

Contribuții la modelarea
și optimizarea funcționării
sistemelor senzor-arc
la sudarea cu două sârme
în mediu de gaze protectoare

Teză de doctorat

Ing. Ionel Dănuț SAVU

Coordonator Științific

Prof.Dr.Ing. Dorin DEHELEAN

2002

v.3.343

Contribuții la modelarea
și optimizarea funcționării
sistemelor sensor-arc
la sudarea cu două sârme
în mediu de gaze protectoare

Teză de doctorat

Ing. Ionel Dănuț SAVU

BIBLIOTECA CENTRALA
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"
TIMISOARA

Coordonator Științific

Prof.Dr.Ing. Dorin DEHELEAN

635 952
369 C

2002

Cuprins

Introducere	3
Cap. 1 Sisteme senzoriale de monitorizare și control în procesele de sudare	7
1.1 Generalități	7
1.2 Definierea și clasificarea sistemelor de control al proceselor de sudare	7
1.2.1 Sistemul de urmărire a traiectoriei de sudare	8
1.2.2 Controlul adaptiv al condițiilor de sudare	9
1.2.3 Sistem de urmărire a îmbinării sudate și control adaptiv	9
1.2.4 Monitorizarea procesului de sudare	10
1.3 Structura generală a unui instrument de măsurare cu tehnică de calcul asociată	10
1.4 Considerații generale privind sistemele de achiziție a datelor	11
1.4.1 Componenta unui sistem de achiziție a datelor utilizat în procesele de sudare	11
1.4.2 Tipuri de sisteme de achiziție a datelor	11
1.5 Senzori	12
1.5.1 Definierea și clasificarea senzorilor	12
1.5.2 Senzori liniari și senzori neliniari	14
1.5.3 Senzori cu piesă de contact	17
1.5.4 Senzorii de arc	18
1.5.5 Senzorii electromagnetici	20
1.5.6 Senzorii optici	20
1.5.7 Senzorii de sunet	20
1.6 Traductoare	20
1.6.1 Definiție, fenomene fizice, caracteristici	20
1.6.2 Liniarizarea caracteristicilor traductoarelor	21
1.7 Circuite de condiționare a semnalelor	21
1.8 Convertoare numeric-analogice (CNA)	22
1.8.1 Caracteristici ale CNA	22
1.8.2 CNA în sistemele de distribuție a datelor la sudare	22
1.9 Convertoare analog-numerice (CAN)	23
1.9.1 Caracteristici ale CAN	23
1.9.2 CAN în sistemele de achiziție a datelor la sudare	23
1.10 Circuite de eșantionare și memorare (CEM)	24
1.11 Software de achiziție și analiză a datelor	25
1.11.1 Software pentru interfețe seriale	25
1.11.2 Software pentru interfețe PCIP (PC Instrument Products)	25
1.12 Alegerea tipului de senzor – motivații	28
1.13 Programul experimental și sistemele de sudare și monitorizare utilizate la experimentări	28
Cap. 2 Sudarea cu două sârme în mediu de gaze protectoare	36
2.1 Caracteristici generale	36
2.2 Clasificarea variantelor procedurii de sudare cu două sârme în mediu de gaze protectoare	37
2.3 Sudarea cu o sursă de putere și duză de contact comună	37

2.4	Sudarea cu două surse de putere și două duze de contact distincte	39
2.5	Sudarea cu două instalații de sudare standard distincte	41
2.6	Stabilitatea procesului de sudare cu două sârme în mediu de gaze protectoare	42
2.6.1	Distanța dintre cele două sârme	42
2.6.2	Unghiul format de cele două sârme de sudare	44
2.6.3	Unghiul format de capul de sudare cu normala la piesa de sudat	45
2.6.4	Unghiul dintre planul celor două sârme și axa rostului	46
2.7	Sudarea în impulsuri	46
2.8	Sudarea cu două sârme cu caracteristici distincte. Alierea în arc	47
2.9	Sudarea cu două sârme tubulare	48
2.10	Rata depunerii la sudarea cu două sârme	49
Cap. 3	Interacțiunea electromagnetică la sudarea cu două sârme în mediu de gaze protectoare	52
3.1	Modelarea matematică a dezvoltării forțelor electrodinamice ca efect al interacțiunii electromagnetice din zona de sudare	52
3.2	Influența interacțiunii electromagnetice asupra curentului de sudare efectiv	61
3.3	Influența forțelor electrodinamice asupra transferului de metal	71
3.3.1	Fenomene care stau la baza procesului de transfer	72
3.3.2	Topirea electrodului	73
3.3.3	Instabilități ale unui volum de metal topit parcurs de curenți electrici	74
3.3.4	Forțele care guvernează transferul de metal	77
3.3.5	Tipuri de transfer de metal la sudarea MIG/MAG	81
3.3.6	Participarea forței electrodinamice la transferul de metal	84
3.4	Influența interacțiunii electromagnetice asupra funcționării senzorului-arc	96
3.5	Simularea acțiunii forțelor electrodinamice	98
3.6	Controlul forței electrodinamice dezvoltate în timpul sudării	105
Cap. 4	Modelarea și optimizarea traiectoriei capului de sudare	108
4.1	Alegerea modului de oscilare a capului de sudare pentru realizarea senzorului	108
4.1.1	Oscilarea alternativ transversală perpendiculară pe axa rostului	109
4.1.2	Rotirea planului celor două sârme fără modificarea orientării acestuia	110
4.1.3	Rotirea alternativă a capului de sudare în jurul unei axe imaginare situată la jumătatea distanței dintre cele două sârme și conținută în planul acestora	111
4.2	Modelarea matematică a traiectoriilor descrise de capetele de sârme în timpul funcționării senzorului-arc	113
4.3	Optimizarea frecvenței de oscilare a capului de sudare	118
Cap. 5	Modelarea matematică și verificarea experimentală pe modele fizice a variației curentului de sudare	125
5.1	Arcul de sudare și valorile fizice ale caracteristicilor acestuia	125
5.2	Modele de arc	126
5.2.1	Modele de tip “cutie neagră”	127
5.2.2	Modele fizice	130
5.2.3	Parametrizarea arcului electric de sudare	131
5.3	Primul model matematic propus pentru variația curentului de sudare	134
5.4	Al doilea model matematic propus pentru variația curentului de sudare	135
5.5	Modelarea matematică și verificarea experimentală a variației curentului de sudare din timpul oscilării capului de sudare transversal pe rost	136
5.5.1	Reprezentări deterministe	136
5.5.2	Funcții periodice. Serii Fourier	138
5.5.3	Funcții aperiodice. Integrale Fourier	140
5.5.4	Modelarea variației curentului de sudare la oscilarea capului de sudare prin metoda dezvoltării în serie Fourier	140
5.5.5	Modelarea variației curentului de sudare la oscilarea capului de sudare prin metoda asimilării cu o funcție periodică simplă	147
Cap. 6	Procesarea semnalului achiziționat, compararea cu semnalul de referință și corectarea poziției capului de sudare	153
6.1	Analiza modală – considerații generale	153
6.2	Procesarea digitală a semnalelor	154

6.3	Nivel 1: Media variabilă	156
6.4	Nivel 2: Prelucrarea Haar și Fourier a semnalului	163
	6.4.1 Prelucrarea Haar a semnalului	163
	6.4.2 Studiul componentei frecvențiale a semnalului achiziționat	177
6.5	Nivel 3: Stabilirea valorilor de comparare	180
6.6	Determinarea poziției momentane a capului de sudare	180
	6.6.1 Corectarea grafică a valorilor efective ale curentului de sudare cu valorile de referință generate prin metoda descompunerii în serie Fourier	181
	6.6.2 Stabilirea sensului de deviere a capului de sudare	187
6.7	Erori posibile în funcționarea senzorului-arc	194
	6.7.1 Eroarea dată de trecerea celui de-al doilea arc peste metalul depus de către prima sârmă	196
	6.7.2 Eroarea dată de neconformitatea parametrilor geometrici ai mișcării capului de sudare	197
Cap. 7	Program pentru calcularea parametrilor de funcționare a unui senzor-arc la sudarea cu două sârme	199
	7.1 Prezentarea generală a aplicației	199
	7.2 Prezentarea interfețelor și a codului	200
	7.2.1 Forma de start	200
	7.2.2 Forma meniu principal	201
	7.2.3 Forma “Determinarea parametrilor inițiali de sudare”	203
	7.2.4 Forma “Calcul forțe electrodinamice și afișare grafică”	206
	7.2.5 Forma “Corectarea valorilor inițiale ale curentului de sudare”	208
	7.2.6 Forma “Determinarea valorilor de referință”	211
	7.2.7 Forma “Oscilația capului de sudare”	213
	7.2.8 Forma “Prelucrarea semnalului achiziționat”	215
	7.2.9 Forma “Compararea valorilor reale cu cele de referință”	217
	7.3 Exemlu de analiză	218
Cap. 8	Considerații finale. Contribuții originale. Perspective	223
Anexe	228	
	A1.1 - Stadiul actual (2000) al sistemelor senzor de urmărire a rostului de sudare conform Raportului Comisiei a XII-a IIW	229
	A6.1 - Scurtarea arcului de sudare pentru diferite distanțe între sârme și diferite unghiuri de rotire a capului de sudare	233
	A7.1 - Codul formei de corectare a valorilor calculate	236
	A7.2 - Codul formei de calcul și prezentare a traiectoriei	248
	A7.3 - Codul formei de comparare a semnalelor	253
Bibliografie		258
Date biografice personale		

Introducere

Cercetarea științifică în domeniul dezvoltării proceselor și sistemelor de sudare are în prezent trei direcții principale:

- creșterea productivității proceselor de sudare prin:
 - modernizarea și eficientizarea proceselor de sudare utilizate în prezent (dezvoltarea de noi echipamente, noi materiale și noi tehnologii pentru sistemele de sudare implicate în sistemele de producție);
 - dezvoltarea de noi procedee de sudare și de materiale avansate, cu rată mare de depunere, dedicate acestora;
 - mecanizarea, automatizarea și robotizarea sistemelor de sudare.
- reducerea volumului și a numărului de imperfecțiuni de material detectabile în îmbinările sudate;
- introducerea managementului electronic în sistemele de sudare.

Aceste direcții de cercetare nu sunt izolate ci se întrepătrund, rezultatul fiind eficientizarea și flexibilizarea proceselor de sudare implicate în fluxurile de fabricație.

Aplicarea rezultatelor cercetării implică o serie de costuri pe care producătorii de structuri sudate și le pot permite sau nu. Înlocuirea integrală a unui sistem de sudare din cadrul fluxului de fabricație înseamnă cheltuieli cu dotarea și cheltuieli cu timpul aferent transformării respective. Din acest motiv majoritatea producătorilor de structuri sudate apelează la modernizarea sistemelor de sudare existente, principalele modificări fiind achiziționarea de echipamente moderne comandate de microprocesor, adoptarea de noi tehnologii bazate pe materiale de sudare moderne, mecanizarea și automatizarea proceselor de sudare. Deși este mai ieftină și mai rapidă, totuși și această acțiune de modernizare presupune o serie de acțiuni complexe care necesită conceperea și fabricarea de echipamente și dispozitive speciale.

Prezenta lucrare își propune rezolvarea unei vechi probleme legate de automatizarea și robotizarea proceselor de sudare și anume urmărirea rostului de sudare.

De-a lungul timpului, acestei probleme i s-au găsit soluții mai mult sau mai puțin ingenioase, mai mult sau mai puțin ieftine [6], [32], [33], [65], [75], [81], [82]. În prezent, pentru sudarea cu arc electric, cele mai uzuale sisteme de urmărire a rostului sunt sistemele senzor-arc, sistemele video și sistemele laser. Fiecare dintre acestea prezintă avantaje și dezavantaje în funcție de situația dată în care sunt aplicate. La numărul mare de sisteme de urmărire a rostului, dezvoltate pentru sudarea cu arc electric, se poate spune că pentru sudarea clasică MAG cu o sârmă, problema este rezolvată. Nu același lucru se întâmplă în cazul sudării cu două sau mai multe sărme.

Configurația unui sistem de sudare MAG cu două sărme, [13], [63], [67], [69], [70], este sensibil diferită de configurația unui sistem clasic. Din acest motiv și sistemele de urmărire a

rostului de sudare dedicate acestui procedeu trebuie concepute într-o manieră cu totul nouă, specifică.

Cunoștințele privind sudarea cu două sârme în mediu de gaze protectoare sunt în prezent extrem de limitate. Necunoașterea fenomenelor fizice specifice acestui procedeu au frânat aplicarea sa și recunoașterea locului important pe care îl deține în marea clasă a procedeelor de sudare cu arc electric.

Ideea abordării cercetărilor în domeniul sudării cu două sârme în mediu de gaze protectoare, în România, a aparținut Institutului Național de Cercetare-Dezvoltare în Sudură și Încercări de Materiale (ISIM) din Timișoara, care, începând cu anul 1997, a efectuat primele experimentări de sudare. Cercetările au fost efectuate atât individual cât și în parteneriat cu Institutul de Sudură Schweißtechnische –Lehr und Versuchsanstalt (SLV) din München, Germania, autorul prezentei lucrări coordonând programele derulate în acest sens. Baza materială și documentară a fost asigurată de cele două institute, iar cooperarea cu o serie de personalități din Germania, Marea Britanie, SUA, Olanda și Rusia, din domeniul sudării, a fost asigurată prin întâlniri la conferințe internaționale (în special conferințele anuale ale Institutului Internațional de Sudură (IIW-IIS): 1998 - Hamburg, Germania, 1999 - Lisabona, Portugalia, 2000 – Florența, Italia și 2001 – Ljubljana, Slovenia, dar și conferințele internaționale organizate de către ISIM Timișoara, la toate autorul participând personal), dar și prin contacte via e-mail. Astfel, a fost posibilă descifrarea pas cu pas a secretelor procedurii de sudare cu două sârme.

Pornind cu un studiu documentar cuprinzând titluri ale ultimului deceniu, autorul a fost nevoit să își înceapă propriile experiențe de sudare, preliminar, de la studiul stabilității procesului de sudare. Lipsa de informații legate de sudarea cu două sârme, din literatura de specialitate consultată, a impus pornirea cercetărilor experimentale de la zero, autorului fiindu-i necesare sute de experimentări care s-au derulat pe o perioadă de aproximativ 4 ani. Rezultatele nu au întârziat să apară, astfel că, începând chiar din 1997, autorul a făcut primele expuneri legate de rezultatele obținute, iar în 1999 a prezentat în cadrul Grupului de lucru 212 “Fizica sudării cu arc electric”, al Institutului Internațional de Sudură (IIW-IIS), primul model matematic, modelul interacțiunii electromagnetice din zona de sudare /63/.

Observațiile efectuate în timpul cercetărilor au condus la alegerea unei direcții finale de cercetare pentru întocmirea tezei de doctorat. Pentru încheierea acestui studiu, autorul a fost nevoit să abordeze și domenii mai puțin legate de sudură, cum ar fi, de exemplu prelucrarea digitală a semnalelor și programarea, domenii care își pun amprenta sensibil asupra conținutului tezei.

Pornind de la cele prezentate anterior, lucrarea își propune să dezvăluie o serie de fenomene fizice specifice sudării cu două sârme și influența acestora asupra funcționării senzorilor-arc, utilizați la urmărirea rostului, în timpul evoluției automate a sistemului de sudare.

Autorul, bazat pe experiența a peste 4 ani de cercetări în domeniul sudării cu două sârme în mediu de gaze protectoare, abordează trei probleme specifice sistemelor sensor-arc:

- modul de oscilare a capului de sudare transversal pe rost,
- modelarea semnalului de referință la nivelul etajului de comparare cu semnalul real înregistrat,
- prelucrarea digitală a semnalului real înregistrat în timpul funcționării sistemului sensor-arc.

În aceste direcții autorul urmărește să modeleze și să cuantifice principalele fenomene care influențează variațiile curentului de sudare și transferul de metal în timpul funcționării

senzorului-arc, aceste modele stând apoi la baza construirii semnalului de referință introdus în etajul de comparare.

Pornind de la principala problemă a sistemelor de urmărire a rostului la sudarea cu două sârme și anume poziționarea unui plan (planul celor două sârme de sudare) relativ la o dreaptă (axa rostului), autorul propune trei moduri de derulare a mișcării de scanare a rostului de către sistemul senzor-arc. Efectuând o serie de experimentări de sudare, cu fiecare dintre cele trei moduri propuse, autorul observă avantajele și dezavantajele fiecăruia putând astfel să aleagă și să optimizeze pe cel mai eficient dintre cele trei. Optimizarea a fost efectuată având drept criteriu frecvența de oscilare, în condițiile obținerii unui semnal util prelucrabil și repetabil în condiții similare. Utilizând programul de analiză matematică asistată, MathCad, autorul construiește traiectoria fiecărei sârme de sudare în timpul oscilării capului. Modelul în baza căruia au fost elaborate traiectoriile s-a construit prin compunerea a două mișcări pe care trebuie să le efectueze capul de sudare: o mișcare tehnologică de sudare și o mișcare de rotire în vederea asigurării unei variații continue a lungimilor celor două arce.

Rezultatul acestei mișcări este analizat și prezentat sub forma a două modele matematice ale variației curentului de sudare în timpul funcționării senzorului-arc. Cele două modele construite prin două tehnici diferite, metoda dezvoltării în serie Fourier și metoda aproximării cu o funcție simplă, au fost verificate experimental și corectate prin considerarea influențelor interacțiunii electromagnetice asupra curentului de sudare. Verificarea experimentală a fost însoțită de simulări cu ajutorul unor programe specializate cum ar fi MathCad, MathLab și ANSYS.

Influența interacțiunii electromagnetice asupra funcționării senzorului-arc s-a dovedit a fi pregnantă. De la modificarea direcțiilor celor două arce, cu lungirea acestora și până la modificarea modului de transfer de metal către baie, tot ce ține de fenomenele fizice din zona de sudare sunt modificate de interacțiunea electromagnetică, rezultată în urma alăturării într-un spațiu restrâns a sârmelor de sudare străbătute de curenți de ordinul sutelor de amperi. Autorul descoperă, analizează și descrie astfel, în premieră, un nou mod de transfer specific sudării cu două sârme: *transferul prin scurtcircuitare cu suport electrodinamic*.

Toate modelele matematice create au trebuit modificate în funcție de influența interacțiunii electromagnetice asupra parametrilor implicați în model. Aceste influențe au fost evidențiate experimental construindu-se baze de date cu valorile inițiale și valorile modificate ale parametrilor studiați.

Rezultatele obținute, aceste modele matematice, au fost necesare construirii semnalului de referință care să fie comparat cu variația reală a curentului de sudare.

Variația reală a curentului de sudare are o formă aproximativ sinusoidală, dată de modul de oscilare ales pentru capul de sudare. Diferențele față de o sinusoidă sunt relativ mari, dată fiind existența de perturbatori ai variației lungimilor celor două arce. Pentru a putea avea un semnal util comparabil cu cel de referință, a fost necesară prelucrarea digitală a semnalului achiziționat în timpul sudării. Autorul analizează posibilitățile de prelucrare a semnalului achiziționat construind o metodă compusă din trei etape de prelucrare. Prelucrarea semnalului prin această metodă se dovedește a fi extrem de sensibilă, metoda având elemente din tehnica prelucrării digitale a imaginilor. Astfel, semnalului înregistrat i se aplică un filtru recursiv cunoscut sub numele de metoda mediei variabile, care oferă prima imagine clară asupra formei unde de curent. După aplicarea acestei metode, semnalul este curățat prin tehnica Haar, iar cu ajutorul funcției discrete Fourier i se extrage componenta frecvențială în vederea comparării ei cu frecvența de oscilare a capului de sudare.

Astfel prelucrat semnalul poate fi comparat cu semnalul de referință.

Dezvoltările introduse de modelele și metodele propuse în această lucrare sunt cuprinse într-un program dedicat funcționării sistemului senzor-arc. Acest program, construit utilizând platforma Visual Basic înglobează toate procesele de la calcularea traiectoriei, a forțelor

electrodinamice, a modelelor propuse, până la momentul efectuării comparației dintre cele două semnale: semnalul achiziționat și prelucrat și semnalul de referință.

Astfel, sunt construite și verificate experimental sau simulate cu ajutorul unor programe specializate toate procesele care stau la baza funcționării senzorului arc. Ca orice sistem fizic, senzorul-arc poate funcționa, în anumite condiții ce ies din limitele normalului unui proces de sudare, cu erori. Erorile sunt introduse de anumiți factori perturbatori ai căror efecte nu sunt cuprinse în modelele construite. Din acest motiv, pentru a evita funcționarea cu erori care să afecteze procesul de control al poziției capului de sudare în rost, autorul prezintă principalii factori perturbatori și influența acestora asupra funcționării senzorului arc.

Programul experimental menit să verifice și să confirme sau să infirme modelele propuse a constat, printre altele, în efectuarea a peste 450 de înregistrări ale parametrilor de sudare și a peste 40 de înregistrări video ale arcelor de sudare. Derularea acestui program experimental nu ar fi fost posibilă fără ajutorul colegilor de la Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare în Sudură și Încercări de Materiale (ISIM) Timișoara și al colegilor de la institutul Schweißtechnische –Lehr und Versuchsanstalt (SLV) GmbH München, cărora autorul le mulțumește pentru sfaturile lor și pentru bunăvoința și răbdarea de care au dat dovadă în cursul derulării acestui program experimental.

Existența acestei lucrări dovedește (pentru a câta oară?) că un sistem de urmărire a rostului, oricât de simplu și de primitiv ar fi, are în spatele său ani de muncă, ani de stres, zeci de discuții contradictorii, sute de interpretări ale fenomenelor implicate și, bineînțeles, o mulțime de cunoștințe teoretice.

Forma de prezentare a conținutului lucrării s-a dorit a fi una simplă, cu o grafică bogată și adecvată, astfel încât, dacă uneori aparatul matematic se dovedește a fi mai mult sau mai puțin greoi, forma intuitivă a prezentării compensează acest neajuns.

1

Sisteme senzoriale de monitorizare și control în procesele de sudare

1.1 Generalități

Mecanizarea, automatizarea sau robotizarea sistemelor de sudare reprezintă opțiuni viabile pentru dezvoltarea fabricației prin sudare și implicit pentru modernizarea sistemelor de producție. Utilizarea eficientă a unor astfel de sisteme impune echiparea lor cu senzori care să ofere informații cu privire la poziția capului de sudare relativ la rostul de sudare, la dimensiunile rostului și la comportarea băii de metal /18/, /21/, /22/, /42/, /45/, /54/.

Necesitatea acestor informații este dată de existența perturbărilor exterioare, /81/, /82/, care apar în timpul derulării procesului de sudare: erorile de prelucrare a rostului, erorile de asamblare provizorie în vederea sudării, modificarea formei traiectoriei descrisă de îmbinarea sudată, erorile de definiție a traiectoriei care trebuie urmată de capul de sudare, erorile date de deformările dezvoltate în timpul sudării, etc. Pe lângă aceste perturbări, a căror apariție are o frecvență relativ ridicată, trebuie amintite și perturbările care pot fi considerate inerente într-un proces de sudare: lumina puternică a arcului, căldura arcului, stropirile, câmpurile electromagnetice dezvoltate în zona de sudare, îndoirea sârmei de sudare, fluctuațiile vitezei de avans al sârmei electrod, uzura duzelor de contact, încărcarea cu stropi a duzelor de contact, etc., care în orice proces de sudare, în anumite situații, trebuie corectate sau compensate. Eliminarea acestor perturbații este soluția ideală pentru obținerea unui proces stabil, coerent și controlabil cu ușurință /60/.

În practică însă, este imposibilă eliminarea tuturor acestor perturbări. Din acest motiv este necesară utilizarea unor sisteme de monitorizare on-line a proceselor de sudare /38/, /41/, /42/, /44/, /52/, /53/, /55/, /56/, sisteme care să sesizeze aceste perturbații, să determine cantitativ evoluția lor să corecteze abaterile introduse de acestea în procesul tehnologic de sudare. Astfel de sisteme de monitorizare au la bază achiziția anumitor parametri de sudare a căror evoluție evidențiază eventualele perturbații din sistem /25/, /65/.

1.2 Definiția și clasificarea sistemelor de control al proceselor de sudare

Controlarea procesului de sudare pe baza informațiilor obținute de la senzori este definită ca și un sistem de control intern /77/, /78/, /91/. Un astfel de sistem de control poate fi clasificat după domeniul de aplicare /94/ în:

- sistem de urmărire a traiectoriei de sudare;
- control adaptiv al condițiilor de sudare;
- sistem de urmărire și control adaptiv;
- monitorizarea procesului de sudare.

1.2.1 Sistemul de urmărire a traiectoriei de sudare

Acest sistem de control este proiectat astfel încât să obțină informații tri- sau bidimensionale direct sau indirect de la un senzor, controlând astfel locul geometric al punctelor și unghiul pe care îl descrie un cap de sudare atașat unui robot sau unui echipament automat de sudare. Acesta este cel mai obișnuit sistem de control aplicat roboților de sudare sau echipamentelor automatizate de sudare.

Se poate utiliza un singur senzor sau mai mulți pentru a controla traiectoria sudurii, punctul său de început și punctul de sfârșit /48/, /49/, /83/. Când se sudează table de grosime mare în mai multe treceri, acest sistem de urmărire poate detecta poziția fiecărei treceri.

Este posibilă activarea unei funcții de decalare care să determine locul geometric al punctelor trecerii anterioare și prin intermediul acestuia să definească locul geometric al punctelor traiectoriei următoarei treceri.

Sistemele de urmărire a rostului bazate pe fenomenele din arcul de sudare presupun combinarea a diferite elemente și a diferiți factori, conform figurii 1.1. În aceste sisteme, când se încearcă oscilarea capului de sudare în rost (conform figurii 1.2 a), curentul de sudare variază ca în figura 1.2 b. În paralel cu aceasta se urmărește și poziția pe verticală a capului de sudare. Linia îmbinării sudate poate fi urmărită prin procesarea valorilor mărimilor electrice culese de pe ambele laturi ale rostului când capul de sudare are o mișcare oscilatorie.

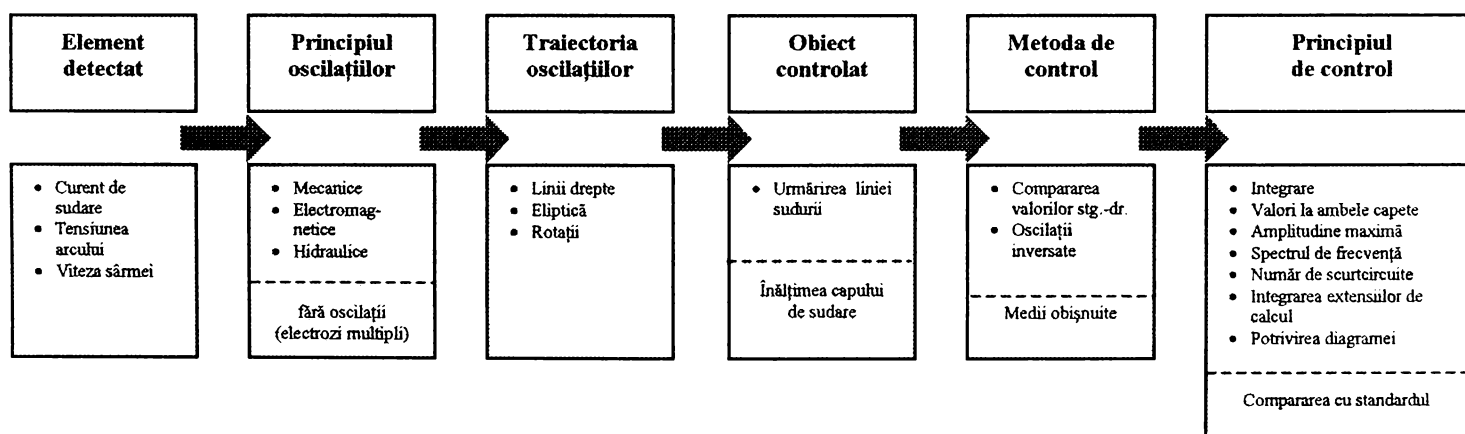


Fig. 1.1 Sistem de urmărire a rostului bazat pe un senzor-arc /94/

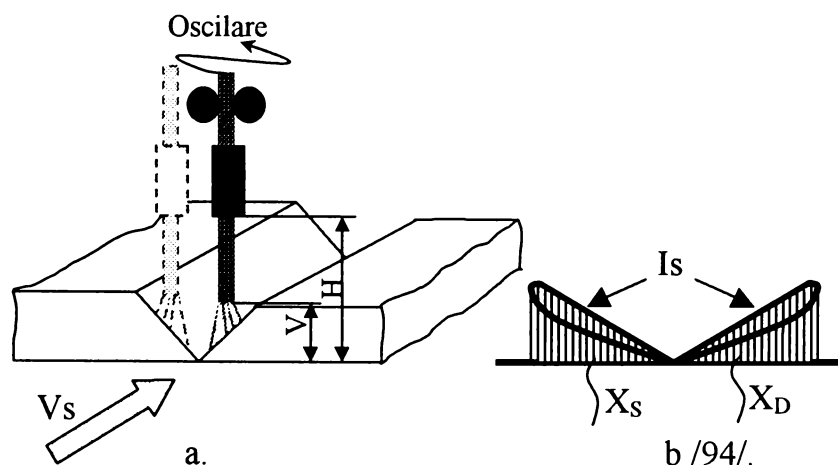


Fig. 1.2 Principiul sistemului de urmărire a rostului cu senzor-arc

Capul de sudare este, în general, forțat să oscileze mecanic. Mișcările oscilatorii sunt liniare, circulare și de rotație. Modificarea lungimii arcului este posibilă și prin alte metode caracterizate prin aceea că nu este necesară oscilarea capului de sudare. Dintre acestea se amintesc:

- devierea arcului cu ajutorul unei forțe electromagnetice;
- devierea arcului cu ajutorul forțelor pinch la trecerea unui jet de gaz pe lângă arc.

În principiu, această metodă de urmărire a traiectoriei de sudare (prin monitorizarea continuă a lungimii arcului) nu permite determinarea punctului de început al sudurii. Din acest motiv, se recomandă /48/, /94/, combinarea acestuia cu un palpator și un senzor de contact al electrozudului. În acest mod operatorul va avea informații și despre punctul din care se începe sudarea.

1.2.2 Controlul adaptiv al condițiilor de sudare

Controlul adaptiv este destinat unui sistem care controlează rezultatele sudării (calitatea îmbinării sudate) în timp real, pe baza informațiilor obținute de la senzori /19/, /40/. Printre parametri care se controlează se numără:

- forma îmbinării sudate (înălțime și lățime);
- forma (aspectul) trecerii de resudare a rădăcinii;
- cantitatea de metal depus.

În această categorie sunt incluse și forma băii metalice sau caracteristicile arcului (formă, sunet, etc.). Elementele de control cuprind: curentul de sudare (I_s), tensiunea arcului (U_a), viteza de sudare (V_s), poziția arcului. În plus, controlul adaptiv implică și un sistem care măsoară direct un obiect de controlat folosind un senzor și un sistem indirect care măsoară temperatura de suprafață a unui obiect de control. Pentru a se realiza controlul adaptiv sunt folosite diferite tehnici de control: controlul digital, controlul fuzzy, teorii moderne de control și inteligența artificială (AI).

Unul dintre cele mai utilizate sisteme de control adaptiv îl reprezintă controlul adaptiv cu senzor pentru fenomenele din arc. Acesta este utilizat pentru controlarea cantității de metal depus. Sistemul este, de asemenea, capabil să calculeze aria transversală a depunerii în funcție de lățimea detectată a deschiderii rostului. Astfel, când lățimea deschiderii se modifică, variația ariei secțiunii transversale este calculată, ceea ce face posibil calculul vitezei de sudare la care se obține o înălțime constantă a îmbinării sudate.

Pentru alte modele, sistemul de control adaptiv include /94/:

- un sistem care controlează viteza de sudare și înălțimea rîndului depus (frecvența numărului de scurtcircuite este asociată cu forma rîndului depus la prima trecere);
- un sistem care detectează modificările formei de undă a curentului și controlează viteza de sudare astfel încât forma rîndului depus să fie menținută constantă;
- un sistem care menține constantă lățimea rîndului depus, controlând curentul de sudare prin detectarea tensiunii dintre materialul de bază și o plăcuță de cupru.

1.2.3 Sistem de urmărire a îmbinării sudate și control adaptiv

Acest sistem de control este o dezvoltare recentă. El poate realiza simultan urmărirea îmbinării sudate și controlul adaptiv al condițiilor de sudare. Acțiunea sa se bazează pe informațiile obținute de la un singur senzor sau de la mai mulți senzori combinați /19/, /39/.

În cazul utilizării unui singur senzor funcționarea este conformă următoarelor:

- îmbinarea sudată și cantitatea de metal depus sunt controlate utilizând metoda de control cu trecere repetată printr-un punct dat, folosind fenomenele din arc;
- urmărirea procesului de îmbinare, a formei îmbinării sudate și a formei rîndului depus, controlul realizându-se prin procesarea unei imagini a distribuției căldurii, utilizând un senzor optic care măsoară o arie.

În cazul utilizării mai multor senzori, urmărirea rostului și controlul formei îmbinării sudate se realizează prin:

- o combinație a unui sensor-arc cu un sensor liniar și unul optic;
- o combinație dintre un sensor-arc și unul de arie (de imagine).

În anexa 1.1 este prezentat stadiul actual al pieței sistemelor de urmărire a rostului, conform unui raport al Institutului Internațional de Sudură (IIW-IIS) /41/.

1.2.4 Monitorizarea procesului de sudare

Sistemele de monitorizare realizează supravegherea procesului de sudare on-line, putând însă fi utilizate în același timp și pentru urmărirea rostului sau controlul neadaptiv al condițiilor de sudare /14/, /18/, /23/, /31/.

Pentru monitorizare se folosesc:

- o cameră TV care creează o imagine /1/, /27/, 32/, /33/, /72/, /79/;
- un microfon care detectează sunetul arcului /24/;
- un sistem de achiziție a parametrilor electrici de sudare /80/;
- o combinație a celor de mai sus /94/.

Componenta hardware a sistemelor de monitorizare și control este cunoscută sub numele de instrument de măsurare cu tehnică de calcul asociată /80/.

1.3 Structura generală a unui instrument de măsurare cu tehnică de calcul asociată

Aparatele de măsurat cu tehnică de calcul asociată sunt aparate (module) care se conectează la un calculator care determină funcționarea aparatului sub controlul unui program /23/, /25/, /39/. Structura unui astfel de aparat este prezentată în figura 1.3.

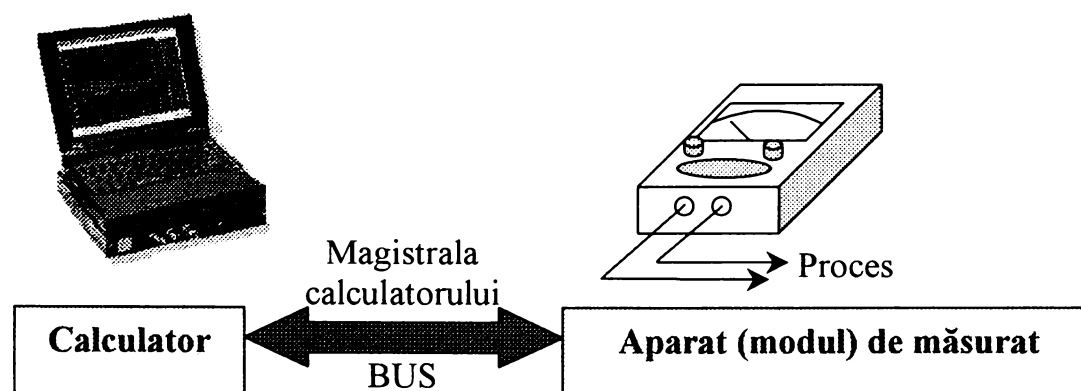


Fig. 1.3 Structura unui aparat de măsurat cu tehnică de calcul asociată

Calculatoarele personale sunt echipamente de mare ajutor în implementarea tehnicilor de măsurare inteligentă, datorită faptului că oferă posibilitatea cuplării direct la magistrala PC-ului a plăcilor utilizator, realizate pentru a asigura diverse funcții. Plăcile de achiziție a datelor fac parte dintre aceste plăci utilizator.

În urmă cu 14 ani National Instruments a introdus conceptul de instrument virtual o dată cu introducerea programului de achiziție, simulare și prelucrare a datelor LabVIEW.

În prezent instrumentul virtual este un concept complex care pornește de la prezentarea către utilizator a unui instrument de măsură demontat și introdus sub forma unei plăci utilizator într-un PC și până la acordarea permisiunii utilizatorului de a-și organiza instrumentul după cum dorește, prin program.

1.4 Considerații generale privind sistemele de achiziție a datelor

Sistemul de achiziție a datelor este principala componentă a unui sistem senzorial de monitorizare și control /34/, /42/, /80/. Fără cunoașterea cu precizie a parametrilor de stare ai unui proces sunt imposibile monitorizarea fiecărei operații în parte, diagnosticarea unei anumite perturbații și corectarea stării respective. Citirea și înregistrarea mărimilor care intervin într-un proces sunt sarcinile sistemului de achiziție a datelor.

1.4.1 Componenta unui sistem de achiziție a datelor utilizat în procesele de sudare

În prezent oferta principală pe piața sistemelor de achiziție o constituie sistemele de achiziție de concepție generală /80/. Acestea sunt concepute și realizate pentru achiziționarea valorilor oricărei mărimi fizice care participă la un proces, putând deci fi adaptate pentru mărimile fizice care intervin în procesele de sudare. Ele pot opera cu un singur parametru, cu doi, patru, opt, șasesprezece sau mai mulți parametri.

În paralel, există echipamente de sudare moderne, care controlează variația parametrilor electrici de sudare cu ajutorul unui microprocesor, care, prin intermediul unei interfețe, poate transmite unui calculator caracteristicile numerice ale acestor variații /39/. Acesta este cel mai simplu sistem propriu de achiziție a datelor, având însă dezavantajul măsurării doar a parametrilor de sudare electrici.

Componenta generală a unui sistem de achiziție a datelor la sudare este următoarea /100/:

- senzori;
- traductori;
- circuite de condiționare a semnalelor;
- circuite de eșantionare și memorare;
- convertoare A/D;
- convertoare D/A;
- sistem de prelucrare numerică;
- software de achiziție, distribuție și prelucrare numerică a datelor.

Mărimile care intervin în procesul de sudare sunt electrice și neelectrice, motiv pentru care, semnalele emise de senzori trebuie convertite în semnale analogice cu ajutorul traductoarelor, semnale care vor fi supuse unui proces de condiționare și vor fi convertite în semnale numerice pentru a putea fi citite și memorate de către placa de achiziție la intervale de timp date. Aceste mărimi sunt de fapt parametrii de sudare definiți sau nu prin specificația procedurii de sudare (WPS).

Conform standardului de definire, SR EN 288, specificația procedurii de sudare prescrie pentru control următorii parametrii de sudare care pot fi achiziționați (se consideră procedeul de sudare cu electrod fuzibil în mediu de gaz protector): intensitatea curentului de sudare, tensiunea arcului electric, viteza de avans al sârmei electrod, viteza de sudare, debitul gazului de protecție, temperatura de preîncălzire, temperatura între straturi, distanța de menținere.

În funcție de necesitățile utilizatorului acești parametri pot fi achiziționați, memorați și prelucrați după dorință.

1.4.2 Tipuri de sisteme de achiziție a datelor

1.4.2.1 Sisteme de achiziție a datelor cu un semnal analogic de intrare

Structura unui sistem de achiziție cu un semnal analogic la intrare, figura 1.4, cuprinde un filtru de intrare de tipul trece-jos, cu funcția de eliminare a erorilor de “aliere” care pot rezulta în urma reprezentării numerice a semnalelor analogice. Semnalul este filtrat, amplificat, eșantionat, memorat și digitalizat pentru a putea fi “înțeles” de sistemul de prelucrare numerică.

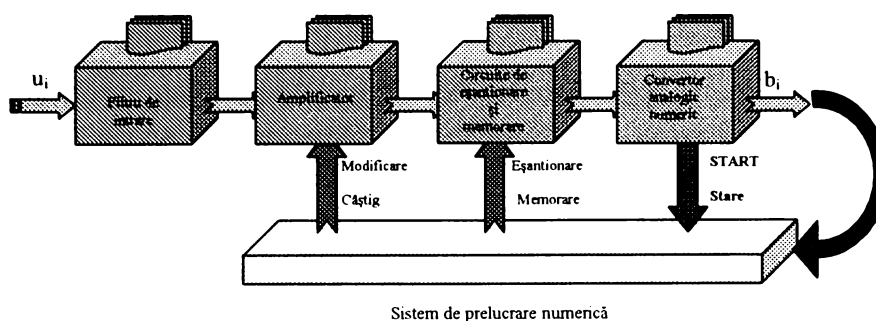


Fig. 1.4 Structura unui sistem de achiziție de date cu un semnal analogic de intrare /80/

1.2.4.2 Sisteme de achiziție a datelor cu multiplexarea semnalelor analogice de intrare

În figura 1.5 este prezentată structura unui sistem de achiziție a datelor cu multiplexarea semnalelor analogice de intrare (multiplexarea constă în conectarea succesivă a intrărilor pentru citire).

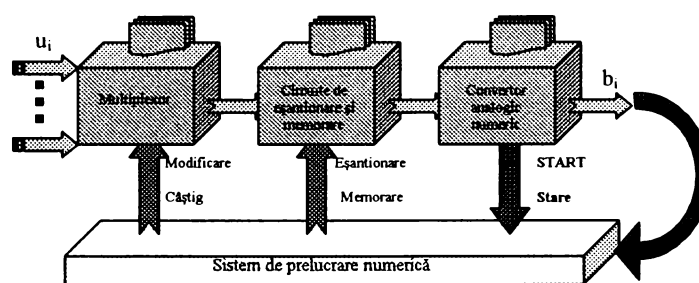


Fig. 1.5 Structura unui sistem de achiziție de date cu multiplexarea semnalelor analogice de intrare /80/

1.5 Senzori

Orice proces de fabricație poate fi privit ca un proces de conversie materială, energetică și informațională. Procesul respectiv trebuie monitorizat continuu pentru a se asigura compatibilitatea dintre ieșirile reale ale sistemului și ieșirile dorite. În cazul operării manuale, procesul este urmărit cu ajutorul simțurilor naturale: văz, auz, miros, gust, tactil. De cele mai multe ori informația obținută prin însumarea informațiilor oferite de aceste simțuri stau la baza luării deciziilor de către operatorul respectiv. În cazul proceselor cu monitorizare automată aceste simțuri trebuie înlocuite de dispozitive specializate, cunoscute sub numele de senzori. De cele mai multe ori înlocuirea simțurilor cu senzori mărește sensibilitatea și precizia receptării unui semnal.

Cuvântul *senzor* provine din latinescul *sentire*, însemnând “a percepe” și este definit ca fiind un dispozitiv care sesizează/detectează modificări ale unui stimul fizic și întoarce către organul de decizie un semnal care poate fi măsurat și înregistrat /81/, /82/, /94/. Cu alte cuvinte, o caracteristică esențială a procesului de detecție este conversia unei forme de energie într-o altă formă de energie.

În practicăm senzorului, ca și dispozitiv de percepție, îi este atașat un circuit pentru transmiterea semnalului de ieșire, rezultând un sistem complex cunoscut sub numele de sistem senzorial.

1.5.1 Definierea și clasificarea senzorilor

Încă din 1982, într-un raport al delegației japoneze la Institutul Internațional de Sudură (IIW-IIS), a fost elaborată o definiție a senzorilor utilizați în domeniul sudării /94/:

"Un detector care este capabil să monitorizeze și să controleze operațiile de sudare prin propriile capacități de detectare a situațiilor interne și externe care afectează procesul de sudare, urmate de transmiterea acestor informații ca și semnal, este numit senzor. Mai mult, dispozitivul de control al acestui senzor, împreună cu senzorul, este acceptat drept un sistem senzor (sistem de control)."

În această definiție termenul de "situații externe" se referă la toți parametrii geometrici ai rostului și pieselor de sudat care se modifică voit sau accidental în timpul derulării procesului de sudare. Termenul de "situații interne" se referă la factori de genul: forma arcului de sudare, forma băii de metal, pătrunderea și alți asemenea parametri specifici procesului de sudare însuși.

În general, fiecare principiu fizic care este apt să ofere informații cu privire la forma și /sau poziția unui obiect, poate sta la baza conceperii și realizării unui senzor. Pentru senzorii de sudare, condițiile speciale de mediu și constrângerile determinate de necesitatea unei anumite eficiențe economice a utilizării dispozitivului-senzor, creează o serie de restricții suplimentare în funcționarea senzorilor. Aceste restricții sunt legate, în principal, de lumina, căldura, fumul, stropirile și câmpurile electromagnetice dezvoltate sau emise inerent în zona de acțiune a senzorului. Din acest motiv și datorită complexității ridicate a procesului de sudare, este imposibilă dezvoltarea unui senzor universal, unic, care să ofere utilizatorului toate informațiile necesare despre procesul de sudare. Pentru utilizator este necesar a se selecta senzorii satisfăcători pentru fiecare mărime din cadrul procesului de sudare, ce se dorește a fi monitorizată.

Se exclud din clasa senzorilor pentru sudarea cu arc electric următorii senzori /94/:

- senzorii utilizați pentru controlul echipamentelor de sudare;
- senzorii utilizați pentru controlul echipamentelor de tip robot sau dispozitiv de manipulare;
- senzorii utilizați pentru înregistrarea și inspecția îmbinărilor sudate.

În general, o clasificare a senzorilor de sudare se poate face în baza principiului de funcționare. În figura 1.6 este prezentată o astfel de clasificare, în concordanță cu /81/.

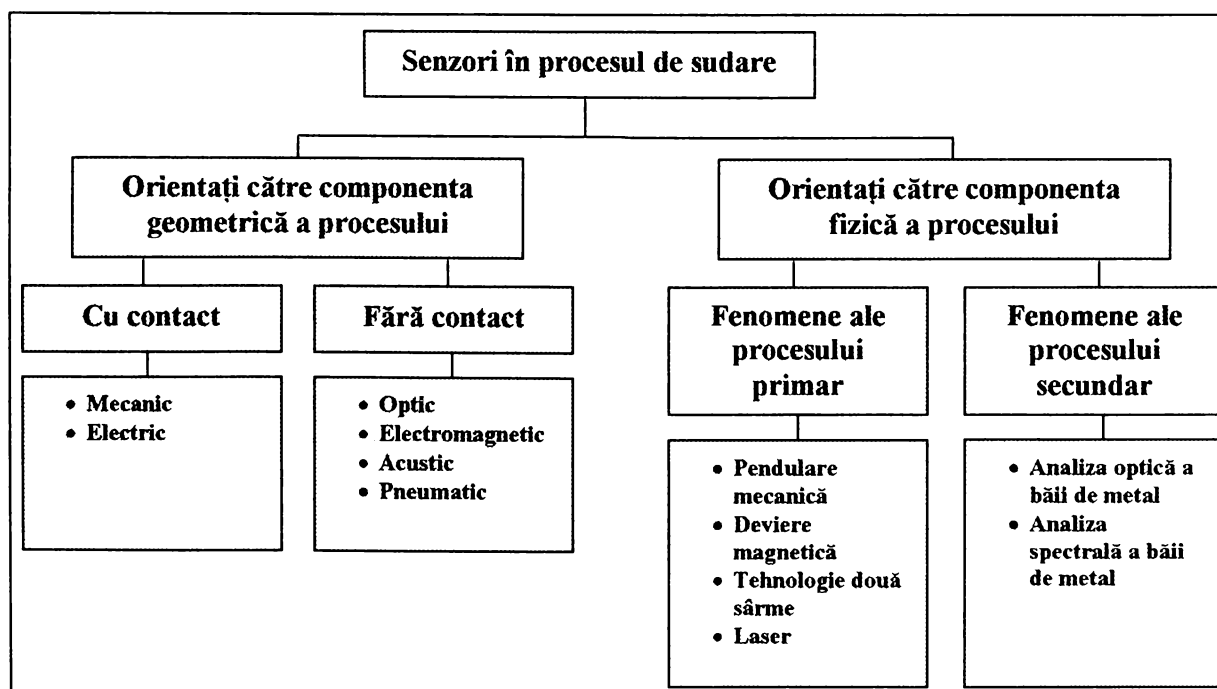


Fig. 1.6 Clasificarea senzorilor utilizați în procesele de sudare

În tabelul 1.1 este prezentată o clasificare generală a senzorilor.

Tabel 1.1 /94/

-	Tip senzor	Configurație bloc senzor
Cu contact	Senzori cu piesă de contact	Micro-comutatoare, potențiometre și transformatoare diferențiale
	Senzori electrod de contact	Tensiune și curent pentru detectare prin contact cu aplicație la electrozii de wolfram sau la sârma de sudare
	Senzori de temperatură	Termocupluri, termistori, foto-termometre, termometre cu infraroșii
Fără contact	Senzori-arc	Curent de sudare, tensiunea arcului, viteza de avans al sârmei electrod, număr de scurtcircuite, număr de vârfuri de curent, anomalii
	Senzori electromagnetici	Detectoare de curent, dispozitive Hall de detectare magnetică
	Senzori optici	Senzori de punctare (fototranzistori și fotodiode), senzori liniari (CCD, MOS și PSD) și senzori de zonare (imagine) (CCD, MOS, ITV și PSD)
	Senzori de sunet	Presiune sonoră variabilă sau senzori pentru detectarea ultrasunetelor.

Acești senzori trebuie să îndeplinească o serie de condiții, dintre care se amintesc:

- menținerea constantă a parametrilor precizați de către specificația procedurii de sudare (WPS – SR EN 288);
- insensibilitatea la alte perturbații apărute în proces;
- durabilitate / fiabilitate corespunzătoare;
- costuri reduse și mentenanță facilă;
- gabarit și greutate reduse;
- domeniu larg de aplicabilitate.

1.5.2 Senzori liniari și senzori neliniari

1.5.2.1 Senzori liniari

Un sistem senzor transformă o mărime de intrare x într-un semnal de ieșire y . În cazul ideal, transformarea este liniară, desfășurându-se după o lege de tipul:

$$y(x) = y_0 + \frac{\Delta y}{\Delta x} \cdot (x - x_0) \quad (1.1)$$

unde:

- x_0 – începutul domeniului de măsurare
- $x_0 + \Delta x$ – sfârșitul domeniului de măsurare
- Δx – lungimea domeniului de măsurare
- y_0 – semnalul de ieșire corespunzător primei valori a intrării ($y_0 = y|_{x=x_0}$)

Sensibilitatea unui senzor, ε , este definită ca fiind panta caracteristicii într-un punct static de funcționare:

$$\varepsilon(x) = \frac{dy}{dx} \quad (1.2)$$

La senzorii liniari sensibilitatea este constantă și conform figurii 1.7 se poate determina cu relația:

$$\varepsilon(x) = \frac{dy}{dx} = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \text{const.} \quad (1.3)$$

În figura 1.7 sunt prezentate principiul de funcționare al senzorilor și o caracteristică liniară de funcționare pentru mărimea de intrare x și mărimea de ieșire y .

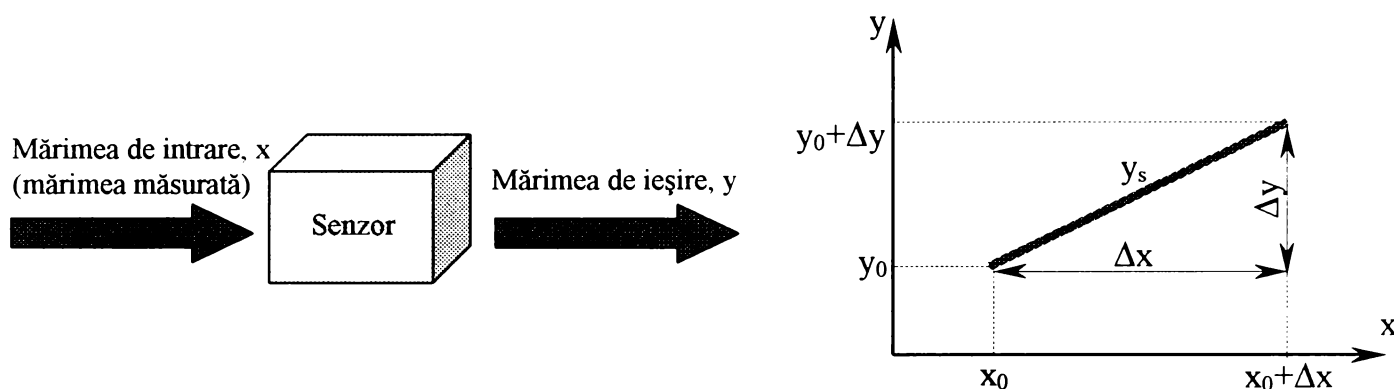


Fig. 1.7 Principiul de funcționare și caracteristica unui senzor liniar

1.5.2.2 Senzori reali

Comparativ cu senzorii liniari, care sunt ideali, senzorii reali sunt caracterizați de către o serie de parametri care redau inexactitățile fizice ale funcționării senzorilor. Acceptați sub forma unor erori de redare [82], acești parametri sunt:

- eroarea absolută, E_{abs} – definită ca fiind diferența dintre valoarea reală oferită de senzor, y_i și valoarea ideală (cea care ar trebui să fie oferită de senzor la ieșire), y_s (figura 1.8):

$$E_{abs} = y_i - y_s; \quad (1.4)$$

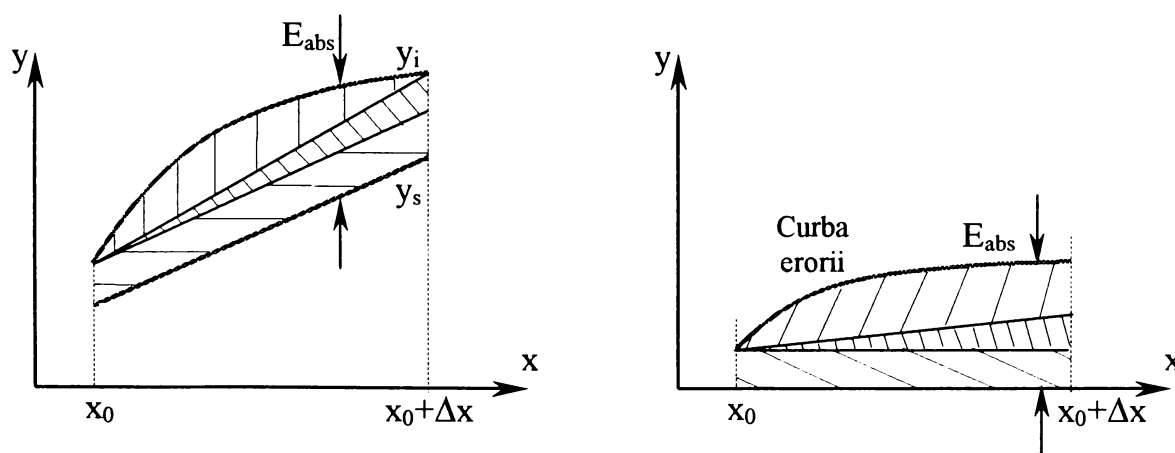


Fig. 1.8 Eroarea absolută

- eroarea relativă, E_{rel} – definită ca fiind raportul dintre eroarea absolută și domeniul de ieșire ideal:

$$E_{rel} = \frac{y_i - y_s}{\Delta y_s} \quad (1.5)$$

- eroarea punctului de nul, E_{nul} – definită ca fiind diferența dintre valoarea ideală și valoarea reală a punctului de început al domeniului de măsurare (figura 1.9):

$$E_{nul} = y_{0i} - y_{0s}$$

- eroarea de înclinare a caracteristicii, E_{panta} – definită ca fiind diferența dintre unghiul ideal și unghiul real al pantei (figura 1.10):

$$E_{panta} = \frac{(x - x_0) \cdot (\Delta y_i - \Delta y_s)}{\Delta x} \quad (1.6)$$

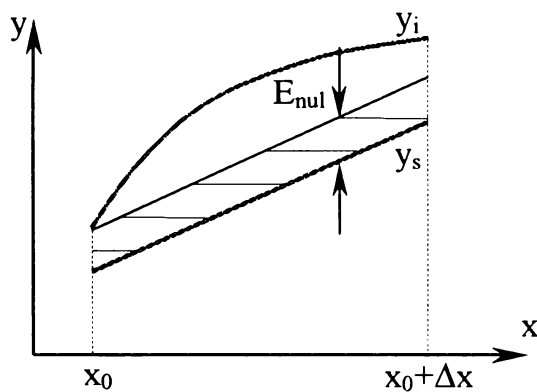


Fig. 1.9 Eroarea punctului de nul

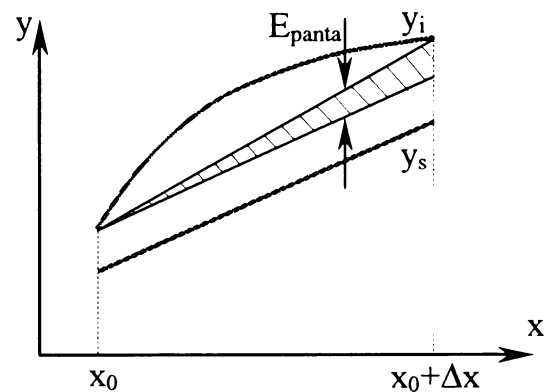


Fig. 1.10 Eroarea de înclinare a caracteristicii

- eroarea de liniaritate, E_{lin} – definită ca fiind diferența dintre forma caracteristicii reale și forma caracteristicii ideale (figura 1.11).

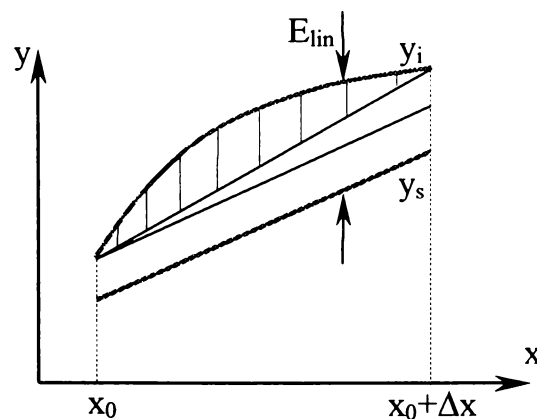


Fig. 1.11 Eroarea liniară

Conform definițiilor prezentate se poate scrie expresia extinsă a erorii absolute:

$$E_{abs} = (y_{0i} - y_{0s}) + \frac{(x - x_0) \cdot (\Delta y_i - \Delta y_s)}{\Delta x} + E_{lin}(x) \quad (1.7)$$

În prezent, dezvoltarea sistemelor hardware și îmbunătățirea algoritmilor de funcționare a senzorilor asigură erori absolute relativ mici, acceptabile din punct de vedere tehnic.

1.5.3 Senzori cu piesă de contact

Senzorii cu piesă de contact sunt dispozitive care detectează modificările de distanțe utilizând o componentă fizică în contact direct cu punctul a cărui poziție se modifică. Diferența de poziție este transformată într-un semnal electric. Componenta de contact poate fi de mai multe tipuri, conform figurilor 1.12 a și b.

• Senzori electrod de contact

Senzorii electrod de contact detectează modificările de curent sau tensiune când electrodul sau sârma de sudare și componentele de sudat sunt în contact (figura 1.12 c). Aceste modificări sunt transformate în semnale analogice putându-se obține coordonatele punctului de contact relativ la un sistem de coordonate ale unui robot sau ale unui dispozitiv automat.

• Senzori de temperatură

Acești senzori sunt utilizați pentru controlul adaptiv al condițiilor de sudare în vederea optimizării formei îmbinării sudate. Temperatura zonei de sudare sau a zonelor învecinate poate fi determinată utilizând un termometru de contact (termocuplu) sau un termometru fără contact (termometre cu fascicul de lumină sau termometre cu infraroșii).

În figura 1.13 sunt prezentate principalele tipuri de termometre utilizate în procesele de sudare și domeniile de temperatură la care pot fi aplicate, /81/, /94/.

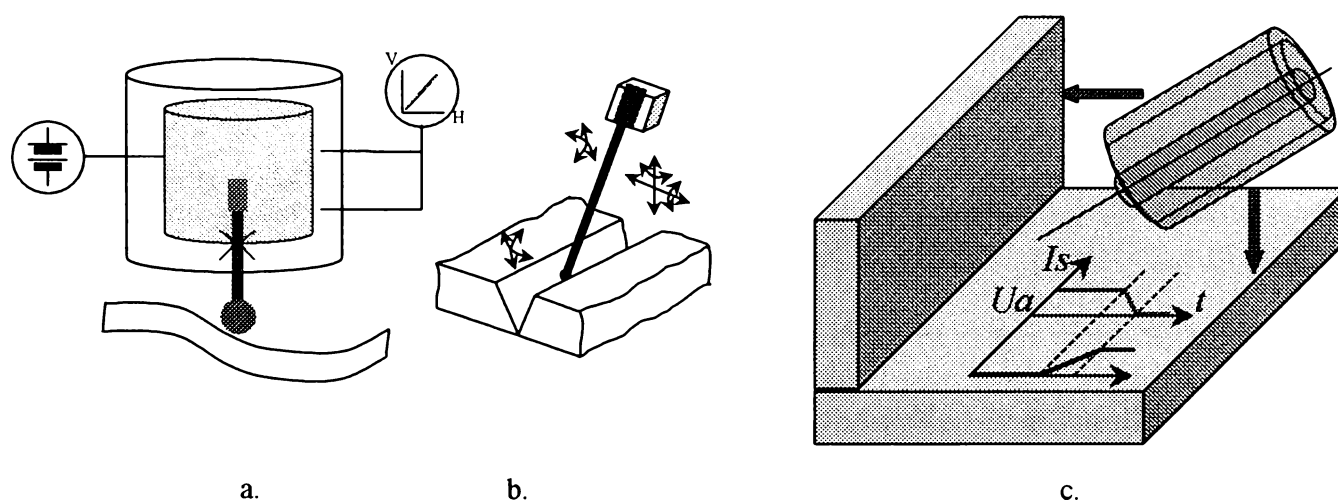


Fig. 1.12 Senzori cu piesă de contact

- Transformator diferențial – 1 grad de libertate
- Senzor de contact – 2 grade de libertate
- Senzori electrod de contact

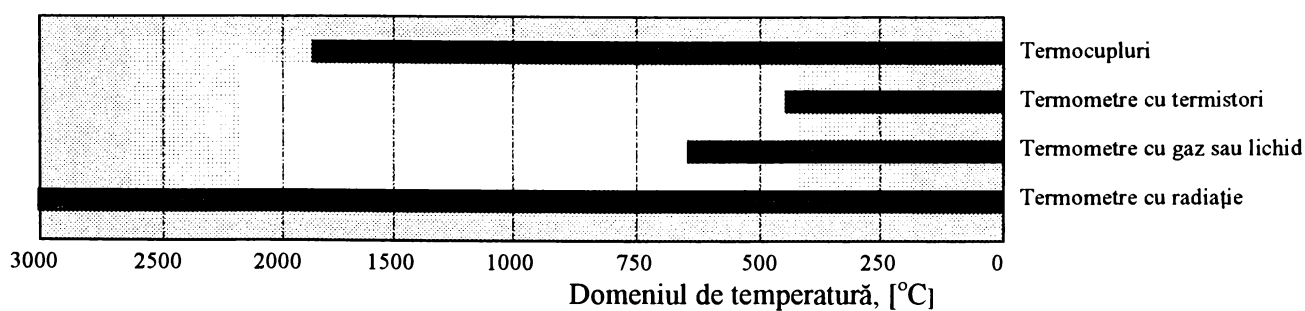


Fig. 1.13 Domeniile de temperaturi la care sunt utilizate termometre în practica proceselor de sudare /94/

635.952
369 C

1.5.4 Senzori-arc

Făcând referire la clasificarea din figura 1.6, senzorii-arc sunt senzori orientați către fenomenele procesului primar de sudare. Acest tip de senzor utilizează caracteristicile electrice ale arcului de sudare în ideea determinării distanței dintre duza de contact electric a capului de sudare și piesa de sudat.

În figura 1.14 este prezentată caracteristica statică a arcului la sudarea în mediu de gaze protectoare cu electrod fuzibil, utilizându-se o sârmă din oțel slab aliat cu conținut scăzut de carbon /94/.

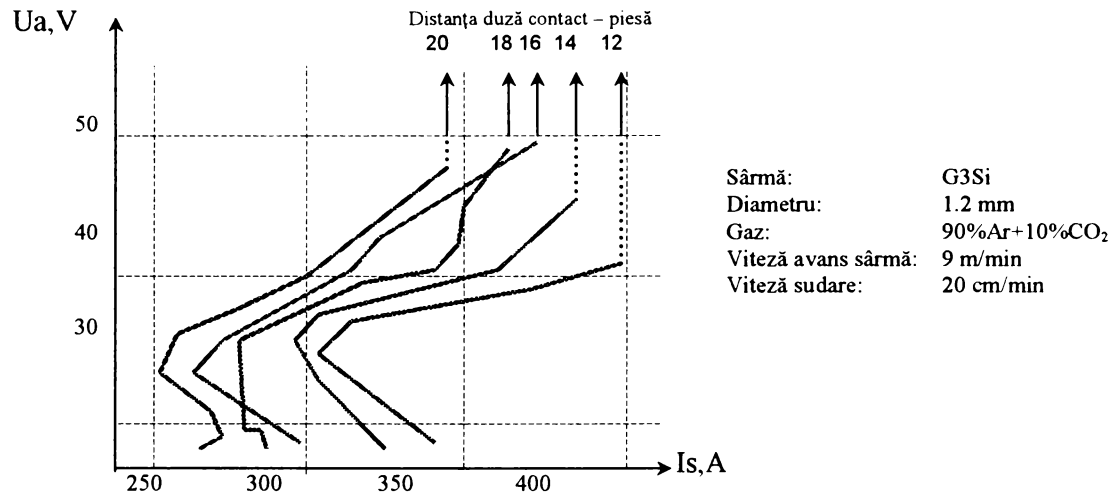


Fig. 1.14 Caracteristicile arcului de sudare în mediu de gaze protectoare cu electrod fuzibil

În general, la sudarea cu arc electric, rezistența ohmică din circuitul de sudare este direct corelată cu lungimea arcului de sudare. Depinzând de tipul procedurii de sudare și de caracteristica externă a sursei de sudare, tensiunea arcului și curentul de sudare sunt major influențate de către lungimea arcului de sudare.

După cum se observă din figura 1.14, curentul de sudare va crește când distanța dintre duză și piesă scade. Pe de altă parte, în același timp, tensiunea arcului va avea o ușoară scădere. În figura 1.15 b și c sunt prezentate variațiile parametrilor de sudare la modificarea lungimii arcului, conform figurii 1.15 a.

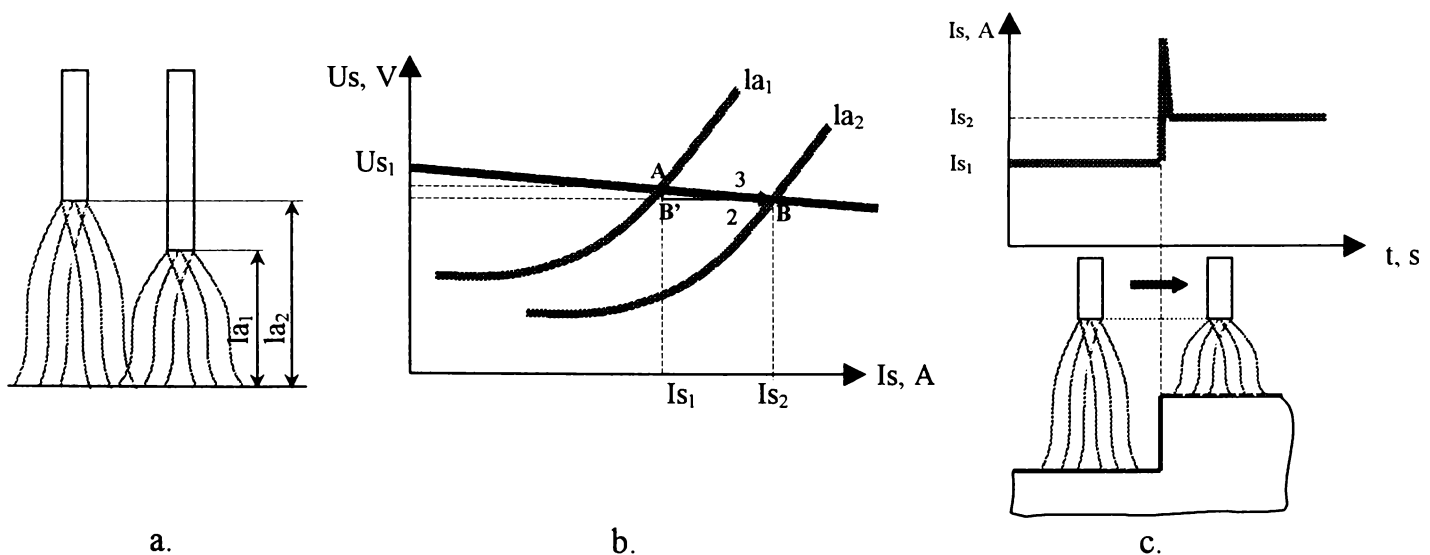


Fig. 1.15 Variațiile parametrilor de sudare la modificarea lungimii arcului

Reacția sursei de sudare la modificarea (micșorarea) lungimii arcului, figura 1.15 a, este următoarea:

- modificarea lungimii arcului conduce la modificarea rezistenței electrice și implicit la modificarea tensiunii coloanei arcului (o scădere ușoară a tensiunii arcului) – săgeata 1, punctul B'; acest punct însă, nu este un punct static de funcționare, deoarece nu se găsește pe caracteristica externă a sursei.

Fiecare poziție a capetelor sârmelor de sudare înseamnă o anumită lungime a arcului de sudare, lungime tradusă printr-un set de parametri de sudare electrice: U_a (tensiunea arcului), I_s (curentul de sudare):

$$R_{arc} = \frac{u_{arc}}{i_{sudare}} = \frac{4 \cdot l_{arc}}{e_0 \cdot \pi \cdot d^2 \cdot D \cdot n} [\Omega] \quad (1.8)$$

unde:

- R_{arc} : rezistența coloanei arcului [Ω];
- u_{arc} : tensiunea coloanei arcului [V];
- i_{sudare} : curentul de sudare [A];
- l_{arc} : lungimea coloanei arcului [mm];
- d : diametrul coloanei arcului [mm];
- D : mobilitatea electronilor [$1/C \cdot mm$];
- n : numărul electronilor;
- e_0 : sarcina electronului [C].

Se observă astfel următoarea dependență variațională:

$$l_{arc} \downarrow \Rightarrow U_a \downarrow, I_s \uparrow$$

- sursa “înțelege” micșorarea lungimii arcului ca pe o dezechilibrare a egalității dintre viteza de topire și viteza de avans a sârmei electrod (viteza de topire este în acest caz mai mică decât viteza de avans al sârmei), egalitate care stă la baza fenomenului de autoreglare internă;
- în consecință, sursa va mări curentul de sudare pentru a mări viteza de topire a sârmei în vederea restabilirii egalității cu viteza de avans al sârmei - săgeata 2, punctul B; punctul B este punct static de funcționare deoarece se găsește la intersecția dintre caracteristica externă a sursei și caracteristica statică a arcului cu lungimea micșorată, l_{a2} .

Această corecție efectuată de sursa de sudare se realizează cu viteză relativ mare, viteză dependentă de dinamica sursei.

Creșterea curentului nu se face direct de la I_{s1} la I_{s2} , deoarece viteza de corectare ar fi prea mică. Din acest motiv, la micșorarea lungimii arcului, pentru a topi surplusul de sârmă, curentul emis de sursă crește brusc pentru un timp de ordinul a 1-3 ms, atingând valori mult mai mari decât cele necesare topirii sârmei în condiții normale (figura 1.15 c).

Această creștere a curentului nu afectează din punct de vedere tehnologic procesul de sudare, deoarece este relativ scurt, inerția termică permițând astfel de intervenții fără a fi afectate forma, dimensiunile și calitatea îmbinării sudate.

Utilizând această variație a parametrilor electrice de sudare la modificarea lungimii arcului, a fost posibilă realizarea senzorilor-arc, care “percep” modificarea lungimii arcului și o transformă în variații ale curentului de sudare sau tensiunii arcului.

1.5.5 Senzorii electromagnetici

Senzorii electromagnetici sunt utilizați pentru determinarea distanței dintre capul de sudare și componentele de sudat prin excitarea unei bobine înfășurate pe un miez de ferită.

1.5.6 Senzorii optici

Senzorii optici utilizați în procesele de sudare detectează forma rostului de sudare și poziția capului de sudare relativ la rost, scanând zona de sudare cu un fascicul de lumină sau laser din spectrul vizibil.

1.5.7 Senzorii de sunet

Senzorii de sunet sunt de două tipuri: senzori care recepționează cu ajutorul unui microfon din spectrul auditiv zgomotul emis de arcul de sudare și senzori ultrasonici care transmit și recepționează unde ultrasonice.

1.6 Traductoare

1.6.1 Definiție, fenomene fizice, caracteristici

Traductorul este un dispozitiv care realizează, în baza unei anumite legi fizice, transformarea unei mărimi într-o altă mărime de care diferă calitativ sau cantitativ, în scopul facilitării procesului de măsurare.

Pentru a putea realiza această funcție, traductoarele trebuie să îndeplinească următoarele condiții: să prelucreze informația primară, să prezinte o siguranță suficientă în exploatare, să furnizeze un semnal mare de ieșire, cu precizie ridicată și să nu perturbe semnalul de măsurat, să permită alegerea domeniului de măsurare și reglarea sensibilității, să admită o anumită suprasarcină pe o perioadă relativ lungă, să nu fie influențat de perturbațiile ce intervin în procesul de convertire, să aibe legături simple de intrare-ieșire (I/O), să fie proiectat în construcție modulară și să permită interschimbabilitatea, să necesite o reglare și o întreținere facile.

Transformarea unei mărimi într-o altă mărime este un fenomen dependent de existența uneia sau a mai multor forme de energie, traductoarele realizând două tipuri de transformări:

- transformarea directă dintr-o formă de energie în alta – cazul măimilor active, purtătoare de energie (forța, curentul electric, sarcina electrică, etc.)
- modularea unei energii în funcție de un parametru – cazul mărimilor pasive (densitatea, rezistența electrică, inductivitatea, etc.).

Principalele fenomene fizice sau dispozitive care stau la baza conceperii traductoarelor, sunt prezentate în tabelul 1.3 /80/.

Tabelul 1.3

I / O	Mecanică	Electrică	Termică	Magnetică	Chimică	Radiantă
Mecanică	Angrenaje	Ef. piezorezistiv	Frecare	Magneto- stricțiune	Emulsie fotosensibilă	Fotoelastici-tate
Electrică	Piezoelectricitate	Tranzistor	Ef. Peltier	Solenoid	Galvanizare	L.E.D.
Termică	Dilatare- Contrație	Ef. termoelectric	Schimbător de căldură	Ef. Curie	Sinteză	Radiație infraroșie
Magnetică	Electromagnet	Ef. Hall	Modificare histerezis	Circuit magnetic	Lichide magnetice	Ef. Faraday
Chimică	Explozie	Ef. Chim.-voltaic	Ardere	-	Reacție chimică	Substanțe fotoemise
Radiantă	Presiunea luminii	Fotodiodă	Încălzire cu infraroșu	Saturare	Fotografie	Filtru de interferență

1.6.2 Liniarizarea caracteristicilor traductoarelor

În funcție de mărimile care trebuie transformate, caracteristica de transfer a traductorului poate fi liniară sau neliniară. O caracteristică neliniară a traductorului utilizat introduce o serie de probleme începând de la distorsionarea semnalului de transformat până la limitarea posibilității de înlocuire cu un alt traductor. Din acest motiv este necesară liniarizarea acestei caracteristici.

Liniarizarea caracteristicii de transfer se poate efectua prin două metode [80]: intervenind la sursele generatoare sau utilizând circuite de corecție. Se amintesc astfel: liniarizarea cu punte activă, liniarizarea cu dublă reacție, liniarizarea pentru scheme cu amplificator de instrumentație, liniarizarea cu multiplicator, liniarizarea prin aproximarea caracteristicii cu segmente de dreaptă, liniarizarea prin metode numerice, etc.

1.7 Circuite de condiționare a semnalelor

Condiționarea semnalelor reprezintă adaptarea între traductorul de măsurare și circuitele de conversie analog-numerică. Această adaptare poate însemna conversia semnalului electric de la ieșirea traductorului într-un alt semnal electric, atenuarea sau amplificarea semnalului de la ieșirea traductorului. Circuitele de condiționare a semnalelor (figura 1.16) realizează prelucrarea analogică a semnalelor în scopul achiziției.

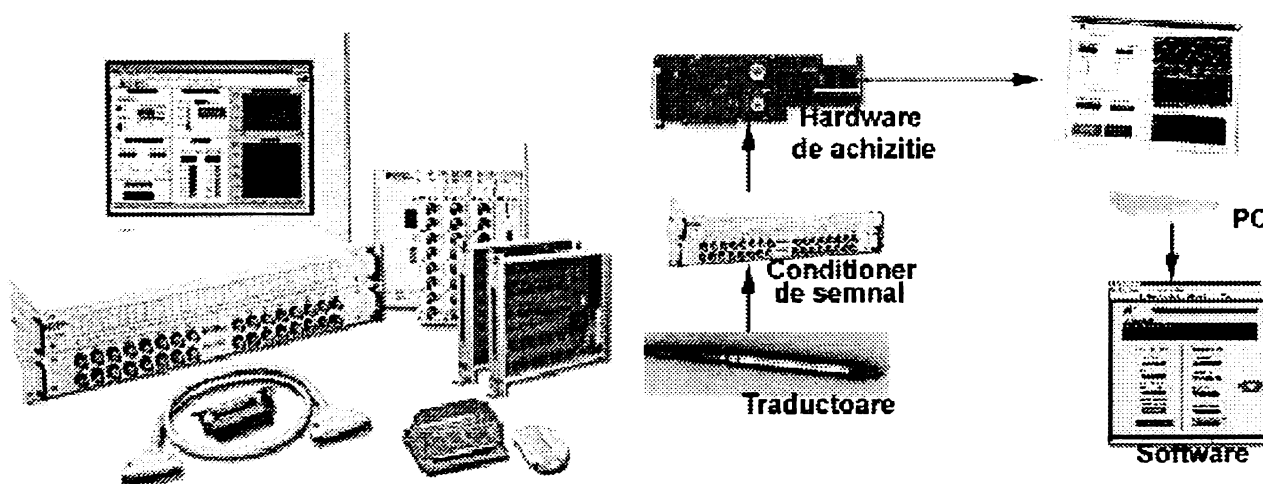


Figura 1.16 Condiționere de semnal și poziția lor în sistemul de achiziție

Condiționerul de semnal reprezintă o componentă importantă a majorității sistemelor de achiziție a datelor și a sistemelor de control, asigurând performanțe ridicate ale sistemelor de achiziție a datelor printr-o varietate de funcții pe care le realizează: amplificarea de semnal, izolare, filtrare, multiplexare și condiționarea directă a traductoarelor.

Principalele funcții pe care le realizează condiționerul de semnal sunt:

- amplificarea semnalului provenit de la traductori;
- filtrarea semnalului: scoaterea zgomotului rețelei de 50-60 Hz;
- izolarea intrărilor: protecția echipamentelor împotriva tensiunilor înalte, conectarea tuturor intrărilor la o singură masă;
- multiplexarea canalelor: citirea pe rând a tuturor canalelor pe care sunt recepționate semnale și distribuția datelor pentru fiecare canal, păstrându-se ordinea de achiziție;
- condiționări digitale: izolare optică, comutări de tip releu.

1.8 Convertoare numeric-analogice (CNA)

1.8.1 Caracteristici ale CNA

Convertoarele numeric-analogice realizează conversia semnalelor numerice în semnale analogice, fiind utilizate în sistemele de distribuție a datelor.

Semnalul de la intrarea unui convertor numeric-analogic are natură numerică, fiind o secvență de variabile binare, b_i , $i=1\dots n$ și dă la ieșire un semnal analogic s_e (curent sau tensiune) în funcție de valoarea numerică a semnalului de intrare, în concordanță cu codul utilizat.

Structura unui convertor numeric-analogic cuprinde:

- circuite pentru generarea tensiunii sau curentului de referință,
- comutatoare electronice comandate de biții semnalului de intrare,
- rețea de rezistențe cu valori ponderate și circuit de însumare a curenților ponderați.

Funcția de transfer a unui CNA se poate scrie sub forma (1.9) /80/:

$$s_e = \frac{K \cdot U_R \cdot D_{CBN}}{2^N} \Rightarrow I_e = \frac{K \cdot U_R \cdot D_{CBN}}{2^N \cdot R} \quad (1.9)$$

unde:

- D_{CBN} - valoarea secvenței de intrare corespunzătoare codului binar natural;
- $K \cdot U_R$ - intervalul de variație a semnalului de ieșire (FSR, Full-Scale Range) și are valori standard: 2,5 V; 5 V; 10 V sau 2 mA;
- I_e - curentul de ieșire al CNA [A];
- R - rezistență de referință [Ω].

În figura 1.17 este prezentată schema bloc a unui CNA bipolar corespunzător codului binar deplasat.

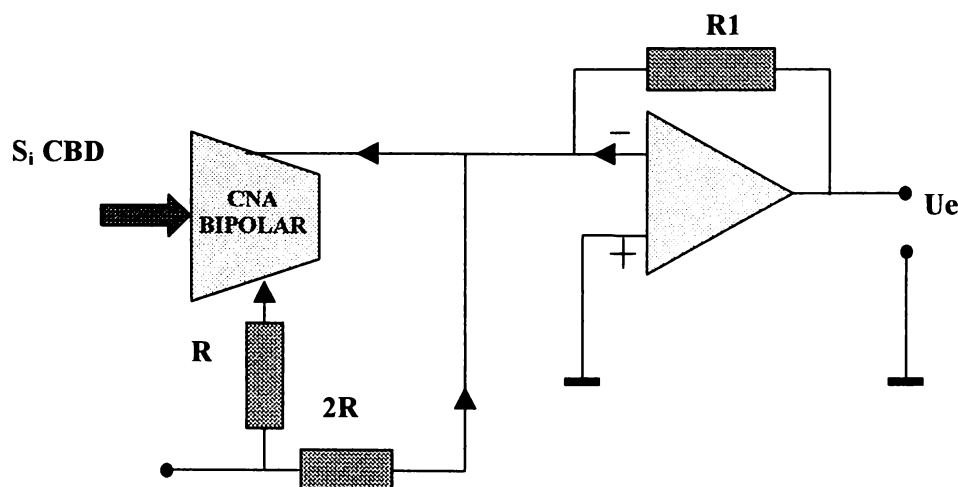


Fig. 1.17 CNA bipolar corespunzător codului binar deplasat /80/

Convertorul numeric-analogic care își păstrează caracteristicile referitoare la erori, pentru un semnal de referință U_r variabil într-un anumit domeniu, se numește CNA multiplicator, în sensul că semnalul de la ieșirea convertorului este funcție liniară de produsul între semnalul de referință U_r și semnalul numeric de intrare s_i , cu valoarea numerică D .

1.8.2 CNA în sistemele de distribuție a datelor la sudare

În cazul sistemelor automatizate de sudare, citirea parametrilor de sudare este însoțită de reglarea acestora relativ la o valoare prescrisă.

Pentru închiderea buclei de reglare, este necesară transformarea semnalului numeric, care a fost obținut prin diferență la compararea semnalului de intrare cu valoarea prescrisă, într-un semnal analogic, care să comande sistemele specifice modificării parametrului care trebuie reglat.

La sudarea MIG/MAG, indiferent că procesul este semimecanizat, mecanizat sau automatizat, este necesară menținerea constantă a vitezei de avans al sârmei. Pentru aceasta se preia semnal de la alimentarea motorului de curent continuu de la dispozitivul de avans al sârmei, microprocesorul sursei compară această valoare cu valoarea prescrisă și semnalul obținut prin diferență, amplificat este convertit în semnal analogic și transmis către sistemul de alimentare. Acesta corectează erorile de avans al sârmei date de diverși factori perturbatori (tub de ghidare murdar, sârma roluită neuniform pe tambur, duza de contact plină de stropi, etc.).

Viteza de sudare este un parametru important al tehnologiei de sudare, prin relația directă cu energia liniară introdusă în piesă. Păstrarea constantă a acestui parametru sau modificarea în anumite puncte, modificare cerută de traseul capului de sudare, este o condiție de care depinde calitatea îmbinării sudate. Pentru aceasta se utilizează un traductor de viteză (tahometru), care determină viteza reală și o transmite microprocesorului sursei. Acesta compară viteza reală cu cea prescrisă și valoarea obținută prin diferență este transformată în semnal analogic și transmisă motorului tractorului de sudare care corectează erorile de deplasare apărute datorită factorilor perturbatori de tipul căilor de ghidare neparalele, deplasate și cu obstacole.

1.9 Convertoare analog-numerice (CAN)

1.9.1 Caracteristici ale CAN

Convertoarele analog-numerice realizează conversia semnalelor analogice în semnale numerice, fiind utilizate în sistemele de achiziție a datelor. Semnalul de la intrarea unui convertor analog numeric are natură analogică, s_i (curent sau tensiune) și dă la ieșire un semnal numeric s_e în funcție de mărimea semnalului de intrare.

Funcția de transfer a unui CAN cu intrare de tensiune, u_i , se poate scrie sub forma /80/:

$$D = \frac{K \cdot u_i}{U_r} \quad (1.10)$$

unde:

- D - valoarea numerică a semnalului de ieșire;
- U_r - tensiunea de referință;
- K - constantă adimensională.

1.9.2 CAN în sistemele de achiziție a datelor la sudare

Convertoarele analog numerice sunt componente importante ale sistemelor de achiziție a datelor, prin faptul că “traduc” microprocesorului semnalele de intrare. Acesta nu poate înțelege un semnal analogic, motiv pentru care este necesară transformarea acestuia într-un semnal numeric.

Poziția CAN în sistemul de achiziție a datelor la sudare este prezentată în figura 1.18. După cum se poate observa în această figură, convertorul primește semnal de la traductoare, prin intermediul circuitelor de condiționare și îl transmite sub formă de semnal numeric microprocesorului computerului care îl prelucrează numeric.

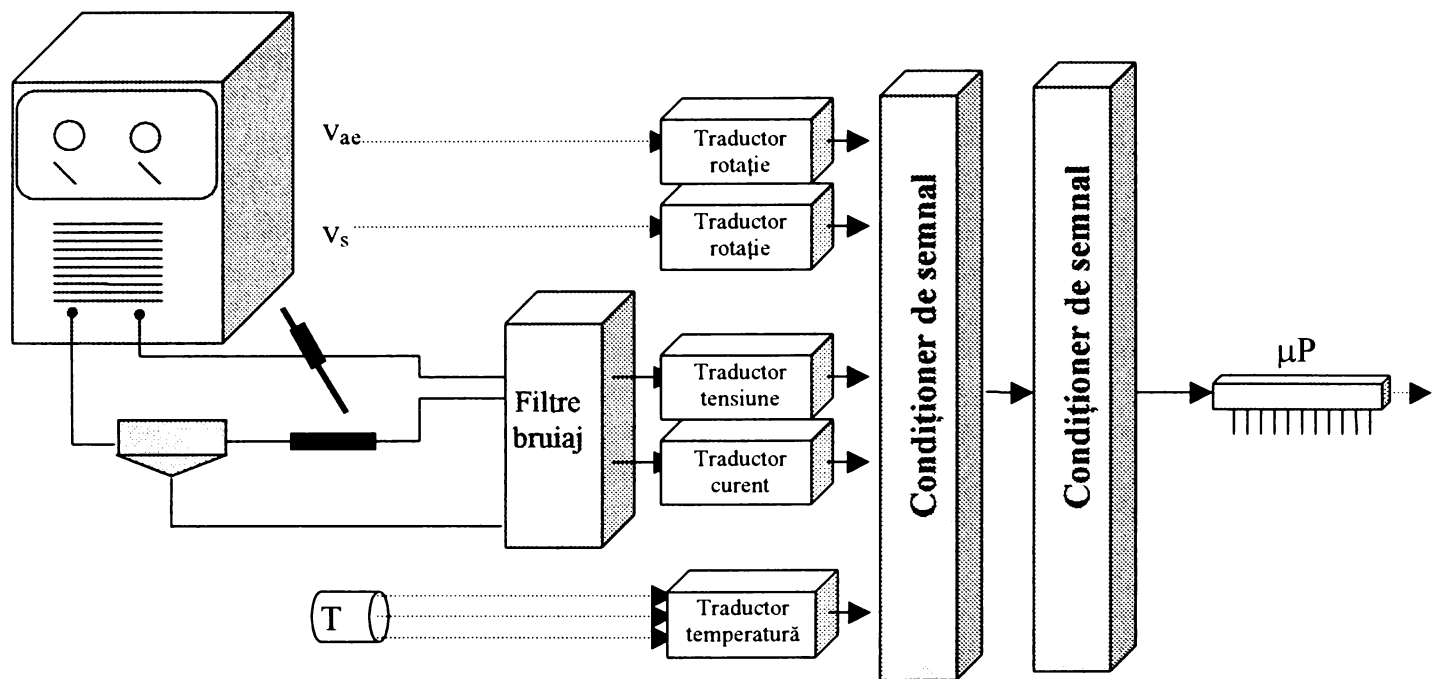


Fig. 1.18 Poziția CAN într-un sistem de achiziție a datelor la sudare

1.10 Circuite de eșantionare și memorare (CEM)

Circuitele de eșantionare și memorare (CEM) prelevează semnalul analogic discret, memorând valorile momentane ale acestuia.

În cadrul unui sistem de achiziție și distribuție a datelor, CEM este conectat între condiționerul de semnal și convertorul analogic-numeric, astfel încât preia o valoare discretă a semnalului, o memorează pe o perioadă egală cu timpul de conversie a CAN, după care preia o nouă valoare discretă și o memorează în vederea conversiei. Prelevarea se face prin intermediul unui multiplexor, dacă există mai multe semnale de intrare, circuitului de eșantionare și memorare revenindu-i sarcina coordonării și memorării modului și a ordinii de prelevare a valorilor discrete. În figura 1.19 este prezentată caracteristica de funcționare a unui circuit de eșantionare și memorare. Eșantionarea semnalului presupune împărțirea sa în bucăți, bucăți care pot fi înregistrate cu o anumită frecvență dependentă de frecvența de lucru a plăcii de achiziție și de frecvența de lucru a computerului utilizate pentru achiziție. În figura 1.20 este prezentat modul de împărțire a semnalului și calculul frecvenței de lucru necesare pentru obținerea unei fidelități ridicate a semnalului prelucrat.

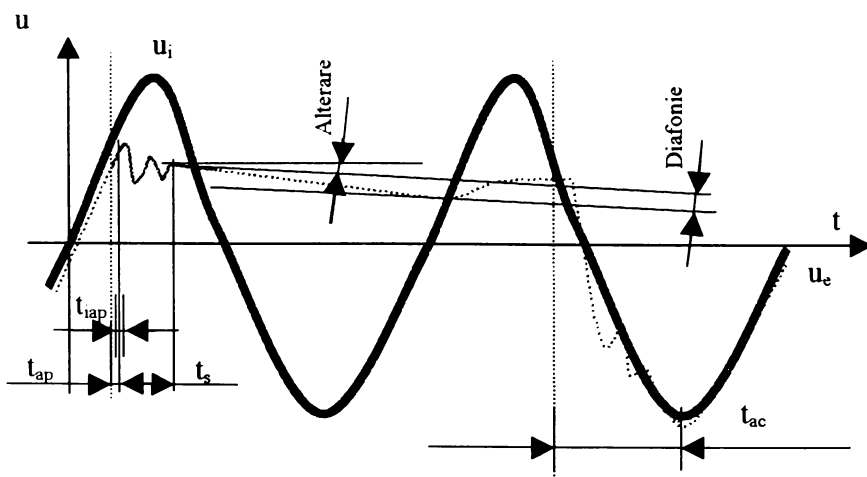


Fig. 1.19 Caracteristica de funcționare a unui circuit de eșantionare și memorare /80/

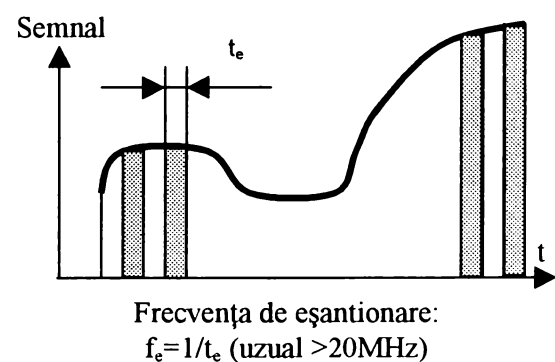


Fig. 1.20 Eșantionarea semnalului de intrare

1.11 Software de achiziție și analiză a datelor

Software joacă un rol vital în dezvoltarea sistemelor automate de achiziție, distribuție și control al datelor /14/. În aceste sisteme este utilizat un software ce acoperă un spectru larg de funcționalități, de la drivere de dispozitive pentru controlul interfețelor hardware specifice, până la pachete de programe de aplicații pentru sistemele de prelucrare numerică a datelor.

Calitatea și flexibilitatea software utilizate pentru dezvoltarea sistemelor de instrumentare existente în prezent, rezolvă necesitățile de orice fel ale utilizatorilor. În ultimul timp nu se mai vorbește despre software de achiziție ca despre o componentă care poate fi oricât de simplă. Software de achiziție, analiză și simulare a datelor, reprezintă, în prezent, baza concepției unui sistem de instrumentare.

În general, un software complet conține o colecție de unelte integrate pentru achiziție, analiză și prezentare (Instrumentation Workbench).

1.11.1 Software pentru interfețe seriale

Software de achiziție poate fi realizat în orice mediu de programare. Unele versiuni de BASIC, însă, nu pot recunoaște viteze de transmitere a datelor mari. Pentru aceasta este nevoie de subrutine care să arate mediului de programare cum să-și definească vitezele mari. O astfel de subrutină, care scrie direct în registrul de pe COM 422, este propusă mai jos:

```
10 OPEN "COM1:1200" AS#1
20 D=INP(&H3FB)
30 OUT &H3FB, 128
40 OUT &H3F8, 2: OUT &H3F9, 0
50 OUT &H3FB, D
```

- Linia 10 deschide comunicarea cu portul respectiv;
- Linia 20 citește registrul de control UART;
- Linia 30 selectează rata de viteză a registrului UART;
- Linia 40 definește rata vitezei la 57,6 Kbaud prin scrierea unui 3 la adresa &H3F8, respectiv definește rata vitezei la 38,4 Kbaud prin scrierea unui 2 la adresa &H3F8;
- Linia 50 re setează registrul de control UART conținând vechile definiri.

Următorul program stabilește comunicarea între porturile standard COM1 și COM2 în vederea transmiterii de date între acestea:

```
10 OPEN "com1:4800" AS #1
20 OPEN "com2:4800" AS #2
30 T1$="Testing COM1 TX/data COM2 RX"
60 *****start subrutina cu rata
vitezei*****
70 DUMMY=INP(&H3F8)
80 OUT &H3F8, 128: OUT &H2F8, 128
90 OUT &H3F8, 2: OUT &H3F9, 0
100 OUT &H2F8, 2: OUT &H2F9, 0
140 OUT &H3F8,DUMMY: OUT &H2F8,DUMMY
150 PRINT #1, T1$
160 INPUT #2, R2$
170 PRINT R2$
190 IF T1$<>R2$ THEN PRINT "Eroare in
transmisie"
210 CLOSE
```

- Linia 10 definește portul standard COM1;
- Linia 20 definește portul standard COM2;
- Linia 30 definește transmisia de testare a porturilor;
- Linia 70 citește registrul de control;
- Linia 80 selectează rata de viteză a registrului;
- Linia 90 definește pentru COM1 viteza de 56Kbaud;
- Linia 100 definește pentru COM2 viteza de 56Kbaud;
- Linia 140 re setează registrul de control;
- Linia 150 transmite datele prin portul COM1;
- Linia 160 recepționează datele prin COM2 și le memorează în registrul R2\$;
- Linia 170 tipărește datele din registrul R2\$;
- Linia 190 mesaj de eroare dacă datele nu au loc în registru;

1.11.2 Software pentru interfețe PCIP (PC Instrument Products)

PCIP sunt interfețe conectabile la un IBM PC/XT/AT sau compatibil IBM având rolul de a funcționa ca și un instrument în cooperare cu PC.

Ele comunică direct cu magistrala de date a PC, datele adunate și procesate fiind prezentate de către PC. Deoarece PCIP nu necesită sursă proprie de alimentare, propriul procesor, sau propriul monitor, ele oferă o soluție la preț redus utilizatorilor.

PCIP-DMMA (multimetru digital) este o interfață care oferă toate funcțiile și performanțele așteptate de la un multimetru digital standard, fără o programare complexă.

Driverul PCIP-DMMA este un fișier I/O independent de limbaj care poate fi încărcat în timpul configurării sistemului (CONFIG.SYS) la fiecare reboot sau printr-o simplă comandă din DOS Prompt.

Device-ul pentru PCIP-DMMA se numește \$DMM.

În continuare este prezentată o secvență de program care definește pentru PCIP-DMMA limita domeniului de citire la 20V și citind o valoare mai mică decât o anumită limită (15V) o afișează, iar pentru o valoare mai mare afișează un mesaj de alarmare.

```

10 OPEN "$DMM" for output as #1
20 OPEN "$DMM" for input as #2
30 ON error 800
40 PRINT#1, "Defineste 20V DC"
50 PRINT#1, "Citeste valoarea"
60 INPUT#2, VOLTS
70 IF VOLTS<=15 GOTO 100
80 PRINT "Atentie a fost depasit domeniul de
masurare!"
90 STOP
100 PRINT "Valoare introdusa=", VOLTS
500 STOP
800 REM Pentru a gasi eroarea, cititi din device
810 INPUT#2, n, A$
820 PRINT A$

```

- Linia 10 deschide device-ul de ieșire;
- Linia 20 deschide device-ul de intrare;
- Linia 40 definește domeniul de măsurare;
- Linia 50 definește pentru DMM modul de citire;
- Linia 60 citește datele și le atribuie eticheta VOLTS;
- Linia 70 face trimitere, în cazul valorilor corecte la comanda de tipărire;
- Linia 820 afișează mesajul de eroare.

PCIP-SCAN (releu de scanare sau multiplexare) oferă posibilitatea citirii unei intrări sau a citirii diferențiale a mai multor intrări. Fișierul driver I/O este independent de limbajul utilizat și poate fi activat prin deschiderea intrărilor, a ieșirilor și trimiterea unei serii de comenzi ASCII care să definească instrumentul. Driver-ul este încărcat o dată cu configurarea sistemului (CONFIG.SYS) sau din DOS Prompt. Următoarea secvență de program definește o rată de scanare de 10 secunde pentru canalul numărul 5.

```

10 OPEN "$SCAN" for output as #1
15 PRINT #1, "Curat"
20 OPEN "$SCAN" for input as #2
30 ON ERROR 800
35 PRINT #1, "Defineste rata 1.0"
40 PRINT #1, "Defineste canalul 5"
800 REM Citire eroare din device
810 INPUT #2, N, A$, B$
820 PRINT "Eroare de scanare", N
830 PRINT "Eroare=", B$
840 PRINT "La linia de comanda", A$

```

- Linia 35 definește rata de scanare;
- Linia 40 selectează canalul;

PCIP-SCOPE (osciloscop digital) oferă posibilitatea eșantionării și reprezentării digitale a unui semnal, funcționând ca și un osciloscop cărui i se pot defini toate funcțiile dorite de către utilizator. Fișierul driver I/O este independent de limbajul de programare și poate fi încărcat la pornire (CONFIG.SYS) sau comandând din DOS Prompt.

Următoarea secvență de program configurează osciloscopul și monitorul pentru un semnal înregistrat.


```

10 OPEN "$SCOPE" for output as #1
20 OPEN "$SCOPE" for input as #2
30 PRINT #1, "Defineste SCOPE off"
40 ON ERROR 800
50 PRINT #1."Defineste A Volt 10 mV"
60 PRINT #1."Defineste A Offset +2.0 V"
70 PRINT #1."Defineste Time 500 ns"
80 PRINT #1."Contact sursa exterioara"
90 PRINT #1."Nivelul contactului: 1.0 V"
100 PRINT #1."Contact poz in mod singular"
110 PRINT #1. "Defineste SCOPE on"
120 PRINT #1. "Monitor on"
130 STOP
800 REM ERROR ...

```

- Linia 10 definește SCOPE-ul pentru citire și scriere;
- Linia 30 Deconectează SCOPE-ul;
- Linia 50 selectează rezoluția pe verticală a canalului A;
- Linia 60 definește curentul de Offset pentru canalul A;
- Linia 70 definește baza de timp pentru monitor;
- Liniile 80, 90, 100 definesc parametrii contactului.

Există software care au scopul de a verifica modul de reacție a interfețelor la recepția unui semnal. Aceste testări sunt absolut necesare înaintea începerii procesului de achiziție pentru a fi siguri că sistemul de achiziție utilizat este potrivit pentru aplicația care se derulează. În continuare este propus un astfel de software. Este conceput în dublu modul pentru verificarea convertorului digital / analog și pentru verificarea convertorului analog / digital. S-a considerat în proiect domeniul de măsurare (-5V...+5V).

```

Activarea convertorului D/A pentru un domeniu cuprins între -5 si 5 V
110 REM ***** Convertor D/A - rutina *****
130 PRINT "VA ROG SA INTRODUCETI VALOAREA TENSIUNII (-5...0...+5):"
140 INPUT V
150 IF V>5 THEN 170
160 IF V<=-5 THEN 190
170 PRINT "VALOAREA INTRODUSA NU ESTE IN DOMENIU!"
180 GOTO 130
190 DIG=INT (V/2*2047)
200 PRINT "VA ROG SA INTRODUCETI NUMARUL CANALULUI DE ACHIZITIE (0...8):"
210 INPUT K
220 IF K>7 THEN 240
230 IF K<=0 THEN 260
240 PRINT "VALOAREA INTRODUSA NU ESTE IN DOMENIU!"
250 GOTO 200
Redarea valorilor masurate pe convertorul D/A
260 REM ***** Redare pe convertor D/A *****
270 DIG=DIG+2048
280 OUT &H302.INT(DIG/256)+K*16
290 OUT &H301.DIG AND &HFF
480 OUT &H300, K+B*16
490 CLS
500 PRINT "VALORI MASURATE DE LA CONVERTORUL A/D"
510 PRINT "CANAL      :",K
520 PRINT "REZOLUTIE  :",A:"BIT"
540 PRINT "APASATI O TASTA PENTRU ABANDON!"
550 D=INP(&300):REM ***** Citire DUMMY
560 REM *****
570 IF INKEY$<>"" THEN END
580 IF (INP(&H300) AND &H1)=0 THEN 570
590 LOCATE 7,1
600 GOSUB 700
610 IF MW=100000! THEN 660
620 PRINT "VALOARE MASURATA:";
630 PRINT USING "+#.####; MW*2/2*A
640 PRINT "V"
650 GOTO 570
Citirea valorilor masurate
699 REM ***** Citire valori masurate *****
700 IF (INP(&H302) AND &H2)<>0 THEN 740
710 MW=(256*INP(&H301))+INP(&H300)
720 IF (INP(&H302) AND &H4)=0 THEN MW=MW*-1
730 GOTO 750
740 MW=100000!
750 RETURN

```

1.12 Alegerea tipului de senzor – motivații

În funcție de aplicația concretă în care este introdus, senzorul utilizat la urmărirea rostului poate fi mai mult sau mai puțin eficient. Astfel, un important pas în realizarea unui sistem de urmărire a rostului la sudare constă în alegerea judicioasă, în baza unor criterii tehnice și economice, a senzorului care se dovedește a funcționa cel mai eficient în sistemul respectiv. Dacă aplicația dată presupune o precizie ridicată, atunci este necesară alegerea unui senzor optic cu fascicul laser dovedit a fi cel mai rapid și cel mai precis senzor utilizat până în prezent la urmărirea rostului. Criteriul economic al alegerii va trebui însă neglijat, deoarece un astfel de senzor este inaccesibil, din punct de vedere al prețului, multor utilizatori. În cazul aplicațiilor cu precizie ridicată utilizarea acestui senzor este binevenită și chiar recomandată în sisteme robotizate. Dacă aplicația dată nu presupune o precizie deosebită, senzorii care se recomandă a fi utilizați sunt senzorii mai ieftini, de tipul senzorului-arc, senzorului magnetic sau cu piesă de contact. Acești senzori sunt accesibili majorității utilizatorilor (anexa A1.1), putând fi utilizați chiar și în sistemele robotizate.

Datorită faptului că procedeul de sudare cu două sârme în mediu de gaze protectoare este un procedeu industrial cu rată mare de depunere, unde precizia de realizare a depunerii este relativ medie, se poate considera că senzorul-arc este senzorul cel mai eficient la utilizarea acestui procedeu. Putând beneficia de existența simultană sau alternativă a două arce, este posibilă realizarea unui sistem complex de poziționare momentană a capului în rost. Configurația fizică a zonei de sudare, specifică procedurii menționat modifică sensibil modul de concepție a unui senzor-arc. Numărul mare de parametri care trebuie controlați, în vederea bunei funcționări a senzorului-arc, ridică probleme noi, inexistente la sistemele standard de sudare. Această provocare a stat la baza alegerii drept obiect al prezentei lucrări dezvoltarea unui senzor-arc dedicat sudării cu două sârme.

Privit în ansamblul său, un senzor-arc este asemănător pentru oricare din procedeele de sudare cu arc electric la care este utilizat /85/, /86/, /87/. Realitatea este însă alta, prin faptul că fiecare procedeu în parte, prin specificitatea sa, influențează funcționarea și configurația senzorului. Prezenta lucrare pune în lumină principalele fenomene specifice sudării cu două sârme care influențează funcționarea unui senzor-arc și oferă recomandări bazate pe studierea unor modele matematice propuse și verificate experimental de către autor.

1.13 Programul experimental și sistemele de sudare și monitorizare utilizate la experimentări

Fiind vorba despre abordarea unui domeniu în mare parte necunoscut, a fost necesară derularea unui amplu program experimental. Acesta a avut drept scopuri principale:

- evidențierea principalelor fenomene fizice dezvoltate în zona de sudare cu două sârme și influența acestora asupra funcționării unui senzor-arc;
- verificarea experimentală a unor modele fizice elaborate și prezentate de autor în cadrul prezentei lucrări.

Pornind de la un volum extrem de redus de informații, au trebuit evidențiate, înțelese și modelate caracteristicile fizice ale arcelor de sudare situate într-o vecinătate relativ restrânsă. Aceste caracteristici determină modul și stabilitatea arderii arcului, modul și stabilitatea transferului de metal, constituindu-se în însăși baza conceperii senzorului-arc. Astfel, modificând parametru cu parametru s-a constatat că, pe lângă parametrii de sudare și materialele de adaos utilizate, un rol important îl joacă și configurația fizică a sistemului format din cele două arce. Din acest motiv programul experimental a fost condus în următoarele direcții:

- evidențierea influențelor diferitelor variante ale procedurii de sudare asupra stabilității arderii arcului și stabilității transferului de metal;
- evidențierea principalilor parametri ai configurației fizice a sistemului de sudare, care influențează stabilitatea arderii arcului și stabilitatea transferului de metal;
- evidențierea existenței forțelor electrodinamice în spațiul celor două arce și influența acestora asupra stabilității procesului de sudare;
- evidențierea creșterii ratei de topire a metalului de adaos și a ratei de transfer de metal datorită acțiunii forțelor electrodinamice în spațiul de arc;
- evidențierea modurilor de transfer de metal specifice sudării cu două sârme pline / tubulare din oțeluri slab aliate, cu două sârme pline din oțeluri inoxidabile austenitice și cu două sârme pline din aliaje de aluminiu (Al-Mg, Al-Si), pentru diferite gaze / amestecuri de gaze de protecție;
- evidențierea dinamicii surselor de putere la sudarea în curent continuu nepulsat și curent continuu pulsant în momentul apariției unor perturbatori externi ai lungimii coloanelor arcelor de sudare.

Rezultatele acestor cercetări au fost prezentate în rapoarte de cercetare accesibile mai mult sau mai puțin publicului. Unele dintre rezultate au fost prezentate în referatele elaborate în faza de pregătire, în lucrări științifice prezentate la conferințe naționale și internaționale sau publicate în reviste de specialitate.

Unele rezultate au fost obținute prin analizarea înregistrărilor video efectuate în cadrul programului experimental. În cazul unor astfel de rezultate, autorul a încercat să preleveze eșantioane de film, să le digitalizeze și să le prezinte în lucrare, pentru ca afirmațiile făcute să poată avea suport justificativ.

Fiind vorba de un domeniu extrem de vast, care acoperă la rândul său o serie largă de subdomenii (fizica arcului, tehnologia sudării prin topire, metalurgie, proiectare și optimizare de echipamente de sudare, etc.), cercetările au fost orientate către fizica arcului, cu aplicabilitate directă în proiectarea și optimizarea senzorilor-arc. Alegerea acestei direcții a fost dictată de observațiile personale ale autorului, observații legate de aplicabilitatea practică a procedurii. Direcția aleasă a impus abordarea multidisciplinară a cercetării, autorul fiind nevoit să atingă și domenii mai mult sau mai puțin legate direct de sudură, cum ar fi prelucrarea digitală a semnalelor și programarea.

Derularea programului experimental a avut loc în laboratoarele Institutului Național de Cercetare-Dezvoltare în Sudură și Încercări de Materiale din Timișoara și în laboratoarele Schweißtechnische –Lehr und Versuchsanstalt Munchen. Standurile experimentale au fost construite diferit de la un laborator la celălalt, în fiecare studiindu-se comportarea unei anumite variante a procedurii de sudare cu două sârme:

- în laboratoarele ISIM Timișoara a fost utilizată varianta cu două instalații de sudare distincte;
- În laboratoarele SLV München a fost utilizată varianta cu surse de sudare distincte și cap de sudare comun.

Sistemele de monitorizare a parametrilor de sudare au fost de asemenea diferite, în funcție de scopul monitorizării. Au fost astfel utilizate două sisteme de achiziție a datelor, unul destinat monitorizării în timp real a parametrilor de sudare cu posibilitate de răspuns, HKS QAS-400 și unul destinat documentării parametrilor de sudare controlat de un software specializat - Q-DOC 9000.

În cazul cercetărilor efectuate la ISIM Timișoara, a fost conceput și executat un dispozitiv de fixare și poziționare a celor două capete de sudare (figura 1.21). Acest dispozitiv a fost montat pe un tractor de sudare Messer Griesheim având posibilități de deplasare cu viteze de până la 200 cm/min.

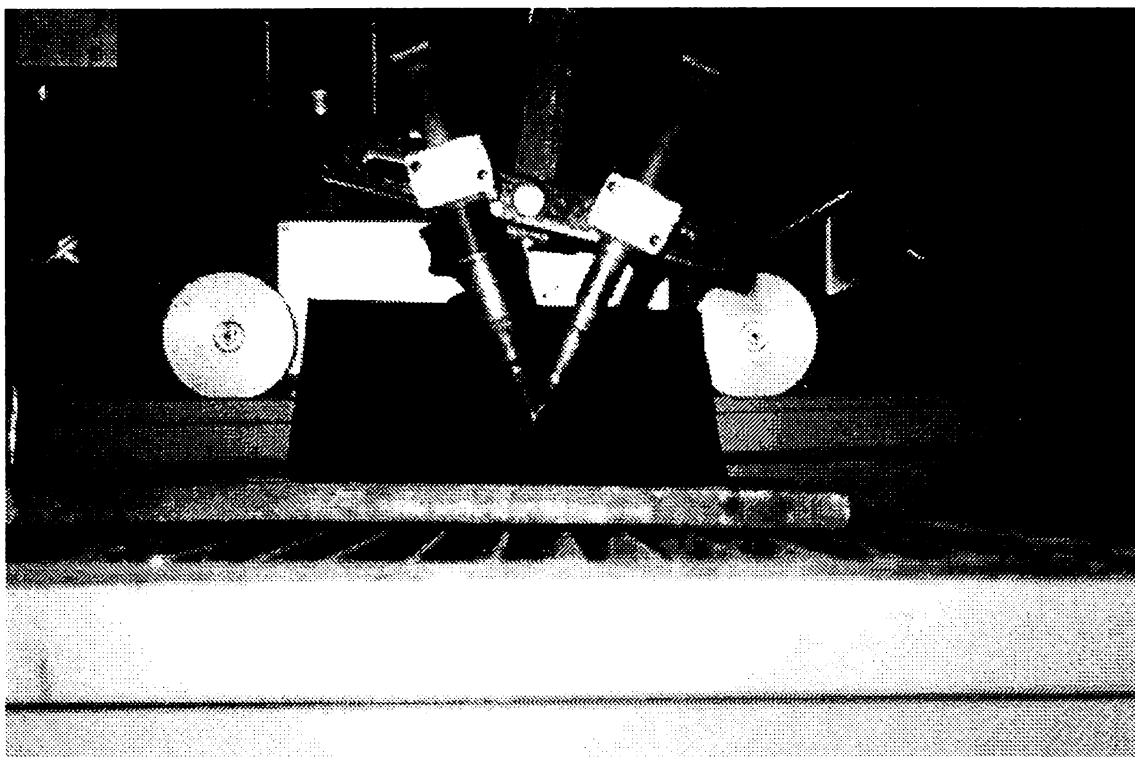


Fig. 1.21 Sistemul de sudare compus din două instalații distincte

Cele două instalații de sudare au fost diferite, EWM High-Speed 500 și Kempomig 500, ambele putând emite curenți de sudare de până la 500 de amperi în condițiile sudării cu curent nepulsat. Cele două instalații au fost utilizate numai în regim nepulsat, diferențele dintre programele lor de comandă făcând dificilă sincronizarea pulsurilor pentru sudarea în curent pulsant.

Monitorizarea parametrilor de sudare s-a efectuat cu ajutorul sistemului Q-DOC 9000.

Q-DOC 9000 este un complex hardware-software dedicat achiziției de date în domeniul sudării. Scopul dezvoltării sale a fost documentarea principalilor parametri ai procesului de sudare: curentul de sudare, tensiunea arcului, viteza de avans al sârmei electrod reală și prescrisă, corecția de tensiune și curentul absorbit de motorul dispozitivului pentru avansul sârmei. Componenta hardware constă într-un sistem simplu de eșantionare a semnalelor digitale oferite de microprocesorul sursei de sudare (figura 1.22). Semnalul eșantionat este prelucrat de către componenta software și oferit utilizatorului în formă grafică sau direct valoric.

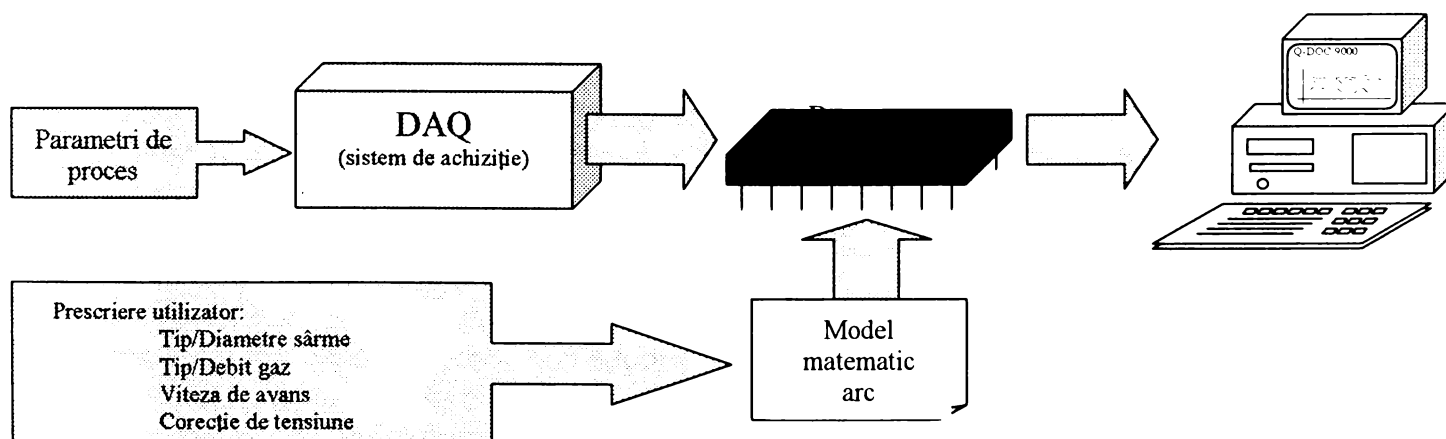


Fig. 1.22 Schema de principiu a sistemului Q-DOC 9000 /14/

În figura 1.23 este prezentat panoul Q-DOC 9000 de afișare a înregistrărilor.

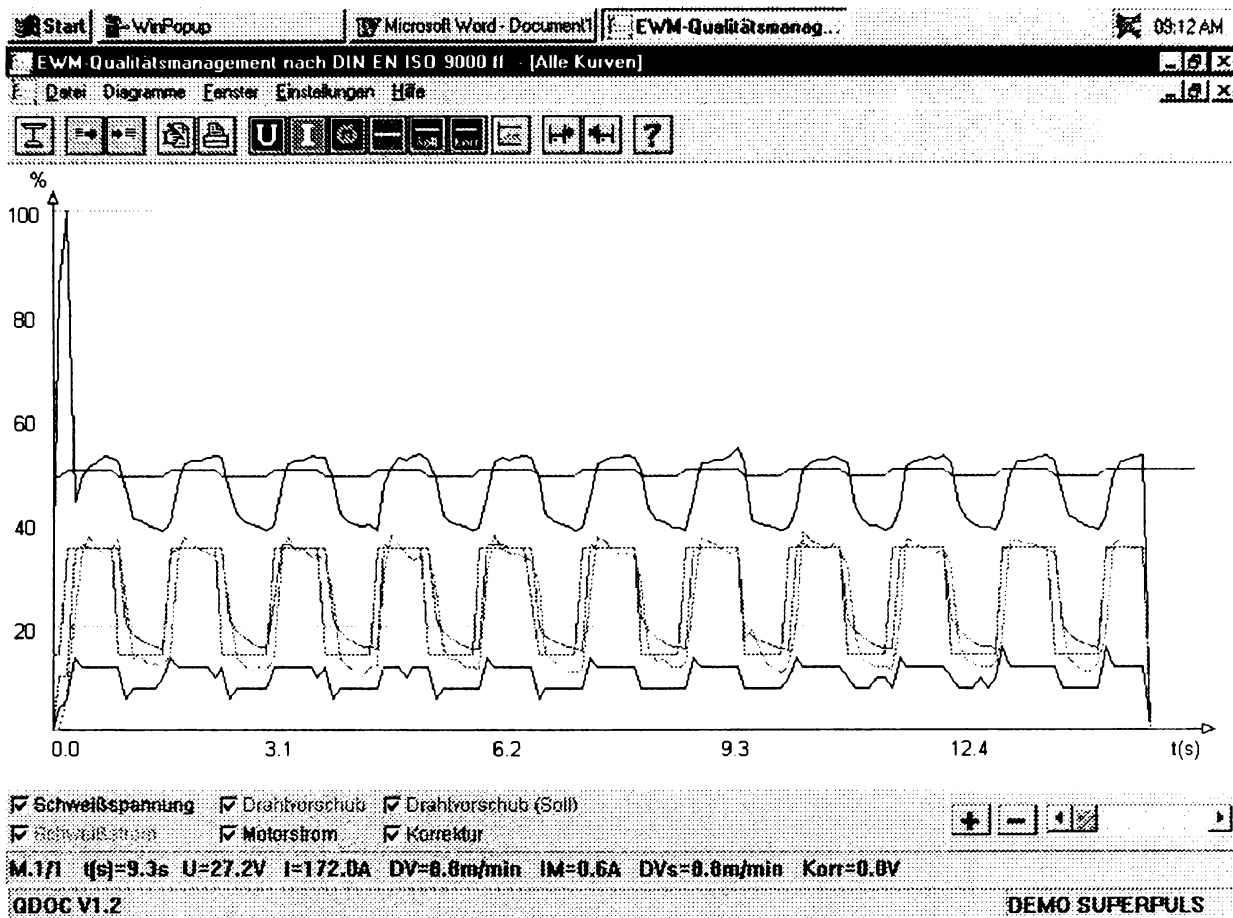


Fig. 1.23 Panoul Q-DOC 9000 de afișare a înregistrărilor

În cazul cercetărilor experimentale efectuate la SLV München, pentru o controlare corespunzătoare a capului de sudare și deci obținerea unor informații reale, absolute, capul de sudare cu două sârme a fost fixat în brațul unui robot de sudare conform figurii 1.24. A fost, de fapt, utilizată o celulă robotizată dedicată sudării cu două sârme în mediu de gaze protectoare. Celula a fost compusă din:

- două instalații pentru sudare în mediu de gaz protector cu electrod fuzibil Cloos Quinto 503 Profi;
- un robot Cloos Romat 310;
- un sistem de comandă dedicat robotului Romat, Rotrol 32 TM.

Cele două instalații au fost utilizate în regim de sudare cu curent pulsant, emiterea pulsurilor fiind sincronizată. Sincronizarea constă în decalarea pulsurilor pe cele două sârme cu o anumită fază. Pentru a putea realiza această sincronizare, dispozitivul acceptă o dependență de tip MASTER-SLAVE între cele două surse de sudare, dependența funcționând după cum urmează: sursa MASTER emite pulsul la comanda dispozitivului de sincronizare; în acest timp sursa SLAVE este în regim de bază a pulsului; după o anumită întârziere prescrisă de utilizator ca și procent din timpul de bază, dispozitivul de sincronizare comandă sursei SLAVE să emită la rândul ei pulsul pentru topirea sârmei.

Comanda procesului a fost efectuată cu ajutorul computerului. Structurând datele prezentate anterior s-a constatat că este nevoie de trei tipuri de comunicare între computer și echipamentul de sudare propriu-zis și anume:

- comunicare prin semnale analogice, (de exemplu pentru valoarea tensiunii pe arcul de sudare traductorul furnizează un semnal analogic);
- comunicare prin trenuri de impulsuri, (așa cum este traductorul pentru viteza de avans al sârmei de sudare);

comunicare prin semnale digitale, (așa cum sunt semnalele de pornire-oprire, semnalele de avertizare, etc..).

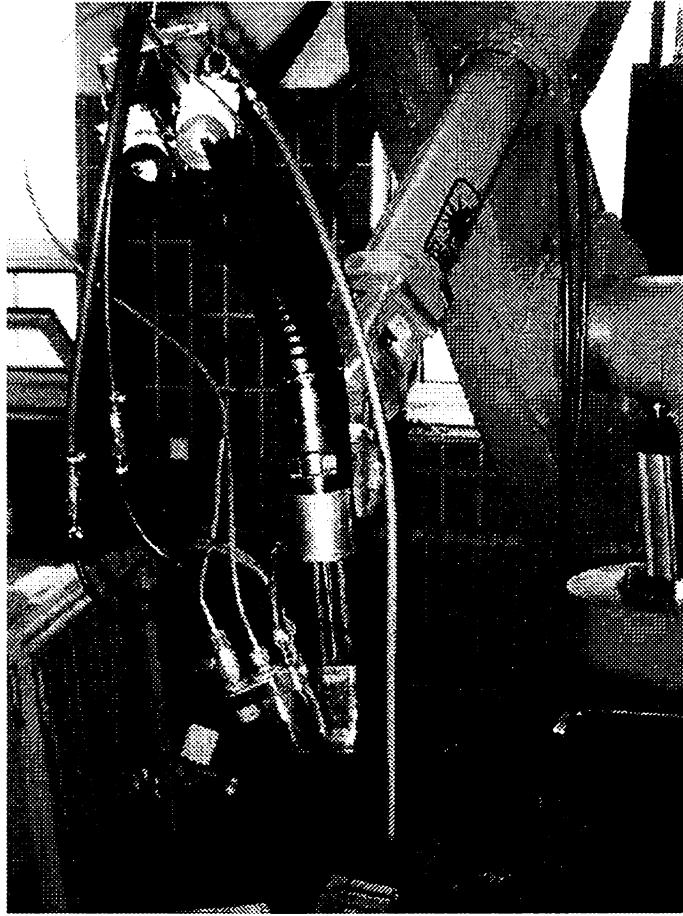


Fig. 1.24 Robotul Cloos Romat 310

Conectarea computerului la sursa de sudare s-a efectuat în acest caz conform schemei din figura 1.25.

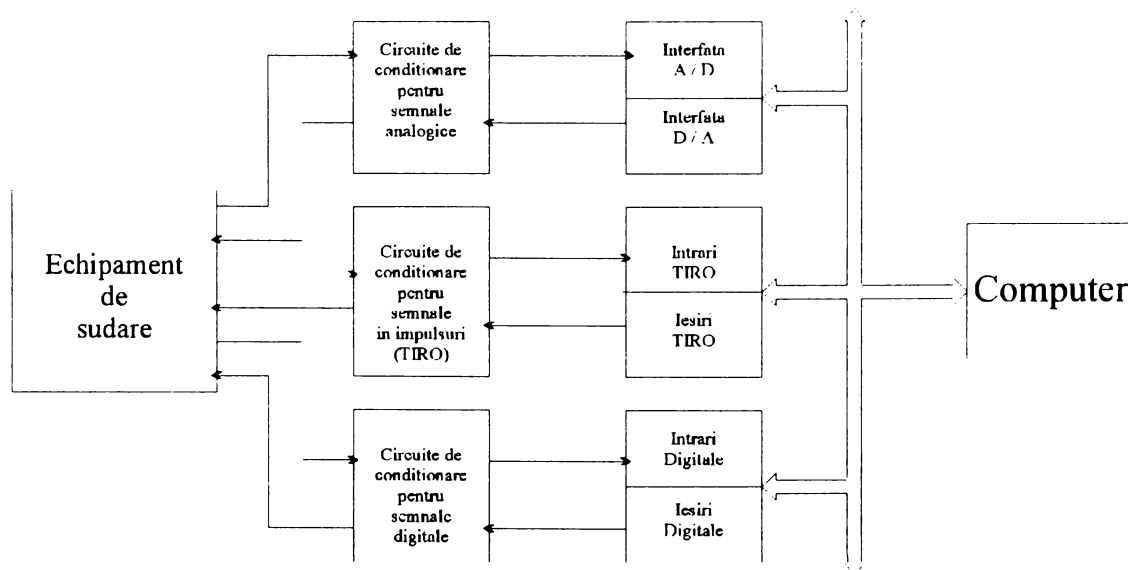
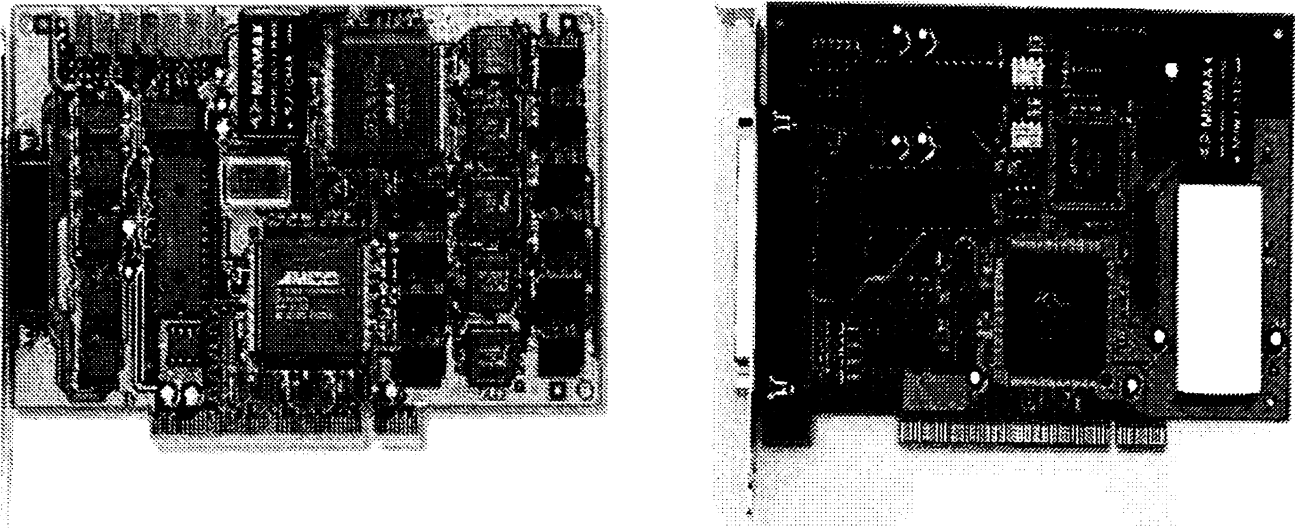


Fig. 1.25 Schema bloc a unității de comandă a robotului.

Interfața analogică a fost compusă din module de tip 8118 / 9118 având 16 canale analogice cu referință masă sau 8 canale analogice diferențiale. Modulul din figura 1.26 a, are funcția de conversie A/D a semnalelor analogice culese din echipamentul de sudare. În schimb interfața D/A (figura 1.26, b) realizează conversia valorilor digitale rezultate din algoritmi de comandă în mărimi analogice destinate echipamentului de sudare. Prin intermediul acestei interfețe se realizează reglarea continuă și independentă a intensității curentului de sudare.

Modulul ISA-TIRO-8CH este destinat achiziției de date privind poziția momentană a capului de sudare. Între traductoarele TIRO de poziție și modulul ISA-TIRO-8CH sunt intercalate circuitele de condiționare (de adaptare). Schemele lor de principiu au fost proiectate cu ajutorul unui program specializat numit OrCad și sunt prezentate în figurile 1.27 și 1.28.



a.

b.

Fig. 1.26 Modulul 9118 PCI (a.) și modulul 6308 PCI (b.) - vedere de ansamblu

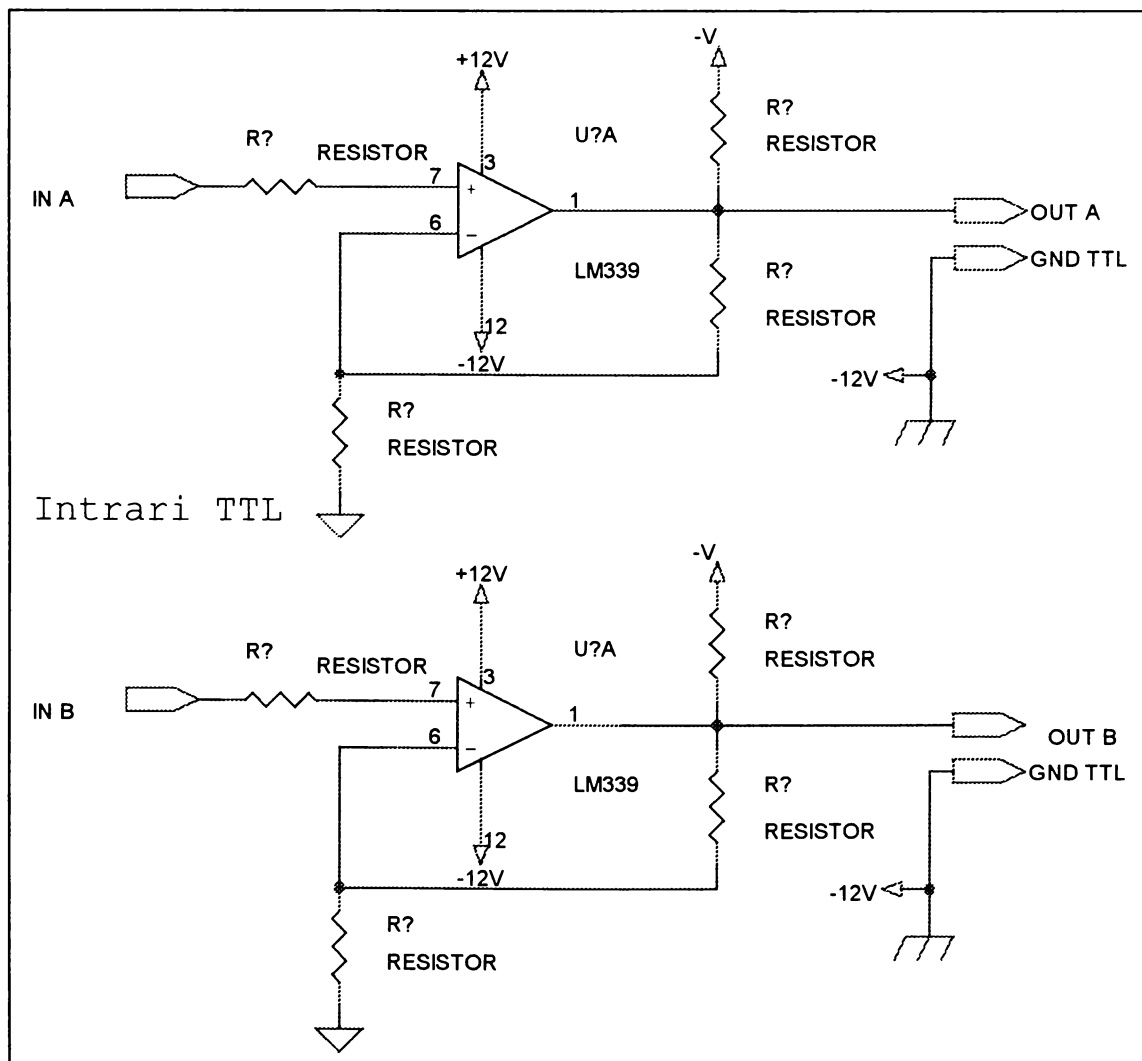


Fig. 1.27 Modul condiționare locală pentru ISA-TIRO-8CH

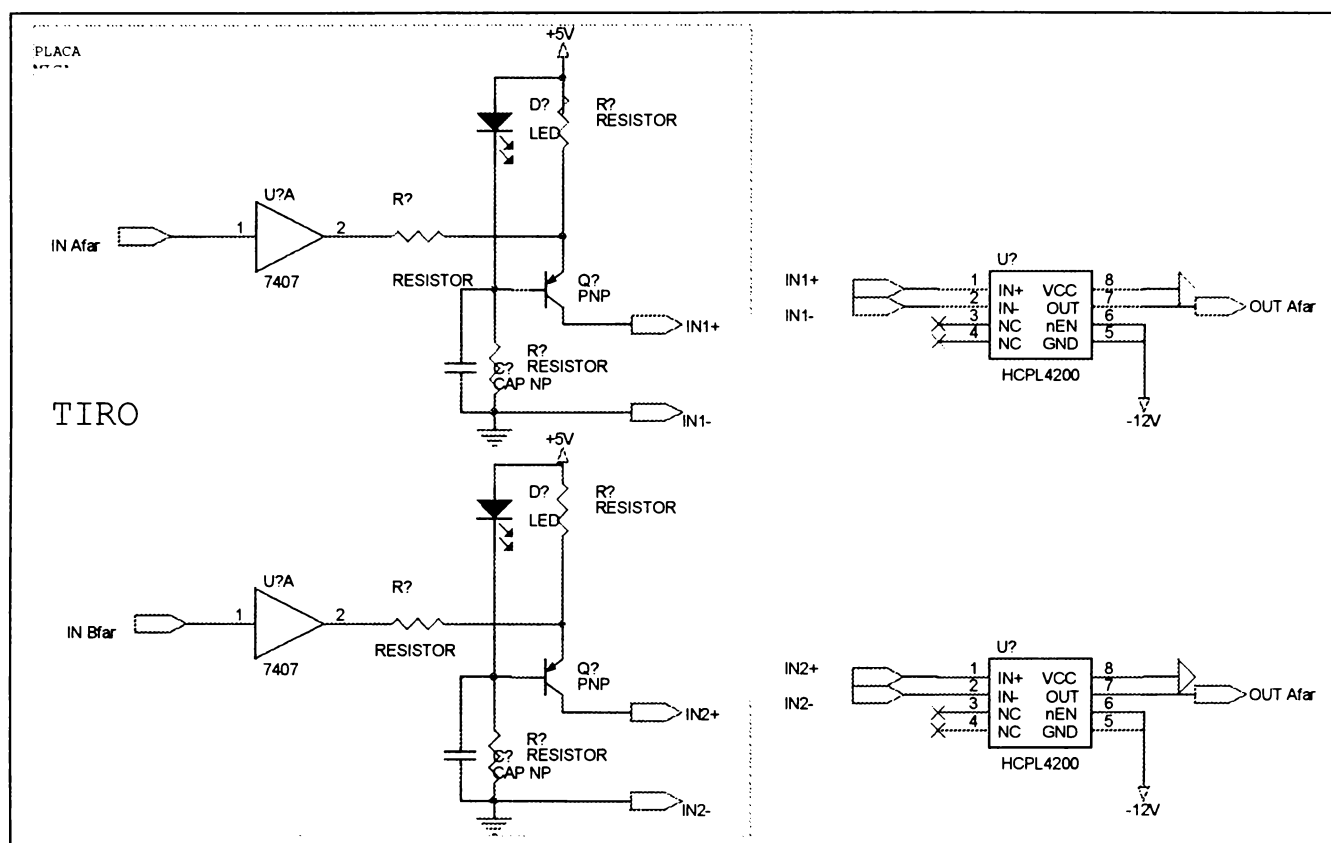


Fig. 1.28 Modul condiționare semnal TIRO la distanță **CC-TIRO-1CH**

Monitorizarea a fost realizată cu un sistem de achiziție a datelor performant. Rata de eșantionare a acestuia a fost de până la 600 MS/s. Frecvența mare de eșantionare a sistemului a permis vizualizarea cu fidelitate a pulsurilor de curent și variația undei de curent în urma oscilării capului de sudare în vederea modificării lungimilor celor două arce. Acest sistem, HKS QAS-400, este deservit de un software sub WINDOWS 9x sau alte versiuni up-grade, Weld Analyst 2.8.

Weld Analyst 2.8 (figura 1.29) are, pe lângă funcțiile necesare achiziției de date și funcții de prelucrare statistică și reprezentare grafică, fiind dedicat monitorizării proceselor de sudare WIG și MIG/MAG.

Celula de sudare și monitorizare a fost concepută conform schiței din figura 1.30. Cele două surse de sudare lucrează dependent una de cealaltă creând un sistem tandem. Sistemul este controlat de un dispozitiv electronic de sincronizare a pulsurilor de curent emise de cele două surse. Sincronizarea este necesară pentru a se putea controla interacțiunea electromagnetică a celor două arce.

Combinând sistemul de achiziție a datelor HKS QAS-400 cu sistemul de control al robotului s-a realizat un sistem senzor-arc dedicat sudării cu două sârme în mediu de gaze protectoare, cu care au fost efectuate experimentările de sudare din cadrul lucrării.

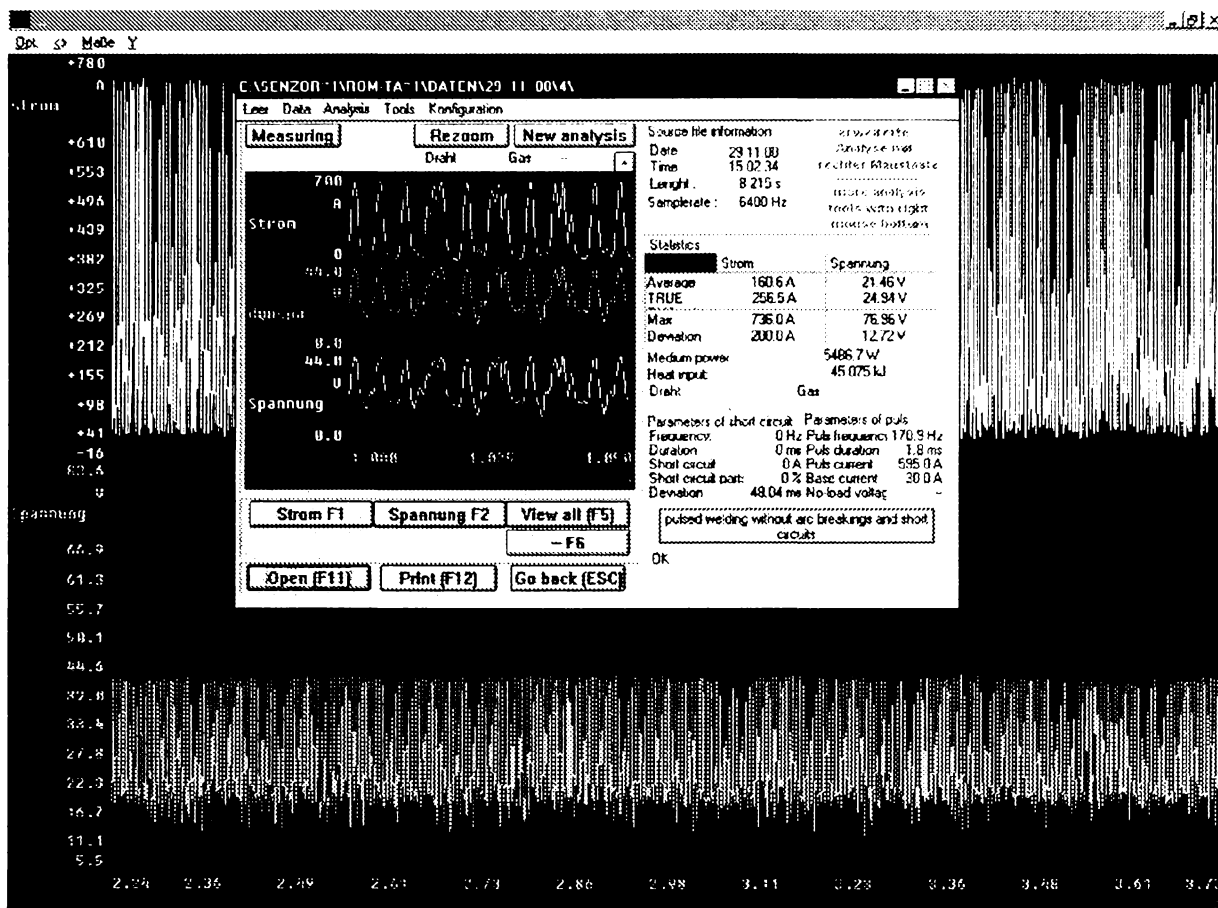


Fig. 1.29 Înregistrare analizată cu Weld Analyst 2.8

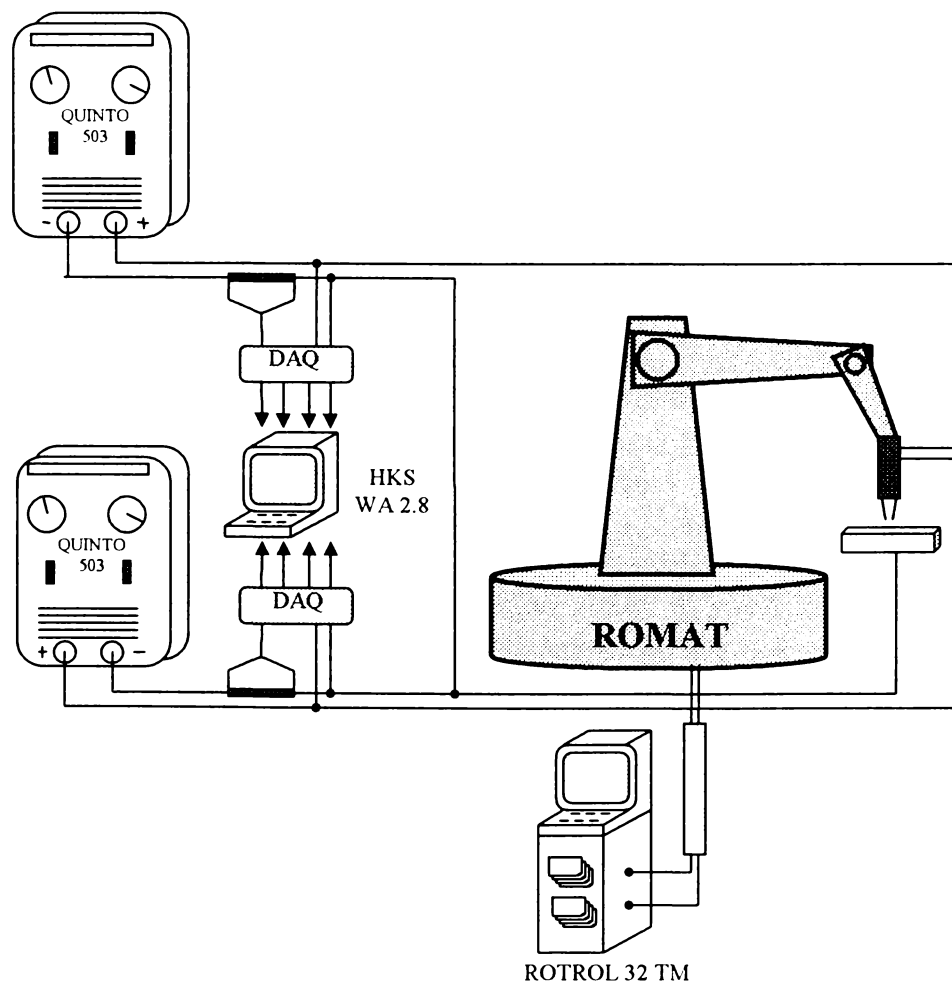


Fig. 1.30 Configurația celulei de sudare și monitorizare

2

Sudarea cu două sârme în mediu de gaze protectoare

2.1 Caracteristici generale

Sudarea cu două sârme în mediu de gaze protectoare este una din variantele de înaltă productivitate ale procedurii de sudare MIG/MAG. Introdus pentru prima oară în anii '70 acest procedeu nu a cunoscut o dezvoltare sensibilă decât la jumătatea anilor '90, când au apărut primele echipamente pentru sudare dedicate acestui procedeu. Conceperea și realizarea acestor echipamente nu a fost posibilă fără inițierea unor proiecte de cercetare în această direcție. Se poate astfel spune că apariția acestui procedeu de sudare pe piața producătorilor de structuri sudate a avut loc în ultimii 10 ani.

Principiul procedurii constă în topirea simultană a două sârme alimentate identic sau diferit din punct de vedere al polarității și valorii curentului de sudare de la una sau două surse de sudare de curent continuu, metalul topit de la capetele sârmelor fiind transferat într-o baie comună, unică. Este astfel posibilă mărirea ratei de depunere de la 6-8 kg/h până la 18-20 kg/h și mărirea vitezei de sudare de la 30-60 cm/min până la 100-200 cm/min /67/, /68/, /69/, /70/.

Prin configurația sistemului de sudare și specificitatea anumitor fenomene fizice, care sunt dezvoltate în timpul sudării, sudarea cu două sârme poate fi considerată un procedeu de sudare nou, cu aplicabilitate largă și eficiență economică ridicată /67/. Literatura de specialitate a ultimului deceniu prezintă o serie restrânsă de articole, majoritatea bine documentate experimental, cu referire la acest procedeu, interesante fiind în primul rând domeniile în care s-a reușit aplicarea acestuia. Astfel, dacă inițial acest procedeu a fost dedicat îmbinărilor cu lungimi și grosimi mari, în prezent se aplică la grosimi coborând până la 2.5 mm /13/. Dacă inițial a fost utilizat numai la sudarea oțelurilor slab aliate, în prezent este aplicat cu succes și la sudarea oțelurilor înalt aliate, a aliajelor de aluminiu și a tablelor zincate. Construcții navale, construcții de automobile, recipiente sub presiune, etc. sunt numai câteva exemple de domenii în care sudarea cu două sârme a fost aplicată cu succes. Totuși, având în vedere caracteristicile sale economice, se poate considera că, în prezent, procedeu de sudare cu două sârme este relativ puțin introdus în sistemele de fabricație ale producătorilor de structuri sudate. Această situație este dată de necunoașterea fenomenelor fizice care influențează atât stabilitatea procesului cât și caracteristicile îmbinărilor sudate. După cum s-a precizat anterior, literatura de specialitate prezintă numai rezultate experimentale fără a dezvolta modele ale fenomenelor fizice specifice acestui procedeu. Prezenta lucrare își propune, printre altele, să umple și unele lacune din această direcție.

2.2 Clasificarea variantelor procedurii de sudare cu două sârme în mediu de gaze protectoare

Rezultatele cercetărilor efectuate până în prezent au evidențiat posibilitatea utilizării procedurii în mai multe variante /67/, /73/, /74/. Criteriile de clasificare sunt numeroase, dintre acestea amintindu-se:

1. Din punct de vedere al componenței echipamentului de sudare există următoarele variante:
 - Sudarea cu două sârme alimentate de la aceeași sursă de putere prin intermediul unei duze de contact cu două orificii;
 - Sudarea cu două sârme alimentate de la două surse de putere distincte, sincronizate / nesincronizate, prin intermediul a două duze de contact izolate electric între ele și montate într-un cap de sudare specializat;
 - Sudarea cu două sârme utilizând două sisteme de sudare clasice distincte, sincronizate / nesincronizate, ale căror capete active sunt montate într-un dispozitiv menit să poziționeze, într-o vecinătate limitată, capetele celor două sârme de sudare.
2. Din punct de vedere al tipurilor de curent prin arcele de sudare există următoarele variante:
 - curent de sudare continuu nepulsat – această variantă a fost des utilizată la începuturile dezvoltării procedurii de sudare, în prezent, conform observațiilor autorului, aplicabilitatea sa fiind relativ redusă ca volum;
 - curent de sudare continuu pulsant cu sau fără sincronizarea pulsurilor /58/, /63/, /69/ - varianta cel mai des utilizată datorită stabilității ridicate a procesului de ardere a arcului și a transferului de metal;
 - curent de sudare alternativ - dezvoltare recentă a cercetătorilor japonezi /26/, /84/, este o variantă în stadiu de laborator, printre avantajele sale amintindu-se controlul interacțiunii electromagnetice din zona de sudare.
3. Din punct de vedere al poziționării capului de sudare relativ la rost există următoarele variante /11/, /13/:
 - sudarea în tandem – variantă în care planul celor două sârme conține axa după care are loc deplasarea tehnologică în vederea realizării îmbinării sudate (variante cel mai des utilizată datorită pătrunderii relativ mari);
 - sudarea în paralel – variantă în care planul celor două sârme este perpendicular pe axa după care are loc deplasarea tehnologică în vederea realizării îmbinării sudate (variantă utilizată în special la depunerile pentru încărcare prin sudare).
4. Din punct de vedere al mecanizării procesului există următoarele variante:
 - mecanizat;
 - automatizat;
 - robotizat.

Aceste variante, prin specificul lor, sunt diferite atât din punct de vedere tehnic cât și din punct de vedere economic /30/, /73/, /74/, /90/. Diferențele sunt uneori atât de mari încât obligă la abordarea fiecărei variante ca fiind un procedeu de sudare distinct.

Aplicabilitatea fiecărei variante, în parte, în producția de serie, trebuie privită atât sub aspect tehnic cât și sub aspect economic, motiv pentru care este necesară cunoașterea caracteristicilor fiecăreia dintre ele.

2.3 Sudarea cu o sursă de putere și duză de contact comună /67/

Această variantă este relativ nouă, putând fi dezvoltată datorită apariției ultimelor generații de echipamente de sudare. Principiul acestei metode constă în topirea simultană a

două sârme de către o singură sursă, contactul electric fiind asigurat de către o duză de contact specializată (figura 2.1).

Avantajele acestei variante constau în:

- utilizarea unei singure surse de sudare, ce reduce costurile dotării;
- utilizarea unui singur cap de sudare, ceea ce permite o poziționare facilă a sistemului de depunere compus din cele două sârme, relativ la forma secțiunii rostului de sudare și a traseului ce trebuie parcurs, deci posibilitatea automatizării și chiar a robotizării procedurii.

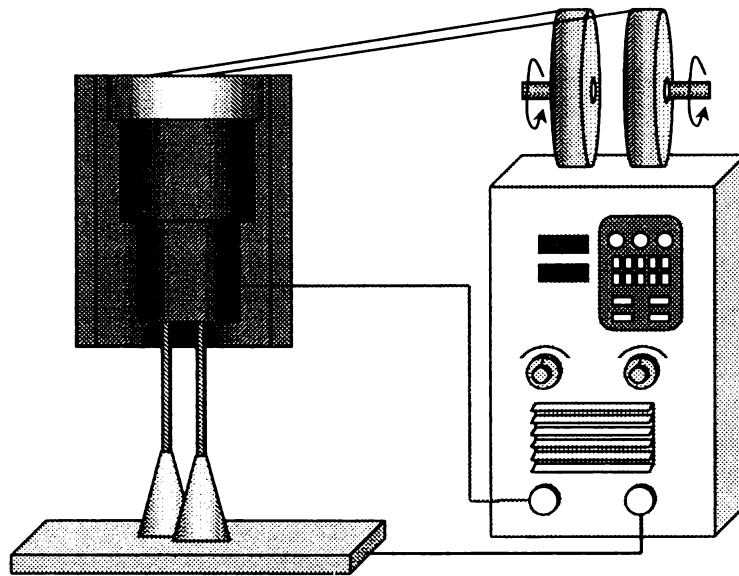


Fig. 2.1 Principiul procedurii de sudare cu două sârme, alimentate de la o sursă de putere prin intermediul unei duze comune

Dezavantajele variantei constau în:

- Existența unei singure surse de putere însă, introduce o nouă problemă. Această sursă trebuie să asigure topirea simultană a celor două sârme, deci cu alte cuvinte trebuie să suporte curenți de sudare relativ mari. Situația cea mai defavorabilă din acest punct de vedere este sudarea în regim pulsant. Creșterea puterii sursei implică și creșterea greutateii și a gabariturii acesteia, deci aceasta va fi mai greu de manevrat și dificil de utilizat în locurile relativ inaccesibile. Din acest motiv, această variantă este posibil de aplicat numai în situațiile în care componentele de sudat sunt manipulabile și se găsesc în locuri în care este permis accesul unei astfel de surse.
- Capul de sudare este complex și necesită o răcire mai bună decât capetele de sudare standard. Fiind un cap relativ greu nu poate fi utilizat în regim de operare manuală pentru activități de genul remanierilor prin sudare.
- În cazul în care se dorește utilizarea simultană a două valori diferite pentru curenții de sudare, acest lucru este imposibil. Din acest motiv nu se pot utiliza două sârme cu diametri diferiți, două sârme de calitate diferite sau o sârmă plină și una tubulară
- Datorită existenței unei singure surse de putere, la modificarea diferită a lungimilor arcelor de sudare, aceasta se dezechilibrează datorită fenomenului de autoreglare internă care nu poate face față celor două modificări simultane ale lungimilor arcelor;
- Este redusă posibilitatea sudării în curent pulsant datorită puterii exagerat de mari necesare pentru topirea celor două sârme;

În ceea ce privește construcția duzei de contact, până în prezent, aceasta permite numai sudarea cu două sârme de același diametru, neexistând posibilitatea utilizării a două sârme de diametre diferite. Această restricție este impusă și de către sursa de sudare care nu poate realiza simultan două seturi de parametri, pentru două diametre diferite ale sârmelor.

În prezent cercetările privind dezvoltarea acestei variante au fost abandonate datorită multiplelor dezavantaje date în principal de performanțele surselor de putere utilizate.

În tabelul 2.1 este prezentată situația actuală a echipamentelor pentru sudare cu două sârme în varianta analizată (sursă site internet producător: <http://www.sks-welding.de/>).

Tabel 2.1

Nr. crt.	Producător / produs	Caracteristici configurație	Oțel slab aliat	Oțel inoxidabil	Al	Cu	Preț [Euro]
1	SKS Welding Systems	Sursă unică, 1 arc comun, curent continuu nepulsat, duză cilindrică, sârme paralele	*	*	*		25.000

2.4 Sudarea cu două surse de putere și două duze de contact distincte /67/

Principiul acestei metode constă în topirea simultană a fiecărei sârme în parte de câte o sursă de putere, contactul electric fiind asigurat de către două duze de contact montate în același cap de sudare, dar izolate electric între ele (figura 2.2).

Avantajele acestei variante constau în:

- utilizarea unui singur cap de sudare, ceea ce permite o poziționare facilă a sistemului de depunere compus din cele două sârme, relativ la axa rostului de sudare și a traseului ce trebuie parcurs, deci posibilitatea automatizării și chiar a robotizării procedurii;
- posibilitatea de a utiliza două sârme cu diametre diferite, în funcție de tehnologia de sudare utilizată;
- posibilitatea sudării cu două sârme de tipuri diferite, utilizând polarități diferite (ex: o sârmă plină cu o sârmă tubulară).

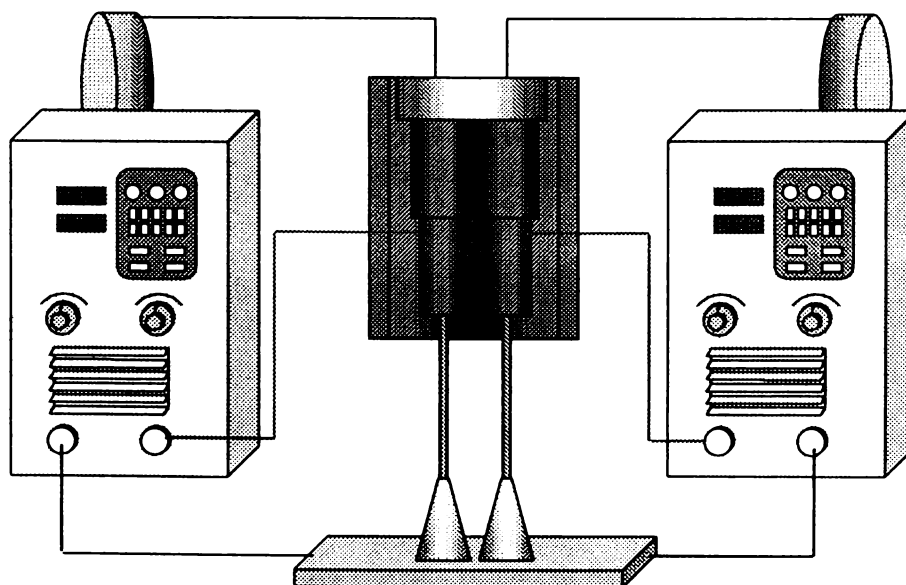


Fig. 2.2 Principiul procedurii de sudare cu două sârme, alimentate de la două surse de putere prin intermediul a două duze distincte montate într-un cap de sudare specializat

Dezavantajele variantei constau în:

- Utilizarea a două surse de sudare implică o investiție relativ mare. În general, acestor două surse li se reduc din performanțe (dialogul cu utilizatorul, componenta electronică, componenta digitală, ...) pentru a se putea asigura sistemului complet un preț accesibil.
- Capul de sudare este complex și necesită o răcire mai bună decât capetele de sudare standard. De asemenea, trebuie amintit că acest cap este un cap dublu push-pull pentru a se asigura alimentarea continuă cu sârmă chiar și la valori de 25-30 m/min ale vitezei de avans al sârmei.
- Capul de sudare are două duze de contact izolate din punct de vedere electric una față de cealaltă, ceea ce contribuie la mărirea dimensiunilor capului de sudare. Avantajul de a avea un cap unic, devine dezavantaj în cazul în care se dorește realizarea de îmbinări sudate unde accesul este limitat.

Existența a două surse de putere elimină problema legată de putere întâlnită la prima variantă, aceste surse putând fi surse standard dedicate sudării MIG/MAG. Utilizarea a două surse, însă, conduce uneori la investiții inițiale mai mari, precum și la asigurarea unui spațiu corespunzător dotat cu două surse de energie electrică. În prezent este cea mai utilizată variantă a procedurii de sudare cu două sârme. Majoritatea producătorilor de echipamente de sudare au dezvoltat un astfel de tip de sistem de sudare. În tabelul 2.2 este prezentată situația actuală a echipamentelor pentru sudare cu două sârme în varianta analizată (surse site-urile internet ale producătorilor: <http://www.cloos.de/>, <http://www.fronius.com/>, <http://www.otc-daihen.de/>, <http://www.nimak.de/>, <http://www.esab.com/>).

Tabel 2.2

Nr. crt.	Producător / produs	Caracteristici configurație	Oțel slab aliat	Oțel inoxidabil	Al	Cu	Preț [Euro]
1	Cloos Schweisstechnik "Tandem"	Curent pulsant cu / fără sincronizare, diverse opțiuni pentru robotizare	*	*	*		min. 20.000
2	Fronius Schweisstechnik "Time-Twin"	Curent pulsant cu / fără sincronizare, bază de date cu parametrii de sudare, diverse opțiuni pentru robotizare	*	*	*	*	30.000
3	OTC Daihen Europe "Doppeldraht"	Curent continuu și pulsant fără sincronizare, control fuzzy pentru reglarea parametrilor de sudare, diverse facilități	*	*	*		70.000 (inclus robot)
4	Nimak Schweisstechnik	Surse convenționale sau cu inertor, curent pulsant cu sincronizare, sârme de sudare paralele	*	*	*	*	15.000
5	Esab "Tandem-MAG"	Curent continuu nepulsant	*				23.000

Datorită faptului că este cea mai utilizată variantă, va constitui subiectul cercetărilor efectuate în cadrul programului experimental din prezenta lucrare.

2.5 Sudarea cu două instalații de sudare standard distincte /67/

Principiul variantei (figura 2.3 a, b) constă în topirea simultană a celor două sârme utilizându-se două instalații complete de sudare MIG/MAG standard. Alăturarea celor două sârme se realizează cu ajutorul unui dispozitiv de poziționare și fixare.

Avantajele acestei variante constau în:

- utilizarea a două instalații standard pentru sudarea în medii de gaze protectoare;
- utilizarea a două duze de contact și a două surse de sudare distincte permite sudarea cu două sârme diferite din punct de vedere al tipului și dimensiunilor;
- posibilitatea poziționării celor două capete de sudare, independent, astfel încât efectele forțelor electrodinamice să nu afecteze stabilitatea procesului.

Dezavantajele variantei constau în:

- utilizarea a două surse de sudare implică uneori o investiție relativ mare;
- necesitatea realizării de dispozitive speciale pentru poziționarea celor două capete de sudare;
- poziționare relativ dificilă a celor două capete relativ la rost, automatizarea acestui procedeu fiind mai dificilă comparativ cu variantele anterioare.

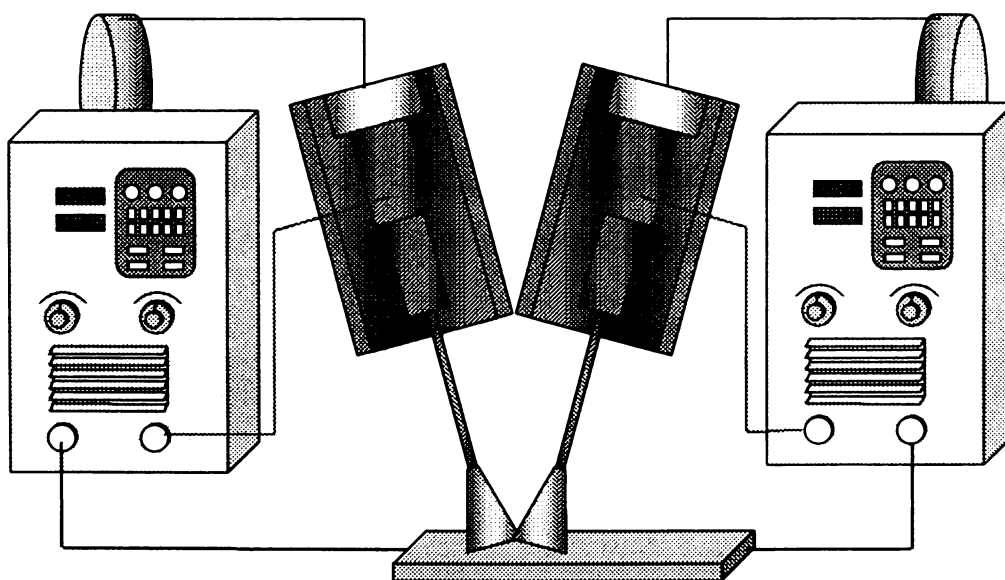


Figura 2.3 Principiul procedurii de sudare cu două sârme alimentate de la două instalații de sudare standard distincte

În tabelul 2.3 este prezentată situația actuală a echipamentelor pentru sudare cu două sârme în varianta analizată (surse site-urile internet ale producătorilor: <http://www.lincolnelectric.com/>, www.kuka-roboter.de).

Tabel 2.3

Nr. crt.	Producător / produs	Caracteristici configurație	Oțel slab aliat	Oțel inoxidabil	Al	Cu	Preț [Euro]
5	Lincoln Electric "Tandem-Welding"	Curent continuu pulsant / nepulsant, două capete de sudare fixate într-un dispozitiv specializat	*	*	*		neprecizat
3	Kuka "Zwei-draht"	Curent continuu nepulsant, două capete de sudare, diverse opțiuni pentru robotizare	*	*	*		neprecizat

2.6 Stabilitatea procesului de sudare cu două sârme în mediu de gaze protectoare

Fenomenele fizice dezvoltate în zona arcelor la sudarea cu două sârme în mediu de gaze protectoare sunt mai complexe decât în cazul sudării cu o singură sârmă. Alăturarea într-o vecinătate restrânsă a două sârme străbătute de curenți de ordinul sutelor de amperi, intersectarea a două vâne de fluid de protecție și modificarea modului de oscilare a băii de sudare sunt numai câteva din fenomenele fizice specifice sudării cu două sârme. Aceste fenomene modifică sensibil stabilitatea arderii arcului și stabilitatea procesului de transfer de metal de la capetele sârmelor către baia de sudură /67/, /68/, /69/, /70/, /96/, /97/, /98/, /99/, /101/, /102/.

Evidențierea acestor fenomene și influențele lor asupra derulării procesului de sudare și asupra calității îmbinărilor sudate s-a făcut experimental. Conform celor prezentate la finalul capitoului 1 programul experimental derulat a fost amplu și și-a propus, înaintea studierii comportării sistemului de sudare constituit în senzor-arc, să ajute, prin observații și verificări, suportul teoretic privind fizica sudării cu două sârme, suport construit în paralel cu derularea experimentărilor.

Primele observații legate de stabilitatea procesului /96/, /97/, au arătat că, pe lângă valorile parametrilor electrici de sudare, o influență determinantă asupra stabilității procesului de sudare o au și parametrii geometrici ai sistemului de sudare. Astfel:

- distanța dintre cele două sârme;
- unghiul format de cele două sârme;
- unghiul format de capul de sudare cu normala la piesa de sudat;
- unghiul dintre planul celor două sârme și axa rostului;

sunt elemente care influențează atât stabilitatea cât și rezultatul procesului de sudare. Cuprinderea tuturor fenomenelor care influențează un anumit parametru, într-un model matematic complex, este dificilă. Din acest motiv se apelează, în general, la modele simple care să redea cât mai fidel fiecare fenomen în parte.

2.6.1 Distanța dintre cele două sârme

Distanța dintre cele două sârme și mai precis distanța dintre capetele libere ale celor două sârme este parametrul geometric cu influența cea mai pregnantă asupra derulării procesului de sudare și asupra calității viitoarei îmbinări sudate /63/. Acest parametru creează condițiile propice interacționării câmpurilor electromagnetice din jurul celor două sârme de sudare. Efectele interacțiunii electromagnetice din zona de sudare sunt multiple /63/:

- dezvoltarea de forțe electrodinamice care acționează asupra arcelor și asupra picăturilor emise de la capetele sârmelor deviindu-le de la poziția naturală (figura 2.4) /67/, /68/, /69/, /70/;
- modificarea frecvenței scurtcircuitelor la sudarea cu transfer prin scurtcircuit;
- modificarea frecvenței de oscilare a băii de sudare;
- modificarea ratei de transfer de metal de la capetelor sârmelor, etc.

Deoarece unul din efectele secundare ale interacțiunii electromagnetice constă în lungirea arcelor de sudare, atunci distanța dintre cele două sârme va influența și funcționarea senzorilor-arc, senzori bazați pe variațiile momentane ale lungimii arcelor. Această influență a fost cercetată de autor în vederea cuantificării ei printr-un model matematic.

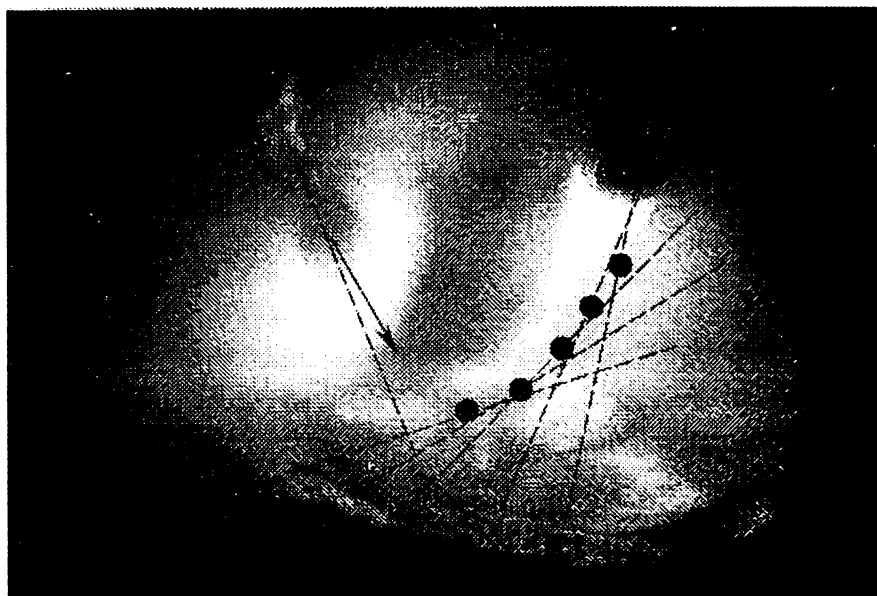


Fig. 2.4 Deviarea de către forțele electrodinamice a arcelor de sudare și a picăturilor emise de la capetele celor două sârme /100/

Pe lângă influența asupra interacțiunii electromagnetice în zona de sudare, distanța dintre cele două sârme influențează și caracteristicile geometrice ale îmbinării sudate. Astfel, creșterea distanței dintre cele două sârme conduce la modificarea formei și a dimensiunilor depunerilor prin sudare (figura 2.5, tabelul 2.4).

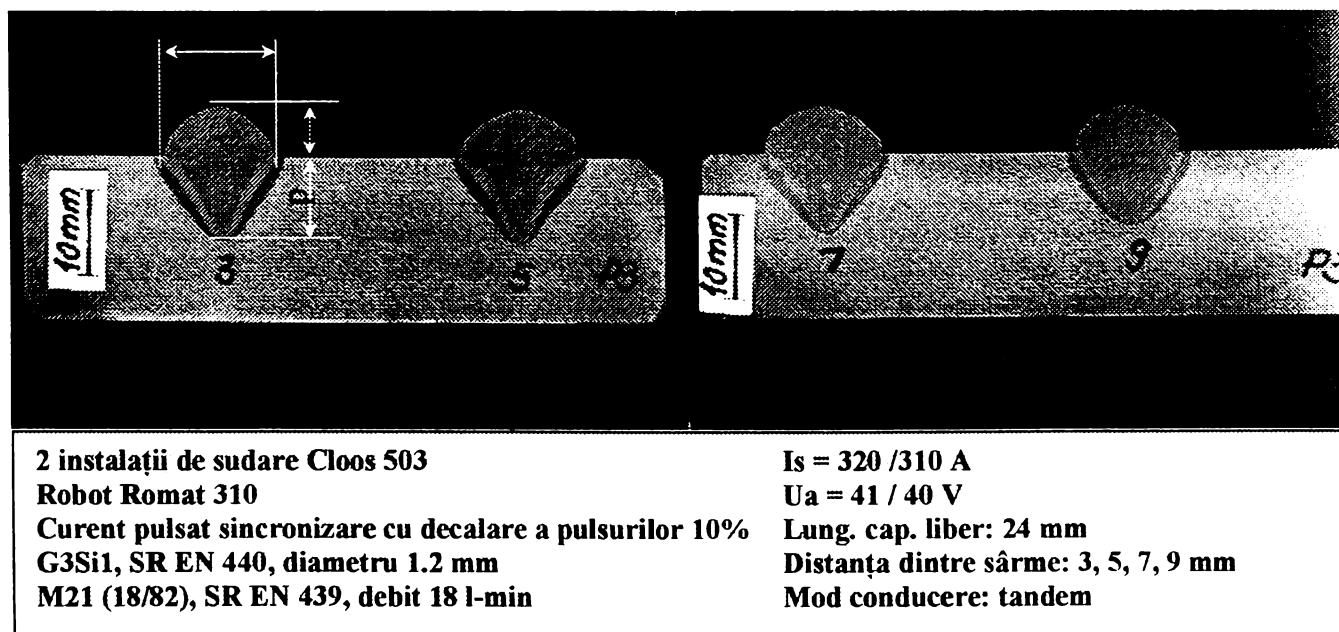


Fig. 2.5 Influența distanței dintre sârmele de sudare asupra pătrunderii /97/, /101/

Tabel 2.4

Distanța dintre capetele celor două sârme [mm]	Supraînălțare h [mm]	Lățime b [mm]	Pătrundere p [mm]
3	6.5	12.0	9.0
5	5.5	13.0	9.0
7	4.5	15.0	8.0
9	4.5	12.0	7.0

Se observă în figura 2.5 că forma pătrunderii se modifică cu creșterea distanței dintre sârme de la cea specifică sudării în argon (așa numitul “deget de argon”) la cea specifică sudării în dioxid de carbon.

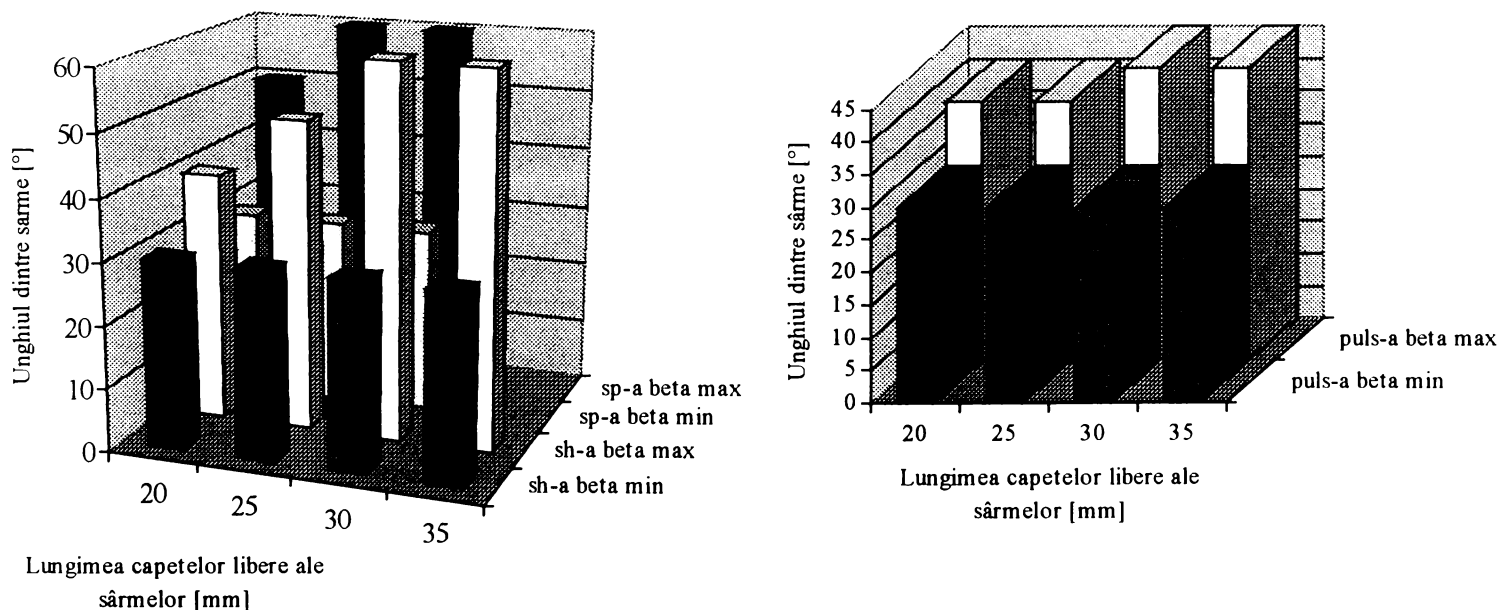
2.6.2 Unghiul format de cele două sârme de sudare

Alături de distanța dintre cele două sârme, unghiul format de acestea stă la baza distribuirii forțelor electrodinamice și implicit a valorilor maxime pe care acesta le capătă în timpul sudării /67/, /68/, /69/, /70/. Dacă în cazul sudării cu două instalații de sudare distincte, capetele fiind montate într-un dispozitiv de poziționare și fixare, este facilă modificarea unghiului dintre cele două sârme, în celelalte două cazuri această modificare nu este posibilă.

În cazul sudării cu două sârme paralele distribuția forțelor electrodinamice rezultate în urma interacțiunii electromagnetice este uniform distribuită pe generatoarea arcului și pe suprafața sârmei de sudare /63/, /67/, /69/, /70/, /96/, /101/. Valoarea acestei forțe nu crește necontrolat ducând astfel la instabilități ale procesului /63/, /101/, datorită faptului că, paralele fiind, fizic nu este posibilă apropierea lor la o distanță mai mică de 8-10 mm.

În cazul sudării cu două sârme neparalele, trebuie controlată continuu distanța dintre capetele acestora deoarece, o dată cu scăderea distanței dintre capete, forțele electrodinamice cresc proporțional cu această scădere /63/, /67/, /69/, /70/, /96/, /101/.

Urmărind stabilitatea procesului de sudare și calitatea depunerilor efectuate /96/, /97/, a fost posibilă determinarea valorilor optime ale unghiului dintre cele două sârme, în funcție de lungimea capetelor libere ale celor două sârme de sudare, pentru anumite moduri de transfer de metal (figura 2.6 a și b).



EWM High-Speed 500	G3Si1, SR EN 440, ϕ 1.2 mm	$U_a = 18...38$ V
Kemppi Pro 500	M21 (18/82), SR EN 439, 16/16 l/min	$I_s = 120...300$ A
Mod de conducere: tandem	Unghi cap cu verticala: 0°	nepulsat (a.)
	Sp – spray, sh – short, puls – pulsat	pulsat (b.)

a.

b.

Fig. 2.6 Valorile unghiului dintre cele două sârme pentru diferite lungimi ale capetelor libere ale sârmelor în condițiile sudării cu transfer prin scurtcircuit, prin pulverizare și în curent pulsant /96/, /97/

2.6.3 Unghiul format de capul de sudare cu normala la piesa de sudat

În funcție de modul de conducere a arcului, “arc împins”, “arc neutru” sau “arc tras”, este posibilă modificarea caracteristicilor viitoarei îmbinări sudate. Acest fenomen care este valabil și în cazul sudării cu o singură sârmă, la sudarea cu două sârme este mult mai accentuat /63/.

În figura 2.7 a, este prezentat cazul sudării cu arc împins, utilizat preponderent la procesele de încărcare prin sudare /96/.

Comparând caracteristicile geometrice ale depunerii (figura 2.7 b) la sudarea cu arc împins sub un unghi de 30° (față de verticală) cu sudarea cu arc neutru (0°), se poate observa o diferență sensibilă între dimensiunile pătrunderilor (tabelul 2.5).

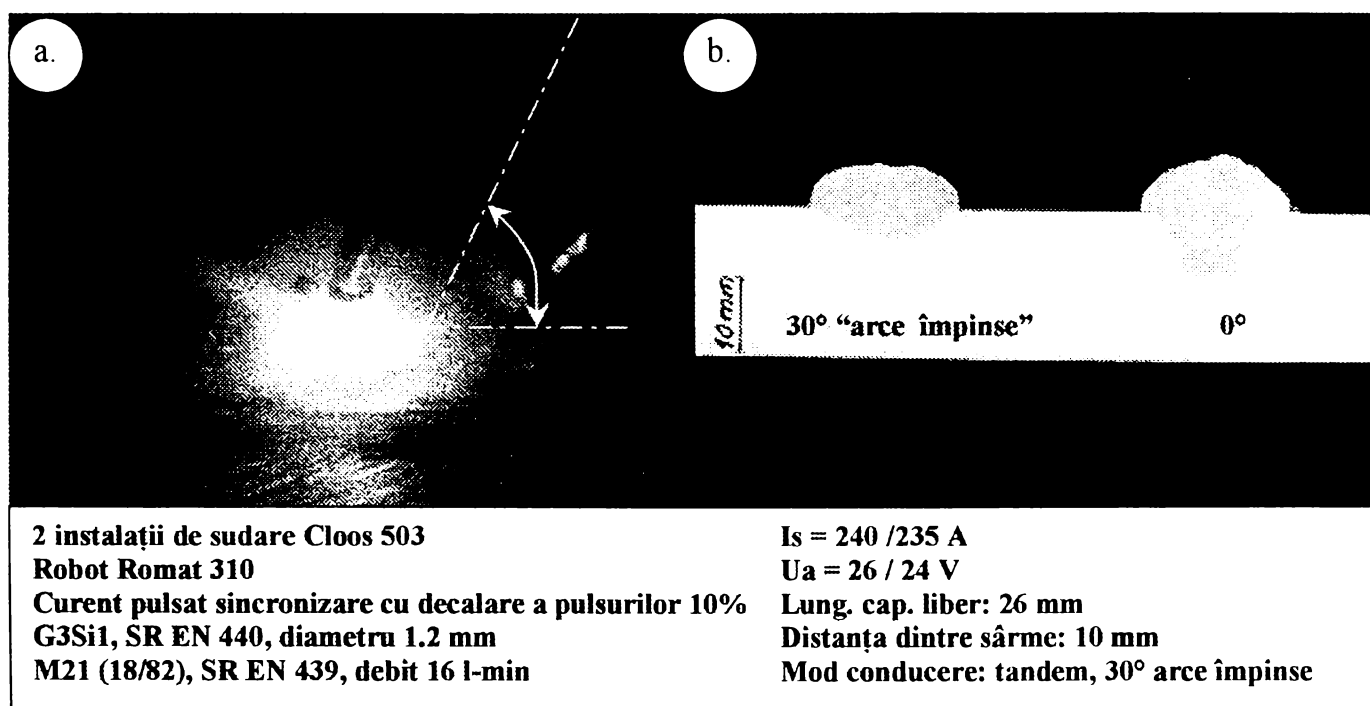


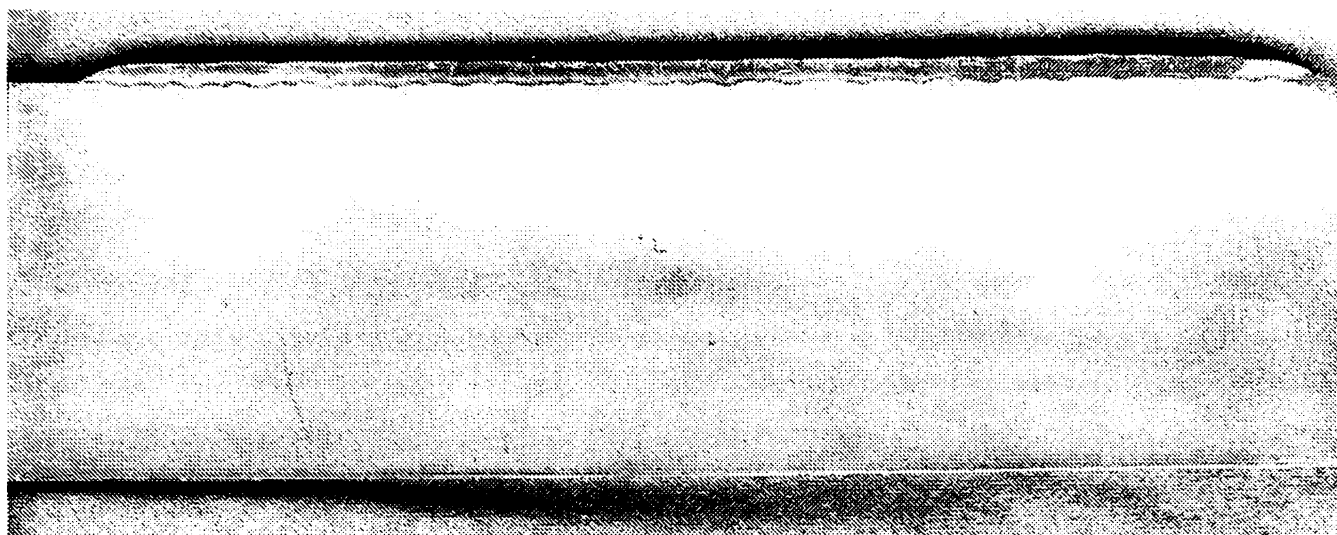
Fig. 2.7 Modul “arce împinse” și compararea pătrunderii cu pătrunderea de la sudarea cu arce neutre /63/, /96/

Tabel 2.5

Unghiul dintre capul de sudare și verticală [$^\circ$]	Supraînălțare h [mm]	Lățime b [mm]	Pătrundere p [mm]
0	5.5	12.0	9.5
30	4.5	12.0	4.0

Experimentările de sudare efectuate /67/, au permis astfel dezvoltarea de tehnologii de încărcare prin sudare cu două sârme, diluția coborând în unele cazuri până la 8%.

În figura 2.8 este prezentat un exemplu de încărcare prin sudare cu două sârme în mediu de gaze protectoare.



2 instalații de sudare Cloos 503	Is = 220 /215 A
Robot Romat 310	Ua = 27 / 26 V
Curent pulsat sincronizare cu decalare a pulsurilor 10%	Lung. cap. liber: 24 mm
G3Si1, SR EN 440, diametru 1.2 mm	Distanța dintre sârme: 10 mm
M21 (18/82), SR EN 439, debit 20 l/min	Mod conducere: paralel, 30° arce împinse

Fig. 2.8 Modul “arc împins” utilizat la procese de încărcare prin sudare /67/

2.6.4 Unghiul dintre planul celor două sârme și axa rostului

Este un parametru deosebit de important în obținerea unei geometrii corespunzătoare pentru îmbinarea sudată /96/. În figura 2.9 este prezentată macroscopia unei treceri de rădăcină cu dezaxare, rezultată în urma creării unui unghi de 20° între planul sârmelor de sudare și axa rostului.



EWM High-Speed 500
Kemppi Pro 500
Curent nepulsat
G3Si1, SR EN 440, diametru 1.2 mm
M21 (18/82), SR EN 439, debit 16 l/min
Is = 260 /255 A
Ua = 29 / 28 V
Lung. cap. liber: 24 mm
Distanța dintre sârme: 18 mm
Mod conducere: tandem, 20° plan sârme - axă

Fig. 2.9 Sudură de rădăcină efectuată cu un unghi de 20° între planul sârmelor de sudare și axa rostului

2.7 Sudarea în impulsuri

Sudarea în impulsuri este cea mai utilizată variantă a sudării cu două sârme. Stabilitatea specifică sudării în curent pulsant are loc și în cazul sudării cu două sârme, însă rezultatele experimentale au evidențiat mici modificări ale modului de transfer /63/, /67/, /96/, /97/, /101/. Aceste modificări vor fi prezentate în detaliu în cadrul următorului capitol, ele fiind rezultatul dezvoltării forțelor electrodinamice ca efect al interacțiunii electromagnetice din zona de sudare. Se pot întâlni trei posibilități de existență, în timp, a impulsurilor de curent pe cele două sârme:

- impulsuri simultane pe ambele sârme (figura 2.10 a);
- impulsuri alternative sincronizate cu o anumită întârziere în timp (figura 2.10 b);
- impulsuri aleatoare.

În cazul utilizării impulsurilor aleatoare este posibilă emiterea cu aceeași frecvență pentru fiecare curent în parte sau emiterea cu frecvențe diferite, sistemul de sudare nefiind limitat din acest punct de vedere.

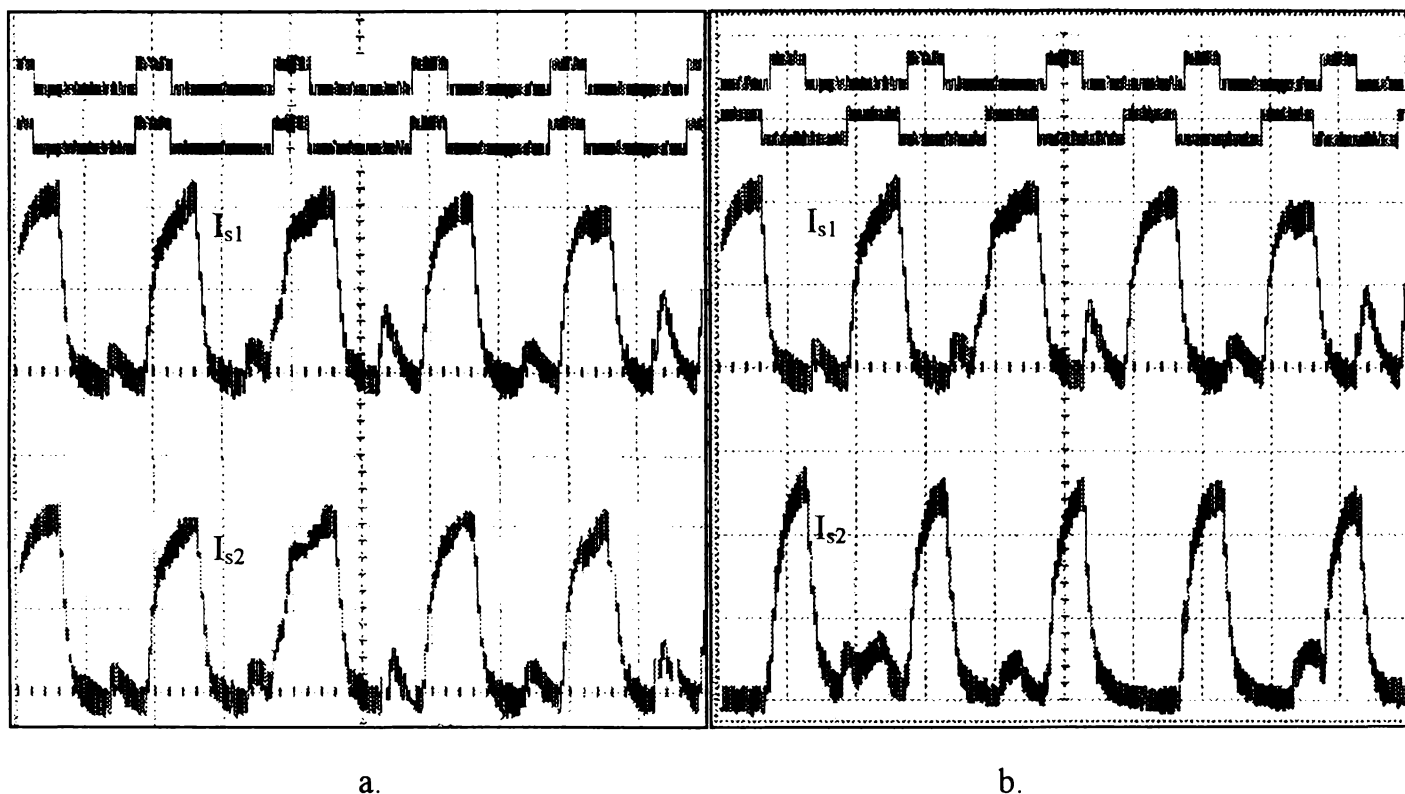


Fig. 2.10 Impulsuri simultane (a.) și alternative sincronizate (b.) /96/, /98/, /102/

Existența în timp a impulsurilor de curent este principalul parametru care influențează stabilitatea procesului de sudare prin influențarea interacțiunii electromagnetice dezvoltate în zona de sudare. Doi curenți cu valori simultan mari, vor implica o interacțiune electromagnetică mai puternică și deci o modificare mai puternică a stabilității procesului de sudare, cu efecte negative sau pozitive /63/, /67/, /96/, /97/, /101/. Din acest motiv, cele mai des utilizate sisteme de sudare sunt cele cu sincronizare decalată a pulsurilor. Aceste sisteme asigură emiterea ordonată a impulsurilor de curent, astfel încât să nu existe simultan valori maxime pentru cei doi curenți.

2.8 Sudarea cu două sârme cu caracteristici distincte. Alierea în arc

O caracteristică importantă a sudării cu două sârme constă în controlarea cu o mai bună precizie a compoziției chimice a metalului depus. În mod normal metalul depus trebuie să prezinte anumite caracteristici mecanice sau de compoziție chimică. De exemplu, la încărcarea prin sudare în vederea generării suprafețelor cu rezistență la coroziune chimică sau electrochimică, metalul depus trebuie să prezinte un anumit conținut de crom, nichel sau carbon. În cazul generării de suprafețe rezistente la uzare abrazivă, metalul depus trebuie să prezinte o duritate corespunzătoare pentru a putea fi introdus în serviciu. La sudarea a două oțeluri înalt aliate cu caracteristici diferite, metalul depus trebuie să prezinte o anumită

compoziție chimică pentru a avea o îmbinare sudată cu caracteristicile dorite. Acestea sunt numai câteva din multiplele situații în care tehnologul sudor trebuie să asigure metalului depus anumite caracteristici. De cele mai multe ori, pentru a rezolva această problemă, tehnologul apelează la materiale de sudare scumpe, care pot, mai mult sau mai puțin, să dea rezultatul scontat.

Prin configurația sa, sudarea cu două sârme în mediu de gaze protectoare rezolvă această problemă. Alegând judicios două materiale de sudare distincte, este posibilă obținerea rezultatului dorit. În timpul sudării au loc două procese consecutive de aliere:

- alierea în arc;
- alierea în baie.

Aceste două procese de aliere conferă în final metalului depus anumite caracteristici. Astfel, pornind de la rezultatul final, cel dorit de către tehnolog, spre momentul emiterii picăturilor de la capetele sârmelor, este posibilă determinarea caracteristicilor celor două materiale care trebuie utilizate. Aceste caracteristici vor fi astfel împărțite pe cele două sârme utilizate, încât materialele alese să fie utilizate să provină din clasele uzuale de materiale, ieftine și ușor de obținut de pe piața producătorilor de materiale de sudare.

În această direcție alierea în arc, constând de fapt în combinarea metalelor a două picături, cu compoziții chimice diferite, care se ciocnesc în spațiul celor două arce, înseamnă primul pas spre obținerea compoziției chimice dorite pentru metalul depus.

În figura 2.11 este prezentat procesul de aliere în arc specific sudării cu două sârme.

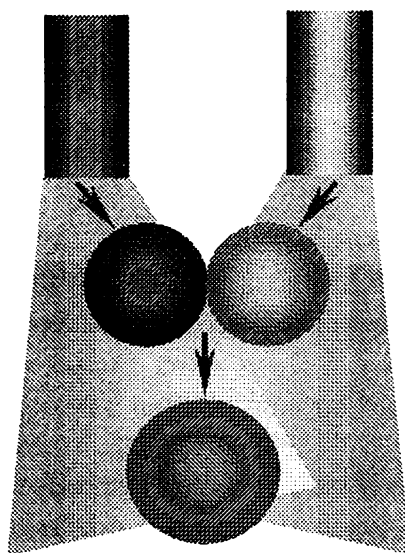


Fig. 2.11 Schema procesului de aliere în arc

Necercetat încă, acest avantaj al procedurii de sudare va oferi posibilități multiple utilizatorilor, oferindu-le șansa obținerii anumitor compoziții chimice pentru metalul depus (compoziții pe care în mod normal le pot obține numai utilizând materiale de adaos scumpe) folosind materiale de adaos uzuale și deci, ieftine.

2.9 Sudarea cu două sârme tubulare

În cazul sudării cu două sârme tubulare, cele prezentate anterior, legate de alierea în arc, capătă o formă mai accentuată. Pulberea existentă în sârmă este mult mai ușor de controlat decât materialul sârmei. Evident, omogenitatea compozițională a fluxului este, poate, pusă sub semnul întrebării, dar la nivelul macro- al îmbinărilor sudate distribuția neuniformă a elementelor dispăre. Specific sudării cu sârme tubulare este nivelul ridicat al procesului de

aliere în arc. Picăturile emise de la capetele sârmelor sunt extrem de fine, datorită emiterii explozive (mod de emiterie specific sudării cu sârmă tubulară datorită densităților mari de curent existente pe fiecare sârmă, /62/) a metalului topit. Aceste picături ocupă aproape întreg spațiul de arc, deci ciocnirile dintre două picături provenind de la sârme diferite sunt mult mai numeroase (figura 2.12).

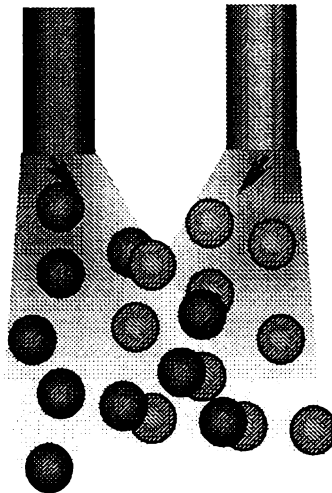


Fig. 2.12 Alierea în arc la sudarea cu sârme tubulare

În acest caz alierea în arc devine un factor deosebit de important în conducerea caracteristicilor viitorului metal al îmbinării sudate.

2.10 Rata depunerii la sudarea cu două sârme

Sudarea cu două sârme în mediu de gaze protectoare a fost dezvoltată cu scopul îmbunătățirii productivității procedurii MIG/MAG standard. Topind simultan două sârme de sudare s-ar putea crede, la prima vedere, că rata de depunere este dublă în cazul sudării cu două sârme comparativ cu sudarea standard cu o singură sârmă. Experimentele de sudare efectuate au demonstrat că rata de depunere este, în general, de 2.2-2.3 ori mai mare decât o situație similară specifică sudării standard /10/, /30/, /35/, /63/. Motivele acestei creșteri sunt legate de modificarea modului de transfer sub influența forțelor electrodinamice dezvoltate în spațiul de interacțiune a câmpurilor electromagnetice din jurul sârmelor și arcelor de sudare. Această modificare, specifică sudării cu două sârme este prezentată detaliat în capitolul 3.

Măsurând caracteristicile metalului depus prin sudare cu două sârme a fost posibilă exprimarea grafică a ratei de depunere și caracteristicile geometrice ale depunerii /63/, /67/, /96/, /97/, /98/.

În figura 2.13 a și b sunt prezentate ratele de depunere măsurate pentru sudarea cu două sârme pline (a) și două sârme tubulare rutilice (b).

În figura 2.13 a se poate observa că pentru sudarea cu două sârme având diametre de 1.2 mm (cel mai utilizat diametru), rata depunerii este cuprinsă între 4-12 kg/h. Comparând cu datele oferite de literatura de specialitate și anume: la sudarea cu o singură sârmă de 1.2 mm rata de depunere va urca până în jurul valorii de 4.5 kg/h pentru o viteză de avans al sârmei de 20 m/min /95/, atunci se poate concluziona că rata de depunere la sudarea cu două sârme este mai mare decât dublul ratei de depunere cu o singură sârmă. Motivul este legat de existența și acțiunea forțelor electrodinamice în zona de sudare /63/, /67/, /96/, /97/, după cum este prezentat în cadrul următorului capitol.

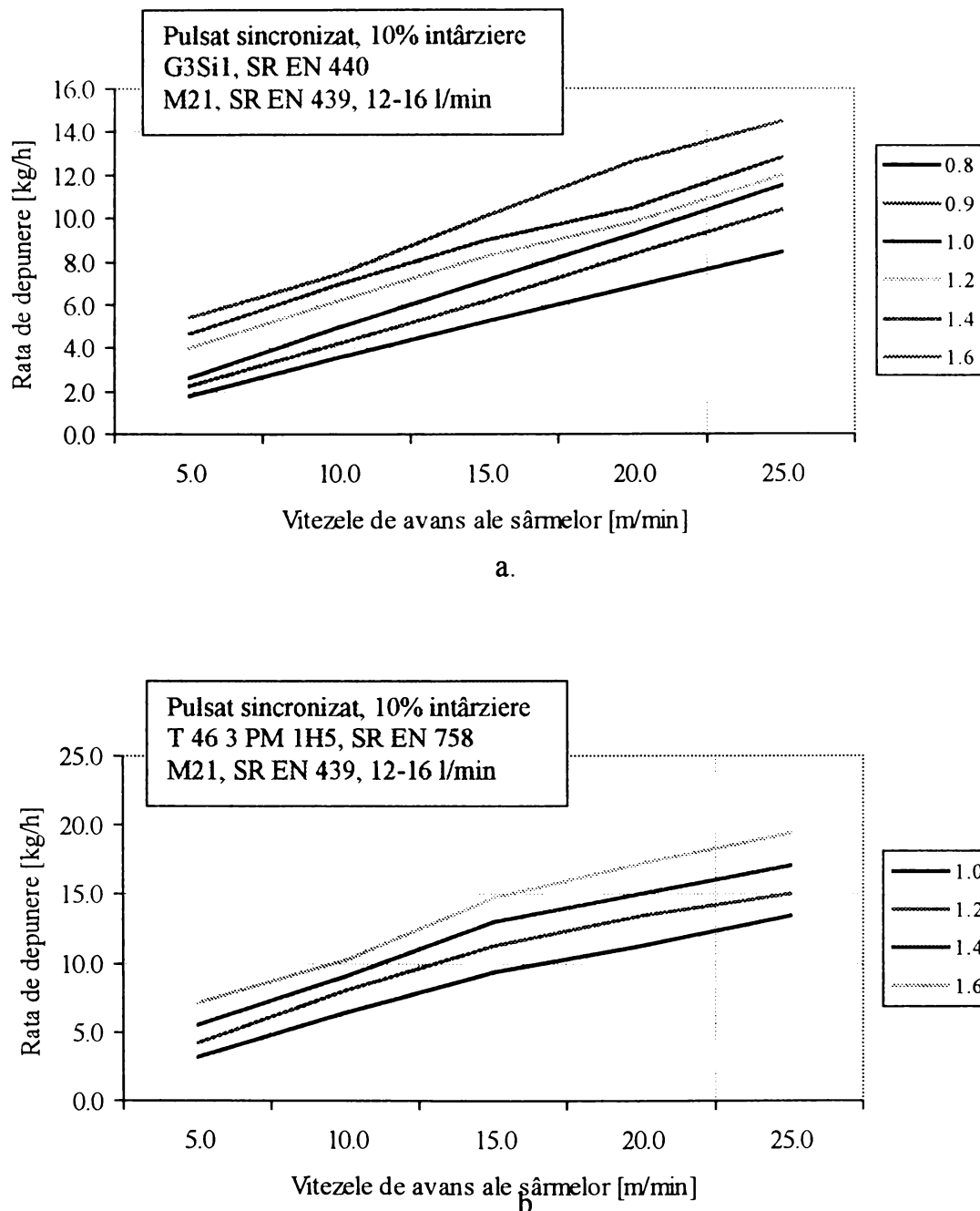


Fig. 2.13 Ratele de depunere la sudarea cu două sârme pline (a) și două sârme tubulare (b)

Și în cazul utilizării sârmelor tubulare, rata de depunere crescând până în jurul valorii de 20 kg este mai mult decât dublul sudării cu o singură sârmă de același tip și diametru.

Trebuie remarcat faptul că topirea celor două sârme nu este identică /63/, /96/, /101/. În capitolul următor este descris un fenomen specific sudării cu două sârme, care conduce la topirea cu o viteză mai mare a celei de-a doua sârme la sudarea în tandem. Aceasta presupune alimentarea diferită (valori diferite ale celor doi cureți de sudare) a celor două sârme pentru ca procesul să fie stabil /63/, /96/, /98/.

Experimentările preliminare de sudare efectuate /67/, /96/ au evidențiat și creșteri ale parametrului α al îmbinărilor în colț până la 6-7 mm. În figura 2.14 sunt prezentate valorile grosimilor îmbinărilor sudate în colț, în cazul sudării cu sârmă plină, diametrul sârmei fiind 1.2 mm.

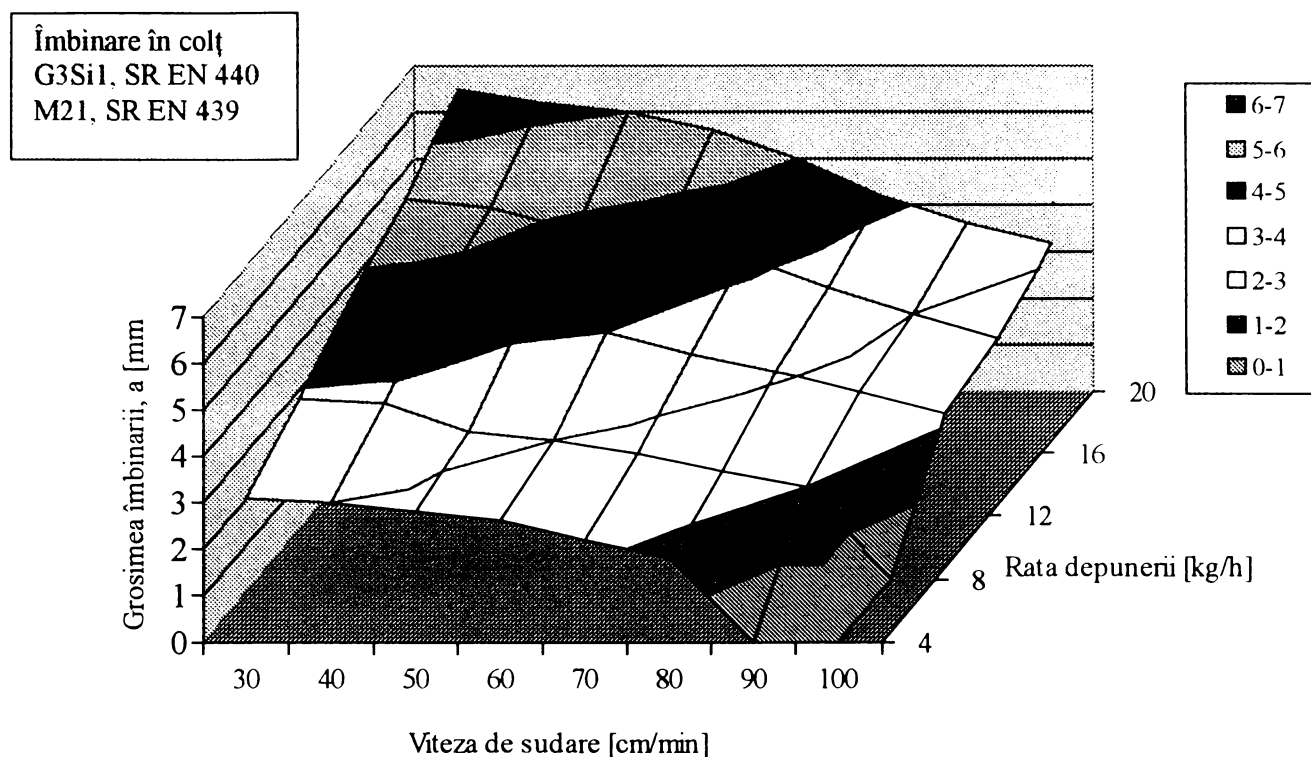


Fig. 2.14 Grosimile îmbinărilor în colț

În figura 2.15 sunt prezentate grosimile îmbinării sudate în colț pentru diferite perechi: viteze de avans ale sârmelor – viteză de sudare.

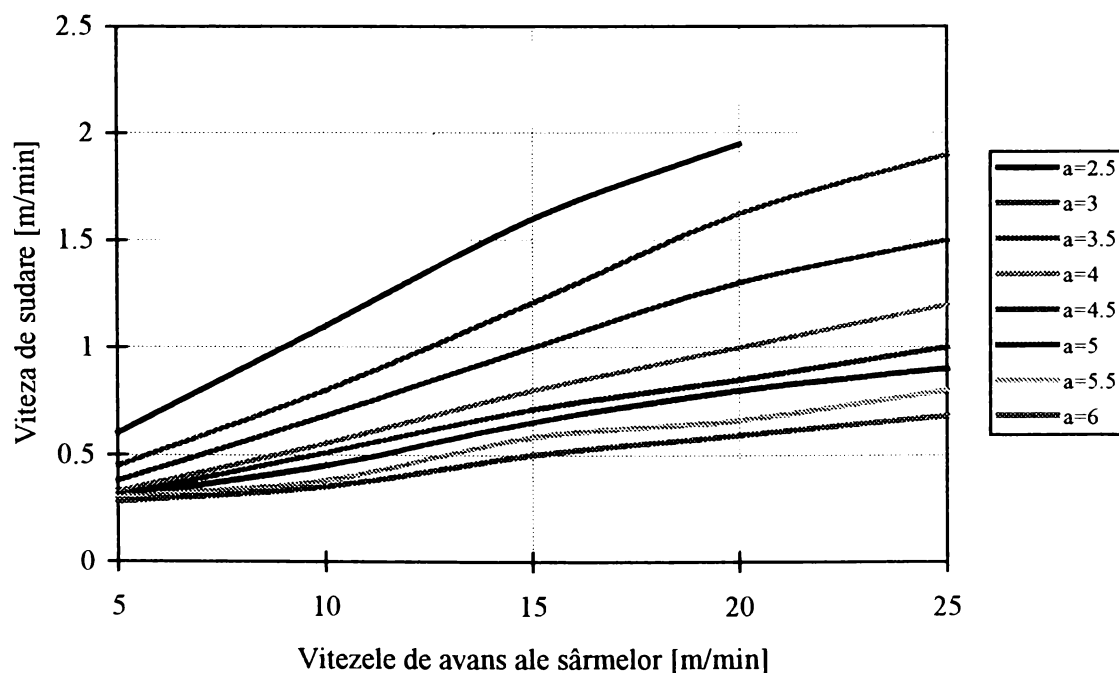


Fig. 2.15 Grosimile îmbinărilor în colț

Definirea sudării cu două sârme drept procedeu de înaltă productivitate are la bază rata de depunere relativ mare (urcând până în jurul valorii de 20 kg/h) și viteza de sudare care, după unii autori, poate ajunge până la 2-4 m/min (citare site firma Lincoln Electric: www.lincolnelectric.com). Această definiție nu limitează aplicativitatea procedurii, acesta având succes în realizarea de îmbinări sudate cu grosime mai mică de 3 mm (citare site firma Fronius Co&KG: www.fronius.com).

3

Interacțiunea electromagnetică la sudarea cu două sârme în mediu de gaze protectoare

Conform teoriei electromagnetismului, în jurul unui conductor străbătut de un curent electric materia capătă anumite proprietăți specifice, reunite în conceptul de câmp electromagnetic. Existența într-o vecinătate relativ restrânsă a doi astfel de conductori conduce la intersectarea în spațiu a câmpurilor electromagnetice. Datorită intersectării, cele două câmpuri vor interacționa /58/, /63/, /88/.

Un astfel de conductor străbătut de un curent având valori de ordinul sutelor de amperi este și sârma de sudare. Alăturarea a două sârme de sudare conduce la dezvoltarea, în spațiul ocupat de cele două arce și de capetele libere ale sârmelor, a unei interacțiuni electromagnetice. Cercetările experimentale au evidențiat faptul că această interacțiune electromagnetică își pune amprenta sensibil pe stabilitatea procesului de ardere a arcului și de transfer de metal de la capătul sârmei către baie.

Literatura de specialitate nu oferă informații teoretice asupra acestui fenomen specific sudării cu două sârme. Singurele referiri la acest fenomen sunt numai unele rezultate experimentale izolate obținute din necesitatea de a stabili procesul de sudare utilizat într-o aplicație concretă /13/, /73/, /74/, /90/, www.fronius.com, www.lincolnelectric.com.

3.1 Modelarea matematică a dezvoltării forțelor electrodinamice ca efect al interacțiunii electromagnetice din zona de sudare

La sudarea cu două sârme, sistemul fizic din zona de sudare constă în existența într-un spațiu relativ redus dimensional a doi conductori străbătuți de curenți, între capetele cărora și piesele de sudat existând arce electrice.

Cele două arce pot fi privite, la rândul lor, ca doi conductori având rezistențe variabile atât în spațiu cât și în timp, de ordinul ohmilor și la capetele cărora se poate măsura o diferență de potențial cuprinsă între 10-50 V.

Din acest motiv se poate accepta modelul fizic constând din doi conductori neomogeni din punct de vedere dimensional și al rezistenței electrice, prin care circulă curenți de ordinul zecilor și sutelor de amperi. Fiind situați la distanțe cuprinse între 3-12 mm unul de celălalt, câmpurile electromagnetice generate de cei doi curenți se vor intersecta și vor interacționa reciproc /63/, /69/, /70/.

Interacțiunea electromagnetică propriu-zisă constă în dezvoltarea a două forțe electrodinamice cu care fiecare dintre cei doi conductori acționează asupra celuilalt, conform figurii 3.1.

Apariția acestor forțe în zona de sudare va conduce la modificarea procesului de ardere a arcelor și la modificarea modului de transfer al picăturilor de la capetele sârmelor către baie. Modificările în cauză au o influență negativă sau pozitivă asupra conducerii procesului, motiv pentru care este necesară controlarea evoluției acestor forțe în vederea stabilizării procesului de sudare.

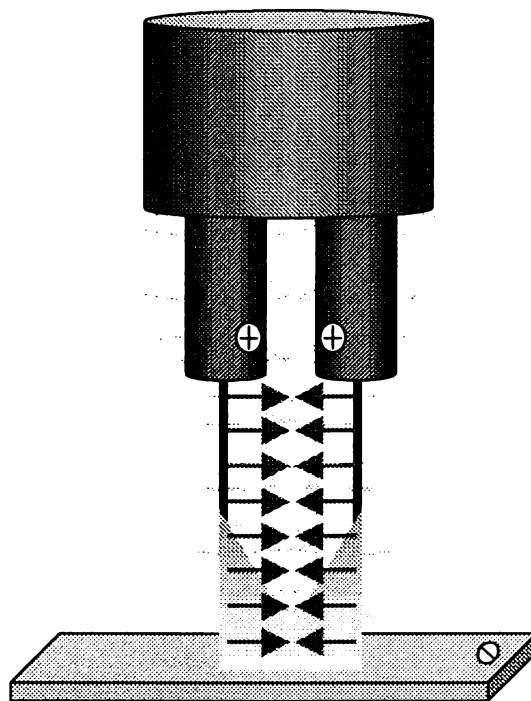


Fig. 3.1 Intersectarea câmpurilor electromagnetice din jurul celor două sârme de sudare și dezvoltarea forței electrodinamice

În vederea controlării dezvoltării, ca sens și modul, a forțelor electrodinamice este necesară crearea unui model matematic bazat pe modelul fizic prezentat anterior. Acest model fizic este asemănător modelului care definește noțiunea de amper, deci modelarea matematică a forțelor electrodinamice va avea la bază teorema Biot-Savart-Laplace /58/, /63/, /88/.

Pentru aplicarea acestei teoreme este necesară discretizarea conductorilor în segmente cu dimensiuni elementare: dl_1 și dl_2 . În vederea realizării unui model matematic cu aplicabilitate generală, se consideră că poziționarea relativă a celor doi conductori este oarecare în spațiu. Se particularizează numai sensurile celor doi curenți. În cazul general al sudării MIG/MAG polaritatea curențului este inversă (polul "+" la sârma electrod). Situațiile excepție sunt extrem de rare și sunt specifice sudării cu sârme tubulare al căror flux are un înalt caracter bazic. Pentru unele din aceste sârme producătorii recomandă utilizarea polarității directe (polul "-" la sârma electrod).

Noul model fizic astfel creat este prezentat în figura 3.2. În baza legilor electromagnetismului, cunoscându-se direcția și sensul curenților, în modelul fizic poate fi introdus vectorul inducție magnetică, \vec{B} , iar cu ajutorul regulii mâinii stângi, vectorul forță electrodinamică, \vec{F}_{ed} .

Pentru fiecare conductor în parte, vectorii inducție magnetică, forță electrodinamică și vectorul unității de lungime a conductorului sunt perpendiculari. Între vectorul inducție magnetică care acționează asupra unui conductor și vectorul unității de lungime al celui alt conductor există însă un unghi α dat de poziționarea relativă, în spațiu, a celor doi conductori.

Direcția vectorului inducție magnetică, \vec{B} , într-un punct al câmpului este tangentă la linia de câmp magnetic în acel punct, iar sensul este același cu cel al liniei de câmp. Forța electromagnetică, \vec{F} , este perpendiculară pe direcția conductorului și pe liniile câmpului magnetic, deci și pe vectorul \vec{B} , iar sensul ei depinde de sensul curentului și de sensul liniilor de câmp, deci și de sensul vectorului \vec{B} .

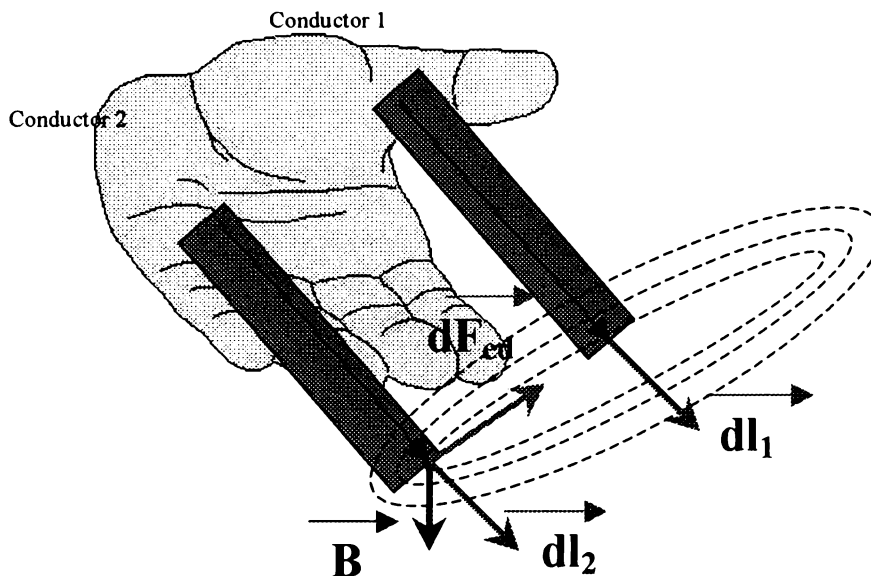


Fig. 3.2 Modelul fizic considerat pentru aplicarea teoremei Biot-Savart-Laplace

Forța electromagnetică este dependentă de curentul prin conductor și de produsul vectorial dintre inducția magnetică și lungimea conductorului, dată de expresia (3.1).

$$\vec{F} = I \cdot (\vec{B} \times \vec{l}) \tag{3.1}$$

Aplicând acestei relații teorema Biot-Savart-Laplace este posibilă exprimarea matematică a modului forței electrodinamice. Aplicarea teoremei Biot-Savart-Laplace presupune două etape. Prima etapă constă în determinarea intensității câmpului magnetic la o distanță oarecare r . În baza definiției intensității câmpului magnetic, \vec{H} , se poate scrie:

$$d\vec{H} = \frac{I_2 \cdot (d\vec{l}_2 \times \vec{r})}{4 \cdot \pi \cdot r^3} \tag{3.2}$$

Conform figurii 3.3, produsul vectorial $(d\vec{l}_2 \times \vec{r})$ se poate exprima scalar prin relația (3.3).

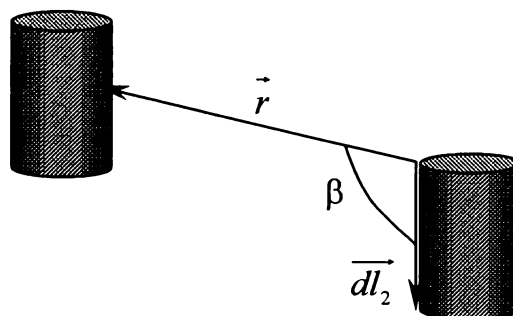


Fig 3.3 Reprezentarea fizică a produsului vectorial $(d\vec{l}_2 \times \vec{r})$

$$(d\vec{l}_2 \times \vec{r}) = dl_2 \cdot r \cdot \sin \beta \tag{3.3}$$

unde β este unghiul dintre cei doi vectori ai produsului. În acest caz, expresia intensității câmpului magnetic devine succesiv:

$$|d\vec{H}| = \frac{I_2 \cdot dl_2 \cdot r \cdot \sin \beta}{4 \cdot \pi \cdot r^3} \quad (3.4)$$

$$|d\vec{H}| = \frac{I_2 \cdot dl_2 \cdot \sin \beta}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \quad (3.5)$$

Datorită relației dintre inducția câmpului magnetic, \vec{B} și intensitatea câmpului magnetic, \vec{H} :

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \quad (3.6)$$

se poate scrie:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{I_2 \cdot dl_2 \cdot \sin \beta}{r^2} \quad (3.7)$$

Cea de-a doua etapă a aplicării teoremei Biot-Savart-Laplace constă în determinarea forței electrodinamice elementare care acționează asupra elementului de conductor electric din ecuațiile (3.1) și (3.7). Înlocuind expresia inducției magnetice (3.7) în expresia forței electromagnetice (3.1), rezultă succesiv:

$$|d^2\vec{F}| = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{I_2 \cdot dl_2 \cdot \sin \beta}{r^2} \cdot I_1 \cdot dl_1 \cdot \sin \alpha \quad (3.8)$$

$$|d^2\vec{F}| = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot \frac{dl_1 \cdot dl_2 \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta}{r^2} \quad (3.9)$$

unde α este unghiul dintre vectorii inducție magnetică, \vec{B} și primul conductor \vec{l}_1 .

Acesta este un model general al forței electrodinamice. Modelul specific sudării cu două sârme este prezentat în figura 3.4.

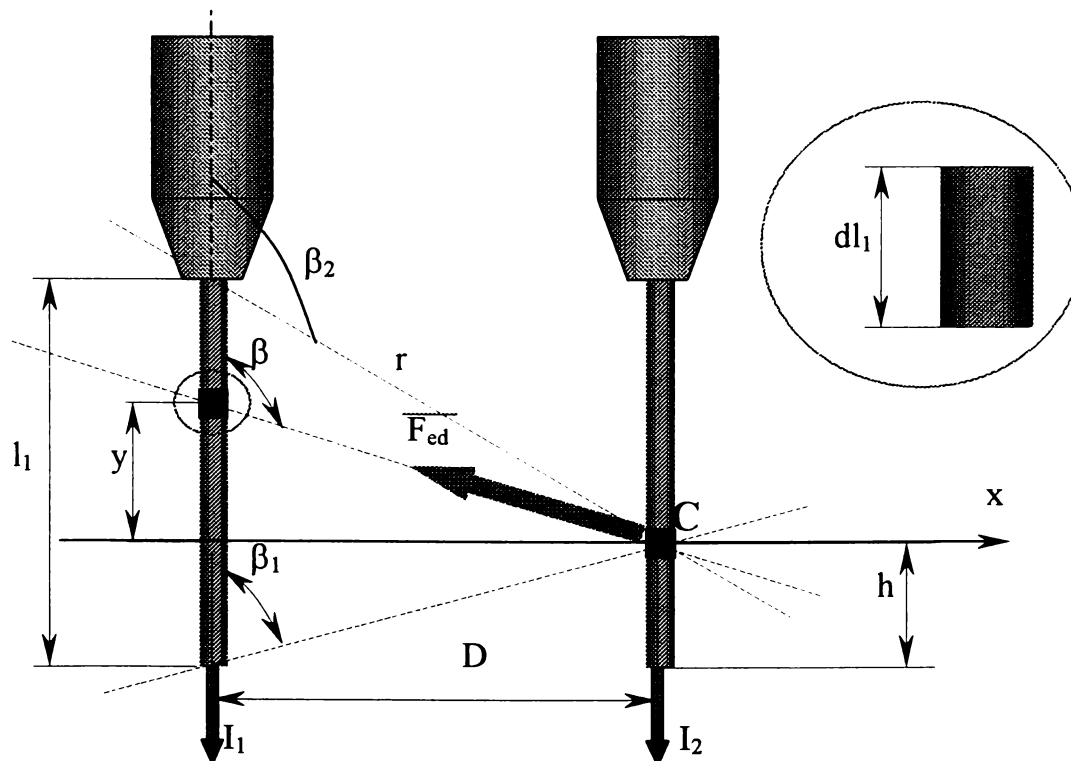


Fig. 3.4 Modelul fizic specific sudării cu două sârme necesar aplicării teoremei Biot-Savart-Laplace

Conform relației (3.7) inducția câmpului magnetic creat de curentul I_1 în punctul C (centrul elementului dl_2), după axa x , de către elementul dy este dată de relația (3.10):

$$|d\vec{B}_C| = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{I_1 \cdot dy \cdot \sin \beta}{r^2} \quad (3.10)$$

Conform relației (3.1) elementul de curent $I_1 \cdot dy$ acționează asupra elementului $I_2 \cdot dl_2$ cu o forță elementară de forma:

$$|d^2\vec{F}_{edC}| = I_2 \cdot dl_2 \cdot |d\vec{B}_C| \quad (3.11)$$

sau preluând expresia inducției câmpului magnetic din relația (3.10):

$$|d^2\vec{F}_{edC}| = I_2 \cdot dl_2 \cdot \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{I_1 \cdot dy \cdot \sin \beta}{r^2} \quad (3.12)$$

Din rațiuni geometrice, conform figurii 3.5, se poate scrie:

$$dy = \frac{D}{\sin^2 \beta} \cdot d\beta \quad (3.13)$$

astfel încât forța elementară, (3.12), care acționează devine succesiv:

$$d^2F_{ed} = I_2 \cdot dl_2 \cdot \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{I_1 \cdot \frac{D}{\sin^2 \beta} \cdot d\beta \cdot \sin \beta}{r^2} \quad (3.14)$$

$$d^2F_{ed} = I_1 \cdot I_2 \cdot dl_2 \cdot \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{\frac{D}{\sin^2 \beta} \cdot d\beta \cdot \sin \beta}{\left(\frac{D}{\sin \beta}\right)^2} \quad (3.15)$$

$$d^2F_{ed} = I_1 \cdot I_2 \cdot dl_2 \cdot d\beta \cdot \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{\sin \beta}{D} \quad (3.16)$$

$$d^2F_{ed} = I_1 \cdot I_2 \cdot dl_2 \cdot \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{\sin \beta \cdot d\beta}{D} \quad (3.17)$$

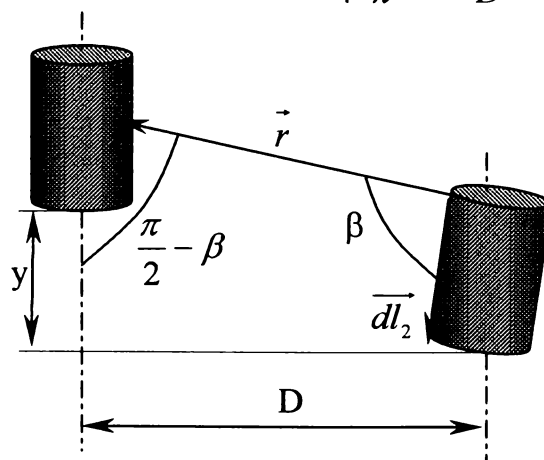


Fig. 3.5 Modelul geometric pentru exprimarea elementului de curent $I dy$

Întreaga forță dezvoltată de către elementele sârmei dl_1 asupra dl_2 care există în C, poate fi determinată cu relația (3.18):

$$d^2F_{ed} = I_1 \cdot I_2 \cdot dl_2 \cdot \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{\cos \beta_1 - \cos \beta_2}{D} \quad (3.18)$$

Direcția forței este perpendiculară pe sârmă, sensul ei depinzând de polaritățile celor doi curenți.

Deoarece în cazul sudării MIG/MAG este utilizată, de regulă, polaritatea inversă („+” la electrod), direcția forței electrodinamice este de la o sârmă către cealaltă. Efectul acestei orientări este devierea celor două arce de sudare unul către celălalt (figura 3.6).

Picăturile, de asemenea, sunt deviate către centrul băii de metal. Când este utilizată polaritatea directă (“-“ la electrod), cazul sudării cu o sârmă tubulară cu miez înalt bazic iar cealaltă sârmă de alt tip (deci polaritate inversă), cele două arce sunt îndepărtate unul de celălalt.

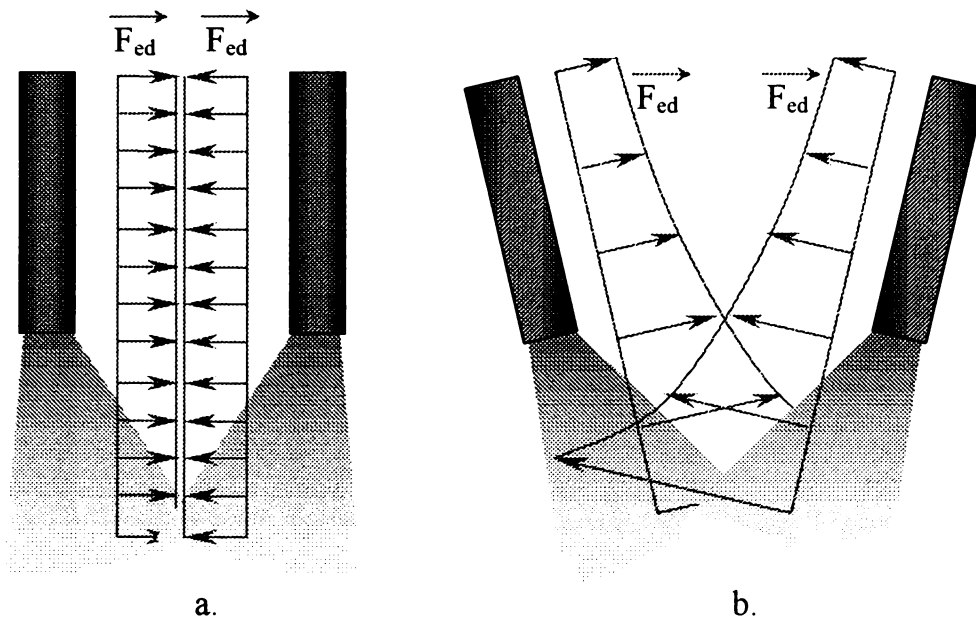


Fig. 3.6 Direcția și sensul forțelor electrodinamice când conductorii sunt paraleli (a.) și când conductorii nu sunt paraleli (b.)

În cazul în care cele două sârme de sudare sunt paralele, expresia (3.18) are o formă redusă, simplificată din rațiuni geometrice. Este chiar situația clasică de definiție a amperului ca și unitate de măsură. Dacă cele două sârme sunt paralele unghiurile β_1 și β_2 capătă valorile:

$$\beta_1 = 0 \tag{3.19}$$

$$\beta_2 = \pi \tag{3.20}$$

Introducând aceste valori în expresia (3.18) aceasta devine:

$$F_{ed} = I_1 \cdot I_2 \cdot l \cdot \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi \cdot D} \tag{3.21}$$

În figura 3.7 este prezentată grafic variația forței electrodinamice pentru o serie de perechi de curenți de sudare, distanța dintre sârme fiind de 10 mm.

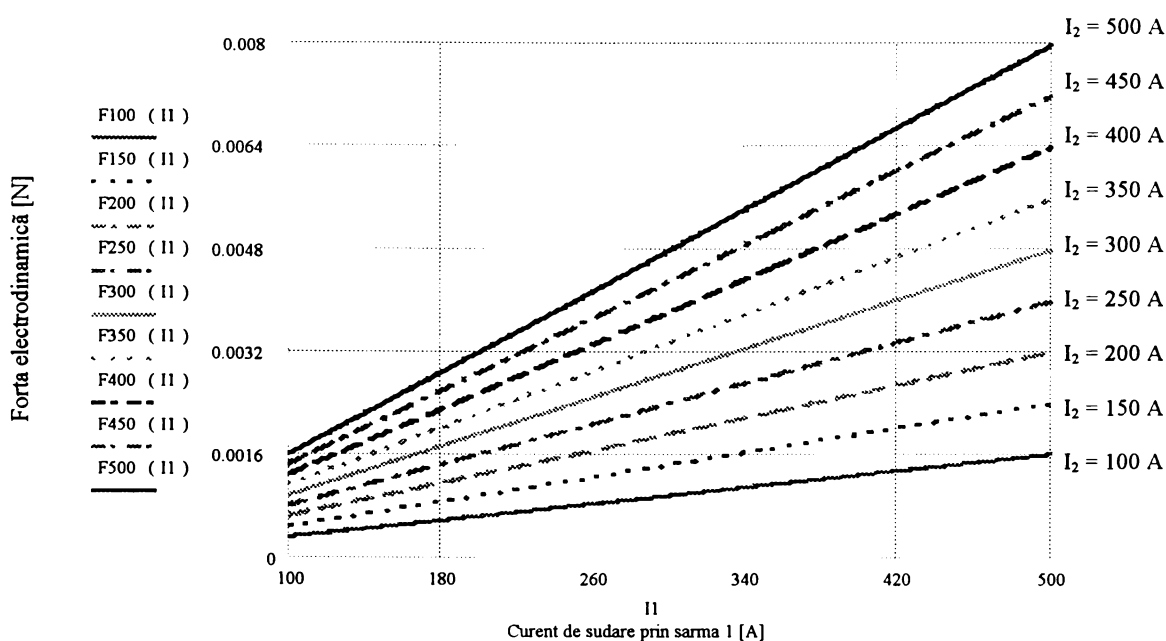


Fig. 3.7 Forța electrodinamică în cazul a două sârme paralele

Atât expresia (3.18) cât și expresia (3.21) sunt valabile în cazul conductorilor filiformi. Renunțând la această ipoteză și considerând situația reală a două sârme de sudare solide cu secțiunile circulare având razele R_1 și R_2 (figura 3.8a) se poate scrie inducția magnetică în interiorul conductorului la distanța x față de centrul conductorului [58], [88] (figura 3.8b):

$$B = I_{S_2} \cdot \frac{\mu_0}{R_1^2 \cdot \pi} \cdot \frac{l_1}{2 \cdot \pi \cdot x} \cdot \pi^2 \cdot x^2 \quad (3.22)$$

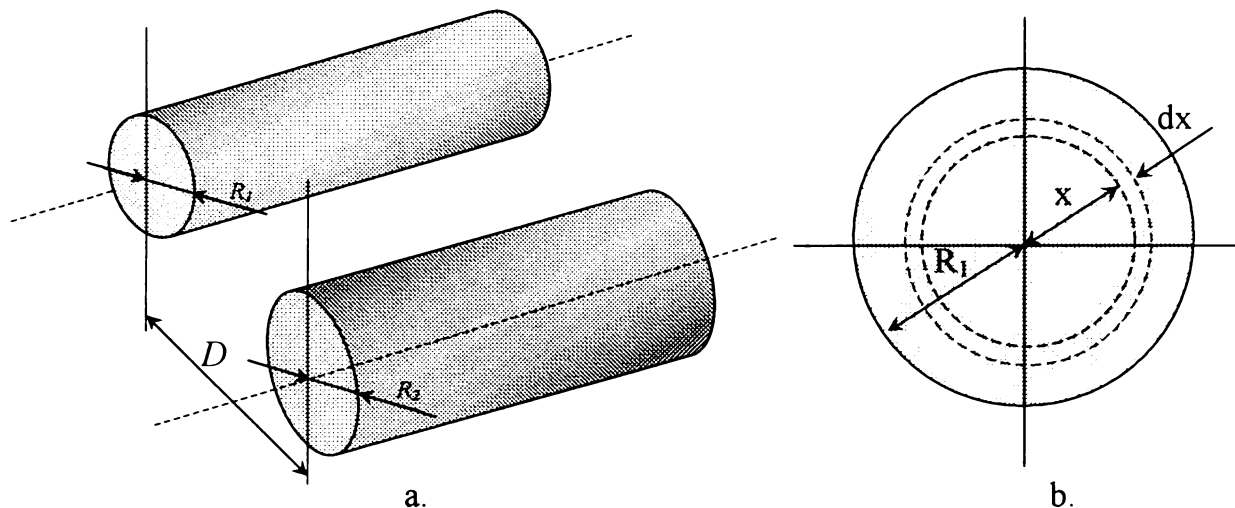


Fig. 3.8 Modelul nesimplificat considerat în calcul

Continuând pe raționamentul anterior, expresia forței electrodinamice dezvoltate în cazul a doi conductori paraleli cu lungimea l , având secțiunea circulară și aflați la distanța D unul de celălalt este:

$$F_1 = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot l \cdot \frac{2}{D - R_2} \cdot \left[\sqrt{1 + \left(\frac{D - R_2}{l} \right)^2} - \frac{D - R_2}{l} \right] \quad (3.23)$$

$$F_2 = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot l \cdot \frac{2}{D - R_1} \cdot \left[\sqrt{1 + \left(\frac{D - R_1}{l} \right)^2} - \frac{D - R_1}{l} \right] \quad (3.24)$$

sau în cazul în care cele două sârme de sudare au aceeași secțiune:

$$R_1 = R_2 = R \quad (3.25)$$

$$F = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot l \cdot \frac{2}{D - R} \cdot \left[\sqrt{1 + \left(\frac{D - R}{l} \right)^2} - \frac{D - R}{l} \right] \quad (3.26)$$

Utilizând o foaie de calcul dintr-un program de calcul tabelar de tip EXCEL se pot determina valorile forței electrodinamice pentru orice situație concretă de interacțiune electromagnetică ce poate apare la sudarea cu mai multe sârme.

Este evidentă influența puternică a valorilor curenților de sudare și lungimilor capetelor libere ale sârmelor asupra modulului forței electrodinamice. Existența simultană a doi curenți de ordinul sutelor de amperi conduce la obținerea unor forțe de ordinul mili-newton-ilor, ceea ce înseamnă relativ mult pentru un arc a cărui rigiditate este în general doar puțin mai mare decât rigiditatea vânei de fluid de protecție care îl înconjoară.

Interpretând fizic relația (3.17), cu cât analiza modulului forței electrodinamice se apropie de baia de metal, cu atât valoarea locală este mai mare, în cazul în care capetele dinspre arce ale sârmelor se apropie.

Modelele matematice prezentate sunt destinate corectării modificărilor introduse de forțele electrodinamice în sistemul senzor-arc.

Pentru o mai bună imagine a ceea ce înseamnă valoarea forței electrodinamice și efectul ei asupra arcului de sudare, în figura 3.9 s-au prezentat valorile calculate ale forței electrodinamice pentru un caz concret de sudare cu transfer prin pulverizare.

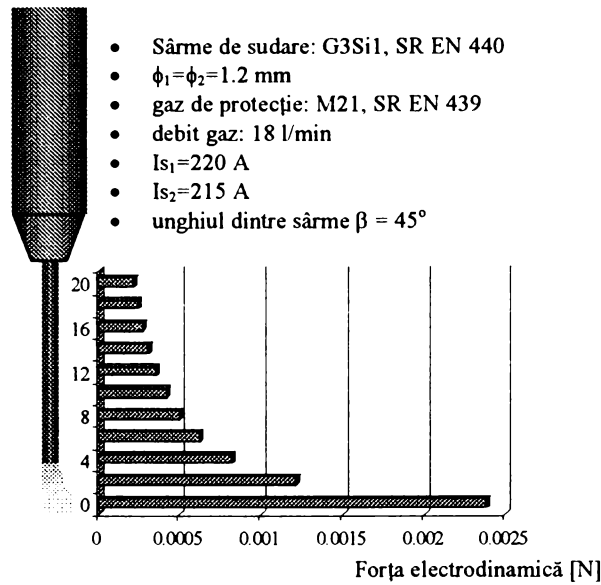


Fig. 3.9 Vizualizarea evoluției valorilor calculate ale forței electrodinamice pentru un caz concret de transfer prin pulverizare

Aplicând modelul prezentat anterior au putut fi determinate valorile modului forței electrodinamice pentru o serie cuprinzătoare de perechi de curenți de sudare. Astfel, în figurile 3.10 și 3.11 sunt prezentate grafic rezultatele calculului forțelor electrodinamice conform modelului matematic construit pe baza ecuației Biot-Savart-Laplace, în cazul sudării standard.

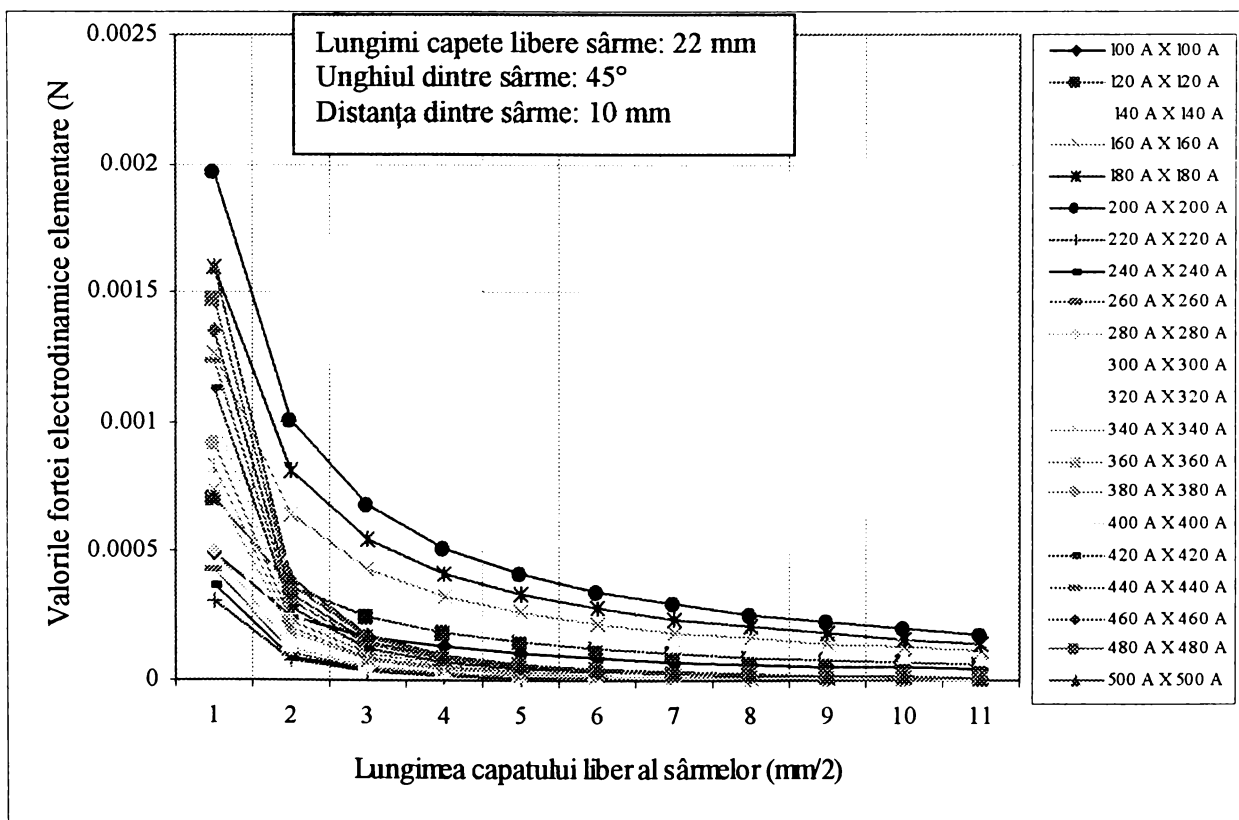


Fig. 3.10 Valorile calculate ale forței electrodinamice elementare la sudarea cu curent nepulsat

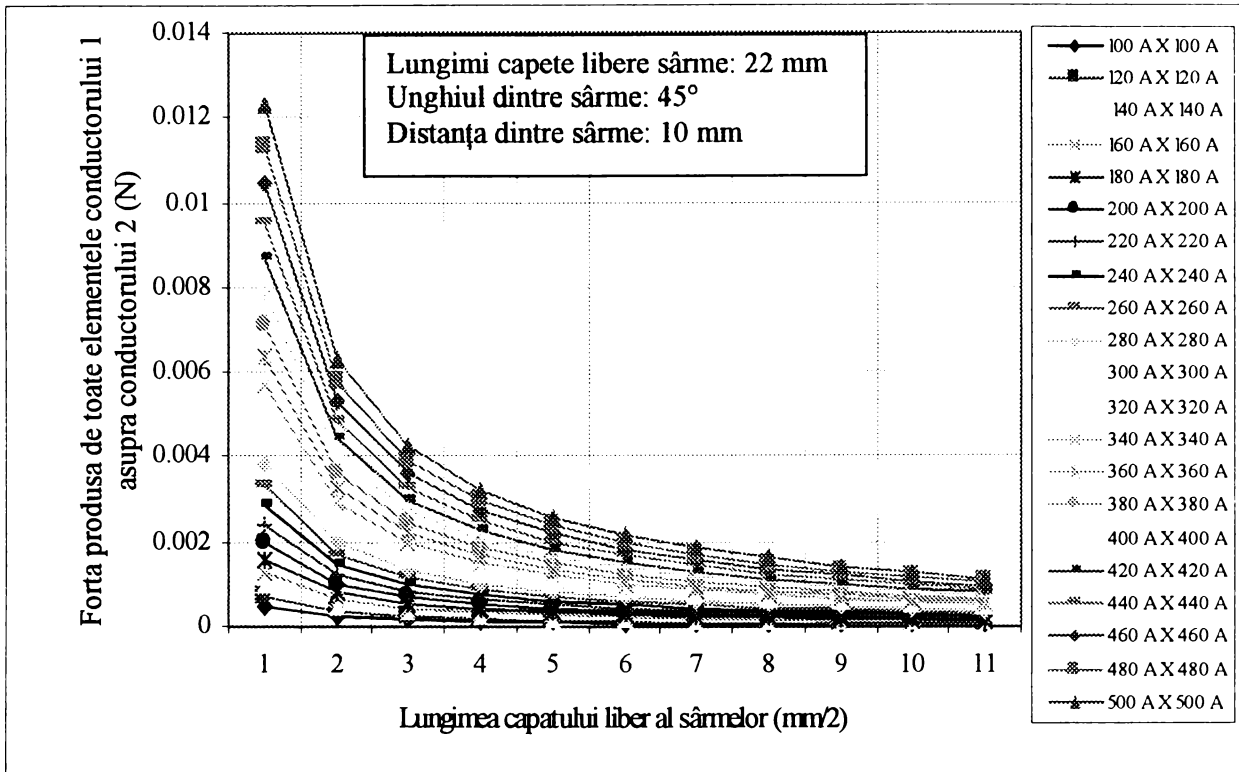


Fig. 3.11 Valorile calculate ale forței electrodinamice produse de fiecare element al unui conductor asupra celuilalt conductor la sudarea cu curent nepulsat

În figurile 3.12 și 3.13 sunt prezentate grafic rezultatele calculului forțelor electrodinamice conform modelului matematic construit pe baza ecuației Biot-Savart-Laplace, în cazul sudării cu curent pulsant, pulsurile fiind sincronizate cu o întârziere de 10%.

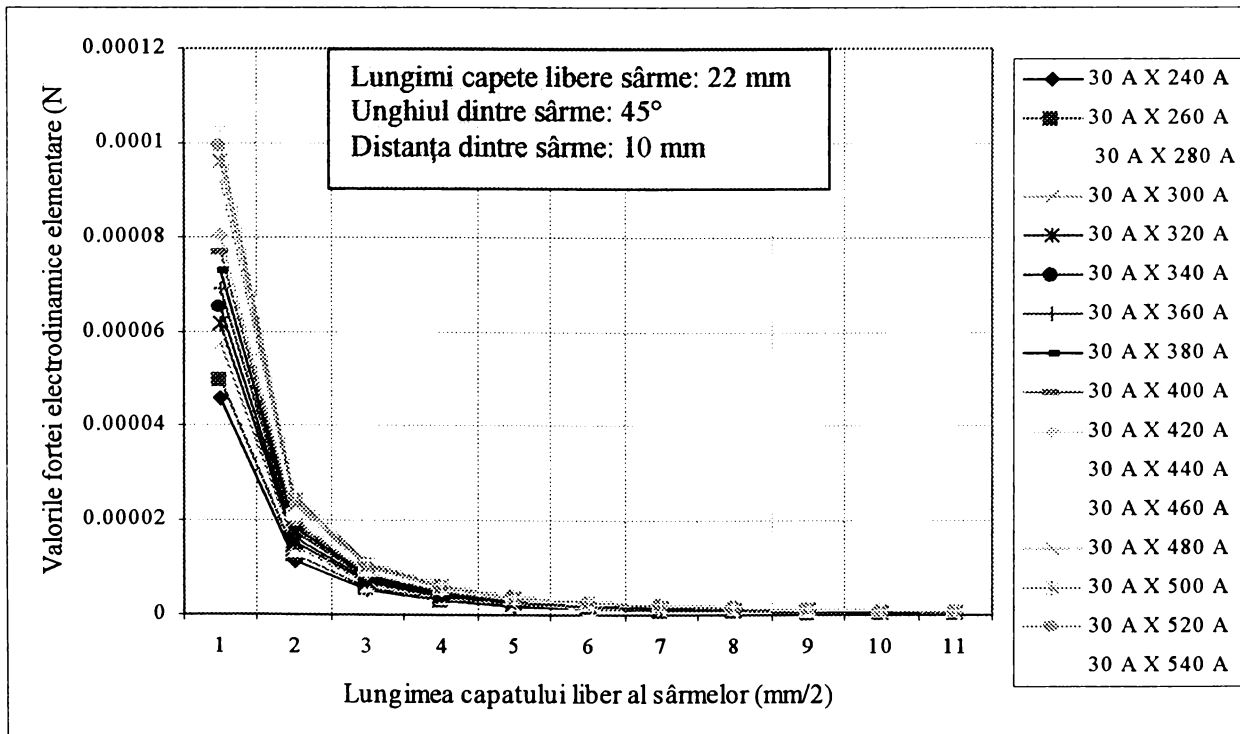


Fig. 3.12 Valorile calculate ale forței electrodinamice elementare la sudarea în curent pulsant sincronizat

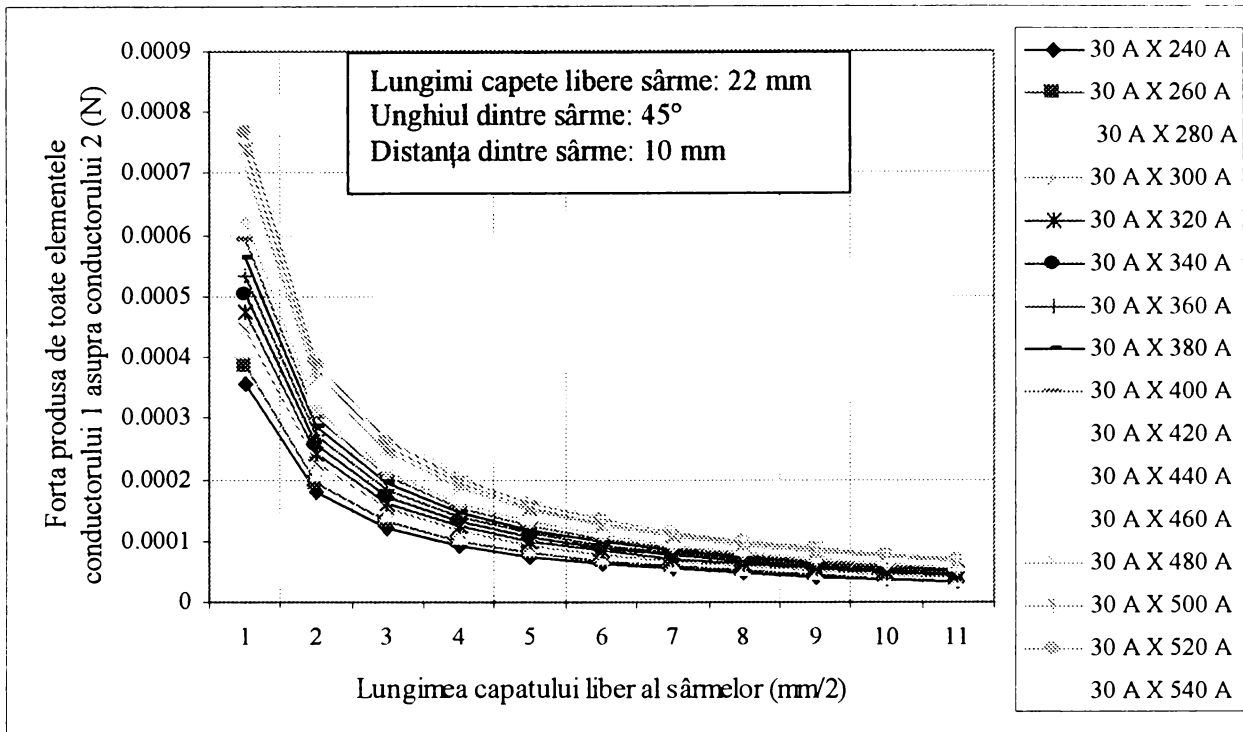


Fig. 3.13 Valorile calculate ale forței electrodinamice produse de fiecare element al unui conductor asupra celuilalt conductor la sudarea în curent pulsant sincronizat

3.2 Influența interacțiunii electromagnetice asupra curentului de sudare efectiv

Cercetările experimentale efectuate au evidențiat existența unei influențe importante a interacțiunii electromagnetice asupra valorilor efective ale curenților prin arcele de sudare. Influența respectivă se datorează a două fenomene fizice a căror dezvoltare este strâns legată de existența forțelor electrodinamice în spațiul celor două arce:

- modificarea modului de transfer de metal către baia de sudură sub influența forțelor electrodinamice;
- modificarea cantității de căldură care participă la topirea celei de-a doua sârme în sensul de avans, în cazul sudării în tandem.

Existența forțelor electrodinamice în spațiul ocupat de cele două arce înseamnă modificarea sistemului de forțe care acționează asupra picăturii care urmează a fi transferate. După cum se va prezenta în subcapitolul următor, forțele electrodinamice, prin direcția, sensul și modulul lor, sunt forțe care ajută la desprinderea picăturilor de metal de la capetele sârmelor. În acest caz cantitatea de metal transferat crește comparativ cu situația specifică sudării cu o singură sârmă.

Cum sistemul sursă de putere – arc de sudare funcționează după legea “viteza de topire și transfer a metalului sârmei trebuie să fie tot timpul egală cu viteza de avans al sârmei”, atunci sursa de putere va modifica parametrii electrici astfel încât să restabilească echilibrul.

Cu alte cuvinte, procesul prezentat decurge în felul următor:

- forțele electrodinamice dezvoltate în spațiul celor două arce de sudare măresc rata de transfer a metalului de la capetele sârmelor către baie

$$F_{ed} \Rightarrow \uparrow \text{cantității de metal transferat} \Rightarrow V_{topire} \neq V_{avans \text{ al sârmei}}$$

- efectul acestei mărimi va consta, în primă fază, în dezechilibrarea sistemului de sudare în sensul că arcul va fi alimentat în acest caz cu o cantitate insuficientă de sârmă pentru a putea menține echilibrul dintre viteza de topire și viteza de avans al sârmei electrod

$$V_{topire} \neq V_{avans \text{ al sârmei}} \Rightarrow \text{dezechilibrarea sistemului de sudare: } P_{emisă} > P_{necesară}$$

- pentru reechilibrarea sistemului sursa va fi nevoită să modifice puterea de topire pe care o emite, acțiune care va consta fizic în reducerea curentului de sudare

$$\text{Sursa de putere: } \downarrow \text{curentul prin arc} \Rightarrow P_{emisă} \downarrow \Rightarrow \text{echilibrarea sistemului}$$

Această reacție în lanț a fost evidențiată experimental prin trecerea forțată de la sudarea cu o singură sârmă la sudarea cu două sârme și invers, parametrii electrici de sudare fiind înregistrați de-a lungul întregului proces.

A doua modificare introdusă de interacțiunea electromagnetică constă în modificarea cantității de căldură care participă la topirea celei de-a doua sârme în direcția de avans a capului de sudare, la sudarea în tandem. Această situație este specifică sudării cu viteze mai mari de 100 cm/min. Ținând cont că viteze de 100-200 cm/min sunt uzuale pentru acest procedeu de sudare, se poate considera că această modificare introdusă de interacțiunea electromagnetică caracterizează, în general, procesul de sudare cu două sârme.

Imaginând un sistem fizic de sudare cu două sârme evoluând în tandem față de direcția de sudare (figura 3.14) se poate observa că devierea primului arc este, în general, mai accentuată decât devierea celui de-al doilea. Acest fenomen este datorat frecării dintre arcul cald și aerul rece la deplasarea cu viteze de sudare relativ mari, arcul având o rigiditate redusă, dată de valorile parametrilor electrici și de existența metalului topit care se transferă.

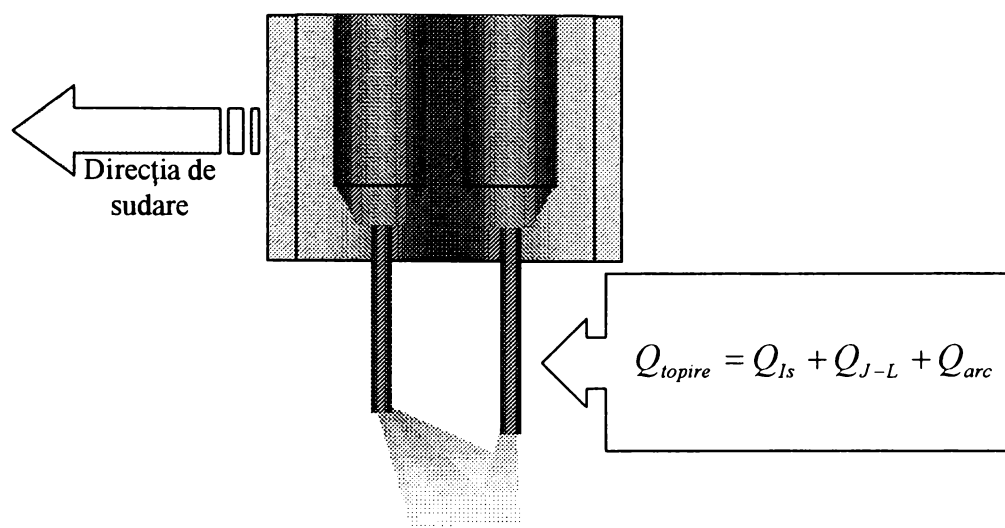


Fig. 3.14 Devierea primului arc către cea de-a doua sârmă și constituirea sa într-o sursă suplimentară de căldură

În acest caz, conform figurii 3.14, căldura care va participa la topirea sârmei a doua în sensul de avans al sudării este constituită din însumarea a trei surse termice: arcul electric propriu, efectul Joule-Lenz dezvoltat pe lungimea capătului liber al sârmei și căldura provenită de la primul arc deviat.

Transferul termic de la unul din arce către cealaltă sârmă se face preponderent prin radiație. O mică cantitate de căldură este, însă, transmisă și prin conducție datorită contactului direct dintre arc și sârma vecină. Deși acest contact direct este, în general, variabil și temporar, pentru simplificarea modelului matematic se va considera că acest contact este constant și continuu, cantitatea de căldură transferată prin conducție fiind în acest caz invariabilă /59/.

Modelul fizic considerat este prezentat în figura 3.15. Arcul electric este acceptat în formă tronconică stratificată, fiecare strat fiind caracterizat printr-o distribuție proprie a temperaturilor (figura 3.16).

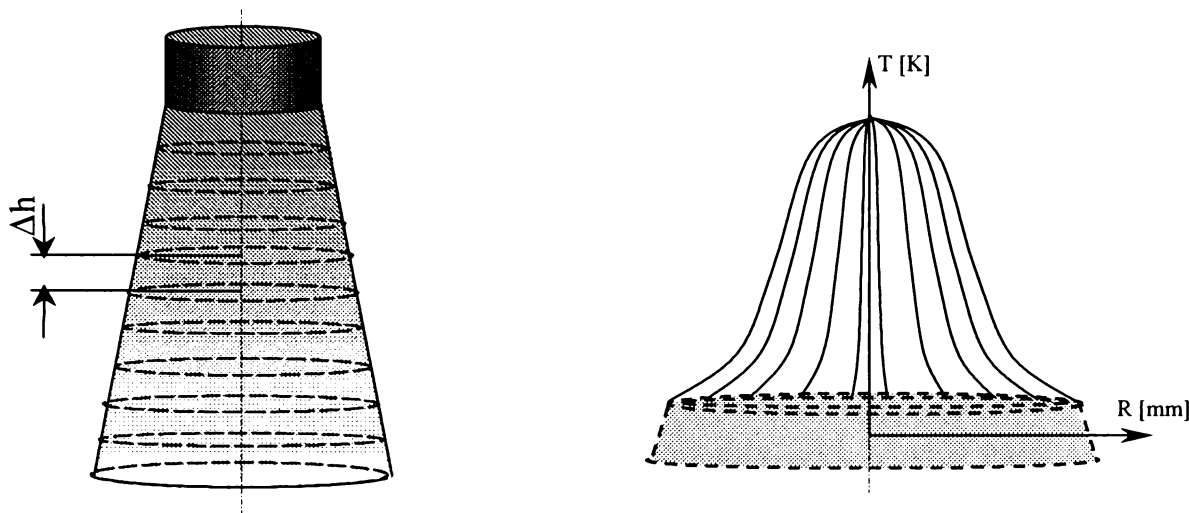


Fig. 3.15 Modelul fizic al arcului considerat pentru studierea transferului termic Fig. 3.16 Distribuția temperaturilor în arc

Acceptând distribuția termică propusă de Ushio și Matsuda în 1982 și acceptată de către Institutul Internațional de Sudură (IIW-IIS) în același an /95/ (figura 3.17),

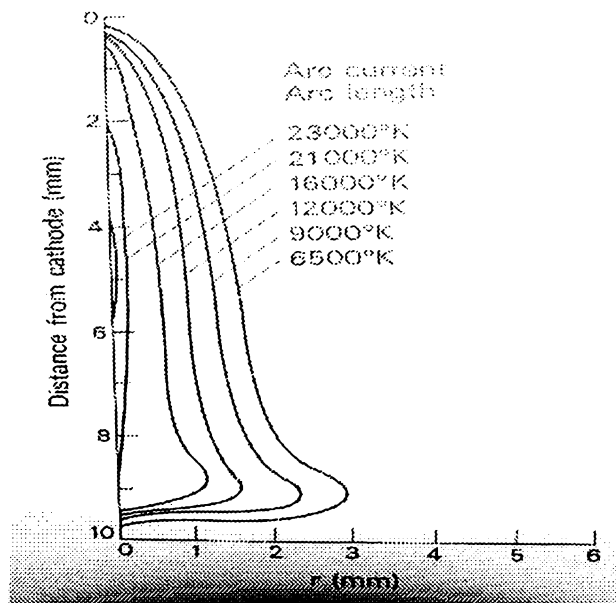


Fig. 3.17 Distribuția termică în arcul MAG pentru un curent de 200 A și o lungime a arcului de 10 mm, după Ushio și Matsuda, 1982 /95/

se propune acceptarea valorii de 6000 K drept temperatura constantă a învelitoarei tronconului, considerat drept sursă de radiație termică. Se consideră o valoare minimă pentru a se simplifica modelul prin neglijarea dispersiei termice datorită curentului de aer.

Fiecare strat considerat componentă a arcului va emite o cantitate de energie termică, fluxul acesteia putând fi cuantificat cu relația:

$$q = \sigma \cdot T^4 \quad (3.27)$$

unde:

- σ - coeficientul Stephan-Boltzmann pentru radiația termică /59/, $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K^4} \right]$
- T - temperatura medie a sursei termice [K].

Acest flux termic este creat de către sursa termică având emisia $Q_{sursă}$ printr-o suprafață tronconică elementară, $A_{sursă}$, adică:

$$Q_{sursă} = q \cdot A_{sursă} \quad (3.28)$$

Din relațiile (3.27) și (3.28) se poate determina cantitatea de căldură emisă de sursă:

$$Q_{sursă} = \sigma \cdot T^4 \cdot A_{sursă} \quad (3.29)$$

sau:

$$Q_{sursă} = \sigma \cdot T^4 \cdot 2 \cdot \pi \cdot R_m \cdot \Delta h \quad (3.30)$$

unde:

- R_m - raza medie a elementului tronconic (fiind vorba de un troncon cu înălțime elementară, cele două raze ale bazelor elementului tronconic pot fi considerate egale), [m]
- Δh - înălțimea elementului tronconic [m].

Această cantitate de căldură este emisă, însă, în toate direcțiile. Doar o parte a acestei emisii este recepționată de sârma vecină. Determinarea procentuală a cantității de căldură recepționată de sârma vecină este posibilă acceptând faptul că fiecare element emisiv din componența elementului tronconic emite spațial. Această ipoteză este prezentată în figura 3.18.

Din rațiuni geometrice se pot scrie 4 ecuații cu 4 necunoscute, conform sistemului:

$$\begin{cases} x = D - y \\ z^2 = D^2 - x^2 \\ (D + w)^2 = D^2 + l_{cl}^2 \\ \frac{w}{w + D} = \frac{y}{D} \end{cases} \quad (3.31-3.34)$$

Din acest sistem rezultă succesiv dimensiunea z necesară în calculul procentului de energie primită de sârma de sudare.

Din ecuația (3.34) rezultă expresia lui y :

$$y = \frac{D \cdot w}{D + w} \quad (3.35)$$

În această expresie se introduce expresia lui w rezultată din ecuația (3.33):

$$w = \sqrt{D^2 + l_{cl}^2} - D \quad (3.36)$$

Rezultă succesiv:

$$y = \frac{D \cdot (\sqrt{D^2 + l_{cl}^2} - D)}{\sqrt{D^2 + l_{cl}^2}} \quad (3.37)$$

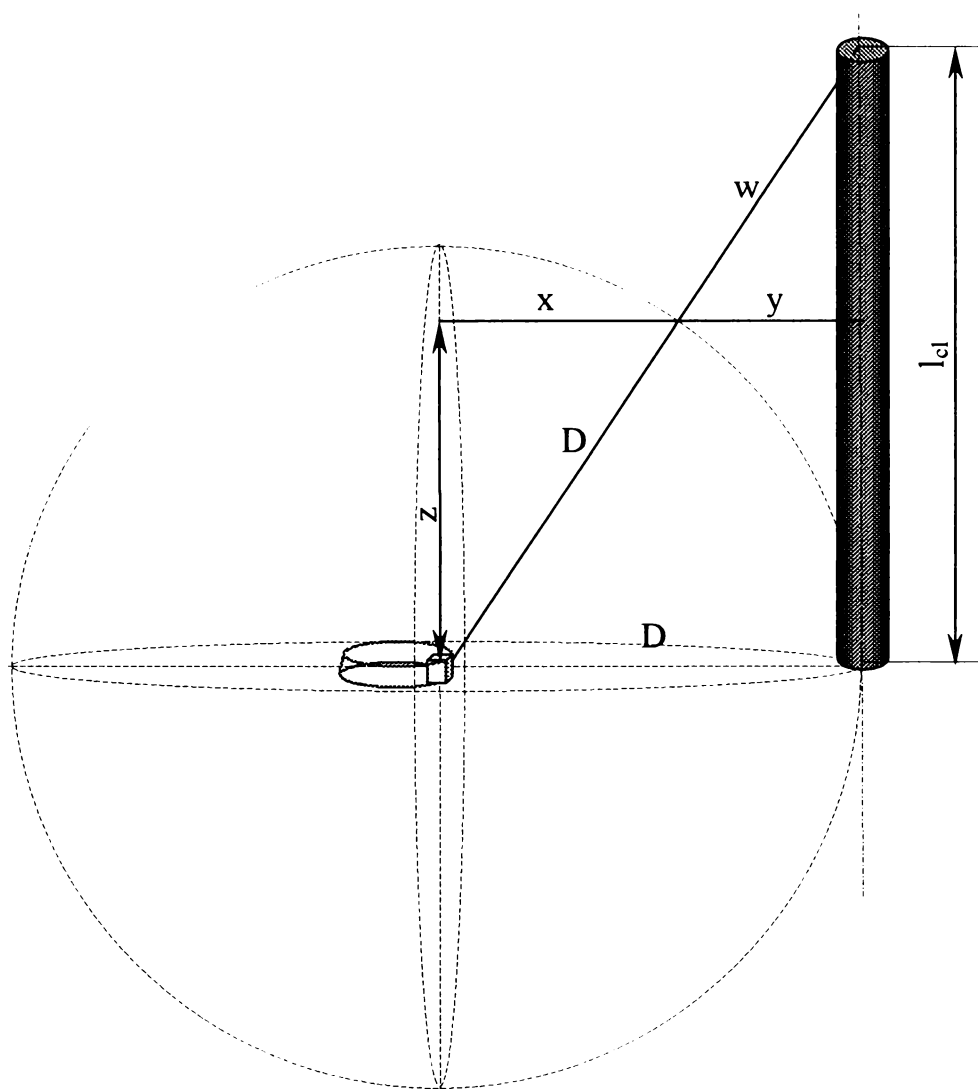


Fig. 3.18 Modelul fizic al emisiei de energie termică și transfer prin radiație considerat

$$y = D - \frac{D^2}{\sqrt{D^2 + l_{cl}^2}} \quad (3.38)$$

Introducând pe y în prima ecuație a sistemului rezultă expresia lui x în funcție de distanța dintre sârme D și lungimea capătului liber l_{cl} .

$$x = \frac{D^2}{\sqrt{D^2 + l_{cl}^2}} \quad (3.39)$$

Din ecuația (3.32) rezultă astfel expresia lui z :

$$z = \sqrt{\frac{D^2 \cdot l_{cl}^2}{D^2 + l_{cl}^2}} \quad (3.40)$$

Procentul de căldură receptat de sârma de sudare, prin radiație, de la un element al arcului vecin este dată de relația:

$$X_{1,2} = \frac{z \cdot \phi_s}{A_{\text{sup } r\text{-radiante}}} \quad (3.41)$$

Din relațiile (3.40) și (3.41) rezultă prin înlocuirea expresiei lui z :

$$X_{1,2} = \frac{\sqrt{\frac{D^2 \cdot l_{cl}^2}{D^2 + l_{cl}^2}}}{\pi \cdot D^2} \cdot \phi_s \quad (3.42)$$

Acest procent depinde de viteza cu care se deplasează sistemul arc-sârmă. Acceptând distribuția termică a lui Ushio și Matsuda /95/, se poate determina o relație între timpul necesar sârmei pentru a ajunge într-unul din punctele A, B, C, D sau O (figura 3.19) și temperatura punctului respectiv considerat drept sursă de radiație termică.

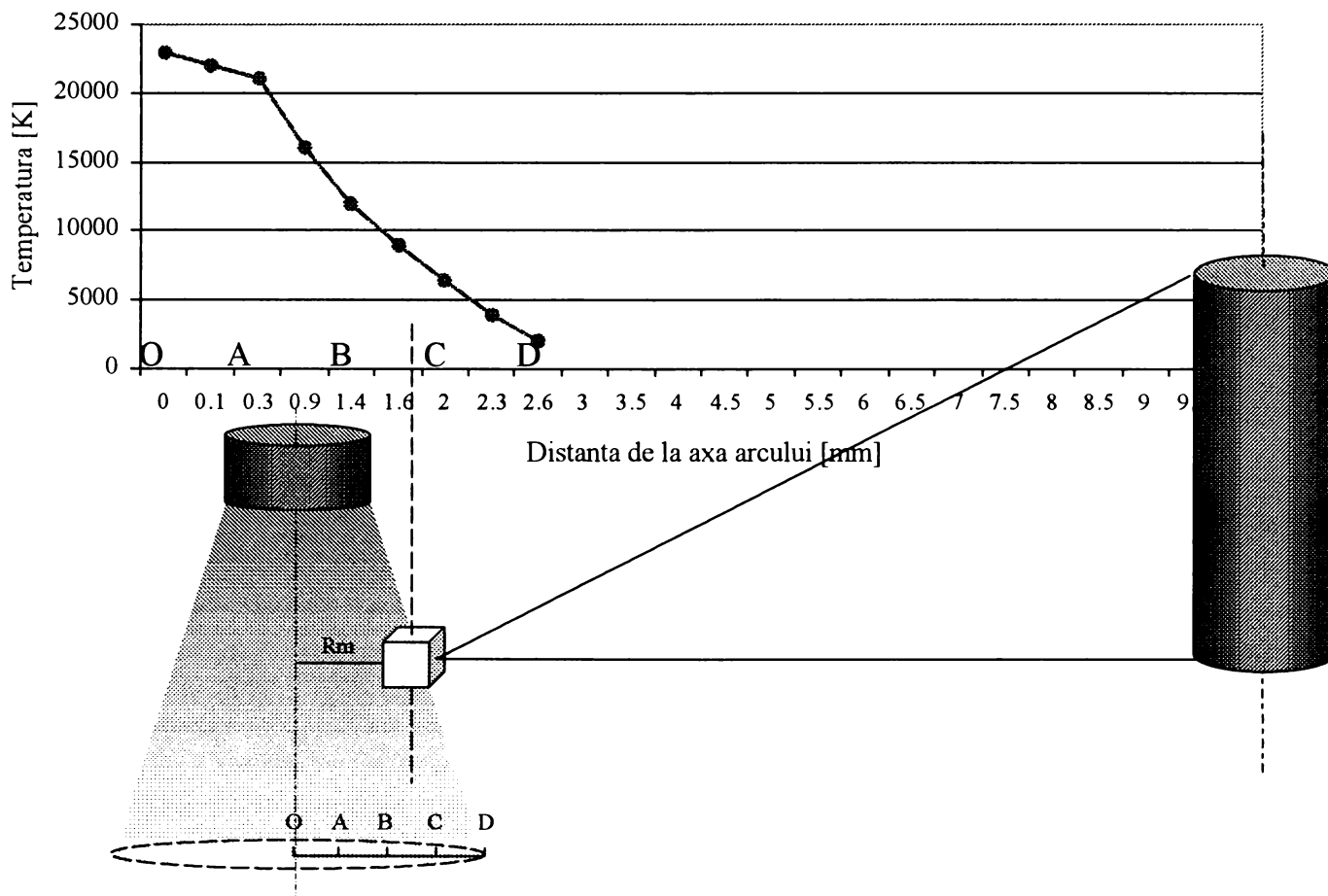


Fig. 3.19 Distribuția temperaturii de la axa arcului spre sârma de sudare vecină

Rezultă astfel o relație polinomială de gradul al treilea în timp. Considerând relația dintre viteza de sudare și timpul necesar străbaterii distanței D dintre cele două sârme:

$$t = \frac{D \cdot 60}{v_s} \tag{3.43}$$

rezultă o relație între temperatura punctului țintă și viteza cu care se deplasează sârma către punctul țintă:

$$T_i = f\left(\frac{1}{v_s}\right) \tag{3.44}$$

Din relațiile (3.30), (3.44) și (3.45) rezultă cantitatea de căldură recepționată de sârmă, prin radiație, de la arc de sudare vecin:

$$Q_{receptat} = Q_{sursa} \cdot X_{1,2} \tag{3.45}$$

$$Q_{receptat} = \sigma \cdot T\left(\frac{1}{v_s}\right)^4 \cdot 2 \cdot \pi \cdot R_m \cdot \Delta h \cdot X_{1,2} \tag{3.46}$$

Punând această relație într-o foaie de calcul Excel se pot determina cantitățile de căldură primite de sârma a doua prin radiație de la primul arc, pentru diferite situații: diverse devieri ale arcului 1 spre arc 2, diverse viteze de sudare, diverse forme de arc.

În figura 3.20 sunt prezentate valorile calculate ale energiei termice primite de sârmă pentru diverse devieri ale arcului (asimilate cu modificarea distanței D) și diverse viteze de avans al sârmei (50 cm/min, 60 cm/min, 70 cm/min, 80 cm/min, 90 cm/min, 100 cm/min).

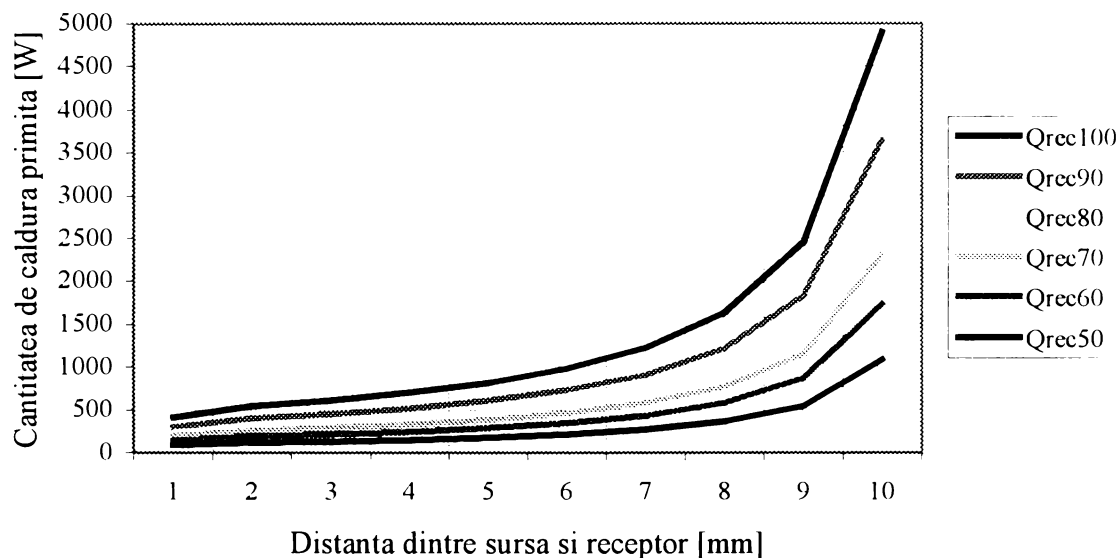


Fig. 3.20 Cantitatea de căldură primită de sârmă prin radiație de la arc vecin

Această căldură suplimentară conduce la scăderea curentului de sudare emis de sursă prin sârma respectivă. Verificarea acestui model s-a făcut prin simulare într-un program de analiză cu elemente finite /20/, ANSYS 5.7.

Pentru aceasta, a fost conceput în ANSYS un sistem fizic conform celui prezentat în figura 3.18. Condițiile impuse programului au fost aceleași cu cele considerate anterior. Concret, parametrii simulării sunt prezentați în figura 3.21. În figura 3.22 este prezentată evoluția iterativă a simulării. Analiza a fost neliniară, datorită ecuațiilor matriceale relativ complexe.

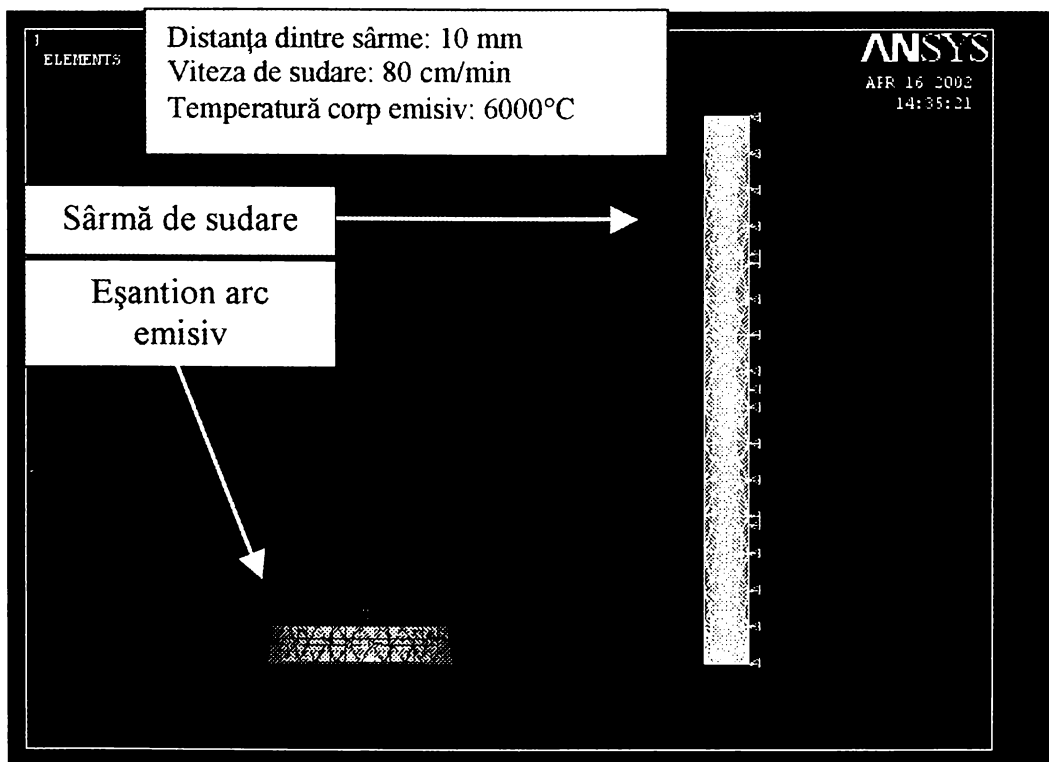


Fig. 3.21 Sistemul fizic utilizat în simulare

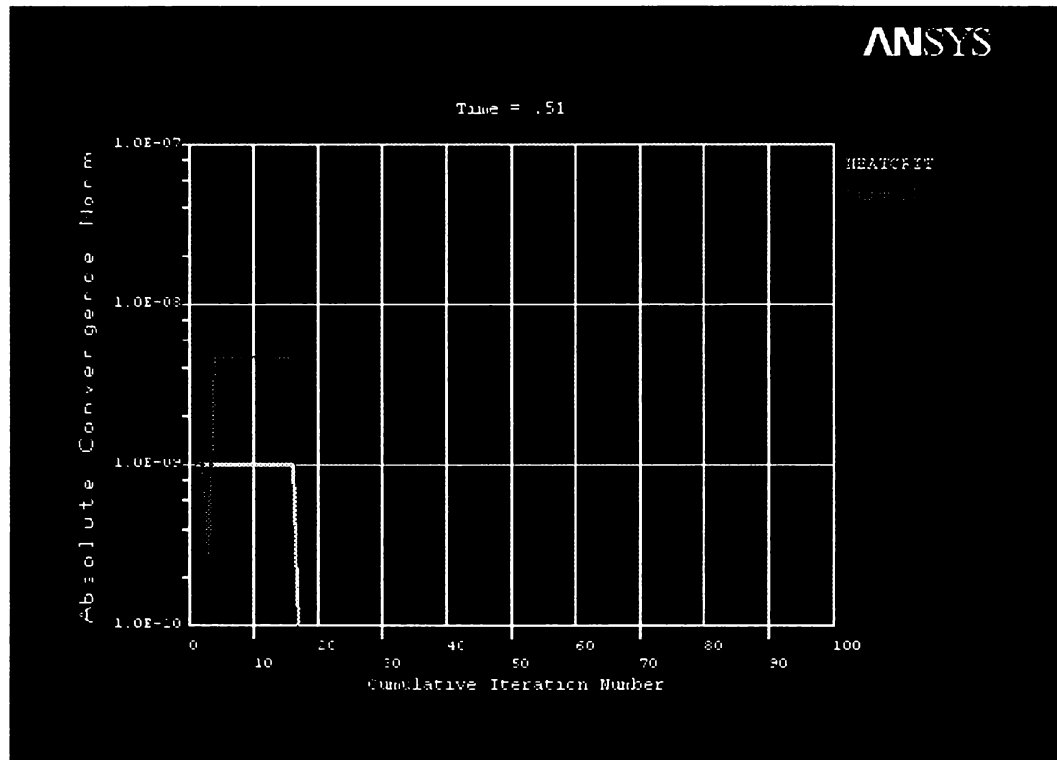


Fig. 3.22 Evoluția iterativă a analizei neliniare

Rezultatul a fost conform predicției oferite de modelul matematic propus: sursa suplimentară, introdusă de transferul termic prin radiație, are o putere, la nivelul suprafeței conductorului, de aproximativ 255 W.

În simulare s-a ținut cont de faptul că sârma de sudare are o temperatură de aproximativ 800°C în urma dezvoltării fenomenului Joule-Lenz la trecerea curentului de sudare considerat a fi de 200 A. Rezultatul este prezentat din punct de vedere energetic în figura 3.23.

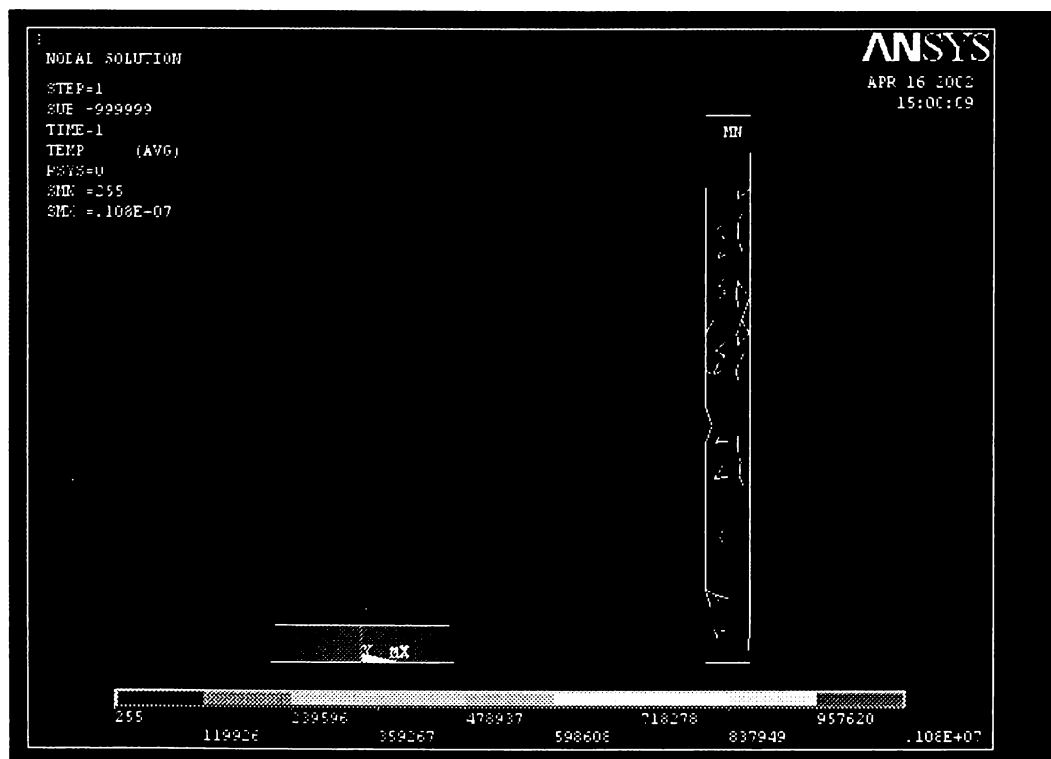


Fig. 3.23 Puterea calorică primită de sârma de sudare

Cuantificarea acestei scăderi este necesară în procesul de corecție a interpretării poziției momentane a capului de sudare.

Cele două fenomene descrise anterior au fost evidențiate experimental, interesul în existența lor fiind legat de necesitatea corectării legilor de funcționare a senzorului-arc.

Pentru evidențierea separată a celor două fenomene s-a considerat un sistem de sudare cu două sârme utilizat în prima fază în modul paralel, pentru a se evita dezvoltarea transferului termic prin convecție și radiație de la prima sârmă la cea de-a doua sârmă. Pornind procesul de sudare cu un singur arc amorsat, după 10 secunde s-a amorsat și cel de-al doilea arc, iar după alte 10 secunde s-a revenit la un singur arc. Înregistrarea curentului de sudare a evidențiat pentru cele trei situații valori diferite, ceea ce a permis acceptarea teoriei privind modificarea modului de transfer datorită existenței forțelor electrodinamice.

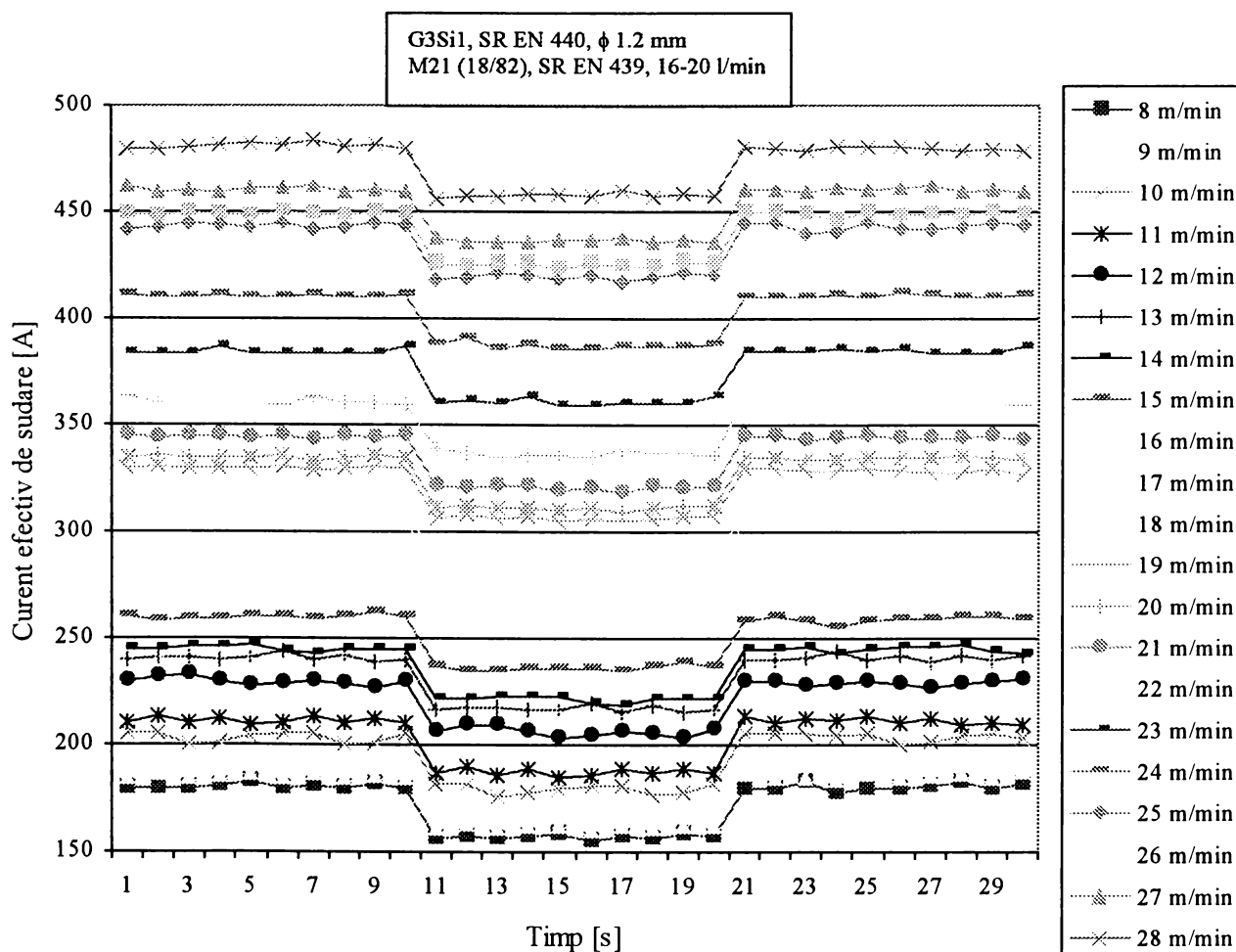
În figurile 3.24 a și b sunt prezentate valorile curentului de sudare pentru cele 3 faze ale sudării, în cazul sudării cu curent nepulsat (a.) și în cazul cu curent pulsant (b.), modul paralel.

Evidențierea directă a celui de-al doilea fenomen prezentat anterior nu a fost posibilă. Repetând însă experimentul, dar în modul tandem și având o viteză de sudare de 120 cm/min s-a observat că modificarea curentului de sudare a fost mai accentuată.

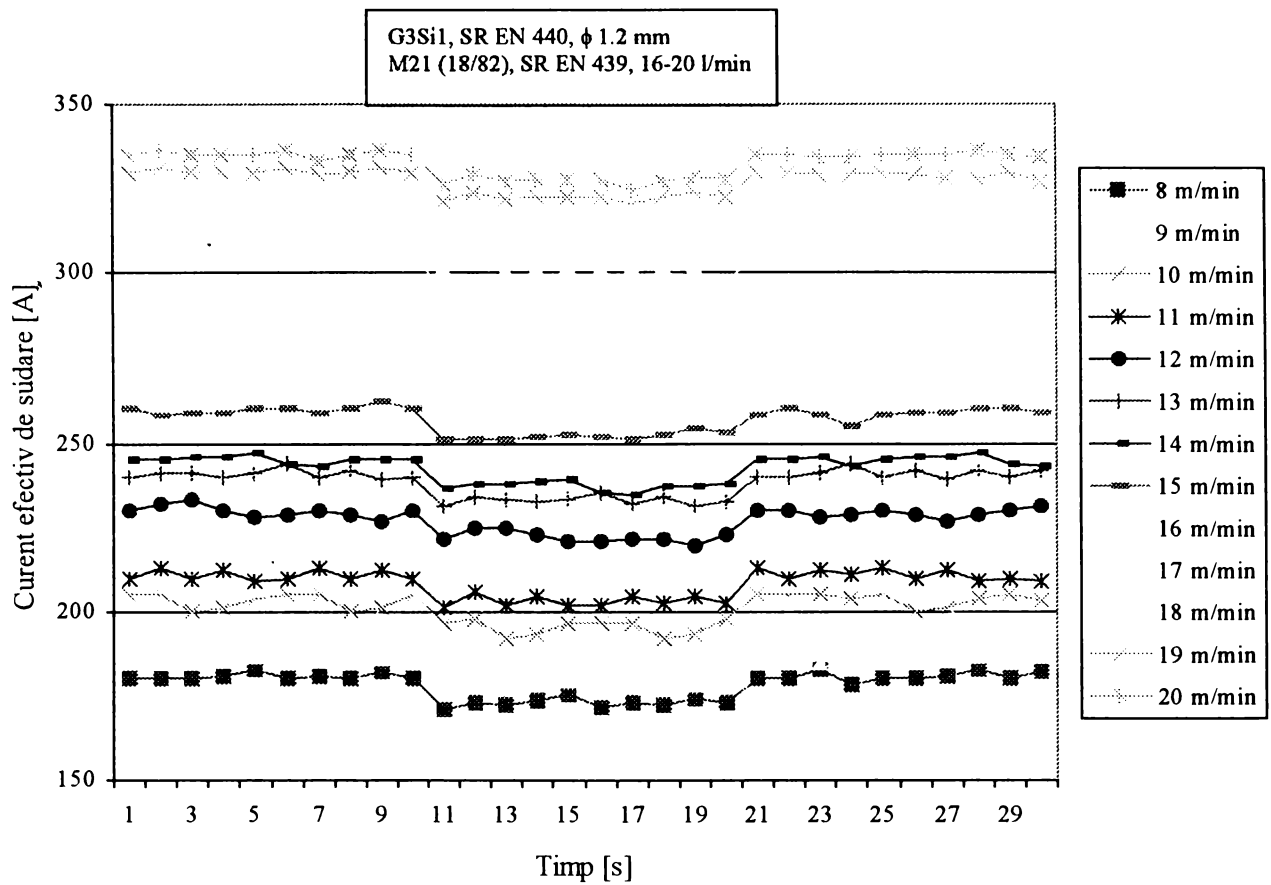
În figurile 3.25 a și b sunt prezentate valorile curentului de sudare pentru cele 3 faze ale sudării, în cazul sudării cu curent nepulsat (a.) și în cazul cu curent pulsant (b.), modul tandem.

Astfel, limitele diferențelor între curentul de sudare la sudarea cu o singură sârmă și curentul de sudare la sudarea cu două sârme au fost după cum urmează:

- sudarea în curent nepulsat, modul paralel: $\Delta I = 22 - 25 A$;
- sudarea în curent pulsant sincronizat, modul paralel: $\Delta I = 6 - 8 A$;
- sudarea în curent nepulsat, modul tandem: $\Delta I = 28 - 31 A$;
- sudarea în curent pulsant sincronizat, modul paralel: $\Delta I = 7 - 9 A$.

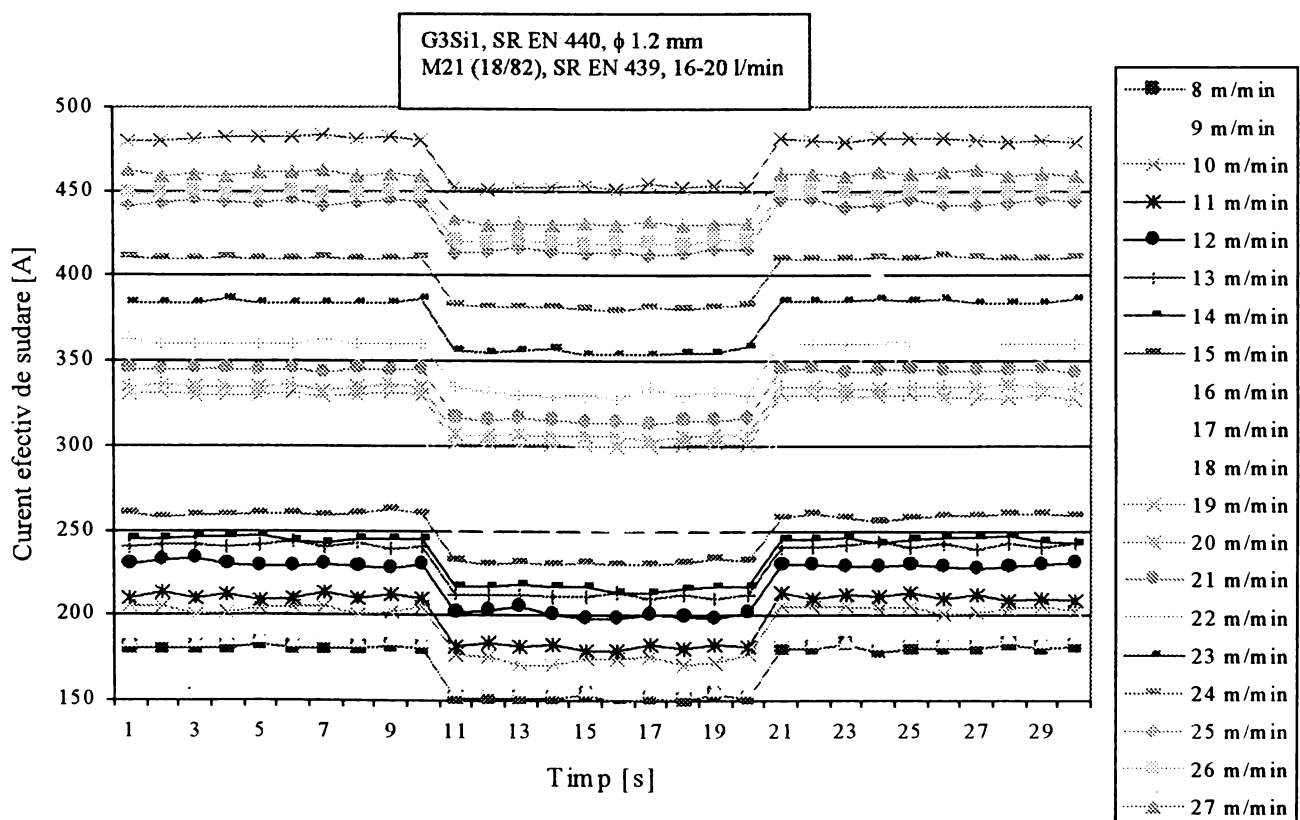


a.



b.

Fig. 3.24 Valorile înregistrate ale curentului de sudare la trecerea de la sudarea cu o sârmă la sudarea cu două sârme și invers, în cazul sudării cu curent nepulsat (a.) și în cazul cu curent pulsant (b.), modul paralel



a.

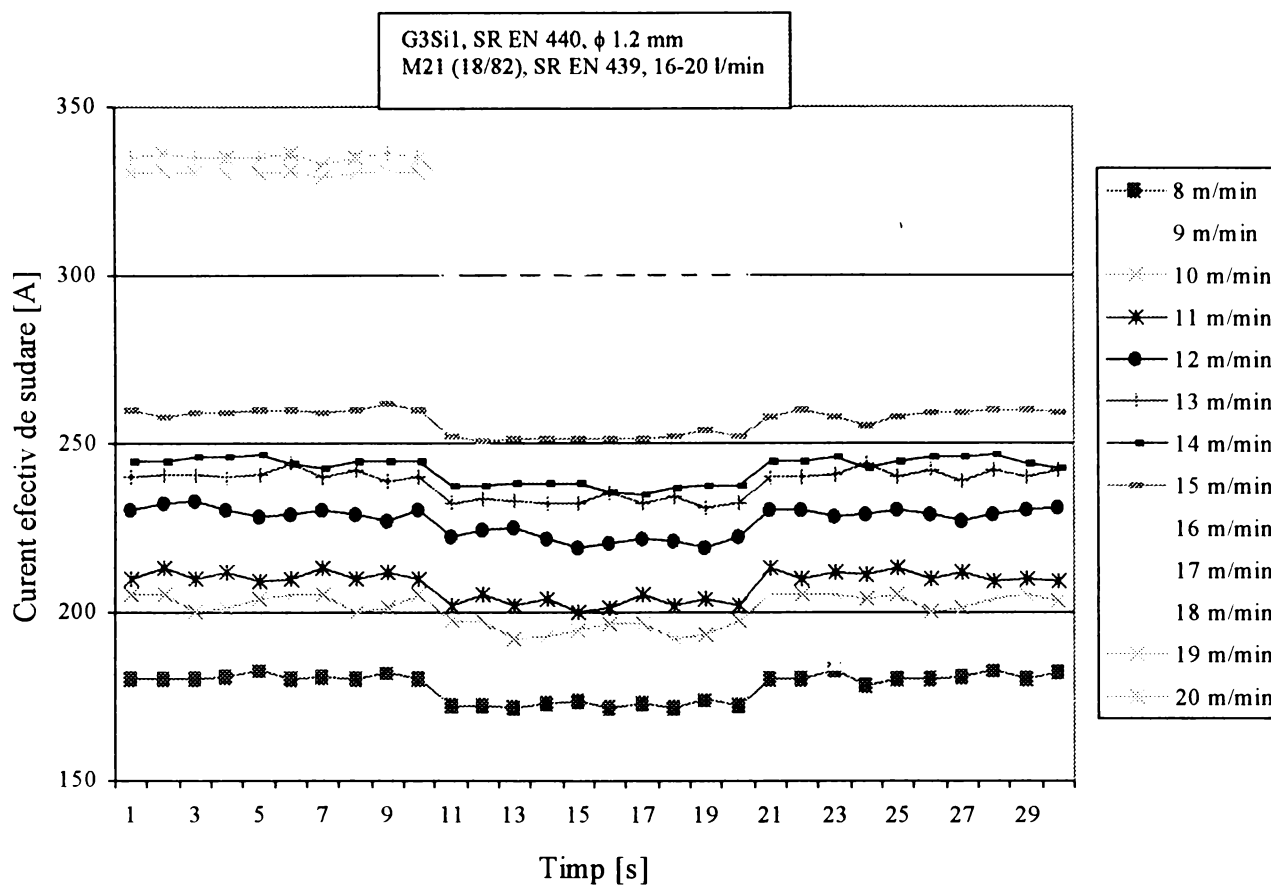


Fig. 3.25 Valorile înregistrate ale curentului de sudare la trecerea de la sudarea cu o sârmă la sudarea cu două sârme și invers, în cazul sudării cu curent nepulsat (a.) și în cazul cu curent pulsant (b.), modul tandem

Cunoașterea acestor modificări ale curentului de sudare sunt necesare la corectarea semnalului de referință care se va compara cu semnalul real achiziționat în timpul funcționării senzorului-arc.

3.3 Influența forțelor electrodinamice asupra transferului de metal

Transferul de metal reprezintă scopul fenomenelor fizice dezvoltate natural sau artificial în spațiul de arc. Crearea artificială a arcului de sudare, topirea unui metal de provenit dintr-o sursă exterioară componentelor de sudat, facilitarea dezvoltării unor forțe și reducerea altora, modificarea tensiunii superficiale dintre metalul lichid și metalul solid prin oxidare, sunt numai câteva din acțiunile efectuate de cel care conduce procesul de sudare, având drept scop transferul de metal de la capătul sârmei de sudare către baia de sudură.

Prin menirea sa, transferul de metal este o caracteristică a eficienței tehnice și economice a procesului de sudare [61], [66]. Din acest motiv, procesul de sudare este privit, în general, din două puncte de vedere: procesul de amorsare și ardere a arcului și procesul de transfer de metal [7], [10], [11], [12], [19], [26], [30], [26], [31], [62].

În funcție de procedeul de sudare cu arc electric și electrod fuzibil utilizat, transferul de metal prezintă diferite caracteristici. Sudarea MIG/MAG este un procedeu relativ bine cunoscut, cercetările efectuate în ultimii 10-15 ani evidențiind principalele sale caracteristici din punct de vedere al transferului de metal [10], [11], [35], [42], [45], [46], [47], [62].

Literatura de specialitate nu prezintă însă decât un număr extrem de redus de titluri privind transferul de metal la sudarea cu două sârme în mediu de gaze protectoare /13/, /73/. În continuare, pornind de la transferul de metal la sudarea MIG/MAG clasică se vor prezenta principalele caracteristici ale transferului de metal la sudarea cu două sârme, caracteristici evidențiate de autor prin cercetări experimentale și prin verificarea experimentală a modelelor matematice dezvoltate în vederea realizării unui senzor-arc la sudarea cu două sârme.

3.3.1 Fenomene care stau la baza procesului de transfer

Fenomenele care stau la baza procesului de transfer de metal la sudarea cu arc electric sunt de natură electrică, electromagnetică, mecanică și chimică. Suma efectelor acestor fenomene determină desprinderea sau nedesprinderea picăturii de la capătul sârmei, proiectarea sau căderea liberă către baia de metal și păstrarea unității sau fragmentarea prin explozie a picăturii în timpul detașării, transportului sau atingerii băii de metal.

Toate aceste fenomene se manifestă prin dezvoltarea unor forțe specifice ale căror orientări și module determină evoluția metalului topit de la capătul sârmei.

Fenomenele de natură electrică se desfășoară atât la scară macroscopică cât și la scară microscopică și se datorează diferenței de potențial dintre capătul sârmei electrod și piesa de sudat. Este, practic, condiția de existență a fenomenului de topire prin efectul Joule-Lenz dezvoltat pe lungimea capătului liber al sârmei și prin arcul electric amorsat între cei doi electrozi. La scară micro- ionii de metal și electronii sunt accelerați în câmpul electric către piesa aflată la polul negativ al sursei, respectiv către capătul sârmei, creându-se astfel un flux de particule metalice accelerate, al cărui debit depinde de intensitatea câmpului electric /10/, /62/, /95/.

Căldura dezvoltată prin efect Joule-Lenz poate fi exprimată prin ecuația:

$$Q = \frac{\rho_e \cdot l}{S} \cdot I^2 \cdot t \quad (3.47)$$

unde:

- Q – căldura dezvoltată prin efect Joule-Lenz pe capătul liber al sârmei [J];
- $\frac{\rho_e \cdot l}{S}$ - rezistența electrică a capătului sârmei (ρ – rezistivitatea electrică a materialului din care este confecționată sârma, l – lungimea capătului liber al sârmei, S – aria secțiunii transversale a sârmei) [Ω];
- I_s – curentul de sudare care străbate capătul sârmei [A];
- t – timp [s].

Coloana arcului se caracterizează astfel printr-o temperatură suficient de mare ca să conducă electric și să topească capătul sârmei.

Fenomenele de natură electromagnetică sunt datorate dezvoltării câmpurilor electromagnetice în jurul sârmelor de sudare ca urmare a existenței curenilor de sudare de ordinul sutelor de amperi prin acestea. La trecerea unui curent printr-un conductor, în jurul acestuia se dezvoltă concentric un câmp electromagnetic a cărui intensitate depinde de mărimea curentului respectiv, sensul liniilor de câmp fiind dat de direcția în care “curge” curentul, deci de polaritatea acestuia, conform regulii “burghiului” sau “mâinii drepte” (figura 3.20 a).

În cazul în care conductorul este fluid, acesta interacționează cu propriul său câmp magnetic, interacțiunea manifestându-se prin dezvoltarea unor forțe radiale de contracție, care produc o comprimare spre interior a conductorului (figura 3.26 b). Acest fenomen poartă numele de “efect pinch” /10/, /11/, /62/, /95/.

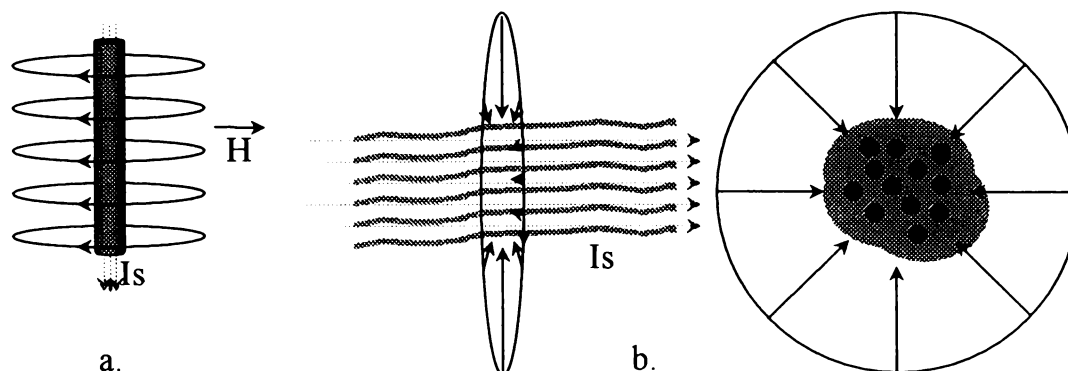


Fig. 3.26 a. Câmpul magnetic din jurul unui conductor străbătut de un curent electric
 b. Efectul pinch, manifestare a interacțiunii dintre un conductor fluid și propriul său câmp magnetic

În cazul sudării cu mai multe sârme fenomenele de natură electromagnetică sunt mai complexe. Pe lângă efectul pinch descris anterior, conform celor prezentate la începutul acestui capitol, mai există o interacțiune între câmpurile electromagnetice existente, mai precis între un câmp electromagnetic din jurul unei sârme de sudare și curentul care trece printr-o sârmă de sudare învecinată intersectată de liniile primului câmp (figura 3.1).

Fenomenele de natură mecanică care guvernează transferul de metal pot fi împărțite în trei clase: fenomene datorate forțelor fizice care acționează asupra unei picături de metal transferate prin arc, fenomene datorate ciocnirii dintre două sau mai multe picături emise simultan și fenomene datorate ciocnirilor dintre diferitele particule existente în plasma arcului. Primele două clase acționează la nivel macroscopic, efectul lor fiind ușor perceptibil, comparativ cu a treia clasă ale cărei efecte sunt percepute mai mult sub forma unei conversii energetice.

Fenomenele de natură chimică au loc la nivelul picăturii de metal care este transferată prin arc, în toate cele patru faze ale existenței acesteia: formare, desprindere, parcurgere arc și atingere a băii de metal. Acestea constau în reacții chimice activate la temperaturi diferite, mergând până la valori de ordinul 20×10^3 K /62/. Elementele care participă la reacții sunt cele care intervin în compoziția sârmei de sudare, participarea fiind într-un grad mai mare la elementele active față de oxigen.

3.3.2 Topirea electrodului

Modelarea procesului de topire a sârmei de adaos la sudare a atras pe foarte mulți cercetători, în ideea dezvoltării unui sistem de control al stabilității arcului electric.

Stabilitatea procesului de transfer începe cu stabilitatea topirii sârmei electrod. Dacă la sudarea MIG/MAG condiția de stabilitate este reprezentată prin identitatea dintre viteza de avans al sârmei electrod și viteza de topire a sârmei electrod, pentru a controla procesul de transfer este necesară cunoașterea vitezei de topire a sârmei electrod.

Messler și Halmoy /45/ au propus un model matematic al topirii sârmei la sudarea MIG/MAG standard, bazat pe studiul variației entalpiei cu densitatea de curent. Pornind de la acest model și introducând sursa suplimentară de căldură dată de arcul vecin, ecuația de echilibru energetic poate fi scrisă:

$$H_t = H_{J-L} + U \cdot \frac{j}{v_{topire}} + \frac{Q_{arc}}{V} \quad (3.48)$$

unde:

- H_t - entalpia totală necesară topirii sârmei și detașării picăturii, $[J/mm^3]$,

- U - potențialul constant de la capătul sârmei care produce încălzirea, [V],
- H_{J-L} - entalpia produsă de încălzirea prin efect Joule-Lenz, [J/mm^3],
- j - densitatea de curent, [A/mm^2],
- v_{topire} - rata de topire, [mm/s],
- Q_{arc} - căldura primită prin convecție și radiație de la arcul vecin, [J]
- V - volumul capătului liber al sârmei încălzit de către arcul vecin, [mm^3]

Rearanjând ecuația 3.48 în spiritul determinării cantității suplimentare de căldură primită de la cel de-al doilea arc și considerând legea de funcționare a unui sistem de sudare MIG/MAG:

$$v_{topire} = v_{avans-sarmă-electrod} \quad (3.49)$$

rezultă succesiv:

$$Q_{arc} = \frac{4}{l \cdot \pi \cdot \phi_e^2} \left(H_t - H_{J-L} - U \cdot \frac{j}{v_{avans-sarmă-electrod}} \right) \quad (3.50)$$

unde s-a considerat:

$$V = l \cdot \pi \cdot \frac{d^2}{4} \quad (3.51)$$

De-a lungul capătului liber rata de schimb a entalpiei este:

$$\frac{dH_t}{dt} = \rho_e \cdot j^2 \quad (3.52)$$

unde $\rho_e = \rho_e(H)$ reprezintă rezistivitatea materialului sârmei și integrând în timp din momentul în care un element de sarmă intră în zona capătului liber și începe să se încălzească, t_i și până în momentul topirii, t , se obține:

$$\int_{t_i}^t Q_{arc} dt = \frac{4}{l \cdot \pi \cdot \phi_e^2} \cdot \int_{t_i}^t \left(H_t - H_{J-L} - U \cdot \frac{j}{v_{avans-sarmă-electrod}} \right) dt \quad (3.53)$$

ecuație din care se poate determina cantitatea de căldură suplimentară provenind de la arcul vecin.

3.3.3 Instabilități ale unui volum de metal topit parcurs de curenți electrici

Cunoscând modul de topire a sârmei, este necesară modelarea evoluției volumului de metal fluid. Este cunoscută teoria prin care trecerea unui curent electric I_s printr-un fluid conduce la apariția densității volumice de forță magnetică /58/, /88/, /95/:

$$\vec{F}_{em} = \vec{j} \times \vec{B} \quad (3.54)$$

unde:

- \vec{j} - vectorul densității de curent, [A/mm^2];
- \vec{B} - vectorul inducție magnetică generat de curentul electric I_s , [T].

Direcția forței \vec{F}_{em} este perpendiculară pe învelitoarea conductorului fluid. Efectul acestei forțe este apariția unei presiuni de forma:

$$p = p_o + \frac{\gamma}{R} + \mu_o \cdot j^2 \cdot \frac{R^2 - r^2}{4} \quad (3.55)$$

unde:

- p_o - presiunea atmosferică;
- γ - tensiunea superficială a fluidului;
- R - raza conductorului fluid;
- r - distanța de la axa de simetrie a cilindrului de fluid la un punct din secțiunea transversală a acestuia;

- μ_0 – permeabilitatea magnetică a vidului.

Conform înregistrărilor video efectuate de autor în colaborare cu un colectiv de cercetători de la Institutul de Sudură SLV din Munchen cu scopul studierii modului de topire a sârmei, s-a constatat că în cazul unui conductor fluid cilindric străbătut de un curent I_s , forma acestuia se modifică, după cum era de așteptat, în funcție de valoarea curentului I_s (figura 3.27). Aceste abateri de la formă poartă denumirea de instabilități /95/.

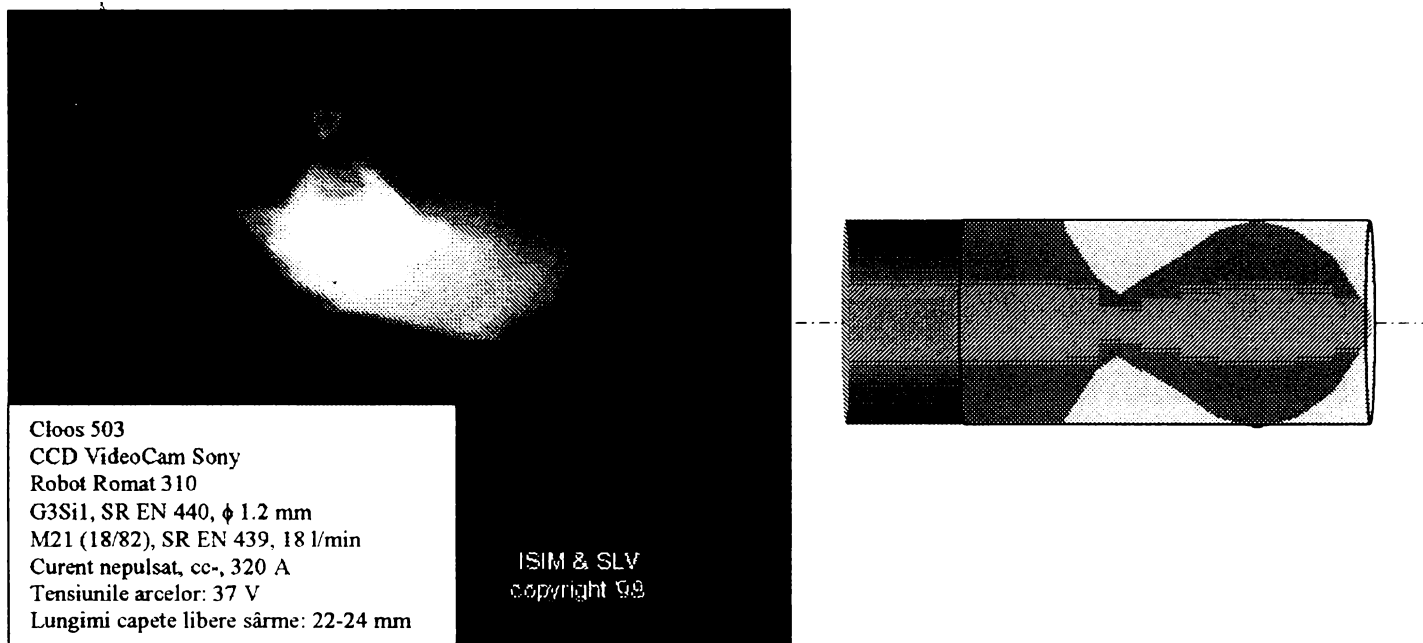


Fig. 3.27 Forma perturbată a coloanei de fluid /96/, /102/

Modelul matematic al comportării conductorului fluid, creat de Herlofson și Murty /95/, fiind cel mai complex model prezentat în literatura de specialitate, are drept ipoteze de bază următoarele:

- arcul, ca și plasmă, este un câmp termic izoterm;
- interacțiunea dintre plasma arcului și material este doar de natură termică;
- densitatea ρ a materialului transportat prin plasmă este independentă de temperatură.

Considerând un conductor cilindric fluid, de rază R , neparcurs de curenți electrici ($I_s=0$), se observă că sub acțiunea unor perturbații exterioare fluidul va suferi o modificare a razei r a coloanei, modificare cuantificată astfel:

- pentru cazul fluidelor staționare:

$$r = R + a \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot z}{\lambda}\right) \quad (3.56)$$

- pentru cazul fluidelor nestaționare:

$$r = R + a \cdot \cos\left(-m\theta + \frac{2\pi \cdot z}{\lambda}\right) \quad (3.57)$$

unde:

- ε - elongația vibrației radiale a coloanei de fluid [m];
- λ - lungimea de undă a vibrației înveltoarei coloanei de fluid [m];
- z - distanța în direcția axei de propagare a vibrației [m];
- m - ordinul (modul) de instabilitate:
 - $m = 0$ - instabilitate pinch, /95/;
 - $m = 1$ - instabilitate kink, /95/;
 - $m = 2$ - instabilitate flüte, /95/;

conform figurii 3.28.

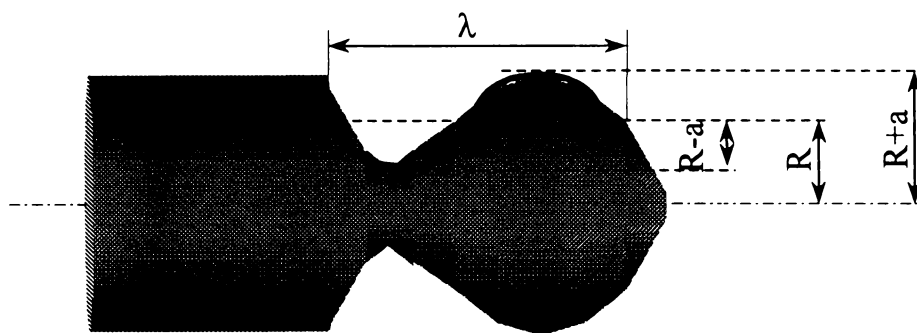


Fig. 3.28 Forma perturbată a coloanei de fluid; caracteristici geometrice

În cazul sudării continue (transfer continuu de metal), după emiterea picăturii, la capătul sârmei mai rămâne o cantitate de metal topit, care sub acțiunea forțelor de tensiune superficială realizează o mișcare oscilatorie axială, mișcare care se menține pe întreaga durată a formării picăturii. Această mișcare conduce la o modificare axială a formei coloanei de fluid după legea, /95/:

$$\delta = \delta' \sin\left(-m\theta + \frac{2\pi \cdot z}{\lambda}\right) \quad (3.58)$$

Deoarece condiția de bază a topirii sârmei de sudare este:

$$v_{ae} = v_t \quad (3.59)$$

unde:

- v_{ae} – viteza de avans al sârmei electrod [m/min];
- v_t – viteza de topire a sârmei electrod [m/min];

și în plus, faptul că sârma avansează cu aproximativ 0,2...0,4 mm pe durata formării unei picături, se poate considera, cu o bună aproximație, cazul fluidelor staționare, deci instabilitatea care apare este o instabilitate de tip pinch.

În acest caz, conform figurii 3.28 și ecuației 3.58 se poate scrie:

$$\begin{cases} p_A = \gamma \cdot \left[\frac{1}{R+a} + a \cdot \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \right] \\ p_B = \gamma \cdot \left[\frac{1}{R+a} - a \cdot \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \right] \end{cases} \quad (3.60)$$

unde γ reprezintă coeficientul de tensiune superficială.

Dacă $p_A > p_B$ atunci coloana de fluid ia formă cilindrică /95/. În caz contrar, $p_A < p_B$, coloana de fluid are tendința de a se transforma în picături mici. Matematic, stabilitatea este atinsă atunci când se îndeplinește condiția:

$$\frac{d(p_A - p_B)}{da} > 0 \quad (3.61)$$

Această condiție devine:

$$\lambda < 2\pi \cdot R \quad (3.62)$$

Dacă $\lambda > 2\pi \cdot R$ coloana de fluid va cădea sub formă de picături distincte /95/. Introducând condiția principală care descrie sudarea, existența curentului I_s care străbate coloana de fluid, se obține presiunea într-o coloană de fluid cilindrică:

$$p = \frac{\gamma}{R} + \mu_o \cdot \frac{I^2}{4\pi^2 R^2} \quad (3.63)$$

distribuită astfel:

$$\begin{cases} p_A = \gamma \cdot \left[\frac{1}{R + \varepsilon} + \varepsilon \cdot \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \right] + \mu_o \cdot \frac{I^2}{4\pi^2 \cdot (R + \varepsilon)^2} \\ p_B = \gamma \cdot \left[\frac{1}{R - \varepsilon} - \varepsilon \cdot \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \right] + \mu_o \cdot \frac{I^2}{4\pi^2 \cdot (R - \varepsilon)^2} \end{cases} \quad (3.64)$$

Punând condiția de stabilitate:

$$\frac{d(p_A - p_B)}{da} > 0 \quad (3.65)$$

rezultă:

$$\lambda < \frac{2\pi \cdot R}{\sqrt{1 + \mu_o \cdot \frac{I^2}{2\pi^2 \cdot \gamma \cdot R}}} \quad (3.66)$$

Dacă are loc:

$$\lambda > \frac{2\pi \cdot R}{\sqrt{1 + \mu_o \cdot \frac{I^2}{2\pi^2 \cdot \gamma \cdot R}}} \quad (3.67)$$

coloana de fluid se transformă într-un șir de picături înlănțuite.

În cazul sudării cu două sârme, înregistrările video efectuate au evidențiat o instabilitate de tip pinch (figura 3.29).

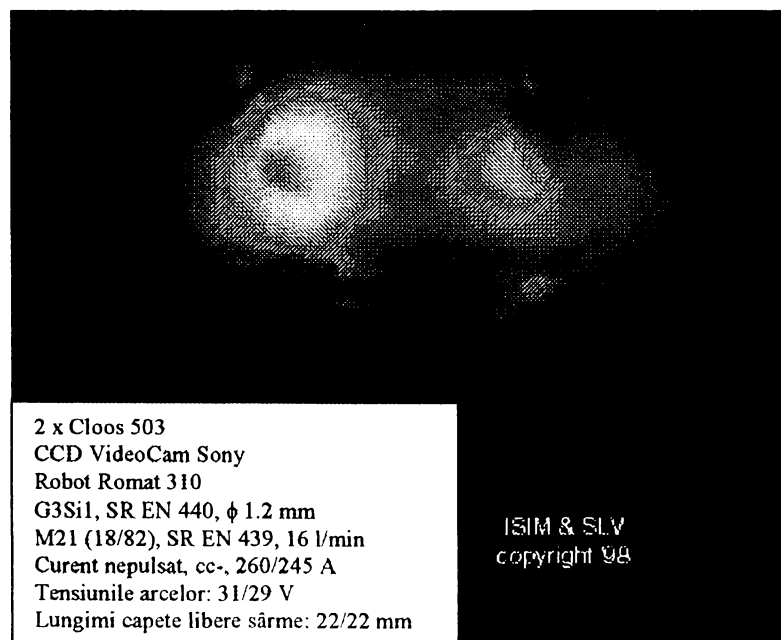


Fig. 3.29 Transferarea materialului sub formă de picături rezultate în urma existenței instabilității de tip pinch /96/, /102/

3.3.4 Forțele care guvernează transferul de metal

În cazul sudării în mediu de gaze protectoare principalii parametri care influențează transferul materialului de adaos sunt: valoarea curentului de sudare și tipul și debitul gazului de protecție utilizat. Modurile principale de transfer cunoscute în prezent sunt: prin scurtcircuitare, intermediar, prin pulverizare, globular, rotitor /19/, /11/, /62/, /95/.

Pentru explicarea fenomenelor (a diferitelor tipuri de transferuri) care apar în arc electric la sudarea în medii de gaze protectoare, este necesar un studiu detaliat al forțelor care conduc la apariția acestor fenomene precum și a factorilor care determină mărimea acestor forțe. Reprezentând schematic diferitele tipuri de forțe care acționează în arc, direcția și sensul acestora, se pot distinge următoarele (figura 3.30).

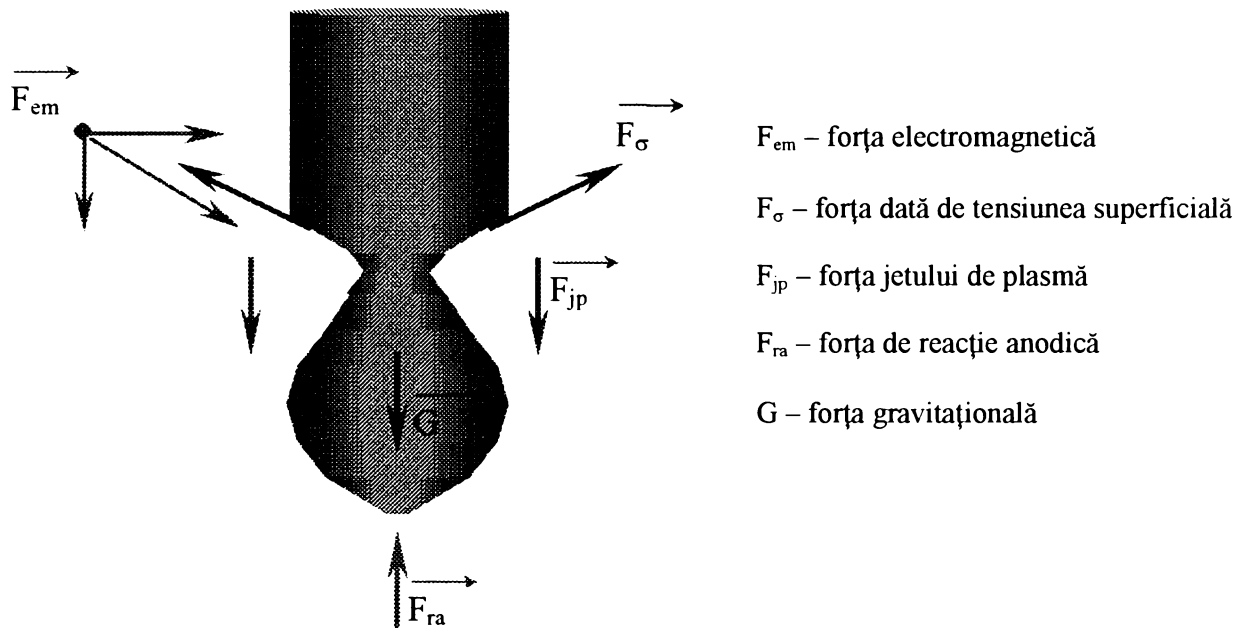


Fig. 3.30 Forțele participante la transferul de metal la sudarea în medii de gaze protectoare cu electrod fuzibil

În cazul sudării cu două sârme, conform celor prezentate anterior, alături de aceste forțe mai participă la transferul metalului și o forță electrodinamică dezvoltată ca efect al interacțiunii câmpurilor electromagnetice create de curenții de sudare (figura 3.31).

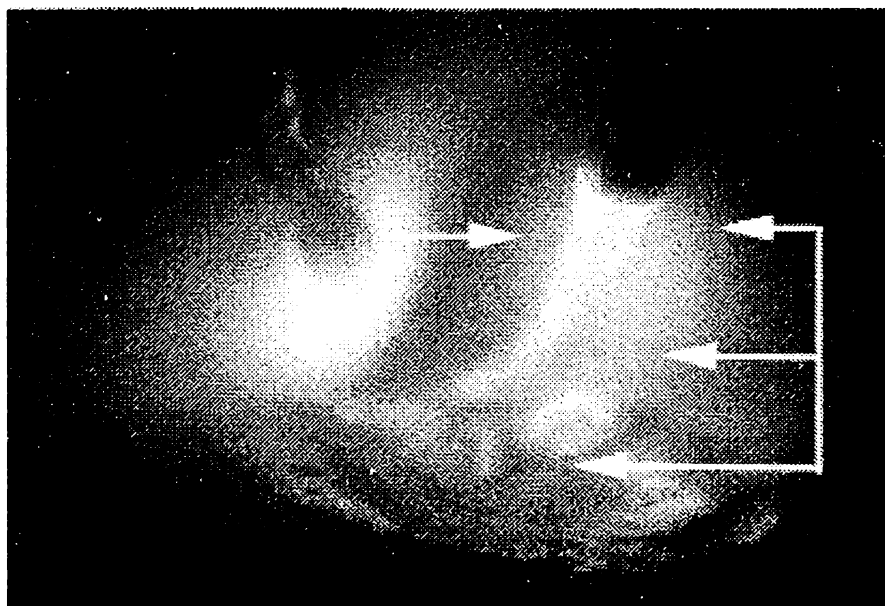


Fig. 3.31 Acțiunea forței electrodinamice la sudarea cu două sârme /63/, /96/

Forța electromagnetică (F_{em}) este generată de interacțiunea liniilor de curent de același sens care parcurg un conductor electric. Ea are două componente, una verticală și una

orizontală, pentru transferul de metal cea mai importantă fiind cea orizontală. Aceasta din urmă dă naștere unui proces de constrângere a conductorului, în special în zona cu secțiune minimă (figura 3.32).

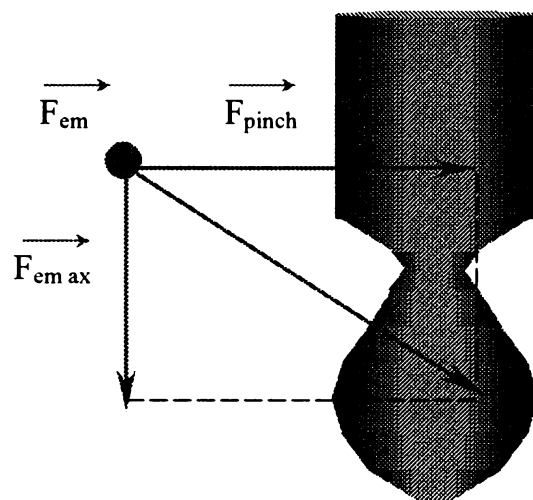


Fig. 3.32 Acțiunea forței electromagnetice asupra metalului lichid

Modulul forței Pinch depinde în principal de valoarea curentului de sudare, fiind direct proporțională cu pătratul acestuia.

Relația de calcul a forței Pinch [10], [11], [62], [95] este următoarea:

$$F_P = \frac{20 \cdot \mu}{8 \cdot \pi^2} \cdot \frac{I^2 \cdot r^4}{d_p^4} \quad (3.68)$$

unde:

- μ - permeabilitatea magnetică a picăturii, [H/m];
- I_s - curentul de sudare, [A];
- r - distanța punctului de aplicație al forței pinch față de axa picăturii, [mm];
- d_p - diametrul picăturii, [mm].

În timpul formării picăturii poziția forței pinch maxime se schimbă urmărind secțiunea minimă a coloanei de metal lichid (figura 3.33).

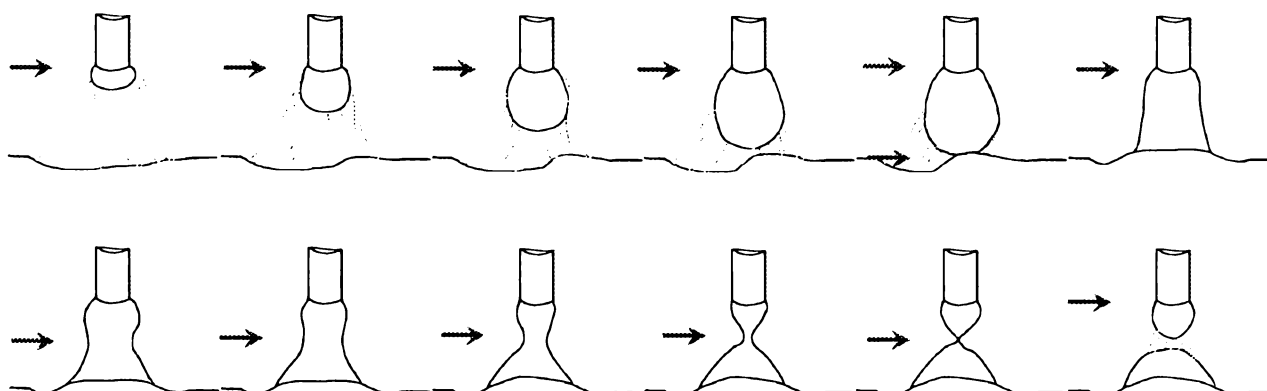


Fig. 3.33 Modificarea poziției forței pinch în timpul formării și desprinderii picăturii

Tensiunea superficială a picăturii (σ) acționează cu o forță F_σ , care se opune desprinderii picăturii din vârful sârmei electrod. În cazul transferului prin scurtcircuit ea își schimbă sensul în momentul în care picătura atinge baia metalică, favorizând desprinderea acesteia.

Ea este puternic influențată de starea suprafeței picăturii, suprafețele oxidate caracterizându-se prin tensiuni superficiale mai reduse.

Reducerea tensiunilor superficiale determină desprinderea mai ușoară a picăturii din vârful sârmei și deci o picătură mai mică, respectiv un transfer mai fin. În consecință o metodă de finisare a picăturilor la sudarea MIG/MAG este utilizarea unui gaz de protecție oxidant.

Pentru calculul forței date de tensiunile superficiale, F_σ , se folosește următoarea relație:

$$F_\sigma = m_h \cdot g \quad (3.69)$$

unde:

- m_h – masa maximă a picăturii ce se formează la vârful sârmei electrod, înainte de desprinderea acesteia [kg];
- g – accelerația gravitațională [m/s^2].

Forța gravitațională (F_G) acționează în general ca o forță care favorizează desprinderea picăturii, cu excepția sudării în poziții dificile. Valoarea ei este determinată în principal de volumul picăturii conform relației:

$$G = m \cdot g \quad (3.70)$$

unde:

- m - masa picăturii [kg];
- g - accelerația gravitațională [m/s^2].

Forța vaporilor de metal sau forța de reacție anodică (F_{an}) este generată de presiunea vaporilor de metal care se degajă ca urmare a temperaturi locale ridicate ce apare la suprafața picăturii (în pata anodică) datorită concentrării pe o zonă foarte mică a arcului electric.

Cuantificarea /95/ acestei forțe este posibilă prin expresia:

$$F_{ra} = \frac{m_v}{\rho_v} \cdot I_s \cdot j \quad (3.71)$$

unde:

- F_{an} – forța de reacție anodică [N];
- m_v – masa vaporilor de metal [kg];
- ρ_v – densitatea vaporilor de metal [kg/m^3];
- I_s – curentul de sudare [A];
- j – densitatea de curent.

Forța jetului de plasmă (F_j) este forța determinată de curgerea cu viteză foarte mare a jetului de plasmă (de ordinul zecilor de metri pe secundă, /95/).

Forța care acționează asupra picăturii de metal desprinse din vârful sârmei electrod și aflată în jetul de plasmă deplasat cu o viteză foarte mare se poate calcula cu relația /95/:

$$F_{jp} = \frac{\pi}{2} \cdot v^2 \cdot \rho_p \cdot R_d^2 \cdot C_p^2 \quad (3.72)$$

unde:

- v – viteza de curgere a plasmei [m/s];
- ρ_p – densitatea jetului de plasmă [kg/m^3];
- R_d – raza picăturii [m];
- C_p – coeficient de curgere a jetului de plasmă, invers proporțional cu numărul Reynolds.

3.3.5 Tipuri de transfer de metal la sudarea MIG/MAG

Transferul prin scurtcircuitare este specific sudării cu arc scurt, tensiune și curent relativ reduse. Poate fi întâlnit la sudarea cu orice fel de gaz de protecție și destinat sudării componentelor cu grosime mică, trecerilor de rădăcină sau sudării în poziții dificile.

Caracteristica principală a transferului, cea care îi dă și numele, constă în atingerea metalului lichid din baie de către picătura formată la capătul sârmei. Scurtcircuitul astfel creat produce o creștere bruscă și cu valoare relativ mare a curentului de sudare. Viteza de creștere a curentului de sudare se controlează, în general, cu ajutorul unei inductanțe fizice sau fictive create prin software. Rezultatul constă în smulgerea picăturii de la capătul sârmei sub acțiunea forței pinch, forței de tensiune superficială și forței gravitaționale, considerate având influențe pregnante în cazul acestui mod de transfer. În figura 3.34 este prezentată o înregistrare a parametrilor electrice de sudare la sudarea cu transfer prin scurtcircuitare, iar în figura 3.35 sunt prezentate dispunerea forței predominante la transferul prin pulverizare și modul de transport al picăturilor prin spațiul de arc.

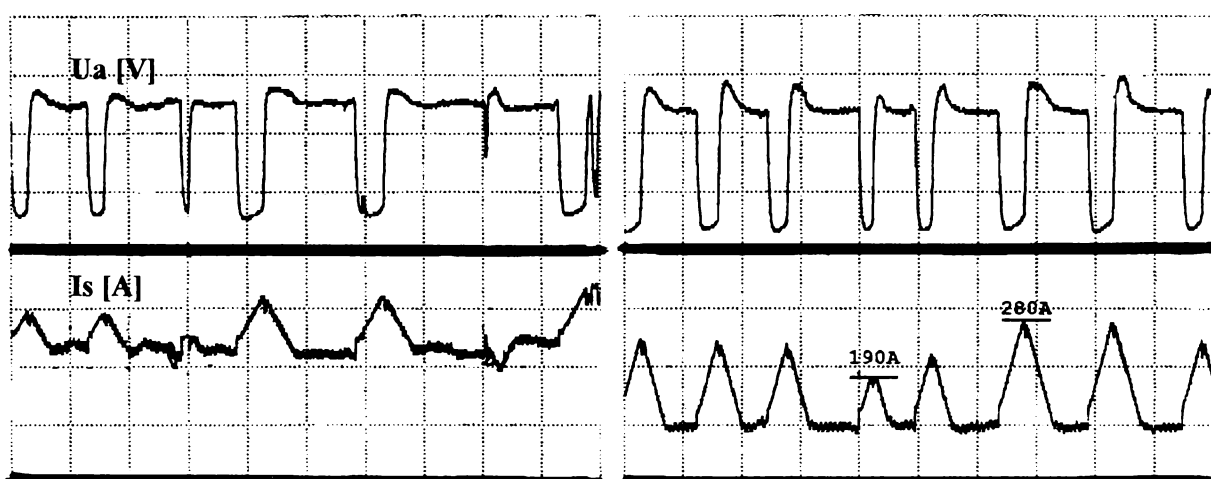


Fig. 3.34 Tensiunea arcului și curentul de sudare în cazul transferului prin scurtcircuitare /96/, /97/, /98/

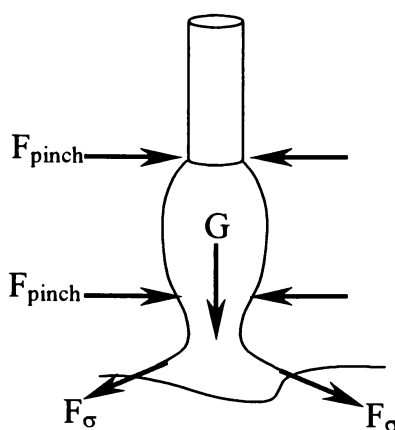


Fig. 3.35 Forțele cu acțiune predominantă și transportul picăturii prin arc în cazul transferului prin scurtcircuitare

Datorită scurtcircuitelor însoțite de stingerea și apoi reamorsarea arcului de sudare, procesul de sudare este ușor instabil datorită deionizării spațiului de arc în timpul scurtcircuitelor. Cercetările efectuate în domeniul transferului prin scurtcircuitare au permis

dezvoltarea unor variante mai eficiente ale acestui mod de transfer. Dintre acestea, cele mai cunoscute sunt transferul prin controlul tensiunii superficiale și transferul prin controlul avansului sârmei de sudare.

Transferul prin controlul tensiunii superficiale constă în reducerea bruscă a curentului de sudare când tensiunea superficială dintre picătură și baie a atins o anumită valoare. În acest mod sunt evitate stropirile caracteristice procesului de rupere explozivă a punții de metal lichid la creșterea bruscă a curentului de scurtcircuit.

Transferul prin controlul vitezei de avans al sârmei constă în crearea unei mișcări de avans alternativ pentru sârma de sudare care, la atingerea băii, se retrage, reamorsând și lungind arcul și oprind creșterea bruscă a curentului de sudare. În felul acesta, transferul are loc numai când capătul sârmei a atins baia, evitându-se astfel pierderile de material prin stropire.

Transferul prin pulverizare este specific sudării cu arc lung, tensiune și curent mari, putând fi atins numai la sudarea în amestecuri bogate în argon. Datorită puterii mari a arcului acest mod de transfer se utilizează, în general, la sudarea grosimilor mari sau trecerilor de umplere. Datorită curentului mare, forțele pinch sunt mari, iar picăturile sunt smulse de la capătul sârmei înainte de a-și mări dimensiunile. Astfel, metalul se transferă sub forma unui jet conic de picături fine, care poate avea deschidere mare la curenți mai mici sau deschidere mai mică la curenți mari. Este unul dintre cele mai utilizate moduri de transfer datorită stabilității crescute și pierderilor reduse de material prin stropire. Datorită curenților de sudare relativ mari, specifici acestui mod de transfer, forța cu acțiune predominantă la desprinderea picăturii de metal este forța pinch. În figura 3.36 este prezentată o înregistrare a parametrilor electrici de sudare la sudarea cu transfer prin pulverizare, iar în figura 3.37 sunt prezentate dispunerea forței predominante la transferul prin pulverizare și modul de transport al picăturilor prin spațiul de arc.

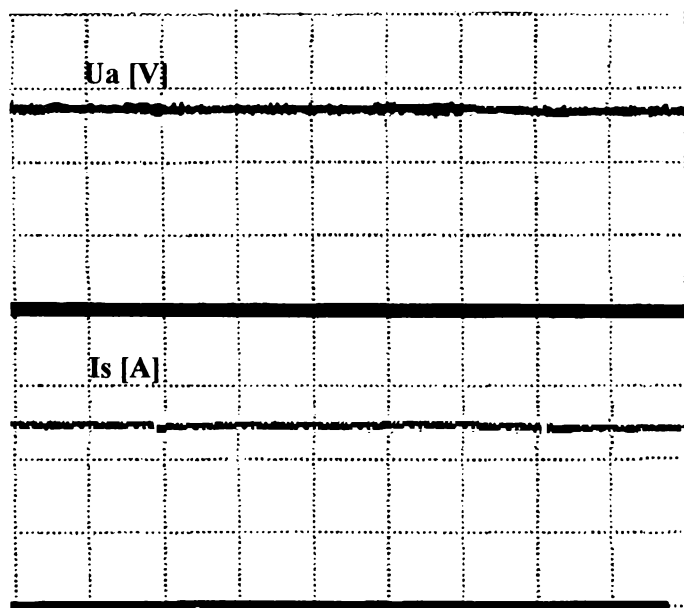


Fig. 3.36 Tensiunea arcului și curentul de sudare în cazul transferului prin pulverizare /96/, /97/, /98/

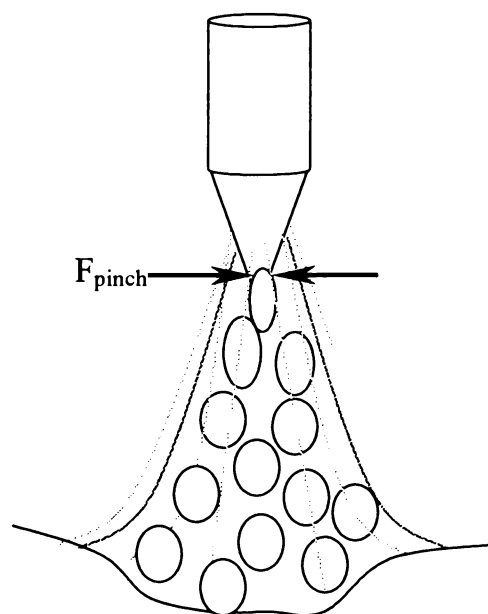


Fig. 3.37 Forța predominantă și transportul de metal prin pulverizare

Transferul intermediar este specific sudării cu tensiuni și curenți medii. Poate fi întâlnit la sudarea cu orice tip de gaz de protecție, dar datorită instabilității accentuate și stropirilor este evitat de către toți sudorii. Domeniul curenților medii nu poate fi, deci folosit la sudarea în curent continuu standard.

Pentru rezolvarea acestei probleme s-a dezvoltat sudarea în curent pulsat care introduce un nou tip de transfer. Acest mod de transfer caută să se situeze în zona curenților medii pentru a se putea suda cu întreg domeniul de valori ale curentului de sudare.

Transferul în curent pulsat constă în emiterea de picături la intervale de timp egale, când sursa emite pulsuri de curent cu o anumită valoare. În restul timpului, curentul emis de sursă are valori în domeniul 20-60 A, atât încât să mențină arcul amorsat și stabil. În timp, transferul în curent pulsat a fost optimizat, existând în prezent posibilitatea controlării emisiei unui anumit număr de picături pe fiecare puls /93/.

Este cel mai stabil mod de transfer, stropirile fiind aproape inexistente. În figura 3.38 este prezentată înregistrarea parametrilor de sudare la sudarea în curent pulsat și dispunerea forței pinch a cărei acțiune este predominantă la acest mod de transfer.

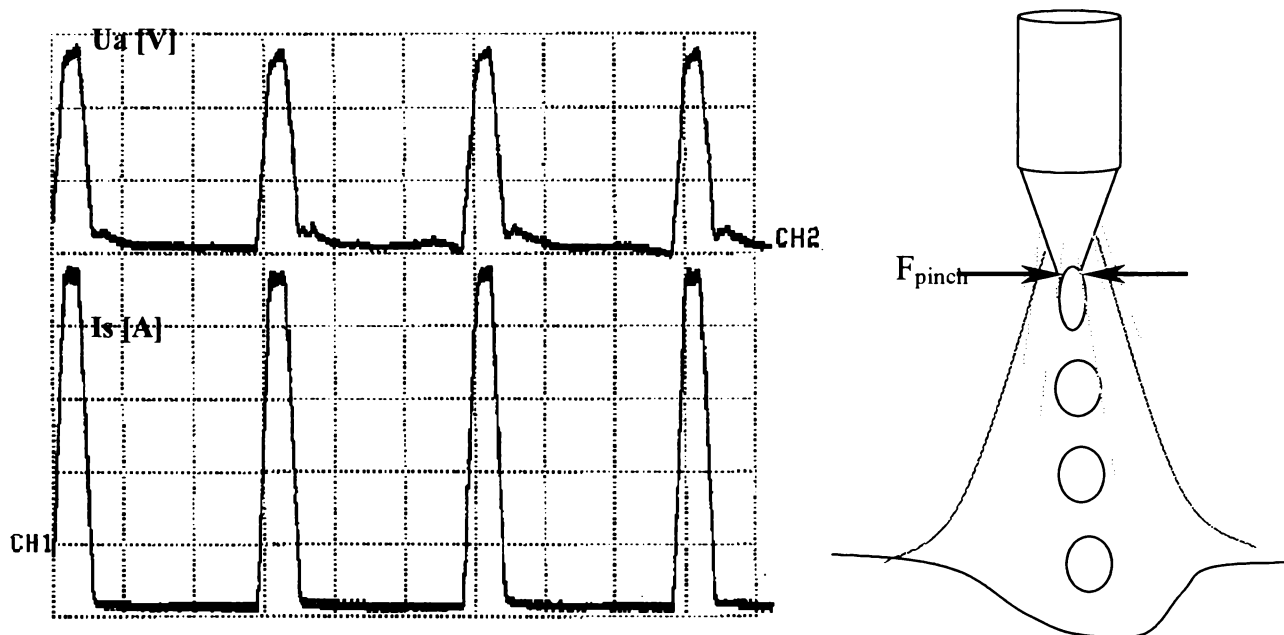


Fig. 3.38 Tensiunea arcului, curentul de sudare și forța predominantă în cazul transferului în curent pulsat /96/, /97/, /98/

Transferul globular sau cu arc lung este specific sudării cu tensiuni și curenți mari, în amestecuri bogate în dioxid de carbon. Picăturile formate au dimensiuni relativ mari datorită lungimii excesive a arcului, transferul efectuându-se în principal sub acțiunea greutatei picăturii și mai puțin sub acțiunea forțelor pinch. Aceasta se explică prin diametrul mare al picăturii, care face ca forța pinch să aibe valori moderate.

De asemenea, diametrul mare al picăturii transferate implică o suprafață mai mare de acțiune a forțelor de reacție anodică, motiv pentru care, în timpul creșterii picăturii, aceasta este deviată lateral față de axa sârmei. Este posibilă și desprinderea și transportarea laterală a picăturii, ceea ce duce la creșterea stropirilor direct de la capătul sârmei. Plonjarea unei picături cu dimensiuni de ordinul a 3-4 ori diametrul sârmei conduce și la stropiri din baie în momentul în care picătura atinge metalul lichid din baie.

În figura 3.39 este prezentată dispunerea forțelor cu acțiune preponderentă la transferul cu arc lung și devierea picăturii datorită forțelor de reacție anodică.

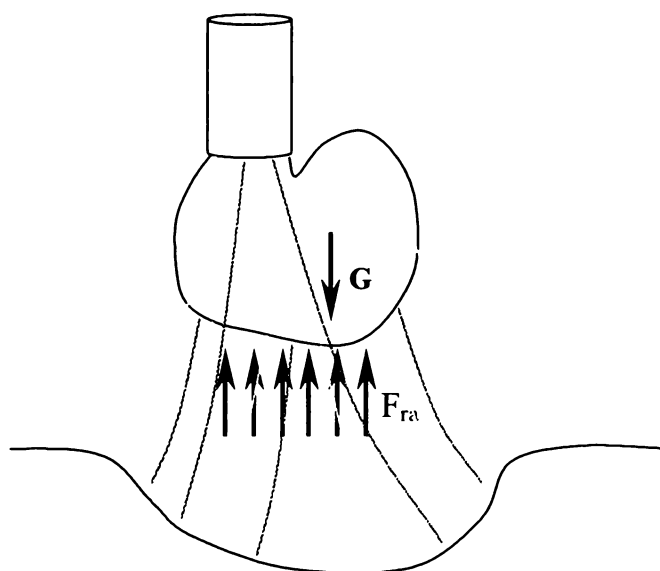


Fig. 3.39 Transportul picăturii și acțiunea forței de reacție anodică la transferul globular

Transferul rotitor este specific sudării cu tensiuni și curenți mari în amestecuri cu minim 92%Ar. Datorită vitezei ridicate a procesului de topire, metalul lichid nu se mai poate transforma în picături distincte, curgerea căpătând forma unei vâne continue de fluid. Datorită câmpului electromagnetic dezvoltat de curentul de sudare vâna de fluid este deviată continuu, ajungând să efectueze o mișcare de rotație în jurul capătului sârmei. În acest fel, urmărind transferul cu viteză redusă, vâna de fluid se prezintă sub forma unei spirale (figura 3.40).

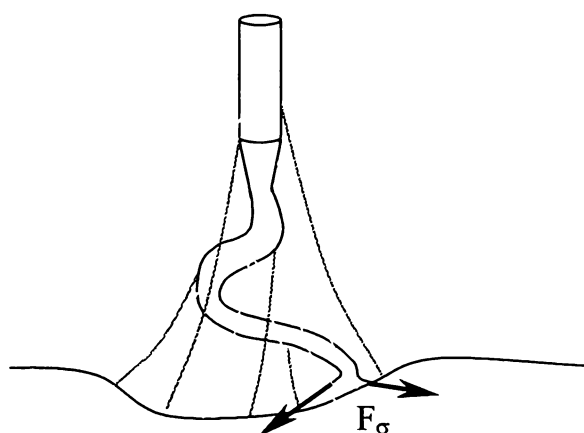


Fig. 3.40 Transportul picăturii și acțiunea forței predominante la transferul rotitor

Transferul de metal la sudarea cu sârmă tubulară diferă puțin de transferul specific sudării cu sârmă plină. Pentru un curent de sudare dat, sârma tubulară se topește mai repede decât cea plină datorită secțiunii reduse a părții metalice în secțiune. Din acest motiv, în general, sârma tubulară este destinată unui transfer prin pulverizare.

Pulverizarea, ca și la sudarea cu sârmă plină, este conică, deschiderea conului depinzând de curentul de sudare.

3.3.6 Participarea forței electrodinamice la transferul de metal

Făcând o comparație cantitativă între forța pinch și forța electrodinamică (figura 3.41), se observă că valorile forței electrodinamice au același ordin de mărime ca și forțele pinch. Cum acestea din urmă sunt principalele forțe care participă la transferul de metal în cazul sudării cu transfer prin pulverizare, este evidentă influența introducerii unei noi forțe de același nivel ca valoare asupra procesului de transfer.

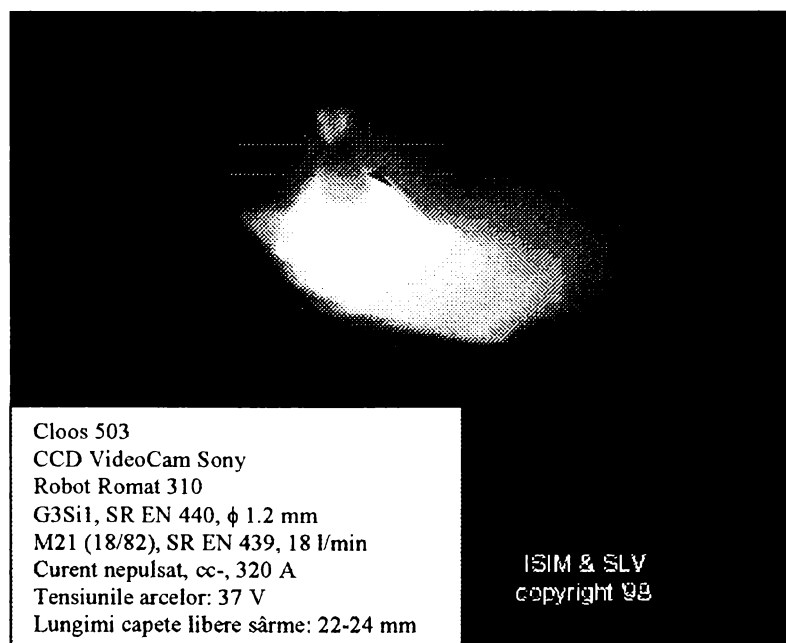
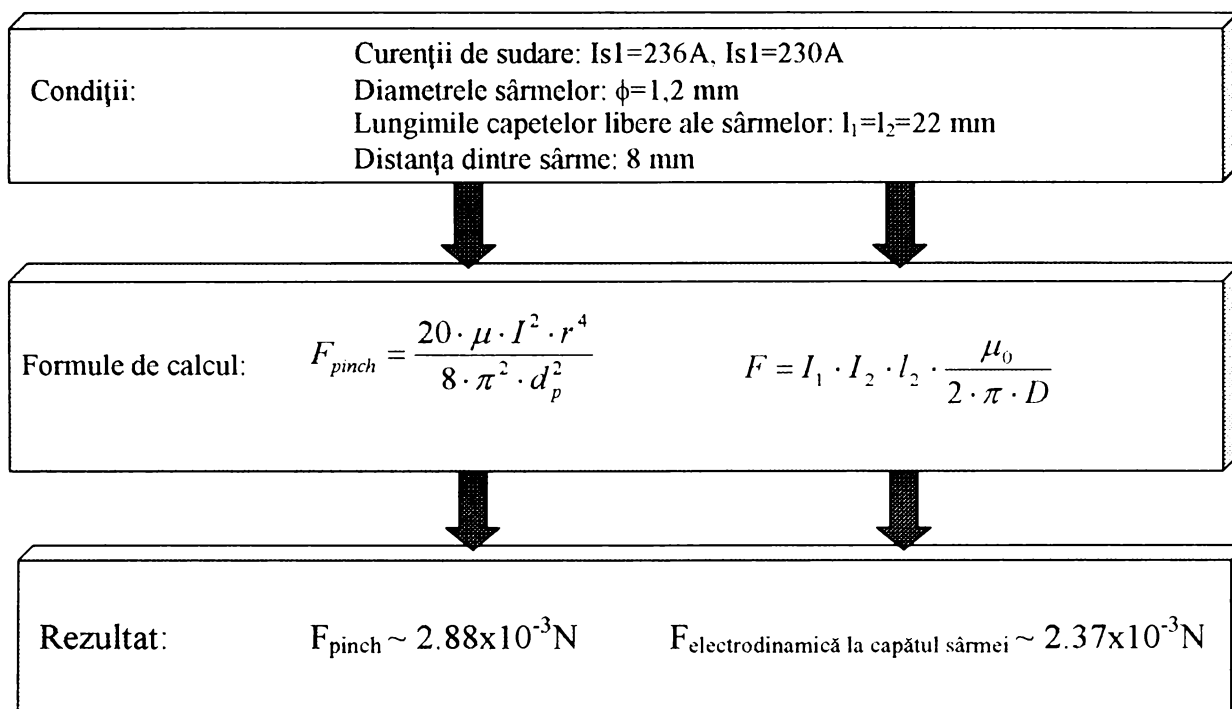


Fig. 3.41 Compararea valorilor calculate pentru forța electrodinamică și pentru forța pinch pentru un caz concret de sudare /96/, /102/

Forța electrodinamică este, deci, determinantă, alături de forțele pinch, pentru detașarea picăturii formate la capătul sârmei. Din acest motiv transferul la sudarea cu două sârme este diferit de transferul la sudarea MIG/MAG standard.

În cazul sudării cu transfer prin scurtcircuitare, picătura este transferată ca urmare a acțiunii tensiunii superficiale și greutateii proprii (fig 3.42 a). Celelalte forțe implicate în transfer au influențe mai mici comparativ cu acestea două. Formarea punții de metal cu secțiunea în scădere continuă va conduce la creșterea acțiunii forței pinch o dată cu creșterea curentului de scurtcircuit și scăderea razei punții lichide.

Puntea de metal lichid formată se va rupe într-o secțiune a cărei poziție este dată de tensiunea superficială. Trăgând de cele două capete ale punții de metal lichid tensiunea superficială întinde această punte subțind-o într-o secțiune aflată aproximativ la mijlocul punții. În această secțiune raza punții este minimă, motiv pentru care forța pinch este maximă. În această secțiune puntea se va rupe, metalul topit divizându-se în două părți cu volume aproximativ egale.

Una dintre părți va fi transferată către baia de sudură sub forma unei picături, iar cealaltă va fi trasă către capătul sârmei unde va oscila după direcția axei sârmei o perioadă relativ scurtă, timp în care își va mări volumul datorită topirii sârmei și va scurtcircuita din nou baia. Din aceste două părți ale coloanei de metal topit vor lua naștere și stropii inerenți acestui mod de transfer.

La sudarea cu două sârme forța electrodinamică acționează din lateral asupra metalului lichid trăgându-l înspre mijlocul băii de sudură. Acest fenomen are drept efect mutarea secțiunii minime a punții de lichid în sus, spre capătul sârmei (fig. 3.42 b). Cum forța pinch este maximă în această secțiune, puntea de lichid se va rupe la acest nivel, fenomenul conducând la transferul unei cantități de material topit mult mai mare decât în cazul sudării standard. Și în cazul transferului prin pulverizare și ruperea punții de metal lichid are loc mai aproape de capătul sârmei la sudarea cu două sârme, comparativ cu sudarea cu o singură sârmă (fig. 3.42 c și d).

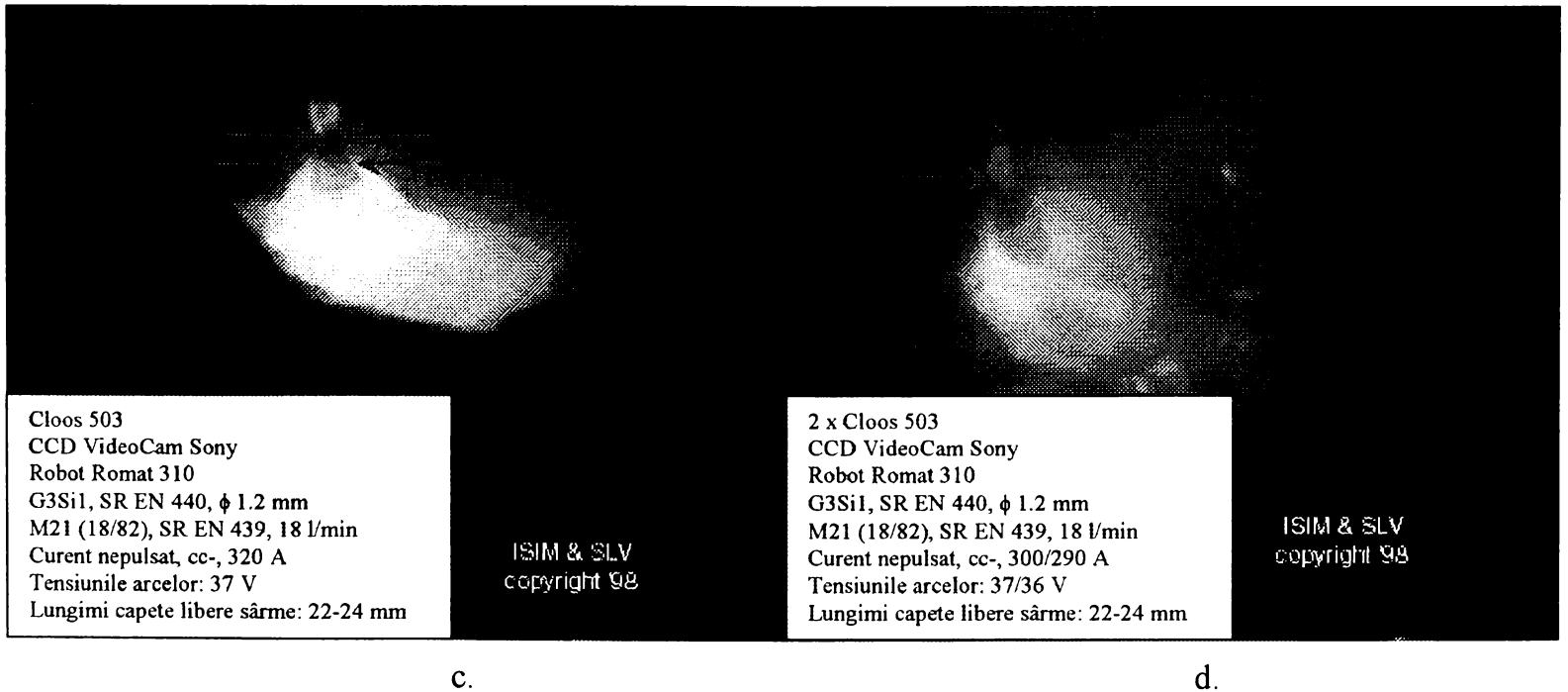
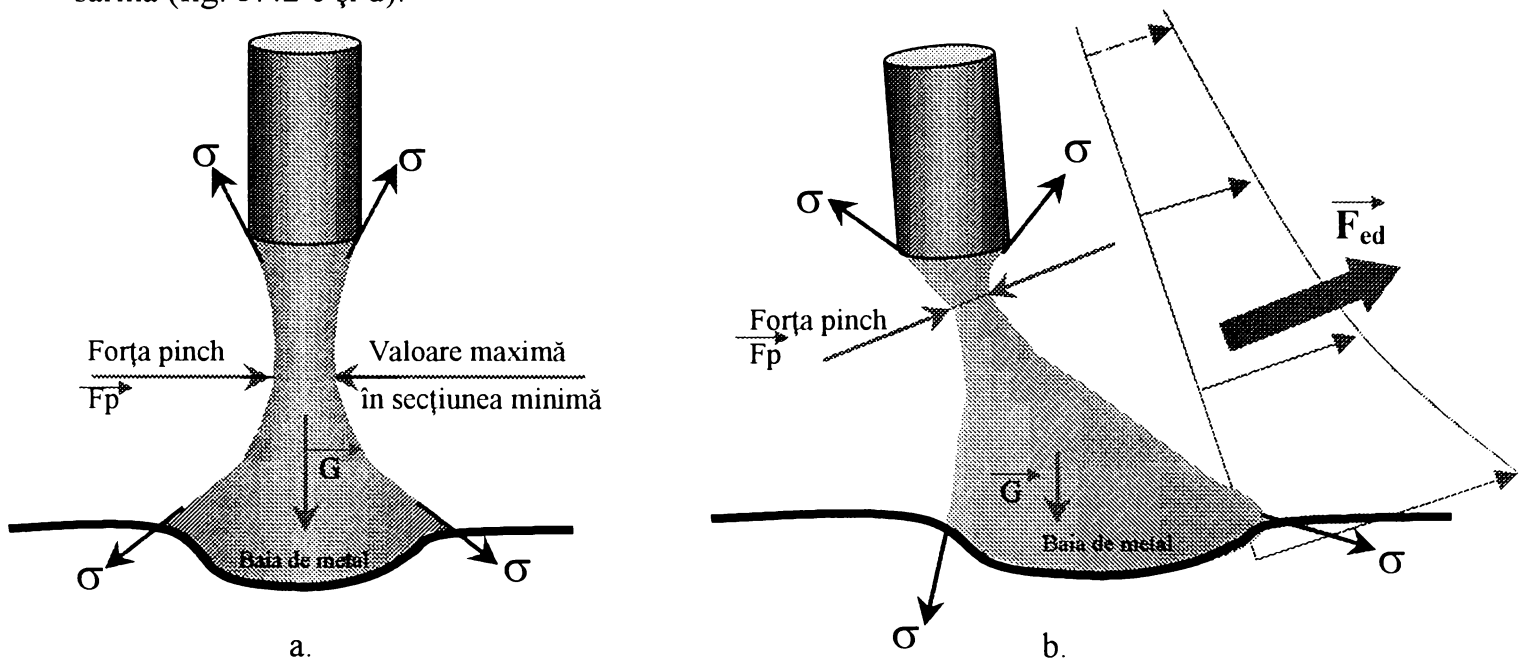
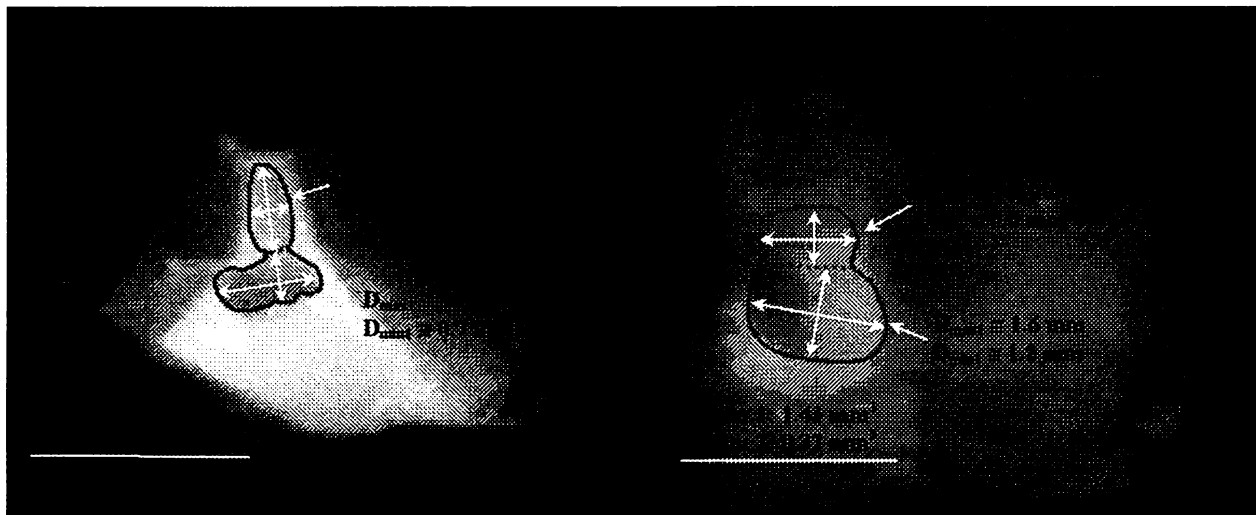


Fig. 3.42 Poziția secțiunii de rupere a punții de metal la transferul prin scurtcircuitare la sudarea cu o singură sârmă (a.) și la sudarea cu două sârme (b.) /96/, /102/

Pentru a putea compara cantitatea de metal transferată la sudarea cu o singură sârmă cu cea transferată la sudarea cu două sârme au fost comparate grafic volumele a două picături emise în aceleași condiții pentru cele două procedee de sudare.

În figurile 3.43 a și 3.43 b sunt prezentate cele două picături supuse comparării. Nivelurile de mărire a imaginii și dimensiunile reale ale picăturilor sunt notate pe figuri.



Materiale de adaos:

- G3Si1 (SR EN 440), $\phi 1.2$ mm
- M21 (SR EN 439), (18/82)

Mod de transfer:

- pulsant (frecvența puls: 400 Hz)

Parametrii:

- curent de sudare mediu: 320 A
- viteza de avans al sârmei: 25 m/min
- tensiunea arcului: 37 V
- lungimea capătului liber: 22-24 mm
- debit gaz de protecție: 18 l/min

a.

Materiale de adaos:

- 2 x G3Si1 (SR EN 440), $\phi 1.2$ mm
- M21 (SR EN 439), (18/82)

Mod de transfer:

- pulsant sincron (frecvența puls: 400 Hz, decalaj 10%)

Parametrii:

- curent de sudare mediu: 300/290 A
- viteza de avans al sârmei: 24/23 m/min
- tensiunea arcului: 37/36 V
- lungimea capătului liber: 22-24 mm
- debit gaz de protecție: 18 l/min

b.

Fig. 3.43 Compararea grafică a volumelor picăturilor emise de la capetele sârmelor de sudare în cazul sudării cu o singură sârmă (a) și în cazul sudării cu două sârme (b)

Raportul volumelor celor două picături este: $C = \frac{1.75}{1.38} \cong 1.27$, deci cantitatea de metal

transferat a crescut cu aproximativ 27 % pentru acest caz concret de sudare, deși a existat o diferență de -10 A în dezavantajul transferului la sudarea cu două sârme.

Acest nou mod de transfer prin scurtcircuitare (fig. 3.42 b), evidențiat prin înregistrări video și prin determinări cantitative ale metalului transferat, se introduce sub numele de **transfer prin scurtcircuitare cu suport electrodinamic**.

Mișcarea secțiunii minime înspre capătul sârmei va determina, după realizarea transferului, creșterea lungimii arcului (figura 3.44). Această creștere va modifica stabilitatea procesului de sudare cu două sârme în sensul micșorării frecvenței scurtcircuitelor. Fenomenul respectiv a fost evidențiat experimental prin achiziționarea on-line a parametrilor electrici de sudare în timpul procesului (figura 3.45).

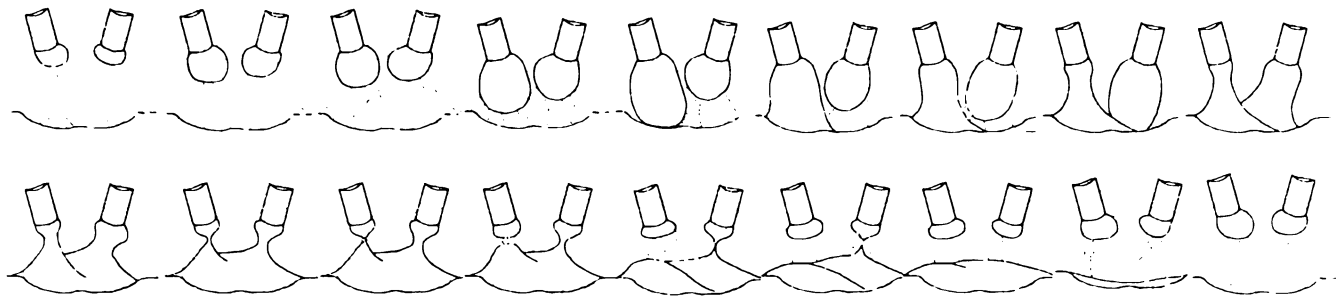


Fig. 3.44 Evoluția procesului de transfer prin scurtcircuitare la sudarea cu două sârme

Figura 3.45 a, b, c, prezintă această modificare importantă. “Prima” sârmă și “a doua” sârmă sunt considerate în direcția de sudare, la sudarea în tandem.

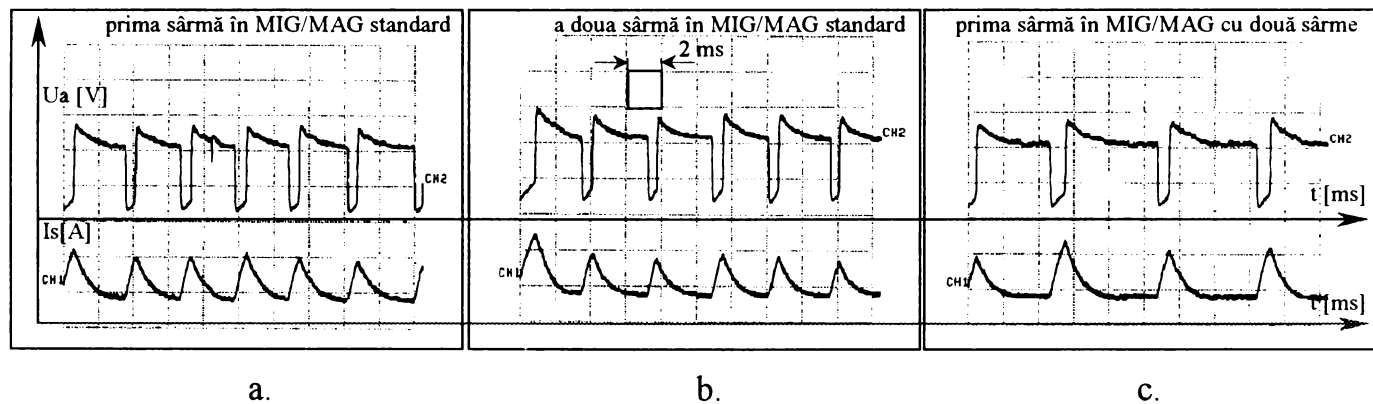


Fig. 3.45 Modificarea frecvenței scurtcircuitelor la trecerea de la sudarea cu o sârmă la sudarea cu două sârme /63/, /96/

Se știe însă că valoarea optimă pentru frecvența scurtcircuitelor este frecvența de oscilare a băii de metal (identitatea 3.73). În cazul sudării cu două sârme ar trebui să existe un dezechilibru între cele două frecvențe datorită micșorării frecvenței scurtcircuitelor /95/.

$$f_{\text{scurtcircuitelor}} \cong f_{\text{oscil_baie}} = 5.84 \cdot \left(\frac{\gamma}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot D^{-\frac{3}{2}} \quad (3.73)$$

Conform valorilor din înregistrarea prezentată în figura 3.9 c rezultă că frecvența scurtcircuitelor este egală cu $\frac{1}{0.004} = 250 \text{ Hz}$. Calculând cu ajutorul ecuației (3.73) valorile frecvențelor de oscilare a băii de sudare se obțin, pentru $D=15-25 \text{ mm}$, valori cuprinse între 255-270 Hz. Din acest motiv se poate considera că dezechilibrul dintre cele două frecvențe nu există. Acest lucru este dat de dimensiunile crescute ale băii de metal specifice acestui procedeu de sudare, dimensiuni care contribuie la micșorarea frecvenței de oscilare a acesteia.

Deci, datorită descreșterii simultane a valorilor celor două frecvențe (frecvența scurtcircuitelor și frecvența de oscilare a băii de metal) procesul rămâne stabil. Înregistrările video efectuate au evidențiat că această stabilitate se îmbunătățește cu creșterea distanței dintre cele două sârme (figurile 3.46, 3.47, 3.48)

Dacă distanța dintre cele două sârme este mai mică de 3 mm, conform expresiei 3.18, forțele electrodinamice cresc foarte mult și agită baia de metal. Efectul principal al acestui fenomen este creșterea frecvenței de oscilare a băii și deci dezechilibrarea relației stabilite între aceasta și frecvența scurtcircuitelor. Rezultatul acestui dezechilibru este creșterea sensibilă a stropirilor din baie și apariția imperfecțiunilor de material de tipul incluziunilor solide și gazoase și de tipul lipsei de topire.

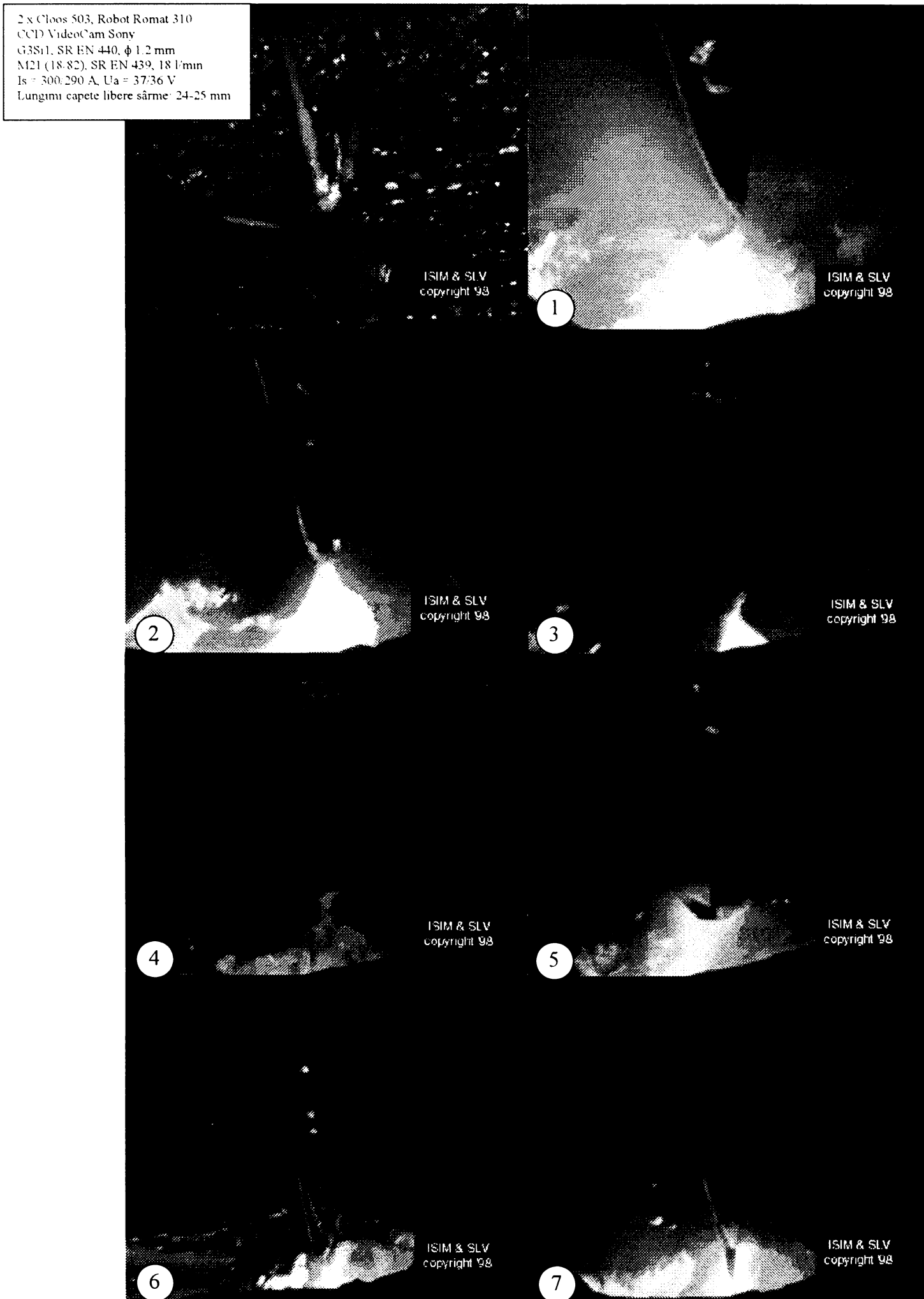


Fig. 3.46 Transfer de metal instabil și ardere discontinuă a arcelor când distanța dintre capetele sârmelor de sudare este zero

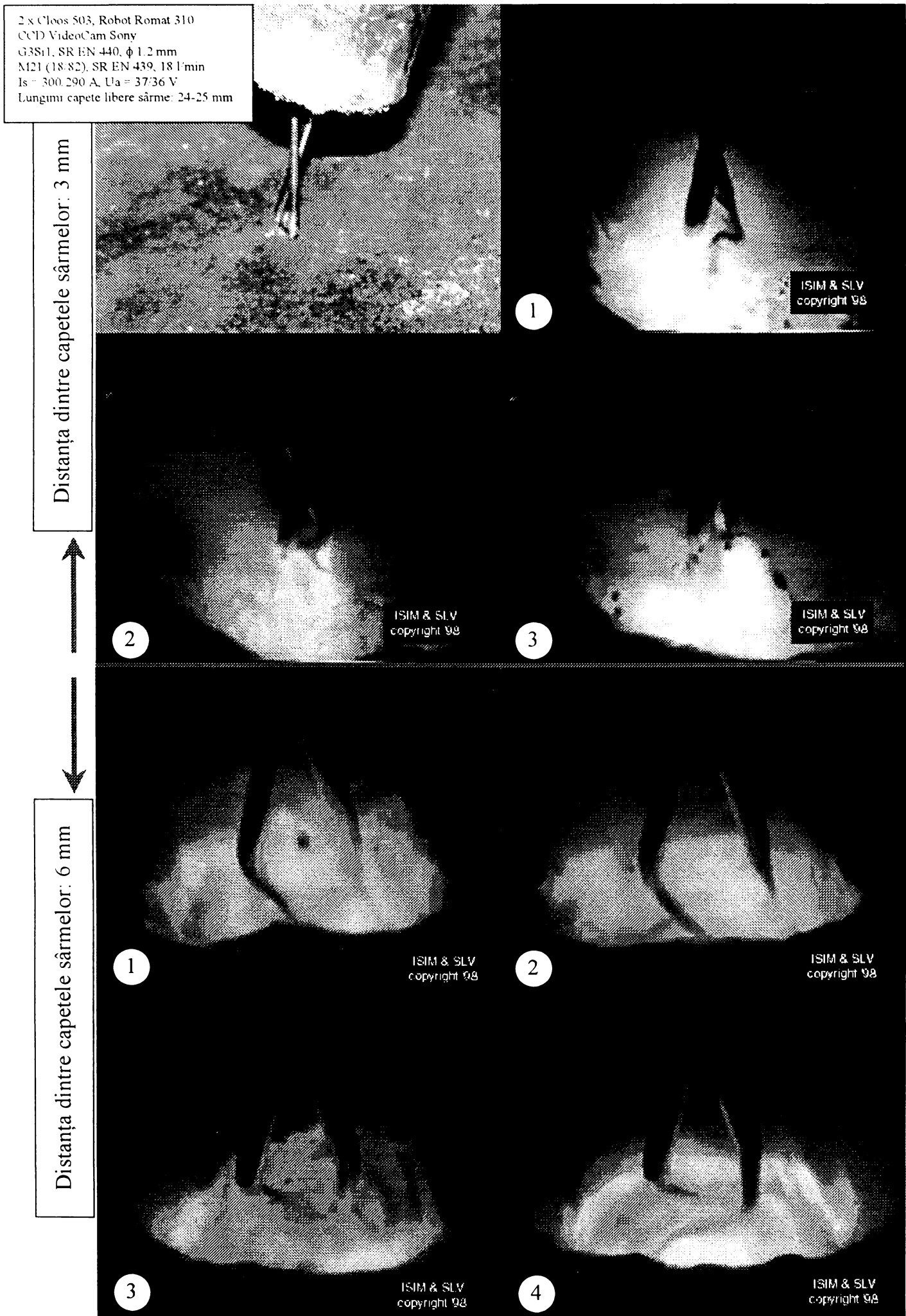


Fig. 3.47 Transferul de metal și modul de ardere a arcului când sârmele sunt încrucișate

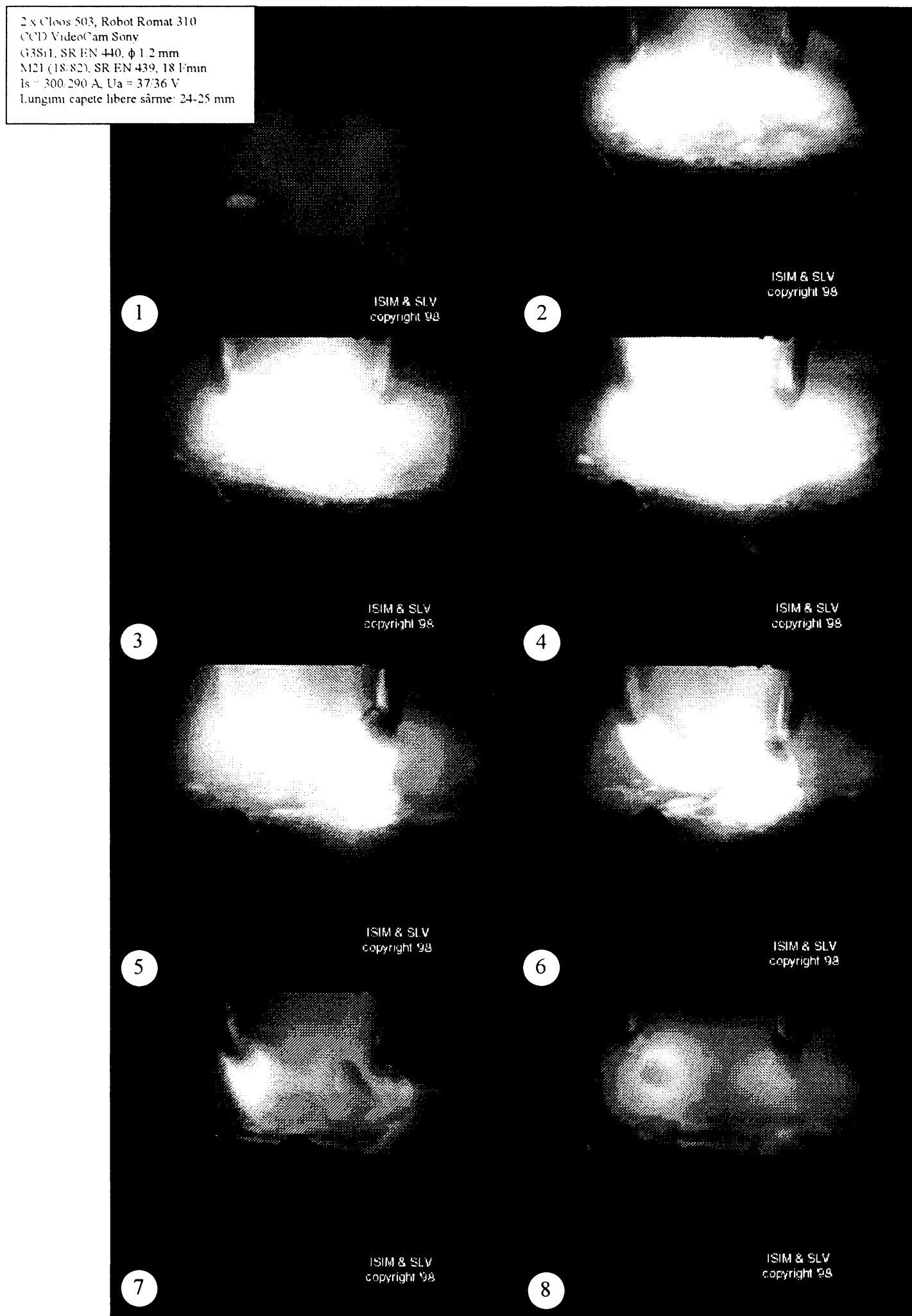


Fig. 3.48 Sudarea cu două sârme, depărtate la o distanță egală cu 10 mm

Un alt aspect specific sudării cu transfer prin scurtcircuitare este formarea la capetele sârmelor a unor stropi cu dimensiuni mai mari decât diametrul sârmelor. Acești stropi își modifică continuu forma și dimensiunile datorită oscilării specifice unui conductor fluid și alimentării cu sârmă a arcului. Din acest motiv, în cazul utilizării unei distanțe între capetele sârmelor mai mică de 3 mm se poate ajunge la atingerea și sudarea reciprocă a picăturilor formate (figura 3.49), fenomen nedorit datorat instabilităților pe care forțele electrodinamice le imprimă procesului de topire.

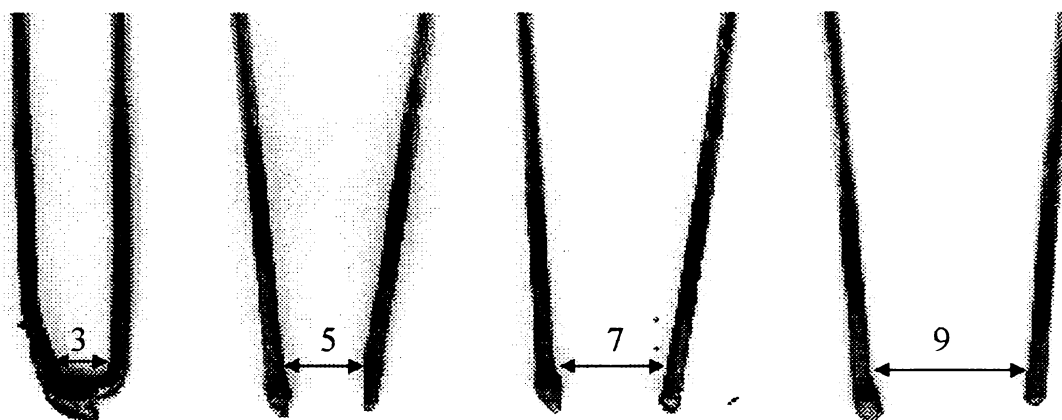


Fig. 3.49 Aspectul capetelor sârmelor după sudare pentru diferite poziționări relative /63/

La sudarea cu transfer prin pulverizare influența forței electrodinamice este mai accentuată, datorită valorilor mari ale parametrilor curent de sudare, I_s și lungimea arcului, l_a . Transferul este stabil picăturile fiind deviate către mijlocul băii de metal. Frecvența emiterii picăturilor și viteza de deplasare a picăturilor prin spațiul de arc sunt mai mari decât în cazul sudării standard în mediu de gaze protectoare. În figura 3.50 este prezentată schematizat evoluția celor două arce și a picăturilor emise la sudarea cu două sârme cu transfer prin pulverizare.

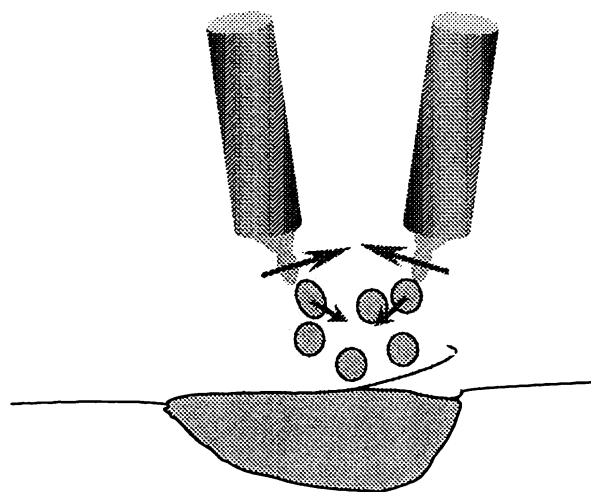


Fig. 3.50 Influența forțelor electrodinamice asupra transferului prin pulverizare

Modificând conținutul gazului de protecție în direcția creșterii volumului de argon din amestec și măbind valorile curenților de sudare și a tensiunilor celor două arce, a fost posibilă și în cazul sudării cu două sârme, obținerea unui transfer rotitor. În acest caz, forțele electrodinamice au participat la rotirea și desprinderea vânei de fluid formate în urma topirii intense a sârmelor de sudare (figura 3.51).

2 x Cloos 503, Robot Romat 310
CCD VideoCam Sony
G3Si1, SR EN 440, ϕ 1.2 mm
M21 (18.82), SR EN 439, 20 l/min
Is = 480-460 A, Ua = 44/42 V
Lungimi capete libere sârme: 28-30 mm

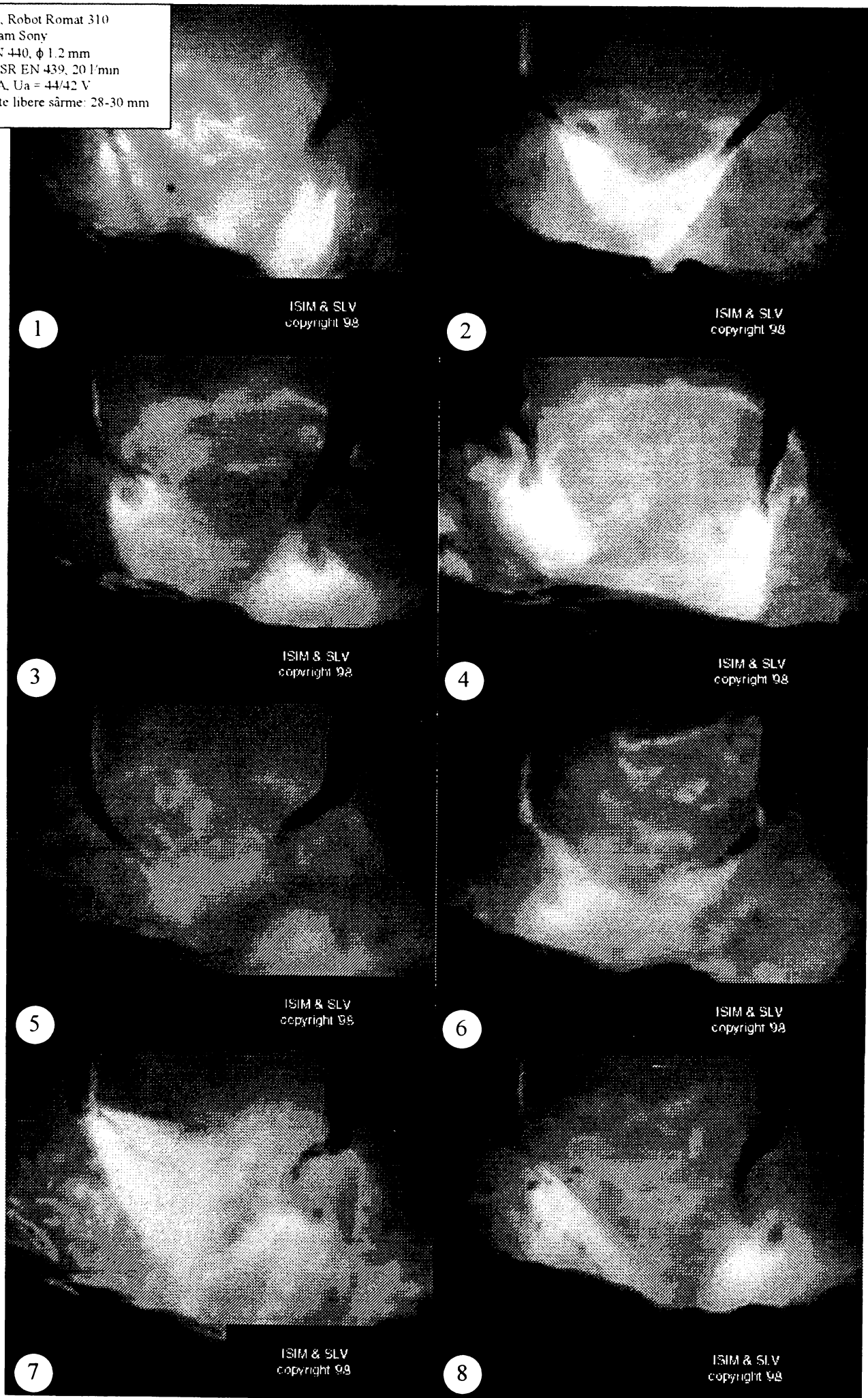


Fig. 3.51 Transferul rotitor la sudarea cu două sârme în mediu de gaze protectoare

Baia devine mult mai agitată decât la sudarea standard cu transfer prin pulverizare putând da naștere la defecte de tipul incluziunilor de zgură, lipsei de topire sau porilor /63/, /96/ (figura 3.52).

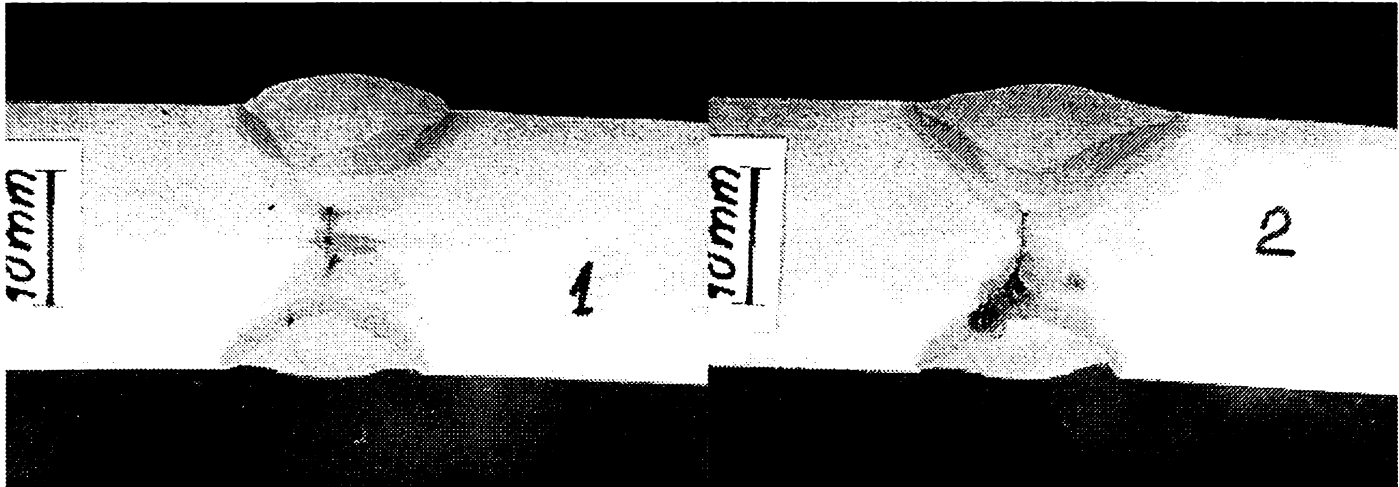


Fig. 3.52 Incluziuni de zgură, lipsă de topire și pori în îmbinările sudate cu două sârme (sârme G3Si1, SR EN 440, ϕ 1.2 mm, în paralel, regim de sudare cu transfer prin pulverizare, gaz de protecție M21 – 18/82, SR EN 439, 18 l/min, distanța dintre capetele sârmelor 3 mm)

La sudarea în modul pulsant, existența forțelor electrodinamice destabilizează sistemul de emisie controlată a picăturilor.

În figura 3.53 este prezentat un caz specific sudării în curent pulsant cu două sârme. Se poate observa existența unei emisii aleatoare, între două pulsuri succesive, a unor picături cu dimensiuni mai mici decât cele emise în timpul pulsului de curent.

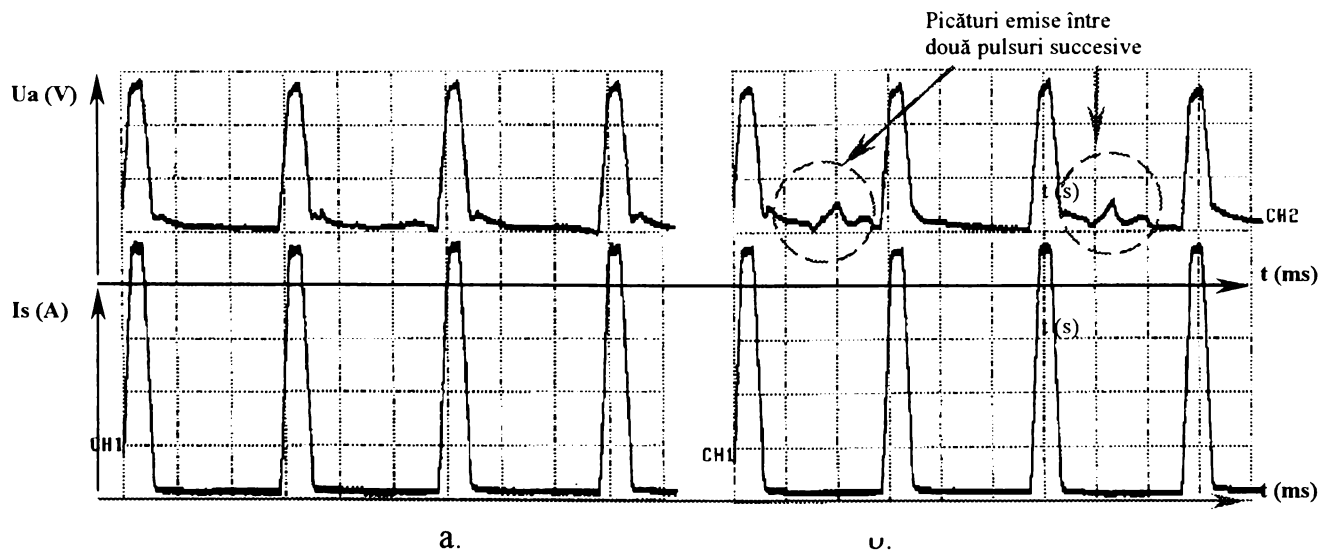


Fig. 3.53 Modul de transfer pulsant pentru sudarea standard MIG/MAG (a.) și pentru sudarea cu două sârme MIG/MAG (b.) /63/

Conceptul de “emisie controlată pe puls” sau “pulsul și picătura” își pierde astfel semnificația. Din acest motiv este necesară limitarea creșterii forței electrodinamice utilizând sisteme de sincronizare alternantă a pulsurilor (fig. 3.54). La aceste sisteme pulsurile sunt emise cu o întârziere dată unul față de celălalt (fig. 3.55). În acest caz nu există două pulsuri simultan ci, când unul din curenți va avea valoarea pulsului, celălalt va avea valoarea bazei.

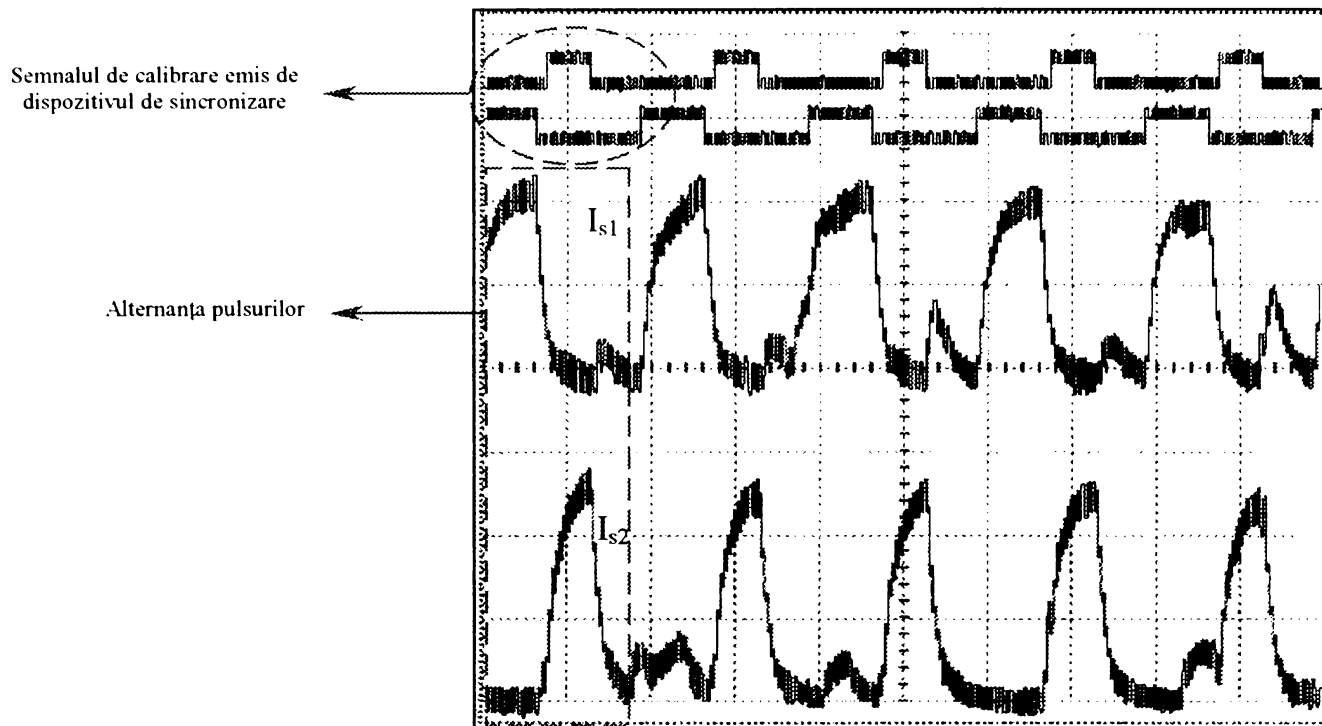


Fig. 3.54 Sincronizarea decalată a pulsurilor de curent prin sârmele de sudare /102/

2 x Cloos 503, Robot Romat 310
 CCD VideoCam Sony
 G3Si1, SR EN 440, ϕ 1.2 mm
 M21 (18/82), SR EN 439, 18 l/min
 $I_s = 320/300$ A puls 10%, $U_a = 35/34$ V
 Lungimi capete libere sârme: 22-23 mm

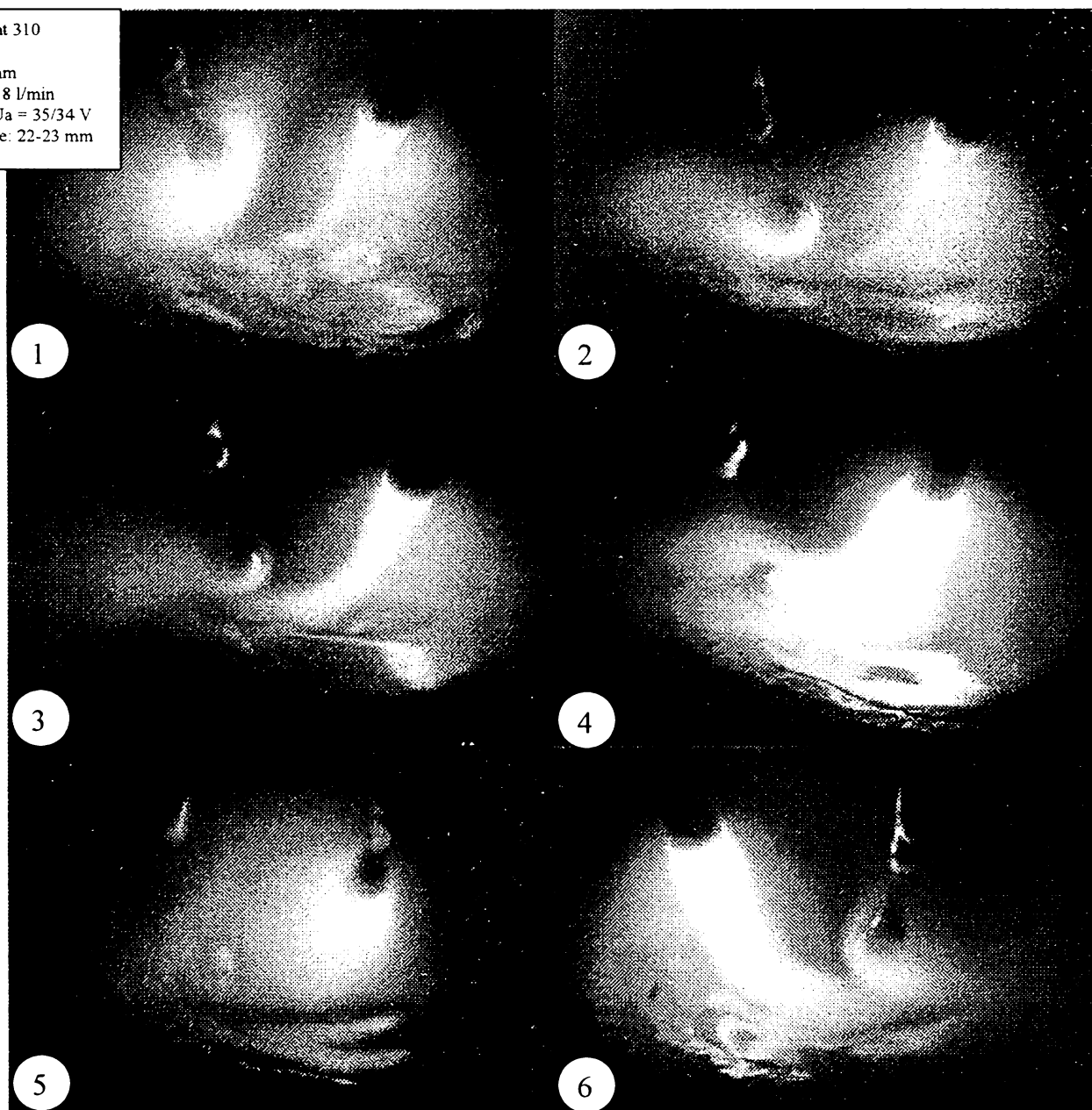


Fig. 3.55 Vizualizarea arcelor de sudare la sincronizarea alternantă a pulsurilor /63/

Se poate observa că cele două arce nu se găsesc niciodată simultan în timpul de puls (figura 3.54), pentru a se evita creșterea produsului " $I_{s1} \cdot I_{s2}$ " de care depinde direct valoarea (modulul) forței electrodinamice. Cei doi factori ai produsului capătă pe rând valori maxime, putând însă avea simultan valori minime.

Procesul de sudare în curent pulsat cu pulsuri astfel sincronizate este stabil. Îmbinările sudate prezintă un număr redus de defecte, iar formele lor geometrice și dimensiunile seamănă cu cele de la sudarea în curent nepulsat. În figura 3.56 sunt prezentate comparativ formele și dimensiunile unor depuneri realizate în regim de sudare cu curent pulsat și cu curent nepulsat.

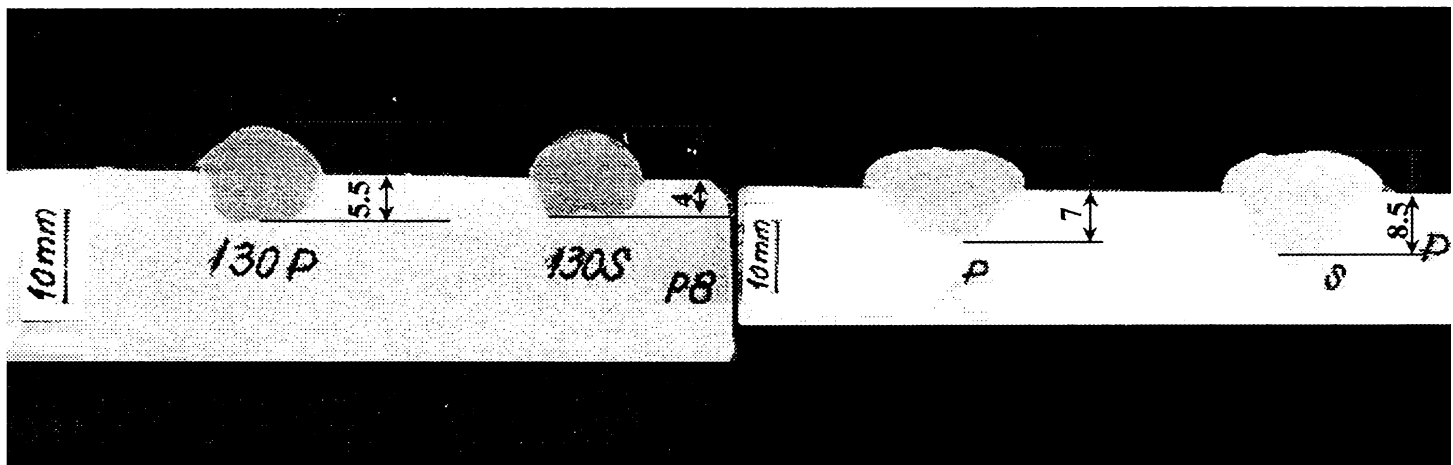


Fig. 3.56 Forma și dimensiunile îmbinărilor sudate cu două sârme în regim pulsat și în regim nepulsat

(sârme G3Si1, SR EN 440, ϕ 1.2 mm, în paralel, gaz de protecție M21 – 18/82, SR EN 439, 18 l/min, distanța dintre capetele sârmelor 8 mm)

Din cele prezentate rezultă că forțele electrodinamice au și influențe pozitive (participă la transferul de metal prin aport la desprinderea picăturii, deci aport la rata de depunere a procedului, orientează picăturile emise spre centrul băii, reduc numărul de scurtcircuitări ale băii la sudarea cu arc scurt, îmbunătățind astfel stabilitatea procesului) dar și influențe negative (în funcție de varianta utilizantă și de configurația geometrică a sistemului de sudare pot apare stropiri, imperfecțiuni de material în îmbinările sudate sau dereglări ale sistemelor "puls-picătură" la sudarea în curent pulsat) asupra stabilității și caracteristicilor economice ale procesului de sudare.

Introducerea sincronizării cu decalare a pulsurilor de curent a permis evitarea sau diminuarea unora din influențele negative, motiv pentru care sudarea cu astfel de sisteme de sincronizare este cea mai des utilizată, conform observațiilor autorului.

Fiind vorba de influențe asupra stabilității arderii arcului și asupra stabilității transferului de metal, este necesară și studierea influenței forțelor electrodinamice asupra funcționării unui senzor-arc la sudarea cu două sârme.

3.4 Influența interacțiunii electromagnetice asupra funcționării senzorului-arc

Senzorii-arc utilizează, în timpul funcționării, valori concrete, momentane, ale curentului de sudare. Dacă aceste valori sunt viciate de către anumite perturbații exterioare sistemului sursă-arc, atunci senzorul-arc va primi informații false cu privire la corelația dintre lungimea arcului sau poziția capului în rost și curentul de sudare momentan.

Concret, dacă lungimea arcului are valoarea l_{a1} , iar sistemul de control știe că pentru valoarea respectivă, în cazul unei viteze de avans al sârmei, v_{ac1} , prin arc va trebui să treacă un curent I_{s1} , atunci sistemul de control va adopta pentru comparare o valoare de referință egală cu valoarea I_{s1} . Intervenția forțelor electrodinamice constă, conform celor precizate, în modificarea lungimii arcului datorită devierii acestuia. În acest caz pentru o poziție dată a capului de sudare în rost, arc va avea o lungime, l_{a1} , în cazul sudării standard cu o singură sârmă și o a doua lungime, l_{a2} , mai mare, în cazul sudării cu două sârme (figura 3.57).

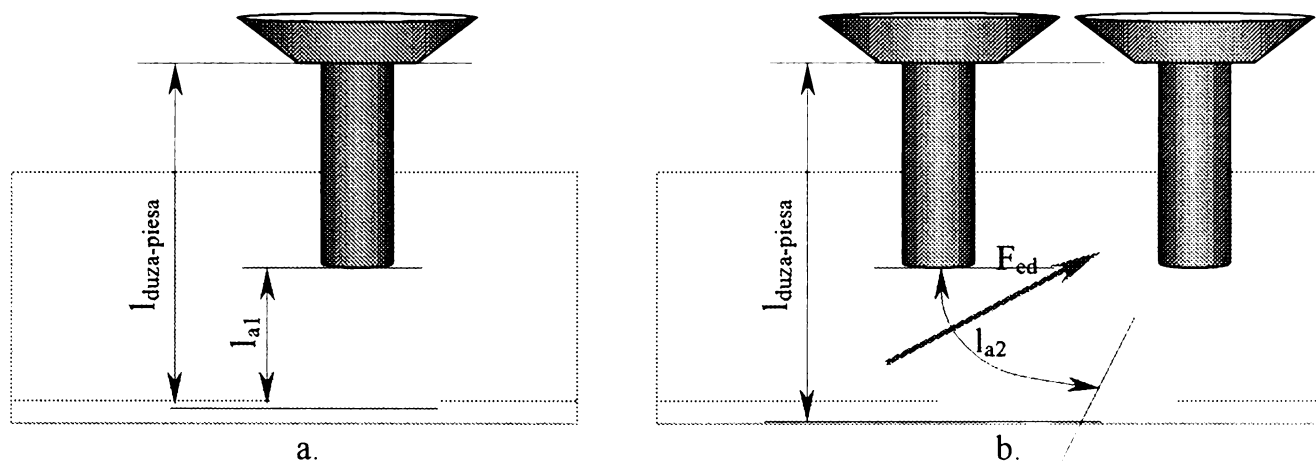


Fig. 3.57 Lungimea arcului pentru o poziție dată a capului de sudare relativ la rost în cazul sudării cu o sârmă (a.) și în cazul sudării cu două sârme (b.)

Efectuând măsurători direct pe înregistrările video s-a observat că arc se lungeste cu aproximativ 15-50% la sudarea în curent pulsant sincronizat și cu până la 120 % în cazul sudării în curent nepulsant (figura 3.58), în funcție de valoarea vitezei de avans al sârmei. În acest caz curentul citit de sistemul senzor-arc va fi mai mic decât cel existent la sudarea standard. În plus, curentul va fi micșorat de efectele interacțiunii electromagnetice prezentate la capitolul 3.2.

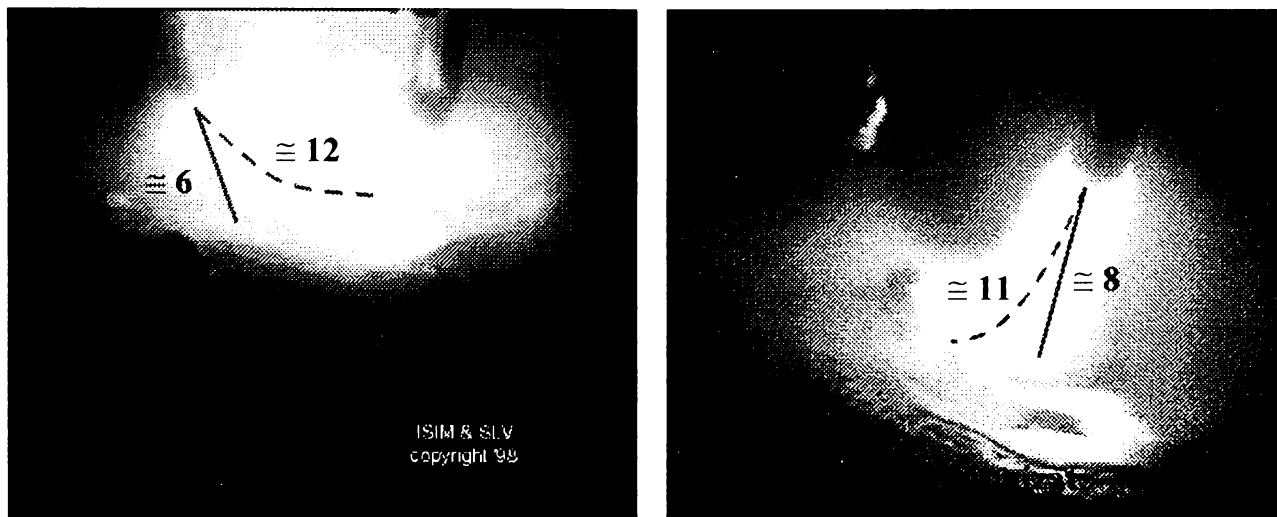


Fig. 3.58 Vizualizarea lungirii arcului sub acțiunea forțelor electrodinamice

Cum funcționarea senzorului-arc se bazează pe compararea valorilor momentane ale curentului de sudare cu o variație de referință, această variație de referință trebuie modelată ținând cont de aceste scăderi ale curentului de sudare datorate interacțiunii electromagnetice.

În figura 3.59 sunt prezentate valoarea curentului de sudare real, valoarea curentului de sudare la sudarea cu o singură sârmă și valoarea curentului de sudare de referință în cazul sudării cu o viteză de avans al sârmei de 10 m/min, transferul fiind prin pulverizare.

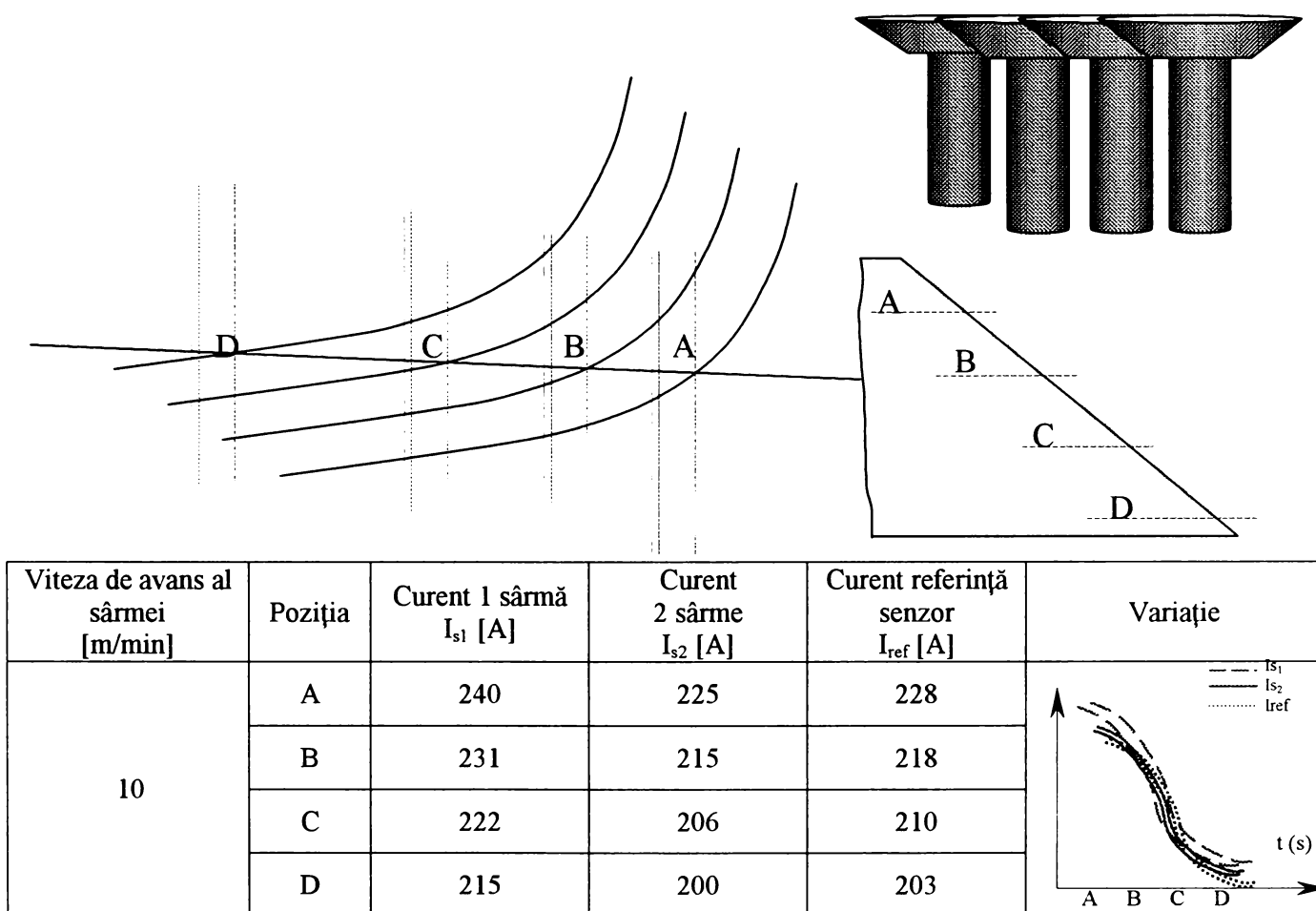


Fig. 3.59 Diferențele între curenții la sudarea cu o sârmă, cu două sârme și curentul de referință la sudarea cu viteză de avans sârmă de 10 m/min, gaz de protecție M21, SR EN 439

3.5 Simularea acțiunii forțelor electrodinamice

Pornind de la înregistrările video efectuate a fost posibilă determinarea unei pseudo-rigidități pentru coloana arcului de sudare la sudarea cu două sârme. S-au măsurat lungimile coloanelor arcelor pentru diferite valori ale vitezei de avans al sârmei, atât în cazul sudării cu o singură sârmă cât și în cazul sudării cu două sârme. Valorile măsurate au permis calcularea diferenței dintre lungimile coloanei arcului pentru cele două situații. Pentru a se lucra cu valorile reale ale lungimilor coloanelor, filmarea a fost efectuată perpendicular pe planul celor două sârme (figura 3.60 a), iar valoarea măsurată a fost corectată cu un coeficient determinat conform figurii 3.60 b.

Modelul fizic propus pentru determinarea rigidității coloanei arcului este modelul unui corp solid omogen din punct de vedere al materialului, având formă conică, diferența dintre secțiunile celor două baze ale conului fiind relativ mici. Această ipoteză a fost introdusă în urma observațiilor efectuate după înregistrările video (figura 3.60 b). În cazul curentului pulsant, cu o eroare relativ mică, forma coloanei arcului poate fi considerată cilindrică.

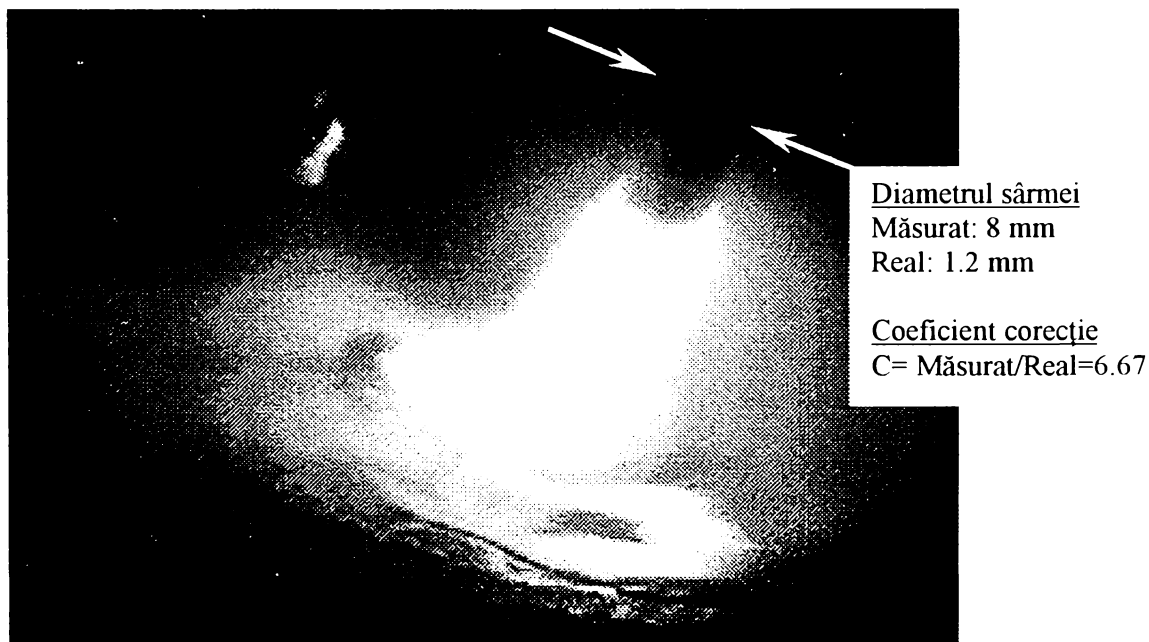
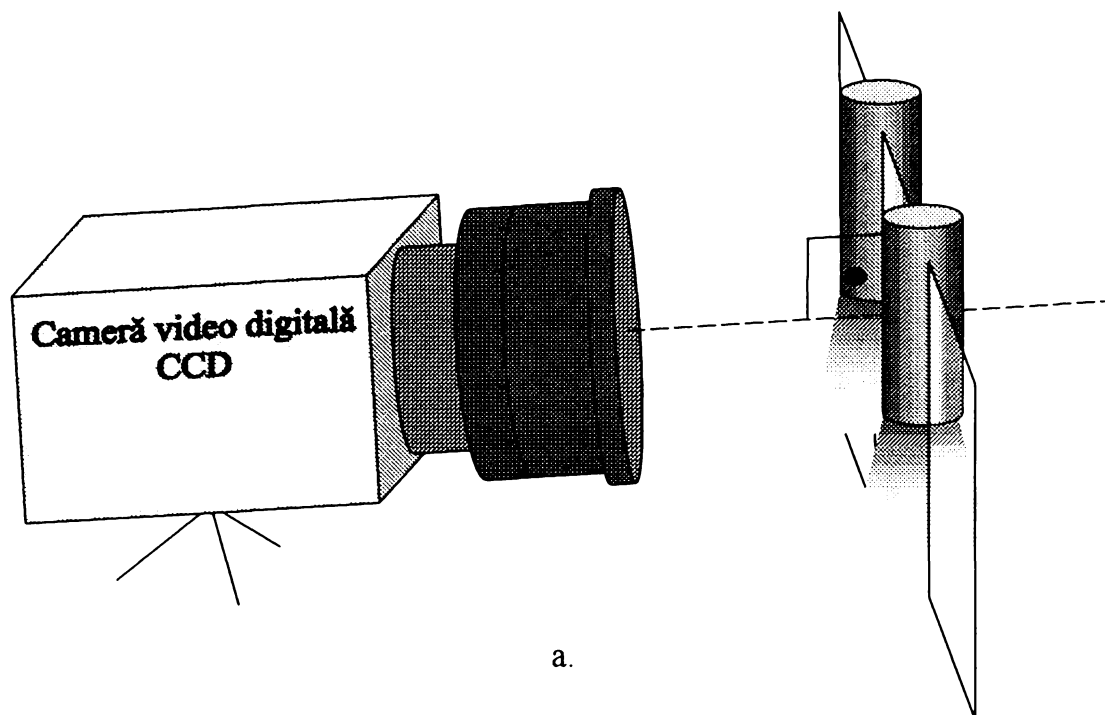


Fig. 3.60 Determinarea lungimii coloanei arcului de sudare

Caracteristicile materialului conului considerat sunt necunoscute dar sunt considerate a fi omogene la nivelul volumul acestuia.

Pornind de la relația deformării generale a unui corp solid:

$$\Delta l = \frac{F \cdot l}{E \cdot A} \quad (3.74)$$

unde:

- F – forța care produce deformarea, [N]
- L – lungimea inițială a corpului solid, [mm]
- E – modulul lui Young, [N/mm²]
- A – aria secțiunii corpului solid, [mm²]

a fost posibilă determinarea unui pseudo-modul Young pentru modelul fizic considerat.

În tabelele 3.1 și 3.2 sunt prezentate valorile rigidității corpului-model și valorile modului lui Young pentru o serie de situații concrete specifice sudării cu două sârme.

Tabel 3.1

Viteza de avans sârmă	Sudare MAG în curent nepulsat G3Si1-SREN440, M21-SREN439, capăt liber: 20 mm, ϕ : 1.2 mm						Forța electro-dinamică	Rigiditate arc	Secțiune medie arc	Modul Young
	Lungimea reală a arcului la sudarea cu o singură sârmă [mm]			Lungimea reală a arcului la sudarea cu două sârme [mm]						
	[m/min]	l_{film}	coeficient	l_{real}	l_{film}	coeficient				
4.00	17.60	6.67	2.64	35.40	6.67	5.31	0.47	0.18	4.00	0.04
5.00	18.40	6.67	2.76	35.60	6.67	5.34	1.47	0.57	4.20	0.14
6.00	19.30	6.67	2.89	36.70	6.67	5.50	2.47	0.95	4.40	0.22
7.00	20.70	6.67	3.10	37.30	6.67	5.59	3.47	1.39	4.60	0.30
8.00	22.00	6.67	3.30	38.00	6.67	5.70	4.47	1.86	4.80	0.39
9.00	23.10	6.67	3.46	38.90	6.67	5.83	6.44	2.72	5.00	0.54
10.00	24.70	6.67	3.70	39.70	6.67	5.95	8.77	3.90	5.20	0.75
11.00	25.80	6.67	3.87	40.40	6.67	6.06	11.45	5.23	5.40	0.97
12.00	26.70	6.67	4.00	41.30	6.67	6.19	14.50	6.62	5.60	1.18
13.00	28.20	6.67	4.23	42.20	6.67	6.33	17.90	8.53	5.80	1.47
14.00	29.60	6.67	4.44	43.10	6.67	6.46	21.66	10.70	6.00	1.78
15.00	30.10	6.67	4.51	44.20	6.67	6.63	25.78	12.20	6.20	1.97
16.00	31.40	6.67	4.71	44.80	6.67	6.72	30.26	15.06	6.40	2.35
17.00	33.90	6.67	5.08	45.30	6.67	6.79	35.10	20.54	6.60	3.11
18.00	35.00	6.67	5.25	46.10	6.67	6.91	40.28	24.20	6.80	3.56
19.00	35.50	6.67	5.32	48.40	6.67	7.26	45.80	23.68	7.00	3.38
20.00	35.60	6.67	5.34	50.50	6.67	7.57	51.70	23.14	7.20	3.21
21.00	36.80	6.67	5.52	53.40	6.67	8.01	58.01	23.31	7.40	3.15
22.00	37.30	6.67	5.59	57.50	6.67	8.62	64.64	21.34	7.60	2.81
23.00	38.00	6.67	5.70	59.30	6.67	8.89	71.62	22.43	7.80	2.88
24.00	38.40	6.67	5.76	61.60	6.67	9.24	78.96	22.70	8.00	2.84
25.00	39.60	6.67	5.94	63.00	6.67	9.45	86.70	24.71	8.20	3.01
26.00	40.40	6.67	6.06	65.30	6.67	9.79	94.72	25.37	8.40	3.02
27.00	42.00	6.67	6.30	68.30	6.67	10.24	103.10	26.15	8.60	3.04

Tabel 3.2

Viteza de avans sârmă	Sudare MAG în curent pulsat G3Si1-SREN440, M21-SREN439, capăt liber: 20 mm, ϕ : 1.2 mm						Forța electro-dinamică	Rigiditate arc	Secțiune medie arc	Modul Young
	Lungimea reală a arcului la sudarea cu o singură sârmă [mm]			Lungimea reală a arcului la sudarea cu două sârme [mm]						
[m/min]	l_{film}	coeficient	l_{real}	l_{film}	coeficient	l_{real}	[10^{-5} N]	[Nmm/mm]	[mm ²]	[10^{-5} N/mm ²]
4.00	26.70	6.67	4.00	35.20	6.67	5.28	2.78	2.18	3.50	0.62
5.00	28.20	6.67	4.23	37.40	6.67	5.61	4.12	2.99	3.70	0.81
6.00	29.60	6.67	4.44	38.50	6.67	5.77	6.34	4.75	3.90	1.22
7.00	30.10	6.67	4.51	40.40	6.67	6.06	8.44	5.47	4.10	1.33
8.00	32.50	6.67	4.87	41.30	6.67	6.19	11.79	8.94	4.30	2.08
9.00	34.10	6.67	5.11	42.20	6.67	6.33	13.88	11.43	4.50	2.54
10.00	34.90	6.67	5.23	43.10	6.67	6.46	16.57	13.48	4.70	2.87
11.00	35.50	6.67	5.32	44.20	6.67	6.63	18.29	14.02	4.90	2.86
12.00	35.60	6.67	5.34	44.80	6.67	6.72	23.85	17.29	5.10	3.39
13.00	36.40	6.67	5.46	45.30	6.67	6.79	28.31	21.22	5.30	4.00
14.00	37.30	6.67	5.59	45.50	6.67	6.82	32.34	26.31	5.50	4.78
15.00	38.30	6.67	5.74	45.80	6.67	6.87	38.78	34.49	5.70	6.05
16.00	38.60	6.67	5.79	46.10	6.67	6.91	43.88	39.02	5.90	6.61
17.00	39.60	6.67	5.94	46.40	6.67	6.96	48.45	47.52	6.10	7.79
18.00	40.50	6.67	6.07	47.00	6.67	7.05	52.10	53.46	6.30	8.49

Utilizând valorile calculate ale forțelor electrodinamice și valorile calculate ale pseudo-modulului Young, pentru modelul fizic propus anterior, a fost posibilă simularea acțiunii forțelor electrodinamice asupra coloanei arcului. Simularea a fost efectuată cu ajutorul programului de analiză cu elemente finite /20/ ANSYS 5.7.

Condițiile simulării au fost:

- forma arcelor: troncon cu baza mare având diametrul de 2.5 mm, iar baza mică având diametrul de 1.5 mm
- lungimile celor două arce: 8 mm
- deplasarea arcelor în punctul de inițiere (capetele sârmelor) a fost considerată zero pentru orice tip de deplasare
- curenții de sudare: 200 A
- încărcarea a fost asigurată pe generatoarele cele mai apropiate.
- forțele electrodinamice calculate pentru doi sistemul respectiv, cu o distanță între sârmele paralele de 8 mm: 18×10^{-5} N
- valoarea acceptată a modului Young: 3×10^{-5} N/mm².

Compararea rezultatului simulării cu situația reală măsurabilă în urma înregistrărilor video a permis confirmarea valorilor calculate ale pseudo-modulului Young.

În figura 3.61 este prezentată geometria, discretizarea și încărcarea modelului fizic utilizat în procesul de simulare.

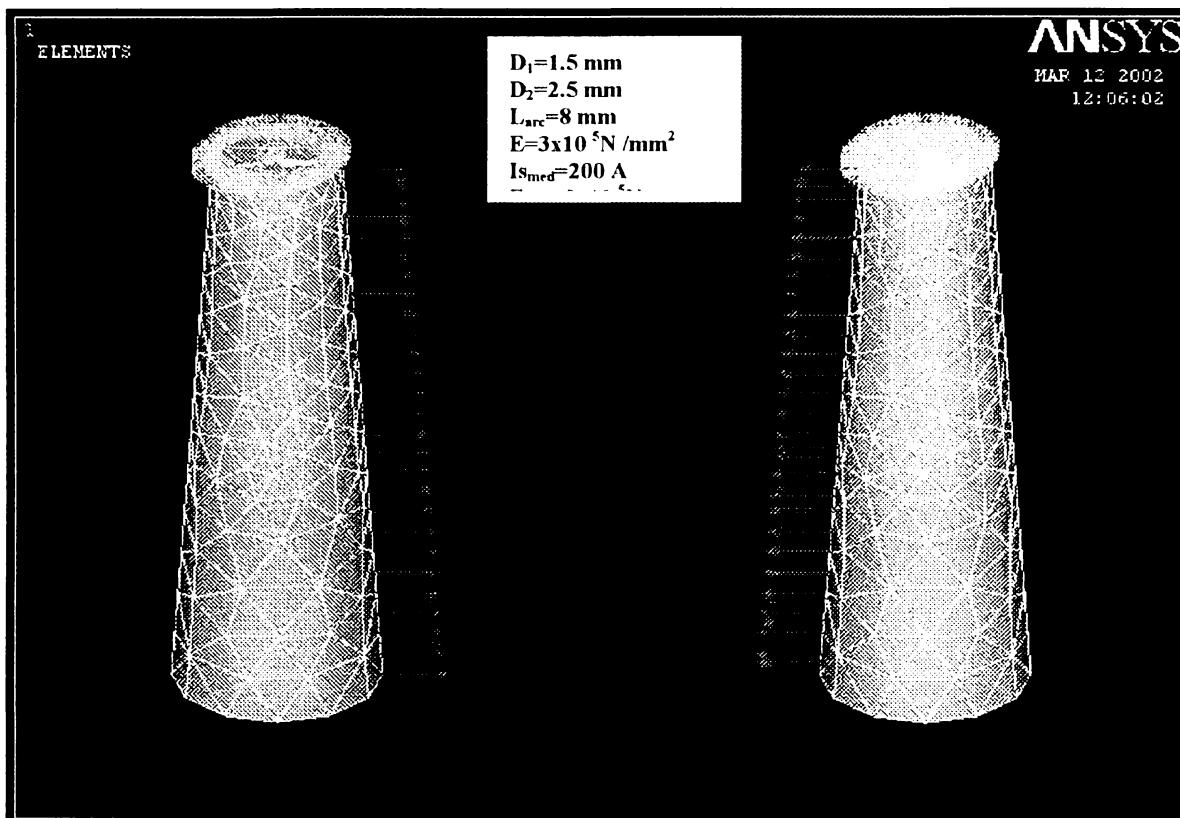


Fig. 3.61 Geometria, discretizarea și modul de încărcare ale modelului fizic

Discretizarea propusă a fost cea tetraedrală, aceasta oferind erori minime în calculul matriceal pentru situația dată. În figurile 3.62 și 3.63 sunt prezentate deformarea arcelor.

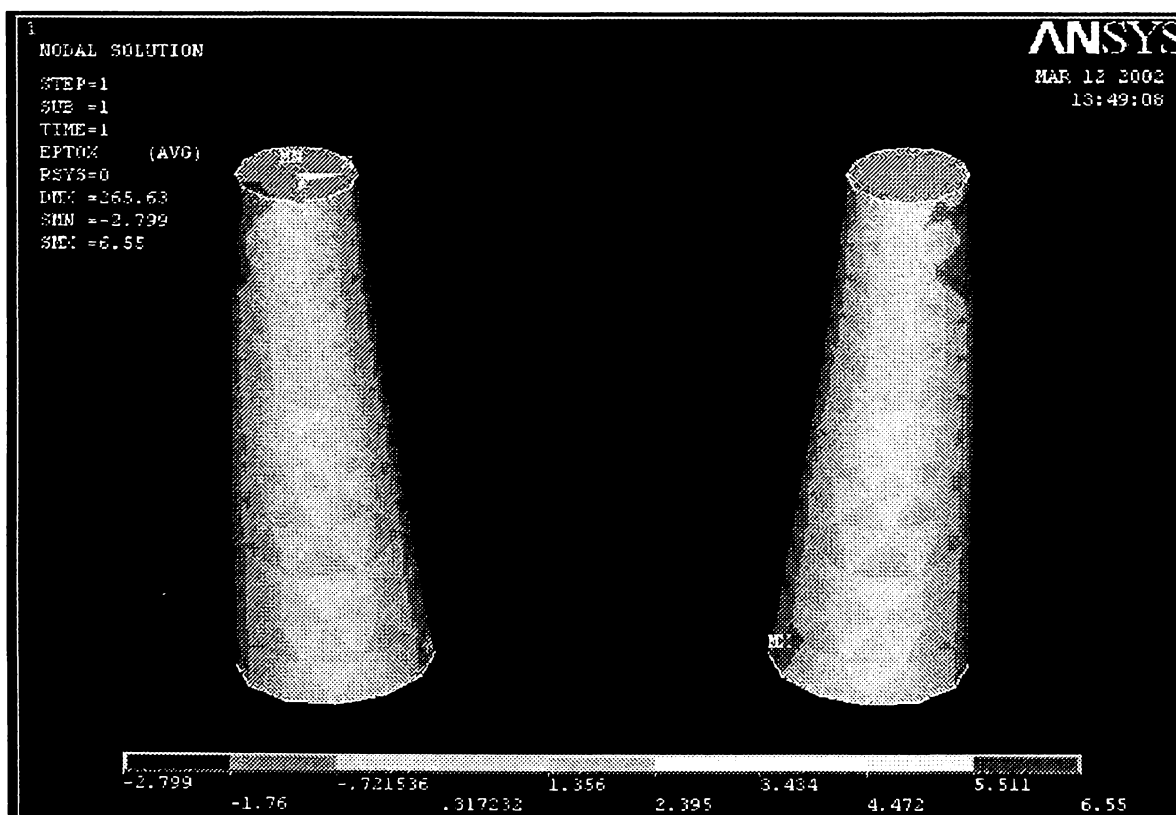


Fig. 3.62 Tensiunile după axa x în coloanele arcelor de sudare

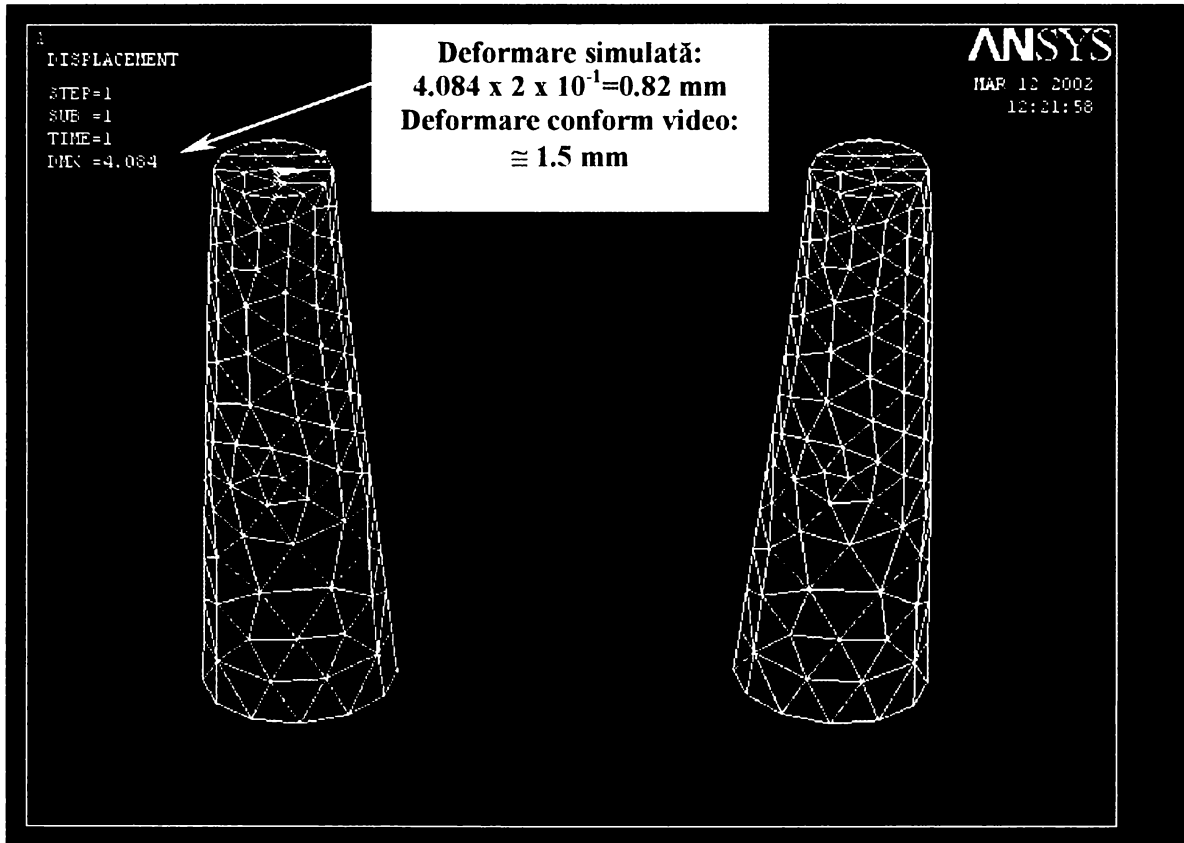


Fig. 3.63 Coloanele deformate ale arcelor de sudare

Diferența pare esențială între starea simulată și cea reală. Considerând însă raportul $\frac{L_{deformată}}{L_{nedeformată}}$, raport interesant în studiul variației curentului de sudare sub influența forțelor electrodinamice, această diferență devine mai puțin esențială.

Oricum, erorile de determinare sunt de ambele părți: erori de măsurare în cazul real și erorile introduse de calculul matriceal al deformației în cazul analizei cu elemente finite.

$$Masurat : \frac{L_{deformată}}{L_{nedeformată}} = \frac{0.82}{8} = 0.1025$$

$$Simulat : \frac{L_{deformată}}{L_{nedeformată}} = \frac{1.5}{8} = 0.1875$$

În figura 3.64 este prezentată schema vectorială a curgerii, iar în figura 3.65 este prezentată evoluția particulelor care compun modelul fizic. Figura 3.66 prezintă punctele cele mai deformate ale coloanei arcului.

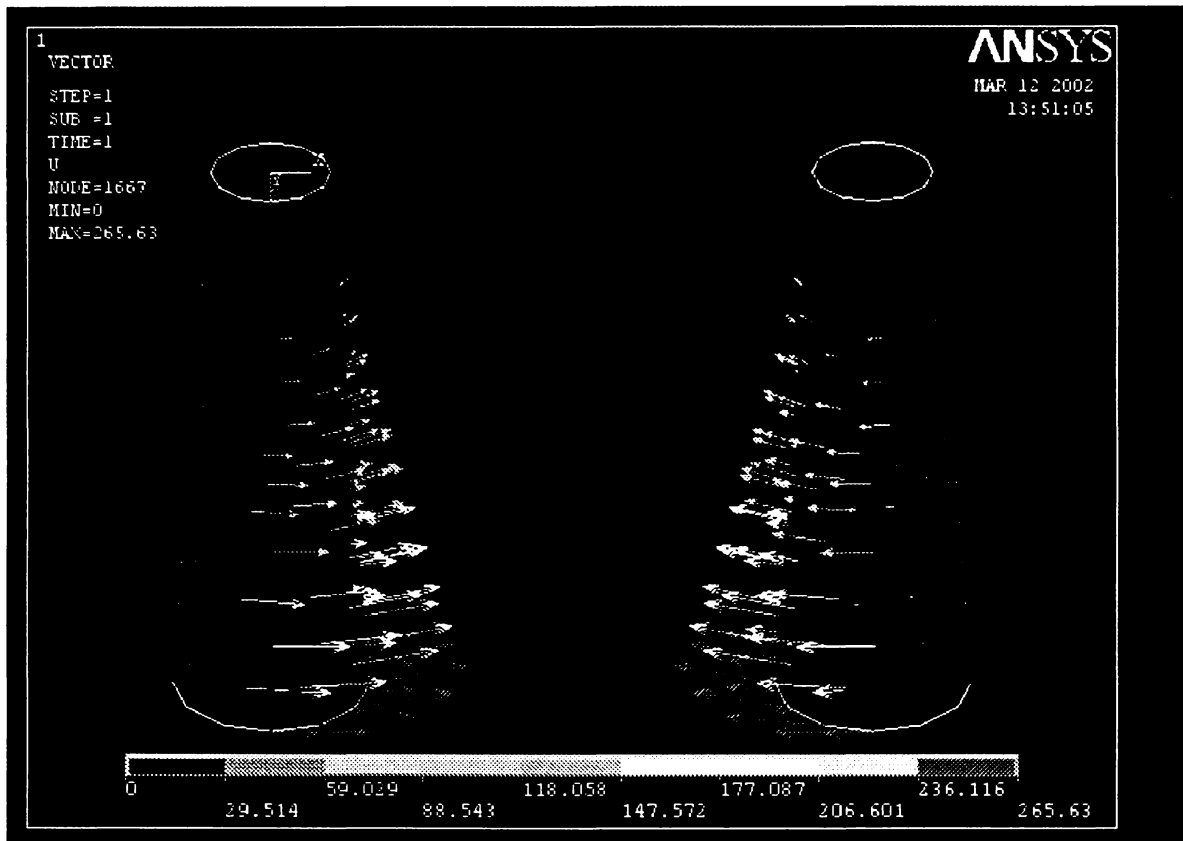


Fig. 3.64 Distribuția vectorială a mișcării arcului

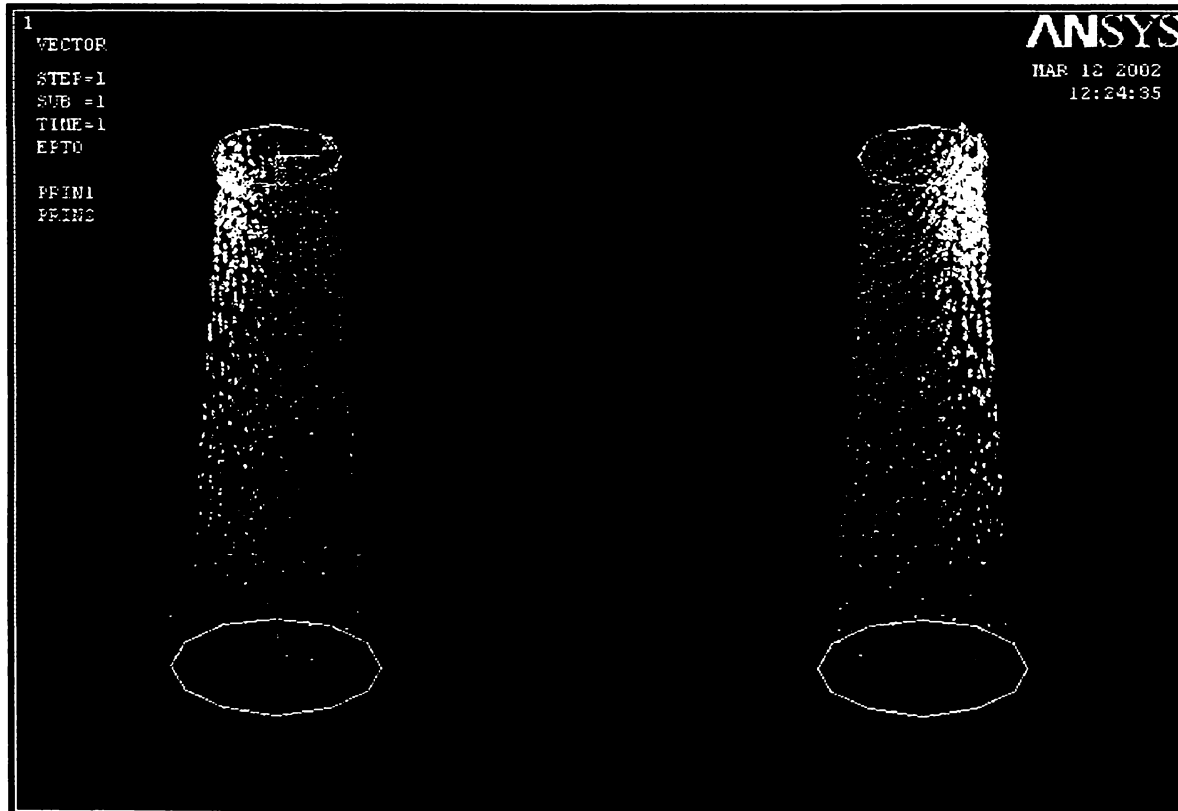


Fig. 3.65 Distribuția densității particulelor arcului în timpul deformării

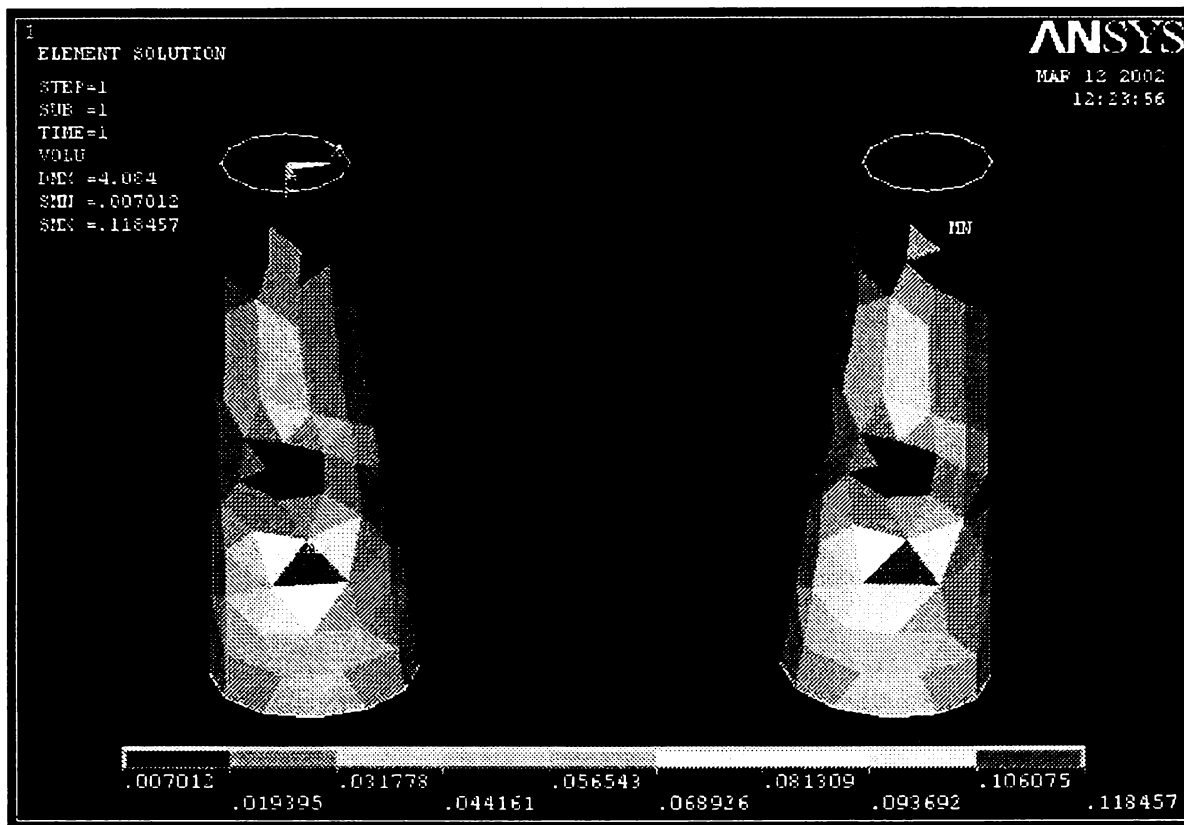


Fig. 3.66 Zonele cele mai deformate ale arcului după axa y perpendiculară pe planul axelor celor două arce

Acceptând erorile amintite anterior, se poate considera că modelul este conform realității, deformarea simulată a axei arcului fiind aproximativ egală cu deformarea determinată în urma înregistrărilor video. Acest fapt confirmă teoria influenței forțelor electrodinamice prezentată în cadrul capitolului. Rezultă astfel un important element în studiul evoluției coloanei arcului în timpul deplasărilor cu viteze relativ mari specifice senzorilor-arc și anume pseudo-modulul Young care poate fi utilizat la determinarea momentană a lungimilor deformate ale arcelor de sudare.

3.6 Controlul forței electrodinamice dezvoltate în timpul sudării

Pentru a putea controla forțele electrodinamice dezvoltate în timpul sudării este necesară găsirea poziției optime relative dintre cele două sârme și găsirea poziției optime a sârmelor relativ la rostul de sudare. Aceste poziționări depind de sistemul de sudare cu două sârme utilizat.

Dacă sistemul de sudare constă în alăturarea a două capete de sudare distincte, conform figurii 2.3, atunci pozițiile recomandate a fi adoptate sunt prezentate în tabelul 3.3 și figura 3.67. Aceste informații sunt rezultate ale cercetărilor întreprinse în cadrul laboratoarelor ISIM Timișoara, utilizându-se două instalații de sudare distincte /96/, conform celor prezentate în cadrul capitolului 1.

Condițiile de experimentare au fost:

- sârme de sudare: G3Si1, SR EN 440, ϕ 1.2 mm,
- gaz de protecție: M21 (18/82), SR EN 439, debit: 16-18 l/min,

- distanța dintre capetele celor două sârme a fost menținută constantă la valoarea de 8 mm,
- au fost modificate pe rând lungimile capetelor libere, l_i (mm), unghiul dintre cele două sârme, β ($^\circ$) și distanța dintre suprafața piesei de sudat și dreapta determinată de capetele celor două sârme, z (mm).

Determinările experimentale au fost efectuate în condițiile obținerii unei stabilități corespunzătoare a procesului de sudare și obținerii unei calități ridicate a îmbinării sudate (nivelul B de acceptare a defectelor conform SR EN 25817). Acestea au fost criteriile de alegere a limitelor domeniilor de reglare a parametrilor geometrici modificați în timpul experimentelor (tabelul 3.3).

Tabel 3.3

Modul de transfer	Capăt liber constant: $l_i=ct.$			Unghiul dintre sârme constant: $\beta=ct.$		
	l_i (mm)	β_{min} ($^\circ$)	β_{max} ($^\circ$)	β ($^\circ$)	$l_{i min}$ (mm)	$l_{i max}$ (mm)
Prin scurtcircuitare	20	30	40	30	30	35
	25	30	50	40	25	35
	30	30	60	50	25	35
	35	30	60	60	20	35
Prin pulverizare	25	30	50	30	25	35
	30	30	60	45	25	30
	35	30	60	60	25	30
Pulsat sinergic	20	30	40	30	20	35
	25	30	40	45	30	35
	30	30	45	60	30	35
	35	30	45	-	-	-

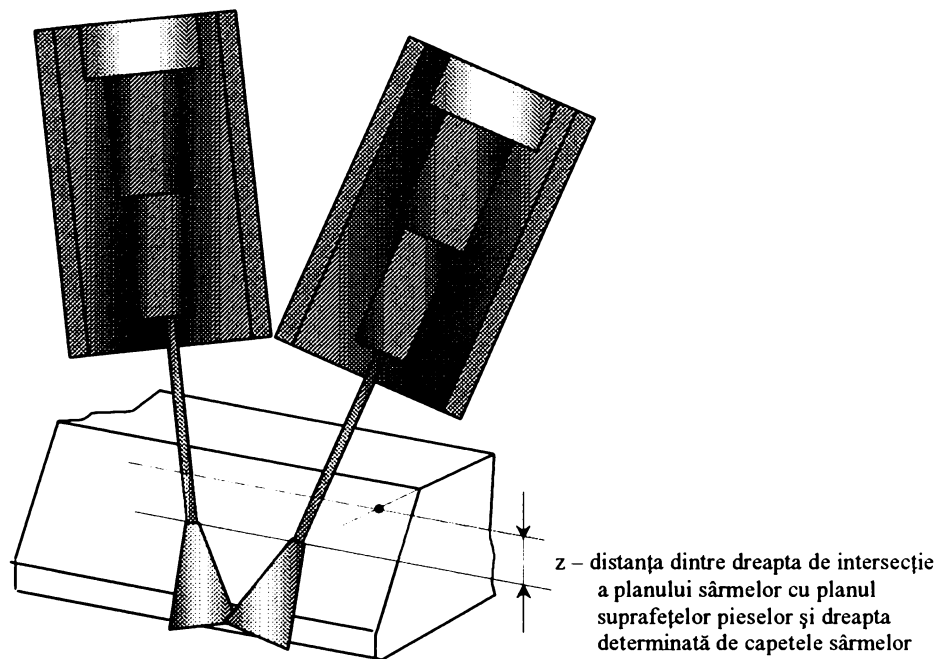


Fig. 3.67 Poziția sârmelor relativ la rostul de sudare

În funcție de modul de transfer de metal utilizat la sudare, se precizează distanțele dintre suprafața piesei de sudat și capătul sârmelor ca fiind:

- **transfer prin scurtcircuitare:** punctul de intersecție al sârmelor va fi în interiorul rostului la cota z :

$$z \in - (0,7s ; 0,8s), s > 5 \text{ mm}$$

- **transfer prin pulverizare:** punctul de intersecție al sârmelor va fi în interiorul rostului la cota z :

$$z \in - (0,4s ; 0,5s), s > 5 \text{ mm}$$

- **transfer în curent pulsant:** punctul de intersecție al sârmelor va fi în interiorul rostului la cota z :

$$z \in - (0,6s ; 0,7s)$$

- dacă viteza de sudare este mai mare de 4 m/min și grosimea componentelor de sudat este mai mare de 5 mm;

$$z \in - (0,5s ; 0,6s)$$

- dacă viteza de sudare este mai mică de 4 m/min și grosimea componentelor de sudat este mai mare de 5 mm.

Dacă sistemul de sudare este caracterizat prin utilizarea unui cap de sudare specializat, având două duze de contact distinct alimentate electric, conform figurii 2.2, este posibilă modificarea poziției relative a celor două sârme, dar într-un domeniu restrâns.

În acest caz parametrul care trebuie urmărit este distanța dintre capetele celor două sârme, parametru care poate avea valori tehnologice cuprinse în intervalul 3-12 mm.

Utilizând acest sistem, cu modificarea distanței respective, este posibilă așezarea celor două sârme în paralel sau sub un anumit unghi.

Când sârmele nu sunt paralele forțele electrodinamice capătă valori atât de mari la nivelul capetelor sârmelor încât este dificilă menținerea stabilă a procesului de sudare.

Dacă sistemul de sudare conține un singur cap de sudare specializat pentru sudarea cu două sârme, sârmele fiind alimentate prin intermediul unei singure duze de contact, de la o singură sursă de sudare, este dificilă modificarea poziției relative a celor două sârme. Din acest motiv este necesară asigurarea prin proiectare a unei forme corespunzătoare pentru duza de contact, astfel încât să se poată controla valorile forțelor electrodinamice dezvoltate.

4

Modelarea și optimizarea traiectoriei capului de sudare

4.1 Alegerea modului de oscilare a capului de sudare pentru realizarea senzorului

Obținerea unei variații a lungimii arcului care să permită determinarea poziției relative a capului de sudare este posibilă prin scanarea transversală a rostului de sudare de către fiecare arc în parte. Diferența majoră față de senzorii-arc clasici utilizați la sudarea cu o singură sârmă este faptul că în cazul sudării cu două sârme trebuie determinată și corectată poziția planului celor două sârme de sudare relativ la axa rostului, pe când la sudarea cu o singură sârmă este de ajuns a se menține un punct (vârful sârmei) în axa rostului.

Determinarea și corectarea poziției unui plan presupune controlarea unui număr mai mare de parametrii geometrici.

În cazul sudării cu o singură sârmă există tehnici specifice de pendulare a capului de sudare în vederea modificării lungimii arcului. Aceste tehnici pot fi mai mult sau mai puțin adaptate la un sistem de sudare cu două sârme.

Datorită configurației capului de sudare cu două sârme sunt posibile 3 moduri principale (figura 4.1 a, b, c) prin care poate fi oscilată poziția capului de sudare în vederea realizării senzorului-arc.

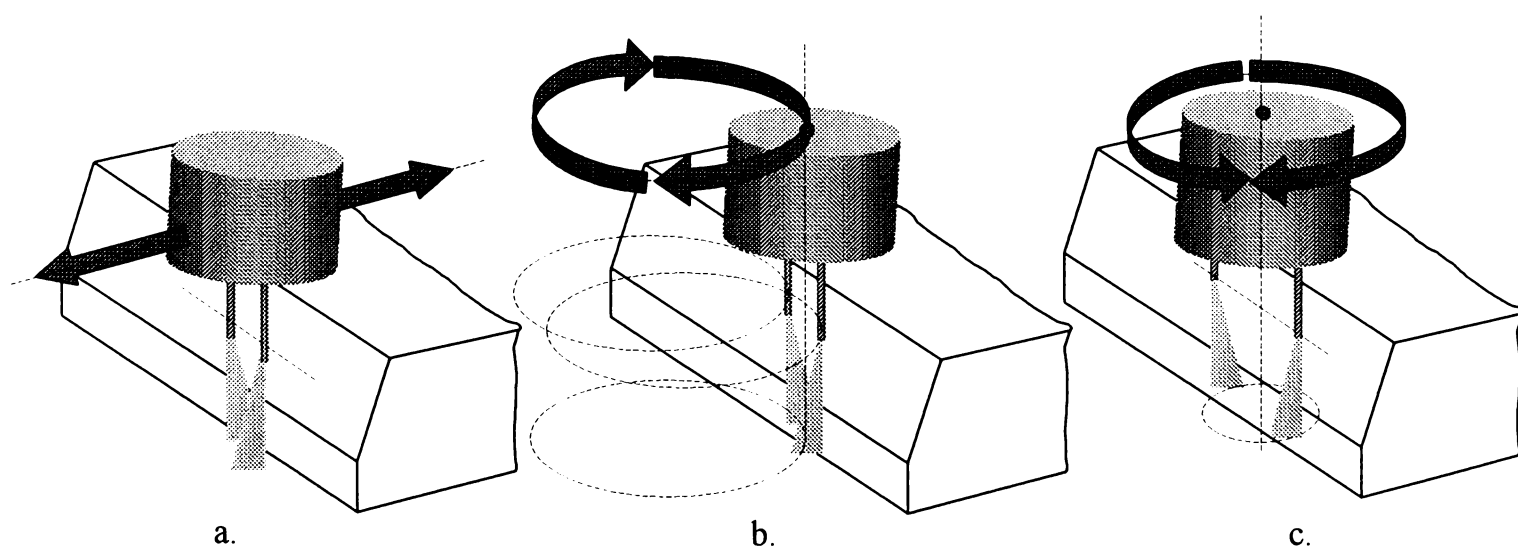


Fig. 4.1 Moduri posibile de oscilare a capului de sudare în timpul funcționării senzorului-arc

4.1.1 Oscilarea alternativ transversală perpendiculară pe axa rostului

Imprimarea unei mișcări de translație alternativă transversală pe axa rostului (figura 4.1 a.) reprezintă cea mai simplă soluție a problemei alegerii modului de oscilare a capului de sudare. Dacă mișcarea în sine este relativ simplu de realizat, ceea ce prezintă un avantaj, semnalul înregistrat este dificil de prelucrat. Fiind vorba despre oscilarea cu o frecvență cuprinsă între 3-10 Hz a unui cap de sudare a cărui greutate este de 1.200 g, amplitudinea mișcării fiind de aproximativ 7 mm, asupra capului de sudare acționează o forță de inerție a cărei valoare este de aproximativ 100–120 N. Schimbarea bruscă a sensului de deplasare conduce la înregistrarea eronată a valorilor curenților în momentul schimbării sensului de deplasare (figura 4.2). Întârzierea datorată schimbărilor sensului de deplasare și vibrația datorată decelerării și apoi accelerării bruște conduc la înregistrarea succesivă a unor valori eronate pentru curentul maxim de sudare.

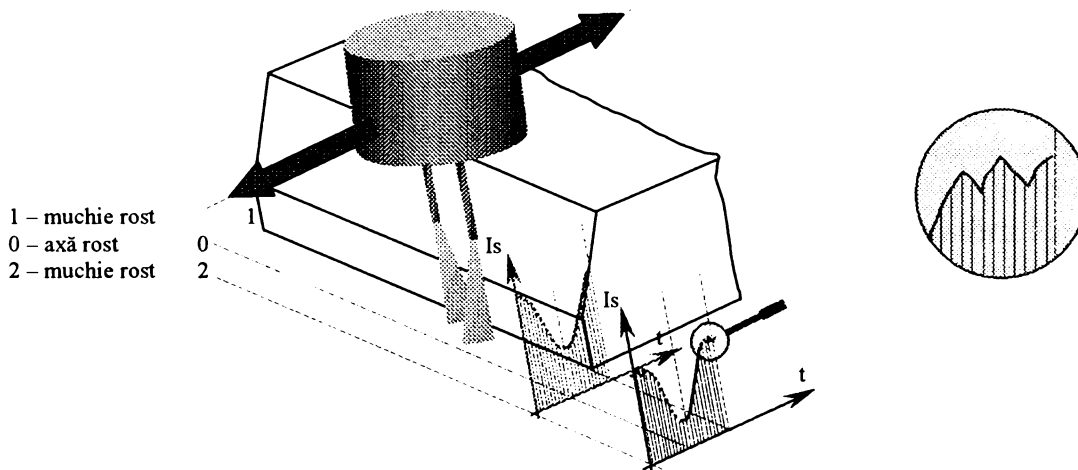


Fig. 4.2 Influența modului de oscilare a capului de sudare asupra variației curentului de sudare

Fiind vorba tocmai de valorile utilizate în corectarea poziției capului de sudare, este necesară dezvoltarea unui algoritm complex de extragere a valorii care trebuie supusă procesului de comparare cu valoarea de referință. De asemenea, sistemul de comparare este dificil de configurat datorită dispersiei mari a valorilor înregistrate (figura 4.3)

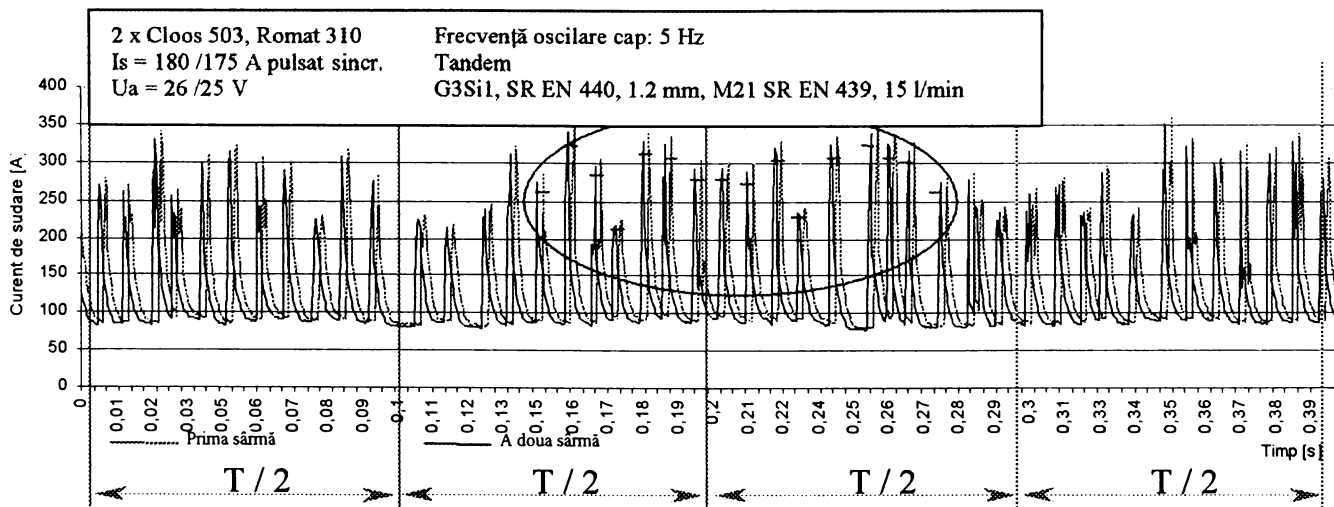


Fig. 4.3 Dispersia valorilor înregistrate în cazul oscilării capului de sudare (evidențiere experimentală) /102/

Un alt dezavantaj al acestui mod de oscilare constă în transmiterea de informații false sistemului de comparare dacă planul celor două sârme nu este paralel cu axa rostului (figura 4.4).

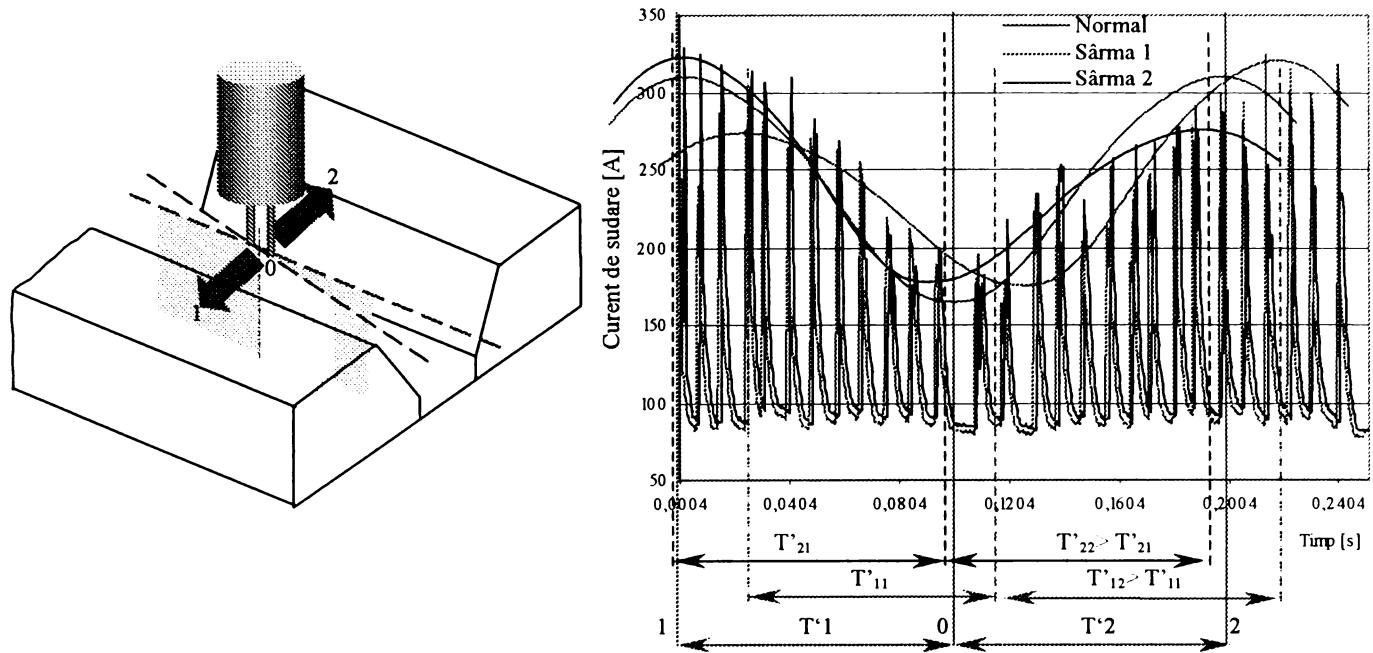


Fig. 4.4 Dezechilibrarea sistemului de comparare datorită deplasării în spațiu a planului celor două sârme relativ la axa rostului de sudare (evidențiere experimentală) /102/

În cazul în care aceasta formează un anumit unghi cu axa rostului semnalele transmise de cele două arce sunt diferite, sistemul de comparare neputând interpreta situația.

4.1.2. Rotirea planului celor două sârme fără modificarea orientării acestuia

Această mișcare este specifică senzorilor-arc utilizați la sudarea cu o singură sârmă. Alegându-se o frecvență de oscilare și o rază de rotire cu valori bine determinate este posibilă obținerea unei variații a curentului de sudare care să permită o interpretare relativ simplă.

Configurația capului de sudare cu două sârme nu permite însă o astfel de mișcare. Imprimând o astfel de mișcare de rotație, în paralel cu mișcarea tehnologică de translație, atât arcul creat de sârma a doua în direcția de avans cât și arcul creat de prima sârmă efectuează multe treceri peste același punct, oferind valori diferite pentru o singură poziție (figurile 4.5 și 4.6). În acest caz interpretarea semnalului este foarte dificilă, iar extragerea semnalului util este aproape imposibilă.

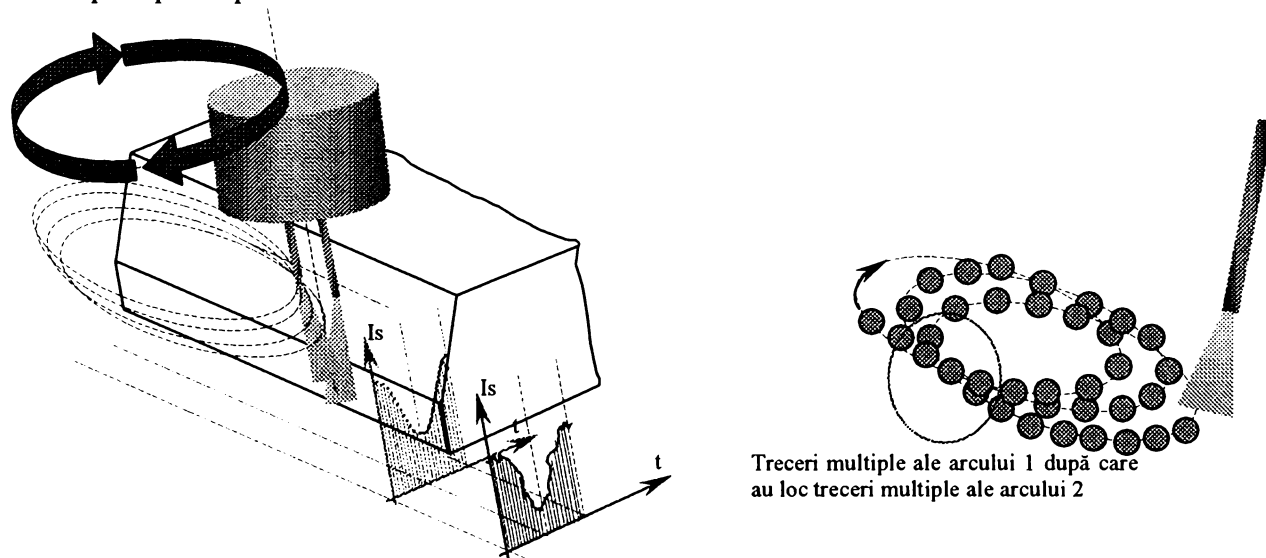


Fig. 4.5 Oscilarea prin rotirea planului celor două sârme cu menținerea acestuia în poziție paralelă cu axa rostului

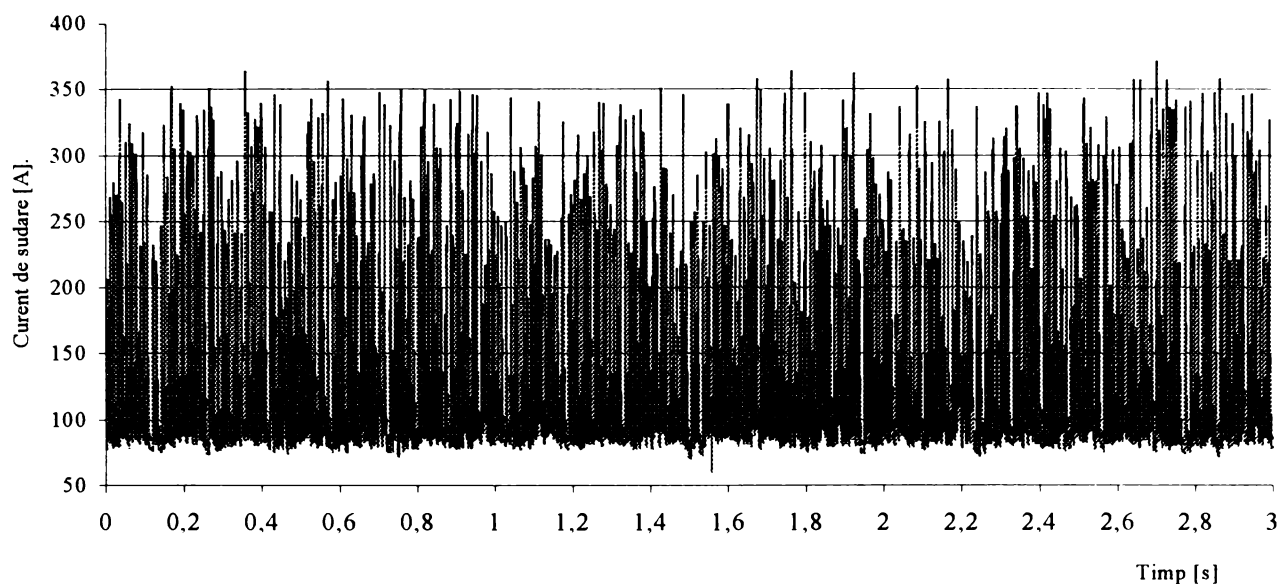


Fig. 4.6 Înregistrarea curenților de sudare în cazul oscilării capului de sudare prin rotire

Este posibilă utilizarea acestui mod de oscilare numai în cazul în care se înregistrează și se interpretează variația curentului printr-un singur arc. Acest lucru nu permite, însă, determinarea poziției planului celor două sârme ci numai a capătului unei singure sârme.

4.1.3. Rotirea alternativă a capului de sudare în jurul unei axe imaginare situată la jumătatea distanței dintre cele două sârme și conținută în planul acestora

Această metodă este eficient de aplicat în cazul în care distanța dintre cele două sârme este mai mare decât 5 mm. Cercetările efectuate în domeniul stabilității procesului de sudare cu două sârme au evidențiat, conform celor prezentate în capitolul 3, necesitatea utilizării unor distanțe între cele două sârme de minim 3 mm. Această necesitate derivă din condițiile de control a interacțiunii electromagnetice din zona de sudare, optimul fiind situat în domeniul 6-12 mm.

Oscilarea constă în rotirea alternativă a capului de sudare în jurul unei axe imaginare situată la jumătatea distanței dintre cele două sârme și conținută în planul acestora, conform figurii 4.7. În acest fel, cele două arce își modifică lungimea simultan, curenții prin arce suportând modificări majore. Preluând variațiile celor doi curenți, variații evident independente una de cealaltă, este posibilă cunoașterea și corectarea poziției capetelor sârmelor relativ la axa rostului. Implicit, este posibilă controlarea on-line a poziției planului celor două sârme relativ la axa rostului.

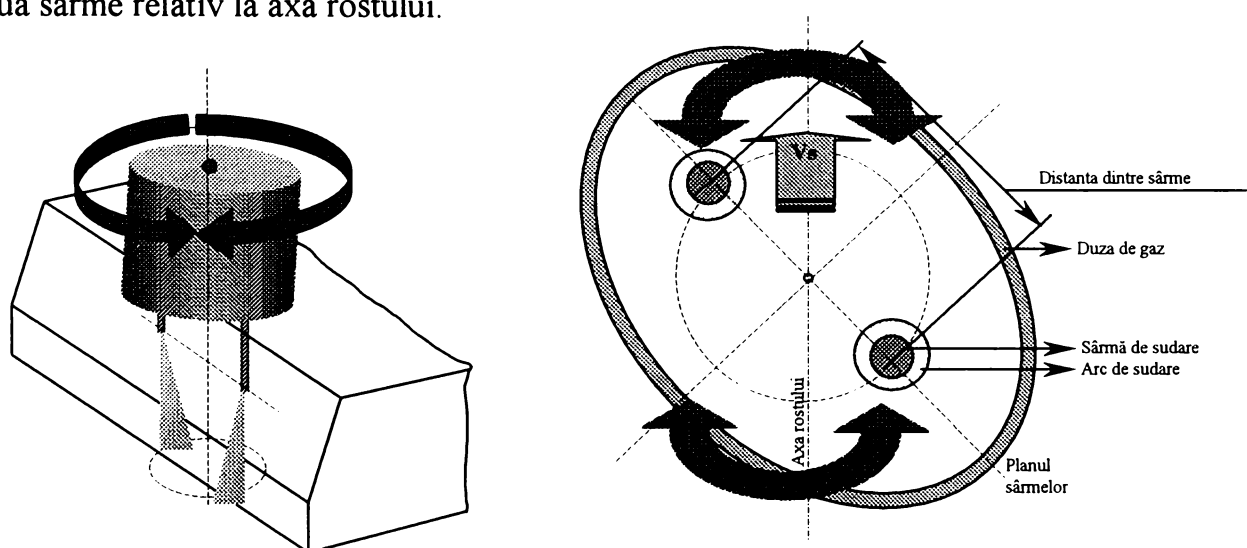


Fig. 4.7 Modul de oscilare a capului de sudare pentru realizarea senzorului-arc

Avantajele acestei metode oscilare sunt:

- nu este necesară deplasarea capului de sudare perpendicular pe axa rostului comparativ cu celelalte două metode prezentate, ceea ce face posibilă utilizarea senzorului și în cazul sudurilor de la structuri complexe unde accesul este limitat;
- datorită traiectoriei descrise este posibilă utilizarea independentă a celor doi cureni utili, deci este posibilă și facilă corectarea poziției planului celor două sârme on-line;
- utilizându-se mecanisme judicios concepute (figura 4.8) este posibilă evitarea șocurilor de la schimbarea sensului de rotire a capului de sudare prin neinversarea sensului de rotire a motorului de antrenare a capului de sudare;
- utilizându-se un motor pas cu pas este posibilă cunoașterea în orice moment a poziției celor două sârme și deci lungimea fiecărui arc în parte; dacă se cunoaște cu precizie reacția sursei la modificarea lungimii arcului este posibilă crearea unui model de variație a curentului prin arc pentru diferite frecvențe de rotire a capului de sudare, model care va sta la baza procesului de corecție a poziției capului de sudare.

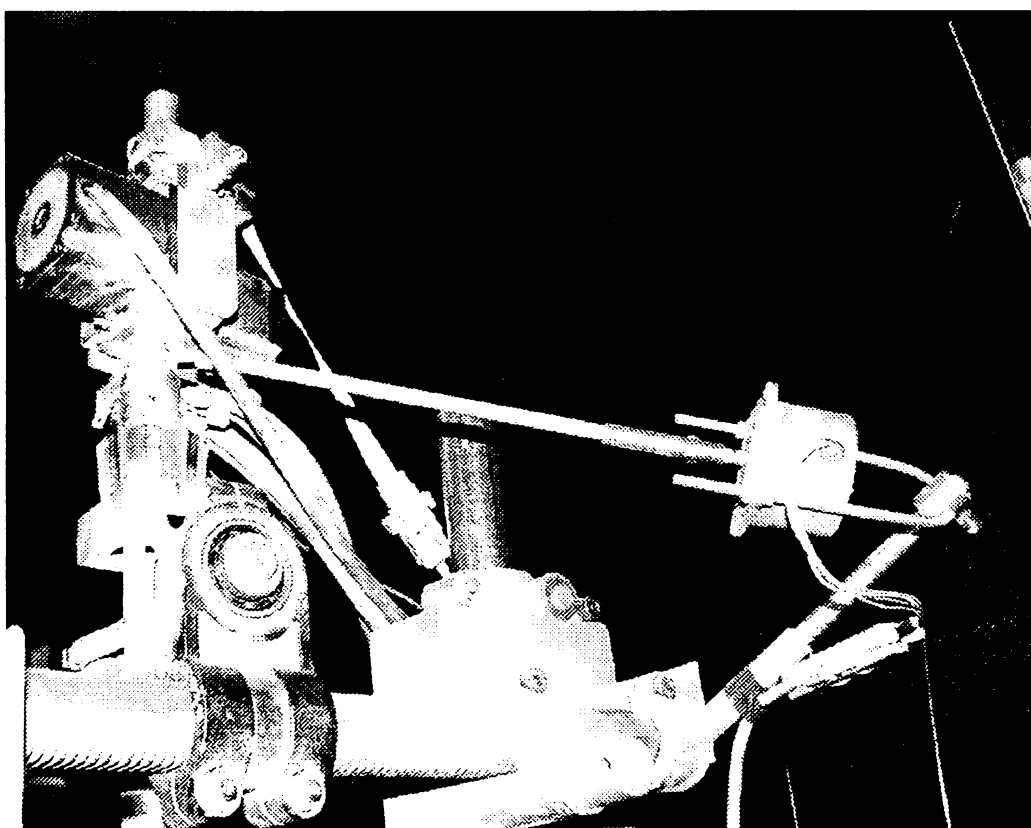


Fig. 4.8 Exemplu de mecanism de pendulare transformat în mecanism de oscilare (SLV München)

Principalul dezavantaj al acestei metode este cel specific senzorilor-arc și anume dificultatea utilizării în cadrul trecerilor de umplere a rostului de sudare. Un alt dezavantaj constă în poziționarea axei de rotație a capului de sudare cu precizie crescută între cele două sârme de sudare. Orice excentricitate necesită corecții fizice ale poziției axei sau corecții ale algoritmului utilizat la funcționarea etajului de comparare a valorii înregistrate cu valoarea de referință rezultată din modelul matematic. Aceeași eroare poate fi dată și de modificarea accidentală a distanței dintre cele două sârme.

Comparând cele 3 metode prezentate anterior, în baza condițiilor pe care trebuie să le îndeplinească un senzor-arc, s-a acceptat superioritatea tehnică a celei de-a treia metode. Din acest motiv s-a utilizat această metodă de oscilare pentru efectuarea programului experimental necesar verificării modelelor matematice propuse în capitolele anterioare.

4.2 Modelarea matematică a traiectoriilor descrise de capetele de sârmelor în timpul funcționării senzorului-arc

Conform principiului general de funcționare a sistemului senzor-arc, capetele sârmelor de sudare trebuie să scaneze suprafața rostului de sudare transversal pe axa acestuia. Această mișcare este necesară provocării unei reacții-răspuns din partea sursei de sudare, reacție constând în modificarea valorilor curenților prin arce.

Cunoscând configurația mișcării capului de sudare, este posibilă modelarea matematică a traiectoriilor celor două sârme. Astfel, traiectoria descrisă de capătul fiecărei sârme poate fi modelată acceptând existența unei mișcări compuse din:

- o mișcare circulară având raza egală cu jumătate din distanța dintre capetele celor două sârme (figura 4.9.a);
- o mișcare de translație dată de deplasarea tehnologică a capului (figura 4.9.b).

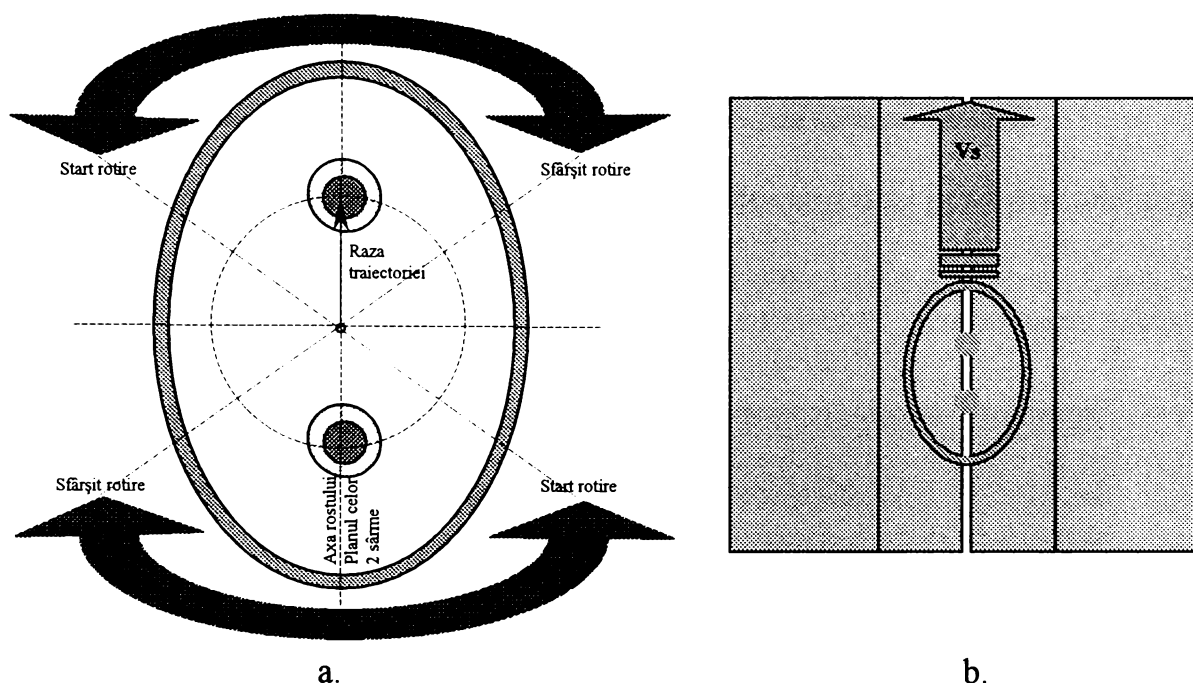


Fig. 4.9 Mișcările de bază care compun mișcarea senzorului

Vitezele celor două mișcări sunt limitate din motive de ordin tehnologic și anume:

- translația:
 - min 50 cm/min – din motive de productivitate și evitare a apariției imperfecțiunilor de material de tipul lipsei de topire și incluziunilor de zgură;
 - max 150 cm/min – din motive de evitare a discontinuităților care pot apare în îmbinarea sudată, precum și de evitare a obținerii unor depuneri cu forme necorespunzătoare.

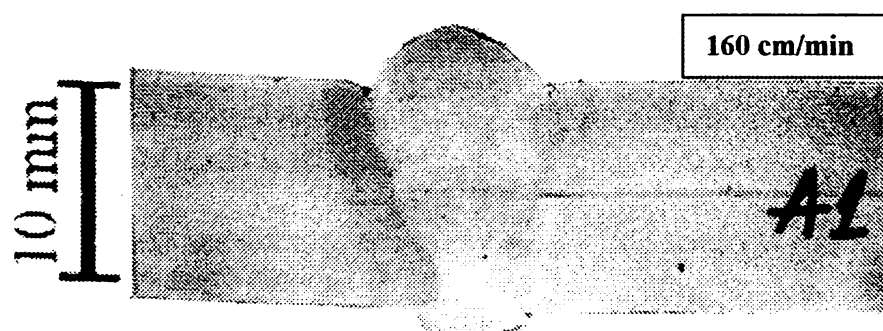


Fig. 4.10 Formă necorespunzătoare a depunerii la viteze mari de sudare /96/

- mișcarea circulară:
 - min 1Hz – din motive de evitare a transformării mișcării pentru înregistrare în mișcare tehnologică de pendulare;

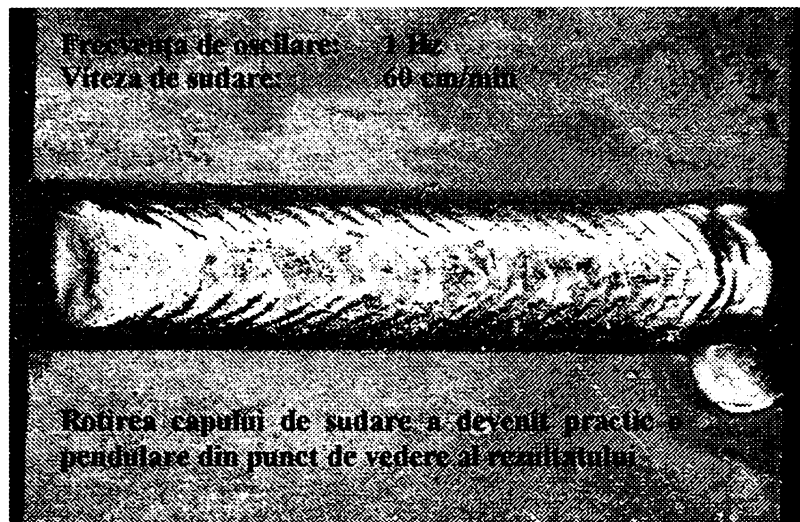


Fig. 4.11 Frecvența de oscilare de 1 Hz a condus la obținerea unei pendulări tehnologice

- max 10 Hz – din motive de evitare a efectuării a două treceri succesive prin zone foarte apropiate, fenomen cu efect în vicierea parametrilor de corecție.



Fig. 4.12 Depunere discontinuă datorată vitezei mari de sudare (150 cm/min) combinată cu o frecvență mare de oscilare a capului de sudare (15 Hz)

Compunerea celor două mișcări conduce la obținerea unei traiectorii asemănătoare celei prezentate în figura 4.13.

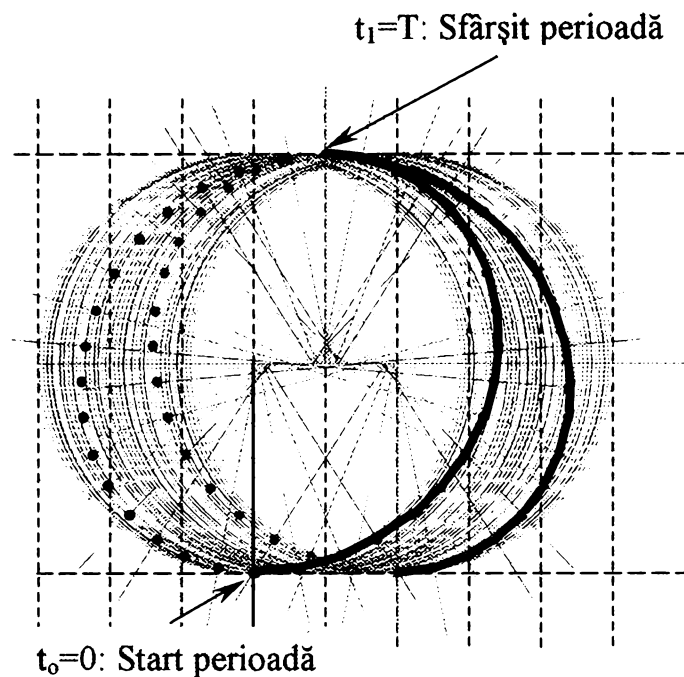


Fig. 4.13 Traiectoria descrisă de capătul sârmei de sudare

Modelul matematic al mișcării capătului sârmei se bazează pe proiectarea în planul xOy a fiecărei mișcări în parte considerate în timp. Ecuația mișcării de translație se poate prezenta sub forma dată de relația 4.1.

$$y_t = v \cdot t \quad (4.1)$$

Mișcarea circulară poate fi descrisă în planul xOy de două ecuații conform relațiilor (4.2) și (4.3).

$$x_c = R \cdot \cos \omega \cdot t \quad (4.2)$$

$$y_c = R \cdot \sin \omega \cdot t \quad (4.3)$$

Compunerea celor două mișcări constă în însumarea mișcărilor pe fiecare axă în parte, iar introducerea ecuațiilor în planul mișcării constă în eliminarea timpului între cele două ecuații obținute. Se consideră astfel succesiv:

- din ecuația deplasării după axa x (4.2) rezultă variabila timp, t :

$$t = \frac{\arccos\left(\frac{x_c}{R}\right)}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad (4.4)$$

- compunerea mișcărilor după axa y (însumarea deplasărilor date de ecuațiile (4.1) și (4.3))

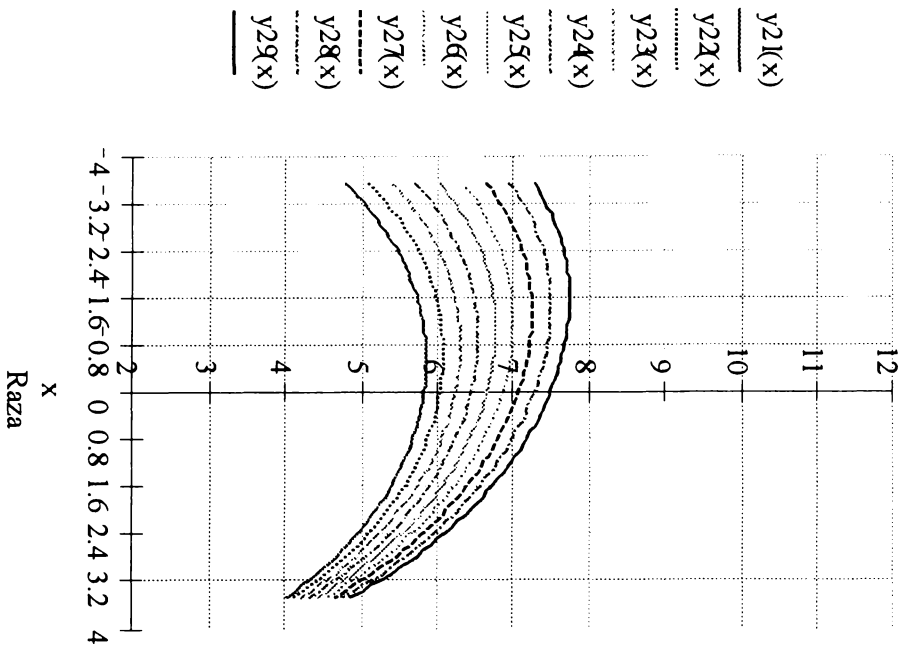
$$y = y_c + y_t = R \cdot \sin \omega \cdot t + v \cdot t \quad (4.5)$$

- introducerea variabilei t din ecuația (4.4) în ecuația (4.5) conduce la obținerea ecuației mișcării:

$$y = R \cdot \sin\left(\arccos\frac{x}{R}\right) + v \cdot \frac{\arccos\frac{x}{R}}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad (4.6)$$

În figura 4.14 sunt prezentate traiectoriile calculate ale capului de sudare pentru viteze de sudare cuprinse între $v_s = 40 \dots 120$ cm/min și frecvențe de oscilare cuprinse între $f = 1 \dots 4$ Hz, distanța dintre sârme fiind egală cu 7 mm, iar în figura 4.15 traiectoriile calculate pentru aceleași condiții dar în cazul frecvențelor cuprinse între $f = 5 \dots 8$ Hz

Traiectoria pentru frecventa de 2 Hz



Traiectoria pentru frecventa de 4 Hz

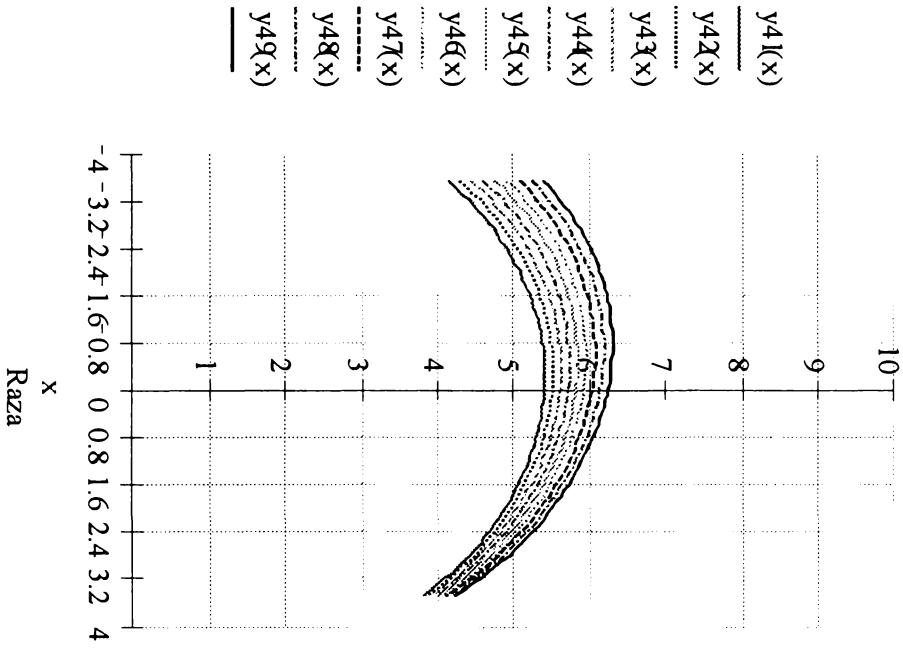
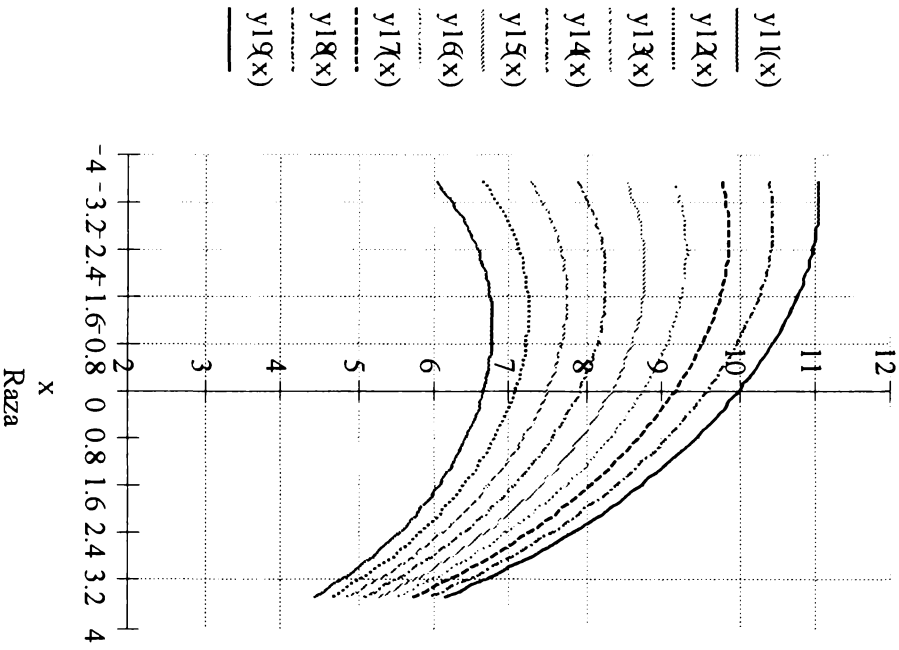
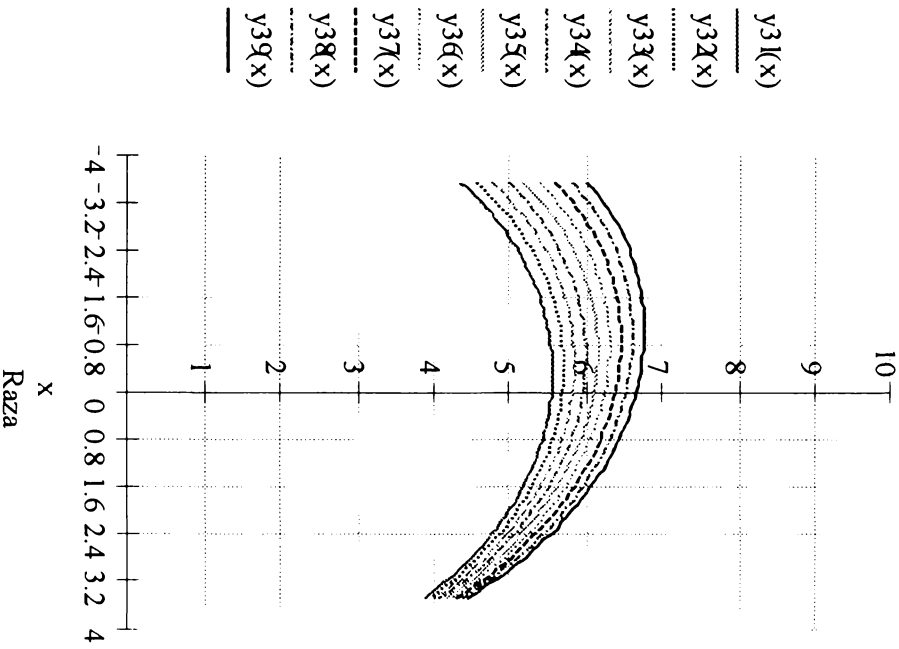


Fig. 4.14 Traiectoriile calculate ale capului de sudare pentru frecvențe de oscilare cuprinse între $f = 1 \dots 4$ Hz

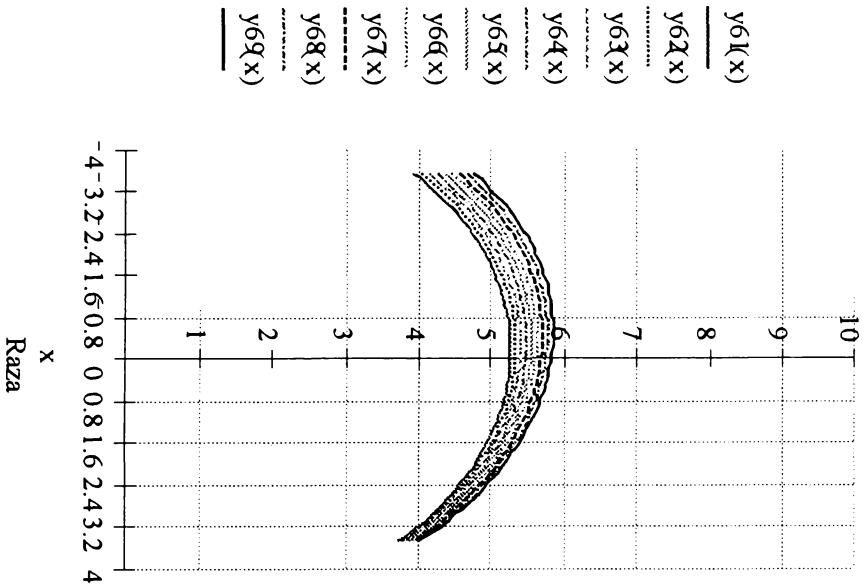
Traectoria pentru frecventa de 1 Hz



Traectoria pentru frecventa de 3 Hz



Traectoria pentru frecventa de 6 Hz



Traectoria pentru frecventa de 8 Hz

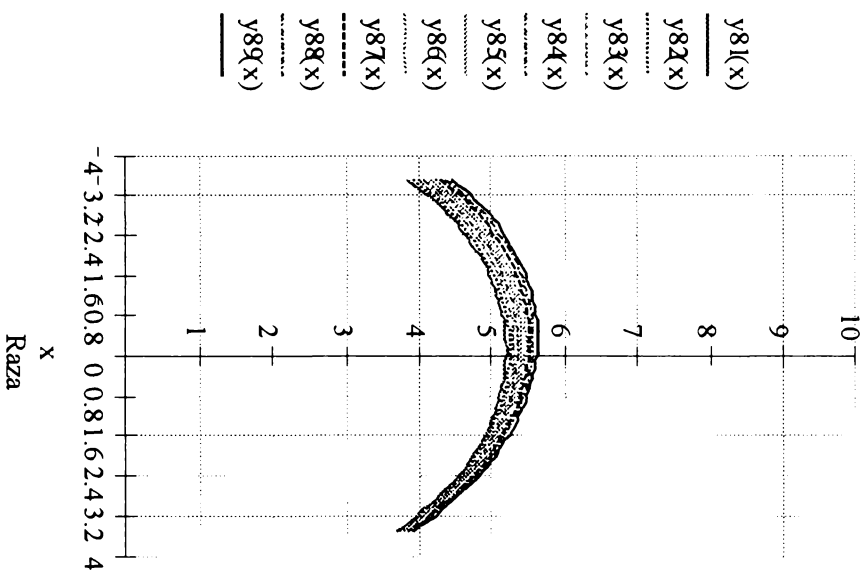
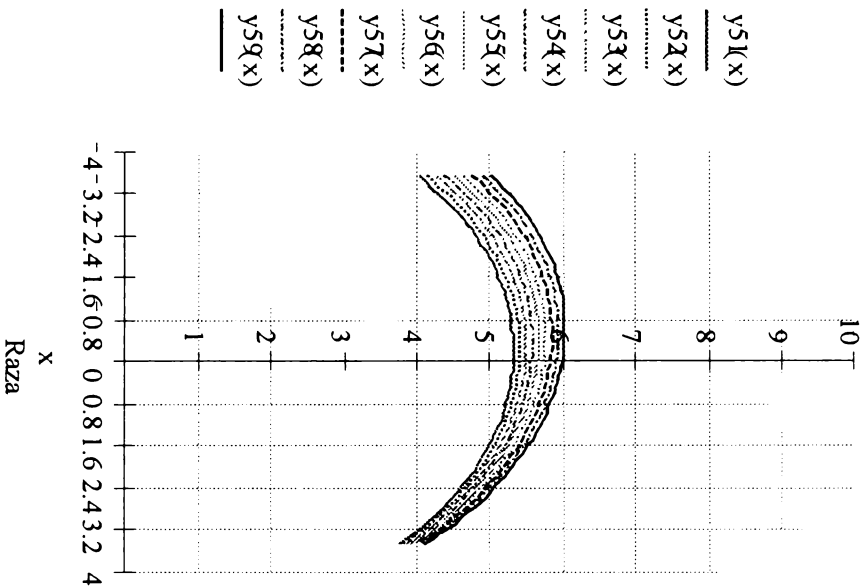
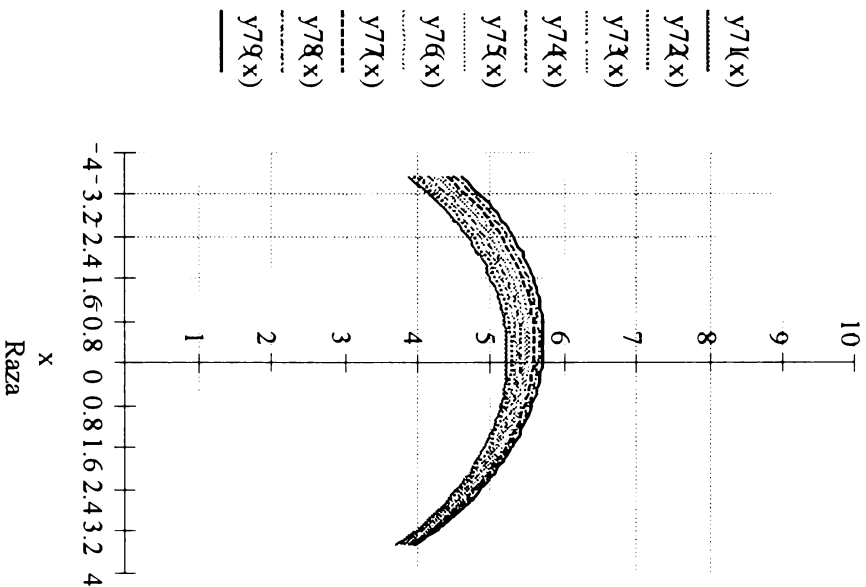


Fig. 4.15 Traectoriile calculate ale capului de sudare pentru frecvențe de oscilare cuprinse între $f = 5 \dots 8$ Hz

Traectoria pentru frecventa de 5 Hz



Traectoria pentru frecventa de 7 Hz



4.3 Optimizarea frecvenței de oscilare a capului de sudare

Înregistrările efectuate în cadrul experimentărilor de sudare demonstrează existența unei strânse legături între variația curentului de sudare în timpul funcționării senzorului-arc și frecvența de oscilare a capului de sudare (figurile 4.16 și 4.17).

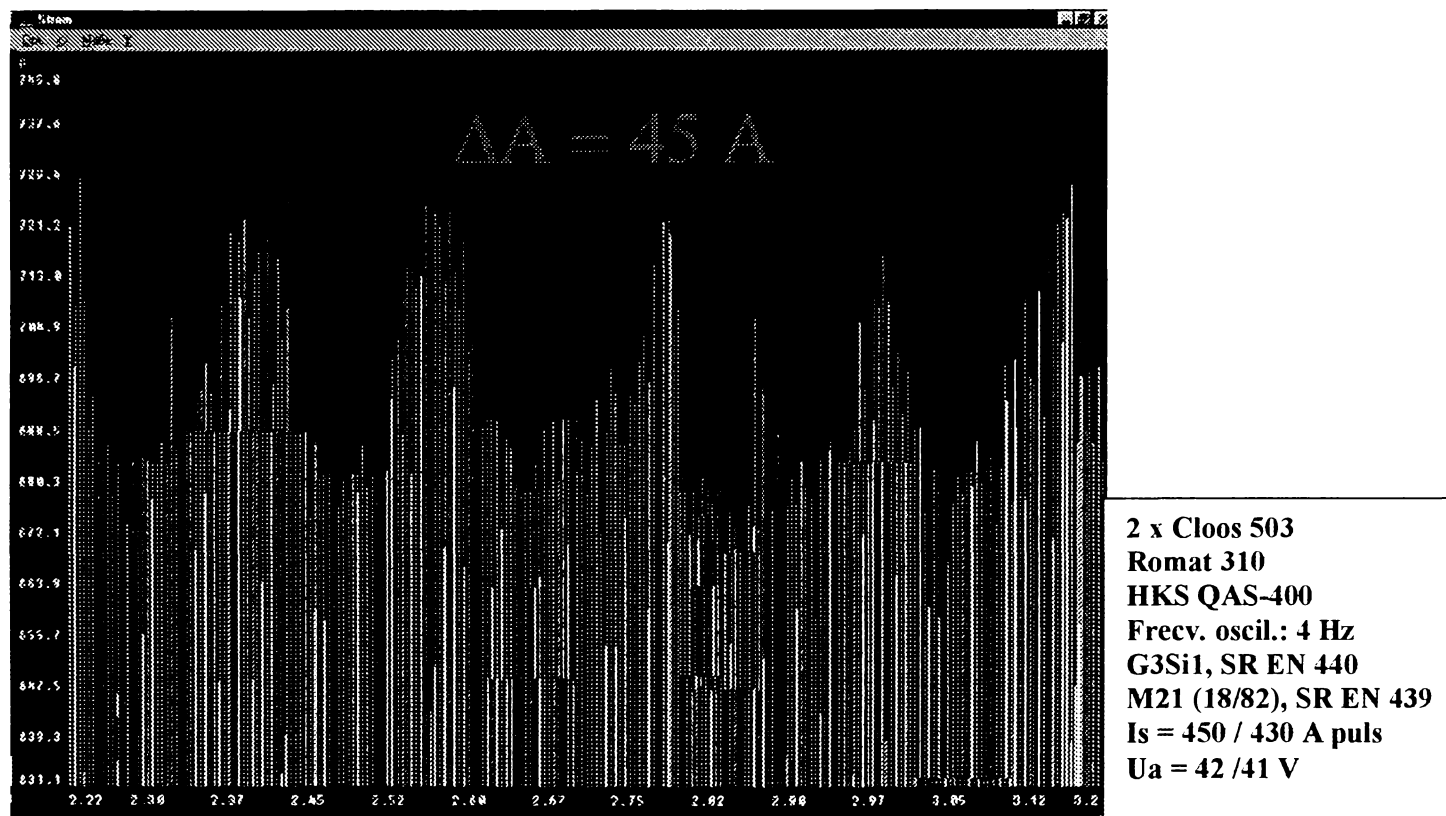


Fig. 4.16 Variația curentului de sudare pentru o frecvență de oscilare de 4 Hz /102/

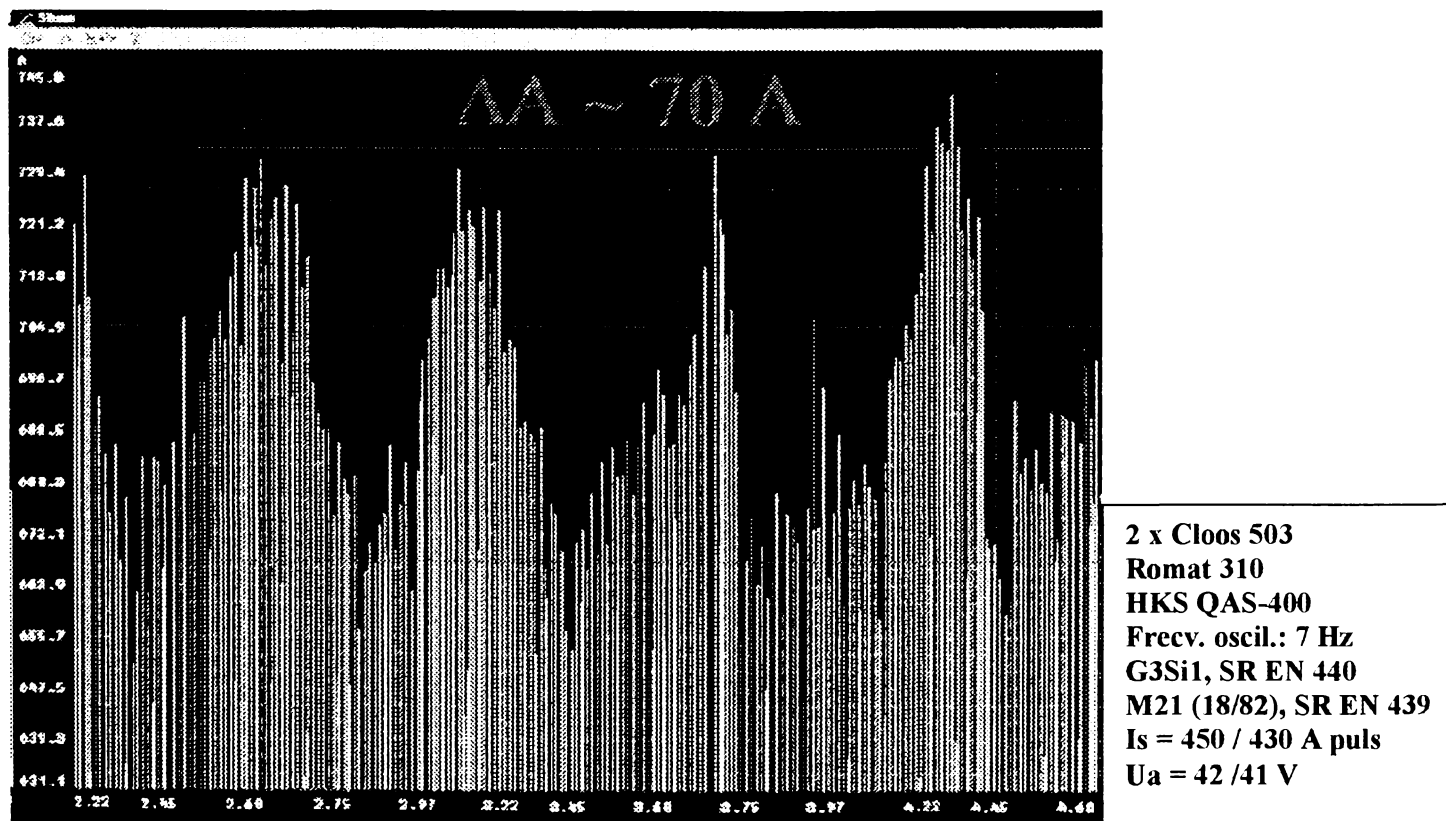


Fig. 4.17 Variația curentului de sudare pentru o frecvență de oscilare de 7 Hz /102/

Fiind vorba de o mișcare oscilatorie, fenomenele legate de această mișcare pot fi exprimate utilizând metoda dezvoltării în serie Fourier. Coeficienții acestei serii sunt multipli ai frecvenței de oscilare conform relațiilor (4.7) și (4.8).

$$\left\{ \begin{array}{l} a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) dt \\ a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cdot \cos \frac{2\pi n t}{T} dt \\ b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cdot \sin \frac{2\pi n t}{T} dt \end{array} \right\} n \neq 0 \quad (4.8)$$

Logica impune alegerea unei frecvențe de oscilare relativ mari pentru a se neutraliza procesul de corectare a lungimii arcului de către sursa de sudare. De asemenea, este necesară o frecvență ridicată pentru ca oscilarea să nu devină pendulare tehnologică, situație în care parametrii de sudare achiziționați ar vicia funcționarea senzorului-arc. Vicierea rezultatului înregistrat constă în citirea unor valori de curenți care au loc la trecerea peste o anumită depunere și nu direct peste rostul de sudare.

Privind din punct de vedere al sistemului mecanic de oscilare, frecvențele reduse sunt mai indicate fiind vorba de deplasarea după o anumită traiectorie a unui cap de sudare având o greutate de minim 1.200 grame. Sistemul mecanic, oricât de bine ar fi proiectat și executat, introduce la începutul și la sfârșitul mișcării o vibrație cu amplitudine și durată limitate (figura 4.18), dar de ajuns cât să modifice valorile curentului de sudare. Vibrația este însoțită adesea și de o întârziere a reluării mișcării în sens opus, ceea ce înseamnă că oscilarea este discontinuă, iar variația curentului de sudare nu poate fi privită ca și o oscilare periodică a unei mărimi fizice.

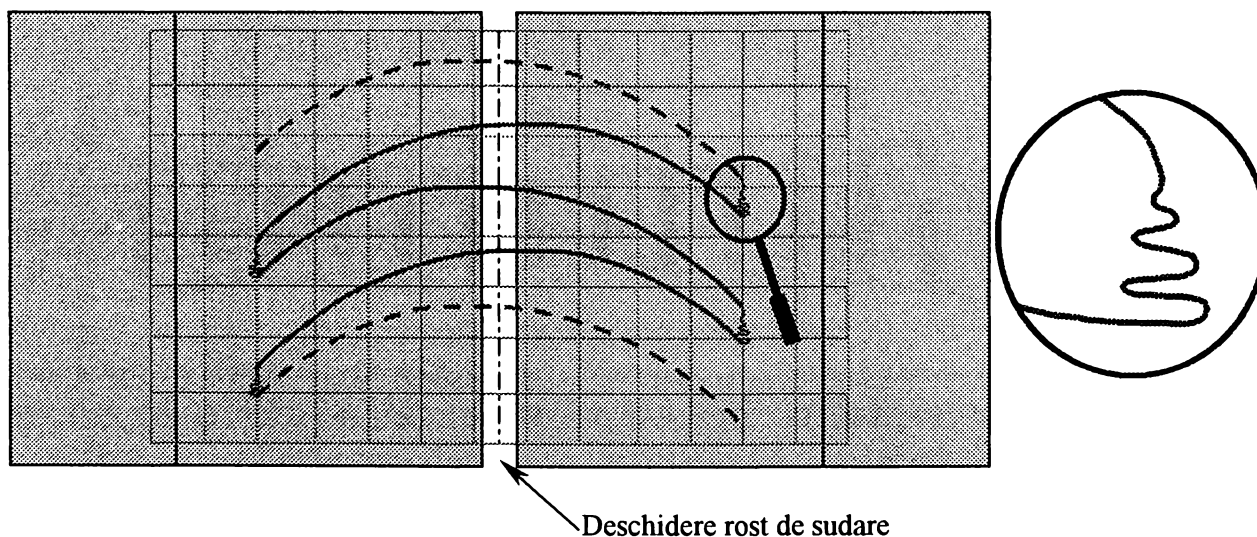


Fig. 4.18 Vibrația sistemului mecanic la sfârșitul mișcării de oscilare

Existența acestei vibrații a constituit și unul din criteriile de alegere a modului de oscilare a capului de sudare transversal pe rost. Constituirea în criteriu de alegere a avut la bază rezultatul înregistrărilor valorilor curenților de sudare la fiecare sfârșit de perioadă a oscilării. Aceste înregistrări au evidențiat o dispersie importantă a valorilor maxime ale

curentului de sudare, dispersie dependentă de frecvența de oscilare a capului de sudare. În figurile 4.19 a, b și c sunt prezentate dispersiile înregistrate ale valorilor maxime ale curentului de sudare pentru cele trei moduri de oscilare a capului de sudare.

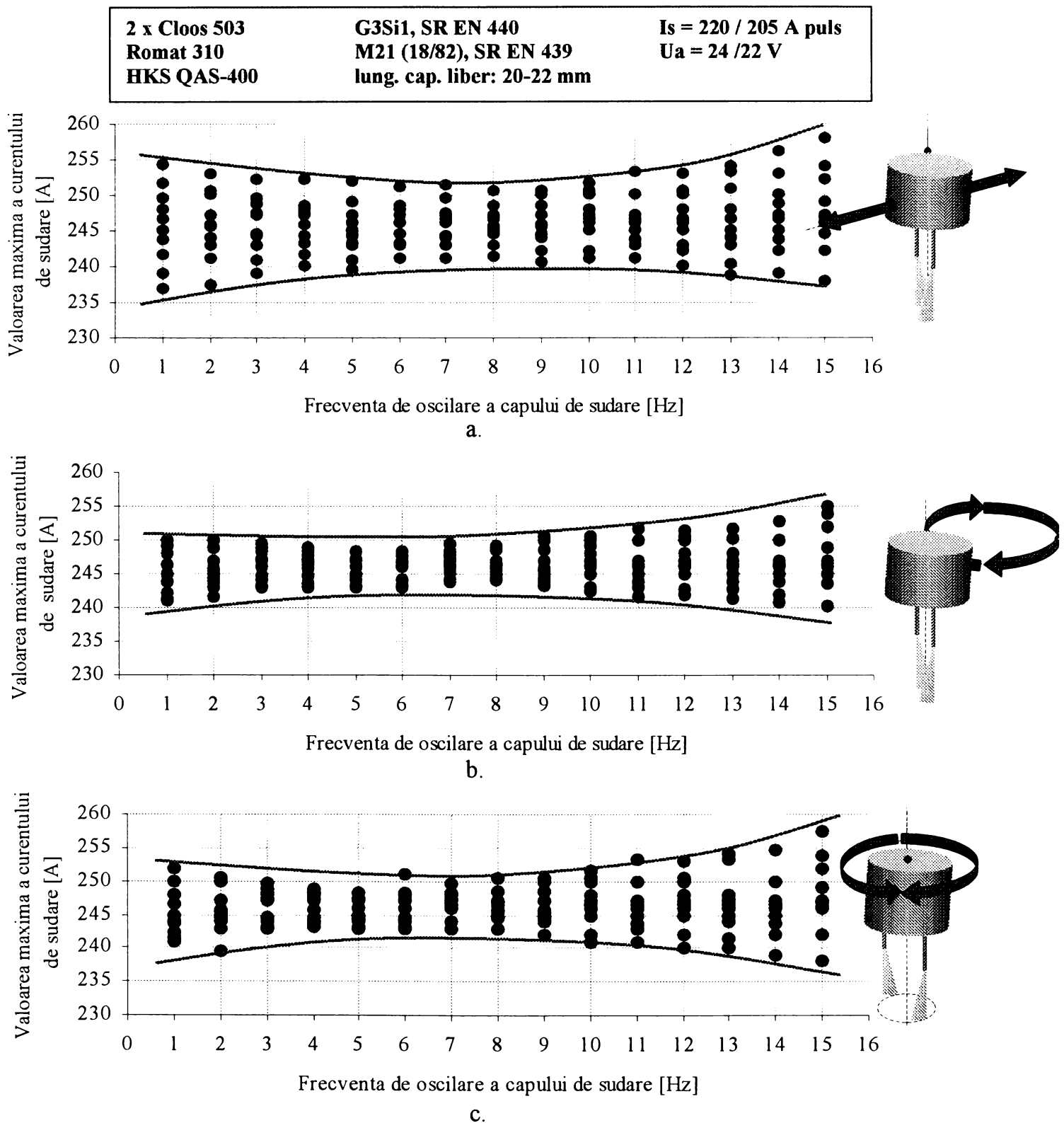


Fig. 4.19 Dispersia valorilor maxime ale curentului de sudare înregistrate la sfârșitul unei perioade a oscilării

Se poate observa că cea mai mică influență are loc în cazul rotirii capului de sudare cu menținerea poziției planului celor două sârme de sudare (figura 4.19 b). Maximul dispersiei determinate experimental a fost de 15 A. Cazul prezentat este valabil când este efectuat un

singur ciclu de oscilare, pentru o singură perioadă. La cea de-a doua trecere situația este complet diferită, dispersia fiind mult mai mare.

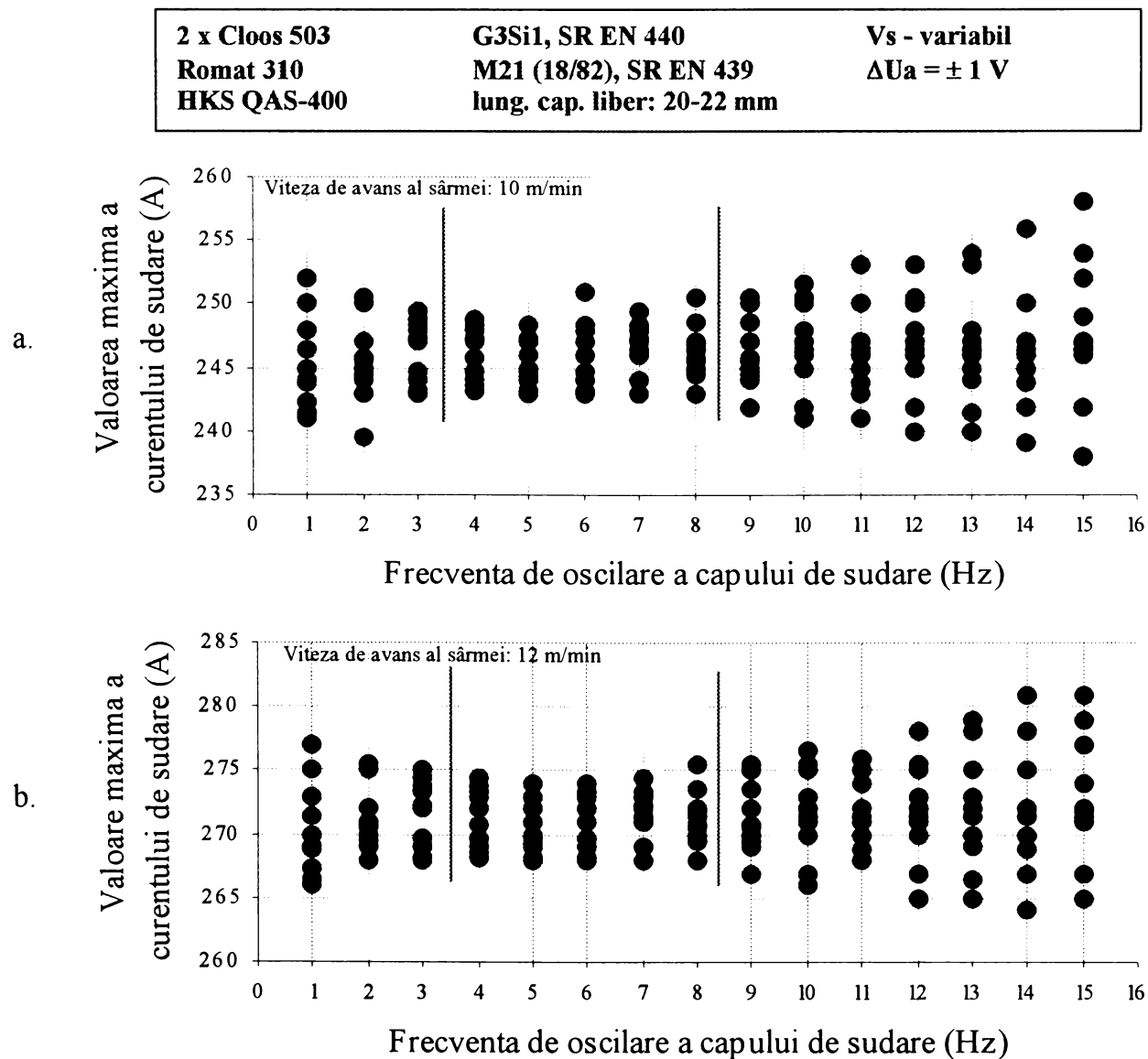
Cea mai puternică influență are loc în cazul pendulării transversale pe rost a capului de sudare (figura 4.19 a). Inerția dată de accelerația capului de sudare și de masa acestuia implică o vibrație cu amplitudine mai mare decât în celelalte două cazuri, dispersia valorilor înregistrate fiind pe măsură. Maximul dispersiei determinate experimental a fost de 20 A.

În cazul rotirii capului de sudare în jurul unei axe situată între cele două sârme de sudare, situația aleasă în urma trierii, dispersia este undeva între cele două cazuri prezentate anterior (figura 4.19 c). Maximul dispersiei, determinate experimental pentru acest mod de oscilare, a fost de 18 A.

În cazul unei analize superficiale, aceste diferențe ar putea părea ne semnificative. Ținând însă cont de faptul că măsurătorile au fost efectuate în condiții de laborator, sistemul utilizat fiind o celulă robotizată, mecanismele implicate în mișcarea de oscilare au avut o precizie crescută. Imaginând un sistem dedicat funcționării în condiții de șantier, mecanismele aceluși sistem nu vor prezenta aceeași precizie, diferențele dintre cele trei moduri de oscilare fiind atunci mult mai mari.

Valorile prezentate în figura 4.19 sunt specifice unei viteze de avans al sârmei de 10 m/min. Pentru alte viteze de avans al sârmei aceste valori sunt diferite.

În figurile 4.20 a, b, c, d, e, și f sunt prezentate valorile maxime, determinate experimental, ale curentului de sudare pentru diferite frecvențe de oscilare a capului de sudare și diferite viteze de avans al sârmei electrod.



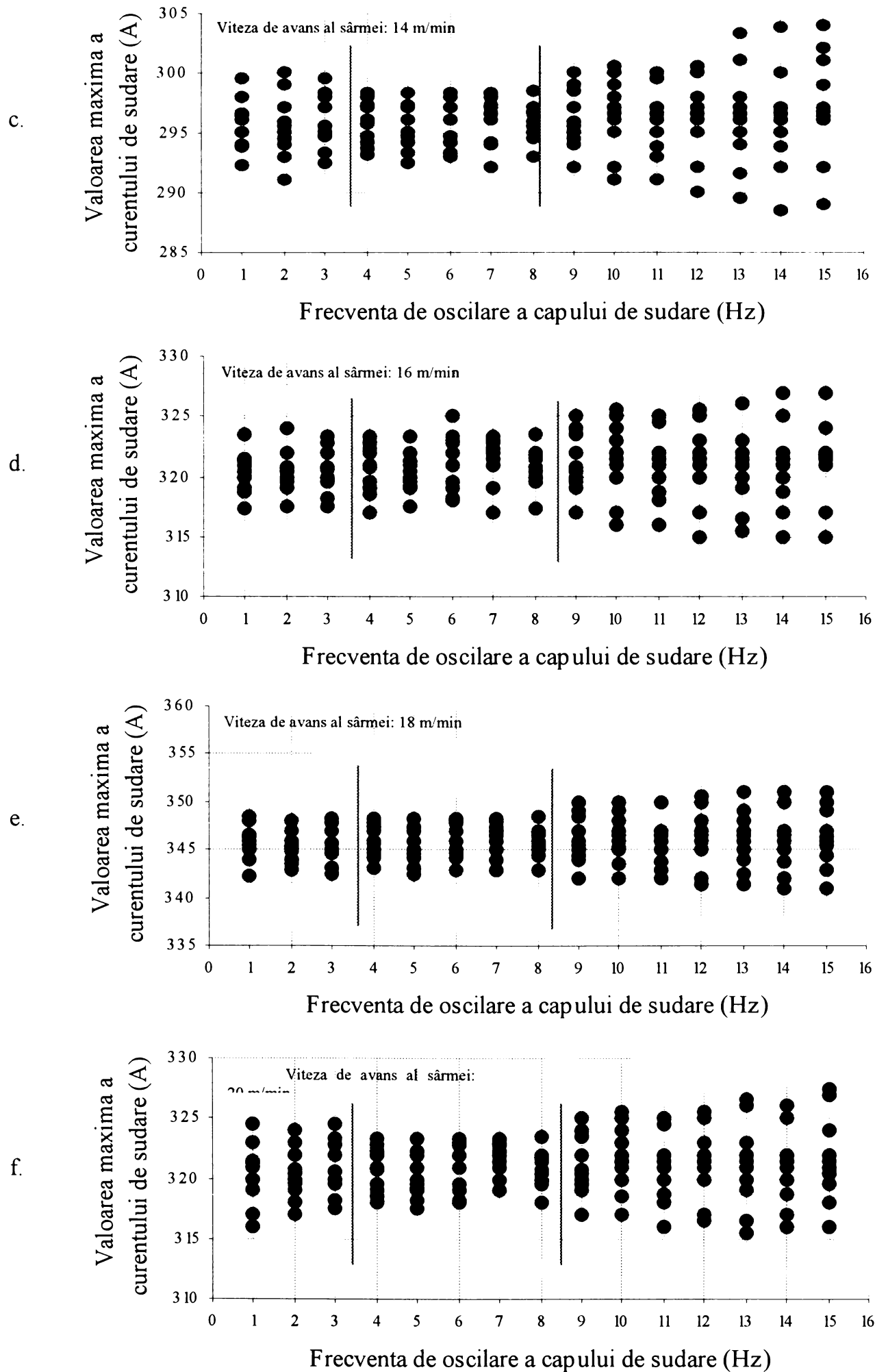


Fig. 4.20 Dispersia valorilor maxime ale curenților de sudare pentru diferite frecvențe de oscilare a capului de sudare

Oricare ar fi modul de oscilare utilizat în funcționarea senzorului-arc, rezultatele experimentale evidențiază că dispersia prezintă un minim pentru o frecvență situată între 4-8 Hz.

O altă observație importantă reieșită în urma analizei rezultatelor experimentale este existența unei influențe a frecvenței de oscilare a capului de sudare asupra diferenței dintre valoarea curentului înregistrată la sfârșitul oscilării și valoarea curentului înregistrată în axa rostului. Pentru o funcționare cu erori minime a senzorului-arc această diferență trebuie să fie cât mai mare posibil. Fiind mare poate fi detectată și prelucrată și de sisteme de achiziție a datelor mai puțin performante. Dacă diferența dintre cele două valori este relativ mică atunci există posibilitatea unei interpretări eronate a poziției capului de sudare relativ la axa rostului.

Experimentările de sudare efectuate pe diferite materiale, cu diferite frecvențe de oscilare au evidențiat și faptul că aceste diferențe sunt influențate și de nivelul curentului de sudare mediu, prescris de utilizator. Astfel, la sudarea cu sârmă de adaos din oțel slab aliat, unde curenții de sudare sunt relativ mari, diferența dintre valoarea curentului înregistrată la sfârșitul oscilării și valoarea curentului înregistrată în axa rostului urcă până în jurul valorii de 80 A. În cazul sudării aliajelor de aluminiu, unde curenții sunt sensibil mai mici, această diferență este și ea mai mică. În figurile 4.21 a și b sunt prezentate variațiile maxime ale curentului de sudare, din timpul oscilării, la sudarea oțelurilor slab aliate.

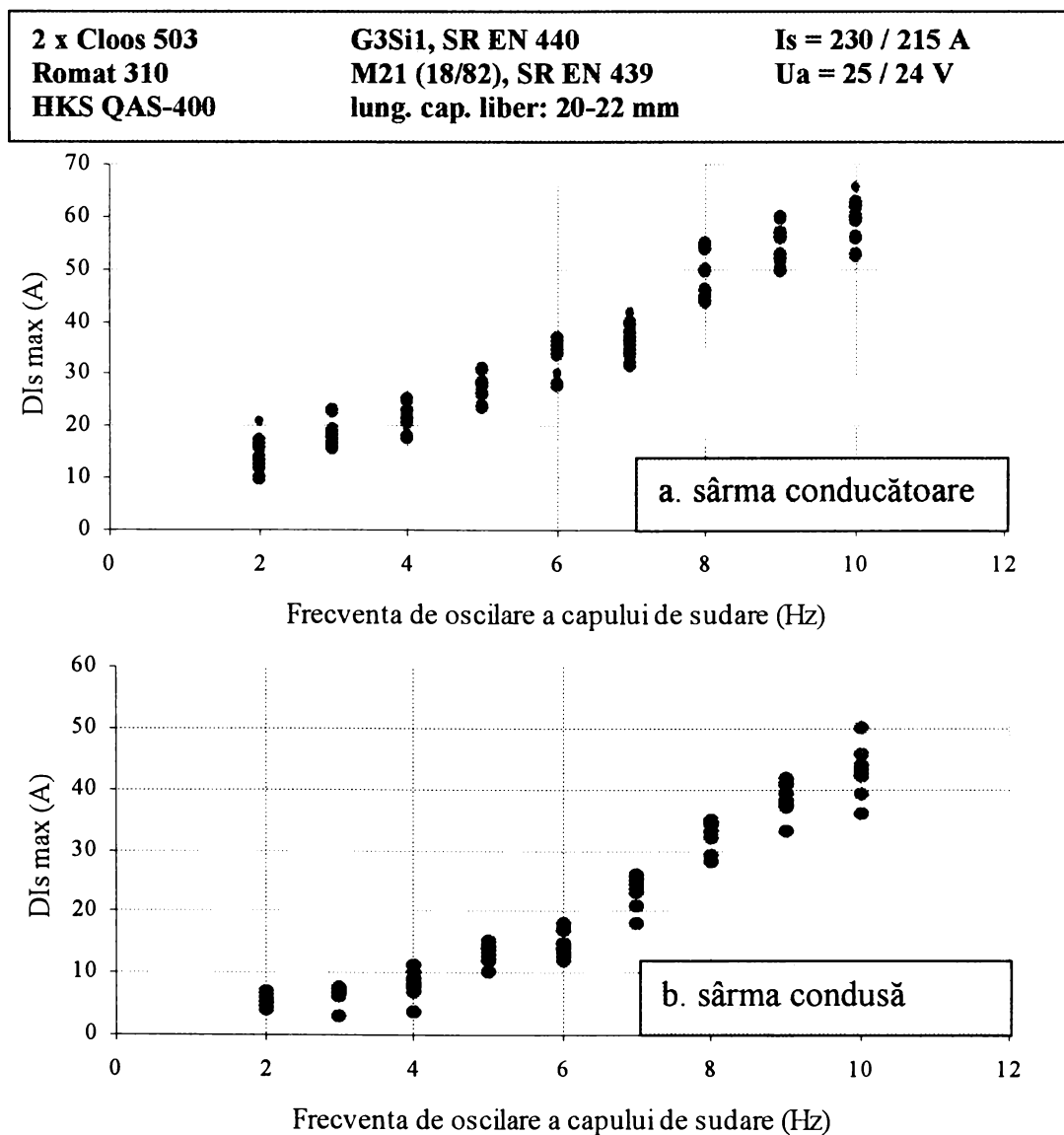


Fig. 4.21 Variația maximă a curentului de sudare la sudarea oțelurilor slab aliate

În figurile 4.22 a și b sunt prezentate variațiile maxime ale curentului de sudare, din timpul oscilării, la sudarea oțelurilor slab aliate.

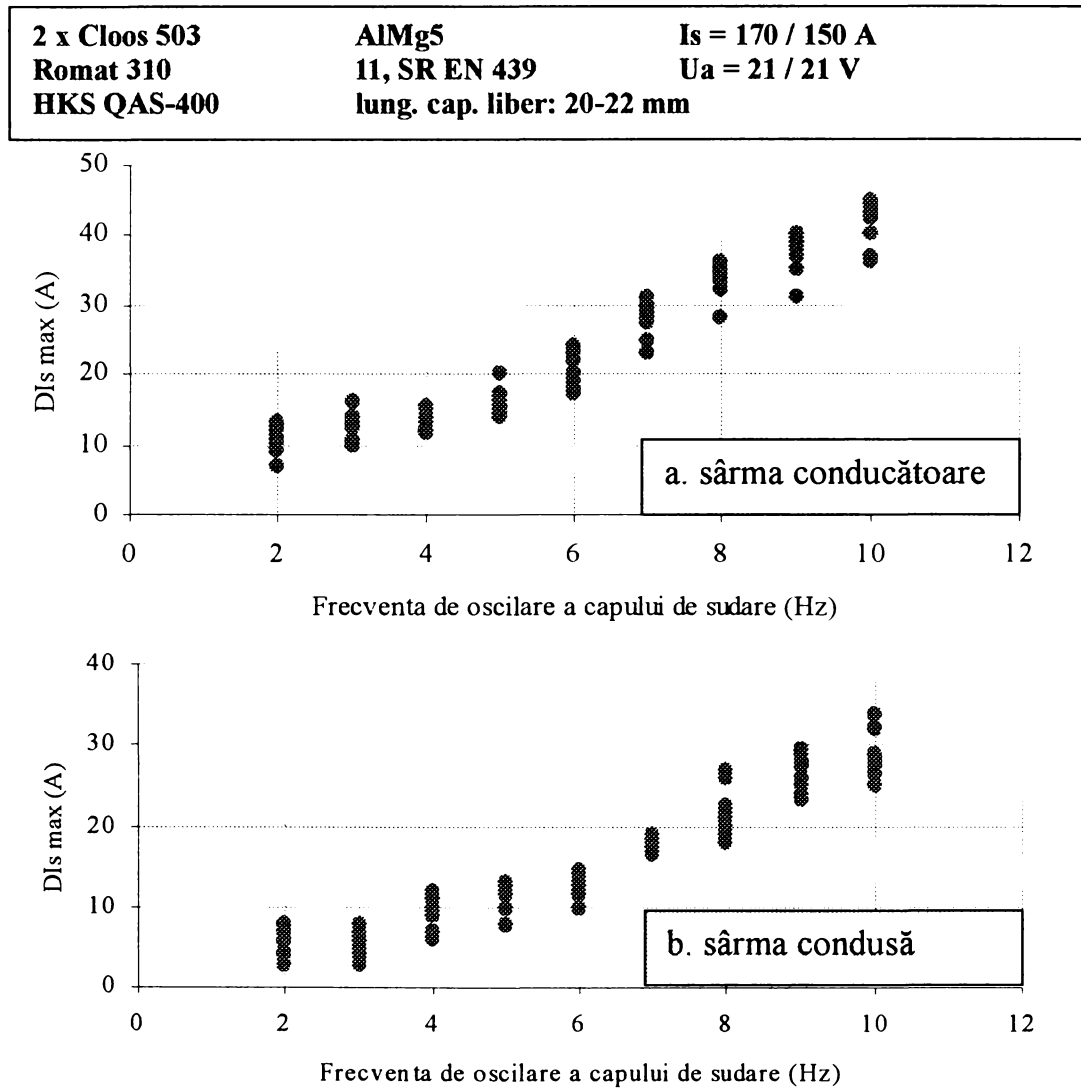


Fig. 4.22 Variația maximă a curentului de sudare la sudarea aliajului AlMg3

Având în vedere cele două influențe introduse de frecvența de oscilare a capului de sudare asupra variației curentului de sudare, se poate concluziona că frecvența de oscilare este un parametru decisiv în funcționarea unui senzor-arc. Analiza rezultatelor obținute permite stabilirea unui domeniu optimal de valori pentru acest parametru și anume: 4-8 Hz.

Comparând acest domeniu de valori cu valorile utilizate de alți specialiști la sudarea cu o singură sârma, se constată că frecvența de oscilare a capului de sudare poate avea aceleași valori și pentru sudarea cu o sârma și pentru sudarea cu două sârme. Acest lucru este foarte important, el permițând utilizarea sistemului mecanic de oscilare la ambele procedee de sudare. În acest fel sistemul de control devine flexibil și simplu de utilizat.

5

Modelarea matematică și verificarea experimentală pe modele fizice a variației curentului de sudare

5.1 Arcul de sudare și valorile fizice ale caracteristicilor acestuia

Arcul electric este o formă de manifestare a materiei dintre două puncte caracterizate prin potențiale diferite, atunci când nu se poate iniția un curent electronic, iar diferența de potențial permite străpungerea electrică a materiei.

Arcul electric este un efect al unei cauze în anumite condiții. Cauza care dă naștere arcului electric este existența unei diferențe de potențial. Condițiile în care cauza produce efectul sunt: existența unei anumite temperaturi, existența unui anumit mediu care să permită transportul sarcinilor electrice și o distanță relativ mică între cele două puncte cu potențiale diferite, distanță care să permită, pentru o anumită diferență de potențial, deplasarea sarcinilor electrice între cele două puncte.

În funcție de tipul aplicației în care se dezvoltă arcul electric poate fi dorit, situație în care sunt create toate condițiile posibile menținerii unei stabilități relative a acestuia, sau nedorit, situație în care arderea sa este destabilizată voit. Astfel, arcul electric de sudare este un caz tipic al unui arc voit, comparativ cu arcul electric inițiat la acționarea întreruptoarelor de înaltă tensiune, arc electric care destabilizează rețeaua electrică dând naștere la pierderi mari de putere. Cercetările în domeniul arcului electric sunt, deci, divergente, urmărindu-se pe de o parte aprinderea și menținerea sa în mod artificial, iar pe de altă parte evitarea dezvoltării sale sau stingerea sa cât mai rapidă.

Ca și formă de manifestare a materiei, arcul interacționează cu mediul înconjurător. Această interacțiune are loc prin schimb de energie sub formă calorică (emisie de energie termică), mecanică (emisie de unde sonore) și radiantă (emisie de radiație luminoasă în spectrul vizibil și invizibil). Deoarece este principalul fenomen care se dezvoltă în cadrul proceselor de sudare prin topire cu arc electric, trebuie controlată interacțiunea sa cu mediul înconjurător sub toate cele trei aspecte ale sale. Se înțelege prin mediu înconjurător atât zona de existență a arcului electric, cât și zonele aflate într-o vecinătate relativă care să permită interacțiunea. În această vecinătate pot exista piesele de sudat, echipamente, operatori, etc.

În figura 5.1 este prezentată caracteristica unei descărcări în gaze /58/. Descărcarea luminescentă se produce pentru căderi de tensiune la catod de 200...250 V și curenți având intensitatea de $10^{-5} \dots 10^{-1}$ A, sau pentru tensiuni mici de ordinul zecilor de volți și curenți având intensitatea de ordinul sutelor de amperi.

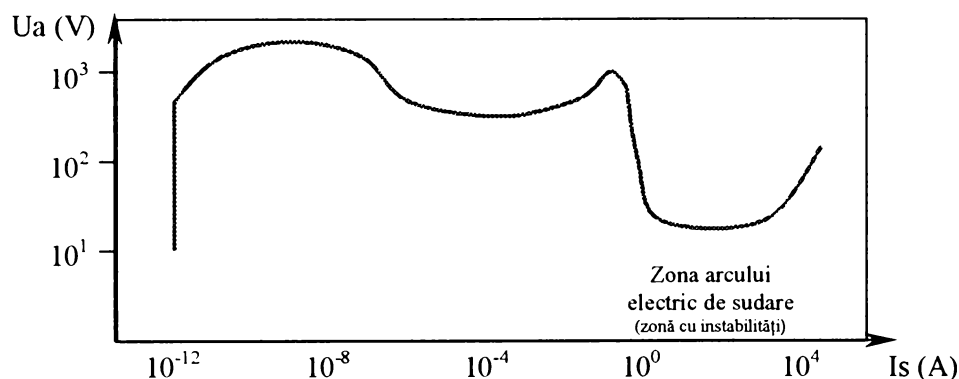


Fig. 5.1 Caracteristica electrică a arcului /58/

5.2 Modele de arc

În vederea controlării arderii arcului electric nu este de ajuns numai efectuarea de cercetări experimentale privind condițiile în care arcul electric arde stabil, ci este absolut necesară crearea unui model matematic care să permită prognozarea modului de manifestare a arcului în anumite condiții. În căutarea modelului matematic care să reprezinte cât mai fidel fenomenele specifice arderii arcului electric de sudare, trebuie să se țină cont și de faptul că la procedeele de sudare cu electrod fuzibil spațiul de arc este străbătut de picături de metal care modifică stabilitatea arderii arcului electric.

Cercetările întreprinse în domeniul arcului electric pot fi clasate în două categorii /58/:

- cercetări privind rezolvarea cât mai riguroasă a unui set de ecuații diferențiale care descriu comportarea arcului electric, ținând cont de cât mai multe fenomene care se dezvoltă în timpul arderii arcului; aceste calcule extrem de laborioase permit determinarea cât mai exactă a proprietăților interne ale arcului electric în configurații bine determinate;
- cercetări experimentale, care au ca scop punerea la punct a unui model matematic, permițând reprezentarea sistemului ardere arc – transfer de metal printr-o ecuație diferențială sau mai multe, în care intervin ca variabile numai parametrii electrice ai arcului; acest model se obține plecând de la setul de ecuații ale plasmii, simplificându-le prin neglijarea fenomenelor de importanță secundară.

S-au consacrat astfel două principale tipuri de modele teoretice utilizate pentru studiul arcului electric:

- modele de arc ce rezultă din ecuația de bilanț a energiei din arc, exprimând faptul că variația de entalpie din coloana de arc este dată de diferența dintre energia introdusă în arc prin câmpul electric aplicat și energia disipată de coloana de arc prin conducție termică, convecție și radiație. Aceste modele sunt cunoscute sub numele de modele de tip “cutie neagră” sau “modele de conductanță” și au la bază o singură ecuație diferențială de ordinul I;
- modele de arc electric care fac apel la mai multe ecuații fundamentale ale fizicii plasmii. Diferitele modele se diferențiază prin condițiile sau ipotezele puse și prin metodele de rezolvare numerică a sistemului de ecuații. Aceste modele sunt cunoscute sub numele de “modele fizice”.

Modelul arcului electric trebuie să facă accesibili parametrii ce figurează în ecuații. Din acest motiv, înainte de efectuarea calculelor de rigoare este necesar a se face măsurări experimentale, pentru toate elementele unui model.

Un model de arc nu este utilizabil dacă nu prezice comportamentul acestuia cu o precizie relativ ridicată. Pentru mărirea acestei precizii trebuie transpuse nu numai fiecare fenomen în parte, dar și interacțiunea acestora. Dificultatea și complexitatea modelării fenomenelor și a interacțiunilor acestora sunt însoțite adesea și de dificultățile teoretice care se opun modelării complete a arcului electric.

5.2.1 Modele de tip “cutie neagră” /58/

În cadrul modelelor de tip “cutie neagră” sau de conductanță, arcul electric este considerat drept un element neliniar de circuit reprezentat de o conductanță ce variază după o anumită lege în vecinătatea trecerii prin zero a curentului. Aceste modele descriu interacțiunea arcului electric cu circuitul electric. Obiectivul fundamental al modelării de tip “cutie neagră” este de a utiliza rezultatele măsurărilor de tensiune și curent obținute în timpul sudării, asociate cu o ecuație diferențială dată, în vederea determinării unui model matematic de arc corespunzător experienței respective.

Cu ajutorul acestor modele se poate studia intervalul de timp în care curentul prin arc este influențat de inerția termică a rezistenței arcului, deci poate fi caracterizată stabilitatea arcului pentru anumite condiții.

Specific acestor modele este utilizarea unei ecuații diferențiale de ordinul întâi care poate fi pusă sub forma generalizată:

$$\frac{1}{G} \cdot \frac{dG}{dt} = \frac{1}{\tau(i, G)} \cdot \left(\frac{u \cdot i}{P(i, G)} - 1 \right) \quad (5.1)$$

unde:

- G – conductanța arcului [$1/\Omega$];
- u – tensiunea arcului [V];
- i – curentul care trece prin arc [A];
- P, τ - parametrii modelului de tip “cutie neagră”.

Diferența dintre diversele modele este dată de tipul de dependență funcțională a parametrilor și prin maniera cu care aceste dependențe sunt determinate. Atunci când funcțiile P și τ sunt constante, este posibil să se dea o interpretare simplă acestor ecuații. Forma generală (5.1) a ecuației este de fapt derivată din modelele cu parametrii constanți.

Privind arcul electric din punct de vedere al proceselor termice, comportamentul dinamic al coloanei de plasmă poate fi exprimat prin ecuația de echilibru energetic (5.2):

$$\frac{dQ}{dt} = u \cdot i - P \quad (5.2)$$

unde:

- Q – energia acumulată în coloana de arc [J];
- $u \cdot i$ – puterea electrică absorbită de la sursă [V A];
- P – puterea transferată în exterior din coloana de arc [W].

În anumite ipoteze pentru P și Q , acest echilibru energetic conduce direct la modelul lui Mayr, identic cu ecuația (5.1) pentru P și τ constante. Reamorsarea termică are loc atunci când puterea absorbită de la sursă devine mai mare decât puterea transferată în exterior. Aceasta arată că, în cazul sudării în regim de transfer prin scurtcircuitare, fenomenul de stingere a arcului nu este un proces instantaneu și că interacțiunea cu sursa de putere influențează în mod semnificativ reaprinderea arcului.

Forma generală a modelului, prezentată în ecuația (5.1), conduce la mai multe modele, majoritatea acestora nefiind însă justificate real. Dependența funcțională a parametrilor “ P ” și “ τ ” a fost frecvent introdusă pentru a obține o mai bună corelare între încercări și calculele teoretice.

Echilibrul energetic descris de ecuația (5.2) conduce la conceptul de constantă termică de timp, τ . În realitate însă, neliniaritățile fenomenelor din arc nu permit o modelare atât de simplă. La fel și P capătă un sens fizic mai complex în unele situații. Unii autori introduc în ecuație un factor de formă pentru a descrie efectele geometriei arcului și ale profilului de temperatură.

Astfel, în general modelele de arc de tip “cutie neagră” trebuie considerate ca descrieri matematice mai degrabă decât ca descrieri fizice.

5.2.1.1 Modelul Cassie /58/

Plecând de la ipoteza unui arc cilindric cu rază variabilă, Cassie simplifică fenomenele considerând că temperatura, entalpia totală a unității de volum, densitatea de curent, conductivitatea electrică și câmpul electric sunt constante.

Deoarece era dificilă modelarea unei evacuări reale a căldurii prin convecție, Cassie simplifică acest fenomen, considerând că evacuarea are loc numai axial și este proporțională cu secțiunea arcului electric.

Conductanța arcului, $G(Q)$, depinde de secțiunea arcului și este exprimată de Cassie prin relația (5.3):

$$\frac{1}{G} \cdot \frac{dG}{dt} = \frac{1}{\tau_0} \left[\left(\frac{u}{U_0} \right)^2 - 1 \right] \quad (5.3)$$

unde U_0 – tensiunea de arc statică, independentă de curentul prin arc.

Această relație poate fi exprimată ca o ecuație având drept necunoscută conductanța, G :

$$G(t) = e^{-\frac{t}{\tau}} \cdot \sqrt{G_0^2 + \frac{2}{\tau \cdot E_0^2} \cdot \int_0^t e^{\frac{2-t}{\tau}} \cdot i^2(t) dt} \quad (5.3)$$

Acest model prezintă cu o aproximație destul de bună arcul de sudare la curenți prin arc de ordinul sutelor de amperi.

5.2.1.2 Modelul Mayr /58/

Mayr a pornit de la ideea că, în cazul unui arc, conductibilitatea electrică este dată determinată de fenomenul de ionizare. A încercat astfel să obțină o reprezentare dinamică a arcului în condițiile: arcul este cilindric, evacuarea termică se face numai prin conducție, iar la periferie arcul nu mai este caracterizat prin conductibilitate, fiind considerat “rece”. Acceptând conductibilitatea ca fiind:

$$G = K \cdot e^{\frac{Q}{Q_0}} \quad (5.4)$$

unde K , Q_0 – constante, Mayr a pus condiția ca puterea evacuată să fie constantă pentru simplificarea problemei. Relația lui Mayr are forma (5.5):

$$\frac{1}{G} \cdot \frac{dG}{dt} = \frac{1}{\tau_0} \left[\left(\frac{u \cdot i}{P_0} \right) - 1 \right] \quad (5.5)$$

relație care poate fi exprimată, ca și în cazul relației lui Cassie, sub forma unei ecuații în conductanță (5.6):

$$G(t) = e^{-\frac{t}{\tau}} \cdot \left(G_0 + \frac{1}{Q_0} \cdot \int_0^t e^{\frac{t}{\tau}} \cdot i^2(t) dt \right) \quad (5.6)$$

Această ecuație se poate aplica în cazul sudării în curent alternativ, o nouă variantă a sudării MIG/MAG dezvoltată de cercetătorii japonezi, unde curentul trece prin zero la fiecare semialternanță.

În literatura de specialitate există multe modele de tip “cutie neagră” asemănătoare modelelor Cassie și Mayr. Astfel, se amintesc:

Ecuția:	Parametri:
$\frac{1}{G} \cdot \frac{dG}{dt} = \frac{1}{\tau_0} \left[\left(\frac{u \cdot i}{P_0} \right) - 1 \right] + \beta \cdot \frac{du}{dt}$	τ_0, P_0, β (5.7)
$\frac{1}{G} \cdot \frac{dG}{dt} = \frac{1}{\tau_0} \left[\left(\frac{u \cdot i - P_0}{e^2 \cdot G} \right) - 1 \right] \cdot \left[1 - \left(\frac{u}{U_d} \right)^2 - \frac{\tau_0}{U_d^2} \cdot \left(\frac{du}{dt} \right)^2 \right]$	τ_0, P_0, e, U_d (5.8)
$\frac{1}{G} \cdot \frac{dG}{dt} = \frac{1}{\tau} \left[\left(\frac{u \cdot i}{P_0 + U_0 i } \right) - 1 \right]; \quad \tau = \tau_0 + \frac{\tau_1}{1 + \left(\frac{G}{G_0} \right)^2}$	$\tau_0, P_0, U_0, G_0, \tau_1$ (5.9)
$\frac{1}{G} \cdot \frac{dG}{dt} = \frac{1}{\tau_0} \left[\left(\frac{u \cdot i}{a + b \cdot i + c \cdot \sqrt{ i }} \right) - 1 \right]$	τ_0, a, b, c (5.10)
$\frac{1}{G} \cdot \frac{dG}{dt} = \frac{1}{\tau(i)} \left[\left(\frac{G_s(i)}{G} \right) - 1 \right]$	$G_s(i), \tau(i)$ (5.11)

Primele modificări au constat în utilizarea ecuațiilor Cassie și Mayr pe intervale de timp limitate. Pentru a obține o mai bună concordanță între rezultatele teoretice și cele experimentale unii autori au combinat cele două ecuații sau au considerat drept variabili parametrii (τ , P și U_0) în funcție de curent sau de conductanță.

Browne (citată de Popa în /58/) a studiat arcul la trecerile prin zero folosind relația lui Cassie și comportarea acestuia imediat după trecerea prin zero utilizând relația lui Mayr.

Ushio și Ito (citați de Popa în /58/) au luat în considerație două zone concentrice ale arcului pentru a extinde intervalul de timp pentru care este valid modelul: stratul central, caracterizat de o temperatură foarte mare, cu un înalt grad de ionizare și deci cu o conductibilitate electrică bună, considerat relativ stabil la variații ale temperaturii și stratul periferic, cu o temperatură mai mică, conductibilitatea electrică fiind relativ mică, iar stabilitatea fiind influențată de variațiile de temperatură.

În ambele straturi bilanțul energetic pe unitatea de lungime poate fi scris astfel:

$$e \cdot i = S \cdot \frac{dh}{dt} + h \cdot \frac{dS}{dt} + \alpha \cdot h \cdot S + n \cdot S \quad (5.12)$$

unde:

- S – secțiunea stratului considerat;
- h – entalpia specifică;
- n – pierderile pe unitatea de volum;
- e – câmpul electric;
- i – curentul care trece prin arc;
- α - coeficient ce ține seama de forța de contracție a arcului datorită suflajului magnetic.

Pentru stratul central se consideră conductivitatea electrică σ_0 și entalpia specifică h_0 constante și se obține:

$$\frac{1}{G} \cdot \frac{dG}{dt} = \beta \cdot \left[\frac{e^2}{e_0^2} - 1 \right], \quad \beta = \alpha + \frac{n}{h_0}, \quad e_0 = \sqrt{\frac{\alpha \cdot h_0 + n}{\sigma_0}} \quad (5.13)$$

Pentru stratul periferic, variația entalpiei este factorul determinant pentru comportamentul dinamic:

$$\frac{1}{G} \cdot \frac{dG}{dt} = \frac{1}{\tau} \cdot \left[\frac{e \cdot i}{n \cdot S} - 1 \right], \quad \tau = \frac{\sigma}{n} \cdot \frac{dh}{d\sigma} \quad (5.14)$$

Cele două ecuații descriu comportamentul dinamic al arcului în faza de curent intens și respectiv în jurul trecerii prin zero a curentului.

5.2.2 Modele fizice

În ultimele două decenii au avut loc încercări de descriere a variației conductanței arcului bazate pe soluția unui ansamblu de ecuații diferențiale cu derivate parțiale, ce exprimă un echilibru local sub o formă mai mult sau mai puțin simplificată.

Cu excepția unei încercări de a simula arcul într-un curent supersonic rece, analizând mișcarea și ciocnirile unui număr redus de molecule cu metoda Monte-Carlo (Oppenlander, 1985) /58/, toate modelele fizice de arc utilizează ecuații de echilibru (pentru energie, masă și impuls) ale elementului de arc macroscopic, proprietățile gazului și formule empirice pentru anumite mecanisme de schimb (turbulența, radiația). În aproape toate cazurile se presupune echilibrul termodinamic local pentru a defini o unică temperatură necesară determinării gradului de disociere și ionizare.

În toate cazurile se studiază un arc axial, fără suflaj magnetic. Toate modelele utilizează ipoteze simplificatoare privind geometria arcului și proprietățile fizice ale plasmei.

Modelul cel mai simplu constă în a presupune un arc cilindric cu proprietățile plasmei în direcție radială și axială constante. Ecuația de continuitate (de conservare a masei) este dată de expresia:

$$\frac{\partial \gamma}{\partial t} + \text{div}(\gamma \cdot \vec{v}) = 0 \quad (5.15)$$

unde:

- γ - densitatea gazului care străbate arcul (argon, amestec argon cu gaze active, etc.);
- \vec{v} - viteza gazului.

Pentru același model ecuația de mișcare (de conservare a impulsului) poate fi redată sub forma:

$$\gamma \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} = \gamma \cdot \vec{g} + \rho \cdot \vec{E} + \vec{j} \times \vec{B} - \text{grad}p + \vec{F} \quad (5.16)$$

unde:

- g – accelerația gravitațională;
- p – presiunea;
- ρ - densitatea de sarcină electrică;
- j – densitatea de curent;
- E – intensitatea câmpului electric;
- B – inducția magnetică;
- F – densitatea forței de frecare vâscoasă.

Ecuația de conservare a energiei:

$$\gamma \cdot \frac{d}{dt} \left(h + \frac{v^2}{2} \right) = \gamma \cdot \vec{g} \cdot \vec{v} + \sigma \cdot E^2 + \text{div}(\vec{T} \cdot \vec{v} + \lambda \cdot \text{grad}\theta - \vec{q}_r) \quad (5.17)$$

unde:

- h – entalpia unității de masă;
- θ - temperatura;
- λ - conductivitatea termică;

- q_r – densitatea fluxului de energie radiată;
- P – tensorul forțelor superficiale.

Popa /58/ face o prezentare laborioasă a rezultatelor obținute în modelarea arcului:

- Frost și Liebermann consideră arcul într-un jet puternic de gaz și studiază atât suflajul gazului cald cât și reducerea canalului conductor prin difuzia căldurii.
- Swanson consideră arcul drept o sursă de căldură într-o curgere gazoasă, transferul de căldură făcându-se pe o zonă relativ subțire.
- Cowley, Chan și Fang pornesc de la tehnicile utilizate în studiul stratului limită.
- Lowke și Ludwig au dezvoltat un model unidimensional pentru curent stabilizat prin convecție forțată, arcul având rază variabilă, iar temperatura arcului fiind uniformă.

5.2.3 Parametrizarea arcului electric de sudare

În cazul sudării MIG/MAG, în condițiile unei lungimi constante a arcului și variații cu diferite viteze a intensității curentului de sudare în cadrul fenomenului de autoreglare internă, caracteristicile statice și dinamice ale arcului sunt asemănătoare celor din figura 5.2 a, b. Corespunzător acestor curbe, pentru valori crescătoare ale curentului, se înregistrează o mărire a temperaturii în coloana arcului, fapt care conduce la creșterea importantă a conductivității gazului, având drept efect scăderea tensiunii de arc.

Arcul electric se amorsează la tensiunea u_s , valorile tensiunii de stingere (tensiune care determină instabilitatea arcului de sudare) u_{st} fiind cu atât mai mici cu cât crește viteza de scădere a curentului (figura 5.3).

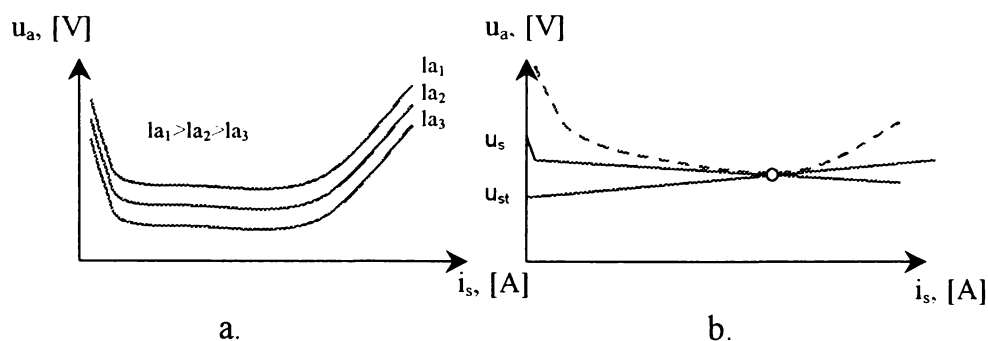


Fig. 5.2 Caracteristicile arcului de sudare
a. statică și b. dinamică

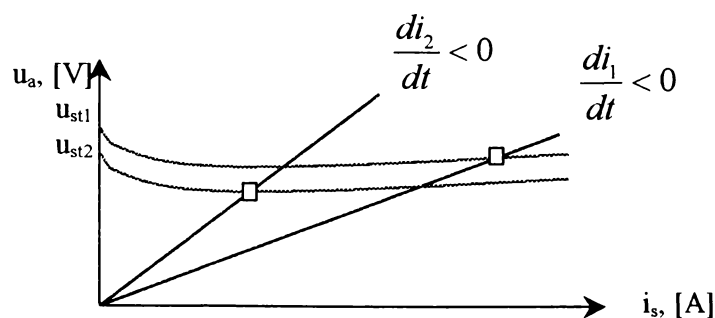


Fig. 5.3 Dependența dintre tensiunea de stingere a arcului și viteza de variație a curentului

În cazul sudării cu două sârme în regim de arc scurt, tensiunea de amorsare, în urma desprinderii picăturii la creșterea curentului de scurtcircuit, este mai mică decât tensiunea de amorsare la sudarea cu o singură sârmă. Acest fapt are loc datorită temperaturii mai mari a zonei de arc și implicit a numărului mai mare de atomi de gaz ionizați datorate existenței celui de-al doilea arc (fig. 5.4).

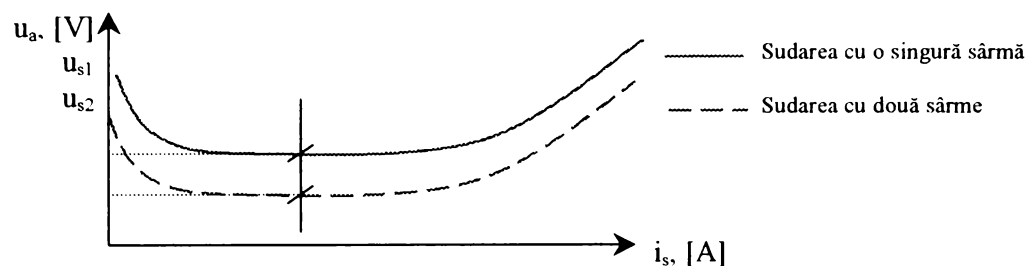


Fig. 5.4 Tensiunea de amorsare pentru sudarea cu o singură sârmă (u_{s1}) și pentru sudarea cu două sârme (u_{s2})

Totodată, tensiunea de stingere a arcului este mai mică în cazul sudării cu două sârme decât în cazul sudării cu o singură sârmă, ceea ce conferă o bună stabilitate între limite mai largi arcului pentru procedeul de sudare cu două sârme. Fiind evidentă dependența comportării arcului electric de parametrii electrici și de materialul din care sunt confecționate sârmele electrod s-au încercat, în timp, diverse aproximări matematice ale acestei comportări.

Ayrton, citat de Popa /58/ a privit din punct de vedere electric arcul și l-a redat cu aproximație sub expresia (5.18):

$$u_a(i) = a_{Ayr} + \frac{b_{Ayr}}{i} \quad (5.18)$$

unde:

- $a_{Ayr} = \alpha_{Ayr} + \gamma_{Ayr} \cdot l_a$, cu α_{Ayr} și γ_{Ayr} constante de material ($\alpha_{Ayr} = 25 \dots 50$ V și $\gamma_{Ayr} = 10 \dots 15$ V/A), iar l_a – lungimea arcului;
- $b_{Ayr} = \beta_{Ayr} + \delta_{Ayr} \cdot l_a$, cu β_{Ayr} și δ_{Ayr} constante de material ($\beta_{Ayr} = 20 \dots 1000$ V/m și $\delta_{Ayr} = 100 \dots 3000$ V·A/m), iar l_a – lungimea arcului;

Conform acestor ecuații, funcția de aproximare a lui Ayrton evidențiază o variație liniară a tensiunii de arc, u_a , în raport cu lungimea l_a a coloanei arcului, în cazul în care intensitatea curentului care trece prin arc este constantă.

O altă funcție de aproximare este prezentată de Nottingham (citare Popa /58/):

$$u_a(i) = a_{Not} + c_{Not} \cdot l_a + (b_{Not} + d_{Not} \cdot l_a) \cdot i^{-n} \quad (5.19)$$

unde:

- a_{Not} , b_{Not} , c_{Not} , d_{Not} - constante de material
- n – exponent exprimat în funcție de temperatura absolută de vaporizare a anodului, T_{vA} (K):

$$n = 2,62 \cdot 10^{-4} \cdot T_{vA} \quad (5.20)$$

- l_a – lungimea arcului.

Rieder (citare Popa /58/) cuprinde în funcția sa de aproximare și independența căderilor de tensiune la electrozi (u_K , u_A) în raport cu lungimea l_a a coloanei arcului:

$$u_a(i) = \alpha_{Ried} + (\beta_{Ried} + l_a) \cdot \gamma_{Ried} \cdot \left[\ln \left(\frac{i}{\delta_{Ried}} \right) \right]^{-3} \quad (5.21)$$

unde:

- $\alpha_{Ried} = 25 \dots 30$ V;
- $\beta_{Ried} = 0,11 \dots 0,15$ m;
- $\gamma_{Ried} \sim 5 \cdot 10^5$ V/m;
- $\delta_{Ried} \sim 7 \cdot 10^{-3}$ A
- l_a – lungimea arcului;

Aplicarea acestor aproximări se face după modelul prezentat în continuare.

Arcul electric de sudare poate fi transpus într-o schemă electrică asemănătoare celei prezentate în figura 5.5. Eroarea acestei transpuneri este relativ mică, circuitul de sudare putând fi modelat cu o bună precizie printr-o inductanță, L_{sc} , și o rezistență, R_{sc} . Se consideră că acest circuit este alimentat cu o tensiune U_{alim} , între anod și catod existând căderea de tensiune $u_a(i)$ care dă naștere arcului electric.

În figura 5.5 este prezentată și caracteristica statică a arcului electric de sudare inițiat între cei doi electrozi.

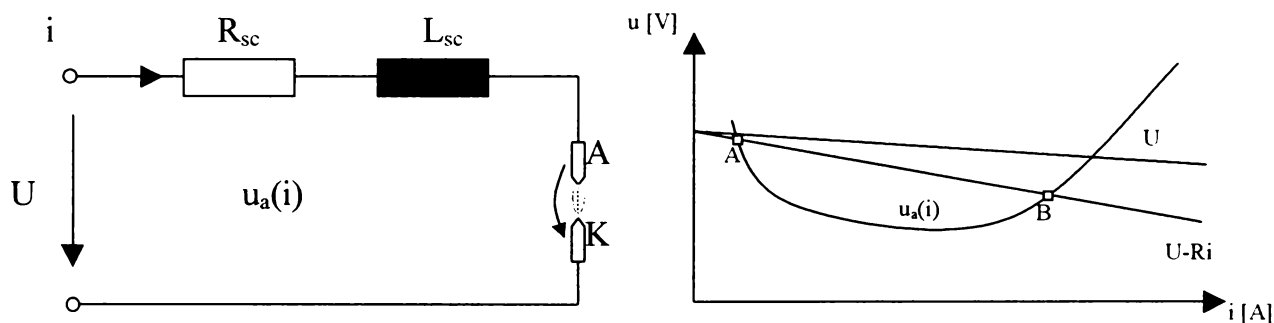


Fig. 5.5 Arcul electric și caracteristica sa statică

Ecuția care descrie funcționarea circuitului este de forma:

$$L \cdot \frac{di}{dt} + R \cdot i + u_a(i) = U \quad (5.22)$$

Utilizând aproximările Ayrton, Nottingham și Rieder se obține:

- Ayrton:

$$L \cdot \frac{di}{dt} + R \cdot i + \alpha + \gamma \cdot l_a + \frac{\beta + \delta \cdot l_a}{i} = U \quad (5.23)$$

Arderea stabilă înseamnă inexistența fenomenului de autoreglare internă:

$$i = ct. \Rightarrow \frac{di}{dt} = 0 \quad (5.24)$$

ecuația (5.23) în necunoscuta i devenind:

$$R \cdot i^2 - (U - \alpha - \gamma \cdot l_a) \cdot i + \beta + \delta \cdot l_a = 0 \quad (5.25)$$

ecuație care poate avea două soluții reale dacă:

$$(U - \alpha - \gamma \cdot l_a)^2 - 4 \cdot R \cdot (\beta + \delta \cdot l_a) \geq 0 \quad (5.26)$$

- Nottingham:

$$L \cdot \frac{di}{dt} + R \cdot i + a + c \cdot l_a + (b + d \cdot l_a) \cdot i^{-n} = U \quad (5.27)$$

Pentru condiția de stabilitate (5.24), ecuația (5.27) devine:

$$R \cdot i^{n+1} + (a + c \cdot l_a - U) \cdot i^n + b + d \cdot l_a = 0 \quad (5.28)$$

- Rieder:

$$L \cdot \frac{di}{dt} + R \cdot i + \alpha + (\beta + l_a) \cdot \gamma \cdot \left[\ln \left(\frac{i}{\delta} \right) \right]^{-3} = U \quad (5.29)$$

ecuație care, în condiția de stabilitate (5.24), devine:

$$(R \cdot \delta \cdot e^k + \alpha - U) \cdot k^3 + (\beta + l_a) \cdot \gamma = 0 \quad (5.30)$$

unde:

$$k = \ln\left(\frac{i}{\delta}\right) \quad (5.31)$$

Mai laborioase, aproximările Nottingham și Rieder nu permit determinarea directă a curenților care trec prin arc în funcție de lungimea acestuia și de diferența de potențial care l-a creat. Rădăcinile ecuației Ayrton nu prezintă o precizie deosebită, dar fiind relativ ușor de obținut se utilizează în cea mai mare parte a cazurilor.

5.3 Primul model matematic propus pentru variația curentului de sudare

Pornind de la ecuația circuitului RL (5.22) și ecuația Ayrton (5.23) este posibilă modelarea matematică a variației curentului de sudare în funcție de ceilalți parametri ai arcului electric de sudare. Se poate, astfel, scrie:

$$\begin{cases} v_t = a \cdot Is + b \cdot l_c \cdot Is^2 & /95/ \\ Ua = \alpha + \beta \cdot Is + \gamma \cdot l_a & (5.33) \\ Ua = U_0 - R \cdot Is - L \cdot \frac{dIs}{dt} & (5.34) \end{cases}$$

În același timp este posibilă reprezentarea vitezei de topire a sârmei de sudare, v_t , în funcție de viteza de avans al sârmei electrod:

$$v_t = v_{ae} \quad (5.35)$$

Ecuația (5.35) reprezintă condiția de echilibru a transferului de metal de la capătul sârmei către baia de metal. În cazul în care apar perturbații exterioare, echilibrul se modifică. Luând drept exemplu variația lungimii arcului la oscilarea capului de sudare transversal pe rostul de sudare, situație existentă în cazul senzorilor de arc, echilibrul (5.35) devine:

$$v_t = v_{ae} - \frac{dl_c}{dt} \quad (5.36)$$

unde l_c este lungimea capătului liber al sârmei, deci diferența dintre lungimea distanței de la duza de contact la piesă, l_t , și lungimea arcului la un moment dat, l_a :

$$l_c = l_t - l_a \quad (5.37)$$

Înlocuind relația (5.36) în ecuația (5.32), rezultă:

$$v_{ae} - \frac{dl_c}{dt} = a \cdot Is + b \cdot l_c \cdot Is^2 \quad (5.38)$$

Evoluția în timp a lungimii arcului de sudare, exprimată aici prin lungimea capătului liber al sârmei electrod nu poate fi modelată matematic direct, ci numai în urma unor determinări experimentale. Aceste determinări vizează variația curentului de sudare ca urmare a variației lungimii arcului de sudare, deoarece este dificilă măsurarea fizică a variației lungimii capătului liber al sârmei electrod.

Din ecuațiile (5.33) și (5.38), eliminând lungimea capătului liber, rezultă:

$$\frac{\left(v_{ae} - \frac{dl_c}{dt}\right) - a \cdot Is}{b \cdot Is^2} = \frac{\alpha + \beta \cdot Is + \gamma \cdot l_t - Ua}{\gamma} \quad (5.39)$$

Tensiunea arcului, Ua , poate fi prezentată în funcție de tensiunea de mers în gol, conform ecuației (5.34).

Ecuația (5.39) devine în acest caz:

$$\frac{\left(v_{ae} - \frac{dl_c}{dt}\right) - a \cdot Is}{b \cdot Is^2} = \frac{\alpha + \beta \cdot Is + \gamma \cdot l_t - \left(U_0 - R \cdot Is - L \frac{dIs}{dt}\right)}{\gamma} \quad (5.40)$$

Variația temporală a curentului de sudare, dată de inductanța bobinei pentru controlul creșterii curentului de scurtcircuit, are sens numai la sudarea cu transfer prin scurtcircuitare, în celelalte situații fiind practic nulă.

Ecuția (5.40), în necunoscuta Is , devine după calcule succesive:

$$Is^3 \cdot (R + \beta) - Is^2 \cdot \left(\alpha - \gamma \cdot l_t + U_0 - L \cdot \frac{dIs}{dt}\right) - Is \cdot \frac{a \cdot \gamma}{b} + \frac{\gamma}{b} \cdot \left(v_{ae} - \frac{dl_c}{dt}\right) = 0 \quad (5.41)$$

sau la sudarea cu transfer prin pulverizare specifică sudării cu rată mare de depunere care face obiectul sudării cu două sârme:

$$Is^3 \cdot (R + \beta) - Is^2 \cdot (\alpha - \gamma \cdot l_t + U_0) - Is \cdot \frac{a \cdot \gamma}{b} + \frac{\gamma}{b} \cdot \left(v_{ae} - \frac{dl_c}{dt}\right) = 0 \quad (5.42)$$

5.4 Al doilea model matematic propus pentru variația curentului de sudare

Se propune și un al doilea model matematic pentru variația curentului de sudare, model în care este acceptată relația uzuală dintre curentul de sudare și tensiunea arcului la sudarea în mediu de gaz protector /62/:

$$Ua = 14 + 0.05 \cdot Is \quad (5.43)$$

Fiind vorba de prezentarea unei dependențe “macro”, într-un timp de ordinul secundelor, care nu ține seama de corectarea creșterii curentului la apariția unui scurtcircuit, acest model este considerat mai puțin precis decât modelul prezentat la punctul 5.3.

Modelul de la care se pornește este același ca și în cazul anterior, înlocuind însă relația (5.34) cu relația (5.43):

$$\begin{cases} v_t = a \cdot Is + b \cdot l_{cl} \cdot Is^2 & (5.32) \\ Ua = \alpha + \beta \cdot Is + \gamma \cdot l_a & (5.33) \\ Ua = 14 + 0.05 \cdot Is & (5.43) \end{cases}$$

Ecuția (5.32) în necunoscuta Is devine succesiv:

$$\frac{\left(v_{ae} - \frac{dl_c}{dt}\right) - a \cdot Is}{b \cdot Is^2} = \frac{\alpha + \beta \cdot Is + \gamma \cdot l_t - 14 - 0.05 \cdot Is}{\gamma} \quad (5.44)$$

$$\gamma \cdot \left(v_{ae} - \frac{dl_c}{dt}\right) - \gamma \cdot a \cdot Is = \alpha \cdot b \cdot Is^2 + \beta \cdot b \cdot Is^3 + \gamma \cdot b \cdot l_t \cdot Is^2 - 14 \cdot b \cdot Is^2 - 0.05 \cdot b \cdot Is^3 \quad (5.45)$$

$$Is^3 \cdot (\beta - 0.05) + Is^2 \cdot (\alpha + \gamma \cdot l_t - 14) + Is \cdot \frac{a\gamma}{b} - \gamma \cdot \left(v_{ae} - \frac{dl_c}{dt}\right) = 0 \quad (5.46)$$

care reprezintă nu numai o ecuație din care se poate obține o valoare momentană pentru curentul de sudare, dar și o relație precisă între variația lungimii arcului și variația curentului de sudare:

$$Is = Is \left(\frac{dl_c}{dt}\right) \quad (5.47).$$

5.5 Modelarea matematică și verificarea experimentală a variației curentului de sudare din timpul oscilării capului de sudare transversal pe rost

Mărimile de interes în problemele ingineresti (deplasări, eforturi, tensiuni, etc.) prezintă o variație mai mult sau mai puțin rapidă în timp, iar analiza lor necesită o reprezentare matematică adecvată. Reprezentările matematice folosite pot fi grupate în funcție de două criterii, conform figurii 5.6.

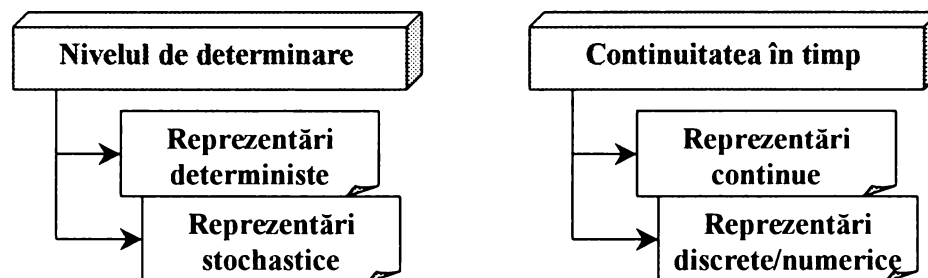


Fig. 5.6 Tipurile de reprezentări matematice utilizate în inginerie

Reprezentările deterministe permit cunoașterea mărimilor de interes în orice moment al solicitării studiate. În aplicațiile ingineresti, reprezentările deterministe pot fi utilizate atunci când se dispune integral de toate informațiile necesare, respectiv când sunt analizate anumite aspecte ipotetice, pe baza unor condiții impuse, conform teoriei probabilităților. Aceste determinări vor fi utilizate în continuare.

Reprezentările stochastice nu permit cunoașterea valorilor mărimilor de interes la diferite momente de timp. În aplicațiile ingineresti, reprezentările stochastice pot fi utilizate atunci când se dorește o evaluare predictivă a comportării structurilor supuse unor solicitări cu caracter haotic.

5.5.1 Reprezentări deterministe

În multe aplicații, funcțiile periodice simple sunt exprimate sub forma:

$$f(t) = f_0 \cos(\omega t + \varphi) \quad (5.48)$$

unde:

- f_0 - reprezintă amplitudinea (reală),
- ω - reprezintă pulsația, $(\omega t + \varphi)$ reprezintă faza mișcării,
- φ - reprezintă faza inițială.

Reprezentarea grafică a funcției (5.48) este prezentată în figura 5.7, iar reprezentarea complexă, echivalentă reprezentării (5.48) este:

$$f(t) = \operatorname{Re} [f^* e^{i\omega t}] \quad (5.49)$$

unde f^* reprezintă amplitudinea complexă care substituie amplitudinea reală f_0 și faza inițială φ :

$$f^* = f_0 e^{i\varphi} = f_0 (\cos \varphi + i \sin \varphi) \quad (5.50)$$

Dacă se înlocuiește relația (5.50) în relația (5.49) se obține:

$$f(t) = \operatorname{Re} [f_0 e^{i\varphi} e^{i\omega t}] = \operatorname{Re} [f_0 e^{i(\omega t + \varphi)}] = f_0 \cos(\omega t + \varphi) \quad (5.51)$$

Expresia (5.49) poate fi scrisă sub forma echivalentă:

$$f(t) = \frac{1}{2} (f^* e^{i\omega t} + \bar{f}^* e^{-i\omega t}) \quad (5.52)$$

unde \bar{f}^* reprezintă conjugata complexă a amplitudinii complexe f^* .

Reprezentarea complexă exprimată prin relațiile de mai sus poate fi reprezentată grafic în planul complex ($\text{Re } f^*$, $\text{Im } f^*$). Funcția $f^* e^{i\omega t}$ reprezintă o mișcare circulară uniformă pe un cerc de rază f_0 (figura 5.8.a). În figura 5.8.b este reprezentată funcția $\bar{f}^* e^{-i\omega t}$, care descrie o mișcare cu faza inițială $-\varphi$ și viteza unghiulară $-\omega$.

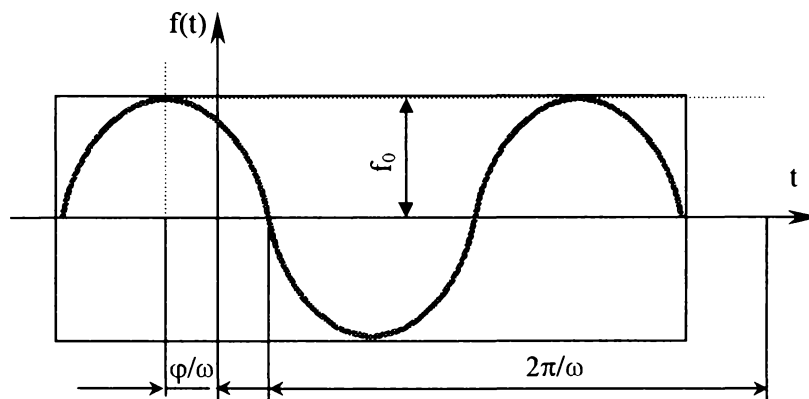


Fig. 5.7 Reprezentarea grafică a unei funcții periodice simple

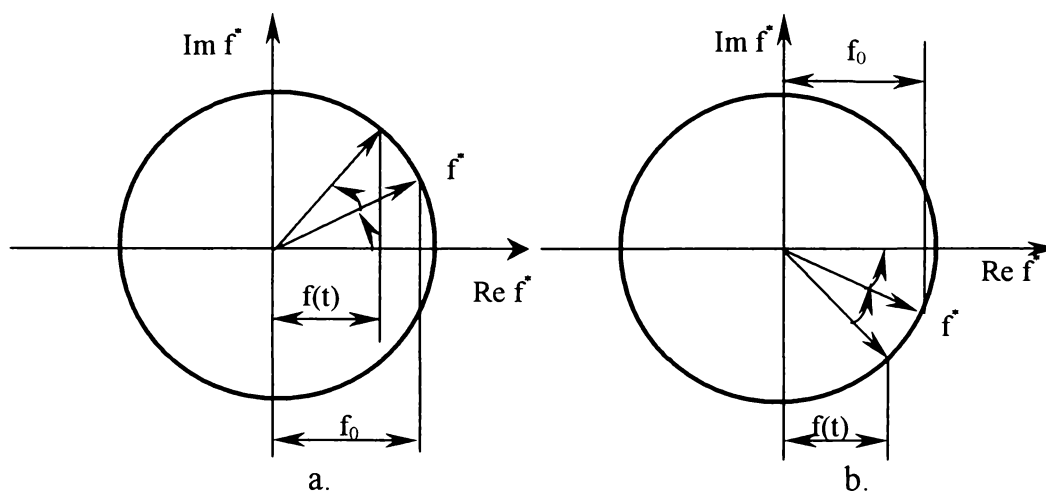


Fig. 5.8 Reprezentarea funcțiilor $f^* e^{i\omega t}$ și $\bar{f}^* e^{-i\omega t}$

Înregistrarea valorilor momentane ale curentului de sudare, în timpul oscilării poziției capului de sudare, a relevat o variație periodică în timp. Această variație poate fi privită ca și o undă complexă, periodică, desfășurând un spectru mai mult sau mai puțin larg de frecvențe. Cea mai joasă frecvență, f_{\min} , este, în general, acceptată cu numele de frecvența fundamentală a undei. Celelalte frecvențe vor avea valorile $2f$, $3f$, etc. Toate aceste frecvențe ale undei de curent sunt excitate simultan, iar vibrația rezultată, unda de curent, are o formă complexă. Periodicitatea undei de curent este egală cu:

$$T = \frac{1}{f} \tag{5.54}$$

Este, deci, posibilă imaginarea undei de curent ca și o sumă de componente sinusoidale aflate în relație armonică.

Pentru a putea stabili cu precizie forma undei de curent, este necesară cunoașterea punctelor în care spectrul formei de undă atinge maxime și minime. Cu alte cuvinte, trebuie determinate frecvențele pentru care forma undei de curent atinge extreme. Acest studiu este posibil prin efectuarea unei dezvoltări în serie Fourier a funcției:

$$I_s = I_s(t) \tag{5.55}$$

Dezvoltarea în serie Fourier asigură o modelare matematică cu o precizie ridicată, precizia fiind dependentă de gradul dezvoltării. În tehnică se recomandă utilizarea de dezvoltări Fourier având gradul minim egal cu 3. Acest grad asigură o precizie relativ bună a reprezentării matematice.

5.5.2 Funcții periodice. Serii Fourier

5.5.2.1. Serii Fourier reale

În numeroase aplicații tehnice, fenomenele studiate au un caracter periodic. Mărimile caracteristice fenomenului sunt astfel funcții periodice $f(t+T)=f(t)$. Avantajele reprezentării unei funcții periodice sub forma unei serii Fourier sau a unei serii de funcții trigonometrice se bazează pe faptul că, în cazul unei funcții sinusoidale, derivarea se reduce, în reprezentarea complexă, la o operație algebrică, de înmulțire cu un factor complex.

O funcție reală $f(t)$, periodică, de perioadă T se poate reprezenta sub forma unei serii Fourier astfel:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + a_1 \cos \frac{2\pi t}{T} + b_1 \sin \frac{2\pi t}{T} + \dots + a_n \cos \frac{2\pi n t}{T} + b_n \sin \frac{2\pi n t}{T} \quad (5.56)$$

unde n sunt numere naturale, iar a_0, a_i, b_i sunt coeficienții Fourier reali ai funcției $f(t)$.

Funcțiile $\cos \frac{2\pi t}{T}$ și $\sin \frac{2\pi t}{T}$ au perioada T , respectiv funcțiile $\cos \frac{2\pi n t}{T}$ și $\sin \frac{2\pi n t}{T}$ au perioada $\frac{T}{n}$. Se poate verifica faptul că funcțiile $\cos \frac{2\pi n t}{T}$ și $\sin \frac{2\pi n t}{T}$ satisfac următoarele relații /4/, /16/, /37/:

$$\int_0^T \cos \frac{2\pi m t}{T} \cos \frac{2\pi n t}{T} dt = \begin{cases} \frac{T}{2}, & m = n \neq 0; \\ 0, & m \neq n \end{cases} \quad (5.57)$$

$$\int_0^T \sin \frac{2\pi m t}{T} \sin \frac{2\pi n t}{T} dt = \begin{cases} \frac{T}{2}, & m = n \neq 0; \\ 0, & m \neq n \end{cases} \quad (5.58)$$

$$\int_0^T \cos \frac{2\pi m t}{T} \sin \frac{2\pi n t}{T} dt = 0; \quad (5.59)$$

$$\int_0^T 1 \cdot \cos \frac{2\pi n t}{T} dt = 0, \quad n \neq 1; \quad (5.60)$$

$$\int_0^T 1 \cdot \sin \frac{2\pi n t}{T} dt = 0, \quad n \neq 1 \quad (5.61)$$

Relațiile (5.57)... (5.61) al căror membru drept este egal cu zero reprezintă condiții de ortogonalitate. Astfel, șirul funcțiilor trigonometrice din seria Fourier este un șir de funcții ortogonale /4/, /16/, /57/.

Relațiile de ortogonalitate permit determinarea coeficienților $a_0, a_1, b_1, \dots, a_n, b_n$. Se obțin următoarele expresii:

$$\left\{ \begin{array}{l} a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) dt \\ a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cdot \cos \frac{2\pi n t}{T} dt \\ b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cdot \sin \frac{2\pi n t}{T} dt \end{array} \right\} n \neq 0 \quad (5.62)$$

$$\left. \begin{array}{l} a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cdot \cos \frac{2\pi n t}{T} dt \\ b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cdot \sin \frac{2\pi n t}{T} dt \end{array} \right\} n \neq 0 \quad (5.63)$$

5.5.2.2 Serii Fourier complexe

Expresia complexă a seriei Fourier se poate obține știind că:

$$\cos \omega t = \frac{e^{i\omega t} + e^{-i\omega t}}{2}; \sin \omega t = \frac{e^{i\omega t} - e^{-i\omega t}}{2i} \quad (5.64)$$

Seria Fourier complexă are expresia /57/, /76/, /89/:

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} c_n e^{\frac{2\pi i n t}{T}} \quad (5.65)$$

unde coeficienții complecși c_n se calculează cu relațiile:

$$c_n = \frac{a_n - ib_n}{2}; \quad c_{-n} = \frac{a_n + ib_n}{2} = \bar{c}_n; \quad c_0 = \frac{a_0}{2} \quad (5.66)$$

Expresiile integrale ale coeficienților complecși c_n se obțin pe baza relațiilor (5.62), (5.63) și (5.66):

$$c_n = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) e^{-\frac{2\pi i n t}{T}} dt \quad (5.67)$$

Se pot menționa următoarele proprietăți ale seriilor Fourier /4/, /16/, /37/, /76/, /92/:

- coeficienții Fourier (reali sau complecși) ai unei funcții periodice $kf(t)$, k fiind o constantă arbitrară, se obțin din coeficienții seriei Fourier $f(t)$, prin înmulțire cu constanta k ;
- coeficienții Fourier (reali sau complecși) ai sumei a două funcții periodice, cu aceeași perioadă, se obțin prin însumarea coeficienților Fourier omologi ai celor două funcții;
- coeficienții Fourier complecși ai derivatei unei funcții periodice $f(t)$ se obțin prin înmulțirea coeficienților c_n ai funcției $f(t)$ cu coeficienții $\frac{2\pi i n}{T}$.

Ultima dintre proprietățile enumerate este semnificativă pentru avantajele dezvoltării în serie Fourier. Această proprietate exprimă faptul că operațiilor diferențiale asupra unei funcții periodice $f(t)$ le corespund operații algebrice asupra coeficienților Fourier.

Din relațiile (5.65) și (5.67) rezultă:

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} e^{\frac{2\pi i n t}{T}} \frac{1}{T} \int_0^T e^{-\frac{2\pi i n t'}{T}} f(t') dt' = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \frac{1}{T} \int_0^T e^{\frac{2\pi i n (t-t')}{T}} f(t') dt' \quad (5.68)$$

5.5.3 Funcții aperiodice. Integrale Fourier

Datorită avantajelor oferite de seriile Fourier pentru studiul funcțiilor periodice s-a pus problema generalizării aplicării acestora și la funcțiile aperiodice. Acest lucru este posibil dacă se consideră că perioada T este foarte mare și se trece la limită ∞ , ∞ .

Se folosesc următoarele notații:

$$\frac{2\pi n}{T} = \omega_n; \quad \frac{2\pi}{T} = \omega_n - \omega_{n-1} = \Delta\omega \quad (5.69)$$

Astfel, relația (5.68) poate fi înlocuită cu:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} e^{i\omega_n t} \int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}} e^{-i\omega_n t'} f(t') dt' \quad (5.70)$$

La limită, pentru $T \rightarrow \infty$, deci $\Delta\omega \rightarrow 0$, rezultă:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{i\omega t} \left[\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-i\omega t'} f(t') dt' \right] d\omega \quad (5.71)$$

în care variabila discretă ω_n este înlocuită cu variabila continuă ω . Transformata Fourier (imaginea Fourier) a funcției originale $f(t)$ se notează cu:

$$\tilde{f}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-i\omega t} f(t) dt \quad (5.72)$$

iar:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{i\omega t} \tilde{f}(\omega) d\omega \quad (5.73)$$

În multe aplicații, funcțiile sunt date sub formă numerică, deci transformatele Fourier, directă și inversă, au o importanță deosebită. Având în vedere volumul mare al calculelor și precizia acestora, se poate apela la transformarea Fourier rapidă (FFT).

5.5.4 Modelarea variației curentului de sudare la oscilarea capului de sudare prin metoda dezvoltării în serie Fourier

Teoria dezvoltării în serie Fourier este bine cunoscută și se bazează pe următoarele considerații:

- O funcție periodică având perioada 2π poate fi reprezentată sub forma unei serii:

$$f(t) = \frac{1}{2} \cdot a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cdot \cos nt + b_n \cdot \sin nt) \quad (5.74)$$

- Expresia (5.84) este valabilă cu anumite restricții numite condițiile Dirichlet: integrala $\int_{-\pi}^{\pi} |f(t)| dt$ trebuie să fie finită și funcția $f(t)$ să fie continuă și monotonă pe porțiuni.

În cazul unde de curent, variația acesteia la oscilarea capului de sudare transversal pe rost este periodică (figura 5.10) având perioada T . Se poate astfel scrie:

$$I_s(t) = \frac{1}{2} \cdot a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T} \cdot nt\right) + b_n \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot nt\right) \right] \quad (5.75)$$

2 x Cloos 503
 Romat 310
 HKS QAS-400

G3Si1, SR EN 440, 1.2 mm
 M21 (18/82), SR EN 439, 18 l/min

Frecv. oscil.: 4 Hz
 $I_s = 450 / 430$ A puls
 $U_a = 42 / 41$ V

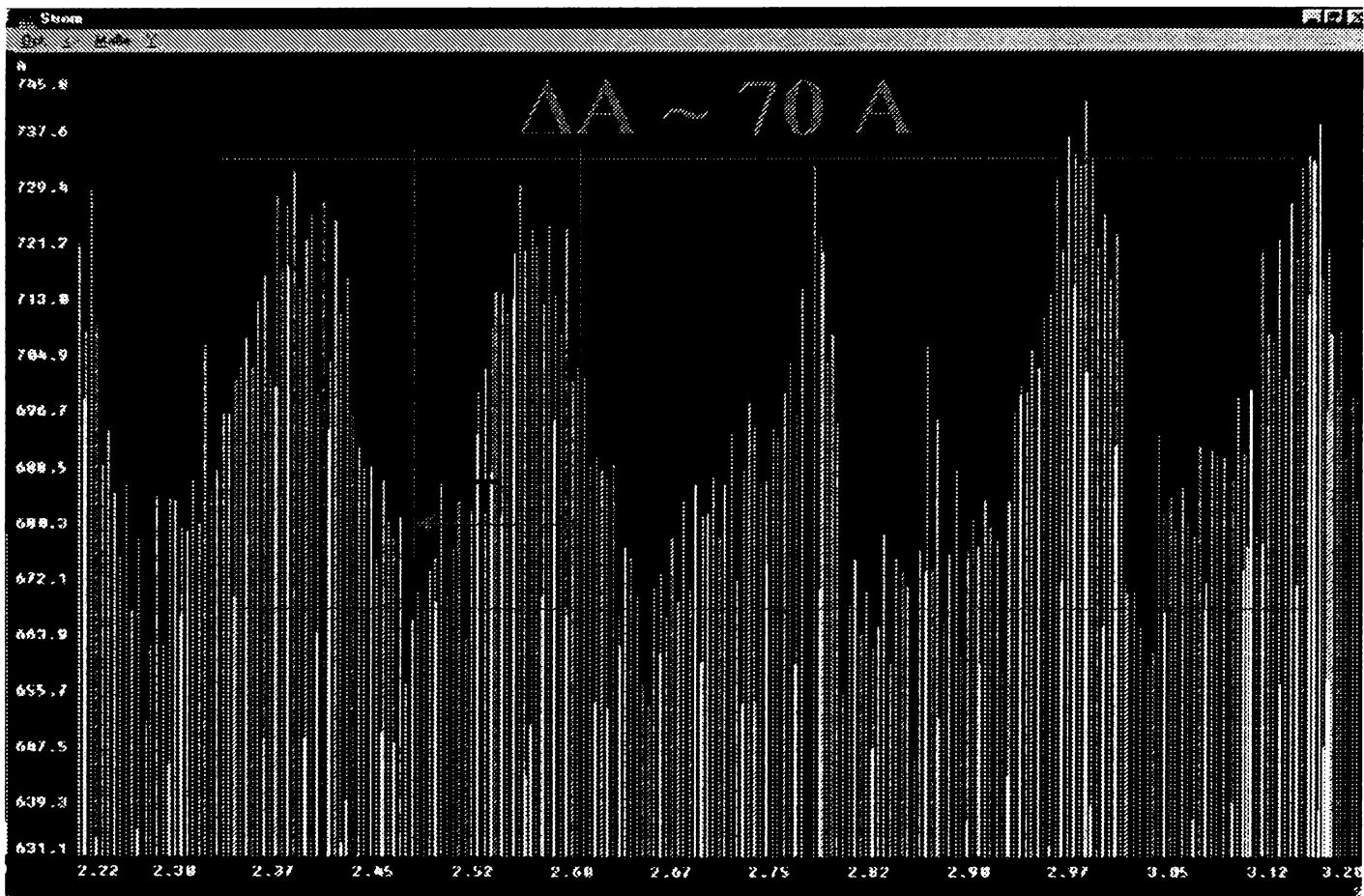


Fig. 5.9 Variația curentului de sudare la oscilarea poziției capului de sudare /102/

Figura 5.9 relevă și faptul că funcția de variație a curentului de sudare este continuă și monotonă pe fiecare ciclu de scanare a rostului, iar integrala sa, care este o funcție sinusoidală, este la rândul ei și monotonă și continuă pe fiecare ciclu de scanare a rostului.

Transpunând traiectoria capului de sudare și variația curentului peste planul din rost în care se găsesc vârfurile celor două sârme de sudare, situația reală devine cea prezentată în figura 5.10 a. Creând artificial un sistem tri-ortogonal Is-t-x, variația fiecărei duble relații arată ca în figura 5.10 b.

Aceste reprezentări sunt caracteristice suprapunerii axei de oscilare a capului cu axa rostului de sudare, amplitudinea stângă fiind egală cu amplitudinea dreaptă.

Punând sub formă integrală expresia (5.75) este posibilă determinarea coeficienților a_n , b_n .

$$\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} I(t) \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot nt\right) dt = \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} b_n \sin\left[n^2\left(\frac{2\pi}{T} \cdot nt\right)\right] dt = \frac{2}{T} \cdot \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} I(t) \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot nt\right) dt \quad (5.76)$$

Prin măsurători ale curentului de sudare, în timpul oscilării capului de sudare transversal pe rost, a fost posibilă determinarea discretă a valorilor momentane ale curentului de sudare. Cu ajutorul acestor valori au fost construite seriile Fourier pentru o serie de situații concrete.

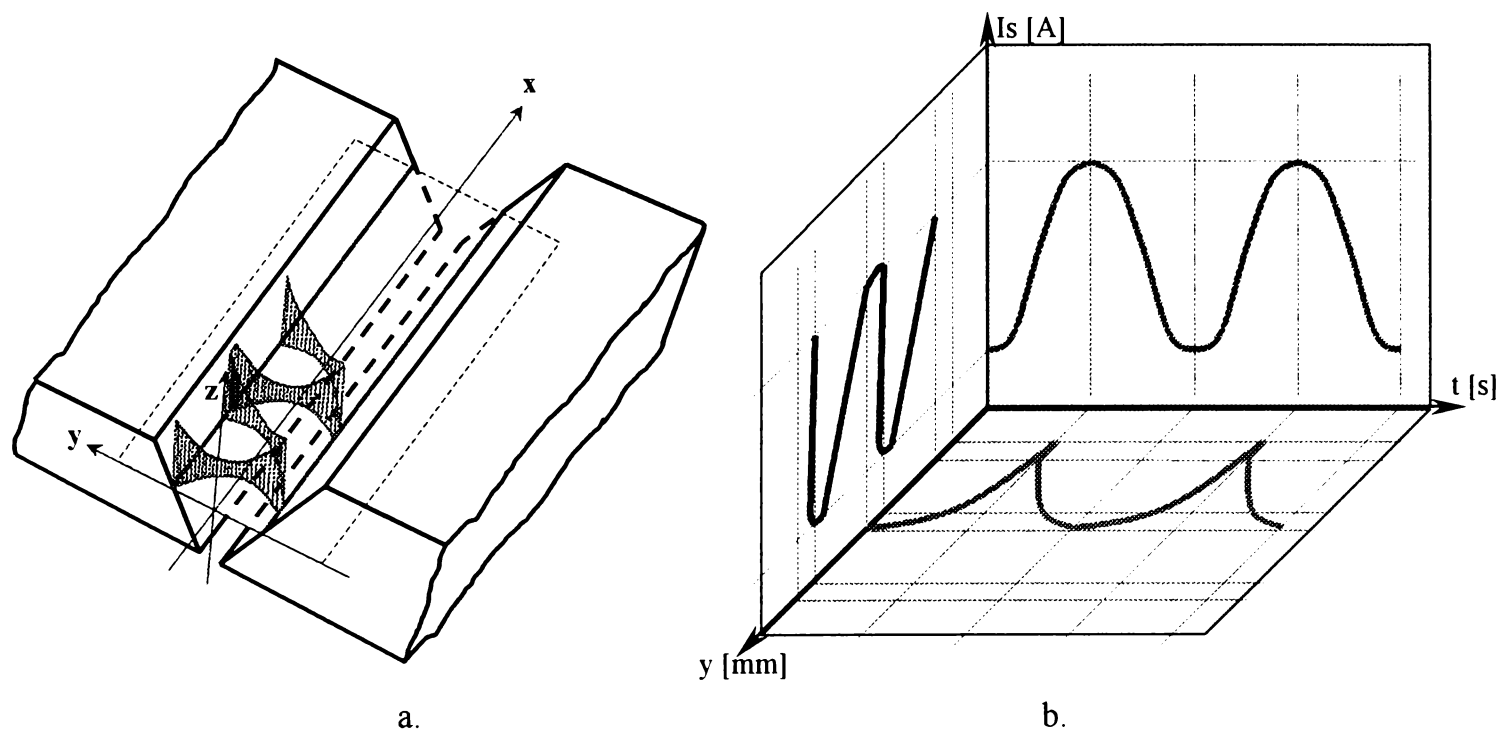


Fig. 5.10 Variația curentului de sudare în timp și spațiu

Caracteristicile experimentului au fost:

2 x Cloos 503	G3Si1, SR EN 440, 1.2 mm	Frecv. oscil.: 4...8 Hz
Romat 310	M21 (18/82), SR EN 439, 18 l/min	Vae = 1...20 m/min
HKS QAS-400	lung. Cap. liber sârme: 16-18 mm	Vs = 50 cm/min

Coefficienții seriei Fourier au fost calculați cu relațiile:

$$a_0 = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N I_{s_i} \quad (5.77)$$

$$a_k = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N I_{s_i} \cos \frac{2k\pi t_i}{T} = \frac{2}{40} \sum_{i=1}^{40} I_{s_i} \cos \frac{2k\pi t_i}{0.1755} \quad (5.78)$$

$$b_k = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N I_{s_i} \sin \frac{2k\pi t_i}{T} = \frac{2}{40} \sum_{i=1}^{40} I_{s_i} \sin \frac{2k\pi t_i}{0.1755} \quad (5.79)$$

Valorile coeficienților a_k și b_k calculați utilizându-se valorile discrete momentane ale curentului de sudare sunt prezentați detaliat în tabelul 5.1.

Tabel 5.1

Viteza de avans al sârmei [m/min]	a_0	a_1	a_2	a_3	b_1	b_2	b_3
4Hz							
1	257,101	8,240	7,505	6,683	0,322	-2,881	1,652
2	265,136	8,497	7,740	6,892	0,332	-2,971	1,704
3	282,812	9,064	8,256	7,351	0,354	-3,169	1,818
4	320,164	10,261	9,346	8,322	0,401	-3,587	2,058
5	385,652	12,360	11,258	10,024	0,483	-4,321	2,479
6	413,871	13,264	12,082	10,758	0,518	-4,637	2,660
7	446,545	14,311	13,035	11,607	0,559	-5,003	2,870
8	484,820	15,538	14,153	12,602	0,607	-5,432	3,116
9	506,529	16,234	14,787	13,166	0,635	-5,675	3,256
10	530,272	16,995	15,480	13,784	0,664	-5,942	3,408
11	550,932	17,657	16,083	14,321	0,690	-6,173	3,541
12	565,624	18,128	16,512	14,703	0,709	-6,338	3,635

13	581,120	18,624	16,964	15,105	0,728	-6,511	3,735
14	593,311	19,015	17,320	15,422	0,743	-6,648	3,813
15	603,869	19,353	17,628	15,697	0,756	-6,766	3,881
16	610,385	19,562	17,818	15,866	0,765	-6,840	3,923
17	628,471	20,142	18,346	16,336	0,787	-7,042	4,039
18	640,329	20,522	18,692	16,644	0,802	-7,175	4,116
19	678,748	21,753	19,814	17,643	0,850	-7,605	4,363
20	692,600	22,197	20,219	18,003	0,868	-7,760	4,452
5Hz							
1	257,101	35,2748	1,133268	-13,6074	38,00527	34,99267	8,754668
2	265,136	36,37714	1,168683	-14,0326	39,19293	36,08619	9,028252
3	282,812	38,80228	1,246595	-14,9681	41,80579	38,49193	9,630135
4	320,164	43,92711	1,41124	-16,9451	47,32731	43,57577	10,90204
5	385,652	52,9122	1,699902	-20,4111	57,0079	52,489	13,132
6	413,871	56,78383	1,824285	-21,9046	61,17921	56,32966	14,09288
7	446,545	61,26676	1,968308	-23,6339	66,00915	60,77674	15,20548
8	484,820	66,5182	2,13702	-25,6597	71,66707	65,98617	16,5088
9	506,529	69,496	2,232	-26,808	74,876	68,940	17,248
10	530,272	72,75428	2,337366	-28,0653	78,38586	72,17237	18,0565
11	550,932	75,58886	2,428432	-29,1587	81,43986	74,98428	18,76
12	565,624	77,60456	2,49319	-29,9363	83,61159	76,98387	19,26027
13	581,120	79,73072	2,561497	-30,7564	85,90232	79,09301	19,78795
14	593,311	81,40339	2,615234	-31,4017	87,70446	80,75231	20,20308
15	603,869	82,85185	2,661769	-31,9604	89,26504	82,18918	20,56257
16	610,385	83,74593	2,690493	-32,3053	90,22833	83,07611	20,78446
17	628,471	86,22729	2,770211	-33,2625	92,90176	85,53763	21,4003
18	640,329	87,85422	2,822479	-33,8901	94,65463	87,15155	21,80408
19	678,748	93,12548	2,991828	-35,9235	100,3339	92,38064	23,11232
20	692,600	95,026	3,052886	-36,6567	102,3815	94,26596	23,584
6Hz							
1	257,101	-13,0484	15,21859	-7,74908	48,78132	8,626409	6,73318
2	265,136	-13,4562	15,69417	-7,99124	50,30574	8,895984	6,943592
3	282,812	-14,3533	16,74045	-8,52399	53,65945	9,48905	7,406498
4	320,164	-16,249	18,95145	-9,6498	60,74655	10,74232	8,384715
5	385,652	-19,5727	22,82789	-11,6236	73,17198	12,93961	10,09977
6	413,871	-21,0048	24,49822	-12,4741	78,52603	13,88641	10,83878
7	446,545	-22,6631	26,43229	-13,4589	84,72545	14,98271	11,69447
8	484,820	-24,606	28,698	-14,613	91,988	16,267	12,697
9	506,529	-25,707	29,983	-15,267	96,106	16,995	13,265
10	530,272	-26,9124	31,38835	-15,9825	100,6115	17,79197	13,88718
11	550,932	-27,9609	32,61127	-16,6052	104,5314	18,48516	14,42824
12	565,624	-28,7066	33,4809	-17,048	107,3189	18,9781	14,813
13	581,120	-29,493	34,39819	-17,515	110,2592	19,49805	15,21883
14	593,311	-30,1118	35,11983	-17,8825	112,5723	19,9071	15,53811
15	603,869	-30,6476	35,74474	-18,2007	114,5753	20,26132	15,81459
16	610,385	-30,9783	36,13047	-18,3971	115,8118	20,47996	15,98525
17	628,471	-31,8962	37,201	-18,9422	119,2432	21,08678	16,45888
18	640,329	-32,498	37,90291	-19,2996	121,4931	21,48464	16,76943
19	678,748	-34,4479	40,17708	-20,4576	128,7827	22,77372	17,7756
20	692,600	-35,1509	40,99702	-20,8751	131,4109	23,23849	18,13836
7Hz							
1	257,101	-20,2722	-9,14657	13,9522	11,82368	24,18638	20,58865
2	265,136	-20,9057	-9,4324	14,38821	12,19317	24,9422	21,23204
3	282,812	-22,2994	-10,0612	15,34742	13,00605	26,60501	22,64751
4	320,164	-25,2446	-11,3901	17,37444	14,72383	30,11888	25,63869
5	385,652	-30,4083	-13,7199	20,9283	17,73552	36,27956	30,88297
6	413,871	-32,6333	-14,7237	22,45964	19,03324	38,93416	33,1427
7	446,545	-35,2096	-15,8861	24,23277	20,53587	42,00791	35,75923

8	484,820	-38,2276	-17,2478	26,30987	22,29609	45,60859	38,8243
9	506,529	-39,9392	-18,0201	27,48792	23,29442	47,65077	40,5627
10	530,272	-41,8114	-18,8648	28,77642	24,38634	49,8844	42,46408
11	550,932	-43,4404	-19,5998	29,89758	25,33646	51,82795	44,11853
12	565,624	-44,5988	-20,1225	30,69485	26,0121	53,21003	45,29502
13	581,120	-45,8207	-20,6738	31,5358	26,72476	54,66783	46,53598
14	593,311	-46,782	-21,1075	32,19739	27,28542	55,81471	47,51226
15	603,869	-47,6144	-21,483	32,7703	27,77093	56,80786	48,35767
16	610,385	-48,1282	-21,7149	33,12393	28,07061	57,42089	48,87952
17	628,471	-49,5543	-22,3583	34,10538	28,90233	59,12225	50,3278
18	640,329	-50,4892	-22,7801	34,74888	29,44766	60,23776	51,27738
19	678,748	-53,5186	-24,1469	36,83382	31,21452	63,85203	54,35402
20	692,600	-54,6108	-24,6397	37,58553	31,85155	65,15513	55,46329
8Hz							
1	257,101	7,505502	2,452717	-1,64072	-2,88093	-2,41773	2,170546
2	265,136	7,740049	2,529364	-1,69199	-2,97095	-2,49329	2,238375
3	282,812	8,256052	2,697988	-1,80479	-3,16902	-2,65951	2,3876
4	320,164	9,346474	3,054326	-2,04316	-3,58757	-3,01076	2,702944
5	385,652	11,25825	3,679075	-2,46107	-4,32139	-3,6266	3,255819
6	413,871	12,08203	3,948276	-2,64115	-4,63759	-3,89196	3,494049
7	446,545	13,03587	4,259982	-2,84966	-5,00371	-4,19922	3,769895
8	484,820	14,15323	4,625123	-3,09392	-5,4326	-4,55916	4,093029
9	506,529	14,787	4,832	-3,232	-5,676	-4,763	4,276
10	530,272	15,4801	5,058728	-3,38398	-5,94191	-4,98658	4,47675
11	550,932	16,08322	5,255821	-3,51582	-6,17341	-5,18086	4,651169
12	565,624	16,5121	5,395977	-3,60957	-6,33804	-5,31902	4,7752
13	581,120	16,96449	5,543812	-3,70847	-6,51168	-5,46474	4,906028
14	593,311	17,32039	5,660115	-3,78627	-6,64829	-5,57939	5,008952
15	603,869	17,62858	5,760829	-3,85364	-6,76659	-5,67866	5,098079
16	610,385	17,81882	5,822996	-3,89522	-6,83961	-5,73994	5,153094
17	628,471	18,34678	5,99553	-4,01064	-7,04226	-5,91002	5,305778
18	640,329	18,69295	6,108653	-4,08631	-7,17513	-6,02153	5,405887
19	678,748	19,81453	6,475172	-4,33149	-7,60564	-6,38282	5,730241
20	692,600	20,2189	6,607318	-4,41989	-7,76086	-6,51308	5,847184

Expresia variației curentului de sudare este:

$$I_s(t) = \frac{1}{2} \cdot a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T} \cdot nt\right) + b_n \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot nt\right) \right] \quad (5.80)$$

$$\begin{aligned} I_s(t) = & \frac{1}{2} \cdot a_0 + a_1 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T} \cdot 1 \cdot t\right) + b_1 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot 1 \cdot t\right) + \\ & + a_2 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T} \cdot 2 \cdot t\right) + b_2 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot 2 \cdot t\right) + \\ & + a_3 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T} \cdot 3 \cdot t\right) + b_3 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot 3 \cdot t\right) \end{aligned} \quad (5.81)$$

coeficienții a_k și b_k fiind cei prezentați în tabelul 5.1.

Pentru verificarea experimentală a modelului au fost construite în MathCAD expresiile curenților de sudare pentru frecvența de oscilare de 4 Hz și viteze de avans al sârmei de 1-10 m/min.

În figura 5.11 sunt prezentate curbele determinate de aceste expresii. Aceste curbe au fost comparate cu variația reală a curentului de sudare determinată prin înregistrarea on-line a curentului de sudare (figurile 5.12 a, b, c, d, e, f, g, h, i, j)

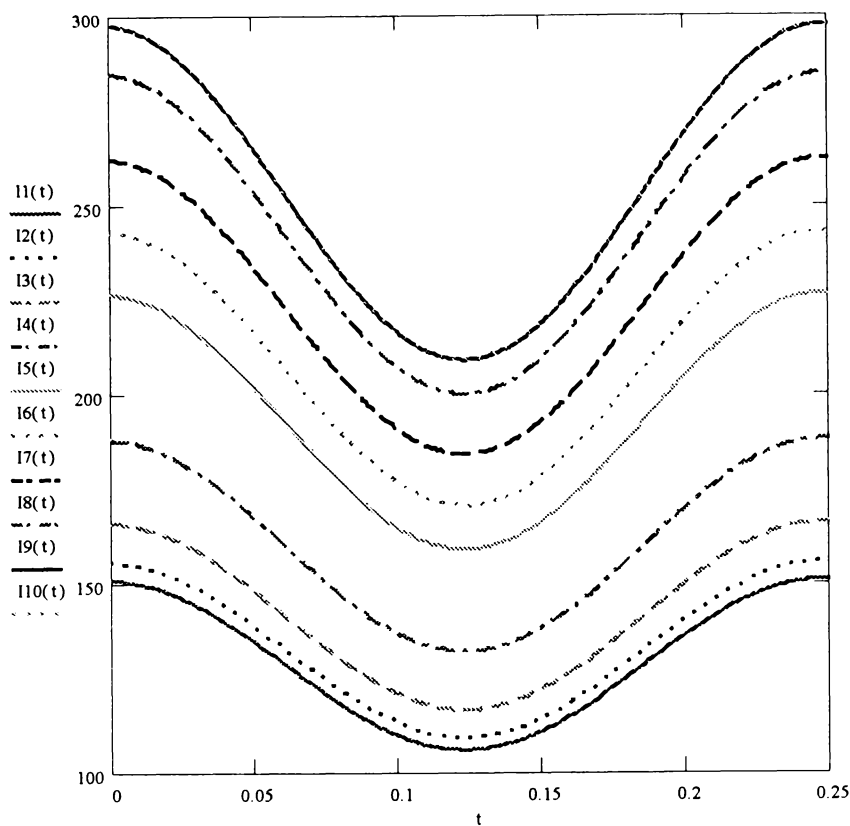
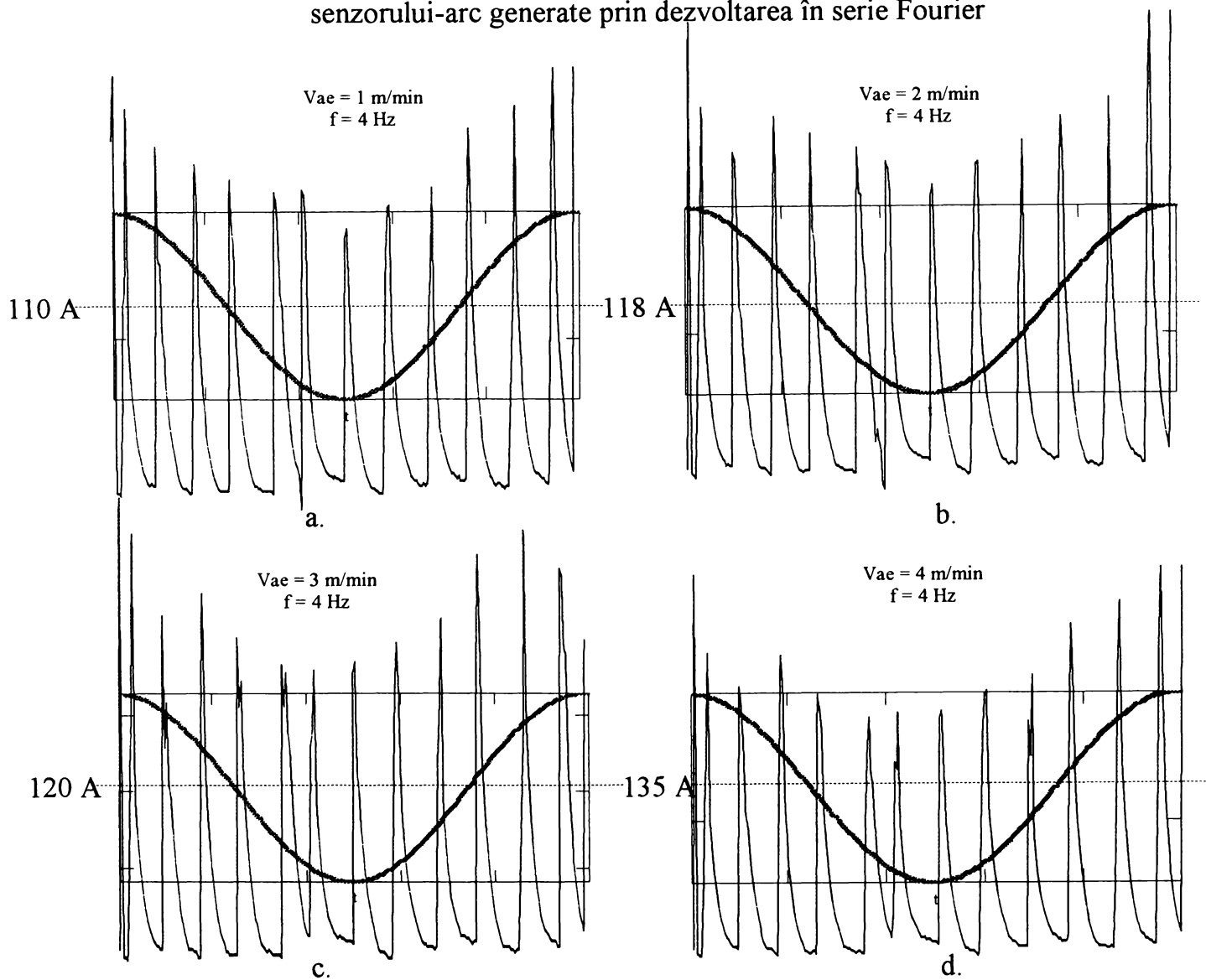


Fig. 5.11 Curbele de variație a curentului de sudare în timpul funcționării senzorului-arc generate prin dezvoltarea în serie Fourier



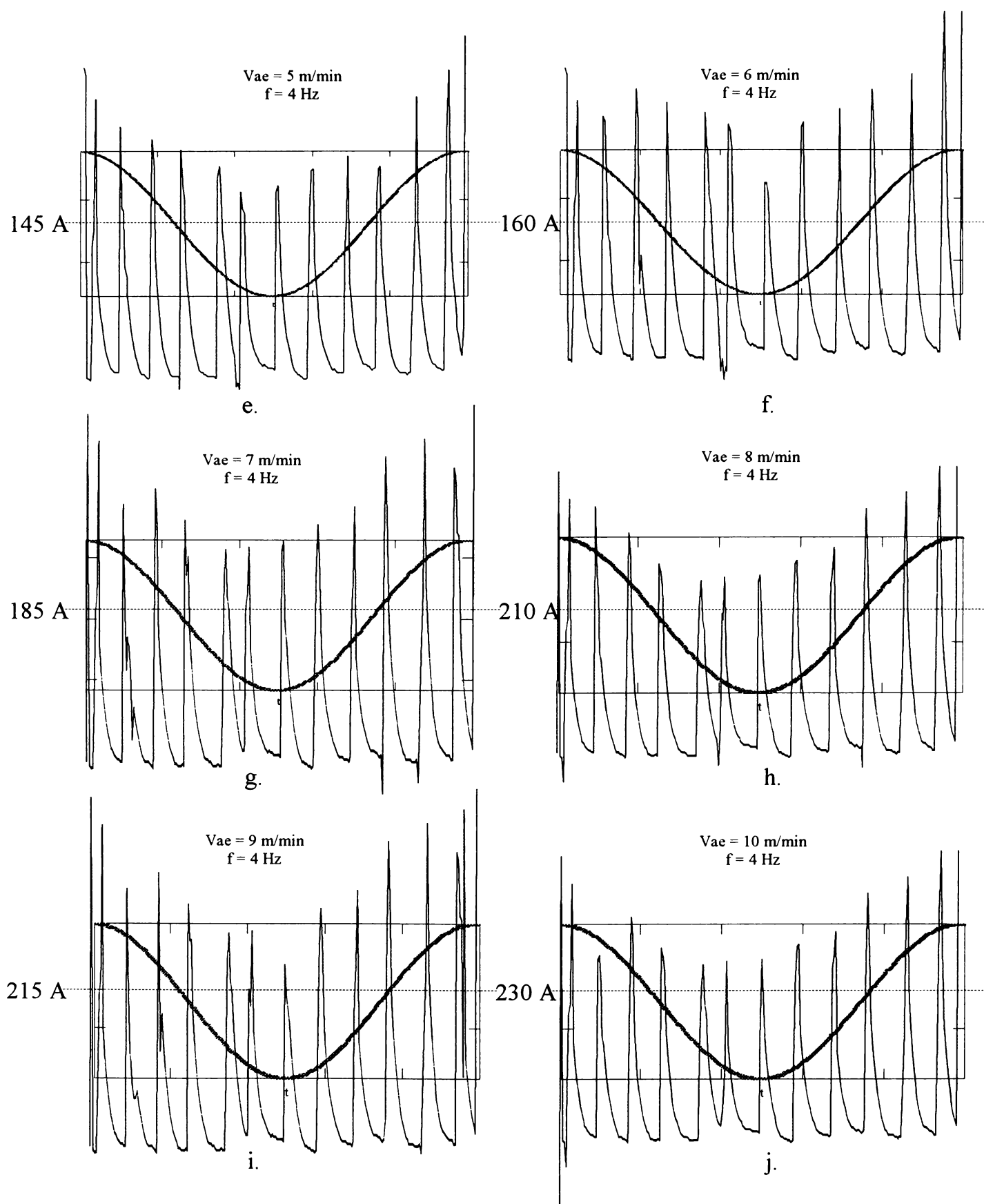


Fig. 5.12 Suprapunerea curbelor generate prin dezvoltarea în serie Fourier cu variația reală a curentului de sudare

Acceptând imaginar unda medie de curent real, se poate observa că aceasta este asemănătoare cu unda descrisă de seria Fourier. Aceasta demonstrează că modelul matematic propus este valabil în oricare din situațiile prezentate. Deși este o metodă mai laborioasă de construire a unei unde de referință care să “ghideze” senzorul-arc, aceasta este totuși recomandată pentru precizia de reprezentare.

5.5.5 Modelarea variației curentului de sudare la oscilarea capului de sudare prin metoda asimilării cu o funcție periodică simplă

Forma (5.81) de exprimare a variației curentului de sudare este, uneori, dificil de utilizat. Dificultatea crește o dată cu dezvoltarea într-o serie Fourier cu grad mai mare. Din acest motiv, pentru facilitarea operării în modelele matematice, se propune și o a doua metodă de modelare matematică, metodă care să ofere în final un model mai simplu și cu o precizie relativ bună de reprezentare.

Privind formele undelor de curent înregistrate în cadrul experimentărilor de sudare prezentate în figura 5.12 se poate observa că:

- pornind mișcarea de oscilare a capului de sudare de pe unul din flancuri, iar axa oscilării se suprapune peste axa rostului de sudare, atunci forma undei este cea prezentată în figura 5.13.

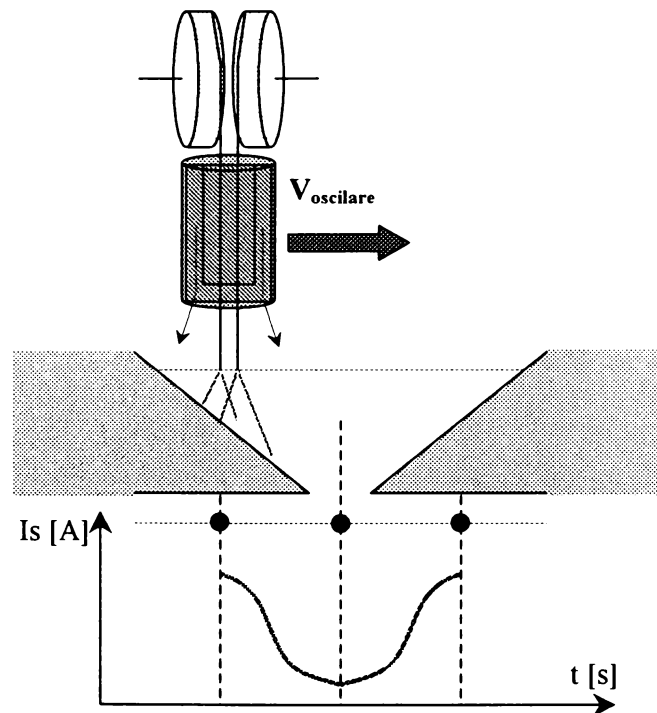


Fig. 5.13 Variația undei de curent la oscilarea capului de sudare cu pornire de pe unul din flancurile rostului de sudare

- valorile maximelor și minimelor înregistrate se repetă cu mici diferențe
- perioada variației este constantă fiind dependentă de frecvența de oscilare a capului de sudare

Aceste observații îndreptătesc asimilarea variației cu funcția *cosinus*. Generarea funcției se bazează pe legea de variație a unei unde elastice. Modelul matematic al unei unde elastice are forma:

$$y(t) = y_m + y_0 \cdot \cos \omega t \quad (5.82)$$

unde:

- y_m – valoarea în jurul căreia evoluează funcția *cosinus*
- y_0 – valoarea amplitudinii unei unde elastice
- ω - pulsația unei

În cazul undei de curent care variază datorită oscilării capului de sudare transversal pe rost, ecuația (5.82) devine:

$$I(t) = I_m + I_0 \cdot \cos \omega t \quad (5.83)$$

Dacă perioada undei este egală cu T , iar defazajul este egal cu φ atunci expresia (5.83) devine succesiv:

$$\varphi = 0 \rightarrow I(t) = I_m + I_0 \cdot \cos \frac{2\pi}{T} t \quad (5.84)$$

$$\varphi = \varphi_i \rightarrow I(t) = I_m + I_0 \cdot \cos \left(\frac{2\pi}{T} t + \varphi_i \right) \quad (5.85)$$

Se precizează că perioada este determinată de către pulsația undei, iar în cazul concret al variației undei de curent, perioada T este determinată de către frecvența de oscilare a capului de sudare transversal pe rost.

În figura 5.14 sunt prezentate componentele expresiei (5.85).

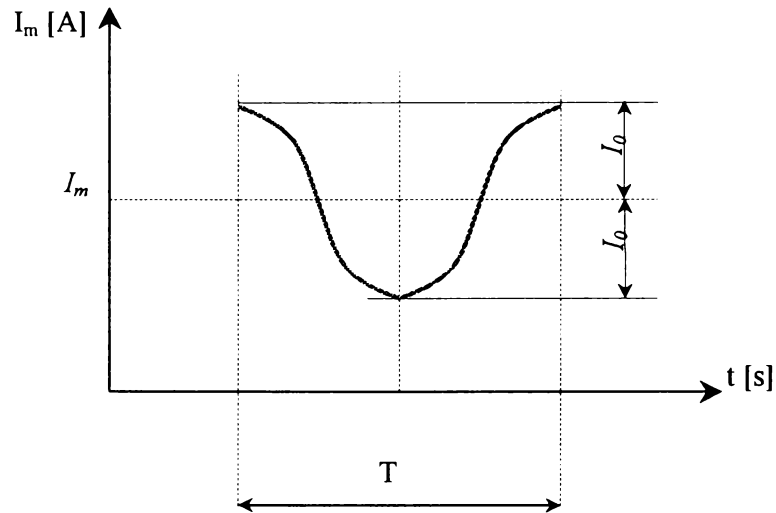
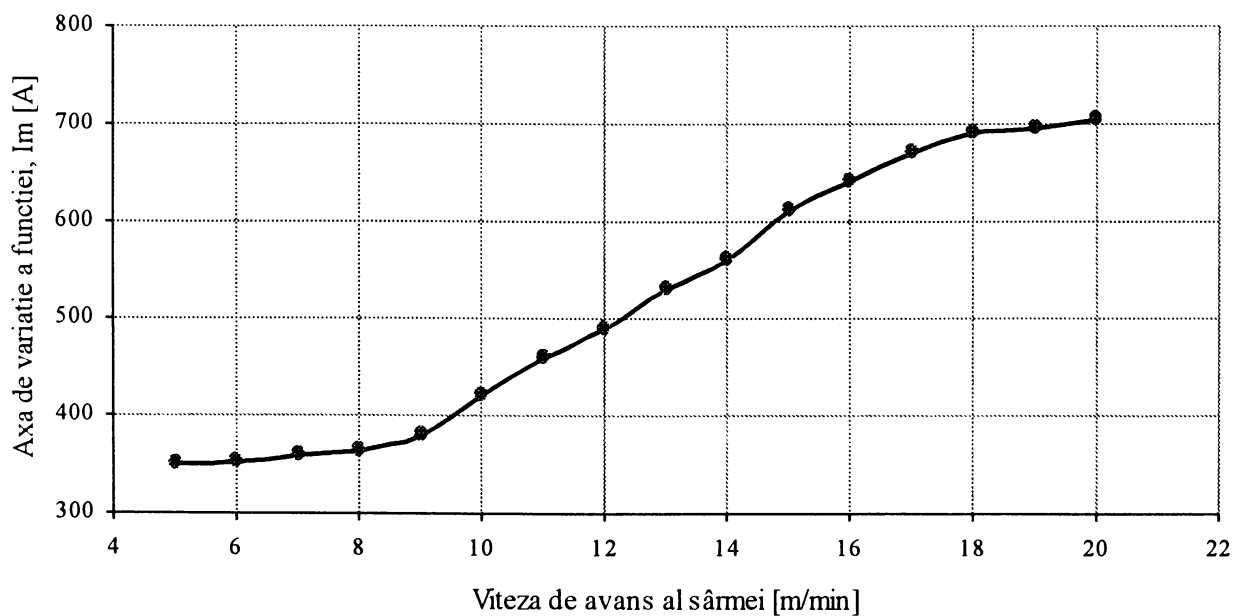


Fig. 5.14 Mărimile care compun modelul undei de curent

Defazajul φ se introduce în cazul în care oscilarea capului de sudare începe într-un alt punct decât una din extremitățile domeniului de oscilare.

Mărimile I_m și I_0 depind de viteza de avans al sârmei conform măsurătorilor prezentate în figurile 5.15 a și 5.15 b, iar perioada T depinde de frecvența de oscilare a capului de sudare, conform figurii 5.16.



a.

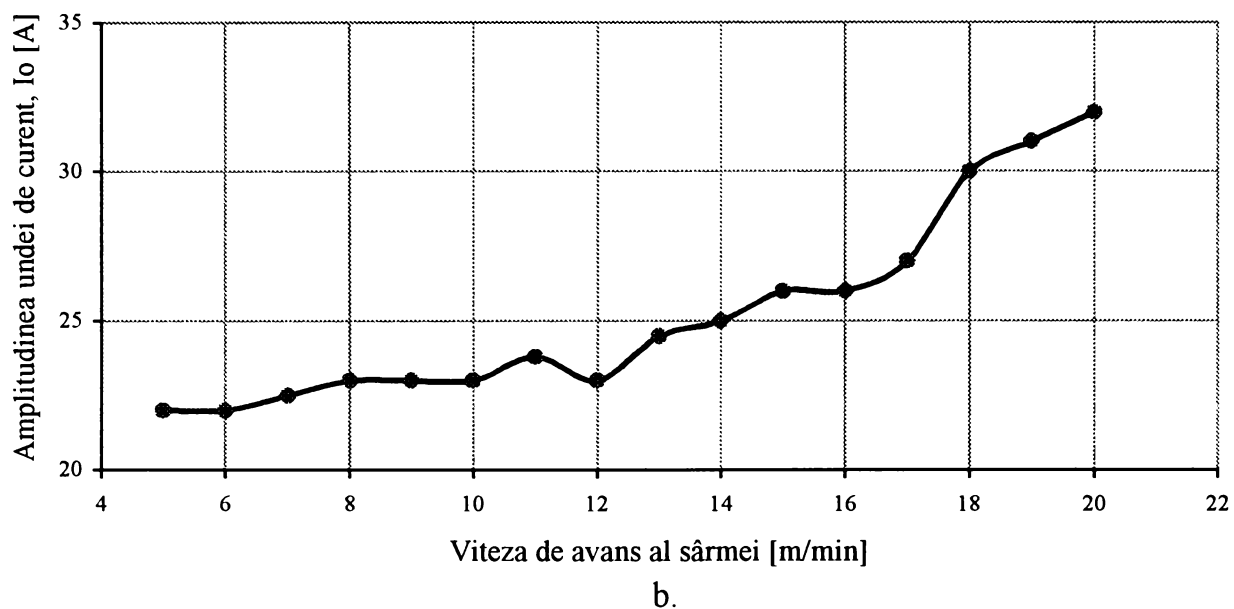


Fig. 5.15 Dependența dintre I_m , I_o și viteza de avans al sârmei electrod

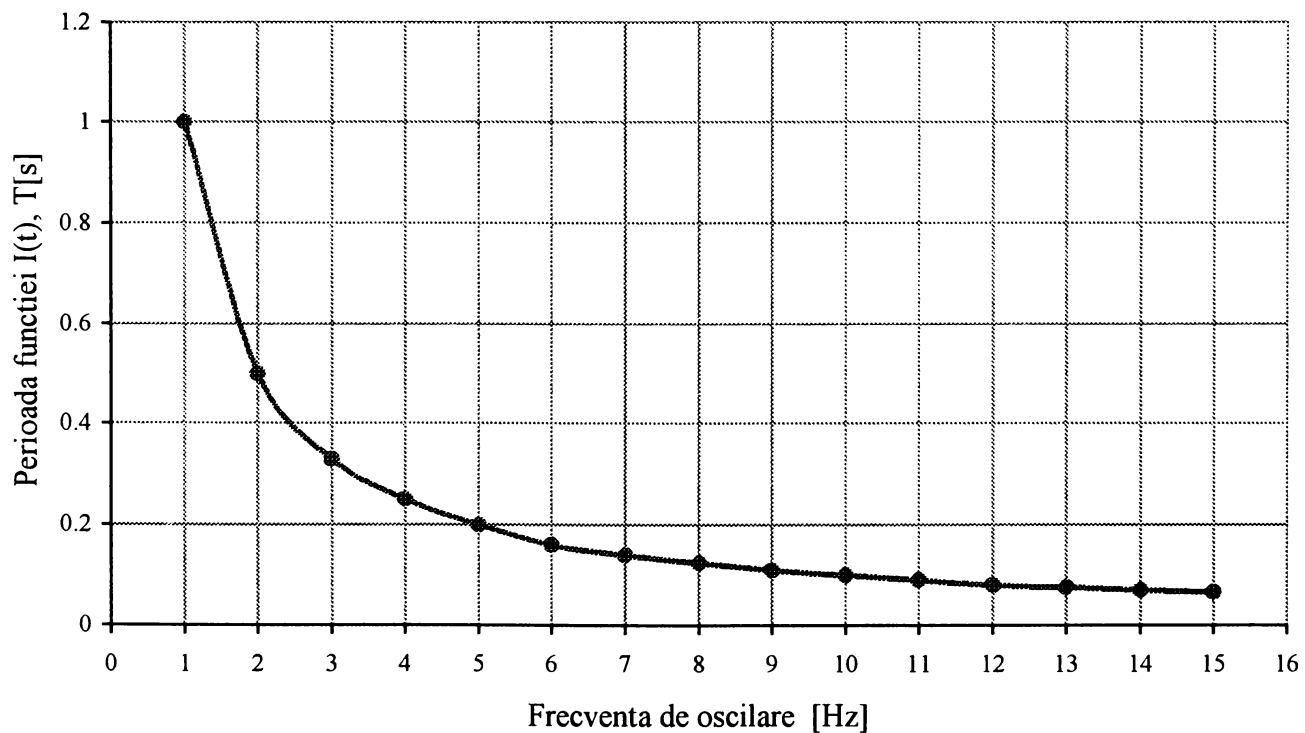


Fig. 5.16 Dependența perioadei T de frecvența de oscilare a capului de sudare

Cunoscându-se aceste dependențe este posibilă generarea funcției $I=I(t)$ prin măsurarea coeficienților acesteia T , I_m și I_o .

În tabelul 5.2 sunt prezentați acești coeficienți pentru sudarea în curent pulsant, viteza de avans al sârmei electrod având valori cuprinse în intervalul 1... 18 m/min.

Tabel 5.2

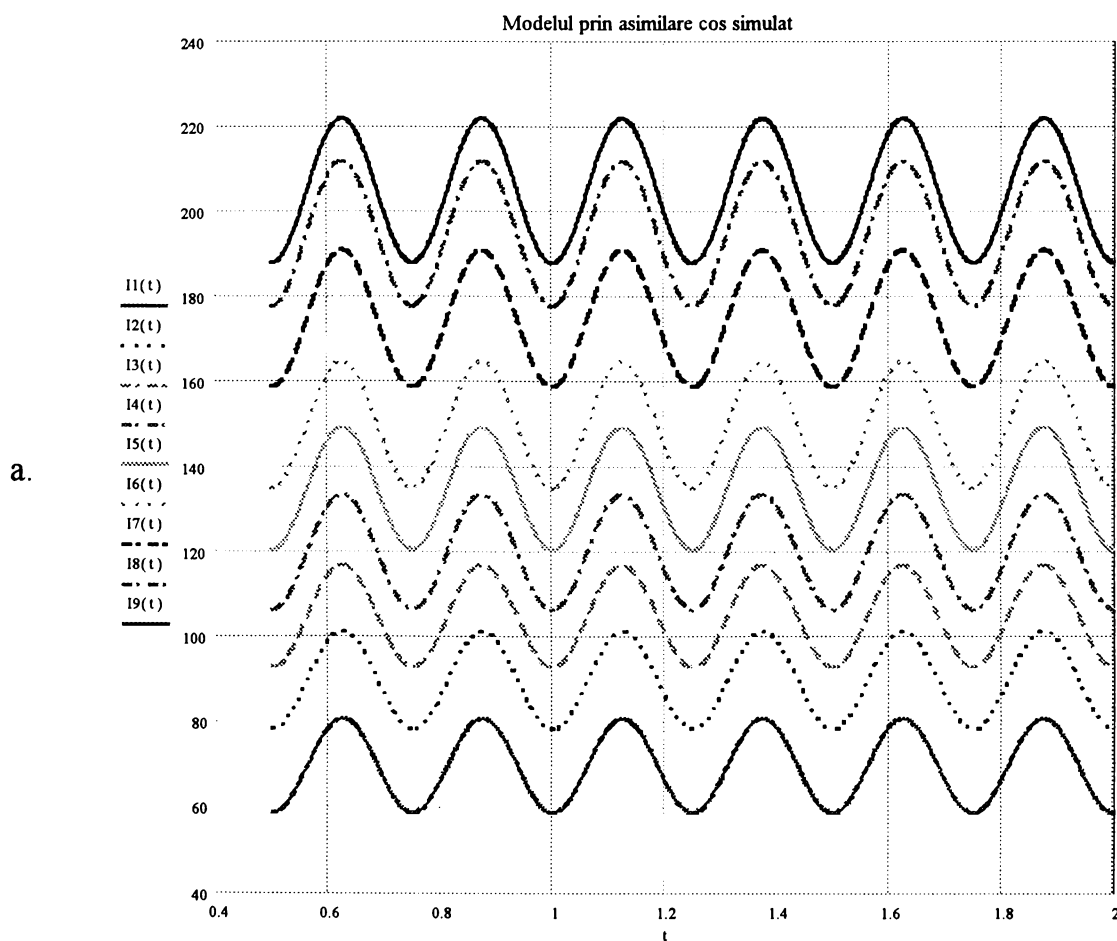
Vae [m/min]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Im, Io [A]																		
Im	70	90	105	120	135	150	175	195	205	220	230	235	250	270	295	300	320	345
Io	11	11	12	13	14	15	16	17	17	17	18	19	20	22	24	24	25	26
Frecvența [Hz]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15			
Perioada [s]	1	0.5	0.33	0.25	0.2	0.16	0.14	0.12	0.11	0.1	0.09	0.08	0.07	0.07	0.06			

$$I(t) = I_m + I_0 \cdot \cos \frac{2\pi}{T} t$$

În figurile 5.17 a și b sunt prezentate grafic variațiile curentului de sudare pentru viteze de avans al sârmei cuprinse între 1...18 m/min la frecvența de oscilare de 4 Hz.

Legendă:

- I1, 10(t) – modelul pentru viteza de avans al sârmei de 1 și 10 m/min
- I2, 11(t) – modelul pentru viteza de avans al sârmei de 2 și 11 m/min
- I3, 12(t) – modelul pentru viteza de avans al sârmei de 3 și 12 m/min
- I4, 13(t) – modelul pentru viteza de avans al sârmei de 4 și 13 m/min
- I5, 14(t) – modelul pentru viteza de avans al sârmei de 5 și 14 m/min
- I6, 15(t) – modelul pentru viteza de avans al sârmei de 6 și 15 m/min
- I7, 16(t) – modelul pentru viteza de avans al sârmei de 7 și 16 m/min
- I8, 17(t) – modelul pentru viteza de avans al sârmei de 8 și 17 m/min
- I9, 18(t) – modelul pentru viteza de avans al sârmei de 9 și 18 m/min



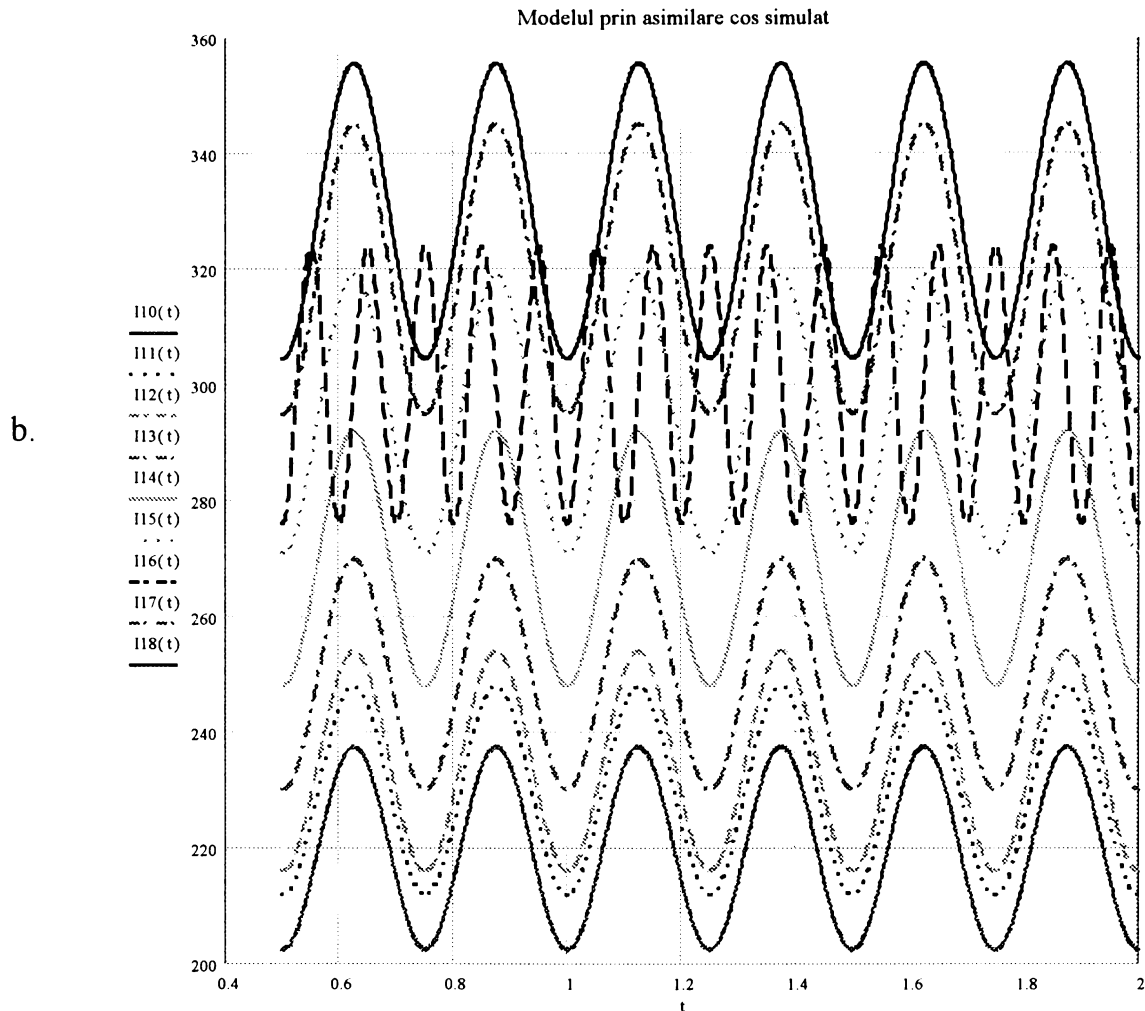


Fig. 5.17 Generarea funcției de variație a curentului de sudare prin aproximarea cu funcția cosinus

Calculule și reprezentarea grafică s-au făcut folosind programul de proiectare matematică asistată MathCAD.

Cunoscându-se modul de variație a curentului de sudare la modificarea lungimii arcului de sudare este posibilă determinarea formei curentului din ecuațiile (5.42) și (5.46). Asimilând variația lungimii capătului liber cu variația curentului de sudare, asimilare posibilă datorită dependenței directe dintre curent și lungimea capătului liber se poate scrie:

$$Is^3 \cdot (R + \beta) - Is^2 \cdot (\alpha - \gamma \cdot l_t + U_0) - Is \cdot \frac{a \cdot \gamma}{b} + \frac{\gamma}{b} \cdot \left(v_{ae} - \frac{dIs}{dt} \right) \approx 0 \quad (5.86)$$

$$Is^3 \cdot (\beta - 0.05) + Is^2 \cdot (\alpha + \gamma \cdot l_t - 14) + Is \cdot \frac{\alpha \gamma}{b} - \gamma \cdot \left(v_{ae} - \frac{dIs}{dt} \right) \approx 0 \quad (5.87)$$

$$Is^3 \cdot (R + \beta) - Is^2 \cdot (\alpha - \gamma \cdot l_t + U_0) - Is \cdot \frac{a \cdot \gamma}{b} + \frac{\gamma}{b} \cdot \left(v_{ae} - \frac{d \left(I_m + I_0 \cdot \cos \frac{2\pi}{T} t \right)}{dt} \right) \approx 0 \quad (5.88)$$

$$Is^3 \cdot (\beta - 0.05) + Is^2 \cdot (\alpha + \gamma \cdot l_t - 14) + Is \cdot \frac{a \cdot \gamma}{b} - \gamma \cdot \left(v_{ae} - \frac{d \left(I_m + I_0 \cdot \cos \frac{2\pi}{T} t \right)}{dt} \right) \approx 0 \quad (5.89)$$

Utilizând MathCAD este posibilă reprezentarea acestor variații în timp, variații compuse din variația curentului de sudare datorată sistemului sursă RL – arc și variația curentului de sudare datorată oscilării capului de sudare transversal pe rostul de sudare.

În figura 5.18 sunt prezentate curbele de variație în timp a curentului de sudare pentru variații ale lungimii arcului de 0.1 mm, 0.2 mm, 0.3 mm și 0.4 mm.

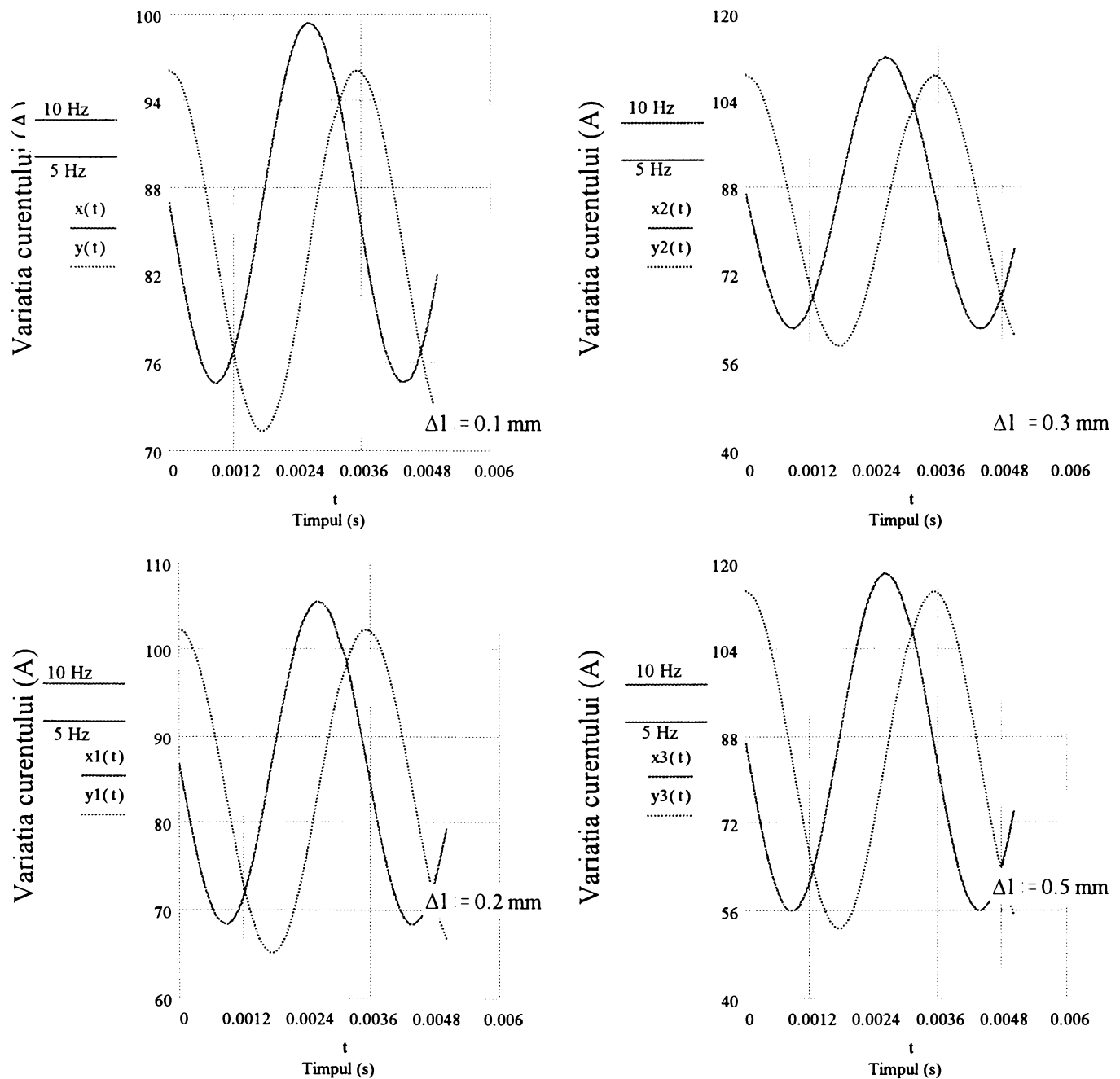


Fig. 5.18 Reacția dinamică a sursei de sudare la modificarea lungimii arcului cu 0.1 mm, 0.2 mm, 0.3 mm și 0.4 mm

Aceste relații vor sta la baza interpretării semnalului real al curentului de sudare, achiziționat în timpul funcționării senzorului-arc.

6

Procesarea semnalului achiziționat, compararea cu semnalul de referință și corectarea poziției capului de sudare

6.1 Analiza modală – considerații generale

Studiile experimentale efectuate asupra undelor au condus la dezvoltarea de teorii care au reușit, mai mult sau mai puțin, să facă lumină în acest domeniu cu largă răspândire în natură. Aceste studii au fost orientate, în principal, în două direcții:

- determinarea nivelului răspunsului unei unde în cadrul analizelor frecvențiale;
- verificarea modelelor teoretice și a predicțiilor evoluțiilor unei unde.

Cele două direcții amintite sunt corespondente din punct de vedere al analizelor implicate. Prima oferă informații asupra efectului produs de o undă, iar cea de-a doua oferă informații privind modul de evoluție al unei unde când este cunoscută sursa de excitație a acesteia. Aceste analize, cuprinzând nu numai procesul în sine dar și procesele auxiliare de achiziție și prelucrare a datelor din cadrul analizei sunt cunoscute în prezent sub numele de *analiză sau verificare modală* /15/. Un important aspect al aplicării acestei teorii constă în integrarea cu succes a trei componente:

- teoria undelor;
- măsurări cu precizii acceptabile a mărimilor undelor studiate;
- prelucrarea și analiza reală și detaliată a datelor achiziționate.

Efectuarea acestei integrări presupune o abordare multidisciplinară și extinsă a problemei. Existența unui semnal, specific unei unde, achiziționat în cadrul evoluției senzorului-arc, orientează analiza către ultimele două componente. Precizia măsurării și a înregistrării on-line a datelor undei de curent au fost asigurate de către sisteme performante de achiziție a datelor. Utilizarea unui sistem de eșantionare cu o frecvență de 600.000 de valori discretizate într-o secundă, au conferit curbei, reconstruite prin alăturarea valorilor înregistrate, o fidelitate mult mai mare decât era necesar. Din acest motiv, pentru a se asigura o viteză relativ mare procesului de prelucrare a semnalului achiziționat, s-a redus frecvența de eșantionare la numai 4000 de valori pe secundă. În acest fel o secvență de scanare a rostului, durând aproximativ 0,2 secunde, a putut fi reconstruită cu ajutorul a 800 de puncte discrete, ceea ce este mai mult decât mulțumitor. Importantă devine cea de-a treia componentă și anume prelucrarea și analiza detaliată a semnalului achiziționat. În continuare vor fi prezentate o serie de propuneri ale autorului privind prelucrarea semnalelor achiziționate ca și componentă a analizei modale a undei de curent create în urma funcționării senzorului-arc.

6.2 Procesarea digitală a semnalelor

Procesarea digitală a semnalelor este un concept relativ nou, ultimii zece ani însemnând coborârea acestuia din sferele cercetării de vârf în aplicații curente, de masă. Un impact major în evoluția științei și tehnicii a reprezentat introducerea acestui concept în ingineria electrotehnică și electronică la începutul anilor '90. Acțiunea în sine a declanșat o reacție în lanț de autodeterminare. Procesarea digitală [2], [8], [9], [71] a condus la dezvoltarea domeniilor respective, iar dezvoltarea domeniilor respective, și în special dezvoltarea micro-electronicii, a însemnat apariția de noi tehnici avansate de procesare a semnalelor. Tehnica a evoluat extrem de repede drept urmare a acestei dezvoltări, motiv pentru care, în prezent, conceptul este întâlnit în orice aplicație în care este necesară efectuarea unei achiziții de date.

După cum este bine cunoscut, procesarea digitală a unui semnal sau a unei înregistrări de date din cadrul unui proces are la bază manipularea numerică, în stare discretizată a semnalului sau a datelor respective. Utilizând operații simple, cum ar fi memorarea cu sau fără întârziere, adunarea, scăderea și înmulțirea cu anumite constante, este posibilă crearea unui spectru larg de funcții folositoare în procesul de prelucrare a semnalului.

Vorbind despre stare discretizată, este necesară prezentarea modurilor de existență a semnalului în mediul în care are loc procesarea digitală a acestuia. Un semnal este considerat a fi discret în timp dacă este definit numai pentru un set particular de valori instantanee în timp. Aceste valori sunt adesea numite *eșantioane instantanee*, deoarece acest concept este uneori mai accesibil imaginației utilizatorilor. Eșantioanele instantanee pot fi divizate în două clase:

- semnal-dată eșantionat
- semnal-dată digital.

Semnalul eșantionat configurează un domeniu continuu de valori ale amplitudinilor semnalului achiziționat, pe când semnalul digital constă în cuantificarea valorilor amplitudinilor semnalului achiziționat într-o serie finită de pași. Utilizatorii mai puțin avizați consideră că cele două tipuri de semnale configurează identic semnalul achiziționat. Realitatea este că abordând identic cele două tipuri de semnale, erorile rezultatului procesării pot fi uneori inacceptabil de mari.

În general, o prelucrare a unui semnal constă în filtrarea acestuia. La început, filtrarea era realizată analogic, utilizându-se echipamente electronice complexe. În prezent, filtrarea digitală a înlocuit toate procedeele analogice de prelucrare a semnalelor.

Filtrul digital este un sistem discret în timp care operează cu o secvență de intrare pentru a produce o secvență de ieșire conform unui algoritm de calcul prestabilit.

Filtrele digitale pot fi fizice, construite din componente electronice, sau fictive constând din software specializate care rulează pe un computer de proces. Este evidentă superioritatea celor fictive, care oferă trei mari avantaje comparativ cu filtrele fizice:

- flexibilitate – caracteristica unui filtru poate fi relativ simplu modificată prin modificarea subrutinelor de date care stau la baza funcționării filtrului digital fictiv;
- fiabilitate - este greu de precizat care este durata de viață a unui filtru digital fictiv; poate fi considerată până la un nou up-grade al versiunii originale sau până la scoaterea din funcțiune a computerului respectiv. În tot acest timp însă, sunt evitate funcționarea defectuoasă a filtrului, necesitatea înlocuirii anumitor componente, funcționarea în afara toleranțelor prescrise, utilizarea de componente fizice cu gabarit și greutate relativ mari, etc.
- modularitate – utilizarea unui software compus dintr-o serie de rutine interschimbabile și ușor de adaptat la noi condiții de lucru este mult mai facilă decât utilizarea unui sistem fizic, chiar și modular care este relativ dificil de modificat ca și configurație.

Deși introduse în industrie abia în ultimii 10 ani în urma dezvoltării explozive a tehnicii de calcul, filtrele digitale au o istorie destul de lungă, originile teoretice fiind situate în preajma anului 1600. Inceputul a fost făcut de matematicienii care erau preocupați de construirea unor modele pentru fenomenele naturale care evoluau sub formă de unde. În prezent, analiza unei amprente vocale, scanarea, prelucrarea și analiza unei imagini reprezintă acțiuni comune. Uneltele electronice și software existente la îndemâna utilizatorului îi permit acestuia prelucrarea facilă și rapidă a oricărui șir de valori discrete [16].

În cazul unei achiziții a curentului de sudare, utilizatorul operează cu un semnal eșantionat, reprezentând variația în timp a mărimii *curent de sudare*.

Procesarea unui semnal eșantionat constă în acceptarea unui set de eșantioane $I_{\text{real}} [n_{\text{vd}}]$, unde I_{real} reprezintă tipul semnalului achiziționat, iar $[n_{\text{vd}}]$ reprezintă numărul de variabile discrete introduse în sistemul de procesare numerică.

Rezultatul procesării este tot un șir de variabile discrete $I_{\text{procesat}} [n_{\text{vd}}]$. În figura 6.1 este prezentat schematic sistemul de procesare digitală a unui semnal eșantionat.

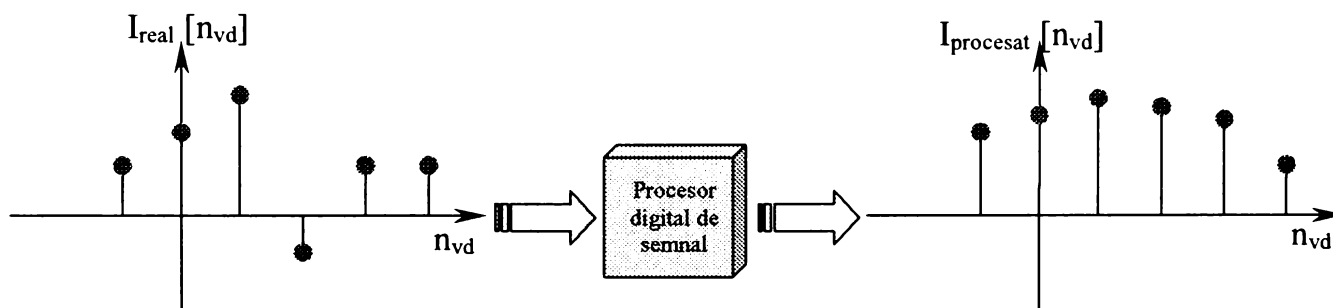


Fig. 6.1 Sistemul de procesare digitală (SPD)

Intrarea $I_{\text{real}} [n_{\text{vd}}]$ conținând valorile $I_{\text{real}} [-1]$, $I_{\text{real}} [0]$, $I_{\text{real}} [1]$, ..., $I_{\text{real}} [n_{\text{vd}}]$ poate fi privită ca un șir de valori ale unui semnal analogic introduse în sistemul SPD regulat, cu un tact dat de frecvența sistemului de eșantionare. Variabila întreagă n_{vd} precizează numărul de valori discrete introduse regulat în SPD, iar $n_{\text{vd}} = 0$ corespunde unui moment origine / referință considerat convențional.

Trebuie precizat că atât $I_{\text{real}} [n_{\text{vd}}]$ cât și $I_{\text{procesat}} [n_{\text{vd}}]$ nu sunt neapărat funcții de timp. În cazul curentului de sudare, cele două șiruri de valori sunt funcții de timp.

Componenta hardware a unui sistem de procesare digitală a fost prezentată în capitolul 1 al lucrării. În continuare va fi prezentată componenta software a acestui sistem.

Trebuie spus pentru început că sistemele de procesare digitală actuale utilizate în sistemele de urmărire a rostului bazate pe senzori-arc funcționează după un software care calculează numai o simplă integrală a semnalului. Acest fapt introduce adesea erori în procesul de urmărire a rostului, iar compararea cu semnalul de referință presupune un software specializat care să poată recunoaște elementele de bază ale semnalului achiziționat.

Din acest motiv se va propune un nou mod de abordare a procesării semnalului achiziționat. Metoda propusă constă în aplicarea a trei nivele de procesare în locul unuia singur cum există în prezent. Simplitatea și viteza aplicării fiecărui nivel propus conduc la păstrarea caracterului de prelucrare în timp real. Performanțele fizice ale sistemului se mențin, crescând în schimb performanțele rezultatului obținut. În plus, etajul de comparare va avea componentele hardware și software mult simplificat.

6.3 Nivel 1: Media variabilă

Metoda mediei variabile /28/ este o tehnică des utilizată în sistemele moderne de procesare digitală. Este o tehnică de prelucrare grobă care pregătește terenul pentru următoarele nivele de procesare din componența software al sistemului SPD. Prin această metodă, fiecare valoare discretă a semnalului de ieșire $I_{\text{procesat}}[n_{\text{vd}}]$ este obținută prin calcularea unei medii a valorilor unui anumit număr de valori discrete ale semnalului de intrare /43/, /57/, /76/.

Presupunând existența unui semnal continuu în timp, introdus în stare eșantionată în sistem și anume semnalul achiziționat în timpul oscilării capului de sudare transversal pe rost, semnalul medie variabilă, $I_{\text{mv}}[n_{\text{vd}}]$ arată ca în figura 6.2.

Analizându-se cu atenție acest semnal, se poate observa că el descrie tocmai curentul de sudare mediu. Practic rezultatul este asemănător integrării semnalului. Diferența constă în faptul că media variabilă este mult mai simplu de efectuat. Chiar dacă semnalul prelucrat nu este la fel de calitativ, el oferă, totuși, informații importante asupra formei generale a evoluției curentului de sudare.

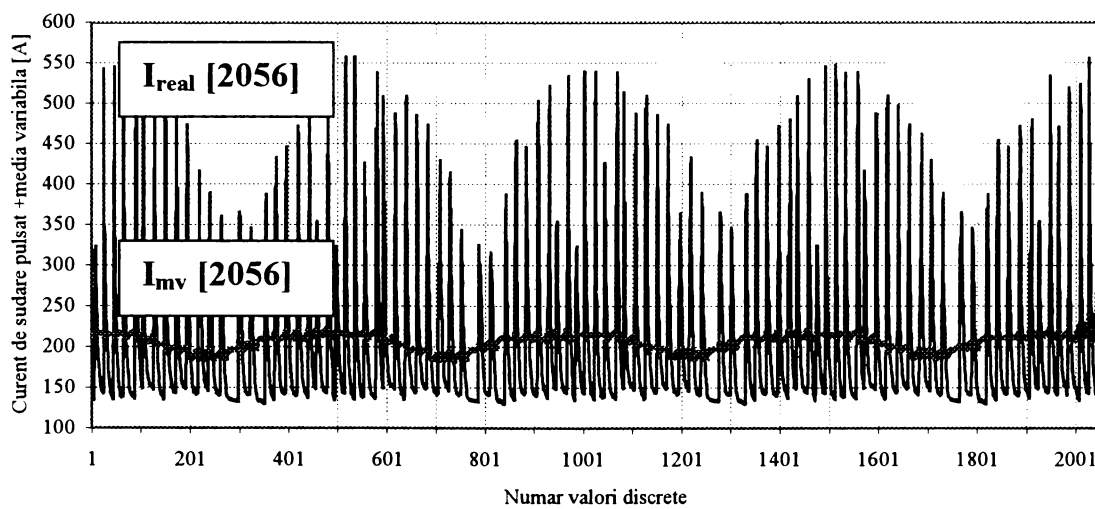


Fig. 6.2 Media variabilă pentru un curent de sudare pulsant de 200 A /102/

Modelul matematic care stă la baza calculării mediei variabile este dat de sistemul de ecuații (6.1).

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{mv1}[n_{vdm}] = \frac{1}{n_{vdm}} \cdot \{I_{real}[n_{vdm}] + I_{real}[n_{vdm} - 1] + I_{real}[n_{vdm} - 2] + I_{real}[n_{vdm} - 1] + \dots + I_{real}[1]\} \\ I_{mv2}[n_{vdm}] = \frac{1}{n_{vdm}} \cdot \{I_{real}[n_{vdm} + 1] + I_{real}[n_{vdm}] + I_{real}[n_{vdm} - 1] + I_{real}[n_{vdm} - 2] + \dots + I_{real}[2]\} \\ \dots \\ I_{mvn_{vd}}[n_{vdm}] = \frac{1}{n_{vdm}} \cdot \{I_{real}[n_{vd}] + I_{real}[n_{vd} - 1] + I_{real}[n_{vd} - 2] + I_{real}[n_{vd} - 3] + \dots + I_{real}[n_{vd} - n_{vdm} + 1]\} \end{array} \right. \quad (6.1)$$

unde:

- I_{mvi} – media variabilă i compusă din n_{vdm} valori discrete
- n_{vdm} – numărul de valori discrete participante la calcularea mediei variabile
- n_{vd} – numărul total de variabile discrete care compun semnalul real I_{real} .

Intuitiv, procesarea constă în calcularea unei medii pentru primele n_{vdm} valori discrete. După obținerea rezultatului operatorul se mută cu o valoare discretă, începând calcularea unei noi medii considerând drept primă valoare introdusă în calcul a doua valoare discretă a semnalului și așa mai departe conform figurii 6.3.

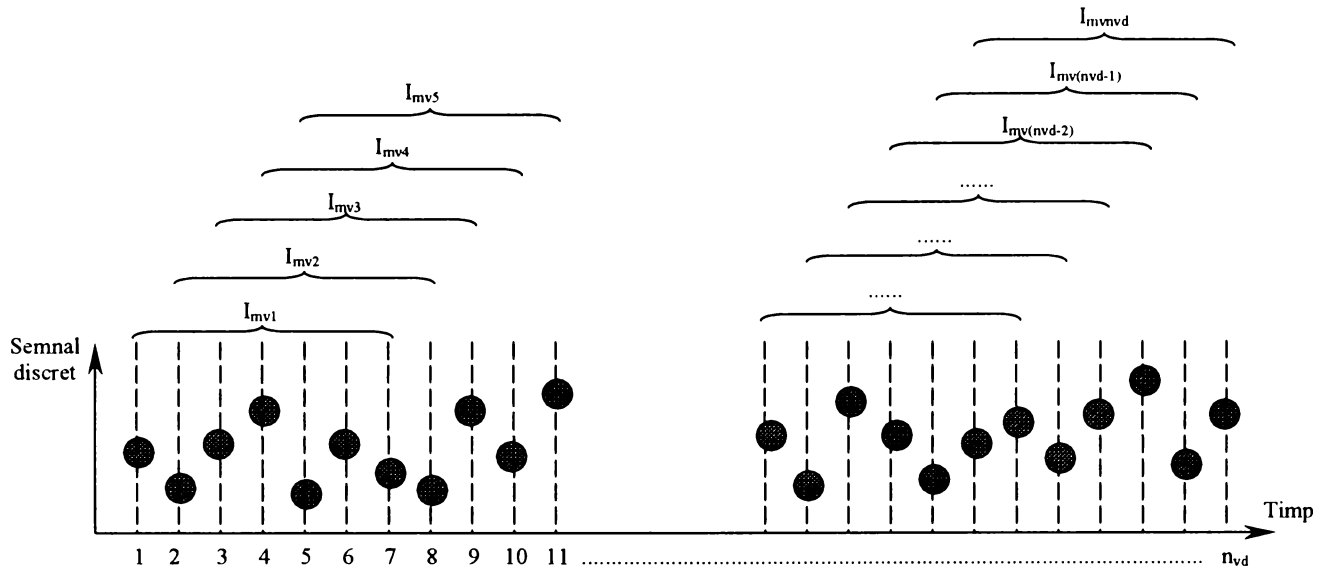


Fig. 6.3 Modul de calcul al mediei variabile

În calcularea mediei variabile trebuie considerat un număr de valori discrete astfel ales încât să redea cu fidelitate semnalul mediu real, dar să nu mărească timpul necesar derulării procesului de prelucrare a semnalului. Un număr redus de valori discrete participante la calcularea mediei înseamnă o viteză de procesare mai mare, dar o reprezentare nu tocmai fidelă a semnalului real. Utilizarea unui număr mare de valori discrete conduce la îmbunătățirea calității semnalului procesat, dar acesta este obținut mult mai lent.

Pentru o imagine mai clară a situației s-a aplicat această metodă semnalului achiziționat considerându-se succesiv 3 numere de valori discrete utilizate: 50, 100, 150. Numărul total de valori discrete introduse (lungimea secvenței de semnal de intrare) este egal cu 2056. Acesta reprezintă exact numărul de valori prelevate de sistemul de eșantionare pe o durată egală cu 1 secundă, frecvența de oscilare a capului de sudare fiind de 4 Hz. În figura 6.4 sunt prezentate rezultatele experimentului.

Deși este mai lentă decât primele două variante, utilizarea a 150 de valori discrete la calcularea mediei variabile oferă un semnal de calitate și este, deci, de preferat în procesul de prelucrare a semnalului achiziționat.

Alegerea numărului de 150 de valori discrete participante la calcularea mediei a fost stabilit și datorită faptului ca modul de existență a curentului de sudare este pulsat. În figura 6.5 este prezentat un puls de curent și valorile înregistrate de sistemul de eșantionare. Pulsul este reconstruit din unirea celor 31 de valori discrete. Dacă s-ar fi acceptat un număr mai mare de valori discrete participante la medie, valoarea medie a curentului unui puls, valoare dată de relația (6.2), ar fi diferită de valoarea calculată a mediei. Eroarea, conform literaturii de specialitate, poate ajunge și la 120% /28/.

$$I_m = \frac{I_p \cdot t_p + I_b \cdot t_b}{t_p + t_b} \tag{6.2}$$

unde:

- I_p, I_b – curenții de puls și de bază [A]
- t_p, t_b - timpii de puls și de bază [s]

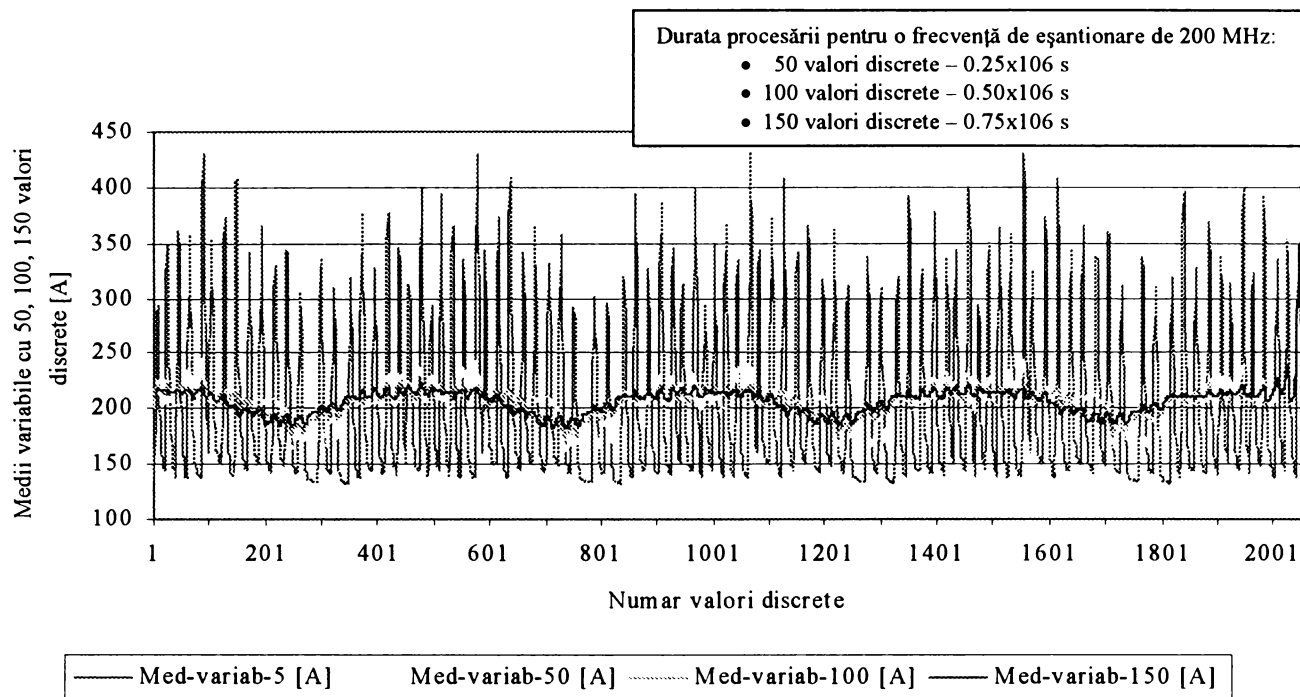


Fig. 6.4 Mediile variabile pentru 3 numere ale valorilor discrete participante la calcularea mediei variabile

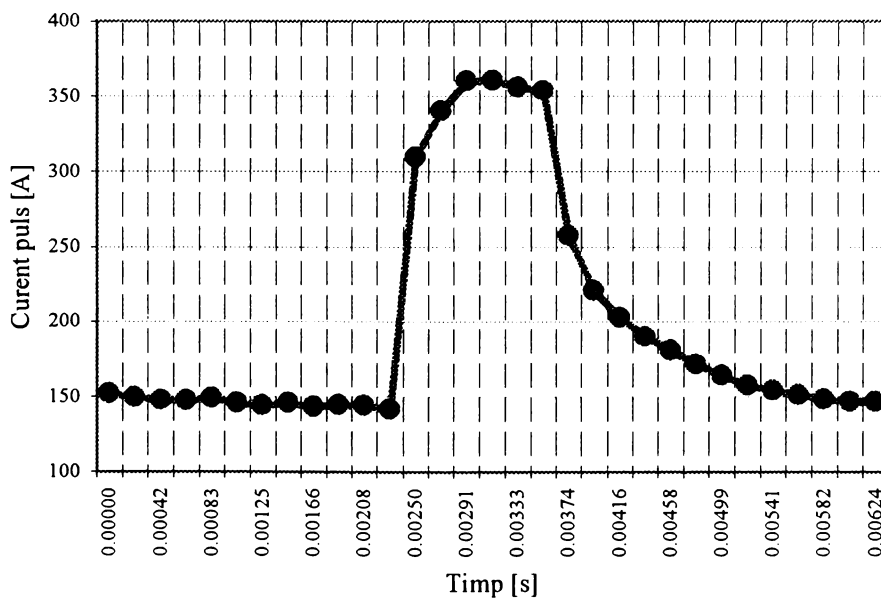


Fig. 6.5 Forma și dimensiunile pulsului de curent utilizat în cadrul experimentărilor

Reconstruirea pulsului cu ajutorul a 31 de puncte este relativ fidelă. Oricum, nu pulsul în sine contează în analiză ci redarea fidelă a valorii medii a acestuia.

Considerând că pentru rata de eșantionare existentă se utilizează un număr de 150 de valori discrete pentru calcularea mediei variabile, ecuațiile (6.1) devin:

$$\begin{cases}
 I_{mv1}[150] = \frac{1}{150} \cdot \{I_{real}[150] + I_{real}[149] + I_{real}[148] + \dots + I_{real}[2] + I_{real}[1]\} \\
 I_{mv2}[150] = \frac{1}{150} \cdot \{I_{real}[151] + I_{real}[150] + I_{real}[149] + \dots + I_{real}[3] + I_{real}[2]\} \\
 \dots \\
 I_{mvm2056}[150] = \frac{1}{150} \cdot \{I_{real}[2056] + I_{real}[2055] + I_{real}[2054] + \dots + I_{real}[1918] + I_{real}[1917]\}
 \end{cases}
 \tag{6.3}$$

sau:

$$I_{mvi} [150] = \sum_{k=0}^{149} I_{real} [150 - k], i = \overline{1, 2056} \quad (6.4).$$

Ecuția (6.4) este o formă recurențială utilizată la fiecare nouă valoare a I_{real} pentru a determina o nouă valoare a I_{mv} . De asemenea, este o formulă nerecursivă deoarece fiecare valoare a semnalului de ieșire I_{mv} este calculată singular din valorile de intrare.

Această ecuație poate fi considerată un filtru digital simplu. Simplu, dar totodată relativ ineficient. Semnalul nu este prelucrat corespunzător deoarece orice valoare a I_{mv} este foarte apropiată de cea anterioară. Eficiența acestui filtru digital poate fi îmbunătățită prin modificarea formulei de recurență.

Privind per ansamblu, ecuația (6.4) prognozează că următoarea valoare a I_{mv} va fi:

$$I_{mvi} [150] = \sum_{k=1}^{150} I_{real} [150 - k] \quad (6.5).$$

Se poate în acest caz scrie o relație de recurență între cele două valori consecutive ale mediei:

$$I_{mv(i+1)} [n_{vdm}] = I_{mvi} [n_{vdm}] + \frac{1}{150} \cdot \{I_{real} [i+1] - I_{real} [i-149]\} \quad (6.6).$$

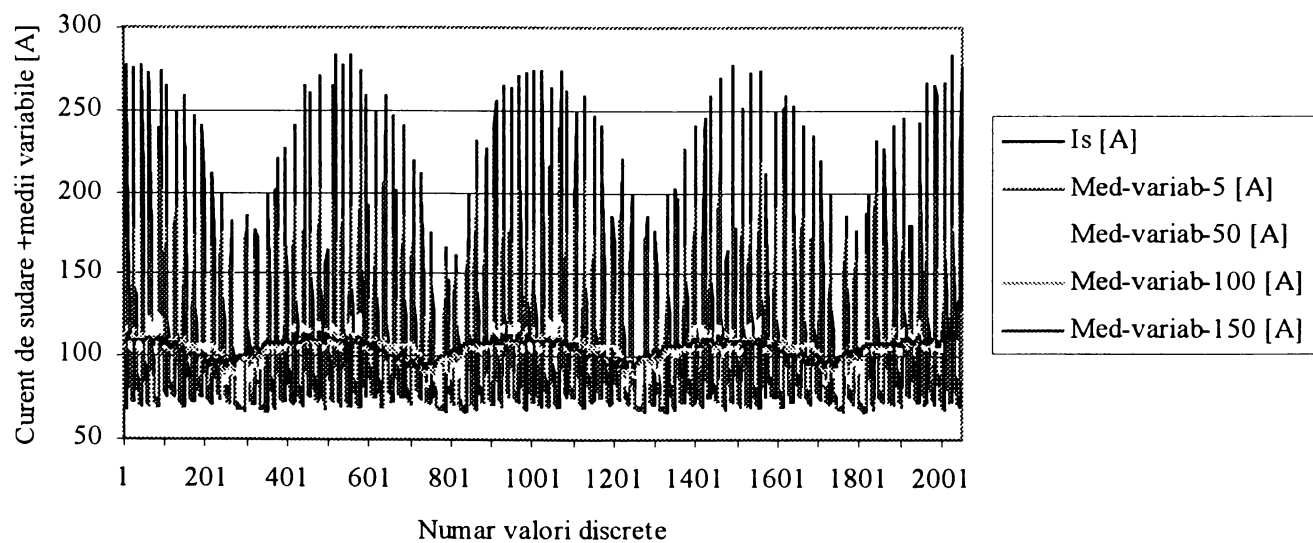
Ecuția (6.6) confirmă faptul că fiecare semnal discret de ieșire poate fi estimat prin actualizarea ieșirii anterioare. Această variantă a modelului de procesare definește un filtru recursiv, filtru care este mult mai eficient decât cel anterior.

Creând această formulă într-o foaie de calcul Excel se poate compune un program pentru calcularea mediei variabile. Cu fiecare nouă valoare a I_{real} programul va calcula noua valoare a mediei variabile, I_{mv} .

În figura 6.6 sunt prezentate prelucrările, prin metoda mediei variabile, ale unor curenți înregistrați în timpul oscilării capului de sudare.

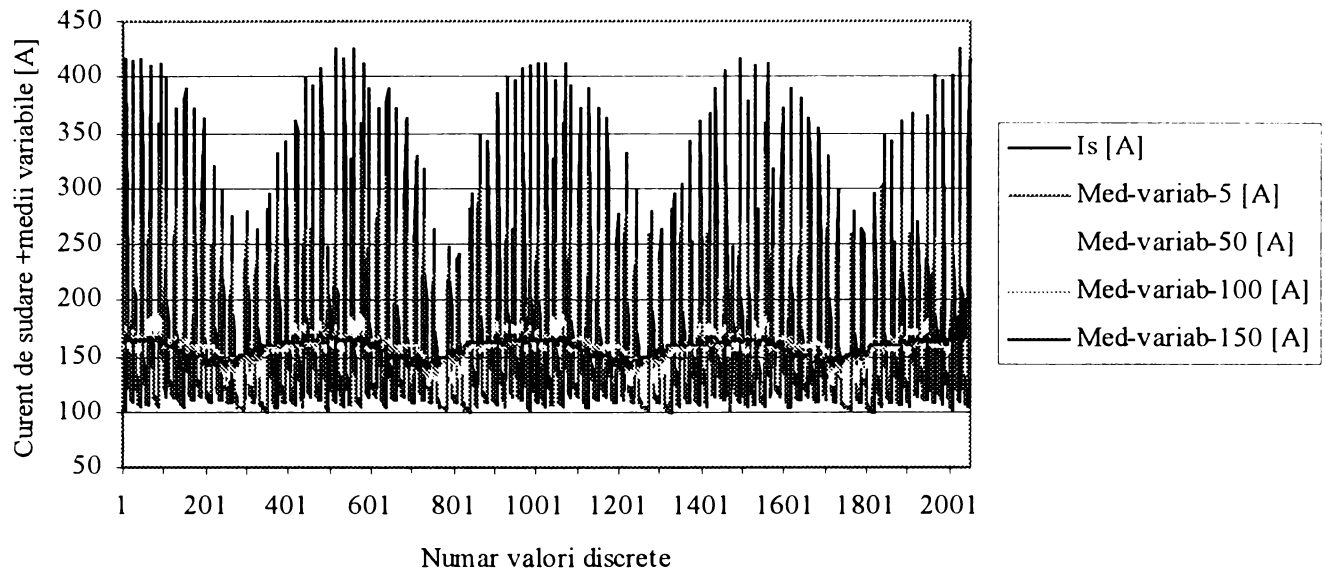
2 x Cloos 503	sudare tandem	lung. cap. liber: 22 mm
Romat 310	G3Si1, SR EN 440, φ 1.2 mm	cc- pulsat
HKS QAS-400	M21, SR EN 439, 18 l/min	Is = 100 ... 400 A

Metoda mediei variabile pentru Is = 100 A



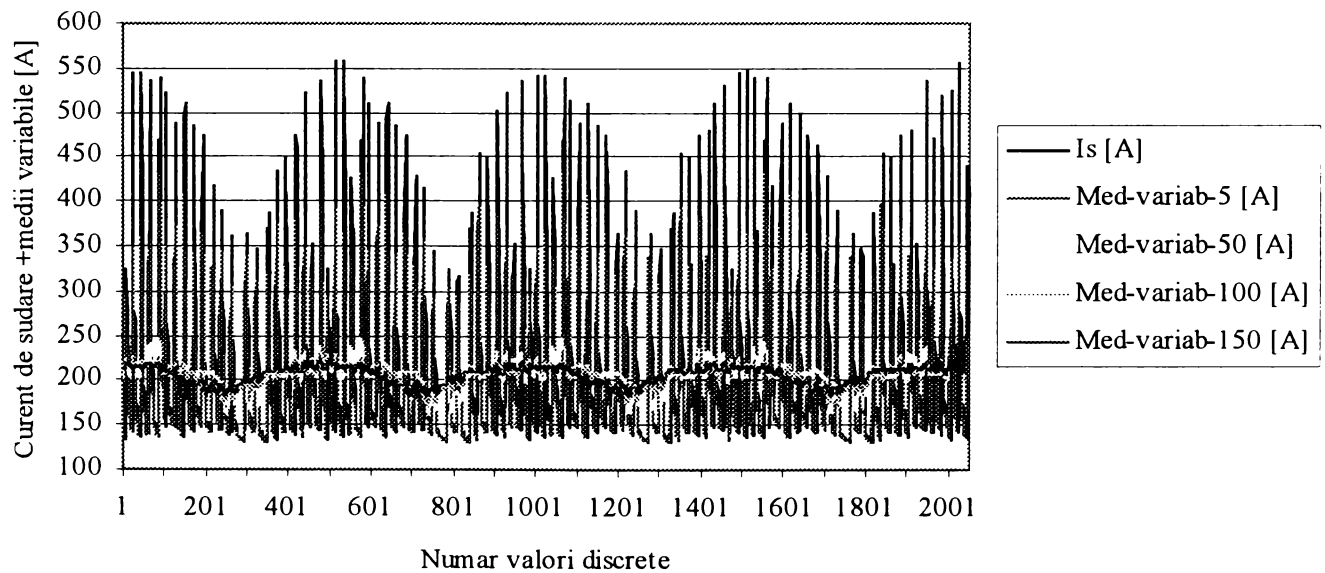
a.

Metoda mediei variabile $I_s = 150$ A



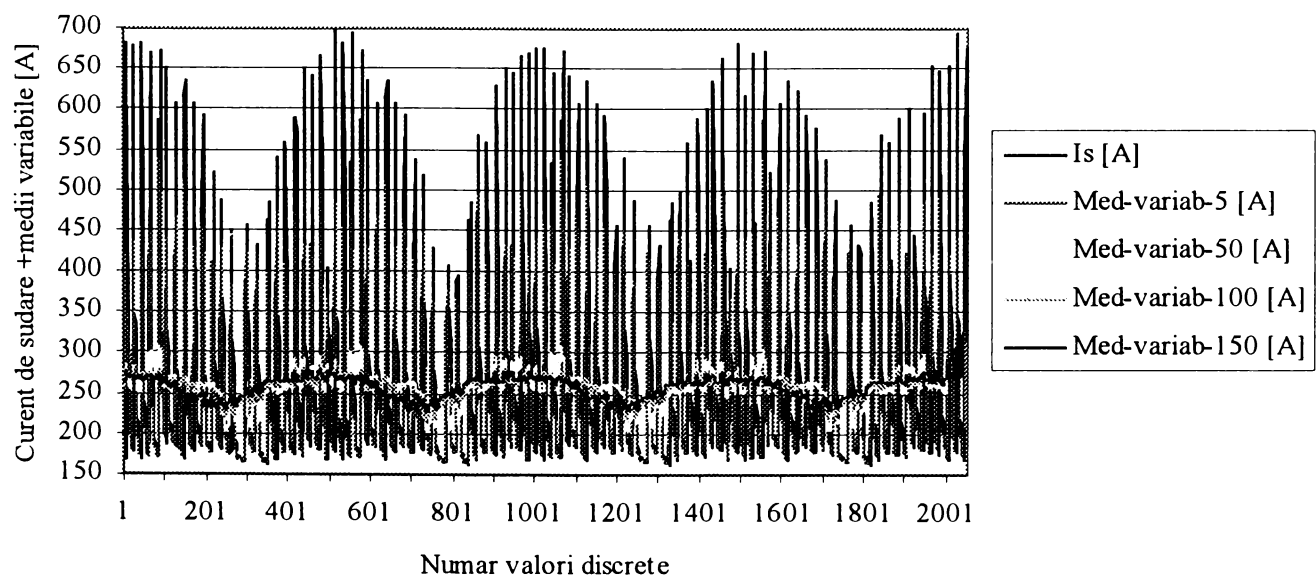
b.

Metoda mediei variabile $I_s = 200$ A



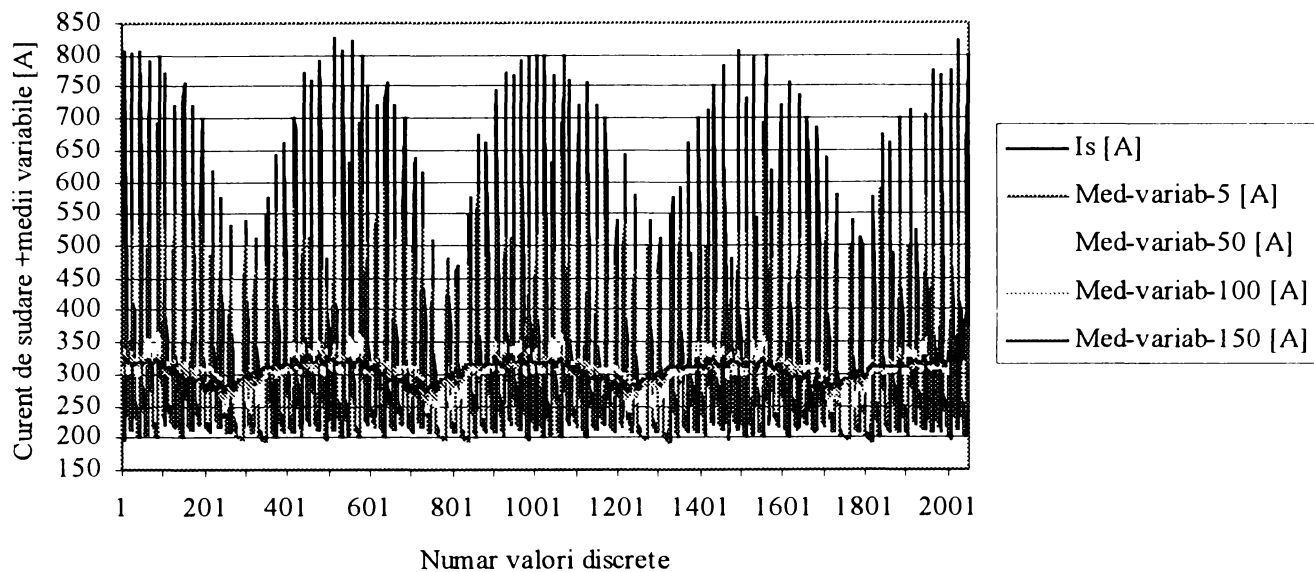
c.

Metoda mediei variabile $I_s = 250$ A



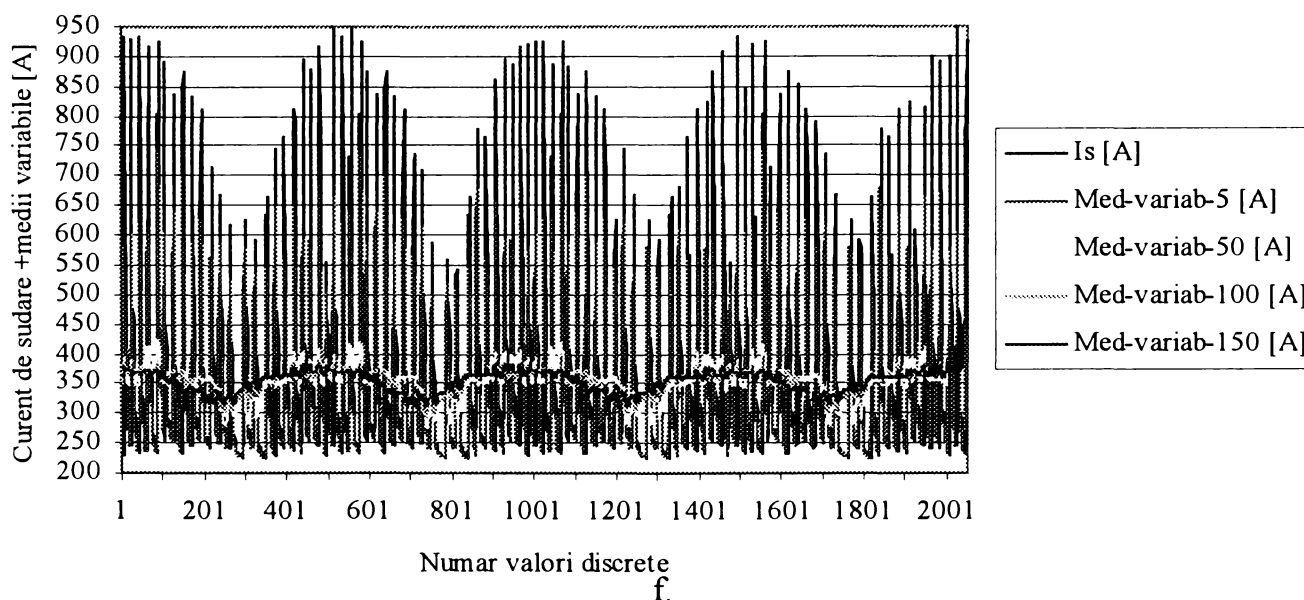
d.

Metoda mediei variabile $I_s = 300$ A



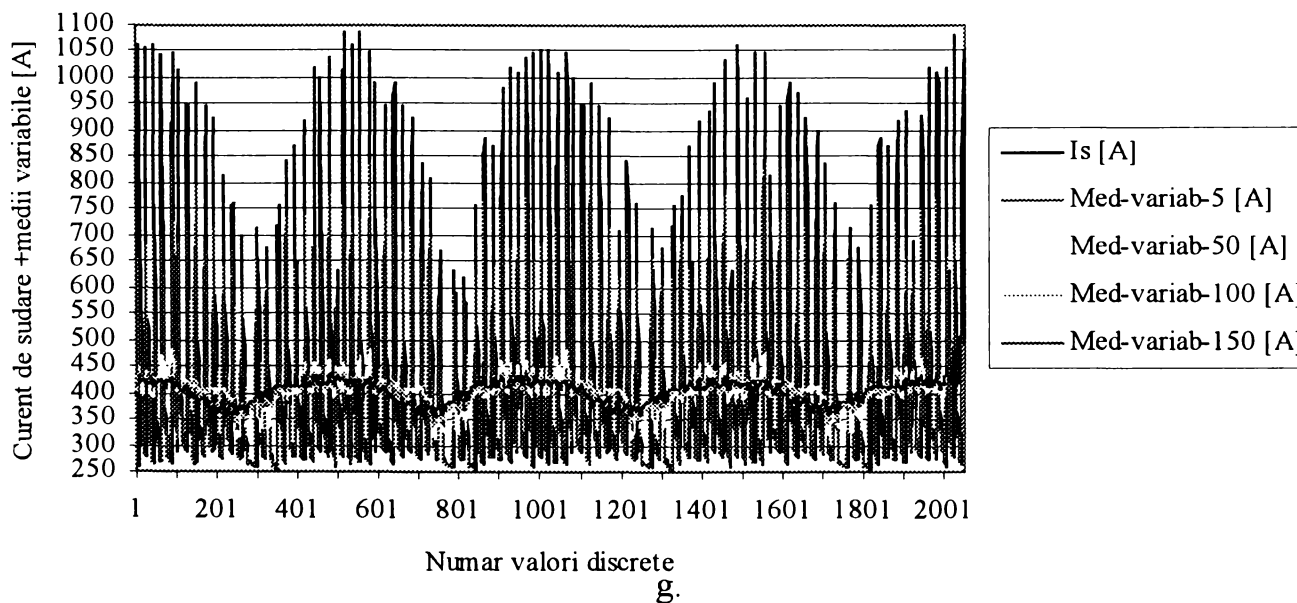
e.

Metoda mediei variabile $I_s = 350$ A



f.

Metoda mediei variabile $I_s = 400$ A



g.

Fig. 6.6 Aplicarea metodei mediei variabile de prelucrarea a semnalelor achiziționate

Se observă că datorită variației mari a curentului de sudare în timpul pulsului și bazei, metoda devine eficientă abia la un număr minim de peste 100 de valori discrete utilizate în calcularea mediei. Trebuie însă reținut faptul că un număr prea mare de valori discrete utilizate la calculul mediei conduce la erori în reprezentarea curentului mediu real.

Astfel, pentru o bună combinație a efectelor pozitive și negative ale utilizării unui anumit număr de valori discrete în calcularea mediei, se propune calcularea mediei pentru un număr de 150 de valori discrete.

În figura 6.7 sunt prezentate mediile variabile ale semnalelor prelucrate anterior pentru un număr de 150 de valori discrete utilizate la calcularea mediei.

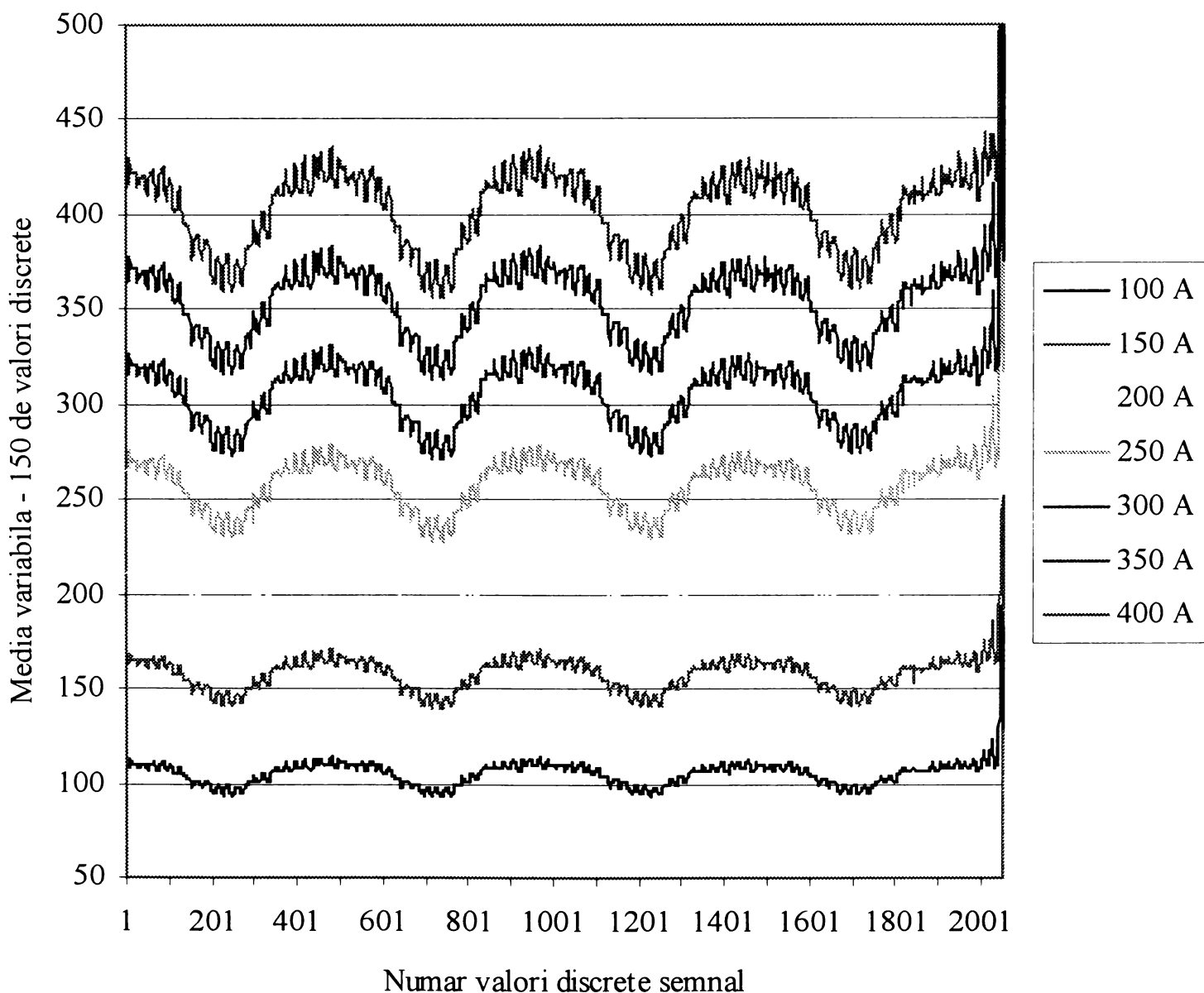


Fig. 6.7 Metoda mediilor variabile pentru 150 de valori discrete

Se poate observa în figura 6.7 că aplicarea metodei mediilor variabile a condus la transformarea semnalului pulsant într-un semnal care redă cu o claritate superioară semnalul mediu achiziționat, putându-se spune că această metodă de prelucrare a pregătit semnalul pentru următoarele nivele de prelucrare.

Concluzia care rezultă din studierea formei finale a semnalului este faptul că în cazul aplicării acestei metode înaintea integrării pentru determinarea semnalului mediu, aplicarea ulterioară a integralei se va face cu o mai mare ușurință și mult mai rapid, iar integrala va oferi un semnal curat, care va introduce erori minime în procesul de comparare.

6.4 Nivel 2: Prelucrarea Haar și Fourier a semnalului

6.4.1 Prelucrarea Haar a semnalului

Prima fază a acestui nivel de prelucrare propus constă în „curățarea“ semnalului-subiect de semnalele parazite și găsirea unei metode de reducere a volumului transmisiei de date astfel încât procesarea semnalelor achiziționate să se facă în timp real. Cea mai simplă metodă de curățare, metodă care asigură și o bună compactare a semnalului, este transformata HAAR.

O undă Haar este cel mai simplu tip de undă /43/, /76/. Discretizată, o undă de tip Haar este modelată de așa-numita transformată Haar. La rândul ei, transformata Haar servește drept bază de modelare și pentru alte tipuri de unde.

Pentru a putea aplica tehnica Haar de prelucrare a unui semnal, este necesar ca semnalul respectiv să fie un semnal discret. În cazul curentului de sudare achiziționat, acesta este un semnal discret prin însăși eșantionarea efectuată de sistemul de achiziție. Se va putea, deci, nota semnalul curent de sudare printr-o funcție discretă:

$$I_{mv} = (I_1, I_2, \dots, I_{n_{vd}}) \quad (6.7)$$

unde n_{vd} este un număr întreg, pozitiv, reprezentând numărul eșantioanelor care compun funcția I_{mv} . Valorile $(I_1, I_2, \dots, I_{n_{vd}})$ sunt determinate din semnalul analogic I_{real} la momentele:

$$t = (t_1, t_2, \dots, t_{n_{vd}}). \quad (6.8)$$

În acest caz, se poate scrie că valorile $I_{mvi}, i = \overline{1, n_{vd}}$, sunt:

$$I_{mvi} = I_{real}(t_i) \quad (6.9)$$

Datorită faptului că sistemul de achiziție efectuează înregistrări la perioade de timp egale, atunci este adevărat că:

$$t = t_1 = t_2 = \dots = t_{n_{vd}} \quad (6.10)$$

Pentru o mai simplă operare, se va împărți semnalul discret achiziționat în două subsemnale egale ca lungime: un subsemnal care reprezintă *media de curgere a semnalului original* sau *tendința de curgere a semnalului original* și un alt subsemnal reprezentând *fluctuația sau abaterea de la tendința de curgere a semnalului original*.

Subsemnalul tendință de curgere, care va fi acceptat sub forma:

$$a^1 = \left(a_1, a_2, \dots, a_{\frac{n_{vd}}{2}} \right) \quad (6.11)$$

va fi calculat prin determinarea unor valori medii, după cum urmează:

$$\left\{ \begin{array}{l} a_1 = \frac{I_1 + I_2}{\sqrt{2}} \end{array} \right. \quad (6.12)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} a_2 = \frac{I_3 + I_4}{\sqrt{2}} \end{array} \right. \quad (6.13)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \dots \\ a_m = \frac{I_{2m-1} + I_{2m}}{\sqrt{2}}, m = \overline{1, \frac{n_{vd}}{2}} \end{array} \right. \quad (6.14)$$

Împărțirea cu $\sqrt{2}$ reprezintă, de fapt, înmulțirea cu $\frac{1}{\sqrt{2}}$ a mediei aritmetice:

$$a_m = \frac{I_{2m-1} + I_{2m}}{2}, m = \overline{1, \frac{n_{vd}}{2}} \quad (6.15)$$

Scopul acestei modificări a mediei este de a conserva energia semnalului care a fost împărțit în două subsemnale având lungimi mult mai scurte.

Subsemnalul abatere de la tendința de curgere a semnalului original, se va nota cu:

$$d^1 = \left(d_1, d_2, \dots, d_{\frac{n_{vd}}{2}} \right) \quad (6.16)$$

Calcularea abaterii se face după cum urmează:

$$d_1 = \frac{I_1 - I_2}{\sqrt{2}} \quad (6.17)$$

$$d_2 = \frac{I_3 - I_4}{\sqrt{2}} \quad (6.18)$$

$$\dots\dots\dots$$

$$d_m = \frac{I_{2m-1} - I_{2m}}{\sqrt{2}}, m = 1, \overline{\frac{n_{vd}}{2}} \quad (6.19)$$

Având definite cele două subsemnale, este posibilă calcularea transformatei de nivel I Haar. Nivelul I al transformatei Haar constă în determinarea corelației H_1 , conform:

$$I_{mvH} \xrightarrow{H_1} (a^1 | d^1) \quad (6.20)$$

Maparea funcției I_{mvH} în baza corelației H_1 are și o inversă. Maparea inversă transformă la loc semnalul $(a^1 | d^1)$ în I_{mv} conform:

$$I_{mv} = \left(\frac{a_1 + d_1}{\sqrt{2}}, \frac{a_1 - d_1}{\sqrt{2}}, \frac{a_2 + d_2}{\sqrt{2}}, \frac{a_2 - d_2}{\sqrt{2}}, \dots, \frac{a_{\frac{n_{vd}}{2}} + d_{\frac{n_{vd}}{2}}}{\sqrt{2}}, \frac{a_{\frac{n_{vd}}{2}} - d_{\frac{n_{vd}}{2}}}{\sqrt{2}} \right) \quad (6.21)$$

Cu alte cuvinte, se poate scrie:

$$I_1 = \frac{a_1 + d_1}{\sqrt{2}},$$

$$I_2 = \frac{a_1 - d_1}{\sqrt{2}},$$

$$I_3 = \frac{a_2 + d_2}{\sqrt{2}},$$

$$I_4 = \frac{a_2 - d_2}{\sqrt{2}},$$

$$\dots\dots\dots$$

$$I_{n_{vd}} = \frac{a_{\frac{n_{vd}}{2}} + d_{\frac{n_{vd}}{2}}}{\sqrt{2}}, \frac{a_{\frac{n_{vd}}{2}} - d_{\frac{n_{vd}}{2}}}{\sqrt{2}} \quad (6.22)$$

Este evident că amplitudinile valorilor subsemnalului abatere sunt sensibil mai mici decât cele ale semnalului original. În general are loc aproximarea:

$$d_m = \frac{I_{mv}(t_{2m-1}) - I_{mv}(t_{2m})}{\sqrt{2}} \approx 0 \quad (6.23)$$

Trasând graficul de variație al funcției I_{mvH} se observă că acesta seamănă cu cel original cu diferența că se derulează în întregime pe numai jumătate din timp, iar pe verticală, amplitudinea este mai mare de $\sqrt{2}$ ori, conform figurii 6.8 a și b.

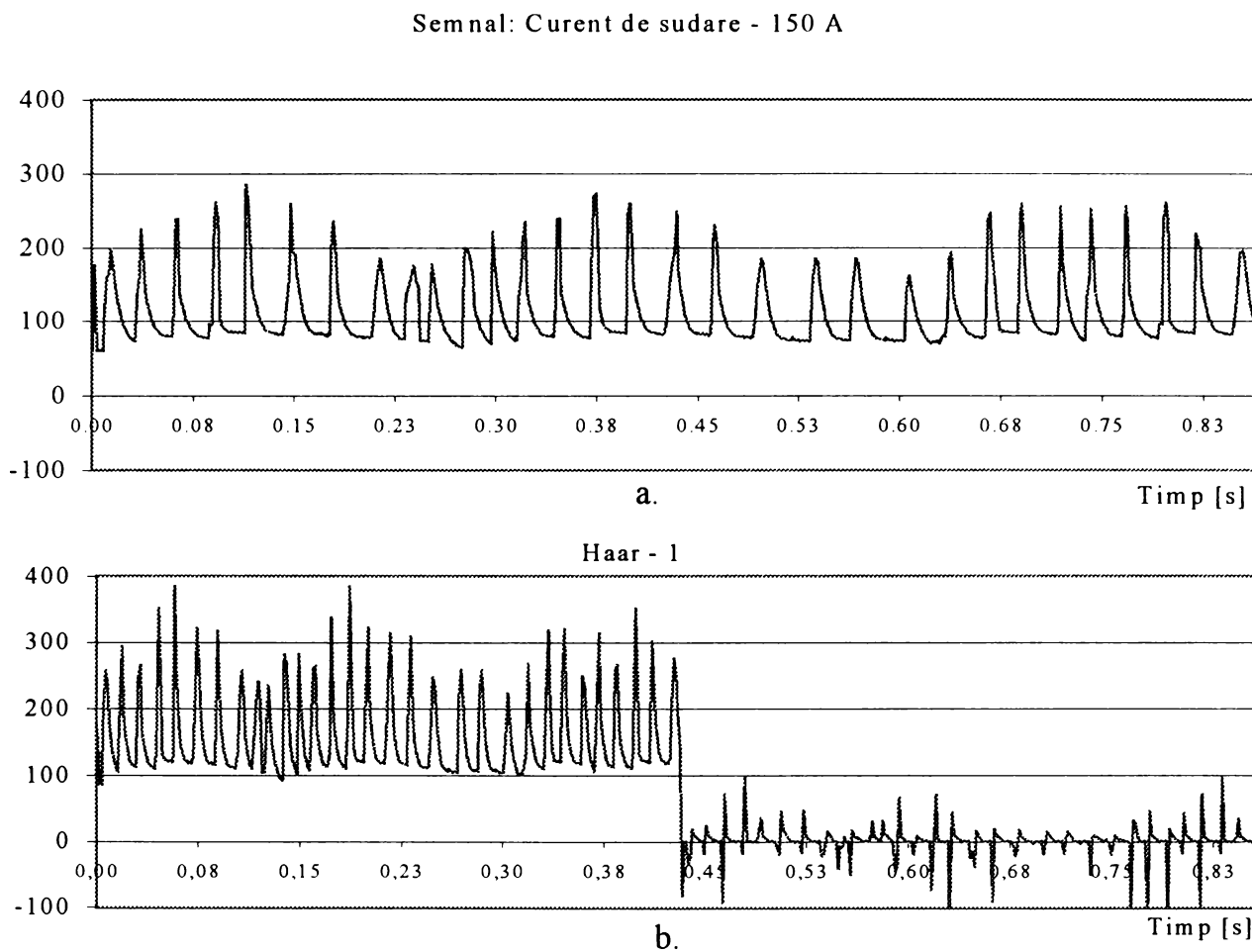


Fig. 6.8 Reducerea lungimii și creșterea amplitudinilor semnalului transformat Haar (a - semnalul original, b - semnalul transformat Haar nivel I)

Datorită faptului că lungimea subsemnalului tendință este egală cu 50% din lungimea semnalului original rezultă că transmiterea acestuia se face cu un număr de biți egal cu jumătate din numărul de biți care ar fi necesari pentru transmiterea semnalului original.

Semnalul obținut este curățat de micile “zgomote” inerente unui proces tehnic, variații care, în general, perturbază procesul de prelucrare a semnalului achiziționat. Metoda Haar de prelucrare a semnalului se aplică de atâtea ori cât se consideră a fi necesar pentru procesul de prelucrare ulterioară. Nivelele superioare constau în aplicarea metodei pentru semnalul tendință obținut în nivelul anterior.

Astfel, se poate deduce că formele superioare ale transformatei Haar sunt:

- Nivelul II: $I_{mvH} \xrightarrow{H_2} (a^2 |d^2| d^1)$ (6.24)

- Nivelul III: $I_{mvH} \xrightarrow{H_3} (a^3 |d^3| d^2|d^1)$ (6.25)

- Nivelul K: $I_{mvH} \xrightarrow{H_K} (a^K |d^K| d^{K-1}|d^{K-2} \dots |d^2|d^1)$ (6.26)

La aplicarea fiecărui nivel Haar, lungimea semnalului tendință se înjumătățește față de nivelul anterior, iar amplitudinile sale cresc de $\sqrt{2}$ ori.

În continuare sunt prezentate transformările Haar de nivel I și II pentru înregistrări ale semnalelor achiziționate în timpul funcționării senzorului-arc, curenții de sudare medii fiind: 150 A, 200 A, 250 A, 300 A, 350 A și 400 A.

A Prelucrarea Haar

Extrăgând câte o porțiune din semnalele achiziționate în azul sudării cu intensități ale curentului de sudare de 150 A, 200 A, 250 A, 300 A, 350 A și 400 A, s-au aplicat primele două nivele ale metodei Haar de curățare.

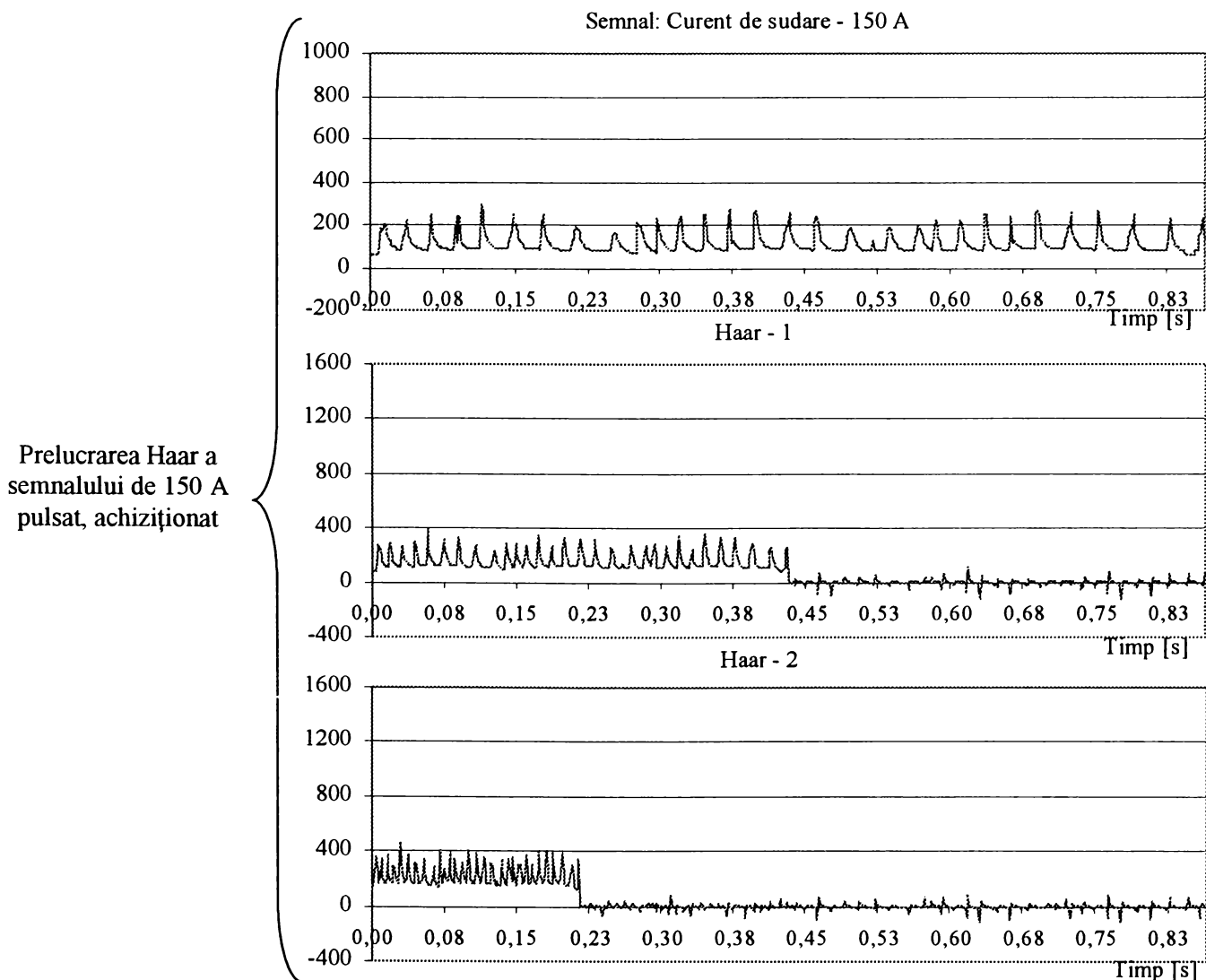
Eșantioanele prelucrate au avut lungimea $N=575$, reprezentând o secvență de înregistrare cu durata de 0.875 s. Parametrii procedurii de sudare:

- Material de adaos: G3Si1, conform SR EN 440. Diametrele sârmelor de sudare: 1.2 mm.
- Lungimile capetelor libere ale sârmelor au fost cuprinse în intervalul 16-18 mm.
- Gazul de protecție utilizat a fost M21 conform SR EN 439. Debitul gazului de protecție: 15-16 l/min

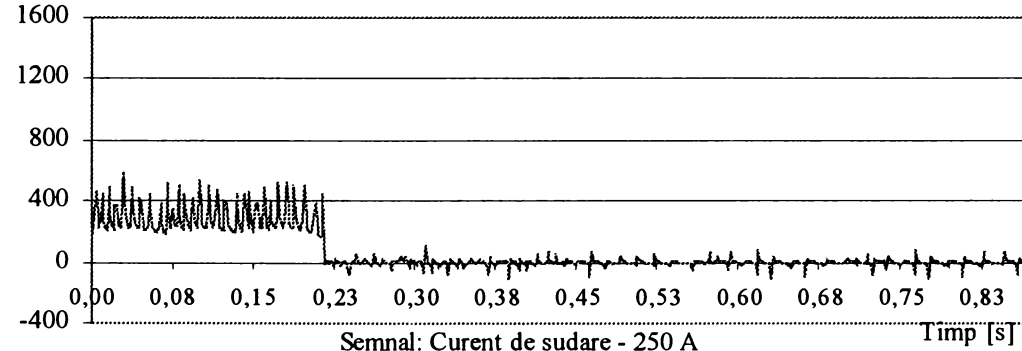
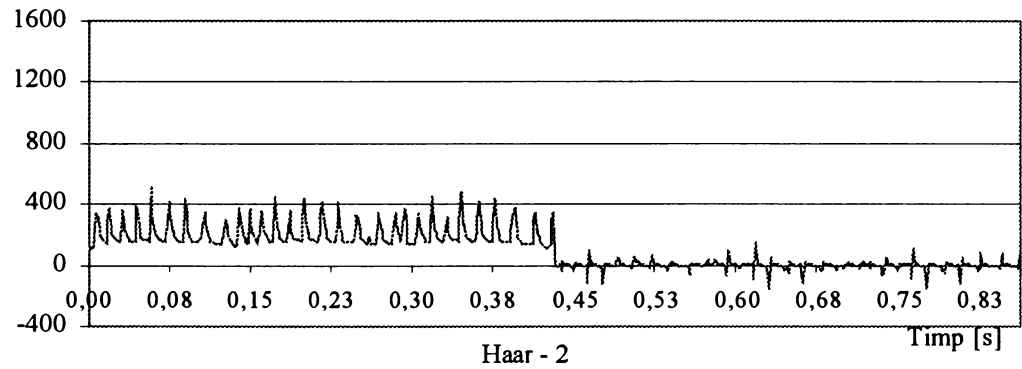
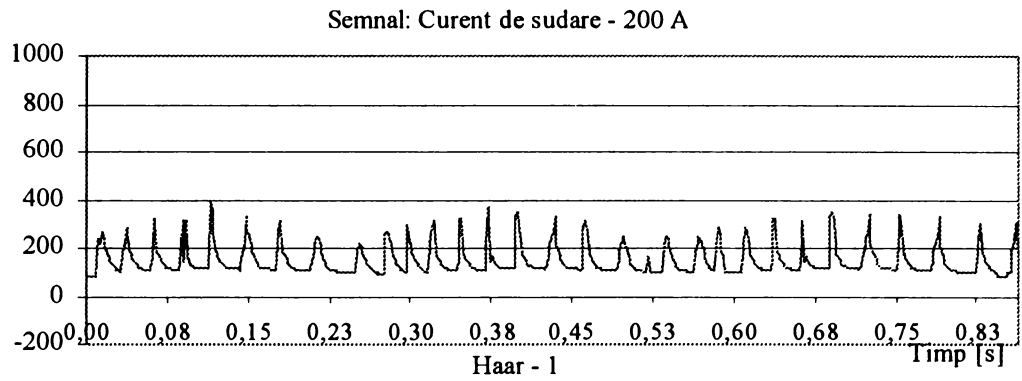
Se poate observa că după fiecare nivel Haar, semnalul tendință este mai compact, iar amplitudinile acestuia sunt mai mari de $\sqrt{2}$ ori. Aceste caracteristici evidențiază forma generală a semnalului și permit extragerea cu o mai bună precizie a componentei frecvențiale.

În plus, energia semnalului se diminuează cu numai 2% după primul nivel și cu încă 8% după nivelul al doilea. Acest lucru permite retransmiterea, cu erori minime și la o putere acceptabilă, a semnalului către etajul de comparare cu semnalul de referință.

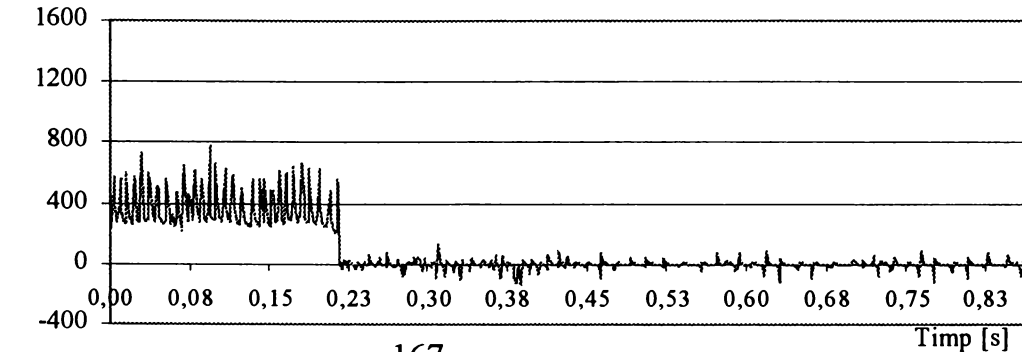
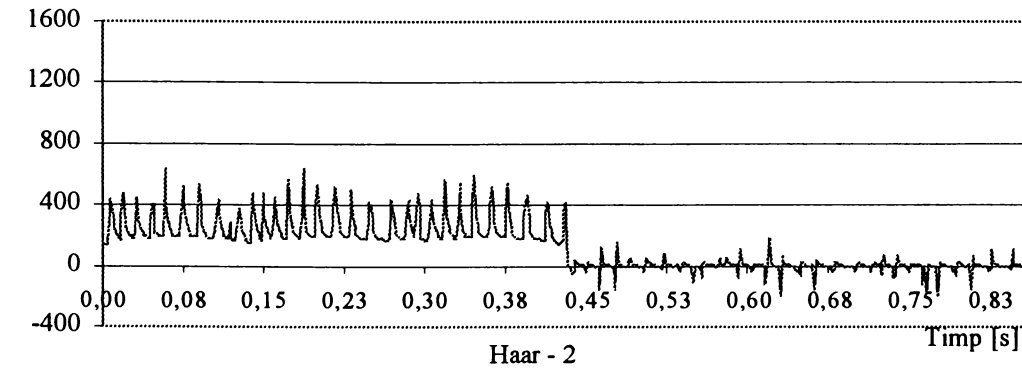
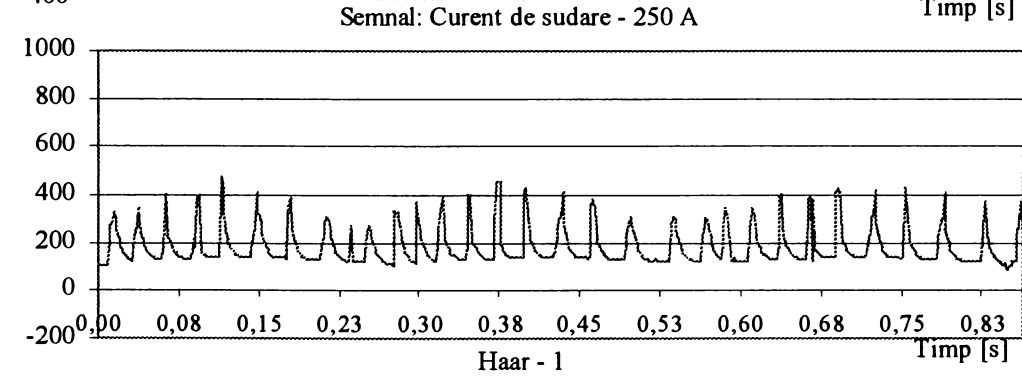
Retransmiterea are loc cu o viteză de 4 ori mai mare decât achiziția, deoarece numărul de biți necesar transmiterii subsemnalului tendință, a^2 , este de 4 ori mai mic decât numărul de biți necesar transmiterii semnalului original, achiziționat.



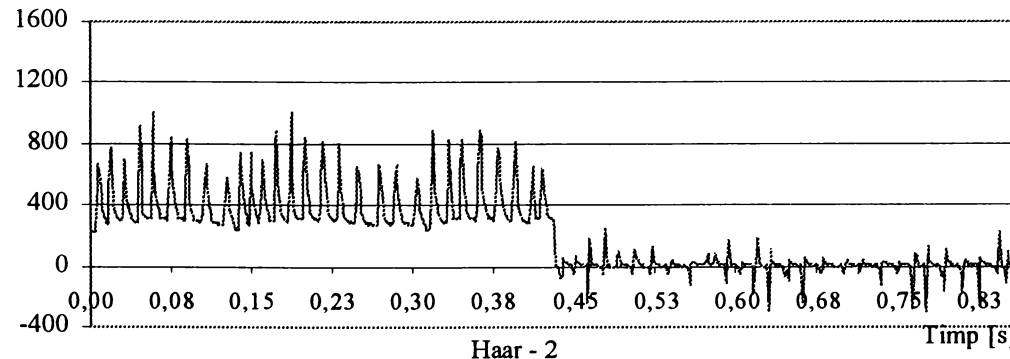
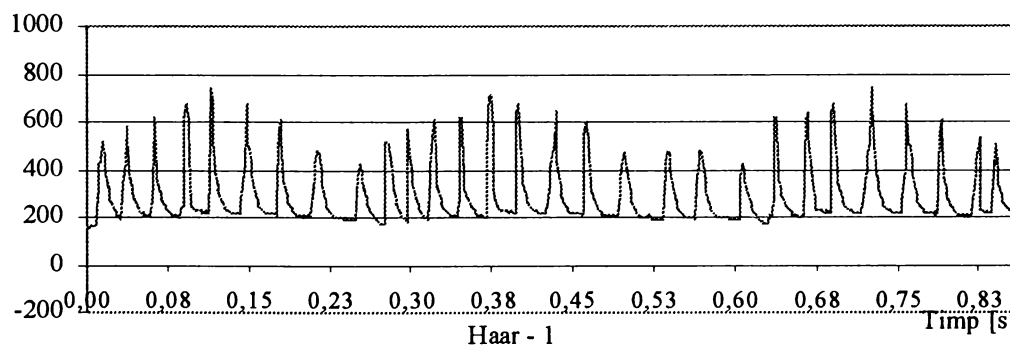
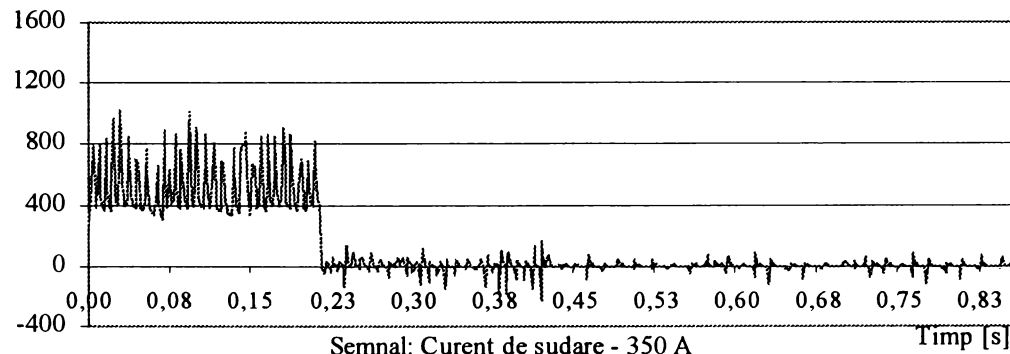
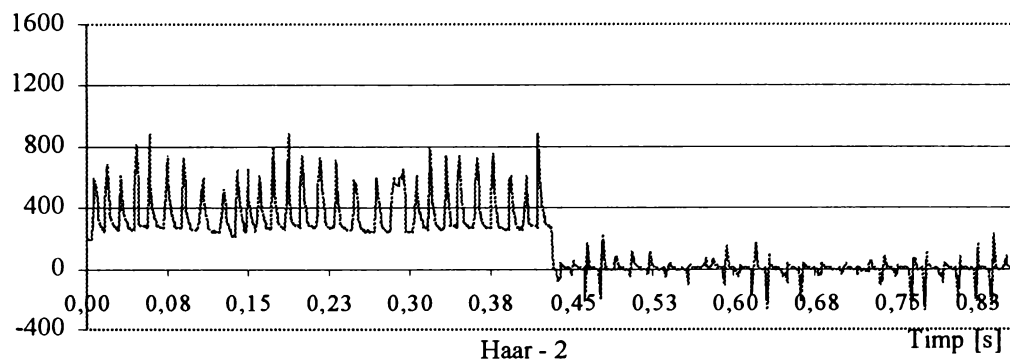
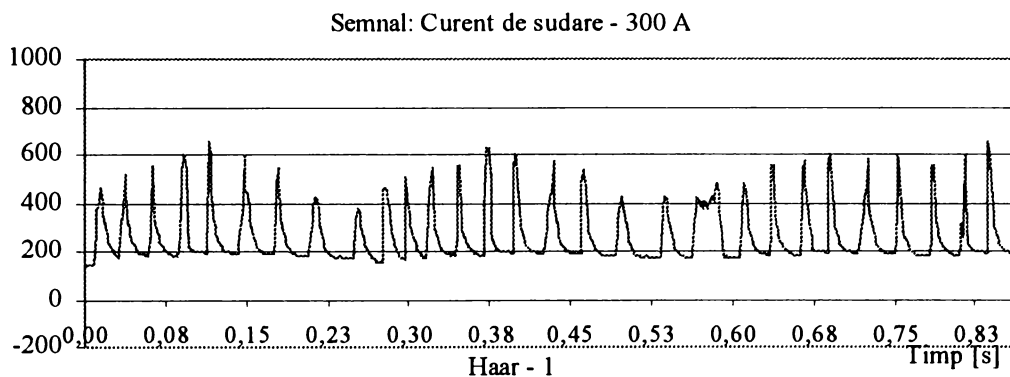
Prelucrarea Haar a semnalului de 200 A pulsat, achiziționat



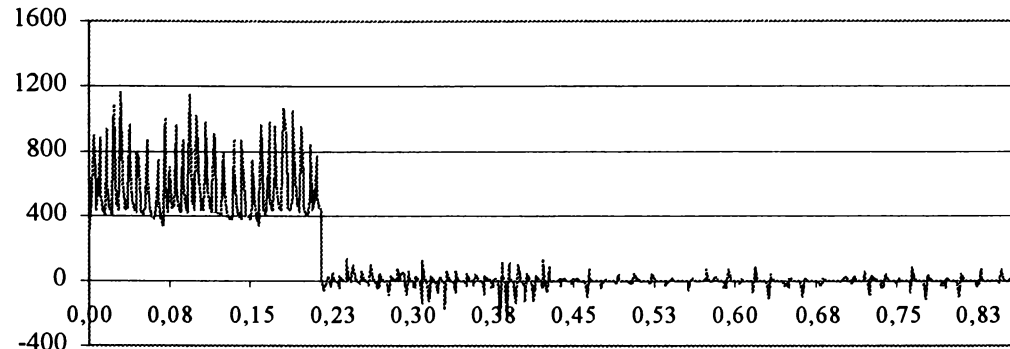
Prelucrarea Haar a semnalului de 250 A pulsat, achiziționat



Prelucrearea Haar a
semnalului de 300 A
pulsat, achiziționat



Prelucrearea Haar a
semnalului de 350 A
pulsat, achiziționat



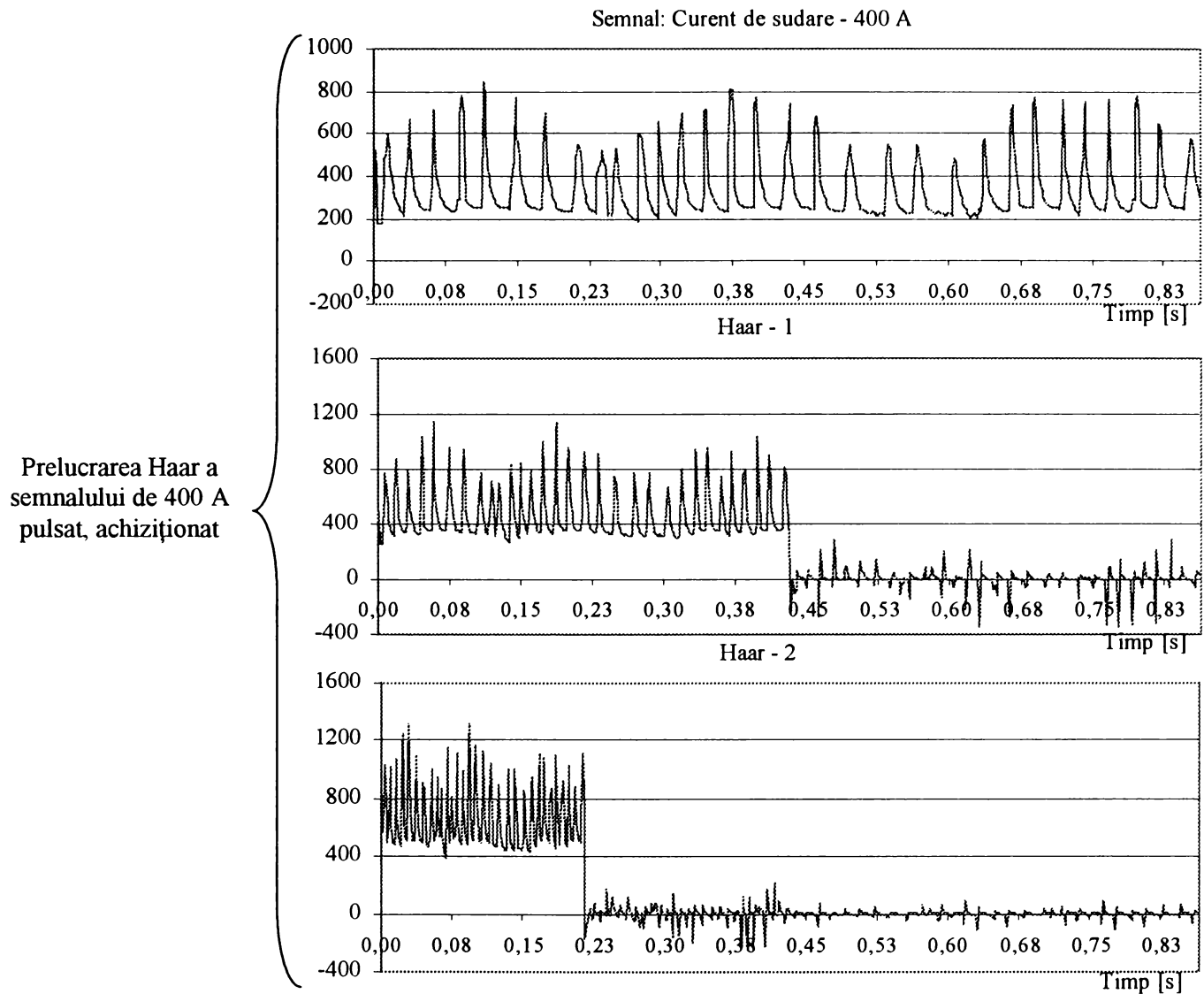


Fig. 6.9 Prelucrarea Haar a semnalelor înregistrate

Se observă însă ca prelucrarea Haar este mult prea “fină” pentru variația grobă a semnalului pulsant. Din acest motiv semnalul achiziționat este inițial prelucrat prin metoda mediilor variabile. Abia după impunerea acestui nivel de prelucrare devine eficientă aplicarea tehnicii Haar de eliminare a zgomotelor parazite.

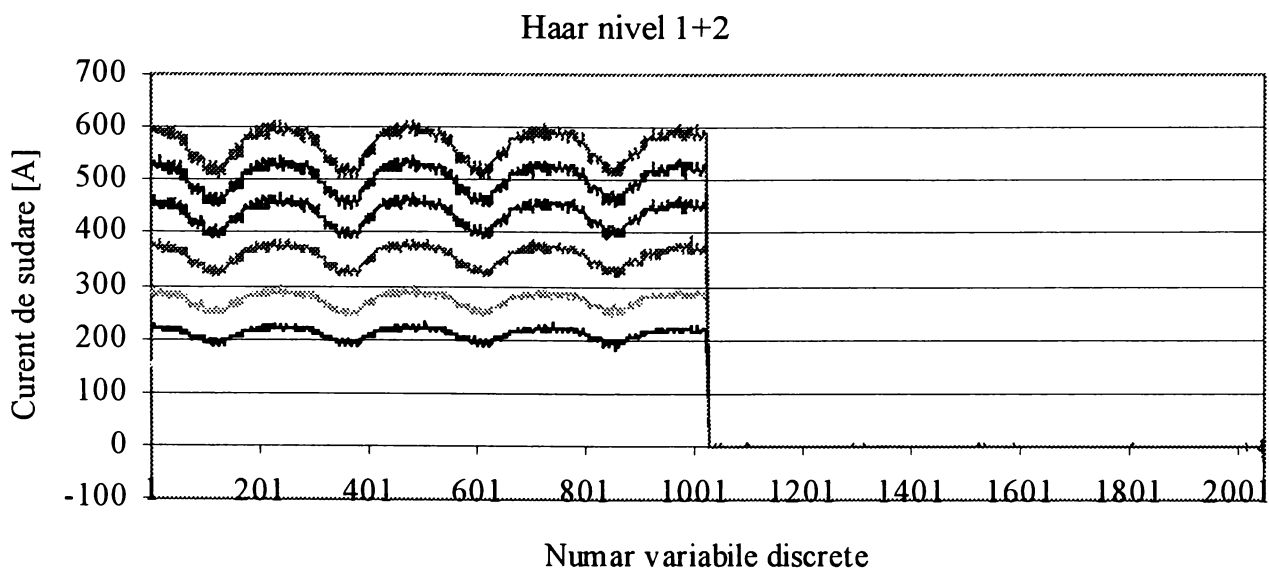
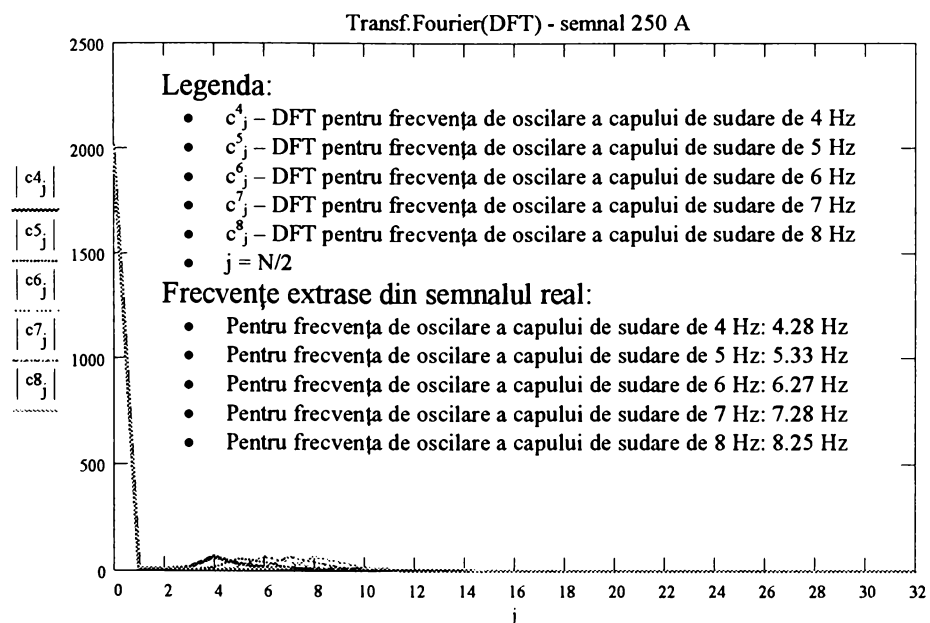
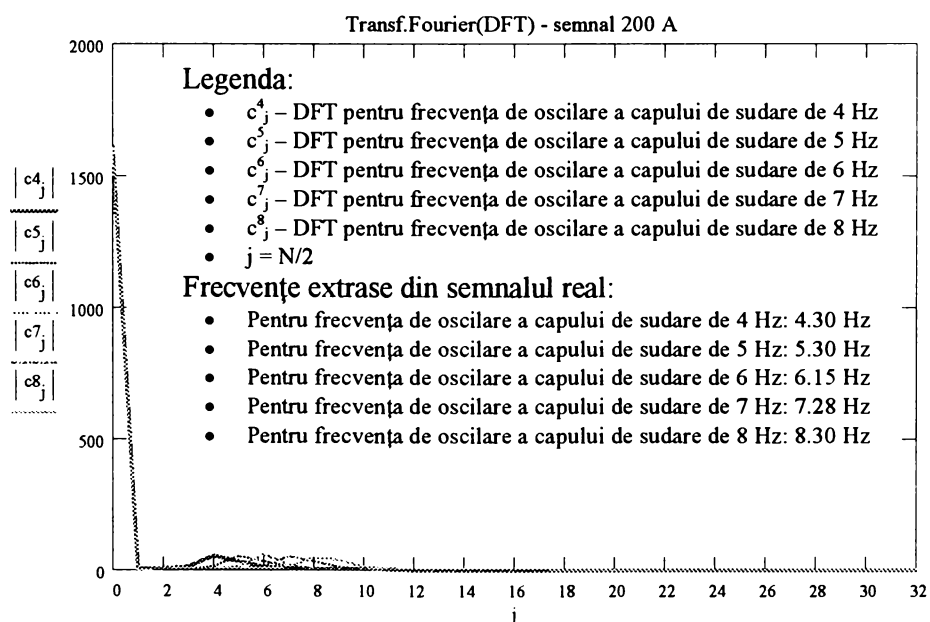
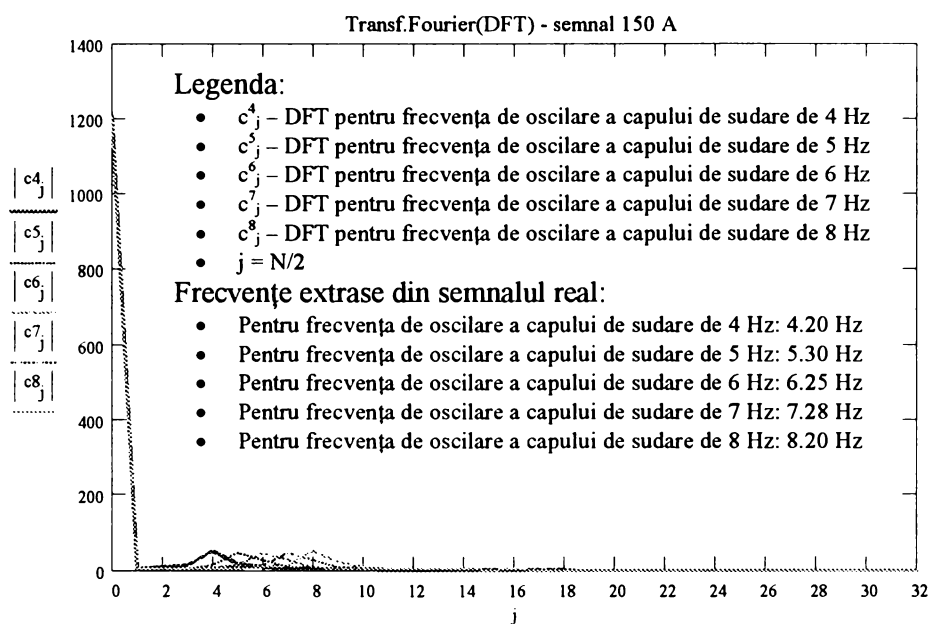


Fig. 6.10 Prelucrarea Haar a semnalelor înregistrate și prelucrate prin metoda mediei variabile

B. Prelucrarea Fourier

După prelucrarea Haar, semnalelor tendință α^2 li s-a construit transformata Fourier, \mathcal{F} , în vederea extragerii componentei frecvențiale necesare funcționării etajului de comparare, fiind evident dificilă compararea a două semnale cu frecvențe diferite.



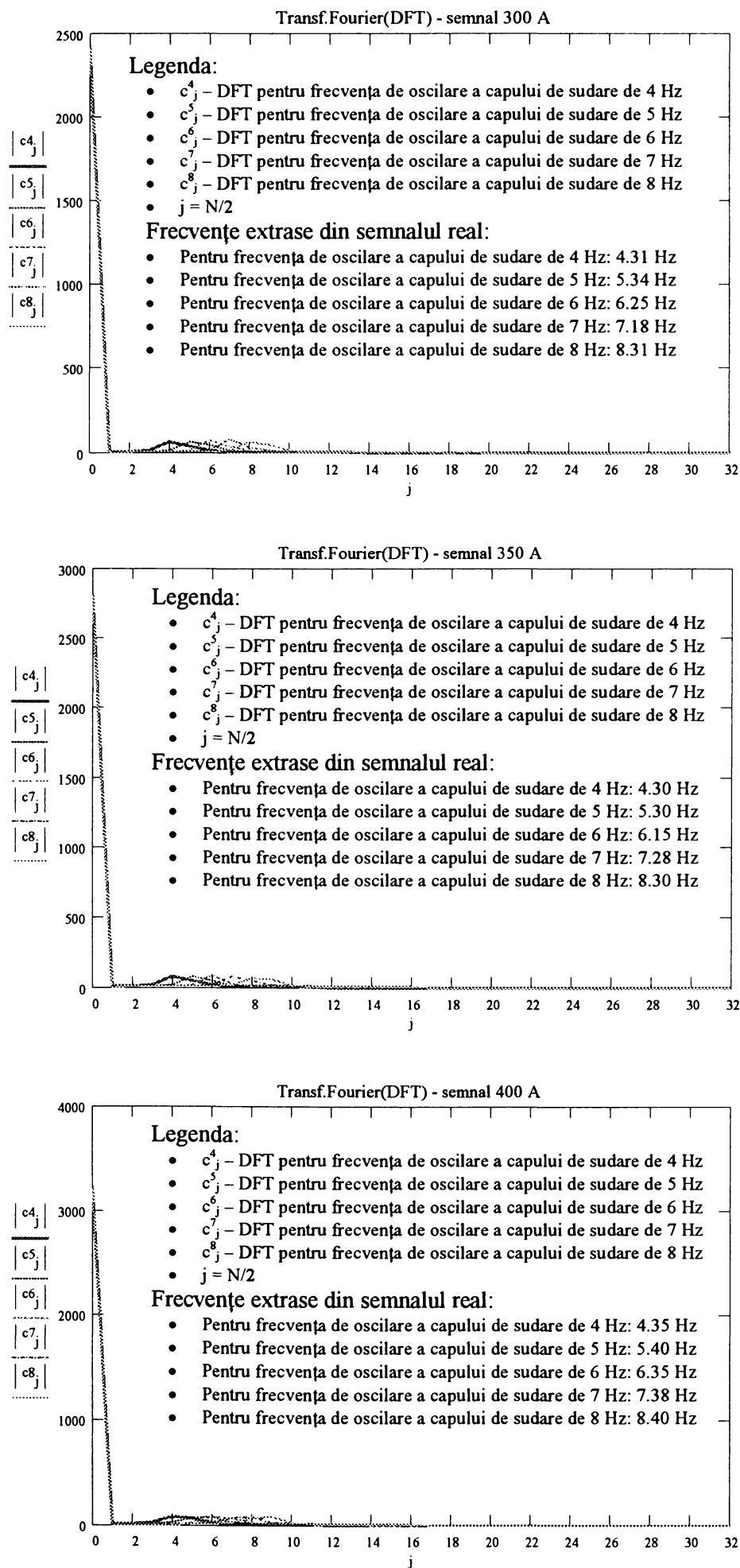


Fig. 6.11 Extragerea componentei frecvențiale a semnalului achiziționat

Cunoscând faptul că frecvența semnalului achiziționat este aproximativ egală cu frecvența de oscilare a capului de sudare, în modelele propuse în capitolul 5, componentele frecvențiale vor fi chiar frecvența de oscilare a capului de sudare. Pornind de la această ipoteză, conform celor prezentate anterior, s-a corectat modelul creat prin asimilarea cu funcția cosinus. Modelele matematice ale variațiilor curenților de sudare medii de 150 A, 200 A, 250 A, 300 A, 350 A, 400 A și 450 A sunt următoarele:

$$I_{S_{100,A}}(t) = 100 + 12 \cdot \cos\left(2 \cdot \pi \cdot f \cdot \frac{t}{N}\right) + rnd(1) \quad (A)$$

$$I_{S_{150,A}}(t) = 150 + 15 \cdot \cos\left(2 \cdot \pi \cdot f \cdot \frac{t}{N}\right) + rnd(1) \quad (B)$$

$$I_{S_{200,A}}(t) = 200 + 17 \cdot \cos\left(2 \cdot \pi \cdot f \cdot \frac{t}{N}\right) + rnd(1) \quad (C)$$

$$I_{S_{250,A}}(t) = 250 + 20 \cdot \cos\left(2 \cdot \pi \cdot f \cdot \frac{t}{N}\right) + rnd(1) \quad (D)$$

$$I_{S_{300,A}}(t) = 300 + 24 \cdot \cos\left(2 \cdot \pi \cdot f \cdot \frac{t}{N}\right) + rnd(1) \quad (E)$$

$$I_{S_{350,A}}(t) = 350 + 26 \cdot \cos\left(2 \cdot \pi \cdot f \cdot \frac{t}{N}\right) + rnd(1) \quad (F)$$

$$I_{S_{400,A}}(t) = 400 + 31 \cdot \cos\left(2 \cdot \pi \cdot f \cdot \frac{t}{N}\right) + rnd(1) \quad (G)$$

unde:

- f – frecvența de oscilare a capului de sudare [Hz]
- N – numărul de eșantioane prelevate de sistemul de achiziție [-]

Simulând în MathCad aplicarea transformatei Fourier pe aceste modele, frecvența extrasă, după cum era de așteptat a fost chiar frecvența de oscilare a capului de sudare.

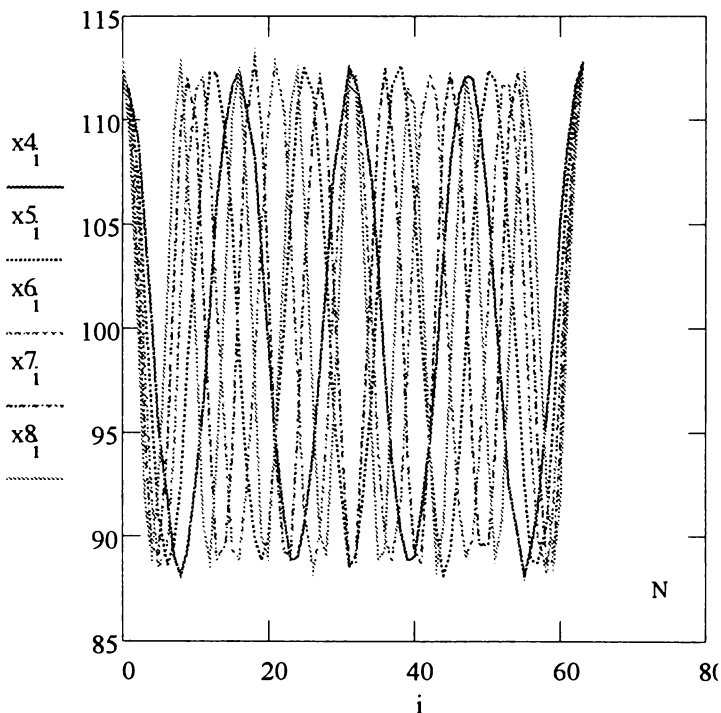
În continuare sunt prezentate grafic curbele modelate conform celor prezentate anterior și frecvențele extrase prin simularea aplicării transformatei Fourier.

Legendă:

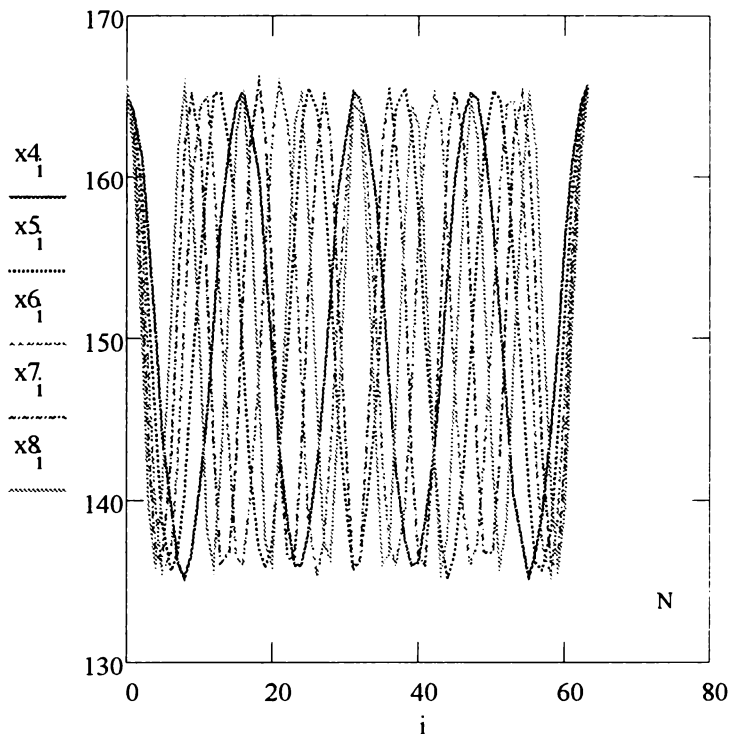
- x_i^4 – model pentru frecvența de 4 Hz
- x_i^5 – model pentru frecvența de 5 Hz
- x_i^6 – model pentru frecvența de 6 Hz
- x_i^7 – model pentru frecvența de 7 Hz
- x_i^8 – model pentru frecvența de 8 Hz

- c_j^4 – DFT pentru frecvența de oscilare a capului de sudare de 4 Hz
- c_j^5 – DFT pentru frecvența de oscilare a capului de sudare de 5 Hz
- c_j^6 – DFT pentru frecvența de oscilare a capului de sudare de 6 Hz
- c_j^7 – DFT pentru frecvența de oscilare a capului de sudare de 7 Hz
- c_j^8 – DFT pentru frecvența de oscilare a capului de sudare de 8 Hz

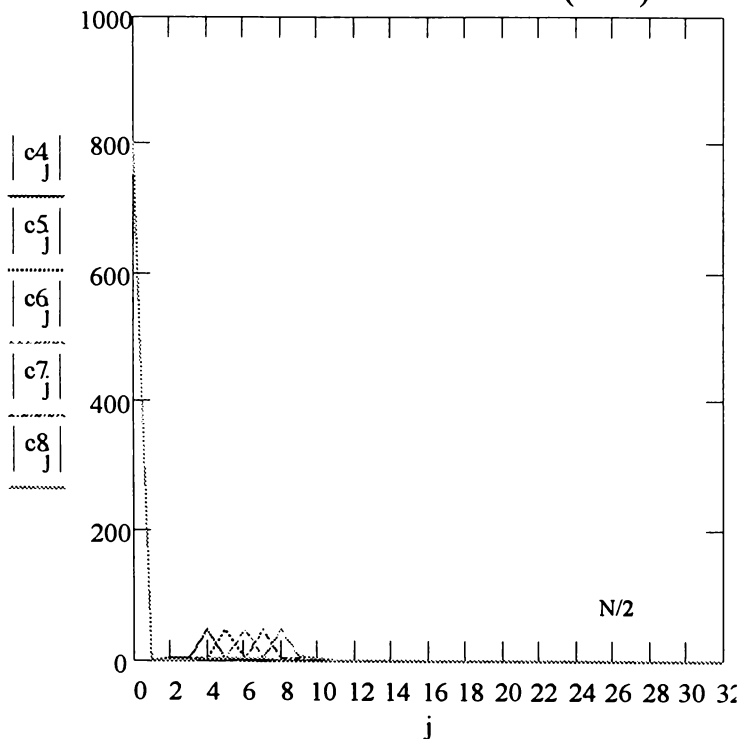
Model asimilat cosinus: $I_s=100$ A



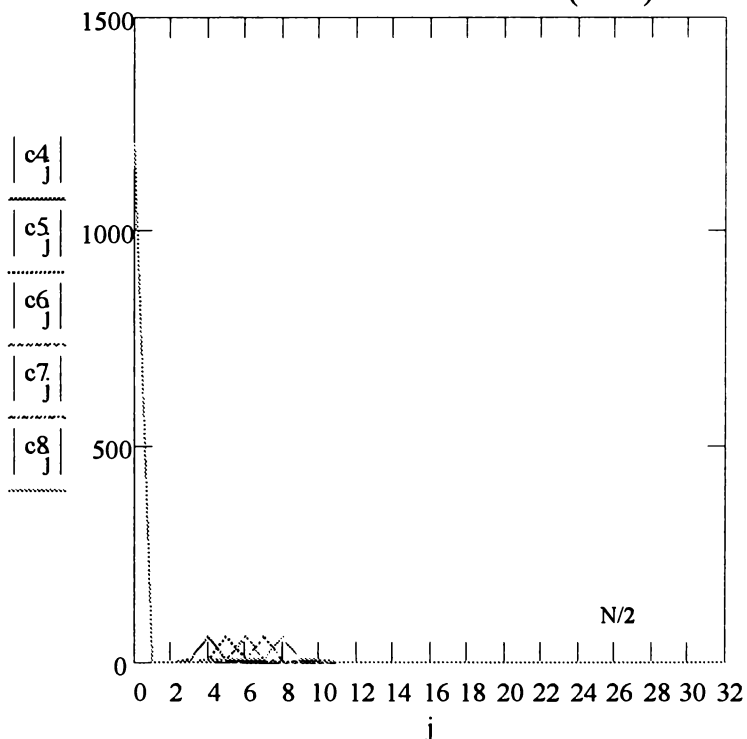
Model asimilat cosinus: $I_s=150$ A



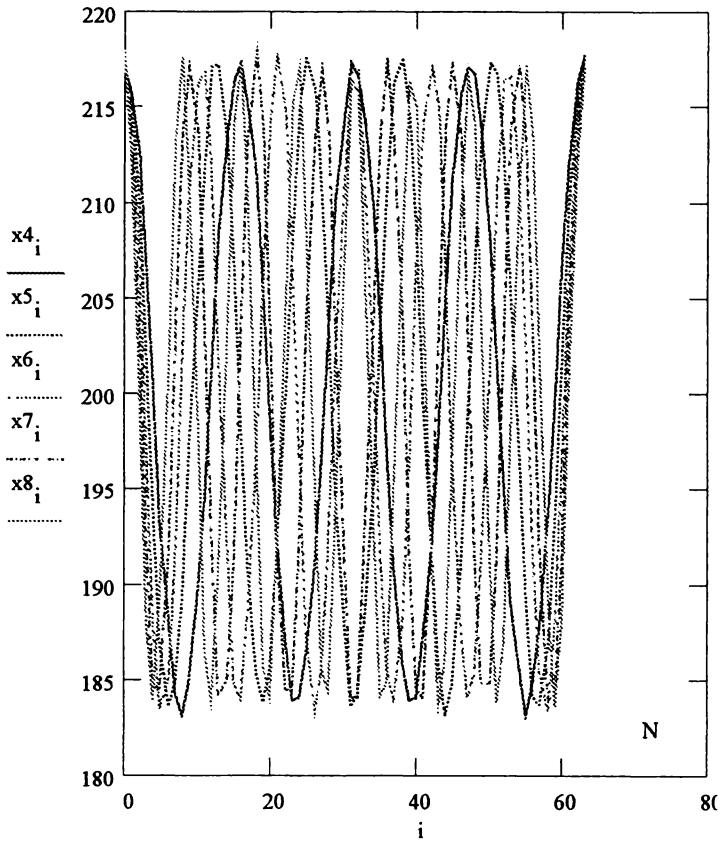
Transformata Fourier (DFT)



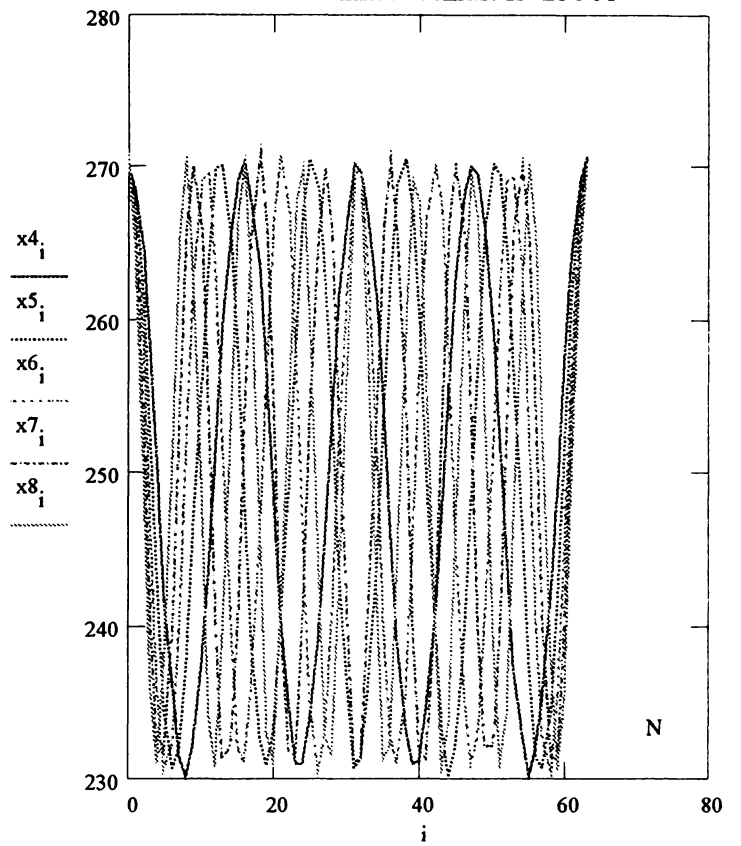
Transformata Fourier (DFT)



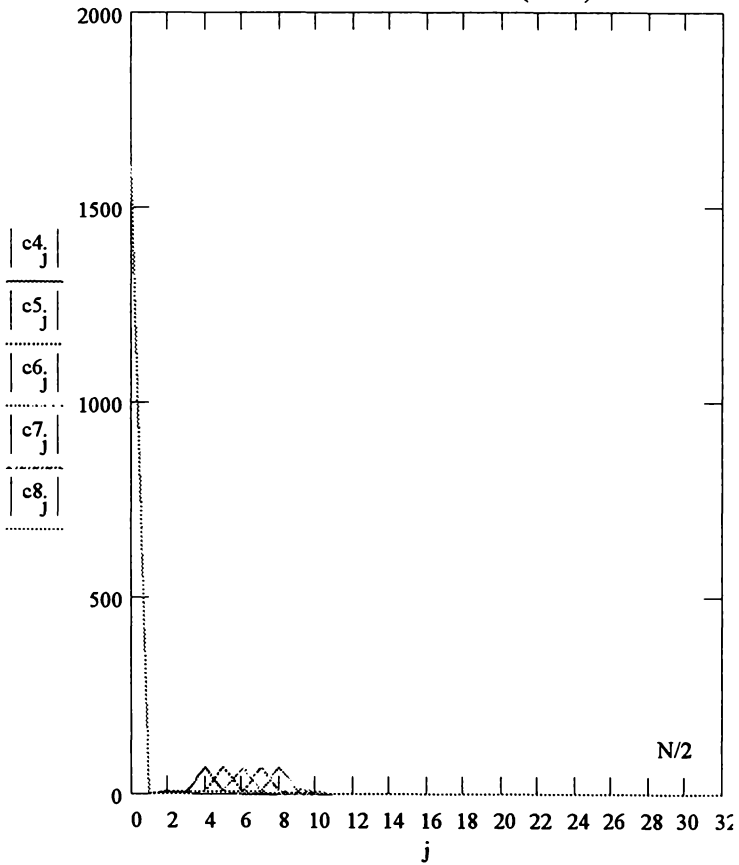
Model asimilat cosinus: $I_s=200$ A



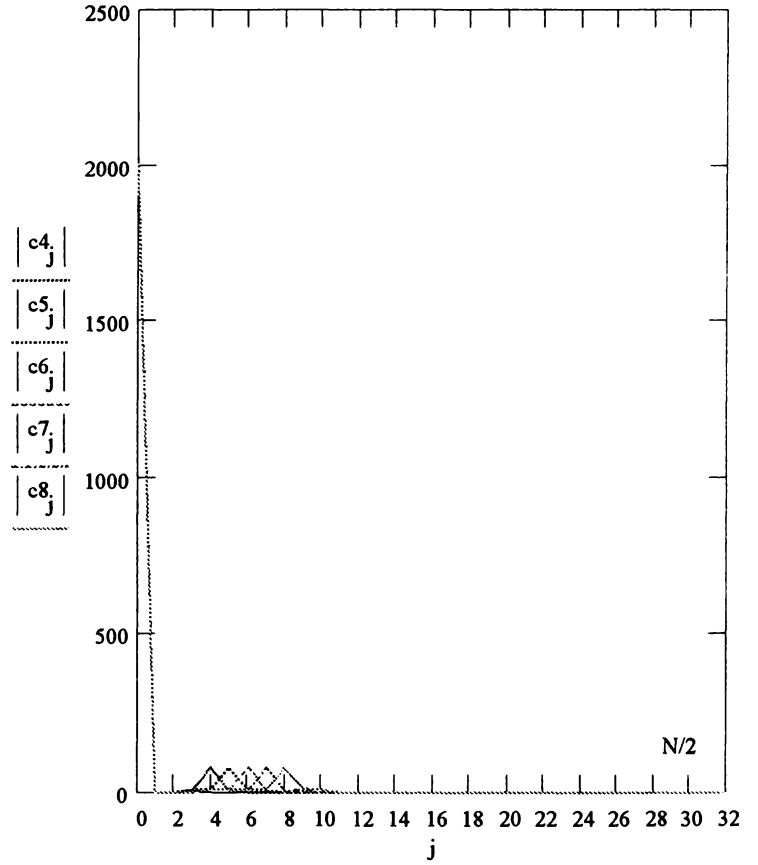
Model asimilat cosinus: $I_s=250$ A



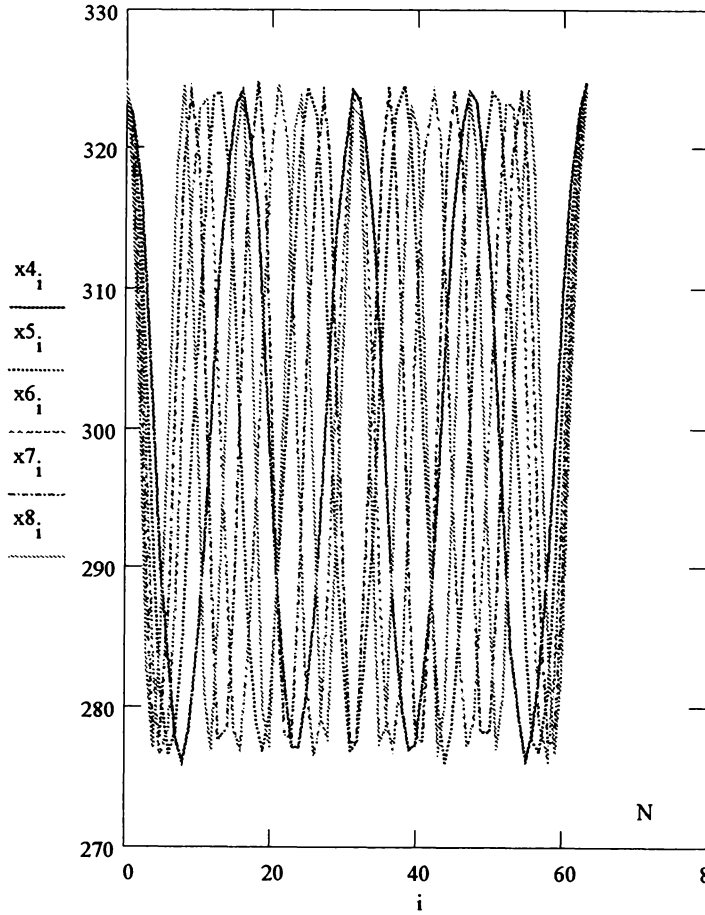
Transformata Fourier (DFT)



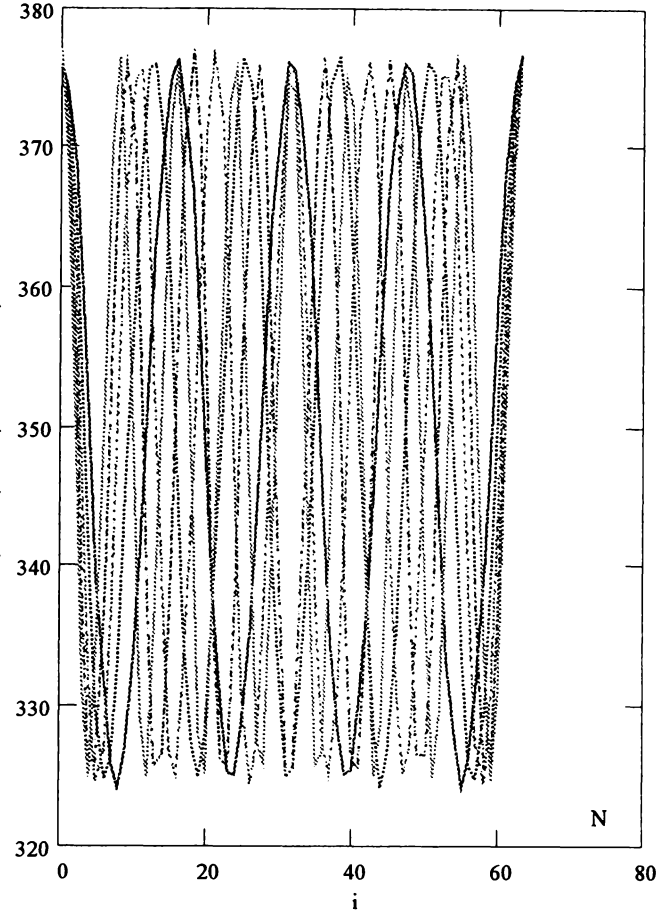
Transformata Fourier (DFT)



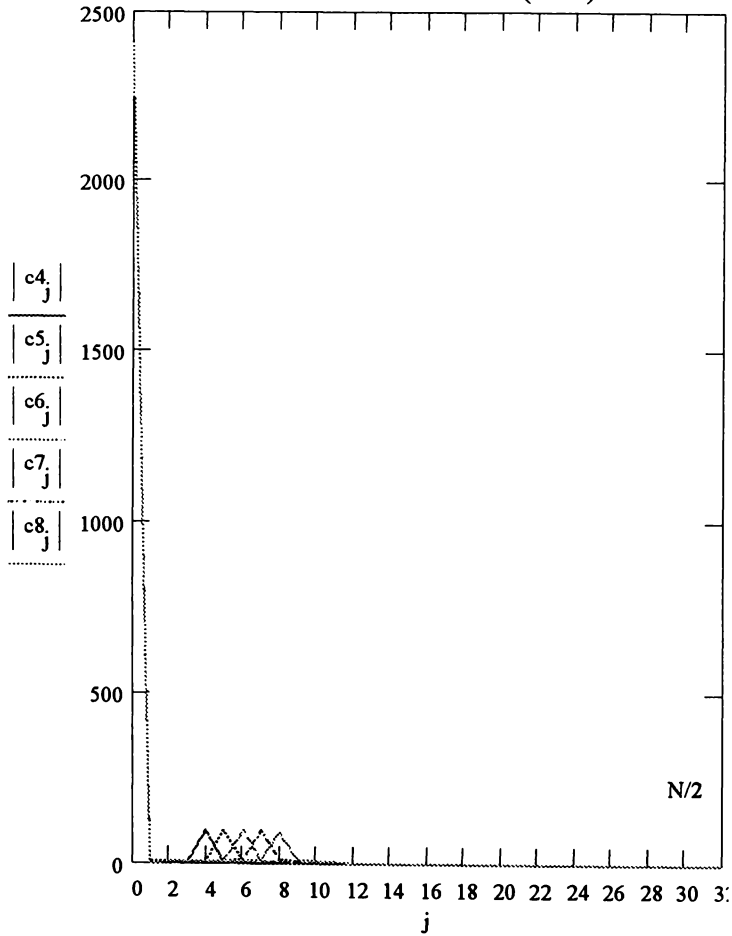
Model asimilat cosinus: $I_s=300$ A



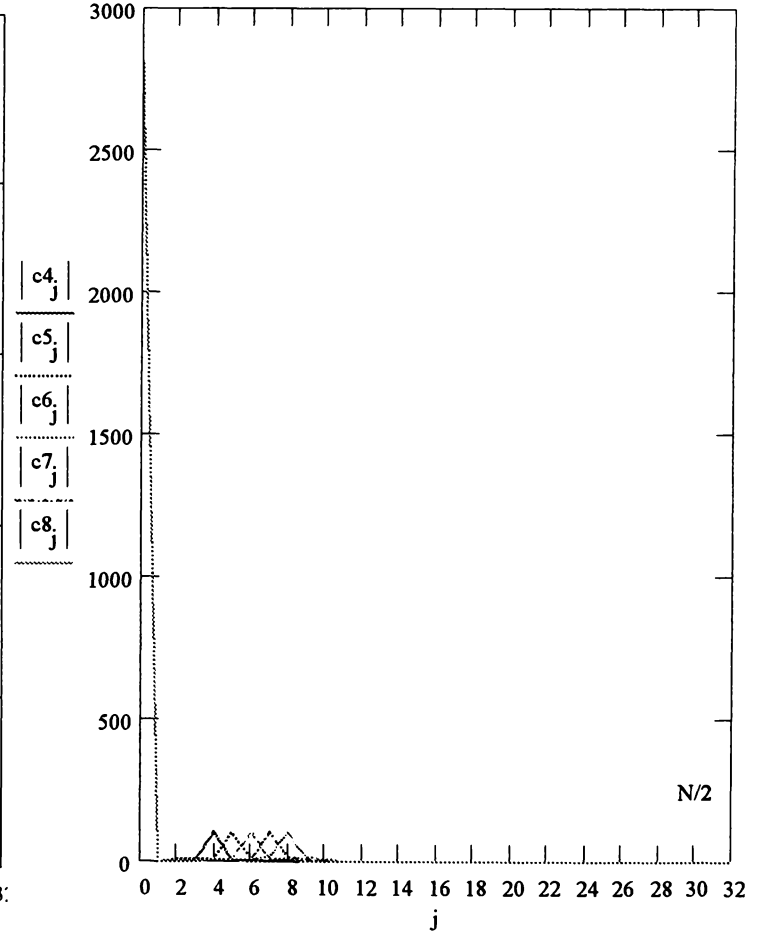
Model asimilat cosinus: $I_s=350$ A



Transformata Fourier (DFT)



Transformata Fourier (DFT)



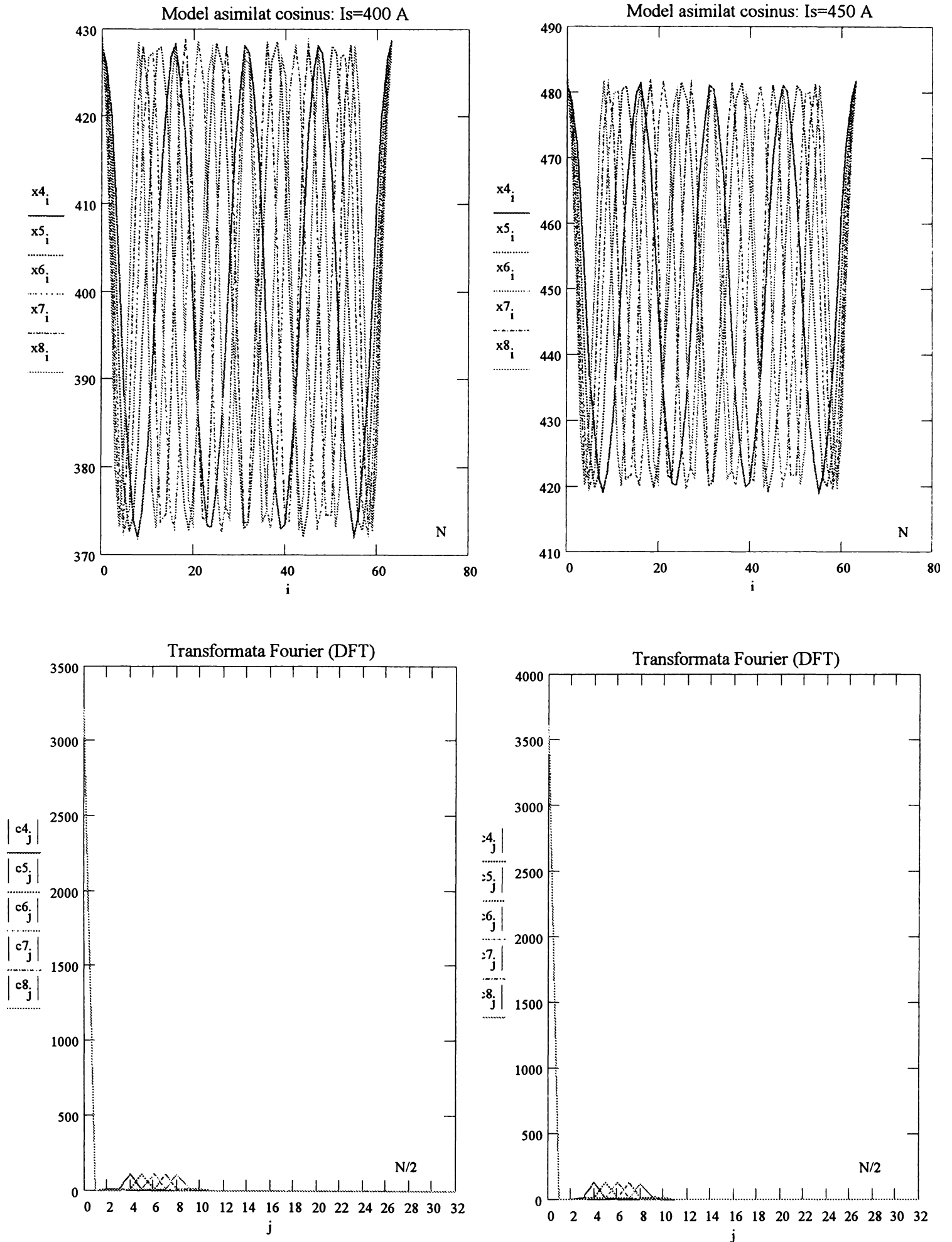


Fig. 6.12 Modelele corectate și componentele frecvențiale extrase din acestea

6.4.2 Studiul componentei frecvențiale a semnalului achiziționat

Analiza matematică a frecvenței unui semnal este cunoscută sub numele de analiză Fourier. Conținutul frecvențial al unui semnal discret se poate pune în evidență cu ajutorul transformatei discrete Fourier (DFT) /4/, /16/, /76/, /89/, /92/. Forma generală a transformatei Fourier discrete, notată în continuare cu \mathfrak{I} , este:

$$(\mathfrak{I}I_{mvH})_n = \sum_{m=1}^N \text{Im} \cdot e^{-i \cdot 2\pi \cdot (n-1) \cdot \frac{m-1}{n_{vd}}} \quad (6.27)$$

unde:

- n – număr întreg;
- n_{vd} – numărul valorilor discrete care formează semnalul de curent de sudare achiziționat, transformat prin metoda mediei variabile și prelucrat Haar, I_{mvH} .

Termenul al doilea al membrului drept reprezintă o exponențială derivată din formula lui Euler:

$$\begin{cases} e^{i\theta} = \cos\theta + i \cdot \sin\theta \\ e^{-i\theta} = \cos\theta - i \cdot \sin\theta \end{cases} \quad (6.28)$$

Conform legii lui Euler, modulul expresiei $|e^{-i\theta}|$ este unitar:

$$|e^{-i\theta}| = 1 \quad (6.29)$$

expresia situându-se pe cercul unitar din planul complex. Din cele două formule ale lui Euler se poate determina cosinusul unghiului dublu:

$$\cos 2\pi \cdot x = \frac{1}{2} \cdot e^{-i \cdot 2\pi \cdot x} + \frac{1}{2} \cdot e^{i \cdot 2\pi \cdot x} \quad (6.30)$$

Acceptând că cele două exponențiale din membrul drept au frecvența f , atunci se poate scrie:

$$\cos 2\pi \cdot f \cdot x = \frac{1}{2} \cdot e^{-i \cdot 2\pi \cdot f \cdot x} + \frac{1}{2} \cdot e^{i \cdot 2\pi \cdot f \cdot x} \quad (6.31)$$

În baza aceluiași raționament sinusul unghiului dublu este:

$$\sin 2\pi \cdot f \cdot x = \frac{1}{2} \cdot e^{-i \cdot 2\pi \cdot f \cdot x} - \frac{1}{2} \cdot e^{i \cdot 2\pi \cdot f \cdot x} \quad (6.32)$$

Deci transformata Fourier, DFT, este o funcție de frecvența semnalului curent de sudare. În același timp, DFT este și o funcție liniară:

$$\alpha \cdot I_{mvH1} + \beta \cdot I_{mvH2} \xrightarrow{\mathfrak{I}} \alpha \cdot \mathfrak{I}I_{mvH1} + \beta \cdot \mathfrak{I}I_{mvH2} \quad (6.33)$$

unde:

- α, β - constante;
- I_{mvH1}, I_{mvH2} – semnalele achiziționate ale celor doi curenți de sudare, fiecare dintre ele având lungimea n_{vd} .

Datorită liniarității, aplicarea transformatei DFT nu trebuie urmată de un proces de liniarizare, proces care, din punct de vedere tehnic este relativ dificil de realizat, chiar dacă matematic operația de liniarizare nu pune probleme prea mari.

Privind îndeaproape, se poate observa că pentru oricare număr natural n și orice lungime de semnal n_{vd} , transformata este periodică și are perioada n_{vd} .

$$(\mathfrak{I}I_{mvH})_n = (\mathfrak{I}I_{mvH})_{n+n_{vd}} \quad (6.34)$$

Datorită acestei caracteristici, nu sunt necesare decât două valori ale n pentru a putea determina transformata funcției discrete dată de semnalul achiziționat și anume:

$$\begin{cases} n = -\frac{n_{vd}}{2} \\ n = \frac{n_{vd}}{2} - 1 \end{cases} \quad (6.35)$$

O altă caracteristică a transformatei Fourier este admiterea unei inverse. Existența acestei inverse asigură faptul că două semnale distincte, I_{mvH1} și I_{mvH2} , au transformate discrete distincte. În plus este facilitată interpretarea valorilor DFT. Fiecare valoare a DFT este o amplitudine pentru semnalul exponențial complex discret: $e^{i \cdot 2\pi \cdot (n-1) \cdot \frac{m-1}{n_{vd}}}$, unde $m = \overline{1, n_{vd}}$. Acest semnal exponențial complex discret este versiunea eșantionată a semnalului exponențial complex discret cu frecvența egală cu $(n-1)$: $e^{i \cdot 2\pi \cdot (n-1) \cdot x}$.

Punctele eșantion, determinate de sistemul de achiziție pot fi modelate în acest caz prin:

$$x_m = \frac{m-1}{n_{vd}} \quad (6.36)$$

Continuând raționamentul, dacă eșantionarea curenților se face la intervale de timp egale, $t = t_1 = t_2 = \dots = t_{n_{vd}}$, ceea ce fizic are loc prin construcția modulului de eșantionare, atunci exponențiala din expresia transformatei devine: $e^{i \cdot 2\pi \cdot \frac{(n-1)}{t} \cdot (m-1) \cdot \frac{1}{n_{vd}} \cdot t}$, caz în care frecvența transformatei devine: $\frac{n-1}{t}$.

Cunoscând acestea, se trage concluzia că semnalul original I_{mv} poate fi construit însumând aceste două semnale discrete complex exponențiale, care au amplitudini date de către valorile transformatei DFT, multiplicare cu factorul de scală $\frac{1}{n_{vd}}$.

Aplicând semnalelor achiziționate în timpul oscilării capului de sudare, modelul de analiză prezentat a fost posibilă extragerea conținutului frecvențial al semnalelor. În figura 6.13 este prezentat un curent a cărui medie este de 150 A, curent care variază datorită oscilării capului de sudare transversal pe rost. Acest semnal a fost prelucrat prin metoda Haar și i s-a extras componenta frecvențială prin aplicarea transformatei Fourier. Această analiză a semnalului a permis îmbunătățirea modelului matematic creat prin asimilarea cu funcția trigonometrică cosinus, realizat conform celor prezentate în capitolul 5.6. Funcția model la care s-a ajuns a avut forma:

$$I_s(t) = 150 + 15 \cdot \cos\left(2 \cdot \pi \cdot 4 \cdot \frac{t}{63}\right) + rnd(1) \quad (6.37)$$

unde:

- 150 – curentul mediu de sudare [A];
- 150 – amplitudinea undei de curent [A];
- 4 – frecvența de oscilare a capului de sudare [s^{-1}];
- 63 – lungimea semnalului achiziționat și prelucrat Haar [s];
- $rnd(x)$ – este o funcție care întoarce o distribuție aleatoare uniformă între 0 și x. Analizând semnalul prelucrat Haar s-a constatat că $x=1$ este o opțiune realistă, deoarece metoda Haar a curățat corespunzător semnalul.

Prelucrarea semnalului, extragerea componentei frecvențiale a semnalului și reprezentările grafice au fost efectuate utilizându-se software de analiză matematică MathCad.

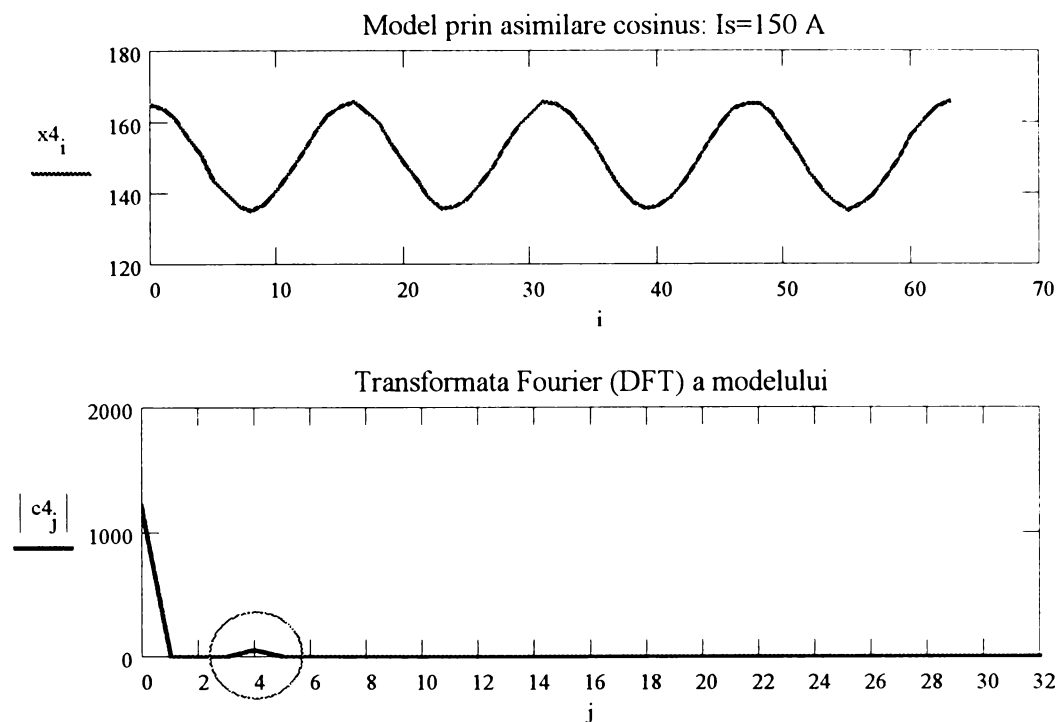


Fig. 6.13 Prelucrarea semnalului prin aplicarea transformatei Fourier pentru extragerea componentei frecvențiale

Se observă că frecvența determinată de transformata Fourier este de 4 Hz, identică cu frecvența de oscilare a capului de sudare. Această observație a confirmat presupunerile anterioare privitoare la influența puternică pe care o exercită frecvența de oscilare a capului de sudare asupra formei undei de curent și a permis îmbunătățirea modelului matematic creat prin asimilarea cu funcția cosinus.

Se menționează că au fost eliminate frecvențele introduse de existența pulsurilor și anume frecvențele de 350-400 Hz egale cu frecvențele de pulsare a curentului. Reprezentarea din figura 6.13 conține numai frecvența datorată procesului de scanare transversală a rostului de către capul de sudare.

În anexa A6.2 sunt prezentate extragerile componentelor frecvențiale pentru curenți medii de 150 A, 200 A, 250 A, 300 A, 350 A și 400 A, după o prealabilă prelucrare Haar cu două nivele, conform celor prezentate anterior.

În toate cazurile frecvențele extrase de către transformata Fourier au avut valori apropiate frecvenței de oscilare a capului de sudare. Domeniul de abatere de la frecvența capului de sudare a fost calculat la $\pm 5\%$. Această abatere conține și eroarea de achiziție și eroarea dată de prelucrarea Haar, deci s-a considerat că frecvența extrasă de transformata Fourier este chiar frecvența de oscilare a capului de sudare.

În baza acestor observații a fost modificat modelul general al variației de curent și a fost verificat prin simulare pentru curenții de 100 A, 150 A, 200 A, 250 A, 300 A, 350 A, 400 A, 450 A și frecvențele de oscilare a capului de sudare de 4 Hz, 5 Hz, 6 Hz, 7 Hz, 8 Hz. Noilor modele, generate în baza acestui model general, li s-a simulat aplicarea metodei de prelucrare Haar și extragerea componentei frecvențiale. Rezultatul a fost conform așteptărilor, frecvența extrasă fiind exact frecvența de oscilare a capului de sudare.

Modelul matematic final al undei referențiale de curent, creat prin asimilarea cu funcția cosinus, utilizat de sistemul senzor-arc capătă o nouă formă și anume:

$$I_s(t) = I_m + I_0 \cdot \cos\left(2 \cdot \pi \cdot f \cdot \frac{t}{N}\right) + rnd(x) \quad (6.38)$$

6.5 Nivel 3: Stabilirea valorilor de comparare

Pentru a putea compara semnalul achiziționat cu semnalul de referință construit conform celor prezentate în capitolul 5 este necesară stabilirea valorilor care vor participa la comparare. Procesul de alegere a acestor valori din șirul de valori discrete care reconstruiesc un ciclu de oscilare a capului de sudare are două etape:

- alegerea numărului de valori care vor participa la comparare;
- alegerea modului de determinare a valorilor punctelor discrete respective.

Un număr mare de valori participante la comparare este de dorit, deoarece performanța procesului de comparare crește în acest caz. Aceasta înseamnă însă sisteme hardware performante, lucrând la frecvențe relativ mari. Compararea unui număr mare de valori, rezultatul prin diferență participând la comanda fizică a unor motoare de corectare a poziției capului de sudare necesită viteze mari de lucru. Din aceste motive trebuie avută în vedere eficiența unui anumit număr de valori participante la comparare. Dacă traiectoria care trebuie urmărită nu este complexă și dificil de realizat, numărul de valori participante la comparare, poate fi redus. Dacă traiectoria respectivă este complexă, numărul de valori trebuie mărit.

Algoritmul de alegere a punctelor discrete din întreg șirul de puncte achiziționate, poate fi conceput cu funcționare temporală sau prin extragerea punctului cu numărul k după fiecare extragere anterioară. Este evidentă superioritatea celui dintâi, care constă în alegerea punctelor în funcție de o perioadă dată de timp.

Aceste aspecte vor fi prezentate în continuare, corelate cu aspecte legate de funcționarea sistemului de corectare a poziției capului de sudare, deoarece acestea există într-o dependență continuă.

6.6 Determinarea poziției momentane a capului de sudare

Conform destinației sale, senzorul-arc, ca sistem de monitorizare și control, are rolul de a stabili poziția curentă a capului de sudare și de a corecta eventualele abateri ale acesteia de la referința prescrisă. În figura 1.1 s-a prezentat etapizat funcționarea unui sistem de control bazat pe senzorul arc. În ordine cronologică, aceste etape sunt:

- scanarea rostului;
- înregistrarea valorilor momentane ale curenților de sudare cu o frecvență minim necesară;
- compararea valorilor măsurate cu valori de referință;
- stabilirea sensului de deviere și a valorii curenți a corecției;
- efectuarea corecției.

Scanarea transversală a rostului prin oscilarea capului de sudare și înregistrarea valorilor momentane ale curenților de sudare au fost tratate în capitolele anterioare. De asemenea, în capitolul 5 autorul a propus o serie de modele matematice pentru stabilirea valorilor de referință necesare în procesul de comparare.

În stadiul actual, însă, sistemul de control nu poate funcționa. Cauzele disfuncționalității sunt următoarele:

- curba de referință este inclusă în curba reală de variație a curenților de sudare, dar diferențele dintre valorile momentane efective vor fi relativ mari. Sistemul de interpretare prin integrare a valorilor efective se va dovedi insuficient de util, fiind astfel imposibilă interpretarea semnalelor prin diferență;
- sistemul de control nu cunoaște sensul în care trebuie efectuată corecția.

Astfel, a fost necesară stabilirea unei metode de determinare a sensului de corecție și a unei metode suplimentare de comparare a valorilor de referință cu cele efective.

6.6.1 Corectarea grafică a valorilor efective ale curentului de sudare cu valorile de referință generate prin metoda descompunerii în serie Fourier

În vederea efectuării unei comparații eficiente, facil de interpretat și facil de prelucrat ulterior, s-a adoptat o tehnică dublă de determinare a valorilor efective ale curenturilor de sudare. Astfel, determinarea prin metoda generării seriei Fourier a fost susținută de o metodă experimentală propusă de autor. Etapele cronologice ale comparației grafice au fost succesiv:

- determinarea experimentală a valorilor curentului de sudare pentru variații ale lungimii arcului de sudare cuprinse între 0,5-4,5 mm;
- determinarea lungimii arcului de sudare pentru un set de puncte ale traiectoriei sârmei, cota verticală a capului de sudare fiind menținută constant;
- construirea curbei de curent pe traiectorie;
- determinarea coeficienților descompunerii în serie Fourier utilizându-se valorile curenturilor din curba construită pe traiectorie;
- generarea funcției de variație a curentului de sudare prin metoda descompunerii în serie Fourier și traversarea grafică a curbei de variație;
- înregistrarea valorilor efective ale curentului de sudare la oscilarea capului transversal pe rost conform metodei prezentate la capitolul 4;
- suprapunerea reprezentărilor grafice ale valorilor de referință și valorilor efective ale curentului de sudare.

A doua metodă constă în compararea valorilor generate de către funcția de variație a curentului, asimilată cu funcția cosinus, cu valorile momentane ale curentului de sudare.

6.6.1.1 Determinarea experimentală a valorilor curentului de sudare pentru diferite modificări ale lungimii arcului

În vederea determinării coeficienților seriei Fourier a fost necesară stabilirea corelației efective dintre curentul prin arc și variația lungimii arcului de sudare. Această corelație a fost stabilită experimental, determinarea făcându-se conform figurii 6.14.

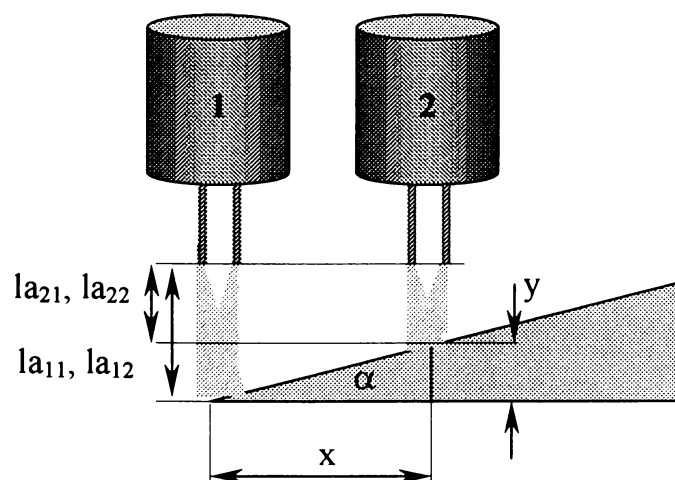


Fig. 6.14 Determinarea experimentală a reacției sursei de sudare la modificarea lungimii arcului

Deplasând cu viteza de oscilare capul de sudare din poziția 1 în poziția 2 s-a obținut pentru scurt timp o modificare a lungimii arcului corectată de către sursa de sudare prin mișcarea curentului prin arc. Din rațiuni geometrice a fost posibilă determinarea parametrilor geometrici ai sistemului prezentat în figura 6.14. Astfel:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{y}{x} = \frac{la_{11} - la_{21}}{x} \Rightarrow x = \frac{la_{11} - la_{21}}{\operatorname{tg} \alpha} \quad (6.39)$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{y}{x} = \frac{la_{12} - la_{22}}{x} \Rightarrow x = \frac{la_{12} - la_{22}}{\operatorname{tg} \alpha} \quad (6.40)$$

Stabilind valoarea unghiului α la 20° a fost posibilă calcularea amplitudinii deplasării pentru obținerea unei scurtări (Δla) dorite:

$$x = \frac{\Delta la}{0.364} \quad (6.41)$$

Efectuând oscilații cu diferite amplitudini s-au determinat valorile curentului de sudare în raport cu scurtarea arcului. Analizând aceste corelații determinate experimental s-a observat posibilitatea modelării acestor corelații utilizându-se tehnicile polinomiale de generare de funcții în baza unor valori determinate a priori.

Alegându-se drept bază a modelului polinomul de gradul al treilea a fost posibilă obținerea unor modele matematice pentru corelația curent de sudare - scurtare arc. Pornindu-se de la forma generală a polinomului de gradul al treilea:

$$f(X) = a \cdot X^3 + b \cdot X^2 + c \cdot X + d \quad (6.42)$$

a fost posibilă determinarea coeficienților a , b , c și d pentru fiecare viteză de avans al sârmei, în baza valorilor determinate experimental, ale curenților de sudare.

Polinomul construit pentru situația dată a avut forma generală:

$$I(\Delta l_a) = a \cdot \Delta l_a^3 + b \cdot \Delta l_a^2 + c \cdot \Delta l_a + d \quad (6.43)$$

S-a considerat necesar și suficient construirea funcției din bucăți acceptându-se porțiuni de câte patru înregistrări pentru fiecare componentă a funcției. Astfel, cum pentru fiecare viteză de avans al sârmei au fost determinate experimental 9 valori ale curentului de sudare pentru scurtările arcului cu 0.5 mm, 1 mm, 1.5 mm, 2 mm, 2.5 mm, 3 mm, 3.5 mm, 4 mm și 4.5 mm, au fost construite 6 sisteme a câte 4 ecuații fiecare în necunoscutele a , b , c și d , după cum urmează:

- se presupun valorile scurtărilor arcului de sudare: E, F, G, H, I, J, K, L, M;
- se presupun valorile determinate experimental ale curentului de sudare: N, O, P, Q, R, S, T, U, V;
- sistemele de ecuații construite devin astfel:

$$\begin{cases} a_1 \cdot E^3 + b_1 \cdot E^2 + c_1 \cdot E + d_1 = N \\ a_1 \cdot F^3 + b_1 \cdot F^2 + c_1 \cdot F + d_1 = O \\ a_1 \cdot G^3 + b_1 \cdot G^2 + c_1 \cdot G + d_1 = P \\ a_1 \cdot H^3 + b_1 \cdot H^2 + c_1 \cdot H + d_1 = Q \end{cases} \quad (6.44)$$

$$\begin{cases} a_2 \cdot F^3 + b_2 \cdot F^2 + c_2 \cdot F + d_2 = O \\ a_2 \cdot G^3 + b_2 \cdot G^2 + c_2 \cdot G + d_2 = P \\ a_2 \cdot H^3 + b_2 \cdot H^2 + c_2 \cdot H + d_2 = Q \\ a_2 \cdot I^3 + b_2 \cdot I^2 + c_2 \cdot I + d_2 = R \end{cases} \quad (6.45)$$

$$\begin{cases} a_3 \cdot G^3 + b_3 \cdot G^2 + c_3 \cdot G + d_3 = P \\ a_3 \cdot H^3 + b_3 \cdot H^2 + c_3 \cdot H + d_3 = Q \\ a_3 \cdot I^3 + b_3 \cdot I^2 + c_3 \cdot I + d_3 = R \\ a_3 \cdot J^3 + b_3 \cdot J^2 + c_3 \cdot J + d_3 = S \end{cases} \quad (6.46)$$

$$\begin{cases} a_4 \cdot H^3 + b_4 \cdot H^2 + c_4 \cdot H + d_4 = Q \\ a_4 \cdot I^3 + b_4 \cdot I^2 + c_4 \cdot I + d_4 = R \\ a_4 \cdot J^3 + b_4 \cdot J^2 + c_4 \cdot J + d_4 = S \\ a_4 \cdot K^3 + b_4 \cdot K^2 + c_4 \cdot K + d_4 = T \end{cases} \quad (6.47)$$

$$\begin{cases} a_5 \cdot I^3 + b_5 \cdot I^2 + c_5 \cdot I + d_5 = R \\ a_5 \cdot J^3 + b_5 \cdot J^2 + c_5 \cdot J + d_5 = S \\ a_5 \cdot K^3 + b_5 \cdot K^2 + c_5 \cdot K + d_5 = T \\ a_5 \cdot L^3 + b_5 \cdot L^2 + c_5 \cdot L + d_5 = U \end{cases} \quad (6.48)$$

$$\begin{cases} a_6 \cdot J^3 + b_6 \cdot J^2 + c_6 \cdot J + d_6 = S \\ a_6 \cdot K^3 + b_6 \cdot K^2 + c_6 \cdot K + d_6 = T \\ a_6 \cdot L^3 + b_6 \cdot L^2 + c_6 \cdot L + d_6 = U \\ a_6 \cdot M^3 + b_6 \cdot M^2 + c_6 \cdot M + d_6 = V \end{cases} \quad (6.49)$$

S-au obținut astfel 6 seturi de coeficienți, a_k , b_k , c_k și d_k , unde $k=1,6$. Calculând mediile aritmetice ale valorilor determinate pentru fiecare coeficient s-au obținut coeficienții finali care au stat la baza generării modelului matematic.

În tabelul 6.1 sunt prezentate valorile curentului de sudare înregistrate pentru fiecare scurtare a arcului, coeficienții determinați conform celor prezentate anterior, valorile curentilor de sudare obținute utilizându-se modelul matematic generat în formă polinomială și erorile dintre valorile înregistrate experimental și cele calculate cu modelul matematic.

Tabel 6.1

Viteza de avans al sârmei [m/min]	Scurtarea arcului de sudare [mm]	Curent de sudare - valoare înregistrată [A]	a	b	c	d	Curent de sudare - valoare calculată [A]	Eroare
1	0.5	95	-0,08	-0,36	10,40	90,11	95,21	0,22
	1	100					100,06	0,06
	1.5	103					104,61	1,57
	2	108					108,80	0,74
	2.5	114					112,55	-1,27
	3	118					115,82	-1,85
	3.5	120					118,53	-1,23
	4	123					120,63	-1,93
	4.5	130					122,04	-6,12
Model matematic: $I(\Delta l_a) = -0.08 \cdot \Delta l_a^3 - 0.36 \cdot \Delta l_a^2 + 10.40 \cdot \Delta l_a + 90.11$ (6.50)								
2	0.5	99	-0.76	-0.72	10.54	95.62	100,71	1,72
	1	105					105,38	0,37
	1.5	109					109,61	0,56
	2	113					113,34	0,30
	2.5	118					116,52	-1,26
	3	121					119,11	-1,56
	3.5	124					121,06	-2,37
	4	127					122,33	-3,68
	4.5	134					122,86	-8,31
Model matematic: $I(\Delta l_a) = -0.76 \cdot \Delta l_a^3 - 0.72 \cdot \Delta l_a^2 + 10.54 \cdot \Delta l_a + 95.62$ (6.51)								
99.75	0.5	108	-0.01	-0.50	11.04	99.75	105,15	-2,64
	1	112					110,28	-1,53
	1.5	116					115,15	-0,73
	2	119					119,74	0,62
	2.5	125					124,05	-0,76
	3	128					128,06	0,05
	3.5	131					131,77	0,59
	4	133					135,17	1,64
	4.5	140					138,26	-1,25

Model matematic: $I(\Delta l_a) = -0.01 \cdot \Delta l_a^3 - 0.50 \cdot \Delta l_a^2 + 11.04 \cdot \Delta l_a + 99.75$ (6.52)								
4	0.5	116	-0.01	-0.27	9.25	111.31	115,86	-0,12
	1	120					120,28	0,24
	1.5	124					124,56	0,45
	2	128					128,69	0,54
	2.5	133					132,66	-0,25
	3	136					136,48	0,35
	3.5	139					140,13	0,10
	4	142					143,62	1,14
	4.5	147					146,94	-0,04
Model matematic: $I(\Delta l_a) = -0.01 \cdot \Delta l_a^3 - 0.27 \cdot \Delta l_a^2 + 9.25 \cdot \Delta l_a + 111.31$ (6.53)								
5	0.5	122	0.01	-0.61	8.82	121.16	125,42	2,80
	1	127					129,38	1,87
	1.5	130					133,05	2,34
	2	135					136,44	1,06
	2.5	141					139,55	-1,03
	3	144					142,39	-1,12
	3.5	145					144,97	-0,71
	4	150					147,29	-1,80
	4.5	156					149,37	-4,25
Model matematic: $I(\Delta l_a) = 0.01 \cdot \Delta l_a^3 - 0.61 \cdot \Delta l_a^2 + 8.82 \cdot \Delta l_a + 121.16$ (6.54)								
6	0.5	125	-0.09	-0.39	8.70	124.17	128,41	2,73
	1	131					132,38	1,06
	1.5	134					136,02	1,50
	2	139					139,24	0,17
	2.5	144					141,98	-1,40
	3	147					144,16	-1,92
	3.5	150					145,72	-2,84
	4	154					146,58	-4,81
	4.5	159					146,67	-7,75
Model matematic: $I(\Delta l_a) = -0.09 \cdot \Delta l_a^3 - 0.39 \cdot \Delta l_a^2 + 8.70 \cdot \Delta l_a + 124.17$ (6.55)								
7	0.5	130	0.003	-0.31	8.03	131.66	135,59	4,30
	1	135					139,38	3,24
	1.5	140					143,01	2,15
	2	145					146,50	1,03
	2.5	149					149,84	0,56
	3	152					153,04	0,68
	3.5	154					156,10	1,36
	4	158					159,02	0,64
	4.5	163					161,81	-0,72
Model matematic: $I(\Delta l_a) = 0.003 \cdot \Delta l_a^3 - 0.31 \cdot \Delta l_a^2 + 8.03 \cdot \Delta l_a + 131.66$ (6.56)								

8	0.5	137	0.05	-0.71	10.77	133.83	139,05	1,49
	1	142					143,94	1,37
	1.5	148					148,56	0,38
	2	151					152,92	1,27
	2.5	157					157,07	0,05
	3	159					161,04	1,29
	3.5	162					164,87	1,77
	4	165					168,58	2,17
	4.5	170					172,21	1,30
Model matematic: $I(\Delta l_a) = 0.05 \cdot \Delta l_a^3 - 0.71 \cdot \Delta l_a^2 + 10.77 \cdot \Delta l_a + 133.83$ (6.57)								
9	0.5	145	0.06	-0.33	14.15	129.03	136,03	-6,19
	1	147					142,91	-2,78
	1.5	152					149,73	-1,50
	2	155					156,51	0,97
	2.5	164					163,31	-0,42
	3	166					170,19	2,52
	3.5	170					177,17	4,22
	4	171					184,31	7,79
	4.5	179					191,66	7,07
Model matematic: $I(\Delta l_a) = 0.06 \cdot \Delta l_a^3 - 0.33 \cdot \Delta l_a^2 + 14.15 \cdot \Delta l_a + 129.03$ (6.58)								
10	0.5	156	0.05	-0.12	12.68	141.16	147,47	-5,47
	1	158					153,77	-2,68
	1.5	162					160,07	-1,19
	2	164					166,42	1,48
	2.5	175					172,86	-1,22
	3	177					179,41	1,36
	3.5	181					186,12	2,83
	4	183					193,01	5,47
	4.5	186					200,12	7,59
Model matematic: $I(\Delta l_a) = 0.05 \cdot \Delta l_a^3 - 0.12 \cdot \Delta l_a^2 + 12.68 \cdot \Delta l_a + 141.16$ (6.59)								

În figura 6.15 sunt prezentate grafic aceste modele matematice:

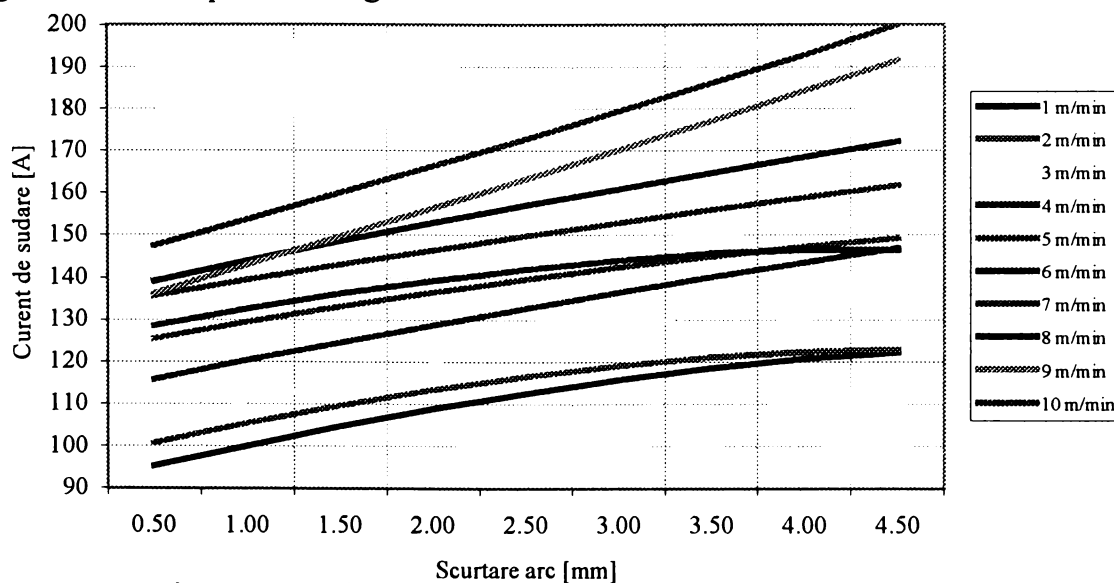


Fig. 6.15 Variația curentului de sudare la scurtarea arcului

Condițiile în care au fost efectuate înregistrările sunt:

- material de bază S355, SR EN 10025
- materiale de adaos: sârmă G3Si1-SR EN440, gaz de protecție M21-SR EN 439
- diametru sârmă: 1.2 mm
- lungimea capătului liber: 17-18 mm

6.6.1.2 Determinarea lungimii arcului pentru un set de puncte ale traiectoriei

Pentru un rost V având dimensiunile din figura 6.16 s-au calculat cotele pe verticală de la suprafața rostului până la capătul sârmei de sudare (figura 6.17).

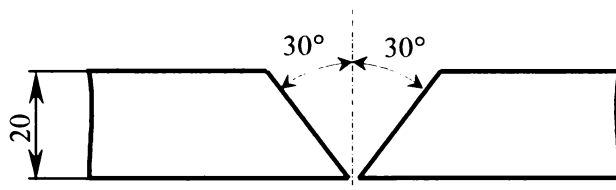


Fig. 6.16 Forma și dimensiunile rostului de sudare utilizat în calcularea valorilor momentane ale curenților de sudare pe traiectorie

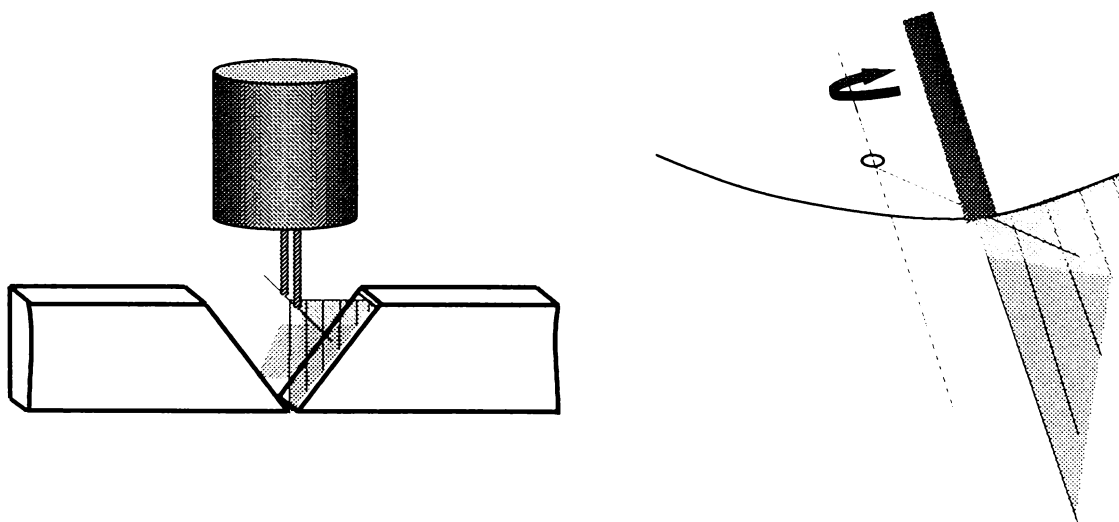


Fig. 6.17 Cotele pe verticală ale capetelor sârmelor de sudare

Fiecare traiectorie obținută cu frecvențe cuprinse între 1-9 Hz a fost împărțită în 10 părți egale obținându-se astfel 11 puncte de măsurare a cotei. Împărțirea a fost efectuată nu geometric ci în timp, fiecare eșantion fiind achiziționat la momentul:

$$t_k = \frac{T}{11} \cdot k \quad (6.60)$$

unde:

- t_k – durata dintre două eșantionări consecutive [s]
- T – perioada de oscilare a capului de sudare [s]
- k – numărul de eșantioane ($k=11$)

S-au obținut astfel 11 seturi de parametri cărora li s-a atașat valoarea curentului de sudare obținută pentru scurtarea sau lungirea arcului respectiv (vezi 6.6.1.1). Figura 6.18 prezintă aceste seturi de parametri.

Valorile curentului de sudare astfel obținute vor fi comparate cu valorile reale corespunzătoare momentelor $t_k, k = 0,10$.

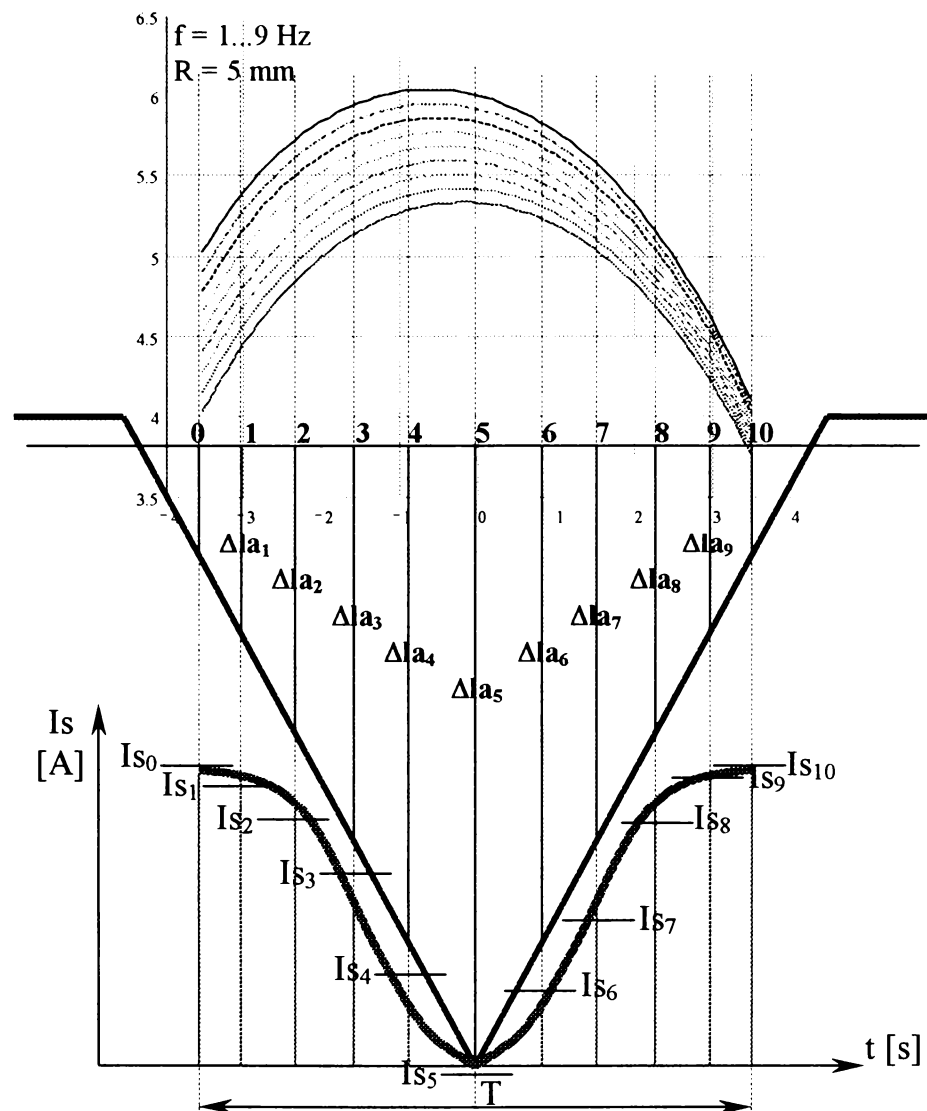


Fig. 6.18 Dispunerea valorilor momentane al curentului de sudare pe traiectorie

6.6.1.3 Determinarea coeficienților seriei Fourier reprezentarea grafică a seriei și compararea cu înregistrarea valorilor efective reale

Cunoscând 11 din valorile curbei de curent este posibilă determinarea prin extrapolare și a altor valori de pe curbă necesare calculării cu precizie ridicată a coeficienților seriei Fourier. Acest calcul se realizează conform metodei prezentate la capitolul 5. Utilizând expresia generală a seriei Fourier se generează seria corespunzătoare curentului de sudare mediu utilizat. Reprezentarea grafică a acestei serii este relativ simplu de realizat utilizând o foaie de calcul tabelar de tip Excel sau un program dedicat proiectării matematice de tip MathCad.

Înregistrarea on-line a valorilor momentane este posibilă cu orice frecvență mai mare decât $f = \frac{11}{T}$. Este mult mai simplu ca frecvența de eșantionare și înregistrare să fie multiplu de 11. În caz contrar vor trebui identificate pe grafic acele valori ale curentului de sudare care au avut loc în momentele t_0, t_1, \dots, t_{10} , deoarece aceste valori trebuie comparate cu valorile de referință cunoscute a priori.

6.6.2 Stabilirea sensului de deviere a capului de sudare

În cazul în care planul celor două sârme de sudare nu se găsește în axa rostului ci pe una din fețele laterale ale rostului, sistemul de monitorizare va înregistra scăderea valorii

curentului și va comanda deplasarea capului de sudare în vederea corecției poziției acestuia. Întrebarea care se naște acum este: cum se determină sensul în care trebuie efectuată corecția?

În figura 6.19 se observă că pozițiile A și B, de deviere de la poziția corectă, sistemul înregistrează aceleași scurtări ale arcului și implicit aceleași modificări ale curentului de sudare. Cum va recunoaște, în acest caz, sistemul de control sensul în care a avut loc devierea pentru a putea face corecția necesară?

Pentru stabilirea sensului de deviere a capului de sudare se propune un model matematic și o serie de metode practice facil de aplicat în cazul în care introducerea modelului matematic în modelul general de funcționare a sensorului întâmpină dificultăți.

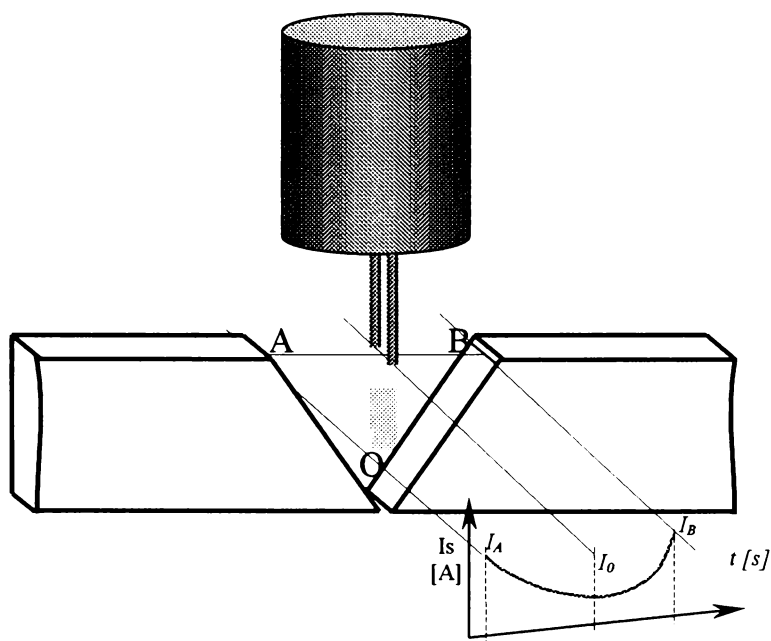


Fig. 6.19 Variația curentului de sudare la modificarea poziției capului de sudare

6.6.2.1 Model matematic pentru stabilirea sensului de deviere a capului de sudare

Pornind de la teoria dezvoltării în serie Fourier /4/ care a stat la baza creării modelului matematic al variației curentului de sudare prezentat în capitolul 5 este posibilă modelarea matematică a sensului de deplasare a capului de sudare în timpul oscilării transversale pe rost. Existența sumei de termeni de forma $\cos nt$ și $\sin nt$ în expresia (6.61) sugerează posibilitatea de a se deduce o formă complexă a seriei folosind relația (6.62).

$$f(t) = \frac{1}{2} \cdot a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cdot \cos nt + b_n \cdot \sin nt) \tag{6.61}$$

$$\cos \theta + j \cdot \sin \theta = \exp(j \cdot \theta) \tag{6.62}$$

Considerând termenul drept al expresiei (6.61), $a_n \cdot \cos\left(nt \cdot \frac{2\pi}{T}\right) + b_n \cdot \sin\left(nt \cdot \frac{2\pi}{T}\right)$ se poate scrie:

$$a_n \cdot \cos\left(nt \cdot \frac{2\pi}{T}\right) + b_n \cdot \sin\left(nt \cdot \frac{2\pi}{T}\right) = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T} \cdot nt - \varphi_n\right) \tag{6.62}$$

unde $\text{tg} \varphi_n = \frac{b}{a_n}$. Rezultă, deci, forma complexă a termenului:

$$a_n \cdot \cos\left(nt \cdot \frac{2\pi}{T}\right) + b_n \cdot \sin\left(nt \cdot \frac{2\pi}{T}\right) = \frac{1}{2} \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \cdot \left\{ \exp\left[j \cdot \left(\frac{2\pi}{T} \cdot nt - \varphi_n\right)\right] + \exp\left[-j \cdot \left(\frac{2\pi}{T} \cdot nt - \varphi_n\right)\right] \right\} \quad (6.63)$$

În ipoteza că n poate avea și valori negative este evident că:

$$\begin{cases} a_{-n} = a_n \\ b_{-n} = -b_n \\ \varphi_{-n} = -\varphi_n \end{cases} \quad (6.64)$$

situație în care expresia (6.63) devine:

$$a_n \cdot \cos\left(nt \cdot \frac{2\pi}{T}\right) + b_n \cdot \sin\left(nt \cdot \frac{2\pi}{T}\right) = \frac{1}{2} \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \cdot \left\{ \exp\left[j \cdot \left(\frac{2\pi}{T} \cdot nt - \varphi_n\right)\right] + \exp\left[-j \cdot \left(\frac{2\pi}{T} \cdot (-n) \cdot t - \varphi_{-n}\right)\right] \right\} \quad (6.65)$$

Din relațiile (6.64) și (6.65) rezultă succesiv pentru cazul particular al variației curentului de sudare:

$$I(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[\frac{1}{2} \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \cdot \exp\left[j \cdot \left(\frac{2\pi}{T} \cdot nt - \varphi_n\right)\right] \right] \quad (6.66)$$

$$I(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[\underbrace{\frac{1}{2} \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \cdot \exp[-j \cdot \varphi_n]}_{I_n} \cdot \exp\left[j \cdot \frac{2\pi}{T} \cdot nt\right] \right] \quad (6.67)$$

Funcția I_n mai poate fi scrisă și sub forma:

$$I_n = \frac{1}{T} \cdot \int_{t_0}^{t_0+T} \left[I(t) \cdot \exp\left(-j \cdot \frac{2\pi}{T} \cdot nt\right) \right] dt \quad (6.68)$$

Admițând că perioada este determinată de frecvența oscilației capului de sudare transversal pe rostul de sudare, se poate scrie:

$$\frac{2\pi}{T} \cdot n \cdot t = \omega \cdot t \quad (6.69)$$

unde ω reprezintă viteza unghiulară cu care este rotit capul de sudare.

Așadar, din relațiile (6.66), (6.67), (6.68) și (6.69) rezultă expresia spectrului de frecvențe al undei de curent:

$$I(f) = \int_{-\infty}^{\infty} [I(t) \cdot \exp(-j \cdot \omega \cdot t)] dt \quad (6.70)$$

expresie care reprezintă chiar transformata complexă Fourier a undei de curent, generată de oscilația ω . Pentru a prezenta grafic spectrul de frecvențe al undei de curent trebuie construite practic două grafice reprezentând coeficienții transformatei complexe:

$$I(f) = a(f) + j \cdot [-b(f)] \quad (6.71)$$

sau

$$I(\omega) = a(\omega) + j \cdot [-b(\omega)] \quad (6.72)$$

fiindcă transformata este mult mai accesibilă prezentată în funcție de un parametru fizic ușor de controlat cum este viteza unghiulară a capului de sudare. Cei doi coeficienți ai transformatei complexe sunt:

$$\begin{cases} a(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} I(t) \cdot \cos \omega t dt & (6.73) \\ b(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} I(t) \cdot \sin \omega t dt & (6.74) \end{cases}$$

Reprezentarea grafică a celor doi coeficienți în sistem Argand ($b=f(a)$) permite și determinarea sensului în care se deplasează capul de sudare prin unghiul de fază:

$$\alpha = \frac{-b(\omega)}{a(\omega)} \quad (6.75)$$

Acest model poate fi utilizat în analiza momentană a stării sistemului de monitorizare și în diagnosticarea diferitelor abateri de la funcționarea continuă a senzorului-arc.

6.6.2.2 Metode practice de stabilire a sensului de deviere a capului de sudare față de poziția prescrisă

Pentru a stabili sensul în care a avut loc devierea de la axa rostului (la stânga sau la dreapta axei rostului) se propun trei metode de determinare și anume:

- compararea duratei dintre două extreme succesive ale funcției de variație a curentului de sudare $I_s(A)$;
- compararea a două maxime succesive ale funcției de variație a curentului de sudare $I_s(A)$;
- compararea valorilor medii calculate între un maxim și un minim succesive.

Utilizarea acestora este posibilă dacă se cunoaște în fiecare moment sensul în care se deplasează capul de sudare în mișcarea sa de oscilare. Utilizarea unui senzor optic poate face cunoscut momentul când capul de sudare a ajuns în poziția limită pe unul din flancuri.

Pentru cunoașterea sensului de deplasare a capului de sudare în mișcarea de oscilare trebuie programat sistemul de monitorizare și control să înceapă oscilarea dintr-una din pozițiile limită, dreapta sau stânga și să emită câte un semnal analogic pentru fiecare moment $t_k=t_0+kT$ (figura 6.20).

Dacă deplasarea începe de pe flancul drept al rostului în direcția de sudare, atunci se va ști că după fiecare semnal la momentul $t_k=t_0+2kT$ capul va oscila spre stânga față de axa de oscilare.

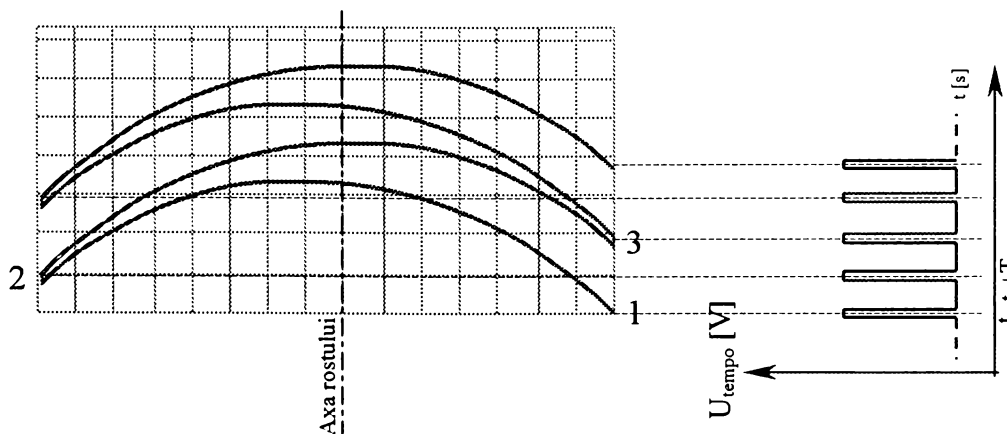


Fig. 6.20 Emiterea semnalului de tempo pentru recunoașterea momentului de început al fiecărui ciclu de oscilare

- **Compararea duratei dintre două extreme succesive ale funcției de variație a curentului de sudare**

Se presupune că în timpul funcționării senzorului-arc, inițial axa de oscilare este suprapusă cu axa rostului. Forma undei de curent prin arc este cea din figura 6.21. Suprapunând această curbă cu graficul de emiterie în timp a pulsurilor de determinare a sensului de deplasare, conform capitolului 6.6.2.1, rezultă reprezentarea grafică a statutului de funcționare a senzorului-arc în axa rostului.

Înregistrările curentului de sudare efectuate în diferite poziții ale axei de oscilare a capului de sudare au evidențiat că pentru o abatere geometrică translațională cu dimensiunea x de la axa rostului, conduce la modificarea curbei de curent conform figurii 6.22.

Se poate observa ca există atât modificări ale curentului de sudare cât și modificări ale duratelor dintre două maxime succesive. Această din urmă variație este explicată prin parcurgerea fizică a două spații diferite de o parte și de alta a axei rostului de sudare.

Cele două modificări oferă informații atât privind dimensiunea abaterii de la axa rostului cât și sensul, spre stânga sau spre dreapta, în care a avut loc aceasta. Analiza acestor informații permite determinarea momentană a poziției capului de sudare precum și parametrii geometrici și cinematici ai procesului de corecție a acestei poziții în cazul eventualelor abateri.

Determinând poziția în timp a extremelor, s-a observat că, în cazul abaterii axei de oscilare de la axa rostului, există o modificare a duratei dintre două extreme succesive (figura 6.16).

Când durata dintre un minim și un maxim este maximă, atunci capul de sudare se găsește în partea opusă axei rostului față de axa de oscilare și invers. Dacă este controlat tactul de începere a fiecărei oscilații, conform celor prezentate în figura 6.23 este evident că:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{a. Oscilare în axa rostului: } \Delta T = T_1 - T_2 = 0 \\ \text{b. Oscilare deplasat dreapta: } \Delta T = T_1 - T_2 > 0 \\ \text{c. Oscilare deplasat stânga: } \Delta T = T_1 - T_2 < 0 . \end{array} \right.$$

- **Compararea a două maxime succesive ale funcției de variație a curentului de sudare $I_s(A)$**

Modificarea lungimii arcului în timpul oscilării capului de sudare transversal pe rost dă naștere, conform celor prezentate în capitolele anterioare la variația curentului de sudare. Această variație prezintă o înșiruire de maxime și minime care pot fi approximate printr-o cosinusoidă echilibrată sau dezechilibrată.

În cazul în care oscilarea are loc în axa rostului, maximele sunt egale ca valoare, iar cosinusoida evoluează echilibrat. În cazul în care axa de oscilare nu coincide cu axa rostului atunci cosinusoida se dezechilibrează, maximele având valori diferite.

Comparând două maxime succesive este posibilă stabilirea existenței unei abateri de la poziția de referință și sensul în care a avut loc aceasta. Este necesară însă emiteria de impulsuri de tempo pentru controlarea începerii fiecărei oscilații. Conform celor prezentate în figura 6.23 este evident că:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{a. Oscilare în axa rostului: } \Delta I_{\max} = I_A - I_D = 0 \\ \text{b. Oscilare deplasat dreapta: } \Delta I_{\max} = I_A - I_D > 0 \\ \text{c. Oscilare deplasat stânga: } \Delta I_{\max} = I_A - I_D < 0 . \end{array} \right.$$

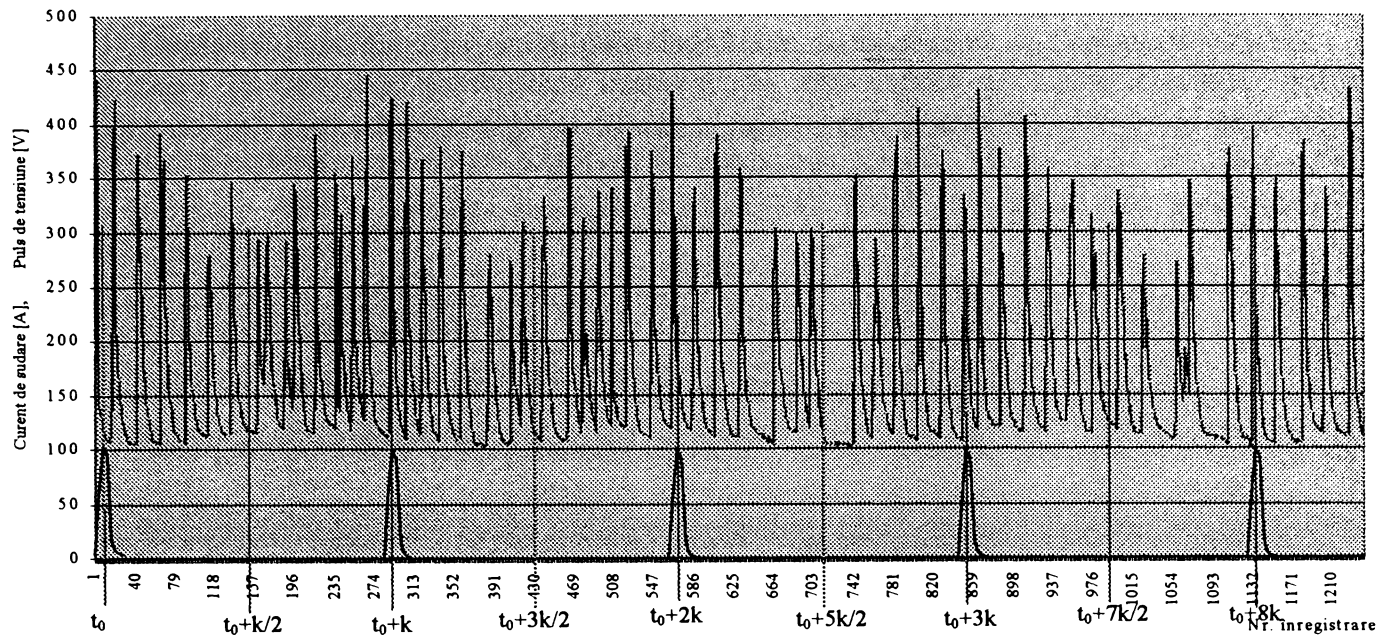


Fig. 6.21 Curentul de sudare la oscilare în axa rostului și emiterea pulsurilor de tempo

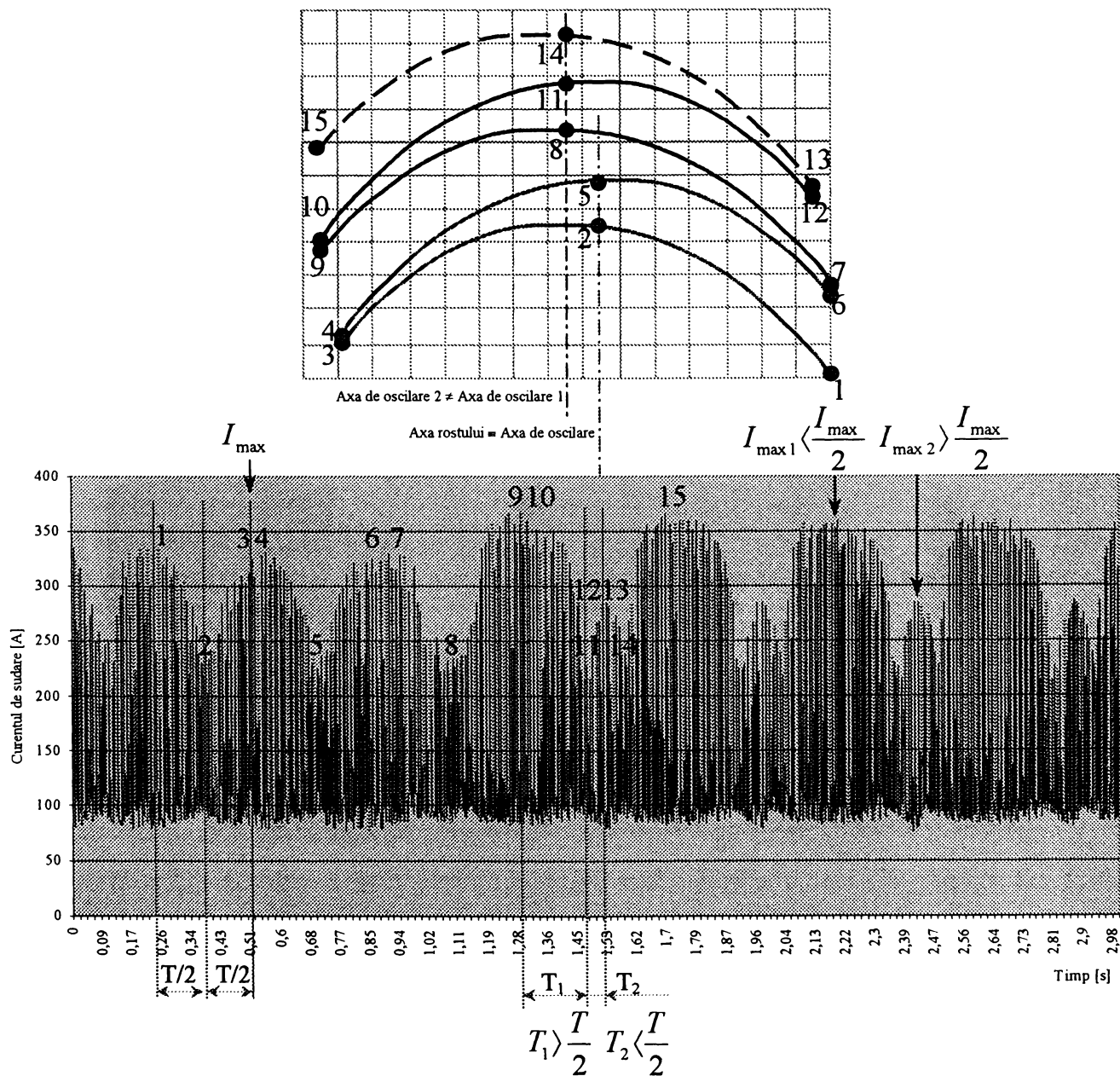


Fig. 6.22 Variația curentului de sudare la oscilarea cu abaterea x față de axa rostului

• **Compararea valorilor medii calculate între un maxim și un minim succesive**

În cazul în care axa de oscilare coincide cu axa rostului de sudare, atunci media curenților mășurați între un maxim și un minim succesive este constantă în timp. În cazul unei cosinusoide dezechilibrată media calculată la coborârea arcului de pe unul din flancurile rostului diferă de media calculată la urcarea pe celălalt flanc. Conform celor prezentate în figura 6.17 este evident că:

- a. Oscilare în axa rostului: $\Delta I_{med} = I_B - I_C = 0$
- b. Oscilare deplasat dreapta: $\Delta I_{med} = I_B - I_C > 0$
- c. Oscilare deplasat stânga: $\Delta I_{med} = I_B - I_C < 0$.

La fiecare din cele trei metode practice prezentate este necesară utilizarea unui semnal de tempo pentru cunoașterea cu precizie a începutului fiecărei oscilări în parte. Recomandată este, însă, folosirea modelului matematic, deoarece o dată cu efectuarea calculelor pentru determinarea variației curentului de sudare, sistemul de control poate efectua și calculele pentru stabilirea sensului de deplasare și deci de deviere a capului de sudare de la pozițiile de referință.

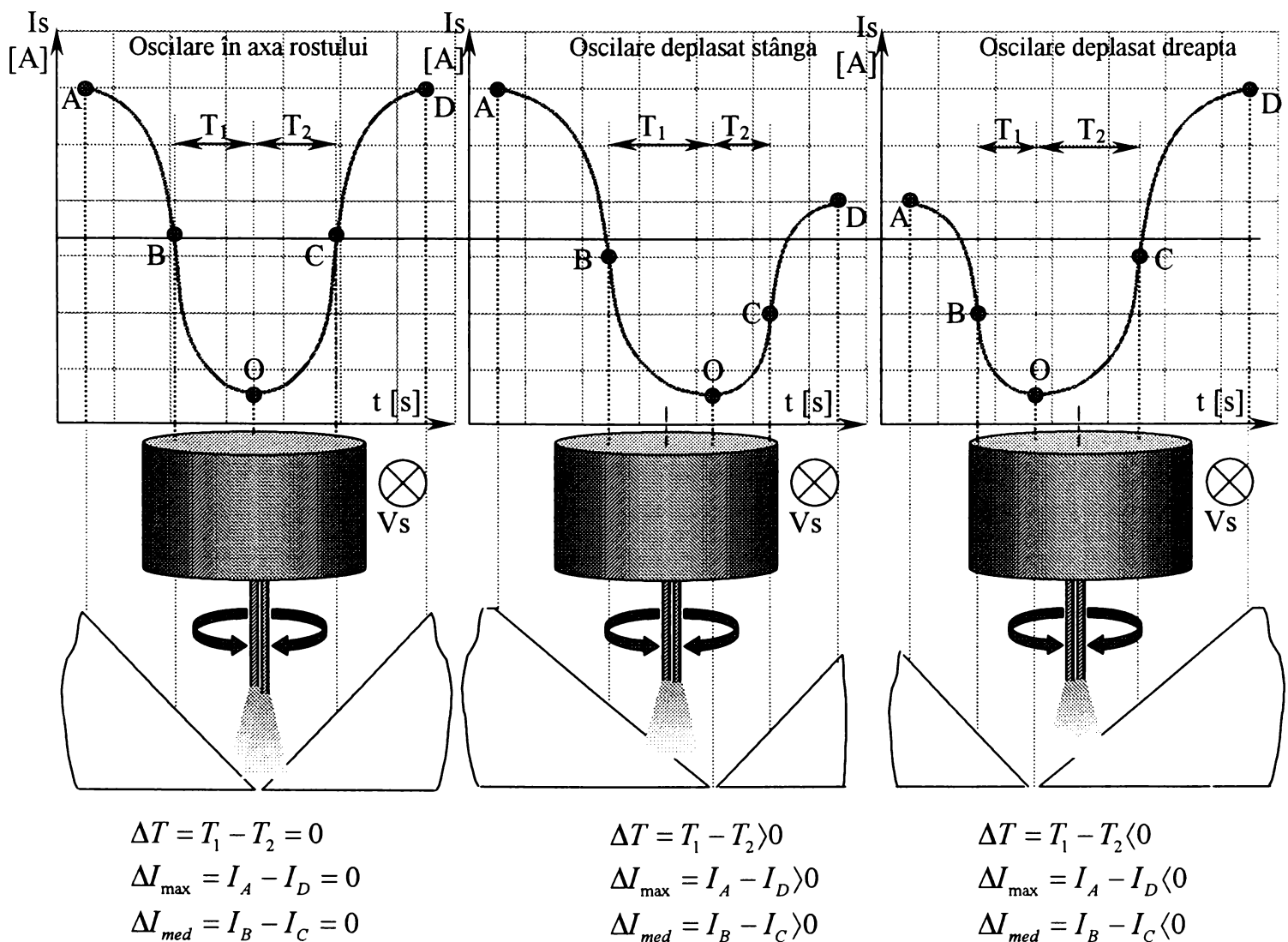


Fig. 6.23 Stabilirea sensului de deviere a capului de sudare față de axa rostului

Este evidentă posibilitatea impunerii unei devieri, cu o anumită valoare, a axei de oscilare față de axa rostului de sudare, situație reală în practica sudării prin mai mult treceri. Corecțiile care trebuie efectuate însă, sunt mult prea laborioase în acest caz. Se recomandă, pentru treceri paralele cu axa rostului, înregistrarea on-line a variațiilor curenților de sudare pentru axa rostului și corectarea acestor variații cu o scurtare sau o lungire a arcului de sudare specifică unei abateri impuse. În acest fel este posibilă reducerea numărului de operații pe care trebuie să le efectueze sistemul de control în unitatea de timp, în timp real.

6.7 Erori de funcționare a senzorului

Sistem fizic cu aplicație tehnică, senzorul-arc funcționează imperfect. Există o serie de perturbatori care pot introduce erori în funcționarea sa. Fără intenția de a se pătrunde în detaliile teoriei erorilor, se dorește expunerea a două situații practice studiate în tipul testelor de verificare a senzorului:

- eroarea dată de trecerea celui de-al doilea arc peste metalul depus de către prima sârmă;
- eroarea dată de neconformitatea parametrilor geometrici ai mișcării capului de sudare

Procesul de corectare a poziției capului de sudare funcționează conform algoritmului prezentat în figura 6.24.

Semnalele achiziționate (curenții de sudare reali prin sârme) sunt prelucrate prin metodele prezentate în cuprinsul prezentului capitol. Rezultă astfel două semnale având forme acceptabile din punct de vedere al procesului de comparare cu semnalele de referință.

Pornind de la datele de intrare ale sistemului senzor-arc și anume:

1. Parametrii geometrici ai sistemului de sudare cu 2 sârme:

- distanța dintre sârme
- sârme paralele/neparalele
- diametre identice/diferite
- lungime capete libere

2. Parametrii geometrici ai oscilării capului de sudare

- frecvența de oscilare
- unghiul efectuat de planul sârmelor
- distanța de la capetele sârmelor la baza rostului

3. Parametrii geometrici ai rostului de sudare

- grosime table
- unghi deschidere
- umăr rost
- deschidere rost

4. Parametrii tehnologici ai procesului de sudare

- curenți de sudare
- tensiunile arcelor
- viteza de sudare

În baza modelelor matematice prezentate în capitolul 5 se determină cele două curbe de referință care vor participa la procesul de comparare. Etajul de comparare determină valorile care vor fi comparate și oferă semnalul rezultat prin diferență. Semnalul prin diferență, provenind de la compararea curentului prin prima sârmă, comandă un motor pas cu pas care modifică poziția planului celor două sârme prin translație după o axă perpendiculară pe axa rostului de sudare. Semnalul prin diferență, provenind de la compararea curentului prin a doua sârmă, comandă un motor pas cu pas care modifică unghiul dintre planul celor două sârme și axa rostului de sudare.

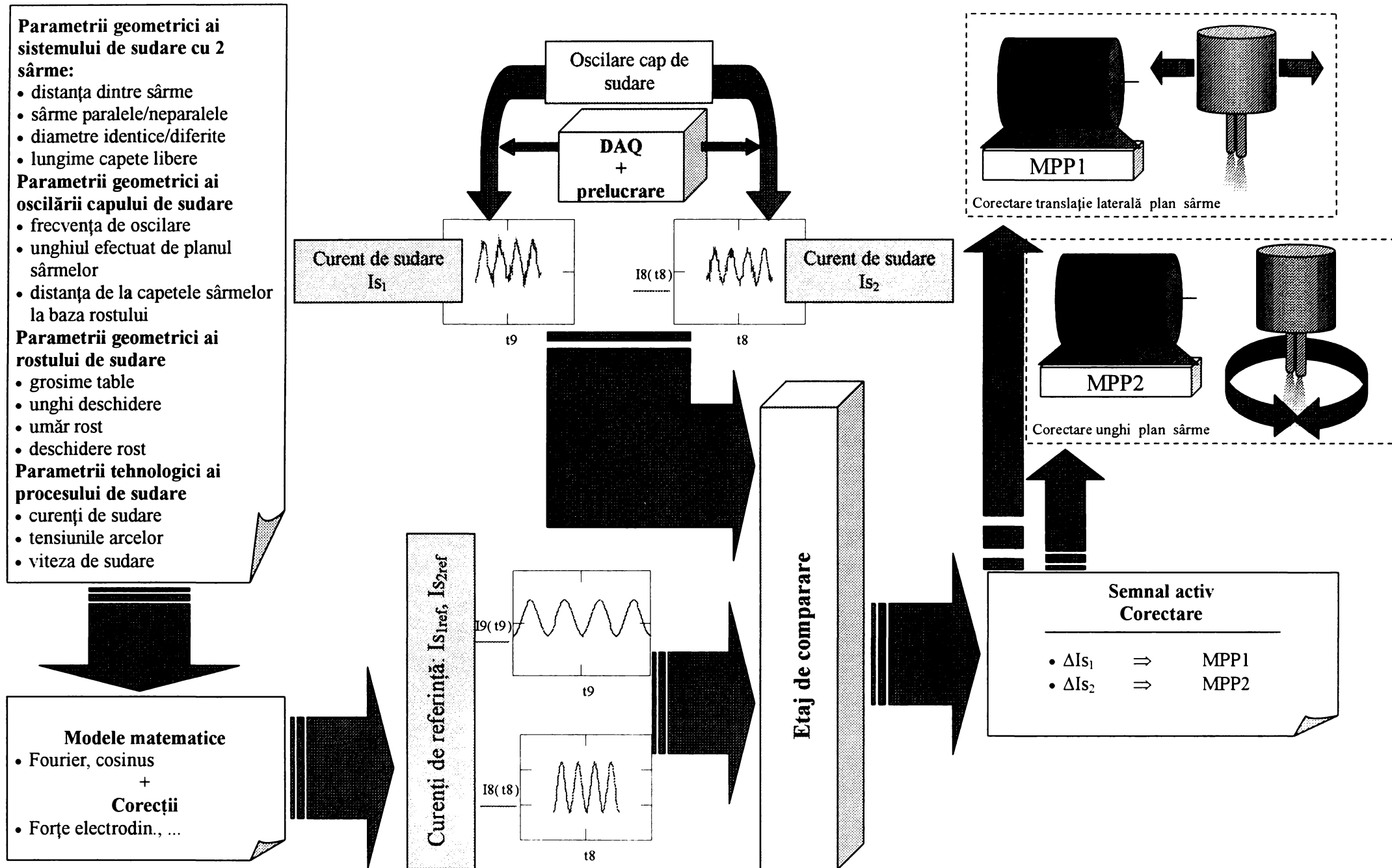


Fig. 6.24 Schema algoritmului de funcționare a senzorului

Modificarea accidentală a unuia dintre parametrii de intrare conduce la funcționarea cu o eroare crescută a senzorului-arc.

6.7.1 Eroarea dată de trecerea celui de-al doilea arc peste metalul depus de către prima sârmă

Modul de oscilare a capului de sudare transversal pe rost implică trecerea celui de-al doilea arc peste metalul depus de prima sârmă. Efectul constă într-o scurtare suplimentară a celui de-al doilea arc, scurtare care conduce la corectarea eronată a unghiului dintre planul sârmelor și axa rostului de sudare.

Pentru corectarea acestei erori este necesară determinarea înălțimii depunerii realizate de către prima sârmă la un ciclu de oscilare. Cuantificarea acestui parametru geometric este relativ simplă. Modelul matematic utilizat ca operator se construiește pe baza condiției ca volumul de metal depus în rost să fie egal cu volumul de metal transferat de la sârmă către baie. Pierderea de metal prin stropire poate fi stabilită cu o bună aproximare la valoarea de 5% din volumul de metal topit.

Acceptând notațiile din figura 6.25 se poate scrie:

$$x = (h - c) \cdot \operatorname{tg} \alpha \quad (6.76)$$

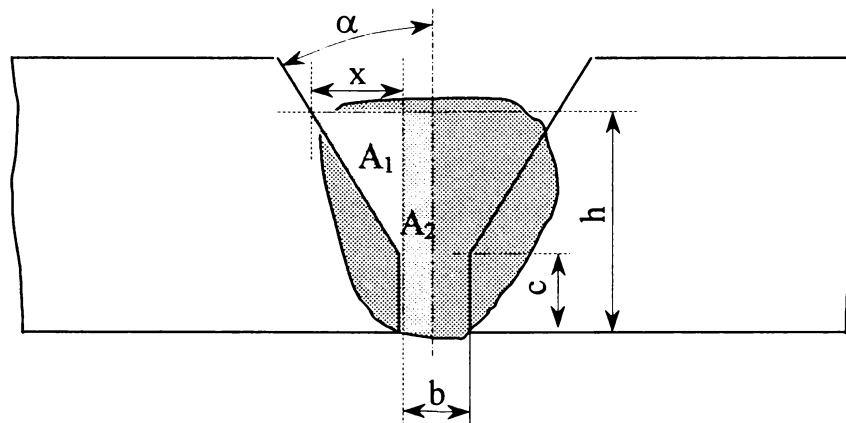


Fig. 6.25 Model fizic pentru calcularea volumului de metal depus de către prima sârmă

Succesiv, din rațiuni geometrice, se poate deduce aria secțiunii transversale a depunerii prin sudare:

$$A_1 = (h - c)^2 \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{\alpha}{2} \right) \quad (6.77)$$

$$A_2 = \frac{h \cdot b}{2} \quad (6.78)$$

$$A_{\text{depunere}} = 2 \cdot (A_1 + A_2) = h \cdot b + h^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha - 2 \cdot h \cdot c \cdot \operatorname{tg} \alpha + c^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha \quad (6.79)$$

Condiția ca volumul de metal depus în rost să fie egal cu volumul de metal transferat de la sârmă către baie este:

$$V_{\text{depunere} / \text{unit. timp}} = V_{\text{topit} / \text{unit. timp}} \quad (6.80)$$

Volumul de metal depus în unitatea de timp se exprimă prin relația:

$$V_{\text{depunere} / \text{unit. timp}} = A_{\text{depunere}} \cdot v_{\text{sudare} / \text{unit. timp}} \quad (6.81)$$

$$V_{\text{depunere}} = (h \cdot b + h^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha - 2 \cdot h \cdot c \cdot \operatorname{tg} \alpha + c^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha) \cdot v_{\text{sudare} / \text{unit. timp}} \quad (6.82)$$

Volumul de metal topit în unitatea de timp se exprimă prin relația:

$$V_{\text{topit} / \text{unit. timp}} = v_{\text{avans-sarma}} \cdot \frac{\pi \cdot \phi_{\text{sarma}}^2}{4} \quad (6.83)$$

Din relațiile (6.80), (6.82) și (6.83) rezultă:

$$\left(h \cdot b + h^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha - 2 \cdot h \cdot c \cdot \operatorname{tg} \alpha + c^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha \right) \cdot v_{\text{sudare / unit. timp}} = v_{\text{avans-sarma}} \cdot \frac{\pi \cdot \phi_{\text{sarma}}^2}{4} \quad (6.84)$$

relație care poate fi pusă sub forma unei ecuații de gradul al doilea având drept necunoscută înălțimea h a depunerii:

$$h^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha - h \cdot (2 \cdot c \cdot \operatorname{tg} \alpha - b) + \left(c^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha - \frac{v_{\text{avans-sarma}}}{v_{\text{sudare / unit. timp}}} \cdot \frac{\pi \cdot \phi_{\text{sarma}}^2}{4} \right) = 0 \quad (6.85)$$

Discriminantul ecuației este:

$$\Delta = (2 \cdot c \cdot \operatorname{tg} \alpha - b)^2 - 4 \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \left(c^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha - \frac{v_{\text{avans-sarma}}}{v_{\text{sudare / unit. timp}}} \cdot \frac{\pi \cdot \phi_{\text{sarma}}^2}{4} \right) \quad (6.86)$$

iar rădăcinile sunt:

$$h_{1,2} = \frac{(2 \cdot c \cdot \operatorname{tg} \alpha - b) \pm \sqrt{(2 \cdot c \cdot \operatorname{tg} \alpha - b)^2 - 4 \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \left(c^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha - \frac{v_{\text{avans-sarma}}}{v_{\text{sudare / unit. timp}}} \cdot \frac{\pi \cdot \phi_{\text{sarma}}^2}{4} \right)}}{2 \cdot \operatorname{tg} \alpha} \quad (6.87)$$

De valorile înălțimii depunerii la o trecere în timpul oscilării trebuie să se țină cont în interpretarea variației curentului de sudare din timpul funcționării senzorului arc. În caz contrar, corectarea unghiului dintre planul celor două sârme și axa rostului de sudare va fi efectuată eronat. Este evident că eroarea este proporțională cu viteza de deplasare a sârmei, deci proporțională cu frecvența de oscilare a capului de sudare.

6.7.2 Eroarea dată de neconformitatea parametrilor geometrici ai mișcării capului de sudare

Modulul forțelor electrodinamice, scurtarea arcului și fenomenul de “preîncălzire” a celei de-a doua sârme sunt principalele elemente din funcționarea senzorului-arc direct dependente de distanța dintre cele două sârme. Scurtarea arcelor este, de asemenea, direct dependentă de unghiul cu care este rotit capul de sudare.

Aceste două elemente geometrice, distanța dintre cele două sârme și unghiul de rotire al capului de sudare, devin astfel doi parametri care pot introduce erori în funcționarea senzorului-arc. Pe lângă acești doi parametri a căror influență este determinabilă analitic, experiența a demonstrat și existența unui al treilea parametru. Mult mai dificil de controlat, excentricitatea e dintre axa de rotire a capului de sudare și axa imaginară situată la jumătatea distanței dintre cele două sârme și conținută în planul acestora (figura 6.26) este o problemă practică generală a senzorilor-arc.

Această excentricitate introduce amplitudini de oscilare diferite, deci scurtări de arce diferite. Aceasta înseamnă variații ale curenților prin sârme, în timpul oscilării, diferite.

Realizarea fizică a unei identități stricte între cele două axe, cea de rotire și cea de simetrie a sistemului de sârme, este relativ dificilă. Tehnica actuală permite acest lucru, dar exploatarea ulterioară conduce în scurt timp la decalarea spațială a celor două axe.

Este dificil de precizat când poate apare o astfel de eroare și care este amplitudinea ei. În cazul sudării robotizate, cazul specific al experimentărilor de sudare efectuate în cadrul lucrării pentru verificarea senzorului-arc, această eroare a fost minimă datorită alegerii sistemului de coordonate al robotului la jumătatea distanței dintre capetele celor două sârme. În acest fel s-a reușit orientarea axei de rotire a capului de sudare după o axă paralelă cu cele două sârme, situată în planul sârmelor și trecând printr-un punct situat la jumătatea distanței dintre capetele celor două sârme.

Unghiul de rotire a capului de sudare determină distanța parcursă de sârmele de sudare după direcția perpendiculară pe axa rostului, în plan orizontal (figura 6.27).

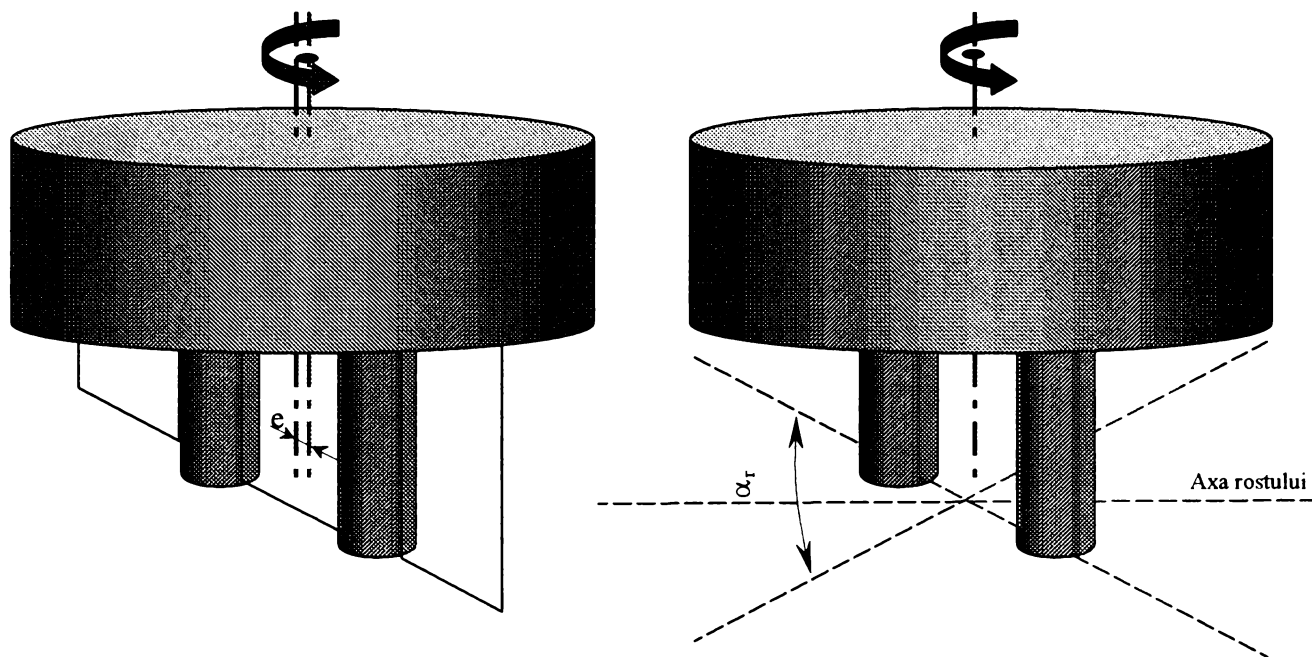


Fig. 6.26 Excentricitatea axei de rotire Fig. 6.27 Unghiul de rotire a capului de sudare

Astfel este creată o anumită scurtare a arcului dependentă de raza de oscilare și de unghiul de oscilare.

În anexa 6.1 sunt prezentate valorile calculate și valorile determinate experimental pentru scurtările arcelor. Se poate observa că pentru o modificare a distanței dintre cele două sârme cu 1 mm, modificarea scurtării are cam aceeași valoare, ~1 mm, la un unghi de oscilare de 90°. Dacă unghiul de oscilare se modifică accidental cu până la 10°, scurtarea arcului se modifică și ea cu aproximativ 0.5 mm.

Considerând eroarea totală ca fiind o înseriere a erorilor prezentate, se poate constata că aceasta capătă valori nepermis de mari. Calcule simple demonstrează posibilitatea existenței unor erori a căror valoare este egală cu aproximativ 50%. Considerarea unei erori medii de 20% conduce la modificarea domeniului de variație a curentului de sudare de la 40-60 A la 30-70 A, evident diferența fiind informație falsă pentru senzorul-arc.

Eroarea se va propaga și în etajul de comparare, iar rezultatul, care stă la baza corectării poziției capului de sudare va comanda eronat această operație.

7

Program pentru calcularea parametrilor de funcționare a unui senzor-arc la sudarea cu două sârme

Un sistem senzor-arc pentru urmărirea traiectoriei de sudare este compus dintr-o componentă fizică și o componentă program. În timp ce componenta fizică asigură totalitatea acțiunilor fizice specifice funcționării senzorului-arc, componenta program asigură determinarea prin calcul a parametrilor de funcționare și, în baza rezultatelor obținute, comanda componentei fizice.

Monitorizând în timp real ieșirile sistemului de achiziție a datelor, componenta program preia valorile discrete oferite de acesta, le prelucrează conform unor algoritmi prestabiliți și le introduce în etajul de comparare. În general, dezvoltările software din ultimii ani înlocuiesc sistemele fizice de comparare cu sisteme de calcul digital. Aceste sisteme funcționează în baza unor algoritmi simpli de comparare discretă a două semnale. Rolul etajului digital de comparare este de a suprapune în timp real valorile corespondente ale unui semnal discret achiziționat și ale unui semnal de referință. Semnalul de referință este construit de componenta program a sistemului senzor-arc în baza unui algoritm care modelează forma semnalului achiziționat. Semnalul prin diferență obținut în urma comparării este utilizat la comanda sistemelor fizice de poziționare spațială a capului de sudare.

În figura 6.24 s-a prezentat schematic algoritmul parțial de funcționare a componentei program a senzorului-arc la sudarea cu două sârme. Se precizează “parțial”, deoarece există subprograme auxiliare care realizează calcule și acțiuni altele decât cele tratate în cadrul prezentei lucrări. Un exemplu sugestiv este subprogramul de menținere constantă a distanței dintre capul de sudare și piesele de sudat. Acest subprogram funcționează după un algoritm asemănător celor prezentate în cadrul lucrării.

În continuare este prezentată componenta program a senzorului-arc dedicată calculării principalilor parametri de funcționare a senzorului-arc.

7.1 Prezentarea generală a aplicației

Aplicația este dezvoltată în limbajul Visual Basic fiind orientată către determinarea în baza algoritmului Fourier a semnalului de referință și compararea discretă a acestuia cu semnalul real, achiziționat și prelucrat prin metoda mediei variabile și metoda Haar. Programul este conceput modular, fiecare modul fiind interconectat cu modulele anterioare și posterioare prin transferul datelor obținute în urma calculelor efectuate.

Citirea tuturor datelor se face dintr-o bază de date creată anterior, bază de date ce se rescrie automat, în timp real, având drept sursă sistemul de achiziție care precedă unitatea curentă de calcul. Crearea bazei de date a fost efectuată cu ajutorul Microsoft Acces din pachetul Microsoft Office 97 Profesional. Utilizarea de către aplicație a bazei de date se efectuează cu ajutorul motorului "JET ENGINE". Tipul de negociere cu baza de date, specific motorului "JET ENGINE" și acceptat în forma originală este DYNASET. Această accepțiune permite ca orice modificare survenită în timpul lucrului cu aplicația să se regăsească în fișierul sursă "BAZA DATE.MDB".

Prelucrarea datelor obținute din baza de date se face automat de către aplicație la solicitarea utilizatorului și de la caz la caz sunt reprezentate grafic rezultatele obținute.

Interfața prietenoasă a Visual Basic a făcut posibilă armonizarea formelor de lucru astfel încât utilizatorul să aibă la îndemână toate opțiunile necesare lucrului.

Programul este în dezvoltare continuă astfel încât să cuprindă toate variantele tehnologice posibile proceselor de sudare cu două sârme în mediu de gaze protectoare reale.

7.2 Prezentarea interfețelor și a codului

7.2.1 Forma de start

La lansarea în execuție a fișierului SensorArc.exe se va deschide forma de lucru prezentată în figura 7.1:

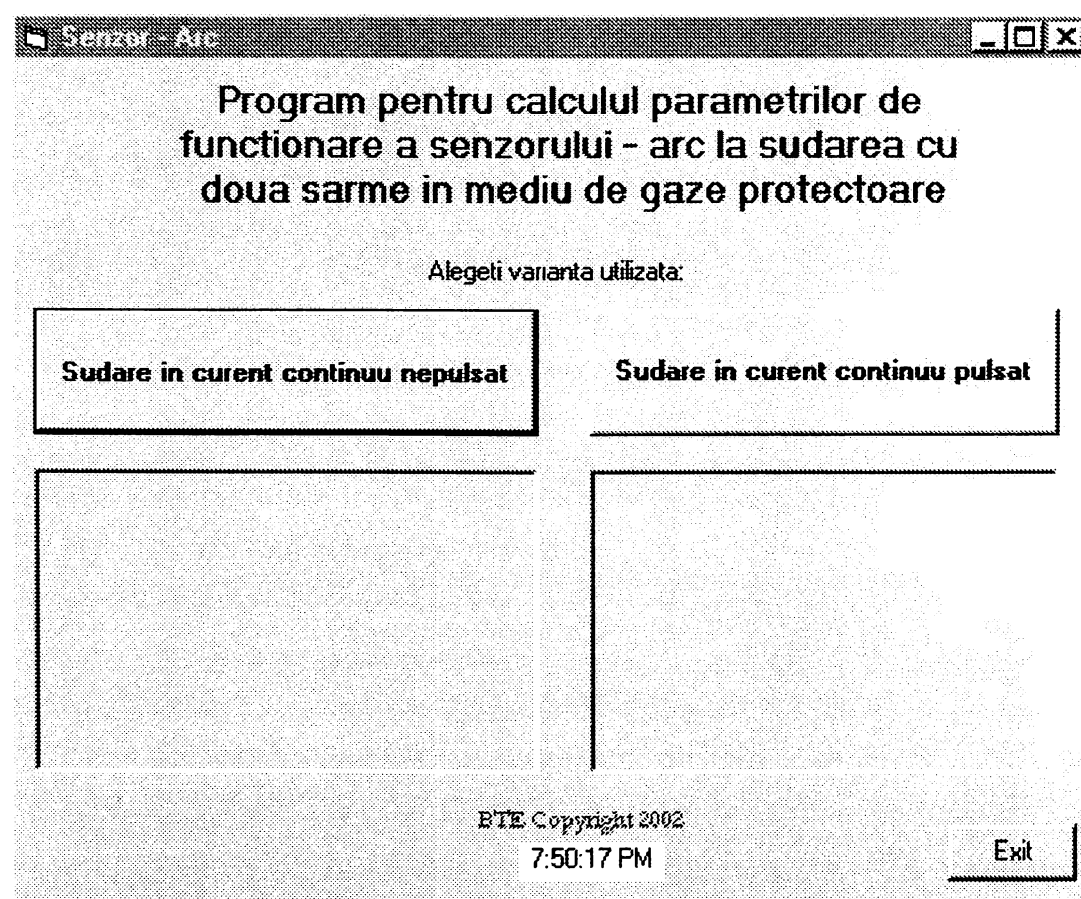
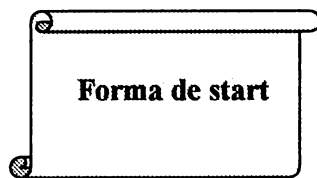


Fig. 7.1 Forma de introducere în program

Utilizatorului i se oferă posibilitatea alegerii variantei dorite în ceea ce privește tipul curentului de sudare specific procedului.

Codul aferent scris fomei de mai sus este următorul:



```
Private Sub Command1_Click()
Form2.Enabled = True
Form2.Visible = True
Form1.Enabled = False
Form1.Visible = False
End Sub

Private Sub Command2_Click()
MsgBox ("Date insuficiente! Program
in dezvoltare!"), vbCritical
End Sub
```

```
Private Sub Command3_Click()
End
End Sub

Private Sub Form_Load()
Timer1.Interval = 1000
End Sub

Private Sub Timer1_Timer()
Label4.Alignment = 2
Label4.Caption = Time
End Sub
```

7.2.2 Forma meniu principal

În această subrutină a aplicației se pornește programul propriu-zis prin afișarea formei de alegere a modulului de operare (figura 7.2):

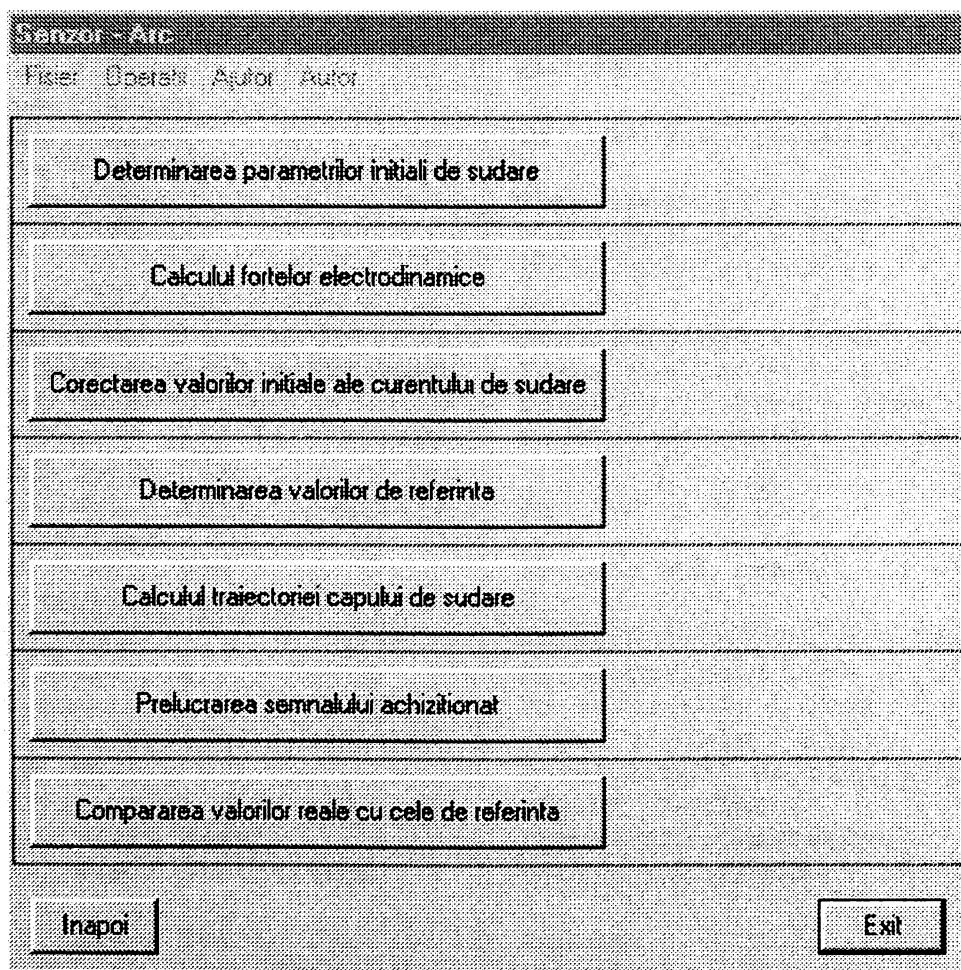
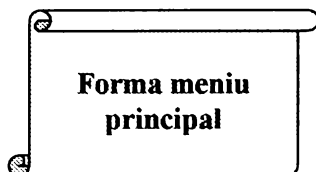


Fig. 7.2 Forma modulară a programului de calcul

Evident apariția acestei forme este dată de selectarea opțiunii “Sudare în curent continuu nepulsat” sau “Sudare în curent continuu pulsat”. Sunt posibile revenirea la forma de start, urmarea cursului aplicației sau părăsirea programului.

În meniul superior sunt prevăzute opțiuni de lansare rapidă, utilitare și alte accesorii pe care utilizatorul le poate folosi după cum dorește. Codul aferent formei meniu principal și al formei autor se prezintă astfel:



```

Private Sub Form_Load()
End Sub

Private Sub operatii1_Click()
Form2.Enabled = False
Form2.Visible = False
Form3.Enabled = True
Form3.Visible = True
End Sub

Private Sub operatii2_Click()

Form1.Enabled = False
Form2.Enabled = False
Form3.Enabled = True
Form1.Visible = False
Form2.Visible = False
Form3.Visible = False
Form4.Enabled = True
Form4.Visible = True

'se calculeaza fortele
electrodinamice
Form4.Text1.Text = Form3.Text7.Text
* Form3.Text1.Text *
Form3.Text6.Text * (1 / (4 * 3.14))
* (2 / (Form3.Text9.Text -
(Form3.Text5.Text / 2))) * (Sqr(1 +
(((Form3.Text9.Text -
(Form3.Text5.Text / 2)) /
Form3.Text6.Text)) ^ 2) -
(Form3.Text9.Text -
(Form3.Text5.Text / 2)) /
Form3.Text6.Text)
Form4.Text2.Text = Form3.Text7.Text
* Form3.Text1.Text *
Form3.Text4.Text * (1 / (4 * 3.14))
* (2 / (Form3.Text9.Text -
(Form3.Text3.Text / 2))) * (Sqr(1 +
(((Form3.Text9.Text -
(Form3.Text3.Text / 2)) /
Form3.Text4.Text)) ^ 2) -
(Form3.Text9.Text -
(Form3.Text3.Text / 2)) /
Form3.Text4.Text)
End Sub

Private Sub operatii3_Click()
Form2.Enabled = False
Form2.Visible = False
Form5.Enabled = True
Form5.Visible = True
End Sub

Private Sub operatii4_Click()
Form2.Enabled = False
Form2.Visible = False
Form6.Enabled = True
Form6.Visible = True
End Sub

Private Sub operatii5_Click()
Form3.Enabled = True
Form9.Enabled = True
Form2.Enabled = False
Form2.Visible = False
Form9.Visible = True
Form6.Enabled = True
Form9.Text1.Text = Form3.Text9 / 2
Form9.Text2.Text = Form6.Text3
End Sub

Private Sub operatii61_Click()
Form8.Option1.Value = True
Form8.Option2.Value = False
Form8.Visible = True
Form2.Visible = False
Form8.Label2.Caption = "METODA
MEDIEI VARIABLE"
Form8.OLE1.CreateLink
("c:/proiect/Medvar-100-4Hz.xls")
End Sub

Private Sub operatii62_Click()
Form8.Option1.Value = False
Form8.Option2.Value = True
Form8.Visible = True
Form2.Visible = False

```

```

Form8.Label2.Caption = "METODA HAAR"
Form8.OLE1.CreateLink
("c:/proiect/haar.xls")

End Sub

Private Sub operatii7_Click()
Form2.Enabled = True
Form2.Visible = False
Form3.Enabled = True

Form4.Enabled = True
Form5.Enabled = True
Form6.Enabled = True
Form7.Enabled = True
Form8.Enabled = True
Form9.Enabled = True
Form10.Enabled = True
Form10.Visible = True

End Sub
    
```

7.2.3 Forma “Determinarea parametrilor inițiali de sudare”

Prin apăsarea primului buton se lansează în execuție subrutina de introducere date pentru prelucrare ulterioară. Aplicația trebuie să urmeze toți pașii necesari pentru a putea prelua și prelucra datele. Nerespectarea acestora va fi gestionată de mesaje de eroare corespunzătoare fiecărei situații. Dacă totuși se insistă asupra efectuării unor operații care determină erori în cadrul aplicației, aceasta va părăsi programul. Se procedează astfel pentru păstrarea integrității bazelor de date. Introducerea parametrilor inițiali de sudare necesari continuării lucrului se face prin intermediul interfeței prezentate în figura 7.3:

Fig. 7.3 Forma de introducere a datelor inițiale

Vor fi respectate indicațiile părții tehnice a acestei aplicații referitor la soluțiile alese pentru a fi utilizate pe parcursul derulării aplicației. De altfel programul este autocorectiv și nu va permite utilizatorului să aleagă alte valori decât cele în limita strictă a datelor obținute în procesele de sudare practice. De asemenea, pentru fiecare eroare comisă de către utilizator va fi afișat un mesaj corespunzător de eroare cum ar fi cel prezentat în figura 7.4:

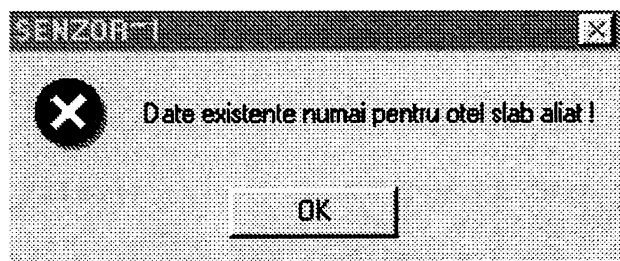


Fig. 7.4 Tip de mesaj de eroare

Introducerea efectivă a datelor în aplicație se execută la apăsarea butonului “Accept” unde după caz se acceptă valorile sau va fi afișat mesajul de eroare corespunzător. Introducerea corectă va afișa o interfață ca cea prezentată în figura 7.5:

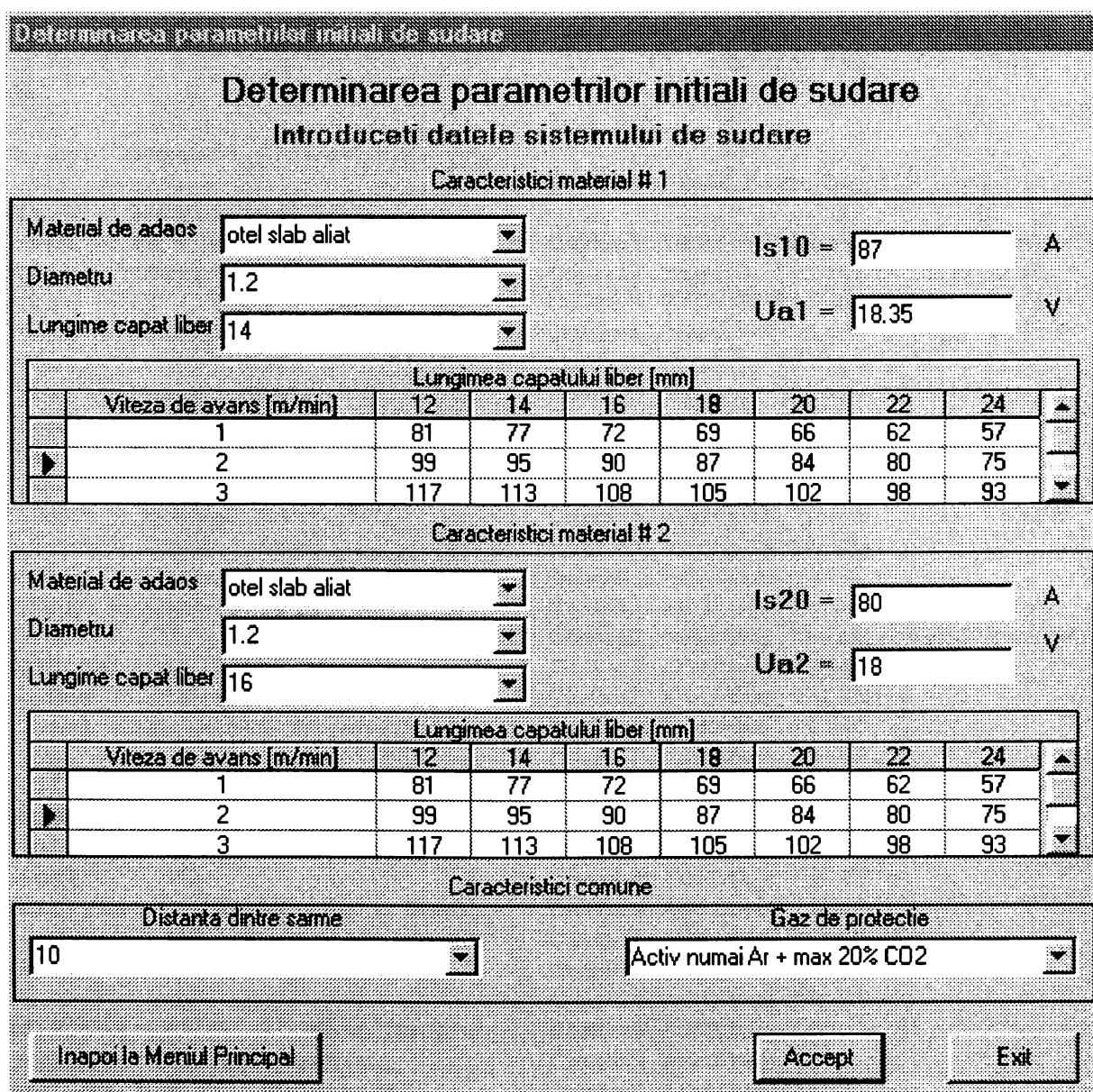


Fig. 7.5 Interfața de acceptare a datelor inițiale și întoarcere a parametrilor de sudare

După cum se poate observa aplicația va funcționa corect calculând primele valori din proces. Odată stabilită situația de lucru, se va reîntoarce la meniul principal prin apăsarea butonului corespunzător “Înapoi la Meniul Principal”.

Codul scris pentru interconectarea obiectelor de pe formă se prezintă astfel:

**Forma de
introducere a
datelor inițiale**

```

Private Sub Command1_Click()
    Form3.Enabled = False
    Form3.Visible = False
    Form2.Enabled = True
    Form2.Visible = True
End Sub

Private Sub Command2_Click()
End

End Sub

Private Sub Command3_Click()
    Text7.Text = DBGrid1.SelText
    Text8.Text = 14 + 0.05 * Text7.Text
    Text1.Text = DBGrid2.SelText
    Text2.Text = 14 + 0.05 * Text1.Text
    Text3.Text = Combo3.Text
    Text4.Text = Combo7.Text
    Text5.Text = Combo4.Text
    Text6.Text = Combo8.Text
    Text9.Text = Combo5.Text
    Text10.Text = Combo1.Text
    Text11.Text = Combo2.Text
    Text12.Text = Combo3.Text
    Text13.Text = Combo4.Text
    Text14.Text = Combo6.Text

    If Text10.Text <> "otel slab aliat"
    Then MsgBox "Date existente numai
    pentru otel slab aliat !",
    vbCritical
    If Text11.Text <> "otel slab aliat"
    Then MsgBox "Date existente numai
    pentru otel slab aliat !",
    vbCritical
    If Text10.Text <> Text11.Text Then
    MsgBox "Materialele nu pot fi decat
    de acelasi tip !", vbCritical

    If Text12.Text <> "1.2" Then MsgBox
    "Date existente numai pentru
    diametrul de 1.2 !", vbCritical

    If Text13.Text <> "1.2" Then MsgBox
    "Date existente numai pentru
    diametrul de 1.2 !", vbCritical

    If Text14.Text = "Alegeti din lista"
    Then MsgBox "Alegeti corect din
    lista !", vbCritical
    If Text9.Text = "Alegeti din lista"
    Then MsgBox "Alegeti corect din
    lista !", vbCritical
    If Text6.Text = "Alegeti din lista"
    Then MsgBox "Alegeti corect din
    lista !", vbCritical
End Sub

Private Sub Form_Load()
    Combo1.Text = "Alegeti din lista"
    Combo2.Text = "Alegeti din lista"
    Combo3.Text = "Alegeti din lista"
    Combo4.Text = "Alegeti din lista"
    Combo5.Text = "Alegeti din lista"
    Combo6.Text = "Alegeti din lista"
    Combo7.Text = "Alegeti din lista"
    Combo8.Text = "Alegeti din lista"
    Combo1.AddItem "otel slab aliat"
    Combo1.AddItem "otel inalt aliat"
    Combo1.AddItem "AlMg"
    Combo1.AddItem "AlSi"
    Combo2.AddItem "otel slab aliat"
    Combo2.AddItem "otel inalt aliat"
    Combo2.AddItem "AlMg"
    Combo2.AddItem "AlSi"
    Combo3.AddItem "0.8"
    Combo3.AddItem "1.0"
    Combo3.AddItem "1.2"
    Combo3.AddItem "1.6"
    Combo3.AddItem "2.0"
    Combo4.AddItem "0.8"
    Combo4.AddItem "1.0"
    Combo4.AddItem "1.2"
    Combo4.AddItem "1.6"
    Combo4.AddItem "2.0"
    Combo5.AddItem "6"
    Combo5.AddItem "8"
    Combo5.AddItem "10"
    Combo5.AddItem "12"
    Combo6.AddItem "Ar"

```

```

Combo6.AddItem "Ar + max 20% CO2"
Combo6.AddItem "Ar + max 25% He"
Combo6.AddItem "He + max 25% Ar"
Combo6.AddItem "CO2"
Combo6.AddItem "Activ numai Ar + max
20% CO2"
Combo7.AddItem "12"
Combo7.AddItem "14"
Combo7.AddItem "16"
Combo7.AddItem "18"
Combo7.AddItem "20"
Combo7.AddItem "22"
Combo7.AddItem "24"
Combo8.AddItem "12"
Combo8.AddItem "14"
Combo8.AddItem "16"
Combo8.AddItem "18"
Combo8.AddItem "20"
Combo8.AddItem "22"
Combo8.AddItem "24"
End Sub

```

7.2.4 Forma “Calcul forțe electrodinamice și afișare grafică”

Această formă va putea fi accesată din Meniul Principal prin apăsarea butonului corespunzător. Vor fi calculate forțele electrodinamice care vor fi afișate într-o interfață conform figurii 7.6.

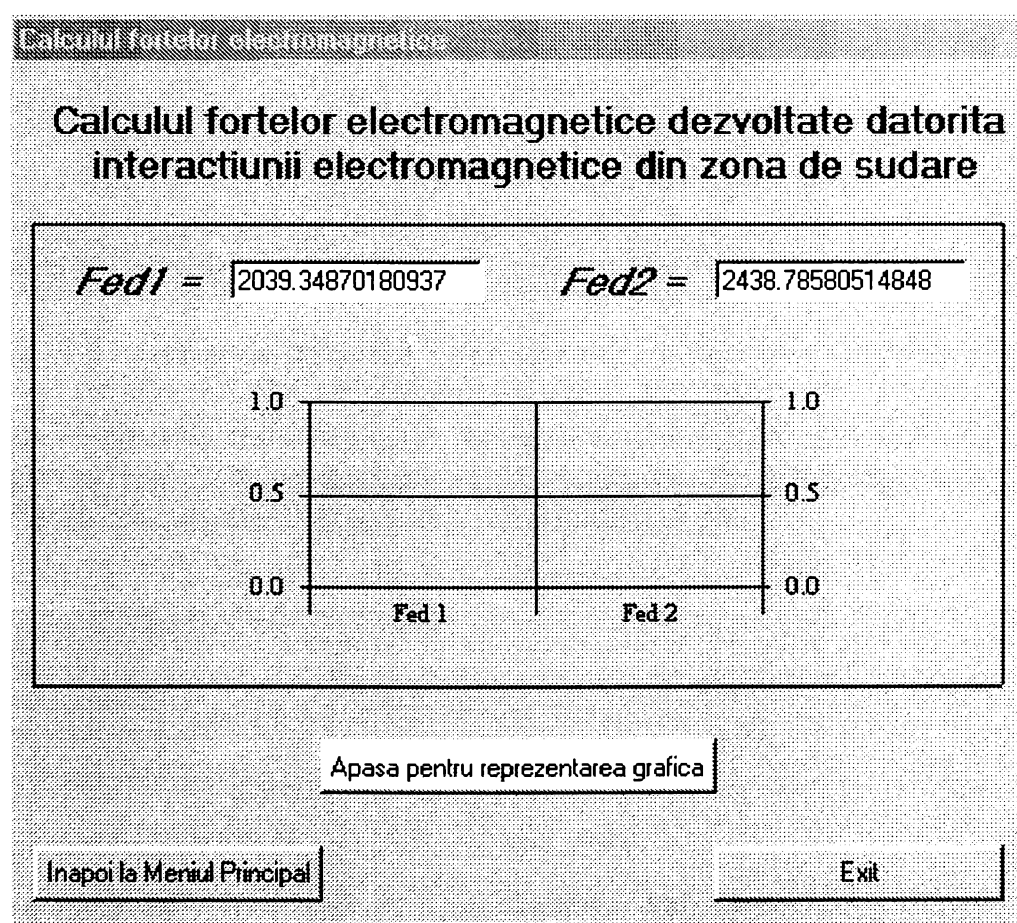


Fig. 7.6 Interfața de întoarcere a valorilor forțelor electrodinamice

Valorile întoarse sunt exprimate în $N \cdot 10^5$, situație de care programul va ține cont în determinarea erorilor de calcul a valorii medii a curentului de sudare.

Programul oferă facilitatea reprezentării grafice a valorilor obținute. Aceasta este posibilă prin activarea butonului “Apasă pentru reprezentarea grafică”. Autorul a introdus în program delimitarea clară a aspectului matematic de cel grafic. Acest lucru este reflectat și în design-ul formelor prin marcarea cu fond galben a inițializărilor grafice. În figura 7.7 este prezentată interfața de reprezentare grafică a valorilor calculate.

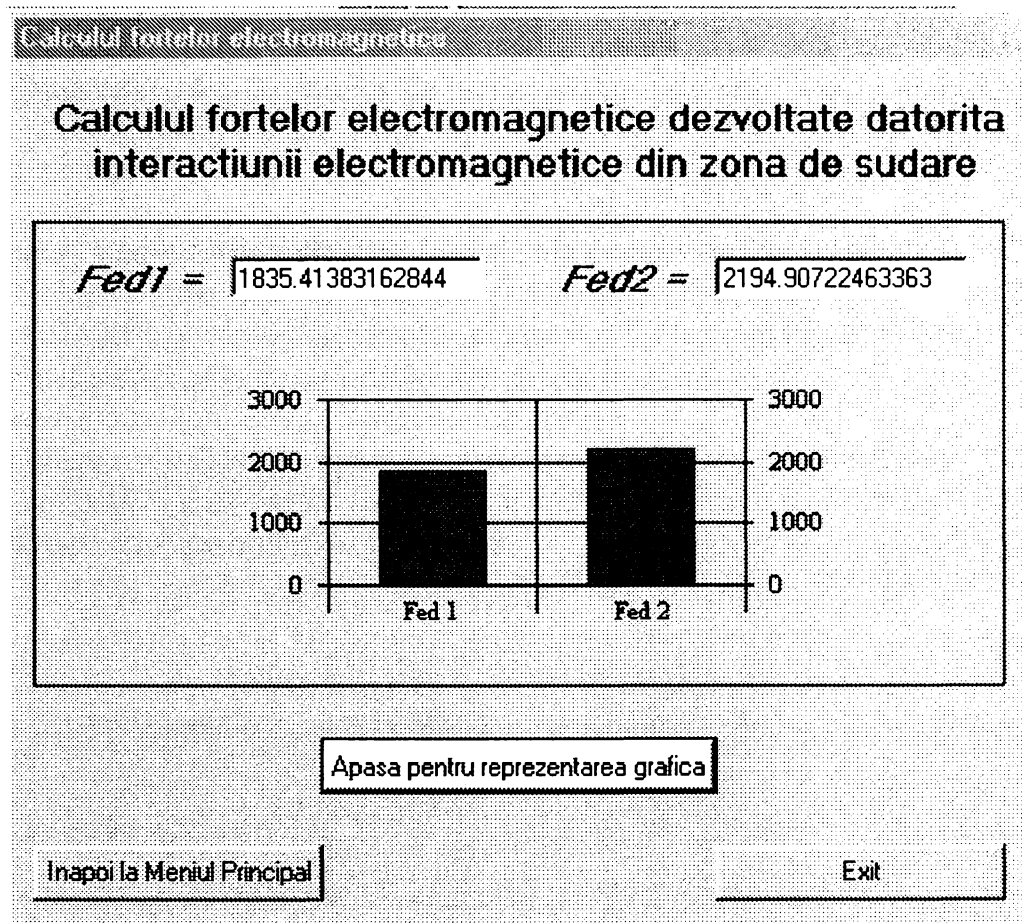


Fig. 7.7 Interfața de prezentare grafică a valorilor forțelor electrodinamice

După cum se observă capacitatea de redesenare grafică este scoasă în evidență prin modificarea valorilor axei Y de pe graficul inițial. Astfel pot fi reprezentate valori oricât de mari fără a se pierde din calitatea reprezentării. Codul utilizat este:

Forma de
prezentare grafică
a forțelor eldinam.

```
Private Sub Command1_Click()
    Form4.Visible = False
    Form2.Visible = True
    Form2.Enabled = True
    Form4.Enabled = False
End Sub

Private Sub Command2_Click()
End

Private Sub Command3_Click()
    MSChart1.Row = 1
    MSChart1.Data = Text1.Text
    MSChart1.Row = 2
    MSChart1.Data = Text2.Text
End Sub
```

În studierea codului scris pentru fiecare formă în parte nu vor apărea absolut toate liniile de program pentru fiecare obiect – formă și acesta deoarece unele linii de cod Visual Basic sunt introduse în codul formei principale.

De asemenea, definirea anumitor caracteristici ale ferestrelor sunt date ca și implicit, acestea putând fi modificate doar în programul sursă.

Următorul pas din cadrul aplicației este cel de întoarcere la meniul principal. Autorul lasă o independență relativă a ferestrelor de lucru. Astfel, este nevoie de o simplă apăsare de buton pentru a putea executa oricare dintre operații. Evident aceste operații vor trebui să fie corelate cu date introduse.

7.2.5 Forma “Corectarea valorilor inițiale ale curentului de sudare”

Această fereastră este una de tranziție și calcul. Vor fi stabiliți curenții de sudare conform determinărilor experimentale. Pentru acesta vor fi efectuați următorii pași:

- Se vor alege ΔI_{s1} și ΔI_{s2} pentru fiecare curent în parte
 - Se va apăsa butonul pentru reprezentarea grafică
 - Se vor alege corecțiile curenților conform determinărilor experimentale
 - Vor fi aplicate efectiv aceste corecții prin apăsarea butonului “Stabilește corecțiile”
- Toți acești pași sunt prezentați în figura 7.8.

Determinarea corecției necesare în urma influenței interacțiunii electromagnetice asupra curentului de sudare

Alege variabila curentului de sudare pentru Is10

Viteza de avans [m/min]	Lungimea capatului liber [mm]							
	12	14	16	18	20	22	24	
1	3	3	3	3	3	2	2	
2	4	4	3	3	3	3	3	
3	4	4	4	4	4	4	4	

Alege variabila curentului de sudare pentru Is20

Viteza de avans [m/min]	Lungimea capatului liber [mm]							
	12	14	16	18	20	22	24	
1	4	4	4	4	4	3	3	
2	5	5	5	5	4	4	4	
3	6	6	6	6	5	5	5	

$\Delta I_{s1} =$ $I_{s1}' =$ A

Efectueaza corectia pentru Is1'

Corectie Is1' $I_{s1}' =$ A

$\Delta I_{s2} =$ $I_{s2}' =$ A

Efectueaza corectia pentru Is2'

Corectie Is2' $I_{s2}' =$ A

Stabileste corectiile

Inapoi la Meniul Principal
Reprezentare grafica
Exit

Fig. 7.8 Interfața de corectare a valorilor curentului de sudare

După alegerea ΔI_{s1} și ΔI_{s2} se vor putea vizualiza grafic corecțiile efectuate prin simpla apăsare a butonului “Reprezentare grafică” (figura 7.9)

După cum se observă se pot reface corecțiile foarte simplu prin apăsarea butonului “Refacere corecții”.

În funcție de curenții corecțai prin calcul se vor stabili curenții conform determinărilor experimentale. Acest lucru devine posibil prin selectarea din meniurile “Corecție Is1’ și Is2’”. Apoi vor fi stabilite corecțiile așa cum s-a prezentat mai sus. Noua fereastră va arăta conform figurii 7.10.

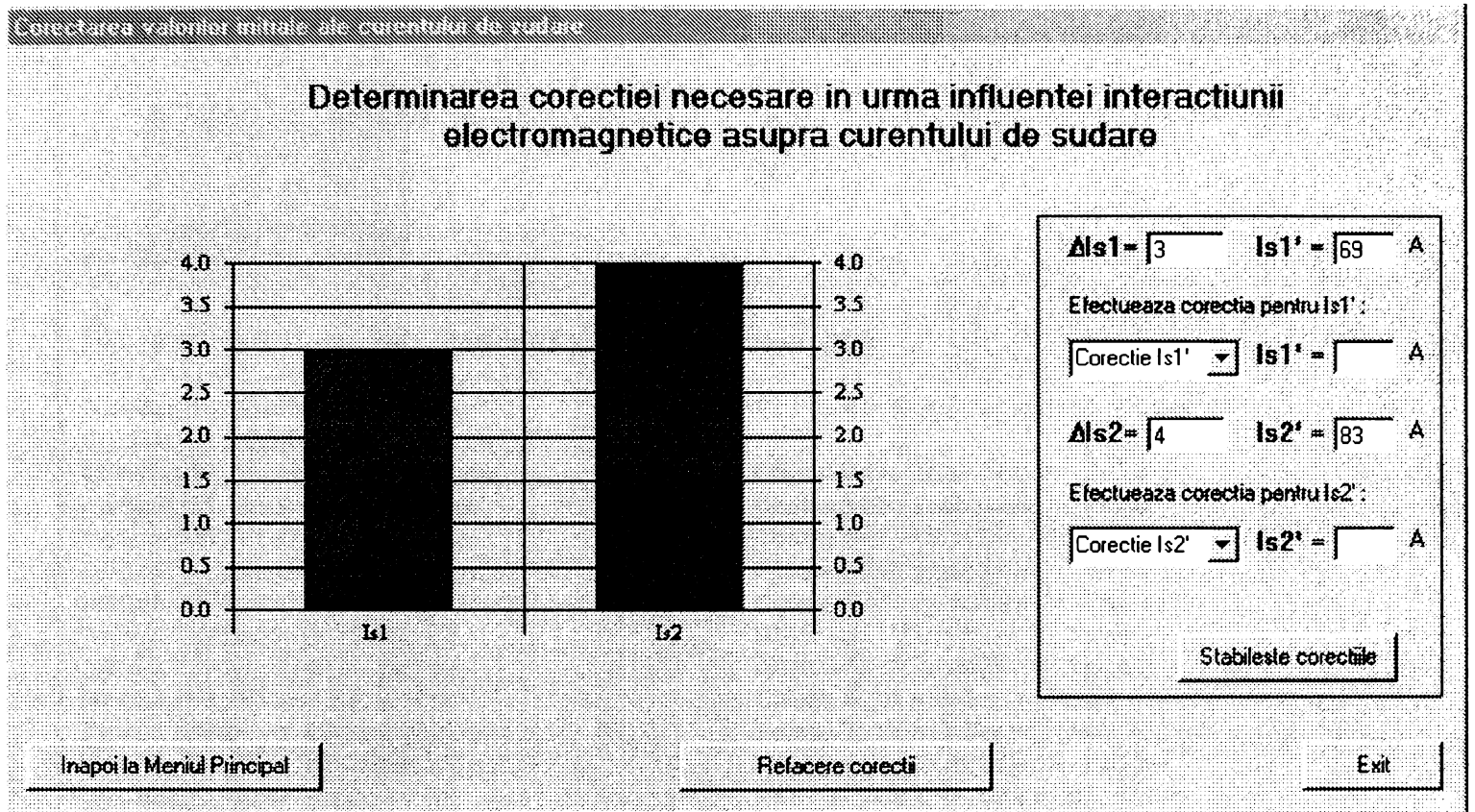


Fig. 7.9 Vizualizarea grafică a modului de corectare

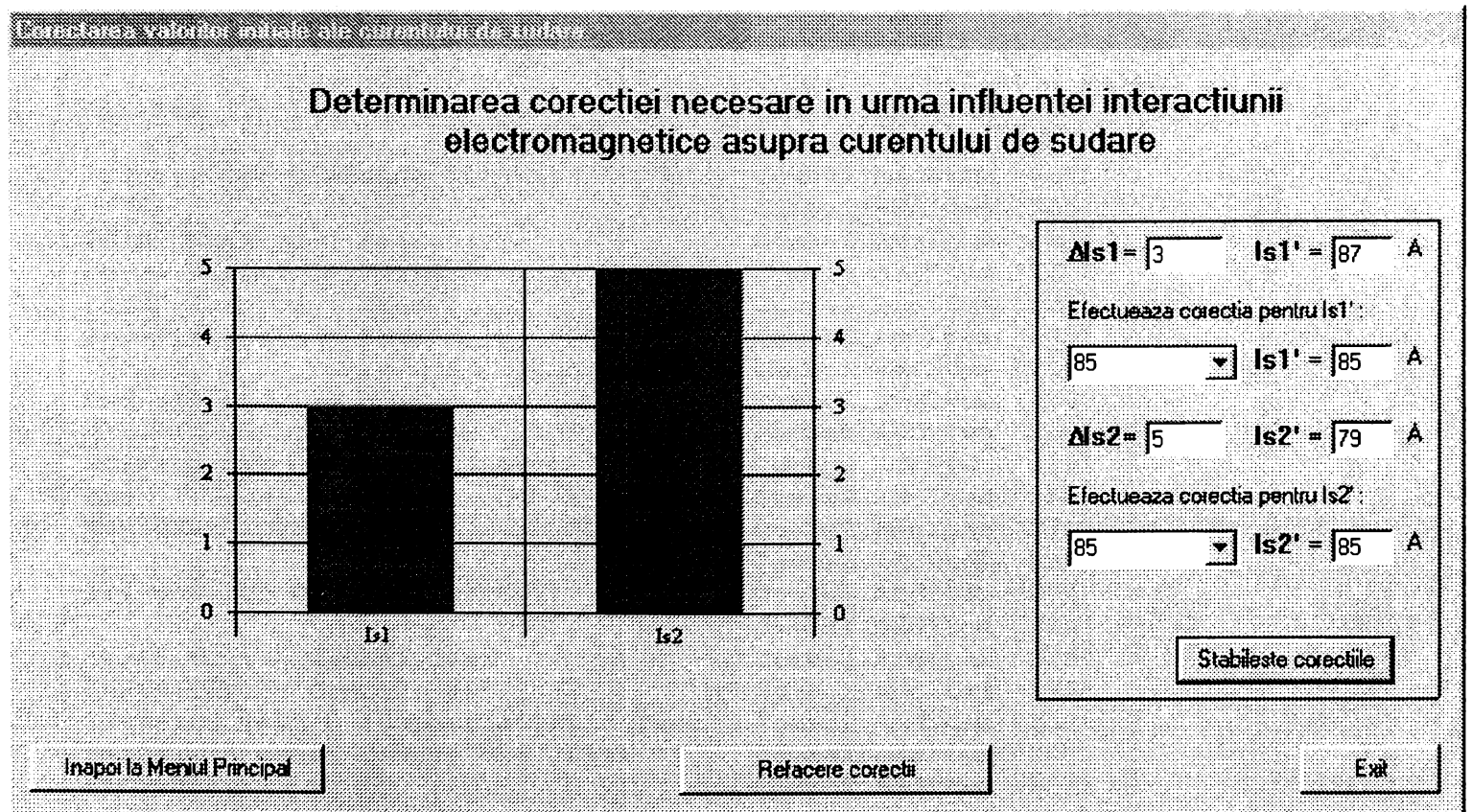
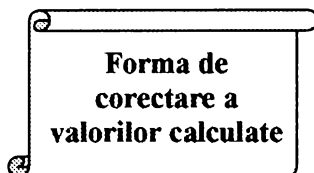


Fig. 7.10 Refacerea manuală a corecțiilor în cazuri extreme

Următorul pas este, evident, cel de întoarcere la meniul principal. Codul aferent va fi:



```

Private Sub Command1_Click()
    Command4.Enabled = True
    Command1.Enabled = False
    Command1.Visible = False
    Command5.Enabled = True
    Command5.Visible = True
    DBGrid1.Visible = False
    DBGrid2.Visible = False
    Label6.Visible = False
    Label7.Visible = False
    MSChart1.Visible = True
    Text1.Text = DBGrid1.Text
    Text2.Text = DBGrid2.Text
    MSChart1.Row = 1
    MSChart1.Data = Text1.Text
    MSChart1.Row = 2
    MSChart1.Data = Text2.Text
    Text3.Text = Form3.Text7 -
    Text1.Text
    Text4.Text = Form3.Text1 -
    Text2.Text
End Sub

Private Sub Command2_Click()
    Form5.Enabled = False
    Form5.Visible = False
    Form2.Enabled = True
    Form2.Visible = True
End Sub

Private Sub Command3_Click()
End
End Sub

Private Sub Command4_Click()
    Text5.Text = Combo1.Text
    Text6.Text = Combo2.Text
    If Text5.Text = "Corectie Is1" Then
    MsgBox "Alegeti corect din lista !",
    vbCritical
    If Text6.Text = "Corectie Is1" Then
    MsgBox "Alegeti corect din lista !",
    vbCritical
End Sub

Private Sub Command5_Click()
    Command4.Enabled = False
    Command1.Enabled = True
    Command1.Visible = True
    Command5.Enabled = False
    Command5.Visible = False
    DBGrid1.Visible = True
    DBGrid2.Visible = True
    Label6.Visible = True
    Label7.Visible = True
    MSChart1.Visible = False
    Text1.Text = DBGrid1.Text
    Text2.Text = DBGrid2.Text
End Sub

Private Sub Form_Load()
    If MSChart1.Visible = False Then
    Command4.Enabled = False
    Combo1.AddItem "70"
    Combo1.AddItem "85"
    Combo1.AddItem "105"
    Combo1.AddItem "125"
    Combo1.AddItem "140"
    Combo1.AddItem "160"
    Combo1.AddItem "180"
    Combo1.AddItem "195"
    Combo1.AddItem "200"
    Combo1.AddItem "220"
    Combo1.AddItem "230"
    Combo1.AddItem "235"
    Combo1.AddItem "250"
    Combo1.AddItem "270"
    Combo1.AddItem "295"
    Combo1.AddItem "300"
    Combo1.AddItem "320"
    Combo1.AddItem "325"
    Combo1.AddItem "335"
    Combo1.AddItem "355"
    Combo2.AddItem "70"
    Combo2.AddItem "85"
    Combo2.AddItem "105"
    Combo2.AddItem "125"
    Combo2.AddItem "140"
    Combo2.AddItem "160"
    End If
End Sub

```

```

Combo2.AddItem "180"
Combo2.AddItem "195"
Combo2.AddItem "200"
Combo2.AddItem "220"
Combo2.AddItem "230"
Combo2.AddItem "235"
Combo2.AddItem "250"
Combo2.AddItem "270"

Combo2.AddItem "295"
Combo2.AddItem "300"
Combo2.AddItem "320"
Combo2.AddItem "325"
Combo2.AddItem "335"
Combo2.AddItem "355"

End Sub
    
```

7.2.6 Forma “Determinarea valorilor de referință”

Modulul “Determinarea valorilor de referință” introduce algoritmul construit utilizând dezvoltarea în serie Fourier. Acest algoritm descrie modelul variației curentului de sudare în timpul oscilării capului de sudare transversal pe rost.

Interfața de deschidere a modulului este cea prezentată în figura 7.11.

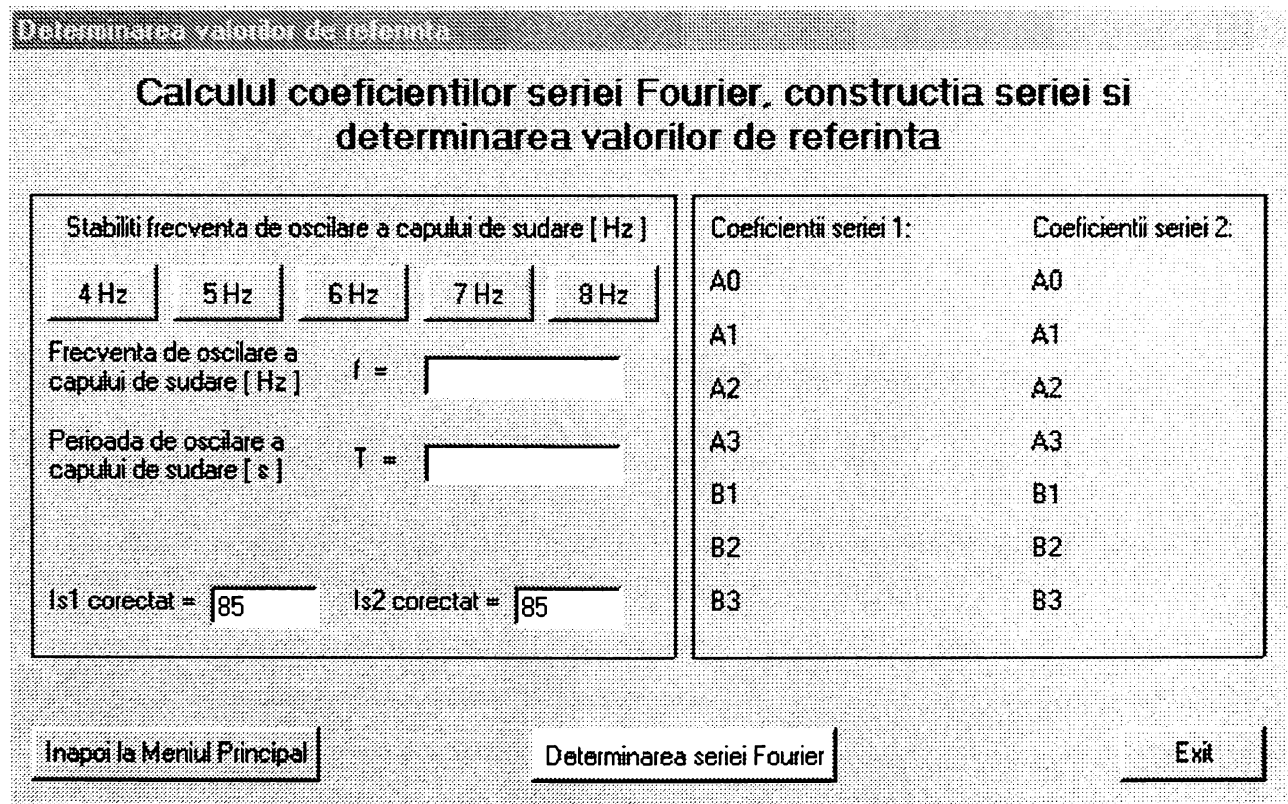


Fig. 7.11 Interfața de calcul a coeficienților seriei Fourier pentru modelarea formei de variație a curentului de sudare în timpul funcționării senzorului-arc

Fereastra de mai sus va aștepta stabilirea de către utilizator a frecvenței. Prin apăsarea, spre exemplu, a butonului “4 Hz”, vor fi efectuate unele calcule interne ce vor duce la afișarea coeficienților cu ajutorul cărora vor fi calculate seriile Fourier conform celor prezentate în capitolele anterioare.

Figurile 7.12, 7.13 și 7.14 prezintă succesiv determinarea coeficienților seriei Fourier și extragerea din aceste serii a valorilor discrete care vor participa la procesul de comparare cu semnalul real achiziționat.

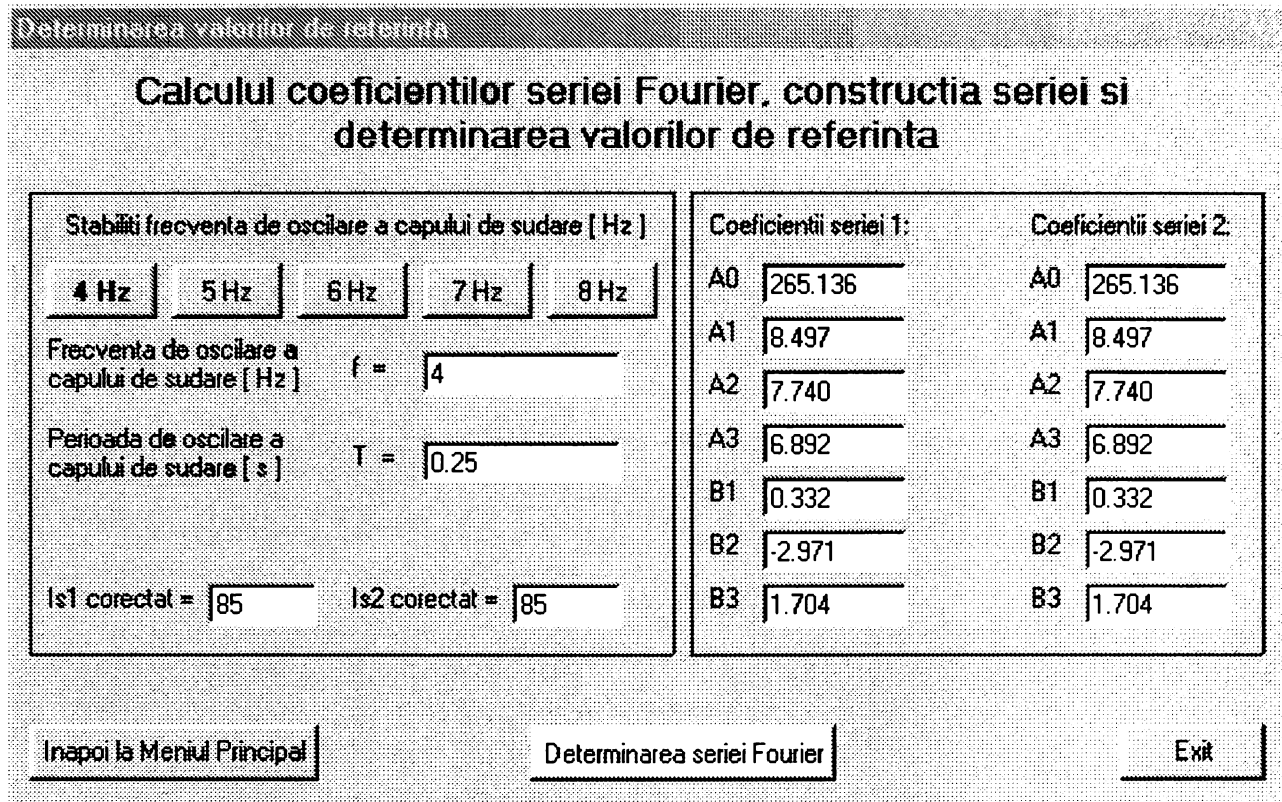


Fig. 7.12 Determinarea coeficienților seriei Fourier

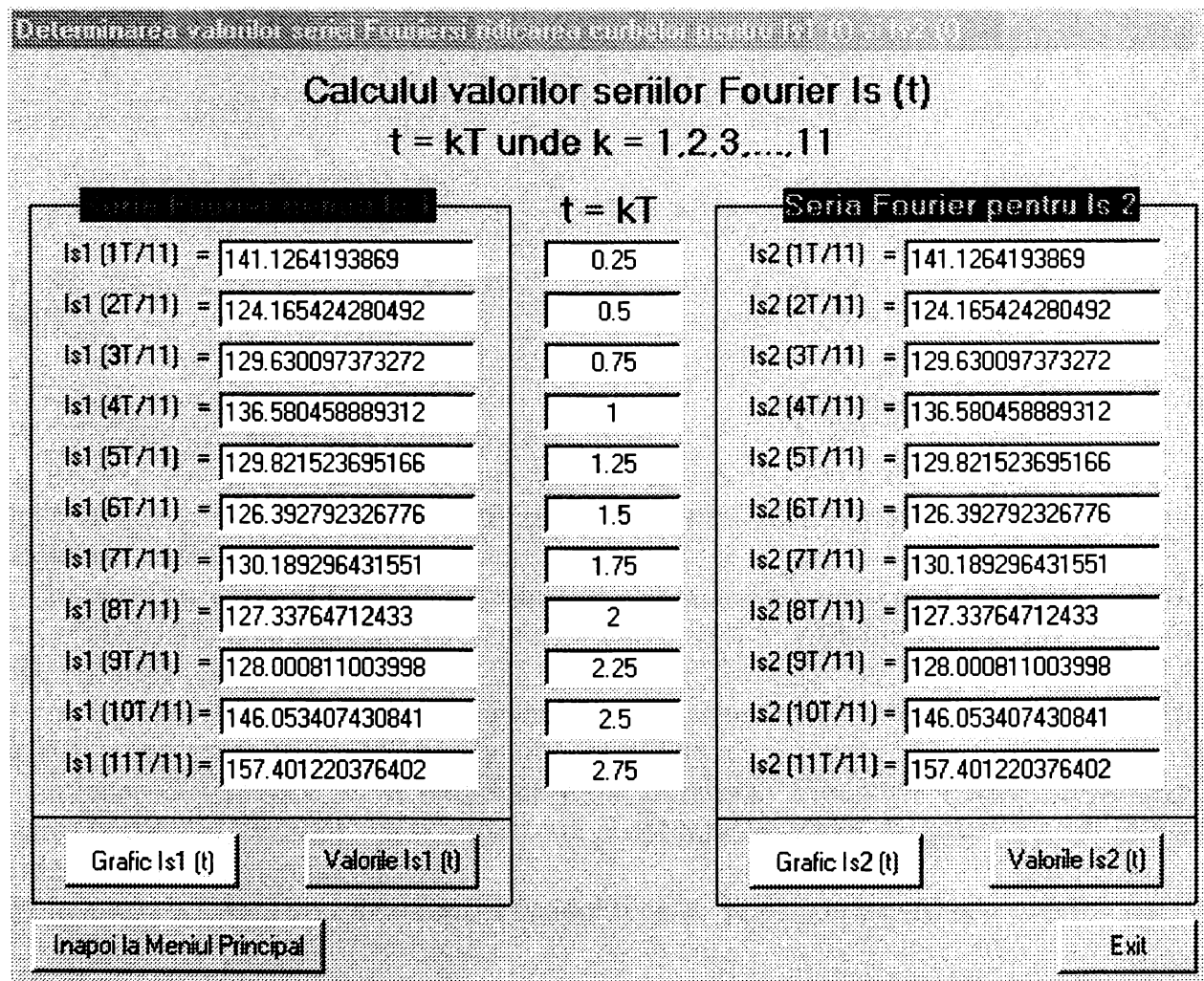


Fig. 7.13 Extragerea valorilor care participă la procesul de comparare

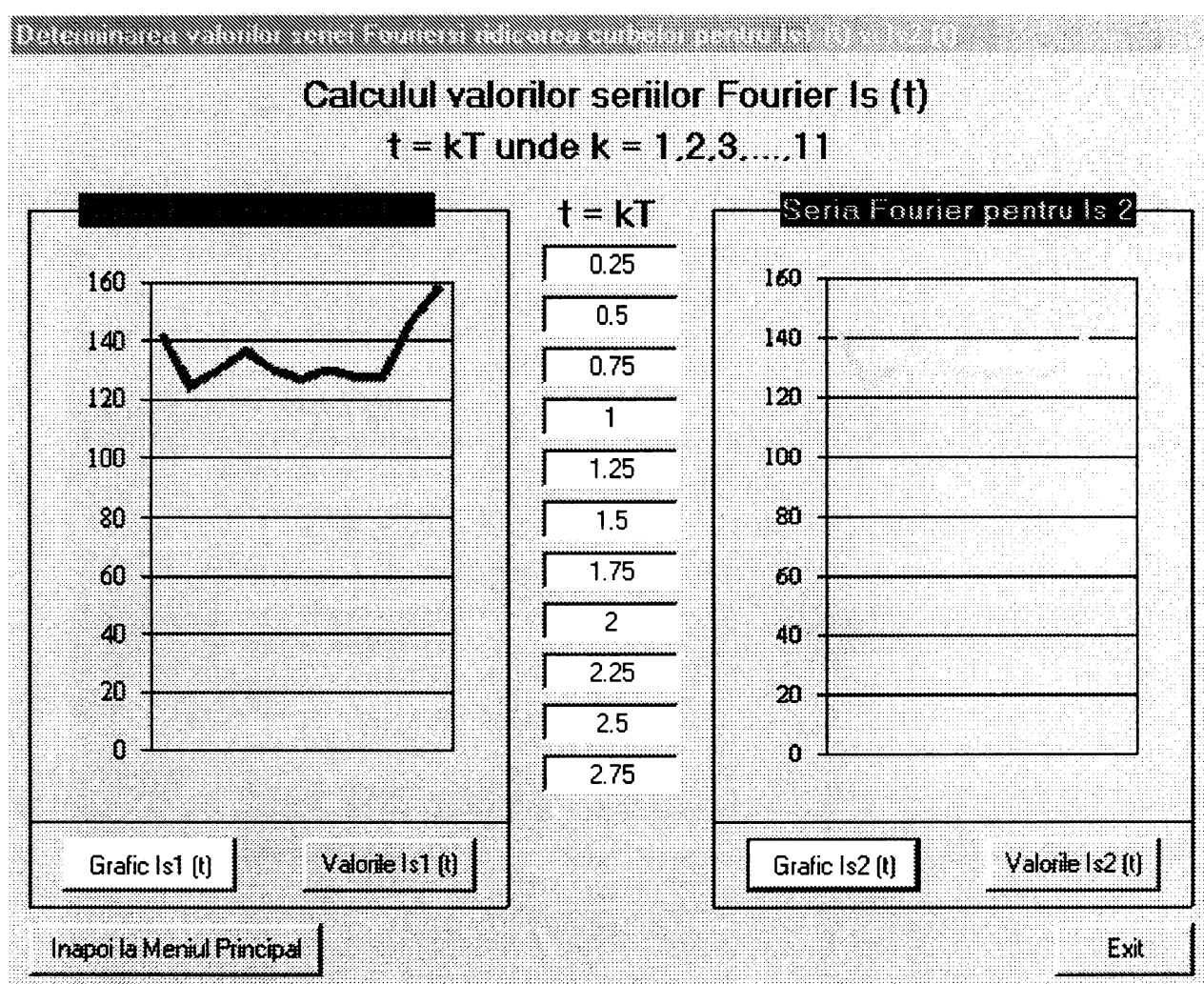


Fig. 7.14 Reprezentarea grafică a valorilor extrase

Sucesiunea de pași este sugestivă. Codul aferent acestor operații este prezentat în anexa 7.1.

7.2.7 Forma “Oscilația capului de sudare”

Pornind de la modul de oscilare ales și optimizat în cadrul capitolului 4, modulul “Oscilația capului de sudare” oferă utilizatorului posibilitatea vizualizării grafice și numerice a traiectoriei capului de sudare.

În cazul în care utilizatorul dorește corectarea acestei traiectorii, el poate interveni în calcul prin modificarea valorilor parametrilor cinematici ai mișcării de oscilație: frecvența de oscilare și viteza de sudare.

În figura 7.15 a este prezentată interfața de introducere a datelor inițiale în vederea calculării și reprezentării traiectoriei capului de sudare.

În această fereastră se va introduce de la tastatura “Viteza de sudare” după care prin apăsarea butonului “Accept” va fi inițializată procedura de calcul. În figura 7.15 b se prezintă grafic traiectoria calculată.

În anexa 7.2 este prezentat detaliat codul formei “Oscilația capului de sudare”.

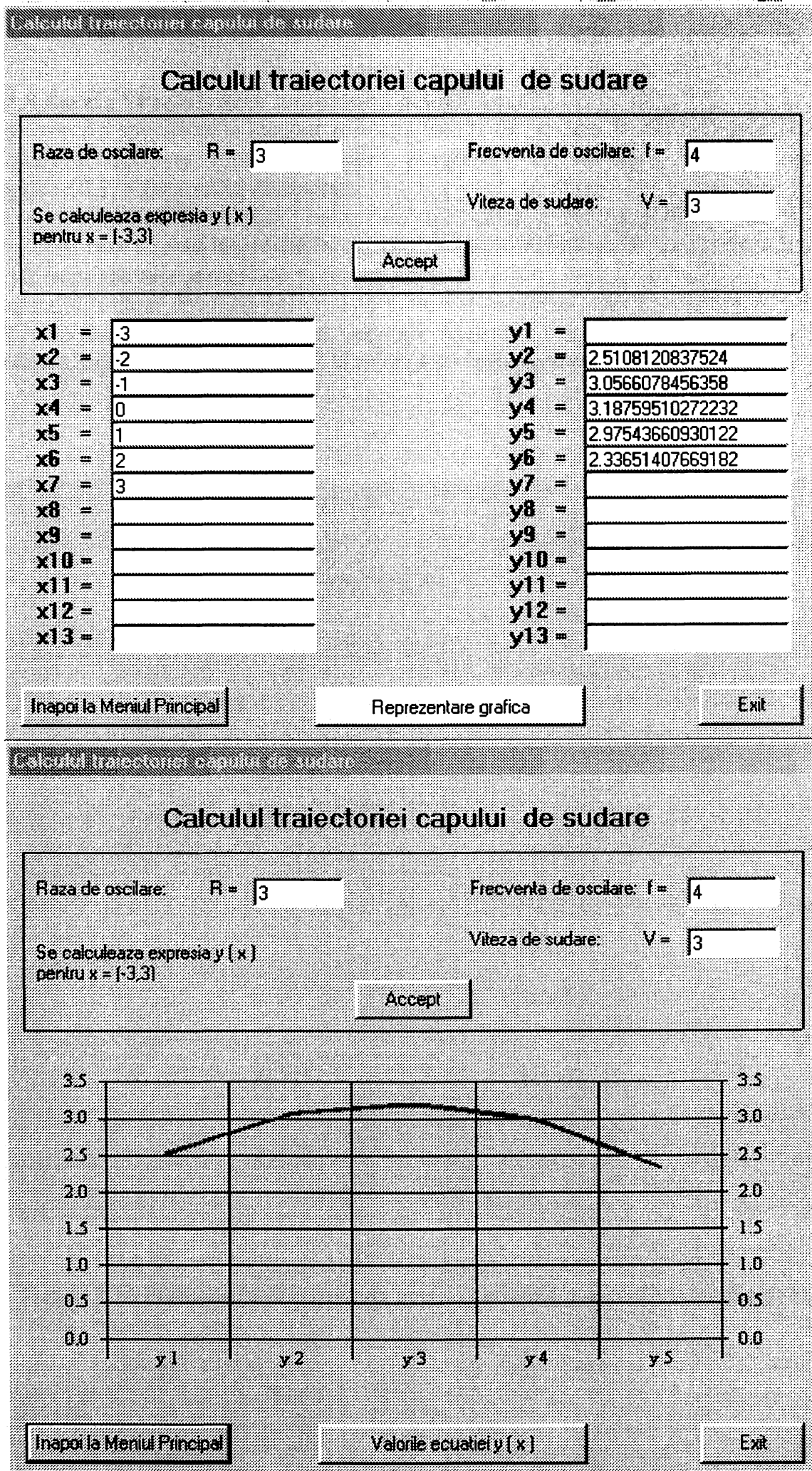


Fig. 7.15 Interfața de introducere a datelor inițiale (a) și prezentarea grafică a traiectoriei (b)

7.2.8 Forma “Prelucrarea semnalului achiziționat”

Așa cum s-a specificat la început aplicația este în dezvoltare. Până la crearea posibilității citirii fișierului de date format de către programul de achiziție, aplicația va utiliza caracteristica OLE a sistemului de operare.

În cazul simulării funcționării senzorului-arc aplicația va citi graficul dintr-o foaie de calcul Excel în care au fost introduse înregistrări prealabile din timpul funcționării senzorului. O astfel de simulare este prezentată în figura 7.16.

Semnalul preluat din înregistrare este prelucrat conform celor prezentate în capitolul 6 al lucrării: nivelul 1 – metoda mediei variabile (figura 7.16), nivelul 2 – metoda Haar de curățare fină a semnalului (figura 7.17) și nivelul 3 – compararea.

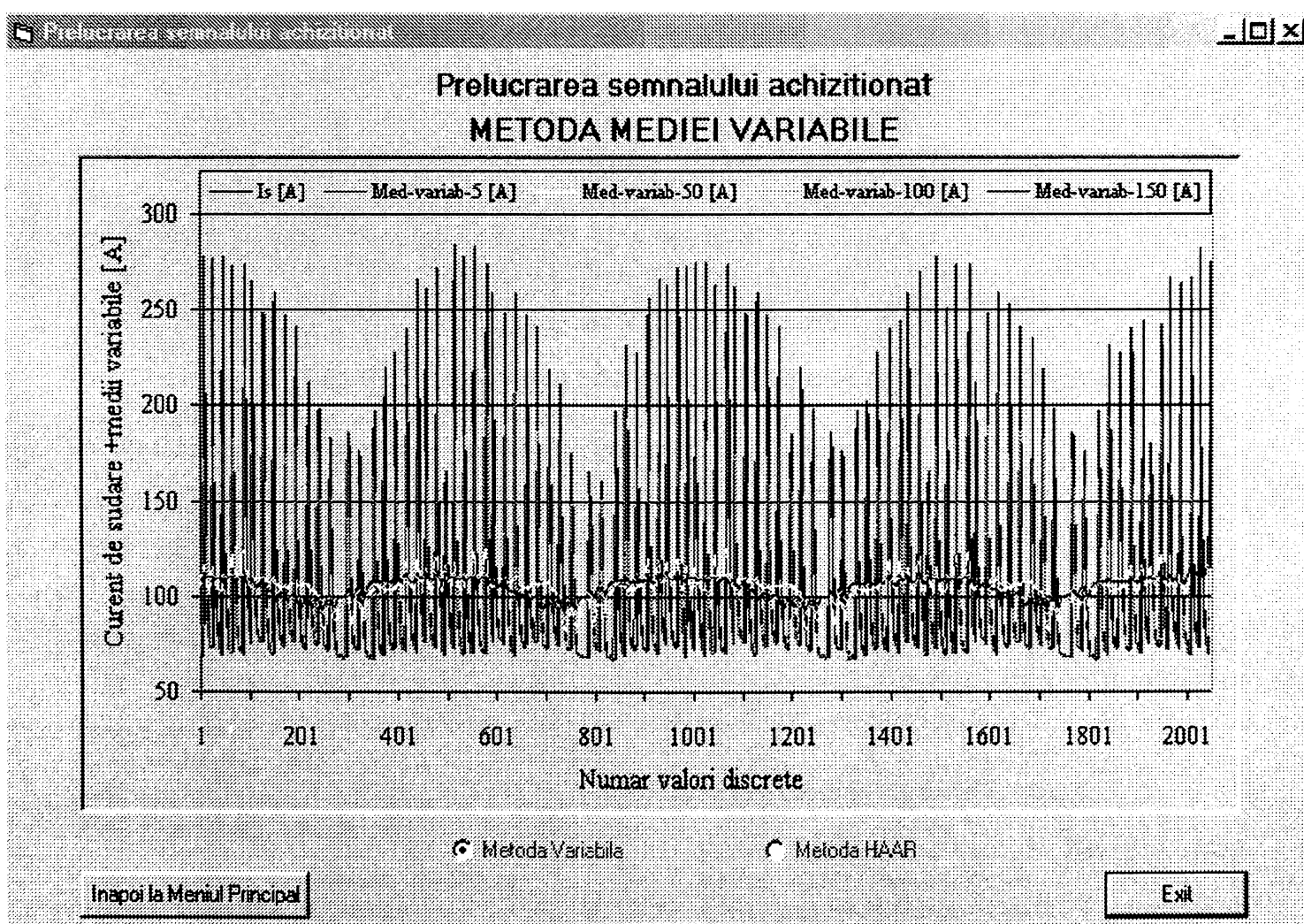


Figura 7.16 Prelucrarea prin metoda mediei variabile a semnalului real achiziționat

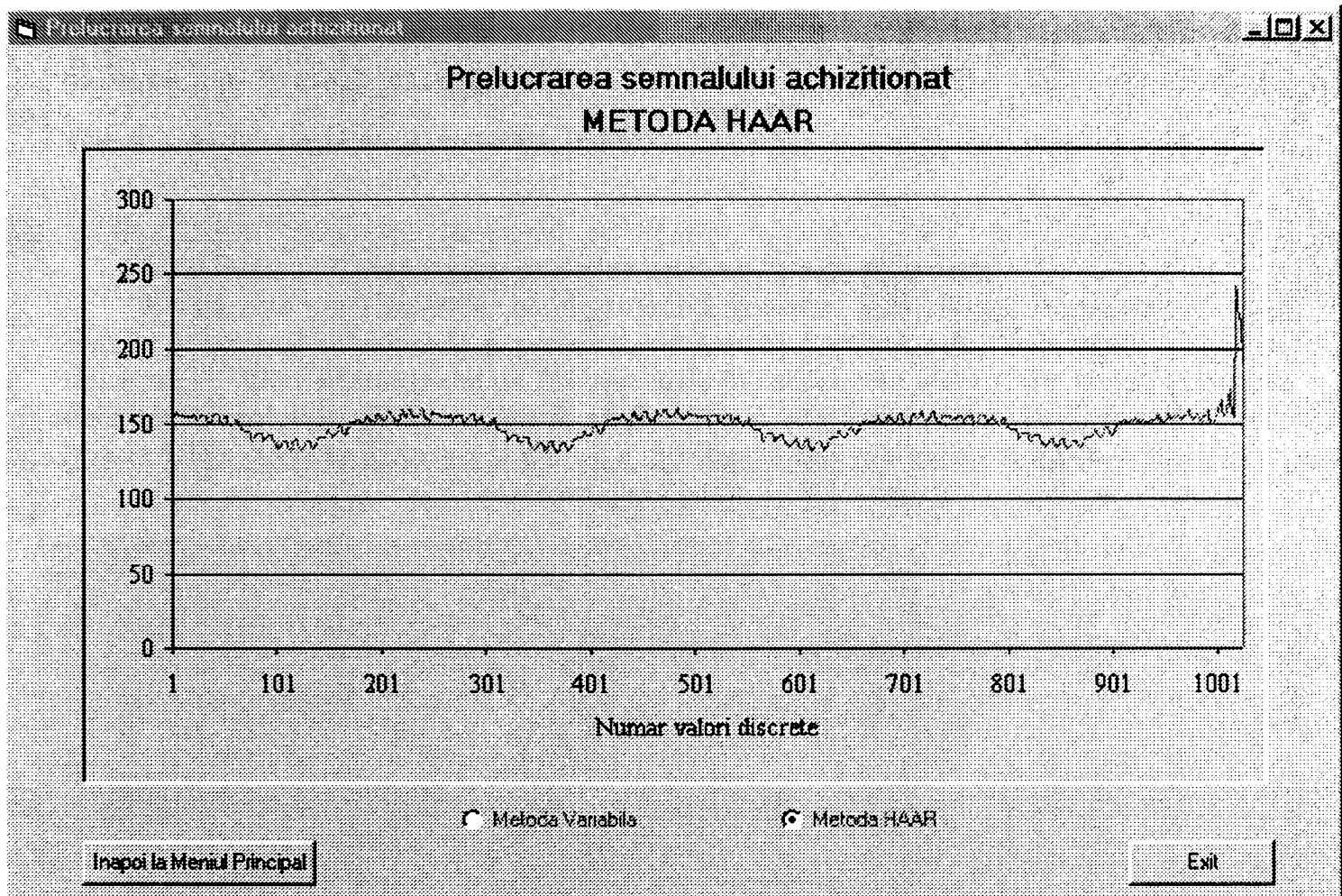


Fig. 7.17 Prelucrarea prin metoda Haar a semnalului achiziționat

Codul aferent acestor operații este prezentat în continuare.

Forma de calcul și
prezentare a
trajectoriei

```

Private Sub
Command1_Click()
End
End Sub

Private Sub Command2_Click()
Form8.Visible = False
Form2.Enabled = True
Form2.Visible = True
End Sub

Private Sub Option1_Click()
Form8.Label2.Caption = "METODA
MEDIEI VARIABLE"
Form8.OLE1.CreateLink
("c:/proiect/Medvar-100-4Hz.xls")
End Sub

Private Sub Option2_Click()
Form8.Label2.Caption = "METODA HAAR"
Form8.OLE1.CreateLink
("c:/proiect/haar.xls")
End Sub Private Sub Command1_Click()
End
End Sub

Private Sub Command2_Click()
Form8.Visible = False
Form2.Enabled = True
Form2.Visible = True
End Sub

Private Sub Option1_Click()

```



```

End Sub                                     Form8.OLE1.CreateLink
                                           ("c:/proiect/haar.xls")

Private Sub Option2_Click()
                                           End Sub

Form8.Label2.Caption = "METODA HAAR"
    
```

7.2.9 Forma “Compararea valorilor reale cu cele de referință”

Având cele două semnale, cel de referință construit prin metoda dezvoltării în serie Fourier și cel real achiziționat și prelucrat, programul compară cele două semnale, discret, utilizând 11 valori situate la durate de timp egale în cadrul unui ciclu. Cele 11 valori au fost determinate anterior, prezenta formă afișându-le și efectuând compararea prin diferență (figura 7.18). Afișarea numerică și grafică a rezultatului este prezentată în figura 7.19.

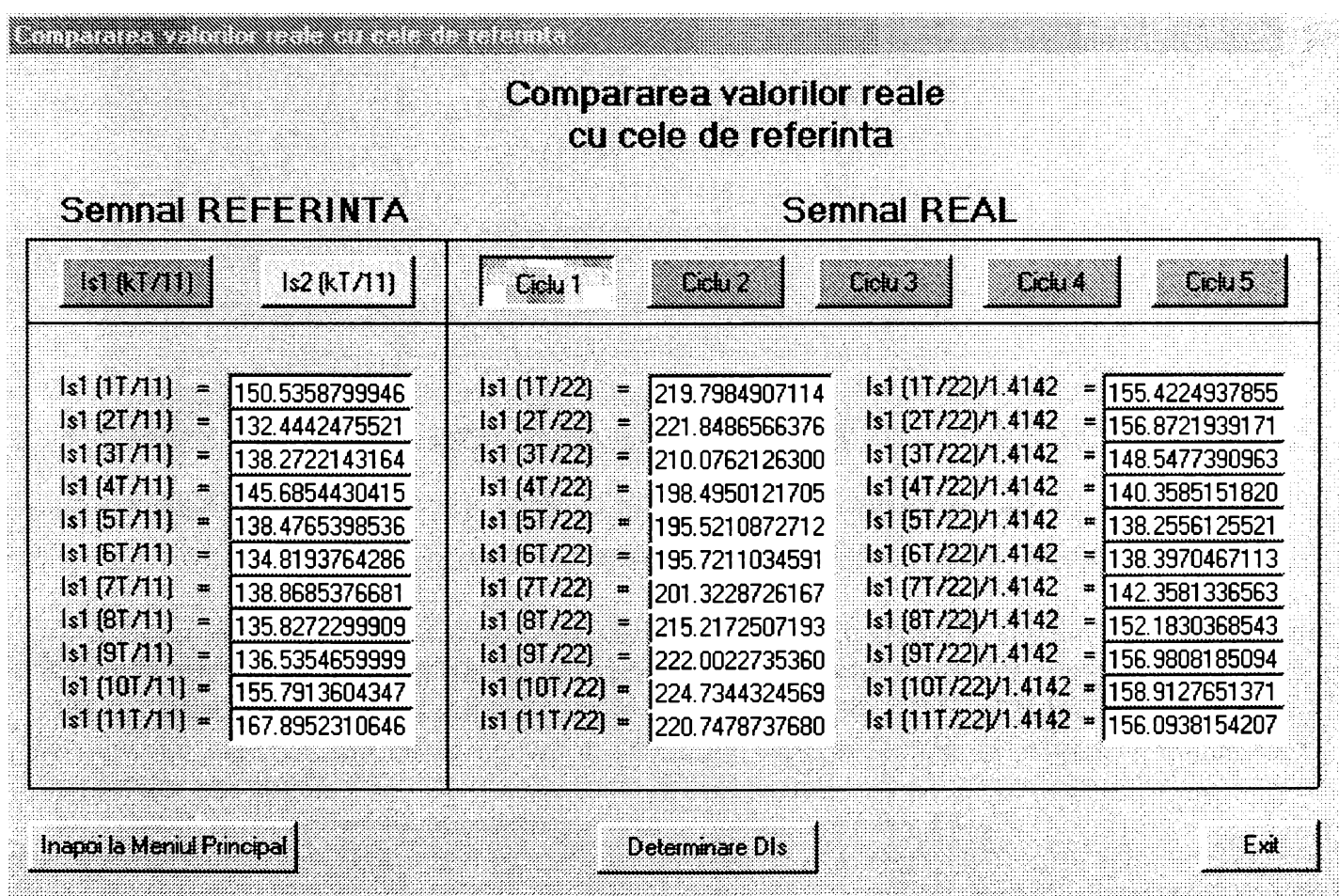


Fig. 7.18 Compararea semnalului de referință cu cel real

După cum se poate observa în figura 7.18, programul calculează cele 11 valori pentru fiecare ciclu al semnalului real și îl afișează. Calculul ține cont de faptul că aplicarea tehnicii Haar reduce lungimea semnalului la jumătate și mărește amplitudinea semnalului cu coeficientul $\sqrt{2}$. Datorită acestei situații programul efectuează înaintea comparării corecțiile necesare: cele 11 valori sunt extrase la momentele $\frac{k \cdot T}{22}$ și nu la $\frac{k \cdot T}{11}$ ca în cazul semnalului de referință, iar valoarea extrasă este împărțită cu 1.4142.

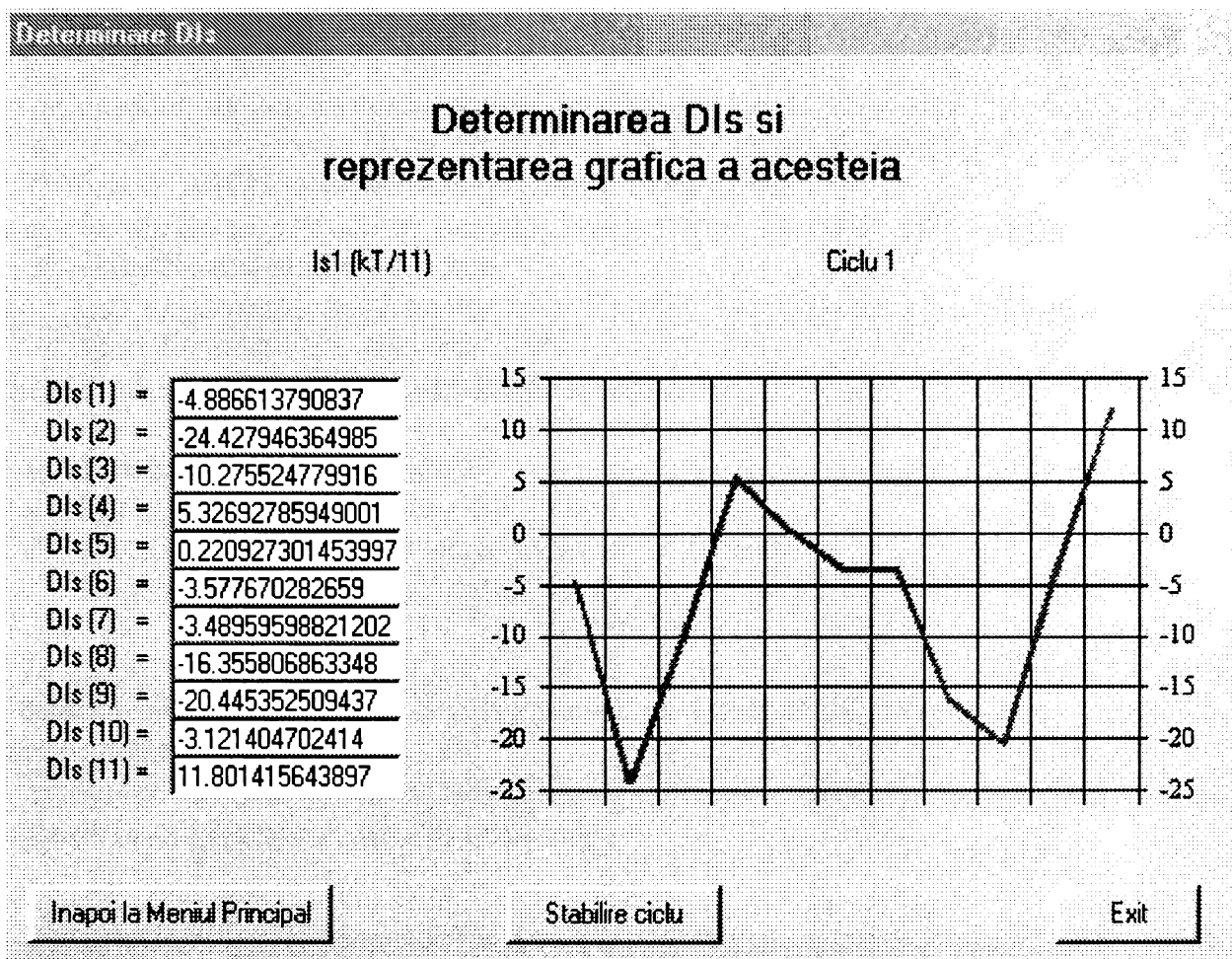


Fig. 7.19 Reprezentarea semnalului obținut prin diferență

Acest semnal va sta la baza corectării poziției momentane a capului de sudare prin comanda celor două motoare pas cu pas care asigură orientarea în spațiu a capului de sudare. Este necesară stabilirea unui domeniu de valori limită pentru diferența calculată de program, iar valorile care ies din domeniu vor fi orientate către sistemele de comandă numerică a motoarelor pas cu pas.

Codul sursă al formei de comparare este prezentat în anexa 7.3.

Programul prezentat este în continuă dezvoltare având în prezent în baza de date numai informații privind sudarea oțelurilor slab aliate. Se urmărește completarea bazei de date cu informații despre sudarea oțelurilor înalt aliate și sudarea aliajelor de aluminiu.

Forma de kit de instalare sub care se prezintă programul asigură instalarea și funcționarea acestuia pe orice sistem PC rulând sub WIN 9X sau variante superioare.

7.3 Exemplu de analiză

Pentru exemplificarea modului de funcționare a sistemului se propune analiza unei înregistrări de curenți de sudare în timpul sudării cu două sârme utilizându-se două instalații distincte. Condițiile de experimentare și echipamentele utilizate în cadrul experimentului au fost:

- Instalație ESAB Puls-Matic Tr 400;
- Instalație ESAB Elma-Analog C400P;
- Tractor de sudare Bug-O- Mat;
- Sistem de achiziție a datelor cu frecvența de eșantionare de 500 samples/secundă, deservit de un program pentru analiză de laborator Turbo-Lab funcționând sub sistemul de operare DOS. Programul Turbo-Lab oferă utilizatorului înregistrări și în format ASCII, utilizabile în programe de tip Excel;
- Sârme de sudare: sârme tubulare rutilice tip T 46 3 PM 1H5 conform SR EN 758, diametrele sârmelor - 1.2 mm;
- Gaz de protecție: M21 conform SR EN 439, 18%CO₂/82%Ar, debite: 14-16 l/min;
- Mod de conducere: tandem;
- Frecvența de oscilare a capului de sudare 4 Hz.;
- Curenții de sudare prescriși echipamentelor: 220 / 215 A;
- Tensiunile arcelor: 24 / 23 V;
- Lungimile capetelor libere: 22-24 mm;
- Distanța dintre capetele celor două sârme: 10 mm;
- Unghiul dintre cele două sârme: 45-50°.

În timpul sudării s-a modificat de câteva ori poziția capului de sudare, spre stânga și spre dreapta, cu aproximativ 1-2 mm, pentru ca sistemul să înregistreze o modificare a lungimilor celor două arce.

În figura 7.20 este prezentată imaginea sudurii efectuate, pe imagine fiind observabile abaterile de la axa rostului a capului de sudare.

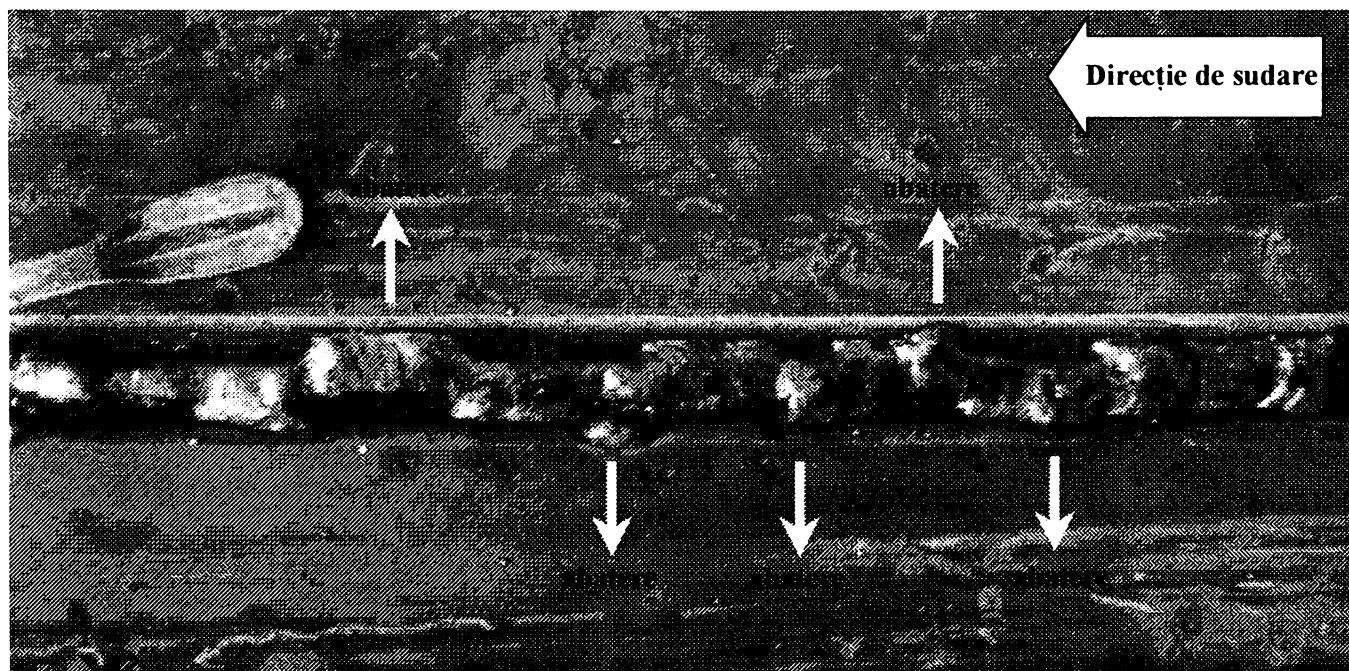


Fig. 7.20 Sudura cu abateri de la axa rostului realizată în vederea analizei semnalului

Înregistrările efectuate au fost convertite în format ASCII de către program și oferite drept intrare programului de calcul a deviațiilor de la axa rostului. Aplicând metoda mediei variabile de două ori și metoda Haar de curățare tot de două ori, programul a putut face compararea între semnalul real al curentului de sudare și semnalul de referință conform valorilor prescrise de utilizator echipamentelor de sudare.

În figura 7.21 este prezentată înregistrarea inițială.

În figurile 7.22 și 7.23 sunt prezentate rezultatele aplicării metodei mediei variabile pentru prelucrarea semnalului înregistrat.

În figurile 7.24 și 7.25 sunt prezentate rezultatele aplicării metodei Haar de curățare a semnalului.

În figura 7.26 este prezentat rezultatul comparării valorilor rezultate în urma prelucrării semnalului real cu valorile de referință ale curentului de sudare.

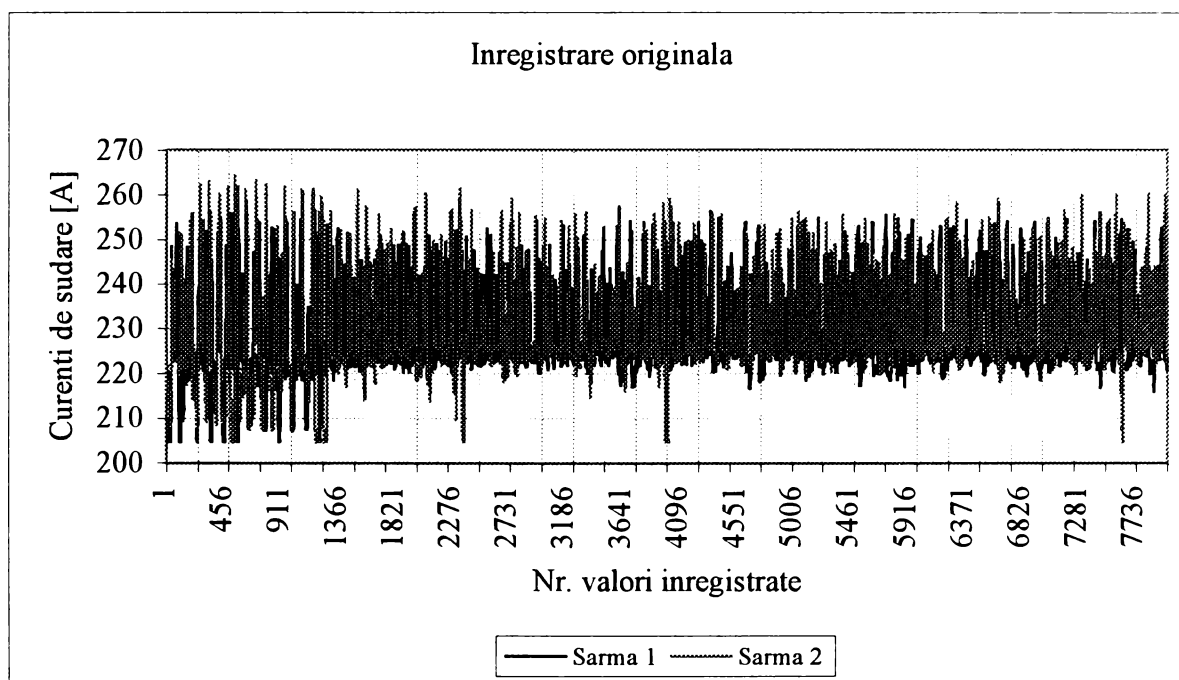


Fig. 7.21 Înregistrarea originală a semnalului

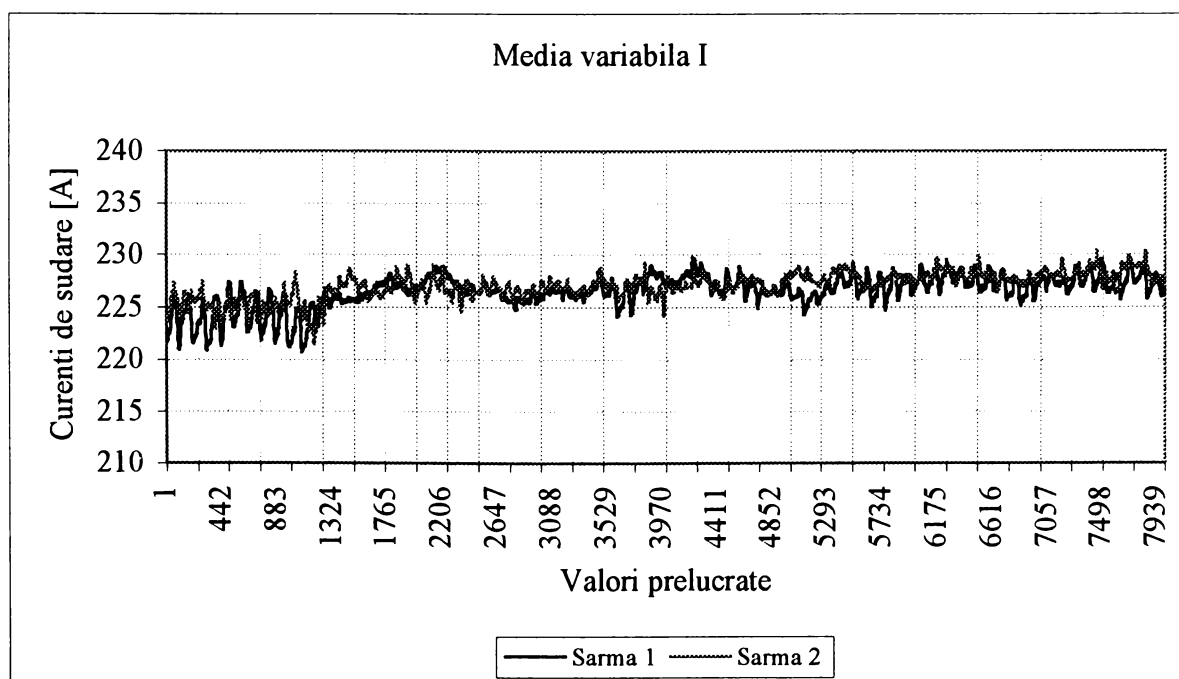


Fig. 7.22 Rezultatul primei aplicări a metodei mediei variabile

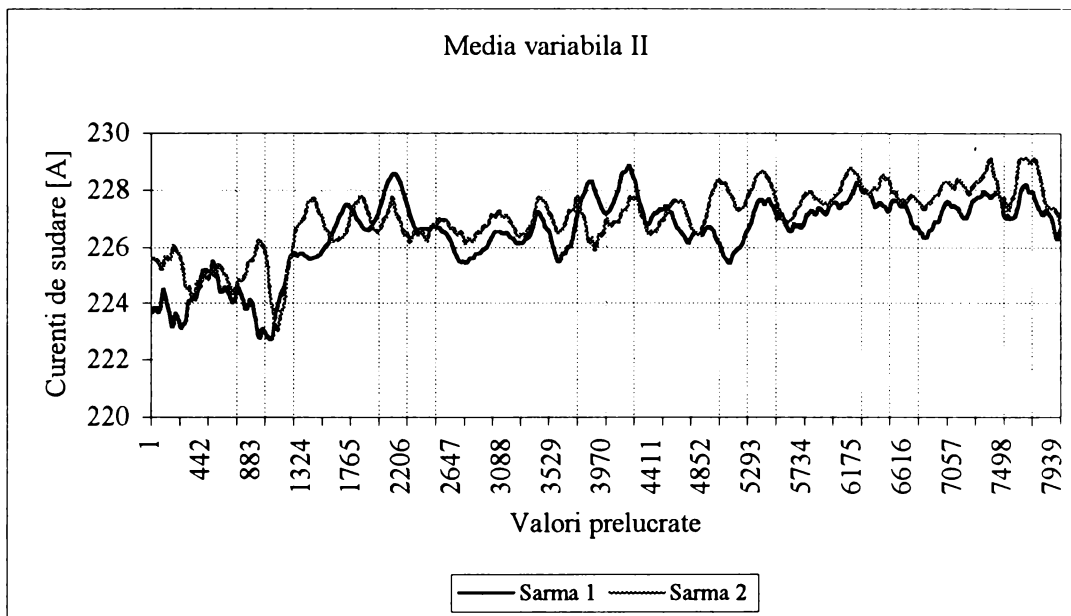


Fig. 7.23 Rezultatul celei de-a doua aplicări a metodei mediei variabile

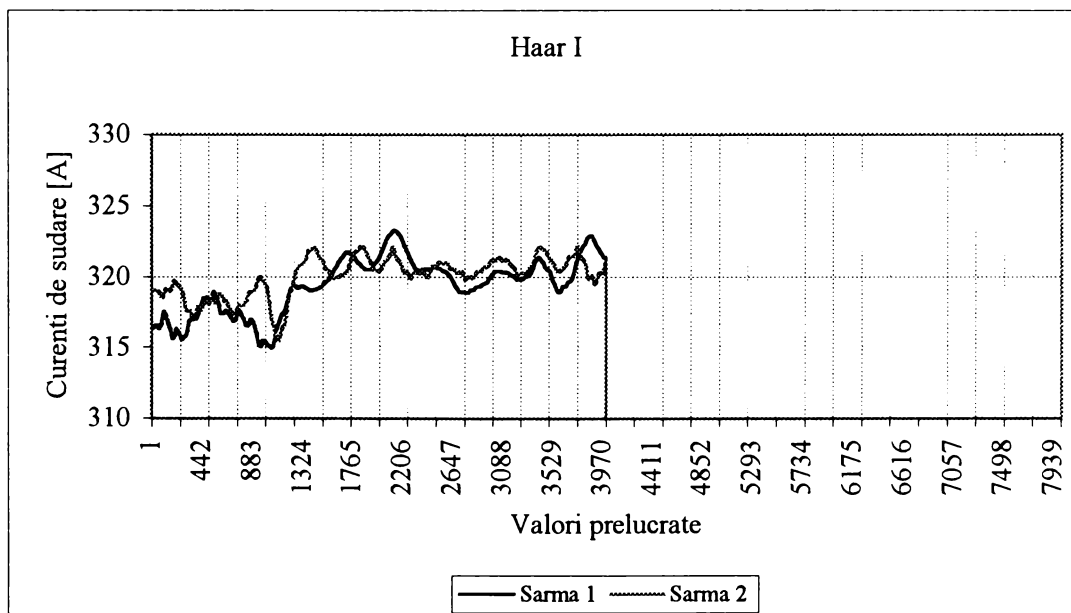


Fig. 7.24 Rezultatul primei aplicări a metodei Haar

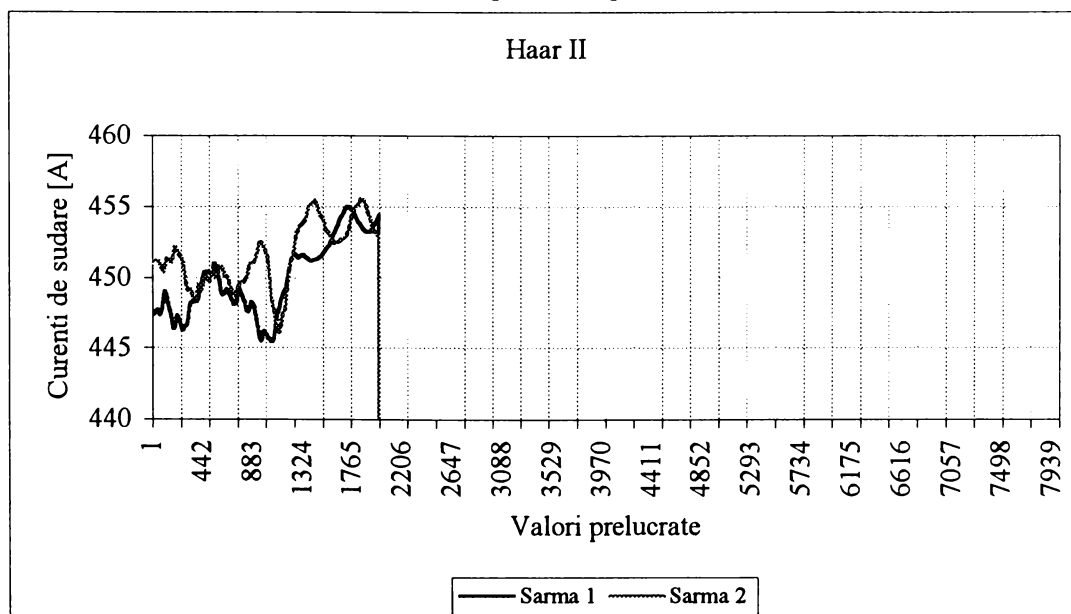


Fig. 7.25 Rezultatul celei de-a doua aplicări a metodei Haar

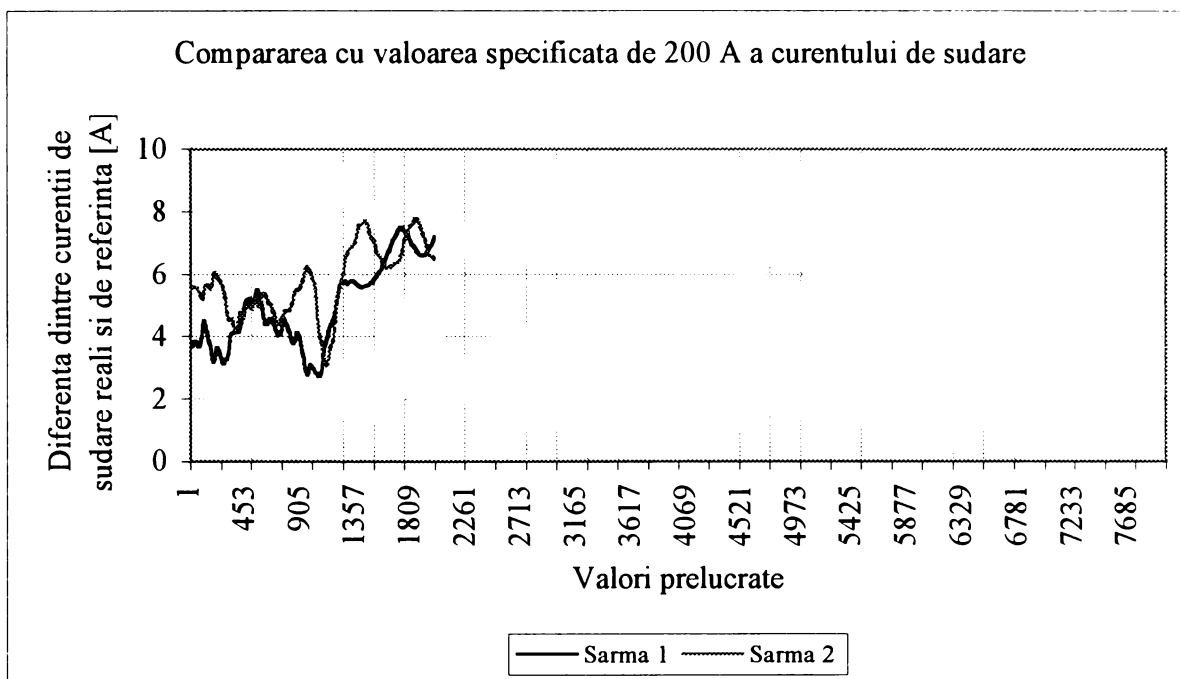


Fig. 7.26 Rezultatul comparării curenților reali prelucrați cu semnalul de referință construit cu ajutorul seriei Fourier

Mărind graficul obținut, se pot observa exact cele 5 abateri de la axa rostului care au avut loc în timpul sudării. Rezultă, deci, că programul a funcționat, oferind valorile prin diferență, valori care vor sta la baza procesului de corecție a poziției capului de sudare.

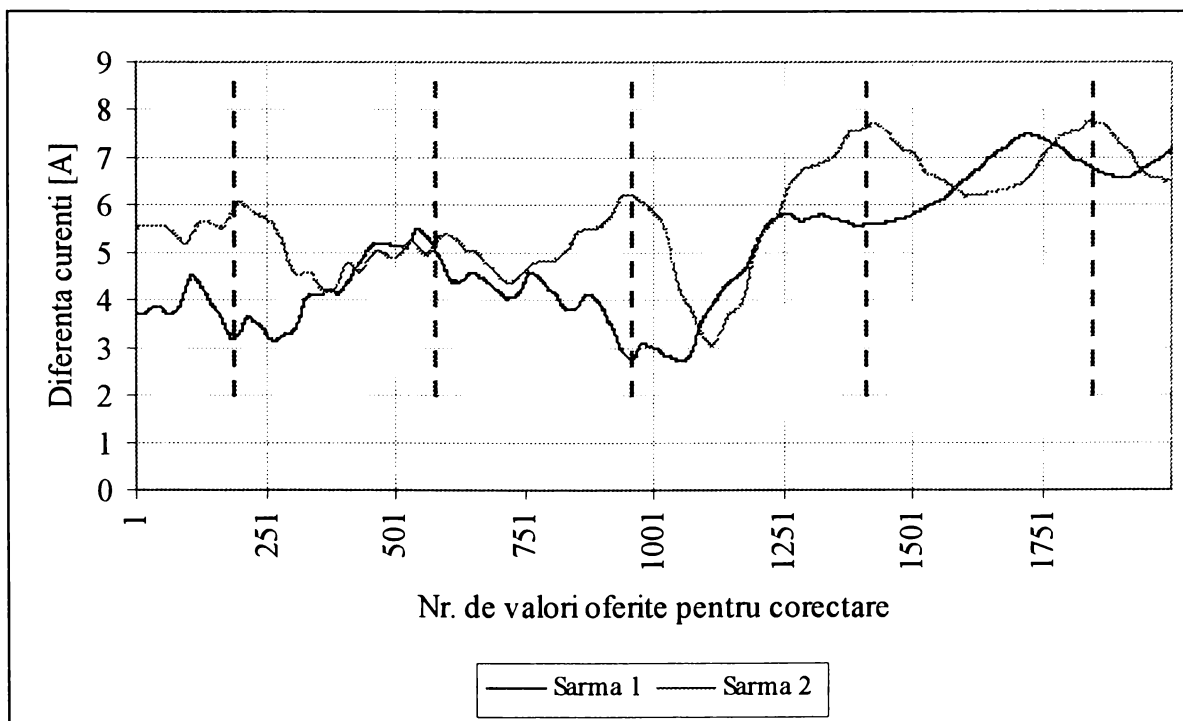


Fig. 7.27 Rezultatul comparării curenților reali prelucrați cu semnalul de referință construit cu ajutorul seriei Fourier (eșantion cu primele 2000 de valori)

Faptul că diferența nu a fost niciodată zero pe această porțiune arată că în tot acest timp arcele nu s-au aflat în axa rostului, ci au fost conduse paralel cu axa rostului, la o distanță care să le dea scurtări echivalente cu diferențele calculate de program.

8

Considerații finale. Contribuții originale. Perspective

Creșterea productivității proceselor de sudare implică și acțiuni orientate către automatizarea sau robotizarea acestora. Aceste acțiuni sunt strâns legate de asigurarea unor dispozitivări auxiliare care să asigure un anumit nivel de calitate îmbinării sudate. Sistemul senzorial utilizat la urmărirea rostului este un astfel de dispozitiv. Constituit dintr-o componentă fizică și o componentă-program, sistemul senzorial de urmărire a rostului efectuează o serie de operații având drept rezultat poziționarea geometrică, în timp real, a capului de sudare relativ la rostul de sudare:

- deplasarea, transversal pe rost, a capului de sudare cu scopul modificării continue a lungimii arcului; această mișcare de scanare a rostului trebuie să aibă loc după o lege bine determinată pentru a se putea construi o legătură între poziția momentanee a capului de sudare și valoarea curentului de sudare;
- detectarea variației curentului de sudare în timpul mișcării de scanare a rostului efectuată de către capul de sudare și înregistrarea, cu o anumită frecvență de eșantionare a unde de curent, a valorilor momentane ale curentului prin arc;
- recompunerea semnalului înregistrat și prelucrarea digitală a acestuia; rezultatul prelucrării trebuie să fie un semnal continuu și care să reflecte fidel modificarea lungimii arcului de sudare;
- operarea cu diverse modele matematice pentru crearea semnalului de referință; semnalul de referință va trebui, la rândul lui, să reflecte situația reală a modificărilor introduse de mișcarea de scanare a rostului de către capul de sudare;
- compararea semnalului de referință cu semnalul achiziționat și prelucrat; în vederea realizării acestei operații, sistemul de control senzor-arc trebuie să se asigure că frecvența semnalului de referință este egală cu frecvența semnalului înregistrat și prelucrat;
- comanda fizică a poziționării capului de sudare în baza semnalului prin diferență obținut în urma comparării; această operație este o simplă comandă a unui motor (în general motor pas cu pas /94/) care are rolul de a deplasa capul de sudare astfel încât diferența dintre valoarea semnalului real și valoarea semnalului de referință, la un moment dat, să se mențină într-un interval limitat în jurul valorii 0.

Prezenta lucrare a tratat aceste puncte din perspectiva “ne-fizică” a funcționării senzorului-arc. Totalitatea modelelor matematice care stau la baza funcționării senzorului-arc au fost construite în condițiile specifice sudării cu două sârme în mediu de gaze protectoare.

Informația redusă privind sudarea cu două sârme în mediu de gaze protectoare a impus abordarea de la “zero” a problemei urmăririi traiectoriei de sudare. Evoluând prin experimente de sudare, pas cu pas, au fost evidențiate principalele fenomene fizice specifice procedurii amintit și influența lor asupra funcționării sistemului senzor-arc. Dacă la început experimentările au fost brute și au vizat determinarea limitelor de funcționare a procedurii de sudare /96/, pe măsura evidențierii fenomenelor fizice, ele au devenit din ce în ce mai fine și mai orientate către scopul declarat al cercetării. După sute de experimentări și înregistrări de parametri de sudare a fost posibilă construirea de modele matematice ale unor fenomene fizice care influențează funcționarea sistemului senzor-arc (dezvoltarea forțelor electrodinamice având drept efecte lungirea arcelor și preîncălzirea sârmei a doua de la primul arc deviat, modificarea bilanțului termic la suplimentarea aportului de căldură, transferul de metal specific, etc.).

Unele modele matematice au fost construite pornind de la modelele existente la sudarea standard cu o singură sârmă fiind adaptate condițiilor specifice sudării cu două sârme. Toate aceste modele au fost verificate experimental sau simulate cu ajutorul unor programe de analiză matematică. În urma acestor verificări modelele matematice respective au fost confirmate și/sau corectate obținându-se astfel formele lor finale.

Greutatea lucrării stă în aceste modele matematice. Dacă literatura de specialitate nu oferă informații privind fizica sudării cu două sârme, modelele create în cadrul acestei lucrări rezolvă parțial această deficiență. Dacă literatura de specialitate nu oferă informații privind condițiile de funcționare ale unui senzor-arc la sudarea cu două sârme, prezenta lucrare rezolvă, parțial, și această deficiență.

Toate modelele propuse în cadrul lucrării sunt asamblate într-un program dedicat calculării parametrilor de funcționare a senzorului-arc. Acest program poate fi utilizat atât la simularea funcționării unui senzor-arc la sudarea cu două sârme, cât și la prelucrarea în timp real a datelor în timpul funcționării senzorului-arc.

Contribuția autorului constă în:

- evidențierea experimentală /96/, /97/, /98/, /99/ a caracteristicilor economice ale procedurii de sudare cu două sârme: rata de depunere și viteza de sudare; utilizând diferite sisteme de sudare (conform celor prezentate la încheierea capitoului 1) și optimizând configurația geometrică a sistemului utilizat, autorul a atins rate ale depunerii de până la 20 kg/h și viteze de sudare de până la 200 cm/min; aceste valori recomandă procedeul din punct de vedere economic multor aplicații din domeniile construcțiilor navale, construcțiilor de utilaje chimice, construcțiilor de autovehicule și de material rulant.
- evidențierea experimentală, /96/, /97/, a influențelor configurației geometrice a sistemului de sudare asupra stabilității procesului și asupra calității îmbinărilor sudate: influențele distanței dintre capetele celor două sârme asupra stabilității arderii arcelor și asupra stabilității transferului de metal, influențele unghiului dintre cele două sârme de sudare asupra stabilității procesului de transfer de metal și asupra stării băii de metal, influențele înclinării capului de sudare relativ la normala piesei de sudat asupra caracteristicilor geometrice ale depunerilor pentru încărcare prin sudare sau ale îmbinărilor sudate și influențele unghiului dintre planul celor două sârme și axa rostului de sudare.
- evidențierea experimentală a principalelor fenomene fizice dezvoltate în zona de sudare la sudarea cu două sârme în mediu de gaze protectoare: interacțiunea câmpurilor electromagnetice constând în special în dezvoltarea forțelor

electrodinamice, modificarea parametrilor de sudare la trecerea de la sudarea cu o singură sârmă la sudarea cu două sârme și invers, alierea în arc, etc;

- evidențierea experimentală a principalelor fenomene fizice care influențează funcționarea senzorilor-arc la sudarea cu două sârme: domeniile de valori optimabile ale parametrilor geometrici de poziționare relativă a celor două sârme, devierea sub acțiunea forțelor electrodinamice a arcelor și a traiectoriilor picăturilor de metal emise de la capetele sârmelor, lungirea arcelor datorită devierii, încălzirea suplimentară a celei de-a doua sârme prin radiație de la primul arc, fenomen care conduce la o topire accelerată a acesteia;
- determinarea experimentală și modelarea matematică a variației curentului de sudare la trecerea de la sudarea cu o singură sârmă la sudarea cu două sârme și invers – lungirea celor două arce conduce la o scădere bruscă a curenților prin arce, scădere menită revenirii la lungimea inițială a fiecărui arc în parte;
- evidențierea specificității transferului de metal la sudarea cu două sârme și importanța forțelor electrodinamice în cadrul procesului de transfer de metal; la transferul prin scurtcircuitare autorul evidențiază, analizează și explică mecanismul de acțiune a forțelor electrodinamice care tind să desprindă picătura de la capătul sârmei, modificând poziția secțiunii de desprindere astfel încât cantitatea de metal transferat să crească cu aproximativ 25%; autorul introduce, în premieră, această nouă variantă a transferului prin scurtcircuitare sub numele de *transfer prin scurtcircuitare cu suport electrodinamic*;
- elaborarea unui model al interacțiunii electromagnetice din zona de sudare, având la bază teorema Biot-Savart-Laplace; autorul construiește un model matematic al forței electrodinamice pornind de la observațiile făcute în timpul derulării programului experimental, program cu ajutorul căruia a evidențiat influența curenților de sudare și a configurației geometrice a sistemului de sudare asupra valorilor forțelor electrodinamice dezvoltate în spațiul celor două arce; modelul fizic utilizat este cel al definirii amperului, modificat pentru doi conductori cu lungime finită având o poziție oarecare în spațiu (și nu paraleli cum este cazul particular al definiției amperului);
- confirmarea modelului matematic al forțelor electrodinamice prin evidențierea experimentală a influenței distanței dintre cele două sârme asupra stabilității procesului de sudare; modelul creat arată o dependență directă și proporțională între valoarea forței electrodinamice și distanța dintre cele două sârme; modificând acest parametru geometric, autorul evidențiază, prin înregistrări video ale spațiului celor două arce, modificarea stabilității procesului de sudare sub influența directă a forțelor electrodinamice: modificarea accentuată a lungimi arcelor, agitarea băii de metal și devierea exagerată a picăturilor emise la reducerea distanței dintre capetele sârmelor de sudare;
- determinarea experimentală a domeniilor de existență a valorilor parametrilor geometrici de poziționare relativă a celor două sârme; având la bază două criterii de optimizare și anume stabilitatea procesului de sudare (ardere continuă și stabilă a celor două arce, transfer de metal uniform, stropiri reduse, zgomot redus al sistemului de arce) și încadrarea îmbinărilor sudate în nivelul B de acceptare a defectelor conform SR EN 25817, autorul stabilește domeniile de valori ale

parametrilor geometrici de poziționare relativă a celor două sârme pentru două din cele trei tipuri de configurații de sisteme de sudare cu două sârme prezentate la începutul capitolului 2;

- alegerea și optimizarea în frecvență a modului de oscilare a capului de sudare; parametru important în obținerea unui semnal util care să poată fi comparat cu semnalul de referință, frecvența de oscilare a capului de sudare transversal pe rost poate lua valori dintr-un domeniu relativ restrâns optimizat prin încercări experimentale de măsurare a maximelor undei de curent și a diferențelor maxime dintre un minim și un maxim succesive ale undei de curent;
- modelarea matematică a traiectoriilor descrise de capetele de sârmelor în timpul funcționării senzorului-arc; informație importantă pentru funcționarea senzorului-arc, legea de mișcare a capului de sudare, în vederea scanării transversale a rostului, trebuie corelată cu forma undei de curent înregistrate; autorul a propus trei variante de mișcare a capului de sudare, din care, prin analizarea înregistrărilor efectuate, a ales-o și a optimizat-o pe cea mai eficientă (care oferă cea mai “curată” formă a undei de curent și totodată și repetabilă în condiții similare);
- elaborarea a două modele matematice ale variației curentului emis de sursa de sudare pornind de la ecuația arcului electric a lui Ayrton; aceste modele redau reacția sursei de putere la modificarea lungimii arcului, reacție de care trebuie să țină cont orice senzor-arc;
- elaborarea modelului matematic de variație a curentului de sudare în timpul oscilării capului de sudare, utilizând tehnica dezvoltării în serie Fourier; construit având la bază dezvoltarea în serie Fourier, modelul matematic conține coeficienți calculați cu ajutorul unor valori determinate experimental pentru situații concrete de sudare; valorile respective, constituind o veritabilă bază de date experimentale, acoperă o plajă largă de situații;
- elaborarea modelului matematic de variație a curentului de sudare în timpul oscilării capului de sudare, utilizând tehnica asimilării cu o funcție periodică simplă; în cazul în care se dorește un calcul simplu și rapid, autorul propune și un al doilea model matematic, construit pornind de la aproximarea formei undei de curent cu o cosinusoidă “corectată”;
- simularea reacției dinamice a sistemului sursă-arc la modificarea lungimii arcului de sudare în timpul funcționării senzorului-arc; dezvoltare a modelului construit pe baza ecuației Ayrton, modelul reacției dinamice a sursei de sudare în timpul oscilării capului de sudare, oferă legea finală de variație a curentului prin arc; în funcție de lungimea momentană a arcului, se poate determina cu precizie valoarea curentului de sudare; modelul conține legea variației construită prin asimilarea cu funcția cosinus și permite sistemului de control un calcul rapid a valorilor undei de referință;
- construirea unei metode noi de prelucrare digitală a semnalului achiziționat pornind de la tehnicile avansate de prelucrare a imaginilor; fiind imposibilă utilizarea undei de curent înregistrate în cadrul etajului de comparare, autorul a propus o metodă de prelucrare a acestui semnal: modelarea formei undei cu ajutorul metodei mediei variabile și curățarea cu metoda Haar; în acest stadiu, unda de curent este

comparabilă cu unda de referință, rămânând sistemului numai sarcina de a extrage componenta frecvențială a semnalului real, aceasta fiind ultima etapă a prelucrării semnalului înregistrat;

- verificarea conformității semnalului achiziționat cu semnalul de referință prin compararea componentelor frecvențiale extrase din cele două semnale; fiind imposibilă compararea valorilor echivalente a două unde cu frecvențe diferite, este necesară verificarea egalității dintre cele două frecvențe; pentru aceasta, autorul utilizează transformarea discretă Fourier (DST), o metodă care permite extragerea componentelor frecvențiale ale unui semnal;
- elaborarea unui model matematic pentru calculul poziției momentane a capului de sudare;
- elaborarea unui model matematic pentru calculul valorilor curentului de sudare la diferite modificări ale lungimii arcului (pentru 10 valori distincte ale vitezei de avans al sârmei electrod);
- elaborarea unui model matematic de stabilire a sensului de deviere a capului de sudare, pornind de la teoria dezvoltării în serie Fourier;
- determinarea experimentală a situațiilor în care senzorul-arc funcționează eronat și elaborarea de metode pentru corectarea acestora; fiind vorba despre un sistem fizic supus unor perturbații considerate sau neconsiderate în modelele construite, autorul oferă utilizatorului și informații privind corecțiile necesare în situații bine precizate;
- elaborarea unui program de calcul al parametrilor de funcționare a unui senzor-arc la sudarea cu două sârme în mediu de gaze protectoare

Programul elaborat de autor este utilizabil în două situații: la calculul parametrilor de funcționare a senzorului-arc în timp real și la simularea funcționării unui senzor-arc. În ambele situații programul are la bază aceiași algoritmi, diferența constând în faptul că, în cazul simulării, programul preia semnalul real dintr-o înregistrare prealabilă existentă într-un fișier de date format *.xls.

Acest program poate fi adaptat și pentru alte procedee asemănătoare procedeeului de sudare cu două sârme, cum ar fi sudarea WIG cu sârmă caldă sau sudarea MIG/MAG cu o sârmă suplimentară încălzită.

Prezenta lucrare a fost dedicată studierii componentei program a unui sistem senzor-arc pentru urmărirea rostului la sudarea cu două sârme în mediu de gaze protectoare. Autorul nu a beneficiat de nici o sursă de informații privind fenomenele fizice specifice sudării cu două sârme, motiv pentru care a fost obligat să înceapă cercetările cu evidențierea acestor fenomene fizice specifice sudării cu două sârme.

Obiectivele propuse au fost atinse, rezultatul fiind programul construit pe un algoritm conținând modelele matematice dezvoltate în cadrul lucrării. Acest rezultat este o contribuție necesară domeniului dezvoltării sistemelor senzoriale utilizate în cadrul proceselor de sudare, prezența sa fiind așteptată de utilizatorii procedeeului de sudare cu două sârme în mediul de gaze protectoare.

Anexe

A1.1 - Stadiul actual (2000) al sistemelor senzor de urmărire a rostului de sudare conform Raportului Comisiei a XII-a IIW

A6.1 - Scurtarea arcului de sudare pentru diferite distanțe între sârme și diferite unghiuri de rotire a capului de sudare

A7.1 - Codul formei de corectare a valorilor calculate

A7.2 - Codul formei de calcul și prezentare a traiectoriei

A7.3 - Codul formei de comparare a semnalelor

Anexa A1.I

Stadiul actual (2000) al sistemelor senzor de urmărire a rostului de sudare Conform Raportului Comisiei a XII-a IIW /41/

1. Producători. Caracteristici

	Principiu	Viteză	Rezoluție	Distanțe de măsurare	Aplicații
Cloos Limited					
CLDS 90/60 laser distance sensor	Triangulație	Mediu	1.5 mm (square butt), 1-1.5 mm (lap)	90mm	Detectarea muchiiilor rostului de sudare
Seam pilot laser sensor system	Triangulație	Mediu	< 0.1 mm	90.5mm	Urmărirea rostului la sudarea cu arc electric
Gulco International Limited					
WSG 1100 and 2100 super guide tracker	Tactil	Lent	0.05 mm	N/A – Senzor tactil	Detectarea capetelor rostului de sudare
Meta technologies					
Metatorch MTX 20	Lumină	Rapid	0.06 mm longitudinal, 0.12 mm vertical	65-85mm	Găsirea și urmărirea rostului de sudare
Metatorch MTX 10	Lumină	Rapid	0.05 mm longitudinal, 0.10 mm vertical	35-65mm	Găsirea și urmărirea rostului de sudare
MSV Modular Vision Systems Inc					
MVS Laservision tube mill control system	Timp de iluminare	Rapid	Specifică senzorilor vizuali laser de tip MVS	Variabilă	Găsirea și urmărirea rostului de sudare; controlul procedurilor de sudare TIG, laser și plasma
Laservision MVS-10	Timp de iluminare	Rapid	0.04 mm sau 0.02mm	Variabilă	Urmărirea rostului de sudare și monitorizarea sudării
Laservision MVS-30	Timp de iluminare	Rapid	0.125mm sau 0.064mm	Variabilă	Urmărirea rostului de sudare și monitorizarea sudării robotizate

Precitec GmbH					
Precitec Lasermatic Series	Capacitiv	Lent	< 0.01mm	0.5mm - 1.5mm	Monitorizarea distanței dintre senzor și piesa de sudat
Quantum Laser Engineering Limited					
Precitec MSI	Inductiv	Lent	< 0.2mm	6mm	Detectarea muchiiilor rostului, urmărirea rostului de sudare și realizarea diverselor poziționări specifice procesului de sudare
Redman Controls and Electronics					
Redman MBT 120 high res. Video seam tracker	Timp de iluminare	Rapid	1 pixel lungime (<0.05mm)	Variabilă	Urmărirea rostului de sudare la sudarea TIG și sudarea cu plasmă
Redman MBT 330 high res. Video seam tracker	Timp de iluminare	Rapid	1 pixel lungime (<0.05mm)	Variabilă	Urmărirea rostului de sudare la sudarea TIG și sudarea cu plasmă
Redman VT 220 TR video seam tracker	Timp de iluminare	Rapid	1 pixel lungime (<0.05mm)	Variabilă	Urmărirea rostului de sudare la sudarea TIG
Selcom					
Selcom Optocator sweeping beam scanner S001	Triangulație	Mediu	0.02 mm (înălțime), 0.02 mm (unghi)	190 mm	Măsurarea bidimensională a profilelor în cazul sudării robotizate
Selcom seam finder 2201	Triangulație	Mediu	0.06 mm	260 mm	Sudarea cu arc electric, în special sudarea cu transfer prin scurtcircuitare a tablelor subțiri
Selcom seam finder 2301	Triangulație	Mediu	0.06 mm	281.5 mm	Sudarea cu arc electric, în special sudarea cu transfer prin scurtcircuitare a tablelor subțiri
Selcom Optocator laser sensor 2008	Triangulație	Mediu	0.025-0.256 mm	390-1200 mm	Aplicații industriale în cazul rosturilor prelucrate grob
Selcom Optocator laser sensor 2201	Triangulație	Mediu	0.002, 0.004 sau 0.008 mm	95 mm	Măsurarea grosimii tabelor și a profilelor

Selcom Optocator laser sensor 2207	Triangulație	Mediu	0.008-0.05 mm	180, 260 or 325mm	Profilarea pieselor din oțel și detectarea îmbinărilor realizate robotizat
Selcom Optocator laser sensor 2301	Triangulație	Mediu	0.002, 0.004 sau 0.0065 mm	95 or 180 mm	Detectarea formei rostului și urmărirea formei depunerii
Selcom SLS 5000 laser sensor	Triangulație	Mediu	1.5, 2.5, 5, 9, 18, 25, 38 or 500 μm	50, 100, 200 sau 300 mm	Inspecție de calitate la sudarea robotizată, control adaptiv al înălțimii sudurii
University of Liverpool					
The University of Liverpool seam finder/tracker	Timp de iluminare	Rapid	1 pixel lungime (< 0.0 5mm)	100 mm (modificabilă)	Detectarea formei rostului și urmărirea formei depunerii Analiză a profilului la sudarea MIG, TIG și plasma)

2. Mod de operare (on-line / off-line)

	Aplicație măsurare		Urmărire rost		Măsurarea profilelor	
	On-line	Off-line	On-line	Off-line	On-line	Off-line
Cloos						
CLDS 90/60 laser distance sensor	-	-	TIG, MIG*	TIG, MIG, Laser	-	-
Seam pilot laser sensor system	TIG, MIG*	TIG, MIG, Laser*	TIG, MIG	TIG, MIG, Laser	TIG, MIG*	TIG, MIG, Laser
Gilloc International Limited						
WSG 1100 and 2100 suocer guide tracker	TIG	TIG, MIG, Laser*	TIG	TIG, MIG, Laser	TIG	TIG, MIG, Laser
Meta Technologies						
Metatorch MTX 10	TIG, MIG	TIG, MIG	TIG, MIG	TIG, MIG	TIG, MIG	TIG, MIG
Metatorch MTX 20	TIG, MIG	TIG, MIG	TIG, MIG	TIG, MIG	TIG, MIG	TIG, MIG
MVS Modular Vision Systems Inc						
MSV Laservision tube mill control system	TIG, MIG	TIG, MIG, Laser	TIG, MIG	TIG, MIG, Laser	TIG, MIG	TIG, MIG, Laser
Laservision MVS-10	TIG, MIG	TIG, MIG, Laser	TIG, MIG	TIG, MIG, Laser	TIG, MIG	TIG, MIG, Laser
Laservision MVS-30	TIG, MIG	TIG, MIG, Laser	TIG, MIG	TIG, MIG, Laser	TIG, MIG	TIG, MIG, Laser

Precitec GmbH						
Precitec MS1	TIG	TIG, MIG	TIG	TIG, MIG, Laser	TIG	TIG, MIG, Laser
Quantum Laser Engineering Limited						
Precitec Lasermatic Series	TIG	TIG, MIG, Laser*	TIG	TIG, MIG, Laser	TIG	TIG, MIG, Laser
Redman Controls and Electronics						
Redman MBT 120 high res. Video seam tracker	TIG, MIG*	TIG, MIG, Laser*	TIG, MIG*	TIG, MIG, Laser	TIG, MIG	TIG, MIG, Laser
Redman MBT 330 high res. Video seam tracker	TIG, MIG*	TIG, MIG, Laser*	TIG, MIG*	TIG, MIG, Laser	TIG, MIG	TIG, MIG, Laser
Redman VT 220 TR video seam tracker	TIG, MIG*	TIG, MIG, Laser*	TIG, MIG*	TIG, MIG, Laser	TIG, MIG	TIG, MIG, Laser
Selcom						
Selcom Optocator sweeping beam scanner S001	TIG	TIG, MIG, Laser*	TIG, MIG*	TIG, MIG, Laser	TIG, MIG*	TIG, MIG, Laser
Selcom seam finder 2201	TIG, MIG*	TIG, MIG, Laser*	TIG, MIG*	TIG, MIG, Laser	TIG, MIG*	TIG, MIG, Laser
Selcom seam finder 2301	TIG, MIG*	TIG, MIG, Laser*	TIG, MIG*	TIG, MIG, Laser	TIG, MIG*	TIG, MIG, Laser
Selcom Optocator laser sensor 2008	-	-	-	-	-	-
Selcom Optocator laser sensor 2201	-	-	-	-	-	-
Selcom Optocator laser sensor 2207	TIG, MIG*	TIG, MIG, Laser	TIG, MIG*	TIG, MIG, Laser	TIG, MIG*	TIG, MIG, Laser
Selcom Optocator laser sensor 2301	TIG, MIG*	TIG, MIG, Laser	TIG, MIG*	TIG, MIG, Laser	TIG, MIG*	TIG, MIG, Laser
Selcom SLS 5000 laser sensor	TIG, MIG*	TIG, MIG, Laser	TIG, MIG*	TIG, MIG, Laser	TIG, MIG*	TIG, MIG, Laser
University of Liverpool						
Seam finder/tracker	TIG, MIG	TIG, MIG, Laser	TIG, MIG, Laser*	TIG, MIG, Laser	TIG, MIG, Laser*	TIG, MIG, Laser

Anexa A6.1

Scurtarea arcului de sudare pentru diferite distanțe între sârme și diferite unghiuri de rotire a capului de sudare

În tabelele A6.1.1-A6.1.6 sunt prezentate valorile scurtărilor arcelor de sudare la modificarea a doi parametri geometrici ai oscilării capului de sudare: distanța dintre cele două sârme de sudare, $D=2R$, și unghiul cu care este rotit capul de sudare, α_r . Valorile prezentate în paranteze sunt determinate experimental. Elementele geometrice prezentate simbolic în tabel sunt conform figurii A.6.1.1.

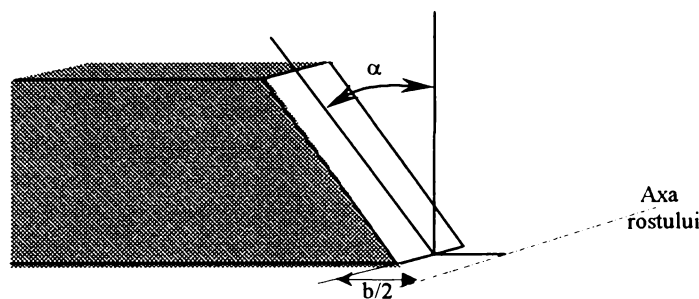


Fig. A6.1.1 Parametrii geometrici ai rostului de sudare

Tabel A6.1.1

Raza de oscilare-R [mm]	Amplitudine oscilare-x [mm]	Scurtare arc - $y_{\alpha, b}$ [mm]						
Unghi oscilare: $\alpha_r=90^\circ$								
R	x	y15,0	y15, 0.5	y15, 1	y15, 1.5	y15, 2	y15, 2.5	y15, 3
3.500	2.475	9.240	8.306	7.373	6.439	5.506	4.572	3.639
3.600	2.545	9.504	8.570	7.637	6.703	5.770	4.836	3.903
3.700	2.616	9.768	8.834	7.901	6.967	6.034	5.100	4.167
3.800	2.687	10.032	9.098	8.165	7.231	6.298	5.364	4.431
3.900	2.757	10.296	9.362	8.429	7.495	6.562	5.628	4.695
4.000	2.828	10.560	9.626	8.693	7.759	6.826 (~6)	5.892	4.959
4.100	2.899	10.824	9.890	8.957	8.023	7.090	6.156	5.223
4.200	2.969	11.088	10.154	9.221	8.287	7.354	6.420	5.487
4.300	3.040	11.352	10.418	9.485	8.551	7.618	6.684	5.751
4.400	3.111	11.616	10.682	9.749	8.815	7.882	6.948	6.015
4.500	3.182	11.880	10.946	10.013	9.079	8.146 (~7)	7.212	6.279
4.600	3.252	12.144	11.210	10.277	9.343	8.410	7.476	6.543
4.700	3.323	12.408	11.474	10.541	9.607	8.674	7.740	6.807
4.800	3.394	12.672	11.738	10.805	9.871	8.938	8.004	7.071
4.900	3.464	12.936	12.002	11.069	10.135	9.202	8.268	7.335
5.000	3.535	13.200	12.266	11.333	10.399	9.466 (~8.5)	8.532	7.599

Tabel A6.1.2

Raza de oscilare-R [mm]	Amplitudine oscilare-x [mm]	Scurtare arc - $y_{\alpha, b}$ [mm]						
Unghi oscilare: $\alpha_r=90^\circ$								
R	x	y20,0	y20, 0.5	y20, 1	y20, 1.5	y20, 2	y20, 2.5	y20, 3
3.500	2.475	6.802	6.115	5.428	4.741	4.053	3.366	2.679
3.600	2.545	6.997	6.309	5.622	4.935	4.248	3.560	2.873
3.700	2.616	7.191	6.504	5.817	5.129	4.442	3.755	3.068
3.800	2.687	7.385	6.698	6.011	5.324	4.636	3.949	3.262
3.900	2.757	7.580	6.893	6.205	5.518	4.831	4.144	3.456
4.000	2.828	7.774	7.087	6.400	5.712	5.025 (~4.5)	4.338	3.651

4.100	2.899	7.969	7.281	6.594	5.907	5.220	4.532	3.845
4.200	2.969	8.163	7.476	6.788	6.101	5.414	4.727	4.039
4.300	3.040	8.357	7.670	6.983	6.295	5.608	4.921	4.234
4.400	3.111	8.552	7.864	7.177	6.490	5.803	5.115	4.428
4.500	3.182	8.746	8.059	7.371	6.684	5.997 (~5)	5.310	4.622
4.600	3.252	8.940	8.253	7.566	6.879	6.191	5.504	4.817
4.700	3.323	9.135	8.447	7.760	7.073	6.386	5.698	5.011
4.800	3.394	9.329	8.642	7.954	7.267	6.580	5.893	5.205
4.900	3.464	9.523	8.836	8.149	7.462	6.774	6.087	5.400
5.000	3.535	9.718	9.030	8.343	7.656	6.969 (~6)	6.281	5.594

Tabel A6.1.3

Raza de oscilare-R [mm]	Amplitudine oscilare-x [mm]	Scurtare arc - $y_{\alpha, b}$ [mm]						
		Unghi oscilare: $\alpha_r=80^\circ$						
R	x	y15,0	y15, 0.5	y15, 1	y15, 1.5	y15, 2	y15, 2.5	y15, 3
3.500	2.240	8.364	7.431	6.497	5.564	4.630	3.697	2.763
3.600	2.304	8.603	7.670	6.736	5.803	4.869	3.936	3.002
3.700	2.368	8.842	7.909	6.975	6.042	5.108	4.175	3.241
3.800	2.432	9.081	8.148	7.214	6.281	5.347	4.414	3.480
3.900	2.496	9.320	8.387	7.453	6.520	5.586	4.653	3.719
4.000	2.560	9.559	8.626	7.692	6.759	5.825 (~5)	4.892	3.958
4.100	2.624	9.798	8.865	7.931	6.998	6.064	5.131	4.197
4.200	2.688	10.037	9.104	8.170	7.237	6.303	5.370	4.436
4.300	2.752	10.276	9.343	8.409	7.476	6.542	5.609	4.675
4.400	2.816	10.515	9.582	8.648	7.715	6.781	5.847	4.914
4.500	2.880	10.754	9.821	8.887	7.953	7.020 (~6.5)	6.086	5.153
4.600	2.944	10.993	10.059	9.126	8.192	7.259	6.325	5.392
4.700	3.008	11.232	10.298	9.365	8.431	7.498	6.564	5.631
4.800	3.072	11.471	10.537	9.604	8.670	7.737	6.803	5.870
4.900	3.136	11.710	10.776	9.843	8.909	7.976	7.042	6.109
5.000	3.200	11.949	11.015	10.082	9.148	8.215 (~7.5)	7.281	6.348

Tabel A6.1.4

Raza de oscilare-R [mm]	Amplitudine oscilare-x [mm]	Scurtare arc - $y_{\alpha, b}$ [mm]						
		Unghi oscilare: $\alpha_r=80^\circ$						
R	x	y20,0	y20, 0.5	y20, 1	y20, 1.5	y20, 2	y20, 2.5	y20, 3
3.500	2.240	6.158	5.470	4.783	4.096	3.409	2.722	2.034
3.600	2.304	6.334	5.646	4.959	4.272	3.585	2.897	2.210
3.700	2.368	6.510	5.822	5.135	4.448	3.761	3.073	2.386
3.800	2.432	6.686	5.998	5.311	4.624	3.937	3.249	2.562
3.900	2.496	6.861	6.174	5.487	4.800	4.112	3.425	2.738
4.000	2.560	7.037	6.350	5.663	4.976	4.288 (~3)	3.601	2.914
4.100	2.624	7.213	6.526	5.839	5.152	4.464	3.777	3.090
4.200	2.688	7.389	6.702	6.015	5.328	4.640	3.953	3.266
4.300	2.752	7.565	6.878	6.191	5.503	4.816	4.129	3.442
4.400	2.816	7.741	7.054	6.367	5.679	4.992	4.305	3.618
4.500	2.880	7.917	7.230	6.543	5.855	5.168 (~4)	4.481	3.794
4.600	2.944	8.093	7.406	6.719	6.031	5.344	4.657	3.970
4.700	3.008	8.269	7.582	6.894	6.207	5.520	4.833	4.145
4.800	3.072	8.445	7.758	7.070	6.383	5.696	5.009	4.321
4.900	3.136	8.621	7.934	7.246	6.559	5.872	5.185	4.497
5.000	3.200	8.797	8.110	7.422	6.735	6.048 (~5)	5.361	4.673

Tabel A6.1.5

Raza de oscilare-R [mm]	Amplitudine oscilare-x [mm]	Scurtare arc - $y_{\alpha, b}$ [mm]						
Unghi oscilare: $\alpha_r=70^\circ$								
R	x	y15,0	y15, 0.5	y15, 1	y15, 1.5	y15, 2	y15, 2.5	y15, 3
3.500	2.007	7.495	6.562	5.628	4.695	3.761	2.828	1.894
3.600	2.065	7.709	6.776	5.842	4.909	3.975	3.042	2.108
3.700	2.122	7.923	6.990	6.056	5.123	4.189	3.256	2.322
3.800	2.179	8.138	7.204	6.271	5.337	4.404	3.470	2.537
3.900	2.237	8.352	7.418	6.485	5.551	4.618	3.684	2.751
4.000	2.294	8.566	7.632	6.699	5.765	4.832 (~4)	3.898	2.965
4.100	2.351	8.780	7.847	6.913	5.979	5.046	4.112	3.179
4.200	2.409	8.994	8.061	7.127	6.194	5.260	4.327	3.393
4.300	2.466	9.208	8.275	7.341	6.408	5.474	4.541	3.607
4.400	2.523	9.422	8.489	7.555	6.622	5.688	4.755	3.821
4.500	2.581	9.637	8.703	7.770	6.836	5.903 (~5.5)	4.969	4.036
4.600	2.638	9.851	8.917	7.984	7.050	6.117	5.183	4.250
4.700	2.695	10.065	9.131	8.198	7.264	6.331	5.397	4.464
4.800	2.753	10.279	9.346	8.412	7.479	6.545	5.612	4.678
4.900	2.810	10.493	9.560	8.626	7.693	6.759	5.826	4.892
5.000	2.868	10.707	9.774	8.840	7.907	6.973 (~6)	6.040	5.106

Tabel A6.1.6

Raza de oscilare-R [mm]	Amplitudine oscilare-x [mm]	Scurtare arc - $y_{\alpha, b}$ [mm]						
Unghi oscilare: $\alpha_r=70^\circ$								
R	x	y20,0	y20, 0.5	y20, 1	y20, 1.5	y20, 2	y20, 2.5	y20, 3
3.500	2.007	5.518	4.831	4.143	3.456	2.769	2.082	1.394
3.600	2.065	5.676	4.988	4.301	3.614	2.927	2.239	1.552
3.700	2.122	5.833	5.146	4.459	3.771	3.084	2.397	1.710
3.800	2.179	5.991	5.304	4.616	3.929	3.242	2.555	1.867
3.900	2.237	6.149	5.461	4.774	4.087	3.400	2.712	2.025
4.000	2.294	6.306	5.619	4.932	4.244	3.557	2.870	2.183
4.100	2.351	6.464	5.777	5.089	4.402	3.715	3.028	2.340
4.200	2.409	6.621	5.934	5.247	4.560	3.873	3.185	2.498
4.300	2.466	6.779	6.092	5.405	4.717	4.030	3.343	2.656
4.400	2.523	6.937	6.250	5.562	4.875	4.188	3.501	2.813
4.500	2.581	7.094	6.407	5.720	5.033	4.345	3.658	2.971
4.600	2.638	7.252	6.565	5.878	5.190	4.503	3.816	3.129
4.700	2.695	7.410	6.723	6.035	5.348	4.661	3.974	3.286
4.800	2.753	7.567	6.880	6.193	5.506	4.818	4.131	3.444
4.900	2.810	7.725	7.038	6.351	5.663	4.976	4.289	3.602
5.000	2.868	7.883	7.195	6.508	5.821	5.134	4.446	3.759

Valorile scurtărilor arcelor sunt relativ mari și orice eroare introdusă în valorile parametrilor geometrici ai rostului și procesului de oscilare conduc la variații importante ale acestor scurtări.

Anexa A7.1

Codul formei de corectare a valorilor calculate

Forma de
corectare a
valorilor calculate

```

Private Sub Command1_Click()
End
End Sub

Private Sub Command2_Click()
Form6.Enabled = False
Form6.Visible = False
Form2.Enabled = True
Form2.Visible = True
End Sub

Private Sub Command3_Click()

Form6.Visible = False
Form6.Enabled = True
Form7.Visible = True
Form7.Enabled = True
Form7.Text1 = 1 * Form6.Text2
Form7.Text2 = 2 * Form6.Text2
Form7.Text3 = 3 * Form6.Text2
Form7.Text4 = 4 * Form6.Text2
Form7.Text5 = 5 * Form6.Text2
Form7.Text6 = 6 * Form6.Text2
Form7.Text7 = 7 * Form6.Text2
Form7.Text8 = 8 * Form6.Text2
Form7.Text9 = 9 * Form6.Text2
Form7.Text10 = 10 * Form6.Text2
Form7.Text11 = 11 * Form6.Text2
'calcul IsIF
Form7.Text12 = 1 / 2 * Form6.Text1 +
Form6.Text4 * Cos(2 * 3.14 /
Form6.Text2 * 1 * 1 * Form6.Text2 /
11) + Form6.Text9 * Sin(2 * 3.14 /
Form6.Text2 * 1 * 1 * Form6.Text2 /
11) + Form6.Text5 * Cos(2 * 3.14 /
Form6.Text2 * 2 * 1 * Form6.Text2 /
11) + Form6.Text10 * Sin(2 * 3.14 /
Form6.Text2 * 2 * 1 * Form6.Text2 /
11) + Form6.Text8 * Cos(2 * 3.14 /
Form6.Text2 * 3 * 1 * Form6.Text2 /
11) + Form6.Text11 * Sin(2 * 3.14 /
Form6.Text2 * 3 * 1 * Form6.Text2 /
11)
Form7.Text13 = 1 / 2 * Form6.Text1 +
Form6.Text4 * Cos(2 * 3.14 /
Form6.Text2 * 1 * 2 * Form6.Text2 /
11) + Form6.Text9 * Sin(2 * 3.14 /
Form6.Text2 * 1 * 2 * Form6.Text2 /
11) + Form6.Text5 * Cos(2 * 3.14 /
Form6.Text2 * 2 * 2 * Form6.Text2 /
11) + Form6.Text10 * Sin(2 * 3.14 /
Form6.Text2 * 2 * 2 * Form6.Text2 /
11) + Form6.Text8 * Cos(2 * 3.14 /
Form6.Text2 * 3 * 2 * Form6.Text2 /
11) + Form6.Text11 * Sin(2 * 3.14 /
Form6.Text2 * 3 * 2 * Form6.Text2 /
11)
Form7.Text14 = 1 / 2 * Form6.Text1 +
Form6.Text4 * Cos(2 * 3.14 /
Form6.Text2 * 1 * 3 * Form6.Text2 /
11) + Form6.Text9 * Sin(2 * 3.14 /
Form6.Text2 * 1 * 3 * Form6.Text2 /
11) + Form6.Text5 * Cos(2 * 3.14 /
Form6.Text2 * 2 * 3 * Form6.Text2 /
11) + Form6.Text10 * Sin(2 * 3.14 /
Form6.Text2 * 2 * 3 * Form6.Text2 /
11) + Form6.Text8 * Cos(2 * 3.14 /
Form6.Text2 * 3 * 3 * Form6.Text2 /
11) + Form6.Text11 * Sin(2 * 3.14 /
Form6.Text2 * 3 * 1 * Form6.Text2 /
11)
Form7.Text15 = 1 / 2 * Form6.Text1 +
Form6.Text4 * Cos(2 * 3.14 /
Form6.Text2 * 1 * 4 * Form6.Text2 /
11) + Form6.Text9 * Sin(2 * 3.14 /
Form6.Text2 * 1 * 4 * Form6.Text2 /
11) + Form6.Text5 * Cos(2 * 3.14 /
Form6.Text2 * 2 * 4 * Form6.Text2 /
11) + Form6.Text10 * Sin(2 * 3.14 /
Form6.Text2 * 2 * 4 * Form6.Text2 /
11) + Form6.Text8 * Cos(2 * 3.14 /
Form6.Text2 * 3 * 4 * Form6.Text2 /
11) + Form6.Text11 * Sin(2 * 3.14 /
Form6.Text2 * 3 * 1 * Form6.Text2 /
11)
Form7.Text16 = 1 / 2 * Form6.Text1 +
Form6.Text4 * Cos(2 * 3.14 /
Form6.Text2 * 1 * 5 * Form6.Text2 /
11) + Form6.Text9 * Sin(2 * 3.14 /
Form6.Text2 * 1 * 5 * Form6.Text2 /
11) + Form6.Text5 * Cos(2 * 3.14 /
Form6.Text2 * 2 * 5 * Form6.Text2 /
11) + Form6.Text10 * Sin(2 * 3.14 /
Form6.Text2 * 2 * 5 * Form6.Text2 /
11) + Form6.Text8 * Cos(2 * 3.14 /
Form6.Text2 * 3 * 5 * Form6.Text2 /
11) + Form6.Text11 * Sin(2 * 3.14 /
Form6.Text2 * 3 * 1 * Form6.Text2 /
11)

```



```

Text4.Text = ""
Text4.Visible = False
Text5.Text = ""
Text5.Visible = False
Text8.Text = ""
Text8.Visible = False
Text9.Text = ""
Text9.Visible = False
Text10.Text = ""
Text10.Visible = False
Text11.Text = ""
Text11.Visible = False
Text12.Text = ""
Text12.Visible = False
Text13.Text = ""
Text13.Visible = False
Text14.Text = ""
Text14.Visible = False
Text15.Text = ""
Text15.Visible = False
Text16.Text = ""
Text16.Visible = False
Text17.Text = ""
Text17.Visible = False
Text18.Text = ""
Text18.Visible = False
Text6.Text = Form5.Text5
Text7.Text = Form5.Text6
End Sub

Private Sub Option1_Click()

Option1.FontBold = True
Option2.FontBold = False
Option3.FontBold = False
Option4.FontBold = False
Option5.FontBold = False
Option6.Value = True
Option7.Value = True
Text1.Visible = True
Text4.Visible = True
Text5.Visible = True
Text8.Visible = True
Text9.Visible = True
Text10.Visible = True
Text11.Visible = True
Text12.Visible = True
Text13.Visible = True
Text14.Visible = True
Text15.Visible = True
Text16.Visible = True
Text17.Visible = True
Text18.Visible = True
Text3.Text = "4"
Text2.Text = 1 / 4
End Sub

Private Sub Option10_Click()

If Text6.Text = "70" Then
Data1.RecordSource = "Is 6 70"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "85" Then
Data1.RecordSource = "Is 6 85"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "105" Then
Data1.RecordSource = "Is 6 105"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "125" Then
Data1.RecordSource = "Is 6 125"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "140" Then
Data1.RecordSource = "Is 6 140"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "160" Then
Data1.RecordSource = "Is 6 160"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "180" Then
Data1.RecordSource = "Is 6 180"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "195" Then
Data1.RecordSource = "Is 6 195"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "200" Then
Data1.RecordSource = "Is 6 200"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "220" Then
Data1.RecordSource = "Is 6 220"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "230" Then
Data1.RecordSource = "Is 6 230"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "235" Then
Data1.RecordSource = "Is 6 235"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "250" Then
Data1.RecordSource = "Is 6 250"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "270" Then
Data1.RecordSource = "Is 6 270"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "295" Then
Data1.RecordSource = "Is 6 295"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "300" Then
Data1.RecordSource = "Is 6 300"
Data1.Refresh

```

```

ElseIf Text6.Text = "320" Then
Data1.RecordSource = "Is 6 320"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "325" Then
Data1.RecordSource = "Is 6 325"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "335" Then
Data1.RecordSource = "Is 6 335"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "355" Then
Data1.RecordSource = "Is 6 355"
Data1.Refresh
End If
End Sub

Private Sub Option11_Click()
If Text7.Text = "70" Then
Data2.RecordSource = "Is 6 70"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "85" Then
Data2.RecordSource = "Is 6 85"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "105" Then
Data2.RecordSource = "Is 6 105"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "125" Then
Data2.RecordSource = "Is 6 125"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "140" Then
Data2.RecordSource = "Is 6 140"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "160" Then
Data2.RecordSource = "Is 6 160"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "180" Then
Data2.RecordSource = "Is 6 180"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "195" Then
Data2.RecordSource = "Is 6 195"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "200" Then
Data2.RecordSource = "Is 6 200"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "220" Then
Data2.RecordSource = "Is 6 220"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "230" Then
Data2.RecordSource = "Is 6 230"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "235" Then
Data2.RecordSource = "Is 6 235"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "250" Then
Data2.RecordSource = "Is 6 250"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "270" Then
Data2.RecordSource = "Is 6 270"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "295" Then
Data2.RecordSource = "Is 6 295"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "300" Then
Data2.RecordSource = "Is 6 300"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "320" Then
Data2.RecordSource = "Is 6 320"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "325" Then
Data2.RecordSource = "Is 6 325"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "335" Then
Data2.RecordSource = "Is 6 335"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "355" Then
Data2.RecordSource = "Is 6 355"
Data2.Refresh
End If
End Sub

Private Sub Option12_Click()
If Text6.Text = "70" Then
Data1.RecordSource = "Is 7 70"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "85" Then
Data1.RecordSource = "Is 7 85"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "105" Then
Data1.RecordSource = "Is 7 105"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "125" Then
Data1.RecordSource = "Is 7 125"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "140" Then
Data1.RecordSource = "Is 7 140"
Data1.Refresh

```



```
ElseIf Text6.Text = "160" Then
Data1.RecordSource = "Is 7 160"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "180" Then
Data1.RecordSource = "Is 7 180"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "195" Then
Data1.RecordSource = "Is 7 195"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "200" Then
Data1.RecordSource = "Is 7 200"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "220" Then
Data1.RecordSource = "Is 7 220"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "230" Then
Data1.RecordSource = "Is 7 230"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "235" Then
Data1.RecordSource = "Is 7 235"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "250" Then
Data1.RecordSource = "Is 7 250"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "270" Then
Data1.RecordSource = "Is 7 270"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "295" Then
Data1.RecordSource = "Is 7 295"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "300" Then
Data1.RecordSource = "Is 7 300"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "320" Then
Data1.RecordSource = "Is 7 320"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "325" Then
Data1.RecordSource = "Is 7 325"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "335" Then
Data1.RecordSource = "Is 7 335"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "355" Then
Data1.RecordSource = "Is 7 355"
Data1.Refresh
End If
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Option13_Click()

If Text7.Text = "70" Then
Data2.RecordSource = "Is 7 70"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "85" Then
Data2.RecordSource = "Is 7 85"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "105" Then
Data2.RecordSource = "Is 7 105"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "125" Then
Data2.RecordSource = "Is 7 125"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "140" Then
Data2.RecordSource = "Is 7 140"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "160" Then
Data2.RecordSource = "Is 7 160"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "180" Then
Data2.RecordSource = "Is 7 180"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "195" Then
Data2.RecordSource = "Is 7 195"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "200" Then
Data2.RecordSource = "Is 7 200"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "220" Then
Data2.RecordSource = "Is 7 220"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "230" Then
Data2.RecordSource = "Is 7 230"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "235" Then
Data2.RecordSource = "Is 7 235"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "250" Then
Data2.RecordSource = "Is 7 250"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "270" Then
Data2.RecordSource = "Is 7 270"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "295" Then
```

```

Data2.RecordSource = "Is 7 295"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "300" Then
Data2.RecordSource = "Is 7 300"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "320" Then
Data2.RecordSource = "Is 7 320"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "325" Then
Data2.RecordSource = "Is 7 325"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "335" Then
Data2.RecordSource = "Is 7 335"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "355" Then
Data2.RecordSource = "Is 7 355"
Data2.Refresh

End If
End Sub

Private Sub Option14_Click()

If Text6.Text = "70" Then
Data1.RecordSource = "Is 8 70"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "85" Then
Data1.RecordSource = "Is 8 85"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "105" Then
Data1.RecordSource = "Is 8 105"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "125" Then
Data1.RecordSource = "Is 8 125"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "140" Then
Data1.RecordSource = "Is 8 140"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "160" Then
Data1.RecordSource = "Is 8 160"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "180" Then
Data1.RecordSource = "Is 8 180"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "195" Then
Data1.RecordSource = "Is 8 195"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "200" Then
Data1.RecordSource = "Is 8 200"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "220" Then
Data1.RecordSource = "Is 8 220"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "230" Then
Data1.RecordSource = "Is 8 230"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "235" Then
Data1.RecordSource = "Is 8 235"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "250" Then
Data1.RecordSource = "Is 8 250"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "270" Then
Data1.RecordSource = "Is 8 270"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "295" Then
Data1.RecordSource = "Is 8 295"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "300" Then
Data1.RecordSource = "Is 8 300"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "320" Then
Data1.RecordSource = "Is 8 320"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "325" Then
Data1.RecordSource = "Is 8 325"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "335" Then
Data1.RecordSource = "Is 8 335"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "355" Then
Data1.RecordSource = "Is 8 355"
Data1.Refresh
End If
End Sub

Private Sub Option15_Click()

If Text7.Text = "70" Then
Data2.RecordSource = "Is 8 70"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "85" Then
Data2.RecordSource = "Is 8 85"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "105" Then
Data2.RecordSource = "Is 8 105"

```

```

Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "125" Then
Data2.RecordSource = "Is 8 125"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "140" Then
Data2.RecordSource = "Is 8 140"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "160" Then
Data2.RecordSource = "Is 8 160"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "180" Then
Data2.RecordSource = "Is 8 180"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "195" Then
Data2.RecordSource = "Is 8 195"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "200" Then
Data2.RecordSource = "Is 8 200"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "220" Then
Data2.RecordSource = "Is 8 220"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "230" Then
Data2.RecordSource = "Is 8 230"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "235" Then
Data2.RecordSource = "Is 8 235"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "250" Then
Data2.RecordSource = "Is 8 250"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "270" Then
Data2.RecordSource = "Is 8 270"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "295" Then
Data2.RecordSource = "Is 8 295"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "300" Then
Data2.RecordSource = "Is 8 300"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "320" Then
Data2.RecordSource = "Is 8 320"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "325" Then
Data2.RecordSource = "Is 8 325"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "335" Then
Data2.RecordSource = "Is 8 335"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "355" Then
Data2.RecordSource = "Is 8 355"
Data2.Refresh
End If
End Sub

Private Sub Option2_Click()

Option2.FontBold = True
Option1.FontBold = False
Option3.FontBold = False
Option4.FontBold = False
Option5.FontBold = False
Option8.Value = True
Option9.Value = True
Text1.Visible = True
Text4.Visible = True
Text5.Visible = True
Text8.Visible = True
Text9.Visible = True
Text10.Visible = True
Text11.Visible = True
Text12.Visible = True
Text13.Visible = True
Text14.Visible = True
Text15.Visible = True
Text16.Visible = True
Text17.Visible = True
Text18.Visible = True
Text3.Text = "5"
Text2.Text = 1 / 5
End Sub

Private Sub Option3_Click()

Option3.FontBold = True
Option2.FontBold = False
Option1.FontBold = False
Option4.FontBold = False
Option5.FontBold = False
Option10.Value = True
Option11.Value = True
Text1.Visible = True
Text4.Visible = True
Text5.Visible = True
Text8.Visible = True
Text9.Visible = True
Text10.Visible = True
Text11.Visible = True
Text12.Visible = True
Text13.Visible = True
Text14.Visible = True
Text15.Visible = True
Text16.Visible = True
Text17.Visible = True
Text18.Visible = True

```

```

Text3.Text = "6"
Text2.Text = 1 / 6
End Sub

Private Sub Option4_Click()

Option4.FontBold = True
Option2.FontBold = False
Option1.FontBold = False
Option5.FontBold = False
Option3.FontBold = False
Option12.Value = True
Option13.Value = True
Text1.Visible = True
Text4.Visible = True
Text5.Visible = True
Text8.Visible = True
Text9.Visible = True
Text10.Visible = True
Text11.Visible = True
Text12.Visible = True
Text13.Visible = True
Text14.Visible = True
Text15.Visible = True
Text16.Visible = True
Text17.Visible = True
Text18.Visible = True
Text3.Text = "7"
Text2.Text = 1 / 7
End Sub

Private Sub Option5_Click()

Option5.FontBold = True
Option2.FontBold = False
Option1.FontBold = False
Option4.FontBold = False
Option3.FontBold = False
Option14.Value = True
Option15.Value = True
Text1.Visible = True
Text4.Visible = True
Text5.Visible = True
Text8.Visible = True
Text9.Visible = True
Text10.Visible = True
Text11.Visible = True
Text12.Visible = True
Text13.Visible = True
Text14.Visible = True
Text15.Visible = True
Text16.Visible = True
Text17.Visible = True
Text18.Visible = True
Text3.Text = "8"
Text2.Text = 1 / 8
End Sub

Private Sub Option6_Click()

If Text6.Text = "70" Then
Data1.RecordSource = "Is 4 70"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "85" Then
Data1.RecordSource = "Is 4 85"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "105" Then
Data1.RecordSource = "Is 4 105"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "125" Then
Data1.RecordSource = "Is 4 125"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "140" Then
Data1.RecordSource = "Is 4 140"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "160" Then
Data1.RecordSource = "Is 4 160"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "180" Then
Data1.RecordSource = "Is 4 180"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "195" Then
Data1.RecordSource = "Is 4 195"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "200" Then
Data1.RecordSource = "Is 4 200"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "220" Then
Data1.RecordSource = "Is 4 220"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "230" Then
Data1.RecordSource = "Is 4 230"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "235" Then
Data1.RecordSource = "Is 4 235"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "250" Then
Data1.RecordSource = "Is 4 250"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "270" Then
Data1.RecordSource = "Is 4 270"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "295" Then
Data1.RecordSource = "Is 4 295"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "300" Then
Data1.RecordSource = "Is 4 300"

```

```

Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "320" Then
Data1.RecordSource = "Is 4 320"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "325" Then
Data1.RecordSource = "Is 4 325"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "335" Then
Data1.RecordSource = "Is 4 335"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "355" Then
Data1.RecordSource = "Is 4 355"
Data1.Refresh
End If
End Sub

Private Sub Option7_Click()

If Text7.Text = "70" Then
Data2.RecordSource = "Is 4 70"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "85" Then
Data2.RecordSource = "Is 4 85"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "105" Then
Data2.RecordSource = "Is 4 105"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "125" Then
Data2.RecordSource = "Is 4 125"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "140" Then
Data2.RecordSource = "Is 4 140"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "160" Then
Data2.RecordSource = "Is 4 160"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "180" Then
Data2.RecordSource = "Is 4 180"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "195" Then
Data2.RecordSource = "Is 4 195"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "200" Then
Data2.RecordSource = "Is 4 200"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "220" Then
Data2.RecordSource = "Is 4 220"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "230" Then
Data2.RecordSource = "Is 4 230"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "235" Then
Data2.RecordSource = "Is 4 235"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "250" Then
Data2.RecordSource = "Is 4 250"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "270" Then
Data2.RecordSource = "Is 4 270"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "295" Then
Data2.RecordSource = "Is 4 295"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "300" Then
Data2.RecordSource = "Is 4 300"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "320" Then
Data2.RecordSource = "Is 4 320"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "325" Then
Data2.RecordSource = "Is 4 325"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "335" Then
Data2.RecordSource = "Is 4 335"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "355" Then
Data2.RecordSource = "Is 4 355"
Data2.Refresh
End If
End Sub

Private Sub Option8_Click()

If Text6.Text = "70" Then
Data1.RecordSource = "Is 5 70"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "85" Then
Data1.RecordSource = "Is 5 85"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "105" Then
Data1.RecordSource = "Is 5 105"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "125" Then
Data1.RecordSource = "Is 5 125"
Data1.Refresh

```

```
ElseIf Text6.Text = "140" Then
Data1.RecordSource = "Is 5 140"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "160" Then
Data1.RecordSource = "Is 5 160"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "180" Then
Data1.RecordSource = "Is 5 180"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "195" Then
Data1.RecordSource = "Is 5 195"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "200" Then
Data1.RecordSource = "Is 5 200"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "220" Then
Data1.RecordSource = "Is 5 220"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "230" Then
Data1.RecordSource = "Is 5 230"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "235" Then
Data1.RecordSource = "Is 5 235"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "250" Then
Data1.RecordSource = "Is 5 250"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "270" Then
Data1.RecordSource = "Is 5 270"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "295" Then
Data1.RecordSource = "Is 5 295"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "300" Then
Data1.RecordSource = "Is 5 300"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "320" Then
Data1.RecordSource = "Is 5 320"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "325" Then
Data1.RecordSource = "Is 5 325"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "335" Then
Data1.RecordSource = "Is 5 335"
Data1.Refresh

ElseIf Text6.Text = "355" Then
Data1.RecordSource = "Is 5 355"
Data1.Refresh

End If
End Sub

Private Sub Option9_Click()

If Text7.Text = "70" Then
Data2.RecordSource = "Is 5 70"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "85" Then
Data2.RecordSource = "Is 5 85"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "105" Then
Data2.RecordSource = "Is 5 105"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "125" Then
Data2.RecordSource = "Is 5 125"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "140" Then
Data2.RecordSource = "Is 5 140"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "160" Then
Data2.RecordSource = "Is 5 160"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "180" Then
Data2.RecordSource = "Is 5 180"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "195" Then
Data2.RecordSource = "Is 5 195"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "200" Then
Data2.RecordSource = "Is 5 200"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "220" Then
Data2.RecordSource = "Is 5 220"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "230" Then
Data2.RecordSource = "Is 5 230"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "235" Then
Data2.RecordSource = "Is 5 235"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "250" Then
Data2.RecordSource = "Is 5 250"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "270" Then
Data2.RecordSource = "Is 5 270"
Data2.Refresh
```

```

Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "295" Then
Data2.RecordSource = "Is 5 295"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "300" Then
Data2.RecordSource = "Is 5 300"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "320" Then
Data2.RecordSource = "Is 5 320"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "325" Then
Data2.RecordSource = "Is 5 325"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "335" Then
Data2.RecordSource = "Is 5 335"
Data2.Refresh

ElseIf Text7.Text = "355" Then
Data2.RecordSource = "Is 5 355"
Data2.Refresh
End If
End Sub

Private Sub Command1_Click()
MSChart1.Visible = True
MSChart1.Row = 1
MSChart1.RowLabel = "t1"
MSChart1.Data = Form7.Text12.Text
MSChart1.Row = 2
MSChart1.RowLabel = "t2"
MSChart1.Data = Form7.Text13.Text
MSChart1.Row = 3
MSChart1.RowLabel = "t3"
MSChart1.Data = Form7.Text14.Text
MSChart1.Row = 4
MSChart1.RowLabel = "t4"
MSChart1.Data = Form7.Text15.Text
MSChart1.Row = 5
MSChart1.RowLabel = "t5"
MSChart1.Data = Form7.Text16.Text
MSChart1.Row = 6
MSChart1.RowLabel = "t6"
MSChart1.Data = Form7.Text17.Text
MSChart1.Row = 7
MSChart1.RowLabel = "t7"
MSChart1.Data = Form7.Text18.Text
MSChart1.Row = 8
MSChart1.RowLabel = "t8"
MSChart1.Data = Form7.Text19.Text
MSChart1.Row = 9
MSChart1.RowLabel = "t9"
MSChart1.Data = Form7.Text20.Text
MSChart1.Row = 10
MSChart1.RowLabel = "t10"
MSChart1.Data = Form7.Text21.Text
MSChart1.Row = 11

MSChart1.RowLabel = "t11"
MSChart1.Data = Form7.Text22.Text
End Sub

Private Sub Command2_Click()

MSChart2.Visible = True
MSChart2.Row = 1
MSChart2.RowLabel = "t1"
MSChart2.Data = Form7.Text23.Text
MSChart2.Row = 2
MSChart2.RowLabel = "t2"
MSChart2.Data = Form7.Text24.Text
MSChart2.Row = 3
MSChart2.RowLabel = "t3"
MSChart2.Data = Form7.Text25.Text
MSChart2.Row = 4
MSChart2.RowLabel = "t4"
MSChart2.Data = Form7.Text26.Text
MSChart2.Row = 5
MSChart2.RowLabel = "t5"
MSChart2.Data = Form7.Text27.Text
MSChart2.Row = 6
MSChart2.RowLabel = "t6"
MSChart2.Data = Form7.Text28.Text
MSChart2.Row = 7
MSChart2.RowLabel = "t7"
MSChart2.Data = Form7.Text29.Text
MSChart2.Row = 8
MSChart2.RowLabel = "t8"
MSChart2.Data = Form7.Text30.Text
MSChart2.Row = 9
MSChart2.RowLabel = "t9"
MSChart2.Data = Form7.Text31.Text
MSChart2.Row = 10
MSChart2.RowLabel = "t10"
MSChart2.Data = Form7.Text32.Text
MSChart2.Row = 11
MSChart2.Data = Form7.Text33.Text
End Sub

Private Sub Command3_Click()

Form7.Visible = False
Form2.Enabled = True
Form2.Visible = True
End Sub

Private Sub Command4_Click()
End
End Sub

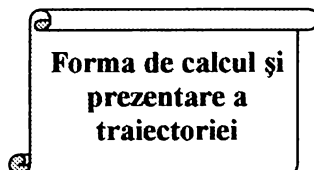
Private Sub Command5_Click()
MSChart1.Visible = False
End Sub

Private Sub Command6_Click()
MSChart2.Visible = False
End Sub

```

Anexa A7.2

Codul formei de calcul și prezentare a traiectoriei



```

Sub grafic6()
MSChart1.Visible = True
MSChart1.RowCount = 11
MSChart1.Row = 1
MSChart1.Data = Text6.Text
MSChart1.Row = 2
MSChart1.Data = Text7.Text
MSChart1.Row = 3
MSChart1.Data = Text8.Text
MSChart1.Row = 4
MSChart1.Data = Text9.Text
MSChart1.Row = 5
MSChart1.Data = Text10.Text
MSChart1.Row = 6
MSChart1.Data = Text11.Text
MSChart1.Row = 7
MSChart1.Data = Text12.Text
MSChart1.Row = 8
MSChart1.Data = Text13.Text
MSChart1.Row = 9
MSChart1.Data = Text14.Text
MSChart1.Row = 10
MSChart1.Data = Text15.Text
MSChart1.Row = 11
MSChart1.Data = Text16.Text
End Sub

```

```

Sub grafic5()
MSChart1.Visible = True
MSChart1.RowCount = 9
MSChart1.Row = 1
MSChart1.Data = Text6.Text
MSChart1.Row = 2
MSChart1.Data = Text7.Text
MSChart1.Row = 3
MSChart1.Data = Text8.Text
MSChart1.Row = 4
MSChart1.Data = Text9.Text
MSChart1.Row = 5
MSChart1.Data = Text10.Text
MSChart1.Row = 6
MSChart1.Data = Text11.Text
MSChart1.Row = 7
MSChart1.Data = Text12.Text
MSChart1.Row = 8
MSChart1.Data = Text13.Text
MSChart1.Row = 9
MSChart1.Data = Text14.Text
End Sub

```

```

Sub grafic4()

```

```

MSChart1.Visible = True
MSChart1.RowCount = 7
MSChart1.Row = 1
MSChart1.Data = Text6.Text
MSChart1.Row = 2
MSChart1.Data = Text7.Text
MSChart1.Row = 3
MSChart1.Data = Text8.Text
MSChart1.Row = 4
MSChart1.Data = Text9.Text
MSChart1.Row = 5
MSChart1.Data = Text10.Text
MSChart1.Row = 6
MSChart1.Data = Text11.Text
MSChart1.Row = 7
MSChart1.Data = Text12.Text
End Sub

```

```

Sub grafic3()
MSChart1.Visible = True
MSChart1.RowCount = 5
MSChart1.Row = 1
MSChart1.Data = Text6.Text
MSChart1.Row = 2
MSChart1.Data = Text7.Text
MSChart1.Row = 3
MSChart1.Data = Text8.Text
MSChart1.Row = 4
MSChart1.Data = Text9.Text
MSChart1.Row = 5
MSChart1.Data = Text10.Text
End Sub

```

```

Sub varianta3()
MSChart1.Visible = False
Label31.Caption = "Se calculeaza
expresia y ( x ) pentru x = (-3,3)"
Text18.Visible = True
Text19.Visible = True
Text20.Visible = True
Text21.Visible = True
Text22.Visible = True
Text23.Visible = True
Text24.Visible = True
Text25.Visible = True
Text26.Visible = True
Text27.Visible = True
Text28.Visible = True
Text29.Visible = True
Text31.Visible = True

```



```

Text5.Visible = True
Text6.Visible = True
Text7.Visible = True
Text8.Visible = True
Text9.Visible = True
Text10.Visible = True
Text11.Visible = True
Text12.Visible = True
Text13.Visible = True
Text14.Visible = True
Text15.Visible = True
Text16.Visible = True
Text32.Visible = True
Text18.Text = "-3"
Text19.Text = "-2"
Text20.Text = "-1"
Text21.Text = "0"
Text22.Text = "1"
Text23.Text = "2"
Text24.Text = "3"
Text6.Text = Text1.Text * Sin(Atn((-
Text19.Text / Text1.Text) / Sqr(1 -
(Text19.Text / Text1.Text) *
(Text19.Text / Text1.Text))) + 2 *
Atn(1)) + Text4.Text * (Atn((-
Text19.Text / Text1.Text) / Sqr(1 -
(Text19.Text / Text1.Text) *
(Text19.Text / Text1.Text))) + 2 *
Atn(1)) / (2 * 3.14 * Text2.Text)
Text7.Text = Text1.Text * Sin(Atn((-
Text20.Text / Text1.Text) / Sqr(1 -
(Text20.Text / Text1.Text) *
(Text20.Text / Text1.Text))) + 2 *
Atn(1)) + Text4.Text * (Atn((-
Text20.Text / Text1.Text) / Sqr(1 -
(Text20.Text / Text1.Text) *
(Text20.Text / Text1.Text))) + 2 *
Atn(1)) / (2 * 3.14 * Text2.Text)
Text8.Text = Text1.Text * Sin(Atn((-
Text21.Text / Text1.Text) / Sqr(1 -
(Text21.Text / Text1.Text) *
(Text21.Text / Text1.Text))) + 2 *
Atn(1)) + Text4.Text * (Atn((-
Text21.Text / Text1.Text) / Sqr(1 -
(Text21.Text / Text1.Text) *
(Text21.Text / Text1.Text))) + 2 *
Atn(1)) / (2 * 3.14 * Text2.Text)
Text9.Text = Text1.Text * Sin(Atn((-
Text22.Text / Text1.Text) / Sqr(1 -
(Text22.Text / Text1.Text) *
(Text22.Text / Text1.Text))) + 2 *
Atn(1)) + Text4.Text * (Atn((-
Text22.Text / Text1.Text) / Sqr(1 -
(Text22.Text / Text1.Text) *
(Text22.Text / Text1.Text))) + 2 *
Atn(1)) / (2 * 3.14 * Text2.Text)
Text10.Text = Text1.Text *
Sin(Atn((-Text23.Text / Text1.Text)
/ Sqr(1 - (Text23.Text / Text1.Text)
* (Text23.Text / Text1.Text))) + 2 *
Atn(1)) + Text4.Text * (Atn((-
Text23.Text / Text1.Text) / Sqr(1 -
(Text23.Text / Text1.Text) *
(Text23.Text / Text1.Text))) + 2 *
Atn(1)) / (2 * 3.14 * Text2.Text)

End Sub
Sub varianta4()

MSChart1.Visible = False
Label31.Caption = "Se calculeaza
expresia y ( x ) pentru x = (-4,4)"
Text18.Visible = True
Text19.Visible = True
Text20.Visible = True
Text21.Visible = True
Text22.Visible = True
Text23.Visible = True
Text24.Visible = True
Text25.Visible = True
Text26.Visible = True
Text27.Visible = True
Text28.Visible = True
Text29.Visible = True
Text31.Visible = True
Text5.Visible = True
Text6.Visible = True
Text7.Visible = True
Text8.Visible = True
Text9.Visible = True
Text10.Visible = True
Text11.Visible = True
Text12.Visible = True
Text13.Visible = True
Text14.Visible = True
Text15.Visible = True
Text16.Visible = True
Text32.Visible = True
Text18.Text = "-4"
Text19.Text = "-3"
Text20.Text = "-2"
Text21.Text = "-1"
Text22.Text = "0"
Text23.Text = "1"
Text24.Text = "2"
Text25.Text = "3"
Text26.Text = "4"
Text6.Text = Text1.Text * Sin(Atn((-
Text19.Text / Text1.Text) / Sqr(1 -
(Text19.Text / Text1.Text) *
(Text19.Text / Text1.Text))) + 2 *
Atn(1)) + Text4.Text * (Atn((-
Text19.Text / Text1.Text) / Sqr(1 -
(Text19.Text / Text1.Text) *
(Text19.Text / Text1.Text))) + 2 *
Atn(1)) / (2 * 3.14 * Text2.Text)
Text7.Text = Text1.Text * Sin(Atn((-
Text20.Text / Text1.Text) / Sqr(1 -
(Text20.Text / Text1.Text) *
(Text20.Text / Text1.Text))) + 2 *
Atn(1)) + Text4.Text * (Atn((-
Text20.Text / Text1.Text) / Sqr(1 -
(Text20.Text / Text1.Text) *
(Text20.Text / Text1.Text))) + 2 *
Atn(1)) / (2 * 3.14 * Text2.Text)

```

```

(Text20.Text / Text1.Text) *
(Text20.Text / Text1.Text)) + 2 *
Atn(1) / (2 * 3.14 * Text2.Text)
Text8.Text = Text1.Text * Sin(Atn((-
Text21.Text / Text1.Text) / Sqr(1 -
(Text21.Text / Text1.Text) *
(Text21.Text / Text1.Text))) + 2 *
Atn(1)) + Text4.Text * (Atn((-
Text21.Text / Text1.Text) / Sqr(1 -
(Text21.Text / Text1.Text) *
(Text21.Text / Text1.Text))) + 2 *
Atn(1) / (2 * 3.14 * Text2.Text)
Text9.Text = Text1.Text * Sin(Atn((-
Text22.Text / Text1.Text) / Sqr(1 -
(Text22.Text / Text1.Text) *
(Text22.Text / Text1.Text))) + 2 *
Atn(1)) + Text4.Text * (Atn((-
Text22.Text / Text1.Text) / Sqr(1 -
(Text22.Text / Text1.Text) *
(Text22.Text / Text1.Text))) + 2 *
Atn(1) / (2 * 3.14 * Text2.Text)
Text10.Text = Text1.Text *
Sin(Atn((-Text23.Text / Text1.Text)
/ Sqr(1 - (Text23.Text / Text1.Text)
* (Text23.Text / Text1.Text))) + 2 *
Atn(1)) + Text4.Text * (Atn((-
Text23.Text / Text1.Text) / Sqr(1 -
(Text23.Text / Text1.Text) *
(Text23.Text / Text1.Text))) + 2 *
Atn(1) / (2 * 3.14 * Text2.Text)
Text11.Text = Text1.Text *
Sin(Atn((-Text24.Text / Text1.Text)
/ Sqr(1 - (Text24.Text / Text1.Text)
* (Text24.Text / Text1.Text))) + 2 *
Atn(1)) + Text4.Text * (Atn((-
Text24.Text / Text1.Text) / Sqr(1 -
(Text24.Text / Text1.Text) *
(Text24.Text / Text1.Text))) + 2 *
Atn(1) / (2 * 3.14 * Text2.Text)
Text12.Text = Text1.Text *
Sin(Atn((-Text25.Text / Text1.Text)
/ Sqr(1 - (Text25.Text / Text1.Text)
* (Text25.Text / Text1.Text))) + 2 *
Atn(1)) + Text4.Text * (Atn((-
Text25.Text / Text1.Text) / Sqr(1 -
(Text25.Text / Text1.Text) *
(Text25.Text / Text1.Text))) + 2 *
Atn(1) / (2 * 3.14 * Text2.Text)
End Sub
Sub varianta5()

MSChart1.Visible = False
Label31.Caption = "Se calculeaza
expresia y ( x ) pentru x = (-5,5)"
Text18.Visible = True
Text19.Visible = True
Text20.Visible = True
Text21.Visible = True
Text22.Visible = True
Text23.Visible = True
Text24.Visible = True
Text25.Visible = True
Text26.Visible = True
Text27.Visible = True
Text28.Visible = True
Text29.Visible = True
Text31.Visible = True
Text5.Visible = True
Text6.Visible = True
Text7.Visible = True
Text8.Visible = True
Text9.Visible = True
Text10.Visible = True
Text11.Visible = True
Text12.Visible = True
Text13.Visible = True
Text14.Visible = True
Text15.Visible = True
Text16.Visible = True
Text32.Visible = True
Text18.Text = "-5"
Text19.Text = "-4"
Text20.Text = "-3"
Text21.Text = "-2"
Text22.Text = "-1"
Text23.Text = "0"
Text24.Text = "1"
Text25.Text = "2"
Text26.Text = "3"
Text27.Text = "4"
Text28.Text = "5"
Text6.Text = Text1.Text * Sin(Atn((-
Text19.Text / Text1.Text) / Sqr(1 -
(Text19.Text / Text1.Text) *
(Text19.Text / Text1.Text))) + 2 *
Atn(1)) + Text4.Text * (Atn((-
Text19.Text / Text1.Text) / Sqr(1 -
(Text19.Text / Text1.Text) *
(Text19.Text / Text1.Text))) + 2 *
Atn(1) / (2 * 3.14 * Text2.Text)
Text7.Text = Text1.Text * Sin(Atn((-
Text20.Text / Text1.Text) / Sqr(1 -
(Text20.Text / Text1.Text) *
(Text20.Text / Text1.Text))) + 2 *
Atn(1)) + Text4.Text * (Atn((-
Text20.Text / Text1.Text) / Sqr(1 -
(Text20.Text / Text1.Text) *
(Text20.Text / Text1.Text))) + 2 *
Atn(1) / (2 * 3.14 * Text2.Text)
Text8.Text = Text1.Text * Sin(Atn((-
Text21.Text / Text1.Text) / Sqr(1 -
(Text21.Text / Text1.Text) *
(Text21.Text / Text1.Text))) + 2 *
Atn(1)) + Text4.Text * (Atn((-
Text21.Text / Text1.Text) / Sqr(1 -
(Text21.Text / Text1.Text) *
(Text21.Text / Text1.Text))) + 2 *
Atn(1) / (2 * 3.14 * Text2.Text)
Text9.Text = Text1.Text * Sin(Atn((-
Text22.Text / Text1.Text) / Sqr(1 -
(Text22.Text / Text1.Text) *
(Text22.Text / Text1.Text))) + 2 *

```

```

Atn(1)) + Text4.Text * (Atn((-
Text22.Text / Text1.Text) / Sqr(1 -
(Text22.Text / Text1.Text) *
(Text22.Text / Text1.Text))) + 2 *
Atn(1)) / (2 * 3.14 * Text2.Text)
Text10.Text = Text1.Text *
Sin(Atn((-Text23.Text / Text1.Text)
/ Sqr(1 - (Text23.Text / Text1.Text)
* (Text23.Text / Text1.Text))) + 2 *
Atn(1)) + Text4.Text * (Atn((-
Text23.Text / Text1.Text) / Sqr(1 -
(Text23.Text / Text1.Text) *
(Text23.Text / Text1.Text))) + 2 *
Atn(1)) / (2 * 3.14 * Text2.Text)
Text11.Text = Text1.Text *
Sin(Atn((-Text24.Text / Text1.Text)
/ Sqr(1 - (Text24.Text / Text1.Text)
* (Text24.Text / Text1.Text))) + 2 *
Atn(1)) + Text4.Text * (Atn((-
Text24.Text / Text1.Text) / Sqr(1 -
(Text24.Text / Text1.Text) *
(Text24.Text / Text1.Text))) + 2 *
Atn(1)) / (2 * 3.14 * Text2.Text)
Text12.Text = Text1.Text *
Sin(Atn((-Text25.Text / Text1.Text)
/ Sqr(1 - (Text25.Text / Text1.Text)
* (Text25.Text / Text1.Text))) + 2 *
Atn(1)) + Text4.Text * (Atn((-
Text25.Text / Text1.Text) / Sqr(1 -
(Text25.Text / Text1.Text) *
(Text25.Text / Text1.Text))) + 2 *
Atn(1)) / (2 * 3.14 * Text2.Text)
Text13.Text = Text1.Text *
Sin(Atn((-Text26.Text / Text1.Text)
/ Sqr(1 - (Text26.Text / Text1.Text)
* (Text26.Text / Text1.Text))) + 2 *
Atn(1)) + Text4.Text * (Atn((-
Text26.Text / Text1.Text) / Sqr(1 -
(Text26.Text / Text1.Text) *
(Text26.Text / Text1.Text))) + 2 *
Atn(1)) / (2 * 3.14 * Text2.Text)
Text14.Text = Text1.Text *
Sin(Atn((-Text27.Text / Text1.Text)
/ Sqr(1 - (Text27.Text / Text1.Text)
* (Text27.Text / Text1.Text))) + 2 *
Atn(1)) + Text4.Text * (Atn((-
Text27.Text / Text1.Text) / Sqr(1 -
(Text27.Text / Text1.Text) *
(Text27.Text / Text1.Text))) + 2 *
Atn(1)) / (2 * 3.14 * Text2.Text)
End Sub
Sub varianta6()

MSChart1.Visible = False
Label31.Caption = "Se calculeaza
expresia y ( x ) pentru x = (-6,6)"
Text18.Visible = True
Text19.Visible = True
Text20.Visible = True
Text21.Visible = True
Text22.Visible = True

Text23.Visible = True
Text24.Visible = True
Text25.Visible = True
Text26.Visible = True
Text27.Visible = True
Text28.Visible = True
Text29.Visible = True
Text31.Visible = True
Text5.Visible = True
Text6.Visible = True
Text7.Visible = True
Text8.Visible = True
Text9.Visible = True
Text10.Visible = True
Text11.Visible = True
Text12.Visible = True
Text13.Visible = True
Text14.Visible = True
Text15.Visible = True
Text16.Visible = True
Text32.Visible = True
Text18.Text = "-6"
Text19.Text = "-5"
Text20.Text = "-4"
Text21.Text = "-3"
Text22.Text = "-2"
Text23.Text = "-1"
Text24.Text = "0"
Text25.Text = "1"
Text26.Text = "2"
Text27.Text = "3"
Text28.Text = "4"
Text29.Text = "5"
Text31.Text = "6"
Text6.Text = Text1.Text * Sin(Atn((-
Text19.Text / Text1.Text) / Sqr(1 -
(Text19.Text / Text1.Text) *
(Text19.Text / Text1.Text))) + 2 *
Atn(1)) + Text4.Text * (Atn((-
Text19.Text / Text1.Text) / Sqr(1 -
(Text19.Text / Text1.Text) *
(Text19.Text / Text1.Text))) + 2 *
Atn(1)) / (2 * 3.14 * Text2.Text)
Text7.Text = Text1.Text * Sin(Atn((-
Text20.Text / Text1.Text) / Sqr(1 -
(Text20.Text / Text1.Text) *
(Text20.Text / Text1.Text))) + 2 *
Atn(1)) + Text4.Text * (Atn((-
Text20.Text / Text1.Text) / Sqr(1 -
(Text20.Text / Text1.Text) *
(Text20.Text / Text1.Text))) + 2 *
Atn(1)) / (2 * 3.14 * Text2.Text)
Text8.Text = Text1.Text * Sin(Atn((-
Text21.Text / Text1.Text) / Sqr(1 -
(Text21.Text / Text1.Text) *
(Text21.Text / Text1.Text))) + 2 *
Atn(1)) + Text4.Text * (Atn((-
Text21.Text / Text1.Text) / Sqr(1 -
(Text21.Text / Text1.Text) *
(Text21.Text / Text1.Text))) + 2 *
Atn(1)) / (2 * 3.14 * Text2.Text)

```

```

Text9.Text = Text1.Text * Sin(Atn((-
Text22.Text / Text1.Text) / Sqr(1 -
(Text22.Text / Text1.Text) *
(Text22.Text / Text1.Text))) + 2 *
Atn(1)) + Text4.Text * (Atn((-
Text22.Text / Text1.Text) / Sqr(1 -
(Text22.Text / Text1.Text) *
(Text22.Text / Text1.Text))) + 2 *
Atn(1)) / (2 * 3.14 * Text2.Text)
Text10.Text = Text1.Text *
Sin(Atn((-Text23.Text / Text1.Text)
/ Sqr(1 - (Text23.Text / Text1.Text)
* (Text23.Text / Text1.Text))) + 2 *
Atn(1)) + Text4.Text * (Atn((-
Text23.Text / Text1.Text) / Sqr(1 -
(Text23.Text / Text1.Text) *
(Text23.Text / Text1.Text))) + 2 *
Atn(1)) / (2 * 3.14 * Text2.Text)
Text11.Text = Text1.Text *
Sin(Atn((-Text24.Text / Text1.Text)
/ Sqr(1 - (Text24.Text / Text1.Text)
* (Text24.Text / Text1.Text))) + 2 *
Atn(1)) + Text4.Text * (Atn((-
Text24.Text / Text1.Text) / Sqr(1 -
(Text24.Text / Text1.Text) *
(Text24.Text / Text1.Text))) + 2 *
Atn(1)) / (2 * 3.14 * Text2.Text)
Text12.Text = Text1.Text *
Sin(Atn((-Text25.Text / Text1.Text)
/ Sqr(1 - (Text25.Text / Text1.Text)
* (Text25.Text / Text1.Text))) + 2 *
Atn(1)) + Text4.Text * (Atn((-
Text25.Text / Text1.Text) / Sqr(1 -
(Text25.Text / Text1.Text) *
(Text25.Text / Text1.Text))) + 2 *
Atn(1)) / (2 * 3.14 * Text2.Text)
Text13.Text = Text1.Text *
Sin(Atn((-Text26.Text / Text1.Text)
/ Sqr(1 - (Text26.Text / Text1.Text)
* (Text26.Text / Text1.Text))) + 2 *
Atn(1)) + Text4.Text * (Atn((-
Text26.Text / Text1.Text) / Sqr(1 -
(Text26.Text / Text1.Text) *
(Text26.Text / Text1.Text))) + 2 *
Atn(1)) / (2 * 3.14 * Text2.Text)
Text14.Text = Text1.Text *
Sin(Atn((-Text27.Text / Text1.Text)
/ Sqr(1 - (Text27.Text / Text1.Text)
* (Text27.Text / Text1.Text))) + 2 *
Atn(1)) + Text4.Text * (Atn((-
Text27.Text / Text1.Text) / Sqr(1 -
(Text27.Text / Text1.Text) *
(Text27.Text / Text1.Text))) + 2 *
Atn(1)) / (2 * 3.14 * Text2.Text)
Text15.Text = Text1.Text *
Sin(Atn((-Text28.Text / Text1.Text)
/ Sqr(1 - (Text28.Text / Text1.Text)
* (Text28.Text / Text1.Text))) + 2 *
Atn(1)) + Text4.Text * (Atn((-
Text28.Text / Text1.Text) / Sqr(1 -
(Text28.Text / Text1.Text) *
(Text28.Text / Text1.Text))) + 2 *
Atn(1)) / (2 * 3.14 * Text2.Text)
Text16.Text = Text1.Text *
Sin(Atn((-Text29.Text / Text1.Text)
/ Sqr(1 - (Text29.Text / Text1.Text)
* (Text29.Text / Text1.Text))) + 2 *
Atn(1)) + Text4.Text * (Atn((-
Text29.Text / Text1.Text) / Sqr(1 -
(Text29.Text / Text1.Text) *
(Text29.Text / Text1.Text))) + 2 *
Atn(1)) / (2 * 3.14 * Text2.Text)
End Sub
Private Sub Command1_Click()

Text4.Text = Text3.Text
If Text1.Text = "3" Then varianta3
If Text1.Text = "4" Then varianta4
If Text1.Text = "5" Then varianta5
If Text1.Text = "6" Then varianta6
End Sub

Private Sub Command2_Click()
End
End Sub

Private Sub Command3_Click()

Command3.Visible = False
Command3.Enabled = False
Command5.Enabled = True
Command5.Visible = True

If Text1.Text = "3" Then grafic3
If Text1.Text = "4" Then grafic4
If Text1.Text = "5" Then grafic5
If Text1.Text = "6" Then grafic6
End Sub

Private Sub Command4_Click()
Form9.Enabled = False
Form9.Visible = False
Form2.Enabled = True
Form2.Visible = True
End Sub

Private Sub Command5_Click()

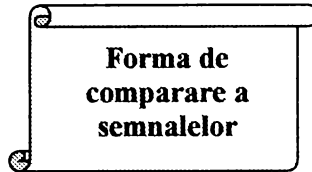
Command5.Enabled = False
Command5.Visible = False
Command3.Enabled = True
Command3.Visible = True

If Text1.Text = "3" Then varianta3
If Text1.Text = "4" Then varianta4
If Text1.Text = "5" Then varianta5
If Text1.Text = "6" Then varianta6
End Sub

```

Anexa A7.3

Codul formei de comparare a semnalelor



```

Private Sub Command1_Click()
End
End Sub

Private Sub Command2_Click()

Form10.Visible = False
Form2.Enabled = True
Form2.Visible = True
End Sub

Private Sub Command3_Click()

Form10.Visible = False
Form12.Visible = True
Form12.Enabled = True
Form12.Text1.Text =
Form10.Text1.Text -
Form10.Text23.Text
Form12.Text2.Text =
Form10.Text2.Text -
Form10.Text24.Text
Form12.Text3.Text =
Form10.Text3.Text -
Form10.Text25.Text
Form12.Text4.Text =
Form10.Text4.Text -
Form10.Text26.Text
Form12.Text5.Text =
Form10.Text5.Text -
Form10.Text27.Text
Form12.Text6.Text =
Form10.Text6.Text -
Form10.Text28.Text
Form12.Text7.Text =
Form10.Text7.Text -
Form10.Text29.Text
Form12.Text8.Text =
Form10.Text8.Text -
Form10.Text30.Text
Form12.Text9.Text =
Form10.Text9.Text -
Form10.Text31.Text
Form12.Text10.Text =
Form10.Text10.Text -
Form10.Text32.Text
Form12.Text11.Text =
Form10.Text11.Text -
Form10.Text33.Text
Form12.MSChart1.ColumnCount = 1

Form12.MSChart1.RowCount = 11
Form12.MSChart1.Row = 1
Form12.MSChart1.Data =
Form12.Text1.Text
Form12.MSChart1.RowLabel = ""
Form12.MSChart1.Row = 2
Form12.MSChart1.Data =
Form12.Text2.Text
Form12.MSChart1.RowLabel = ""
Form12.MSChart1.Row = 3
Form12.MSChart1.Data =
Form12.Text3.Text
Form12.MSChart1.RowLabel = ""
Form12.MSChart1.Row = 4
Form12.MSChart1.Data =
Form12.Text4.Text
Form12.MSChart1.RowLabel = ""
Form12.MSChart1.Row = 5
Form12.MSChart1.Data =
Form12.Text5.Text
Form12.MSChart1.RowLabel = ""
Form12.MSChart1.Row = 6
Form12.MSChart1.Data =
Form12.Text6.Text
Form12.MSChart1.RowLabel = ""
Form12.MSChart1.Row = 7
Form12.MSChart1.Data =
Form12.Text7.Text
Form12.MSChart1.RowLabel = ""
Form12.MSChart1.Row = 8
Form12.MSChart1.Data =
Form12.Text8.Text
Form12.MSChart1.RowLabel = ""
Form12.MSChart1.Row = 9
Form12.MSChart1.Data =
Form12.Text9.Text
Form12.MSChart1.RowLabel = ""
Form12.MSChart1.Row = 10
Form12.MSChart1.Data =
Form12.Text10.Text
Form12.MSChart1.RowLabel = ""
Form12.MSChart1.Row = 11
Form12.MSChart1.Data =
Form12.Text11.Text
Form12.MSChart1.RowLabel = ""
End Sub

Private Sub Option1_Click()
Form12.Label14.Caption =
Option1.Caption

```

```

Label2.Caption = "Is1 (1T/11)    ="    Data2.Refresh
Label3.Caption = "Is1 (2T/11)    ="    Data3.RecordSource = "Ciclu 1
Label4.Caption = "Is1 (3T/11)    ="    valoarea 3"
Label5.Caption = "Is1 (4T/11)    ="    Text14.DataField = "Haar nivel 1"
Label6.Caption = "Is1 (5T/11)    ="    Data3.Refresh
Label7.Caption = "Is1 (6T/11)    ="    Data4.RecordSource = "Ciclu 1
Label8.Caption = "Is1 (7T/11)    ="    valoarea 4"
Label9.Caption = "Is1 (8T/11)    ="    Text15.DataField = "Haar nivel 1"
Label10.Caption = "Is1 (9T/11)   ="    Data4.Refresh
Label11.Caption = "Is1 (10T/11)   ="   Data5.RecordSource = "Ciclu 1
Label12.Caption = "Is1 (11T/11)  ="   valoarea 5"
Text1.Text = Form7.Text12        Text16.DataField = "Haar nivel 1"
Text2.Text = Form7.Text13        Data5.Refresh
Text3.Text = Form7.Text14        Data6.RecordSource = "Ciclu 1
Text4.Text = Form7.Text15        valoarea 6"
Text5.Text = Form7.Text16        Text17.DataField = "Haar nivel 1"
Text6.Text = Form7.Text17        Data6.Refresh
Text7.Text = Form7.Text18        Data7.RecordSource = "Ciclu 1
Text8.Text = Form7.Text19        valoarea 7"
Text9.Text = Form7.Text20        Text18.DataField = "Haar nivel 1"
Text10.Text = Form7.Text21       Data7.Refresh
Text11.Text = Form7.Text22       Data8.RecordSource = "Ciclu 1
End Sub                           valoarea 8"
                                   Text19.DataField = "Haar nivel 1"
                                   Data8.Refresh
                                   Data9.RecordSource = "Ciclu 1
                                   valoarea 9"
                                   Text20.DataField = "Haar nivel 1"
                                   Data9.Refresh
                                   Data10.RecordSource = "Ciclu 1
                                   valoarea 10"
                                   Text21.DataField = "Haar nivel 1"
                                   Data10.Refresh
                                   Data11.RecordSource = "Ciclu 1
                                   valoarea 11"
                                   Text22.DataField = "Haar nivel 1"
                                   Data11.Refresh
                                   Text34.Text = Text22 * 1.4142
                                   Text35.Text = Text21 * 1.4142
                                   Text36.Text = Text20 * 1.4142
                                   Text37.Text = Text19 * 1.4142
                                   Text38.Text = Text18 * 1.4142
                                   Text39.Text = Text17 * 1.4142
                                   Text40.Text = Text16 * 1.4142
                                   Text41.Text = Text15 * 1.4142
                                   Text42.Text = Text14 * 1.4142
                                   Text43.Text = Text13 * 1.4142
                                   Text44.Text = Text12 * 1.4142
                                   Text23 = Text44 / 1.4142
                                   Text24 = Text43 / 1.4142
                                   Text25 = Text42 / 1.4142
                                   Text26 = Text41 / 1.4142
                                   Text27 = Text40 / 1.4142
                                   Text28 = Text39 / 1.4142
                                   Text29 = Text38 / 1.4142
                                   Text30 = Text37 / 1.4142
                                   Text31 = Text36 / 1.4142
                                   Text32 = Text35 / 1.4142
                                   Text33 = Text34 / 1.4142
                                   End Sub

Private Sub Option2_Click()
Form12.Label14.Caption =
Option2.Caption
Label2.Caption = "Is2 (1T/11)    ="
Label3.Caption = "Is2 (2T/11)    ="
Label4.Caption = "Is2 (3T/11)    ="
Label5.Caption = "Is2 (4T/11)    ="
Label6.Caption = "Is2 (5T/11)    ="
Label7.Caption = "Is2 (6T/11)    ="
Label8.Caption = "Is2 (7T/11)    ="
Label9.Caption = "Is2 (8T/11)    ="
Label10.Caption = "Is2 (9T/11)   ="
Label11.Caption = "Is2 (10T/11)  ="
Label12.Caption = "Is2 (11T/11)  ="
Text1.Text = Form7.Text23
Text2.Text = Form7.Text24
Text3.Text = Form7.Text25
Text4.Text = Form7.Text26
Text5.Text = Form7.Text27
Text6.Text = Form7.Text28
Text7.Text = Form7.Text29
Text8.Text = Form7.Text30
Text9.Text = Form7.Text31
Text10.Text = Form7.Text32
Text11.Text = Form7.Text33
End Sub

Private Sub Option3_Click()
Form12.Label13.Caption =
Option3.Caption
Data1.RecordSource = "Ciclu 1
valoarea 1"
Text12.DataField = "Haar nivel 1"
Data1.Refresh
Data2.RecordSource = "Ciclu 1
valoarea 2"
Text13.DataField = "Haar nivel 1"

```

```
Private Sub Option4_Click()  
    Form12.Label13.Caption =  
    Option4.Caption  
  
    Data1.RecordSource = "Ciclu 2  
    valoarea 1"  
    Text12.DataField = "Haar nivel 1"  
    Data1.Refresh  
  
    Data2.RecordSource = "Ciclu 2  
    valoarea 2"  
    Text13.DataField = "Haar nivel 1"  
    Data2.Refresh  
  
    Data3.RecordSource = "Ciclu 2  
    valoarea 3"  
    Text14.DataField = "Haar nivel 1"  
    Data3.Refresh  
  
    Data4.RecordSource = "Ciclu 2  
    valoarea 4"  
    Text15.DataField = "Haar nivel 1"  
    Data4.Refresh  
  
    Data5.RecordSource = "Ciclu 2  
    valoarea 5"  
    Text16.DataField = "Haar nivel 1"  
    Data5.Refresh  
  
    Data6.RecordSource = "Ciclu 2  
    valoarea 6"  
    Text17.DataField = "Haar nivel 1"  
    Data6.Refresh  
  
    Data7.RecordSource = "Ciclu 2  
    valoarea 7"  
    Text18.DataField = "Haar nivel 1"  
    Data7.Refresh  
  
    Data8.RecordSource = "Ciclu 2  
    valoarea 8"  
    Text19.DataField = "Haar nivel 1"  
    Data8.Refresh  
  
    Data9.RecordSource = "Ciclu 2  
    valoarea 9"  
    Text20.DataField = "Haar nivel 1"  
    Data9.Refresh  
  
    Data10.RecordSource = "Ciclu 2  
    valoarea 10"  
    Text21.DataField = "Haar nivel 1"  
    Data10.Refresh  
  
    Data11.RecordSource = "Ciclu 2  
    valoarea 11"  
    Text22.DataField = "Haar nivel 1"  
    Data11.Refresh  
  
    Text34.Text = Text22 * 1.4142  
  
    Text35.Text = Text21 * 1.4142  
    Text36.Text = Text20 * 1.4142  
    Text37.Text = Text19 * 1.4142  
    Text38.Text = Text18 * 1.4142  
    Text39.Text = Text17 * 1.4142  
    Text40.Text = Text16 * 1.4142  
    Text41.Text = Text15 * 1.4142  
    Text42.Text = Text14 * 1.4142  
    Text43.Text = Text13 * 1.4142  
    Text44.Text = Text12 * 1.4142  
  
    Text23 = Text44 / 1.4142  
    Text24 = Text43 / 1.4142  
    Text25 = Text42 / 1.4142  
    Text26 = Text41 / 1.4142  
    Text27 = Text40 / 1.4142  
    Text28 = Text39 / 1.4142  
    Text29 = Text38 / 1.4142  
    Text30 = Text37 / 1.4142  
    Text31 = Text36 / 1.4142  
    Text32 = Text35 / 1.4142  
    Text33 = Text34 / 1.4142  
End Sub  
  
Private Sub Option5_Click()  
    Form12.Label13.Caption =  
    Option5.Caption  
  
    Data1.RecordSource = "Ciclu 3  
    valoarea 1"  
    Text12.DataField = "Haar nivel 1"  
    Data1.Refresh  
  
    Data2.RecordSource = "Ciclu 3  
    valoarea 2"  
    Text13.DataField = "Haar nivel 1"  
    Data2.Refresh  
  
    Data3.RecordSource = "Ciclu 3  
    valoarea 3"  
    Text14.DataField = "Haar nivel 1"  
    Data3.Refresh  
  
    Data4.RecordSource = "Ciclu 3  
    valoarea 4"  
    Text15.DataField = "Haar nivel 1"  
    Data4.Refresh  
  
    Data5.RecordSource = "Ciclu 3  
    valoarea 5"  
    Text16.DataField = "Haar nivel 1"  
    Data5.Refresh  
  
    Data6.RecordSource = "Ciclu 3  
    valoarea 6"  
    Text17.DataField = "Haar nivel 1"  
    Data6.Refresh  
  
    Data7.RecordSource = "Ciclu 3  
    valoarea 7"
```

```

Text18.DataField = "Haar nivel 1"
Data7.Refresh

Data8.RecordSource = "Ciclu 3
valoarea 8"
Text19.DataField = "Haar nivel 1"
Data8.Refresh

Data9.RecordSource = "Ciclu 3
valoarea 9"
Text20.DataField = "Haar nivel 1"
Data9.Refresh

Data10.RecordSource = "Ciclu 3
valoarea 10"
Text21.DataField = "Haar nivel 1"
Data10.Refresh

Data11.RecordSource = "Ciclu 3
valoarea 11"
Text22.DataField = "Haar nivel 1"
Data11.Refresh

Text34.Text = Text22 * 1.4142
Text35.Text = Text21 * 1.4142
Text36.Text = Text20 * 1.4142
Text37.Text = Text19 * 1.4142
Text38.Text = Text18 * 1.4142
Text39.Text = Text17 * 1.4142
Text40.Text = Text16 * 1.4142
Text41.Text = Text15 * 1.4142
Text42.Text = Text14 * 1.4142
Text43.Text = Text13 * 1.4142
Text44.Text = Text12 * 1.4142

Text23 = Text44 / 1.4142
Text24 = Text43 / 1.4142
Text25 = Text42 / 1.4142
Text26 = Text41 / 1.4142
Text27 = Text40 / 1.4142
Text28 = Text39 / 1.4142
Text29 = Text38 / 1.4142
Text30 = Text37 / 1.4142
Text31 = Text36 / 1.4142
Text32 = Text35 / 1.4142
Text33 = Text34 / 1.4142
End Sub

Private Sub Option6_Click()

Form12.Label13.Caption =
Option6.Caption

Data1.RecordSource = "Ciclu 4
valoarea 1"
Text12.DataField = "Haar nivel 1"
Data1.Refresh

Data2.RecordSource = "Ciclu 4
valoarea 2"
Text13.DataField = "Haar nivel 1"

Data2.Refresh

Data3.RecordSource = "Ciclu 4
valoarea 3"
Text14.DataField = "Haar nivel 1"
Data3.Refresh

Data4.RecordSource = "Ciclu 4
valoarea 4"
Text15.DataField = "Haar nivel 1"
Data4.Refresh

Data5.RecordSource = "Ciclu 4
valoarea 5"
Text16.DataField = "Haar nivel 1"
Data5.Refresh

Data6.RecordSource = "Ciclu 4
valoarea 6"
Text17.DataField = "Haar nivel 1"
Data6.Refresh

Data7.RecordSource = "Ciclu 4
valoarea 7"
Text18.DataField = "Haar nivel 1"
Data7.Refresh

Data8.RecordSource = "Ciclu 4
valoarea 8"
Text19.DataField = "Haar nivel 1"
Data8.Refresh

Data9.RecordSource = "Ciclu 4
valoarea 9"
Text20.DataField = "Haar nivel 1"
Data9.Refresh

Data10.RecordSource = "Ciclu 4
valoarea 10"
Text21.DataField = "Haar nivel 1"
Data10.Refresh

Data11.RecordSource = "Ciclu 4
valoarea 11"
Text22.DataField = "Haar nivel 1"
Data11.Refresh

Text34.Text = Text22 * 1.4142
Text35.Text = Text21 * 1.4142
Text36.Text = Text20 * 1.4142
Text37.Text = Text19 * 1.4142
Text38.Text = Text18 * 1.4142
Text39.Text = Text17 * 1.4142
Text40.Text = Text16 * 1.4142
Text41.Text = Text15 * 1.4142
Text42.Text = Text14 * 1.4142
Text43.Text = Text13 * 1.4142
Text44.Text = Text12 * 1.4142

Text23 = Text44 / 1.4142
Text24 = Text43 / 1.4142

```



```

Text25 = Text42 / 1.4142
Text26 = Text41 / 1.4142
Text27 = Text40 / 1.4142
Text28 = Text39 / 1.4142
Text29 = Text38 / 1.4142
Text30 = Text37 / 1.4142
Text31 = Text36 / 1.4142
Text32 = Text35 / 1.4142
Text33 = Text34 / 1.4142
End Sub

Private Sub Option7_Click()
Form12.Label13.Caption =
Option7.Caption

Data1.RecordSource = "Ciclu 5
valoarea 1"
Text12.DataField = "Haar nivel 1"
Data1.Refresh

Data2.RecordSource = "Ciclu 5
valoarea 2"
Text13.DataField = "Haar nivel 1"
Data2.Refresh

Data3.RecordSource = "Ciclu 5
valoarea 3"
Text14.DataField = "Haar nivel 1"
Data3.Refresh

Data4.RecordSource = "Ciclu 5
valoarea 4"
Text15.DataField = "Haar nivel 1"
Data4.Refresh

Data5.RecordSource = "Ciclu 5
valoarea 5"
Text16.DataField = "Haar nivel 1"
Data5.Refresh

Data6.RecordSource = "Ciclu 5
valoarea 6"
Text17.DataField = "Haar nivel 1"
Data6.Refresh

Data7.RecordSource = "Ciclu 5
valoarea 7"
Text18.DataField = "Haar nivel 1"
Data7.Refresh

Data8.RecordSource = "Ciclu 5
valoarea 8"
Text19.DataField = "Haar nivel 1"
Data8.Refresh

Data9.RecordSource = "Ciclu 5
valoarea 9"
Text20.DataField = "Haar nivel 1"
Data9.Refresh

Data10.RecordSource = "Ciclu 5
valoarea 10"
Text21.DataField = "Haar nivel 1"
Data10.Refresh

Data11.RecordSource = "Ciclu 5
valoarea 11"
Text22.DataField = "Haar nivel 1"
Data11.Refresh

'Text34.Text = Text22 * 1.4142
'Text35.Text = Text21 * 1.4142
'Text36.Text = Text20 * 1.4142
'Text37.Text = Text19 * 1.4142
'Text38.Text = Text18 * 1.4142
'Text39.Text = Text17 * 1.4142
'Text40.Text = Text16 * 1.4142
'Text41.Text = Text15 * 1.4142
Text42.Text = Text14 * 1.4142
Text43.Text = Text13 * 1.4142
Text44.Text = Text12 * 1.4142

Text23 = Text44 / 1.4142
Text24 = Text43 / 1.4142
Text25 = Text42 / 1.4142
'Text26 = Text41 / 1.4142
'Text27 = Text40 / 1.4142
'Text28 = Text39 / 1.4142
'Text29 = Text38 / 1.4142
'Text30 = Text37 / 1.4142
'Text31 = Text36 / 1.4142
'Text32 = Text35 / 1.4142
'Text33 = Text34 / 1.4142

Text26.Text = "0"
Text27.Text = "0"
Text28.Text = "0"
Text29.Text = "0"
Text30.Text = "0"
Text31.Text = "0"
Text32.Text = "0"
Text33.Text = "0"

Text34.Text = "0"
Text35.Text = "0"
Text36.Text = "0"
Text37.Text = "0"
Text38.Text = "0"
Text39.Text = "0"
Text40.Text = "0"
Text41.Text = "0"
End Sub

```

Bibliografie

Publicații. Conferințe

1. Asai S., s.a. - Development of Fully Automatic GMAW System with Visual Sensor, IIW Doc XII-1546-98, IIW Conference, Hamburg 1998
2. Benedetto, J.J., Frazier, M.W. – Wavelets. Mathematics and application, CRC Press, Boca Raton, 1994
3. Boekholt R. - The status of welding mechanisation and automation in middle and small size shipyards (II), IIW Doc XII-1558-98, IIW Conference, Hamburg 1998
4. Briggs, W.L., Henson, V.E. – The DFT. An owner's manual, Ed. by SIAM Philadelphia, PA, 1995
5. Brostean, L., Potencz, I., Bozu, P., Savu, I.D. – Utilizarea debitmetrelor cu lichide magnetice pentru măsurarea debitelor de gaz protector la sudarea MIG/MAG, Zilele academice timișene, a V-a Ediție a Academiei de Științe din România, Filiala Timisoara, 22-24 mai 1997
6. Buchmayr, B. – Computer in der Werkstoff- und Schweißtechnik, Anwendung von mathematischen Modellen, DVS, Band 112, Düsseldorf, 1991
7. Burcă, M., Negoșescu, St., June, C.D., Savu, I.D. – Sudarea MIG/MAG în curent pulsant – o metodă de creștere a ratei de depunere la sudarea MIG/MAG, Sesiunea anuală de comunicări științifice, 28-30 mai, 1998, “25 de ani ai Colegiului Tehnic din Oradea“
8. Burrus, C.S., s.a. – Introduction to wavelets and wavelet transforms. A primer., Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1998
9. Chambolle, A., s.a. – Nonlinear wavelet image processing: variational problems, compression and noise removal through wavelet shrinkage, IEEE Trans. on image processing, vol. 7, nr. 1, jan. 1998
10. Cornu, J. - Advanced welding systems. Fundamentals of fusion welding technology, IFS Ltd / Springer Verlag, London, 1988
11. Dehelean, D. – Tehnologia sudării prin topire, Ed. Sudura, 1997
12. Dilthey U., s.a. - Prospects by Combining and Coupling Laser Beam and Arc Welding Processes, IIW Doc XII-1565-99, Intermediate Meeting of Commission XII 25/26 of March 1999
13. Dilthey U., s.a. - Two-Wire Processes for Higher Deposition Rate and Higher Welding Speed IIW Doc XII-1549-98, IIW Conference, Hamburg 1998
14. Dzelnitzki, D., Savu, I.D. – Documentarea parametrilor de sudare utilizând sistemul de achiziție a datelor Q-Doc 9000, Conferința Internațională “Sudură-Control“, Timișoara, 6-9 mai 1997

15. Ewins, D.J. – Modal Testing. Theory and Practice, Research Studies Press Ltd, Hertfordshire, 1989
16. Finkbeiner, D.T., Windstrom, W.D. – A primer of discrete mathematics, W.H. Freeman and Co, New York, 1987
17. Fogarassy-Neszly, P. – Programarea în Visual Basic, Ed. Sedona, Timișoara, 1998
18. Fujimoto M., s.a. - Development of Multi-Robot Welding System for Sub-Assembly in Shipbuilding, IIW Doc XII-1652-00, IIW Conference, Florence 2000
19. Fujita K., s.a. - Adaptive Control system for MAG Welding, Recent Technology of Arc Welding in Vessel and Pipe, Edited by the Japanese Institute of Welding, 2000
20. Gârbea, D. – Analiza cu elemente finite, Ed. Tehnică, Bucuresti, 1990
21. Gollnick J. - Integrated Through-the-Arc Sensor System with Rotary Movement of the Torch Tip in GMA-Welding, IIW Doc XII-1656-98, Intermediate Meeting of Commission XII, 2nd of May 2001 – Aachen
22. Gorbach V.D., s.a. - Semiautomatic Machine for Plasma Welding of Aluminium and its Alloys, IIW Doc XII-1512-98, IIW Conference, Hamburg 1998
23. Gorbach V.D. - Process of Automatic Electric Arc Welding with Numerical Program Control, IIW Doc XII-1654-98, Intermediate Meeting of Commission XII 2nd of May 2001 – Aachen
24. Grad L., s.a. - An Investigation of Acoustic Waveforms Generated during GMAW in Short Circuiting Mode, IIW Doc XII-1522-98, IIW Conference, Ljubljana 2001
25. Gustafsson B., s.a. - Advanced parametric programming of arc welding robot, IIW Doc XII-1538-98, IIW Conference, Hamburg 1998
26. Harada S., s.a. - The state-of-the art of AC GMAW process in Japan, IIW Doc XII-1589-99, IIW Conference, Lisabon 1999
27. Heidrich J., s.a. - Application of Artificial Neural Networks in a Optical Stereo Sensor System for Seam Tracking, IIW Doc XII-1657-01, Intermediate Meeting of Commission XII 2nd of May 2001 – Aachen
28. Hernandez, E., Weiss, G., - A first course on wavelets, CRC Press, Boca Raton, Florida, 1996
29. Heyman, M.S. – Bazele Visual Basic 4, Ed. Teora, București, 1997
30. Houldcroft, P.T. – Welding Process Technology, University Press Cambridge, Cambridge, 1987
31. Huang T.C., s.a. - Synchronized Data Acquisition and Video Image of Metal Transfer in Gas Metal Arc Welding, IIW Doc XII-1672-01, IIW Conference, Ljubljana 2001
32. Iguchi M., s.a. - Application of seam tracking sistem by image processing to welding of membrane of inground LNG tank, IIW Doc XII-1580-99, IIW Conference, Lisabon 1999
33. Kamo K., s.a. - Development of Fully Automatic System for Narrow Gap GTAW with Visual Sensor, Recent Technology of Arc Welding in Vessel and Pipe Ed. By the Japanese Institute of Welding, 2000
34. Kampker M. - RobIcon –an Icon-based Programming System for Welding Robots, IIW Doc XII-1553-98, IIW Conference, Hamburg 1998
35. Kataoka T., s.a. - A model for wire feeding process in gas metal arc welding, IIW Doc XII-1527-98, IIW Conference, Hamburg 1998
36. Kobayashi K., s.a. - Development of High Efficient Twin-Arc TIG Welding Method IIW Doc XII-1669-01, IIW Conference, Ljubljana 2001
37. Körner, T.W. – Fourier Analysis, University Press Cambridge, Cambridge, 1992
38. Koves A., s.a. - Quality analyses by on-line monitoring of welding process during welding, IIW Doc XII-1597-99, IIW Conference, Lisabon 1999
39. Kutsuna M., s.a. - Computer Aided Welding (CAW) System in Japan (Report II), IIW Doc XII-1551-98, IIW Conference, Hamburg 1998
40. Leino K. - Agile Welding Automation, IIW Doc XII-1623-00, IIW Conference, Florence 2000
41. Lucas W., s.a. - Review of industrial sensors for control of arc welding, IIW Doc XII-1566-99, IIW Intermediate Meeting of Commission XII 25/26 of March 1999

42. Lukacevic Z., s.a. - Characterization of a Welding Procedure Based on Monitoring of Welding Variables, IIW Doc XII-1627-00, IIW Conference, Florence 2000
43. Mallat, S. – A wavelet tour of signal processing, Academic Press, New York, 1998
44. Melton G.B. - Requirements for arc monitoring and equipment calibration, IIW Doc XII-1525-98, IIW Conference, Hamburg 1998
45. Messler, R.W. Jr. – Principles of Welding, John Wiley and Sons, Inc., New York, 1999
46. Mita T., s.a. - Pulse GMAW Power Source with Constant Voltage Characteristic, Recent Technology of Arc Welding in Vessel and Pipe, Ed. By the Japanese Institute of Welding, 2000
47. Mita T., s.a. - Rectangular Wave Pulse GMAW Power Source, Recent Technology of Arc Welding in Vessel and Pipe, Ed. By the Japanese Institute of Welding, 2000
48. Morisawa J., s.a. - Development of Fully Automatic GTAW System with Visual Sensor, IIW Doc XII-1544-98, IIW Conference, Hamburg 1998
49. Morisawa J., s.a. - Development of Fully Automatic GTAW System with Visual Sensor, Recent Technology of Arc Welding in Vessel and Pipe, Ed. By the Japanese Institute of Welding, 2000
50. Nakano T., s.a. - State-of-the-Art GMAW Wires for Pipeline Construction in Japan, IIW Doc XII-1647-00, IIW Conference, Pipemill & Pipeline in IIW Commission XII, Florence 2000
51. Nakatani M., s.a. - High Efficiency Arc Welding for Steel Structure in Japan, IIW Doc XII-1569-99, IIW Intermediate Meeting of Commission XII 25/26 of March 1999
52. Nishi Y., s.a. - Automatic Welding Process for Ship's Bottom Shell Plates (Part 2), IIW Doc XII-1684-01, Ljubljana 2001
53. Ogawa T., s.a. - Development of High Efficient and High Quality GTAW System Using Visual Sensor, Recent Technology of Arc Welding in Vessel and Pipe, Ed. By the Japanese Institute of Welding, 2000
54. Oshima K., s.a. - Sensing and Control of Weld Pool in One Side Robotic Welding, IIW Doc XII-1626-00, IIW Conference, Florence 2000
55. Oshima K., s.a. - Sensing and Controlling Weld Pool in Multi-layered Welding Using Visual Intelligent Robot, IIW Doc XII-1560-98, IIW Conference, Hamburg 1998
56. Otsuki M., s.a. - Application of All Position Automatic GMAW System for High Quality Heavy Wall Vessel, Recent Technology of Arc Welding in Vessel and Pipe Ed. By the Japanese Institute of Welding, 2000
57. Papula, L. – Matematik für ingenieure, vol. 2, Friederich Vieweg & Sohn VerlagsgesellschaftmbH, Braunschweig, 1991
58. Popa, I. - Întreruptoare de înaltă tensiune cu hexafluorură de sulf (SF₆) – Probleme fundamentale. Modelare, Ed. Reduta, Craiova, 1998
59. Popović, B. - Introductory Engineering Electromagnetics, Addison-Wesley Publishing Company, Inc, Massachusetts, 1991
60. Quintino L., s.a. - SEEK-Sensor Explorer Expert Key, IIW Doc XII-1665-01, IIW Conference, Ljubljana 2001
61. Ribardo C. - Method for Optimizing Arc Welding Parameters, IIW Doc XII-1606-00, IIW Intermediate Meeting of Commission XII 2 & 3 May 2000 – Columbus, Ohio, USA
62. Sălăgean, T. – Elemente ale fizicii sudării prin topire, Ed. MIC-OIDCM, București, 1988
63. Savu, I.D. - Electromagnetic interaction in two wires GMA welding, The 52nd annual conference of the IIW, Lisbon, 19th of July, 1999
64. Savu, I.D. – Măsurarea debitelor de gaz protector utilizând traductoare de debit cu lichide magnetice, Conferința Internațională "Sudură-Control", Timișoara, 6-9 mai 1997
65. Savu, I.D. – Senzori de arc la sudarea cu două sârme în mediu de gaze protectoare, BID ISIM, 1/2000, pag. 10-14
66. Savu, I.D., Bîrlică, R. – Sudarea cu rată mare de depunere în poziție orizontală pe perete vertical a oțelurilor pentru construcții navale, BID ISIM, 1/1999, pag. 12-15

67. Savu, I.D., Bîrlică, R. – Sudarea MAG cu două sârme – variantă de mare productivitate a procedurii de sudare MIG/MAG, Conferința Internațională “ Sudura – prezent și viitor “, Sibiu, 15-16 octombrie, 1998
68. Savu, I.D., June, C.D. – Creșterea ratei de depunere la sudarea MIG/MAG utilizând două sârme și efectele ei asupra calității îmbinărilor sudate, Conferința Internațională “ Sudura ’98 “, Timișoara 17-19 Iunie, 1998
69. Savu, I.D., June, C.D. – Influența forțelor electrodinamice asupra stabilității procesului de sudare cu două sârme în mediu de gaze protectoare, Sudura, an VIII, 2/1998, pag. 24-28
70. Savu, I.D., June, C.D. – Influența forțelor electrodinamice, a presiunii gazului de protecție și a poziționării relative a sârmelor asupra stabilității procesului de sudare cu două sârme în mediu de gaze protectoare, Sesiune de comunicări științifice a Universității “ Aurel Vlaicu “, Arad, a IV-a ediție “25 de ani de învățământ tehnic superior arădean“, Arad, 20-22 octombrie 1997
71. Sharif L.H., s.a. - Image processing and digital control of weld pool in one side robotic welding, IIW Doc XII-1595-99, IIW Conference, Lisabon 1999
72. Shibata N., s.a. - A Visual Sensor for an Automatic Welding System, Recent Technology of Arc Welding in Vessel and Pipe, Ed. By the Japanese Institute of Welding, 2000
73. Shinoda T., s.a. - Development of Double Wire MIG Welding Process, Recent Technology of Arc Welding in Vessel and Pipe, Ed. By the Japanese Institute of Welding, 2000
74. Shinoda T., s.a. - Double Wire MIG Welding Process and its Applications, IIW Doc XII-1543-98, IIW Conference, Hamburg 1998
75. Smith J.S., s.a. - Vision Based System for Monitoring and Control of Welding, IIW Doc XII-1687-01, IIW Conference, Ljubljana 2001
76. Stearns, S.D., David, A.R. – Signal Processing, Algorithms, Prentice Hall – Inc., New Jersey, 1988
77. Sugitani Y. - Making the Best Use of Sensors in Welding Automation, Recent Technology of Arc Welding in Vessel and Pipe, Ed. By the Japanese Institute of Welding, 2000
78. Sugitani Y., s.a. - CIM in Welding Fabrication (Final Report), IIW Doc XII-1552-98, IIW Conference, Hamburg 1998
79. Taki K., s.a. - Application of Visual Sensors for Automatic Welding in Japan, IIW Doc XII-1564-99, IIW Intermediate Meeting of Commission XII 25/26 of March 1999
80. Toma, L. – Sisteme de achiziție și prelucrare numerică a semnalelor, Ed. de Vest, Timișoara, 1997
81. Tönshoff, H.K., Inasaki, I. (Edit.) - Sensors in Manufacturing, Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim, 2001
82. Tränkler, H.R., Obermeister, E. – Sensortechnik. Handbuch für Praxis und Wissenschaft, Springer-Verlag Berlin, 1998
83. Tsuboi R., s.a. - Application of laser sensor for automatic welding in Japan, IIW Doc XII-1578-99, IIW Conference, Lisabon 1999
84. Ueyama T., s.a. - Improve Sheet Metal Welding Quality & Productivity with AC Pulsed MIG Welding System, IIW Doc XII-1629-00, IIW Conference, Florence 2000
85. Ushio, M., Mao, W. - A study of Sensitivity Characteristic of Arc Sensor and its Improvements Proceedings of the 6th International Welding Symposium, November 19-21 (1996), p.325~330, Nagoya
86. Ushio, M., Mao, W. - An Analysis of the Dynamic Characteristics of an Arc Sensor for DC MIG/MAG Welding in Open Arc Mode -Study of Improvement of Sensitivity and Reliability of Arc Sensor in GMA Welding, Welding International, Vol.10, No.7 (1996), 543~551
87. Ushio, M., Mao, W. - Measurement and Theoretical Investigation of Arc Sensor Sensitivity in Dynamic State during Gas Metal Arc Welding, Science and Technology of Welding and Joining, Vol.2, No.5(1997), 191~198
88. Vasilievici, A. – Aparate și echipamente electrice, Edit. Universitatea Politehnica Timisoara, 1995

89. Walker, J.S. – A primer on wavelets and their scientific applications, CRC Press LLC, Boca Raton, 1999
90. Yamamoto H., s.a. - Development of Double Wire Mag Welding System for Robots, IIW Doc XII-1682-01, IIW Conference, Ljubljana 2001
91. Yamane S., s.a. - Seam tracking in first layer of one side robotic welding, IIW Doc XII-1594-99, IIW Conference, Lisabon 1999
92. Zelniker, G., Taylor, F.J. – Advanced digital signal processing, Marcel Dekker Inc., New York, 1994
93. *** - Pulsed Arc Welding, Abington Publishing Special Report, Abington Publishing, Cambridge, 1990
94. *** - Sensors, Ed. by the Japanese Institute of Welding, Tokio, 19
95. *** - The Physics of Welding, Edited by The International Institute of Welding, Pergamon Press, 1984

Rapoarte de cercetare. Referate

96. Savu D., June, C., Bîrlică, R. – Studiu documentar privind sudarea cu două sârme. Experimentări preliminare privind comportarea din punct de vedere metalurgic a oțelurilor slab aliate și aliajelor de aluminiu, Raport de cercetare MCT, ISIM, Timișoara, 1997
97. Savu D., June, C., Bîrlică, R. – Adaptarea echipamentelor de sudare pentru sudarea cu două sârme, Raport de cercetare MCT, ISIM, Timișoara, 1998
98. Savu, D., Bîrlică, R. – Dezvoltarea tehnicilor de sudare MIG/MAG de înaltă productivitate la îmbinările cu lungimi mai mari de 6m din oțeluri destinate construcției navelor fluviale și maritime, Raport de cercetare ANSTI, ISIM, Timișoara, 1999
99. Savu, D. – Dezvoltarea tehnicilor de sudare MIG/MAG de înaltă productivitate la îmbinările cu lungimi mai mari de 6m din aluminiu și aliaje de aluminiu destinate construcției navelor fluviale și maritime, Raport de cercetare ANSTI, ISIM, Timișoara, 1999
100. Savu, D. – Sisteme automate de achiziție a datelor la sudare, Referat doctorat, Timișoara, 1999
101. Savu, D. – Procese fizice la sudarea cu mai multe sârme, Referat doctorat, Timișoara, 2000
102. Savu, D. – Cercetarea influenței interacțiunii electromagnetice la sudarea MAG cu două sârme în scopul dezvoltării unui senzor-arc pentru mecanizarea și automatizarea sudării prin acest procedeu, Grant ANSTI, Timișoara, 2000
103. Vărșăndan, E., ș.a. – Cercetări și experimentări de sudare MIG/MAG de mare productivitate cu 1 și 2 sârme pentru sudarea oțelurilor carbon și slab aliate specifice producției de utilaje miniere și metalurgice, Raport de cercetare MCT, ISIM, Timișoara, 1997

Date biografice personale

Numele: SAVU
Prenumele: IONEL DĂNUȚ

Data nașterii: 17.09.1970
Locul nașterii: Drobeta - Turnu Severin, Mehedinți

Cetățenie: română

Parinții: Vasile SAVU și Gheorghita SAVU

Educație:

Liceul teoretic de matematică-fizică "TRAIAN"
Drobeta-Turnu Severin
1985-1989 – Diplomă de Bacalaureat

Universitatea "Politehnica" din Timișoara
Facultatea de Mecanică, Utilajul și Tehnologia Sudării
1990-1996 – Diplomă de Inginer

Universitatea "Politehnica" din Timișoara
Facultatea de Mecanică, Utilajul și Tehnologia Sudării
1996-1997 – Diplomă de Studii Aprofundate

Federația Europeană de Sudură
2001 – Diplomă de Inginer Sudor European

Loc de muncă:

Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare în Sudură și
Încercări de Materiale, ISIM, Timișoara – 1996-prezent
Cercetător Științific Principal III

Universität der Bundeswehr Hamburg – 2001-prezent
Responsabil program experimental proiect