

UNIVERSITATEA TEHNICĂ A MOLDOVEI

Cu titlu de manuscris
C.Z.U.: 004.2/004.3

CALMÎCOV IGOR

**SOLUȚII ÎNCORPORATE PENTRU SISTEME DE MĂSURARE ȘI
CONTROL ÎN PRODUCEREA ȘI APLICAREA MICROFIRELOR**

**232.01 – SISTEME DE CONDUCERE, CALCULATOARE ȘI REȚELE
INFORMAȚIONALE**

Teză de doctor în științe tehnice

Conducător științific

Zaporojan Sergiu
conf. univ., dr.

Autorul:

Calmîcov Igor

CHIȘINĂU, 2018

©Calmîcov Igor, 2018

CUPRINS

ADNOTĂRI.....	5
LISTA ABREVIERILOR	8
INTRODUCERE	9
1. ANALIZA SITUAȚIEI ÎN DOMENIUL SISTEMELOR DE PRODUCERE ȘI APLICARE A MICROFIRELOR	18
1.1. Procesul de turnare a microfiredor	18
1.2. Modelul hidrodinamic de aproximare a formei picăturii	23
1.2.1. Modelul picăturii pe baza ecuațiilor Navier-Stokes	23
1.2.2. Modelul cu două straturi.....	28
1.2.3. Criteriile de aplicabilitate a modelului	30
1.3. Determinarea parametrilor microfiredor în procesul de fabricare	32
1.4. Platforme arhitecturale pentru aplicare în sisteme de producție industrială	33
1.5. Formularea problemei și a direcției de cercetare	35
1.6. Concluzii la capitolul 1	38
2. MODELE ȘI ALGORITMI PENTRU SISTEME INTELIGENTE DE CONTROL ȘI SUPTOR DECIZIONAL ÎN PRODUCEREA MICROFIRELOR.....	40
2.1. Procesul de luare a deciziilor în turnarea microfiredor	40
2.2. Aspecte de comandă și control în procesul tehnologic de turnare a microfiredor	41
2.3. Abordarea predictivă în modelarea și comanda procesului tehnologic	46
2.3.1. Schema experimentală pentru achiziția și analiza datelor.....	47
2.3.2. Algoritmii de procesare a imaginii picăturii.....	51
2.3.3. Modelul de aproximare a formei picăturii în timp real	57
2.3.4. Acurateța aproximării formei picăturii	61
2.4. Comanda și controlul procesului prin logica fuzzy	62
2.5. Implementarea sistemului de procesare a imaginii picăturii pe o platformă încorporată	67
2.6. Concluzii la capitolul 2	70
3. SISTEME PENTRU CARACTERIZAREA MICROFIRELOR MAGNETICE ȘI SUPTOR DECIZIONAL ÎN PROCESUL DE PRODUCȚIE	71
3.1. Caracterizarea microfiredor prin măsurarea rezistenței lineare	72
3.2. Caracterizarea microfiredor magnetice cu înveliș din sticlă	74
3.3. Proiectarea sistemului informațional de caracterizare a microfiredor magnetice în regim dinamic – MAGNUS	77
3.3.1. Subsistemul de achiziție	78
3.3.2. Subsistemul de rebobinare.....	80

3.3.3. Elaborarea aplicației de comandă și control.....	84
3.3.4 Subsistemul grafic de vizualizare a rezultatelor măsurării.....	85
3.4. Dispozitiv autonom de măsurare a diametrului microfiredor magnetice	90
3.5. Concluzii la capitolul 3	92
4. SOLUȚII ÎNCORPORATE PENTRU APLICAREA AVANSATĂ A MICROFIRELOR MAGNETICE.....	94
4.1. Sistem reconfigurabil de caracterizare avansată a microfiredor magnetice	95
4.2. Dispozitiv staționar de identificare a etichetelor pe baza microfiredor magnetice	100
4.3. Detector de marcaje în hârtii securizate	104
4.4. Concluzii la capitolul 4	105
CONCLUZII GENERALE.....	107
RECOMANDĂRI	107
BIBLIOGRAFIE	109
ANEXE.....	120
Anexa 1. Scheme electrice principale și cablaje imprimate a dispozitivului experimental de achiziție a datelor.....	120
Anexa 2. Rezultatele experimentelor	125
Anexa 3. Scheme electrice principale și cablaje imprimate a sistemului de măsurare - MAGNUS.....	129
Anexa 4. Scheme electrice principale și cablaje imprimate a dispozitivului autonom de măsurare a diametrului.	183
Anexa 5. Schemele electrice principale și cablajele imprimate a sistemului reconfigurabil de caracterizare avansată a microfiredor.....	185
Anexa 6. Schemele electrice principale și cablajele imprimate a dispozitivului staționar de identificare a etichetelor pe baza de microfiredor.	196
Anexa 7. Scheme electrice principale și cablajele imprimate a detectorului portativ de marcaje în hârtie securizată.	201
Anexa 8. Actele de implementare.	204
DECLARAȚIA PRIVIND ASUMAREA RĂSPUNDERII	206

Adnotare

la teza „Soluții încorporate pentru sisteme de măsurare și control în producerea și aplicarea microfiredor” prezentată de către Calmîcov Igor pentru conferirea gradului științific de doctor în științe tehnice, Chișinău, 2018.

Structura tezei. Teza de doctor cuprinde introducerea, patru capitole, concluzii, bibliografia cu 135 titluri, 8 anexe, 110 pagini text de bază, inclusiv 52 figuri și 3 tabele. Rezultatele obținute sunt publicate în 33 lucrări științifice.

Cuvinte cheie: sisteme încorporate, microfiredor, sisteme de suport decizional, sisteme de control, procesarea imaginilor, machine vision.

Domeniul de studiu îl constituie aspectele teoretice și practice ale modelării și controlului procesului de turnare a microfiredorului prin metoda Taylor-Ulitovsky, construirii structurilor de suport decizional în sisteme cu grad înalt de incertitudine și aplicării materialelor avansate.

Scopul lucrării constă în elaborarea și dezvoltarea unor noi soluții tehnico-științifice pentru sporirea eficienței sistemelor de producție industrială a microfiredorului cu înveliș din sticlă, controlul calității microfiredorului turnat și dezvoltarea de aplicații avansate cu microfiredor.

Noutatea și originalitatea științifică constă în propunerea a noi modele și tehnici pentru comanda și controlul inteligent a procesului de turnare a microfiredorului, cu posibilitatea de a urmări și de a estima parametrii capilarului în condiții operaționale. Originalitatea soluțiilor propuse constă în îmbinarea tehnicilor machine vision cu metodele și algoritmi logicii fuzzy care permit comanda și controlul procesului în regim de predicție a evoluției acestuia în timp real.

Problema științifică soluționată rezidă în elaborarea unui model original de estimare în timp real a formei geometrice a capilarului caracteristic procesului de turnare a microfiredorului prin metoda Ulitovsky-Taylor, fapt care a condus la dezvoltarea unei abordări predictive în comanda și controlul procesului respectiv, cu posibilitatea de creștere a calității microfiredorului turnat.

Semnificația teoretică a lucrării o constituie propunerea soluțiilor inovative care pot servi la acumularea cunoștințelor operatorului uman de calificare foarte înaltă. Implementarea modelului propus presupune dezvoltarea unui algoritm de autoînvățare online pentru completarea și/sau modificarea bazei de cunoștințe, utilizate la ajustarea strategiilor de control la nivelul motorului de inferență al sistemului de comandă și control.

Valoarea aplicativă a lucrării constă în: 1) elaborarea unei platforme tehnologice încorporate pentru achiziția, procesarea și analiza datelor privind evoluția procesului de turnare a microfiredorului; 2) elaborarea noilor sisteme de măsurare a caracteristicilor microfiredorului magnetice; 3) elaborarea sistemelor de detectare a amprentelor formate din microfiredor.

Implementarea rezultatelor științifice constă în utilizarea modelelor și sistemelor elaborate în cadrul companiei “Microfiredor Tehnologii Industriale” S.R.L. Valoarea aplicativă a lucrării se confirmă inclusiv prin 2 acte de implementare a rezultatelor obținute.

Annotation

for science degree in technics with title “Embedded solutions for measurement and control systems in fabrication and application of microwires”, presented by Igor Calmîcov for conferring a PhD Degree in technical sciences, Chişinău, 2018.

Thesis structure. The Ph.D. thesis comprises the introduction, four chapter, conclusions bibliography (135 titles), 8 appendixes, 110 pages of main text, 52 figures and 3 tables. The obtained results are published in 33 scientific articles.

Keywords: embedded systems, microwire, decision support systems, control systems, image processing, machine vision.

The study domain includes theoretical and practical aspects of modelling and controll of the microwire casting using the Taylor-Ulitovsky method, decision support structures construction in systems with high degree of uncertainty and application of advanced materials.

The purpose of research consists of elaboration and development of embedded solutions for the increasing of microwire production systems efficiency, microwire quality control and development of new applications based on the microwires.

The scientific novelty consists in forwarding of new models and technics for intelligent command and control of the microwire casting process with possibility to track and estimate the parameters of capillary in operational conditions. The originality of proposed solutions consists in combining machine vision techniques with fuzzy logic methods and algorithms that allow command and control of the process using prediction of its evolution in real time.

The solved scientific problem resides in the elaboration of an original model for real-time estimation of the geometric shape of the capillary during the microwire casting, which led to the development of a predictive approach in command and control of the process, and increasing the quality of the cast microwire.

The theoretical significance of the work consists of innovative solutions that can serve to accumulate the knowledge of the highly skilled human operator. The implementation of the proposed models involves the development of an online self-learning algorithm for completing and/or modifying the knowledge base, which can be used to adjust control strategies in order to develop the inference engine.

The applied value consists in: 1) elaboration of an embedded technological platform for the acquisition, processing and analysis of data regarding the evolution of the microwire casting process; 2) elaboration of new systems for measuring the characteristics of magnetic microwires; 3) development of detection systems for magnetic microwire based tags.

The implementation of scientific results consists in the use of elaborated models and systems within the Microfir Tehnologii Industriale LTD.

Аннотация

диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук с темой „Встроенные решения для систем измерения и контроля в производстве и применении микропроводов”, автор Калмыков Игорь, Кишинэу 2018

Структура работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, выводов, библиографии из 135 наименований, 8-и приложений, 110 страниц основного текста, включая 52 рисунков и 3 таблицы. Полученные результаты опубликованы в 33-х работах.

Ключевые слова: встроенные системы, микропровод, системы принятия решений, системы контроля и управления, обработка изображения, машинное зрение.

Область исследования касается теоретических и практических аспектов моделирования, контроля и управления процесса литья микропровода методом Улитовского, построения структур принятия решений в условиях неопределённости.

Цель работы состоит в повышении эффективности систем промышленного производства и качества литого микропровода, а также разработке новых применений с использованием микропровода.

Научная новизна и оригинальность полученных результатов заключается в том, что предложены новые модели и средства для контроля процессом литья с возможностью отслеживать и оценивать параметры капилляра в рабочем режиме. Оригинальность предложенных решений заключается в сочетании методов и средств машинного зрения и нечеткой логики, что позволяет контролировать процесс литья в режиме предсказания.

Решённая научная задача состоит в разработке оригинальной модели для оценки в реальном времени геометрической формы капилляра характерной для процесса литья микропровода, что способствует разработке предиктивного подхода для контроля и управления процессом.

Теоретическое значение заключается в предложении инновационных решений, которые могут служить для развития системы сбора знаний опытного оператора. Внедрение предложенной модели предполагает разработку самообучающегося алгоритма в целях создания базы знаний и применения в корректировке управляющих стратегий.

Практическая значимость работы заключается в 1)разработке встроенной платформы для сбора, обработки и анализа данных о ходе процесса литья; 2) разработке встроенных систем измерения параметров магнитных микропроводов; 3) разработке систем считывания меток на основе магнитных микропроводов.

Внедрение научных результатов состоит в использовании предложенных моделей и систем в рамках компании “Microfir Tehnologii Industriale” S.R.L. Практическая значимость работы подтверждается двумя актами о внедрении полученных результатов.

LISTA ABREVIERILOR

MCU – Microcontroller Unit
CPLD – Complex Programmable Logic Device
FPGA – Field Programmable Gate Array
ASIC – Application Specific Integrated Circuit
DSP – Digital Signal Processor
UAL – Unitatea Aritmetico-logică
ARM – Advanced RISC Machine (Acorn RISC Machine)
DDS – Direct Digital Synthesis
SoC – System on Chip
SBC – Single Board Computer.
SDRAM – Synchronous Dynamic Random-access Memory
USART – Universal Synchronous/Asynchronous Receiver/Transmitter
CAN – Controller Area Network
USB – Universal Serial Bus
ADC – Analog to Digital Converter
HDMI – High-Definition Multimedia Interface
GUI – Graphic User Interface
LCD – Liquid Crystal Display
RFID - Radio-frequency Identification
MEMS – Micro Electro Mechanical Systems
Hc – forța coercitivă
RL– rezistența lineară (indicațiile de la măsurătorul de rezistență)
PTS – presiunea aerului în tubul de sticlă
PG – puterea generatorului de câmp magnetic
VTS – viteza de avans a tubului de sticlă
VTA – viteza de avans a tijeii de aliaj
VBR – viteza de rotire a bobinei receptorului
TPS – temperatura picăturii în zona de sus
TPJ – temperatura picăturii în zona de jos
PC – punctul capilarului
PI – punctul de inflexiune
PP – poziția picăturii

INTRODUCERE

Actualitatea temei de cercetare. La ora actuală, în lume se remarcă un interes sporit față de nanotehnologii. În particular, se manifestă un interes special față de producerea și aplicarea microfiredelor magnetice. Aplicațiile mai mult sau mai puțin tradiționale sunt completate cu noi aplicații de perspectivă. De exemplu, o aplicare avansată ține de obținerea compozitelor ternare, care încorporează senzori magnetici pe baza microfiredelor magnetice într-o matrice de biopolimer, înglobate pe suport de hârtie. Senzorii trebuie să codifice o informație cât mai amplă, pentru ca în cazul unor utilizări în tehnica ambalajului, a etichetării sau a hârtiei securizate să facă cât mai dificile încercările de falsificare. Aria de aplicații fiind în creștere, cresc cerințele față de caracteristicile electromagnetice și geometrice ale microfiredului. În context mai larg în vizor este reducerea costurilor producției și creșterea productivității. În mod deosebit, accentul se pune pe calitatea microfiredului obținut fie în condiții de laborator, fie în condiții de producere industrială. Rezultă actualitatea și necesitatea de a crește eficiența sistemelor de producție a microfiredului și calitatea produsului finit pentru a satisface cerințelor aplicative.

Diametrul tipic al microfiredului metalic tras prin metoda Ulitovsky-Taylor este în intervalul 1 - 50 μm . Microfiredul poate fi turnat fie din metale (cupru, aur, argint, cobalt, nichel etc.), fie din aliaje pe baza metalelor respective. Este de notat că diametrul microfiredului turnat poate varia în timpul procesului staționar de turnare. În dependență de diametrul prescris al microfiredului, precizia de producere a acestuia variază puternic: (5-10)% pentru microfired în diapazonul de la 5 la 10 micrometri, respectiv (15-20)% pentru microfired în diapazonul de la 10 la 30 micrometri. Pentru alte valori ale diametrului calitatea (în sensul parametrilor geometrici) scade puternic. Explicația constă în faptul că pentru tragerea microfiredului operatorul recurge la indicațiile unui traductor (măsurător) al rezistenței firului metalic. De precizia acestui dispozitiv depinde diametrul firului tras. Din păcate, dispozitivul în cauză devine practic nefuncțional la grosimi mici și a celor de peste 30-40 micrometri. Reproiectarea acestui traductor fiind foarte complicată și greu de realizat, tragerea microfiredelor în diapazonul respectiv este posibilă doar datorită calificării și experienței operatorului uman care vizualizează picătura pentru a ajusta starea tehnologică a procesului. În consecință, chiar dacă operatorul reușește să tragă firul, calitatea acestuia este scăzută. Pe de altă parte, calitatea și grosimea izolației de sticlă a microfiredului este extrem de importantă pentru a asigura proprietățile electro-magnetice dorite sau necesare pentru dezvoltarea aplicațiilor avansate cu microfired. Astfel, în condițiile tehnologiilor existente, se constată o problemă complexă în producerea microfiredelor cu parametrii prescrși.

Procesul tehnologic de turnare a microfiredului se caracterizează printr-un nivel de complexitate extrem de ridicat. Procesul respectiv reprezintă o îmbinare de procese mecanice,

termice, electrodinamice, transformări și interacțiuni fizico-chimice. Dat fiind gradul înalt de complexitate și incertitudine, crearea unui model matematic complet și adecvat pentru automatizarea procesului de turnare a microfirului reprezintă o problemă extrem de dificilă. Se poate presupune că abordarea fizico-matematică pură a procesului tehnologic în cauză nu reprezintă o soluție viabilă practic.

Având în vedere cele expuse pe de o parte, rolul și ponderea în creștere a sistemelor încorporate inteligente pentru aplicații industriale pe de altă parte, se poate constata actualitatea și importanța efectuării lucrărilor de cercetare-dezvoltare și implementare a unor soluții avansate pentru modelarea procesului tehnologic de turnare a microfirului prin metoda Ulitovsky-Taylor, caracterizarea și controlul parametrilor microfirului atât în faza de producere, cât și la etapa de control a calității produsului finit. Totodată, este actuală și elaborarea de noi sisteme/dispozitive încorporate pentru cercetarea și dezvoltarea de noi aplicații pe baza microfiredelor cu înveliș din sticlă.

Generalizând, se poate vorbi despre actualitatea și importanța unei oferte de reengineering în cazul întreprinderilor axate pe producerea, cercetarea și aplicarea microfiredelor în domeniul de vârf. Ideea de reengineering este centrată asupra tuturor proceselor la nivelul întreprinderii moderne. Reengineering-ul implică o re proiectare radicală a unui sistem de producție pentru a atinge o îmbunătățire considerabilă a indicatorilor de performanță (cost, calitate, productivitate, etc.). Mai mult, ideea de reengineering este actuală, deoarece tehnologia informației este în schimbare continuă. Lumea fiind în continuă schimbare, esențială pentru succes în sfera de interes este organizarea optimă a activității, acordată priorităților și rigorilor externe. Resursele umane, financiare, materiale și informaționale disponibile contează enorm în asigurarea producției. În primul rând însă, trebuie considerată problema optimizării sistemului de producție, adică a organizării și desfășurării proceselor și a activităților aferente producției, activități interconectate la nivelul unei întreprinderi.

Activitățile respective includ procese organizaționale, economico-financiare, productive, comerciale și, nu în ultimul rând, informaționale. Ceea ce are importanță în organizarea procesului de producție este optimizarea activității întreprinderii, ținând cont de cerințele pieței și de puterea tehnologiilor actuale. Activitățile menționate sunt realizate de agenți umani și/sau mașini pentru a contribui la atingerea obiectivelor fixate în cadrul întreprinderii. Deci, organizarea, respectiv optimizarea unui sistem de producție ține de activități (sau operații), participanți (agenți umani și/sau mașini) și obiective țintă (indicatori de performanță).

În contextul lucrării de față, obiectivul reengineering-ului constă în asigurarea unui suport decizional pentru îmbunătățirea indicatorilor de performanță, în condițiile unor schimbări operative (sau complexe) în procesul de producere și aplicare a microfiredelor. În sens mai larg, se

impune cercetarea și dezvoltarea unor noi modele, metode și platforme tehnologice pentru sisteme de suport decizional, astfel încât factorii de decizie să poată găsi soluția cea mai bună (optimă pe un anumit criteriu). Cercetată din acest punct de vedere, producerea și aplicarea microfiredor cu înveliș din sticlă reprezintă un caz specific, complex și extrem de interesant.

Domeniul de cercetare. Lucrarea dată are drept domeniu de cercetare studiul aspectelor teoretice și practice ale modelării și controlului procesului tehnologic de turnare a microfiredorului prin metoda Taylor-Ulitovsky, construirii structurilor de suport decizional în sisteme de producție industrială cu grad înalt de incertitudine și aplicării materialelor avansate.

Obiectul de cercetare. Sisteme și metode pentru suportul decizional în procesul de producție și aplicare a microfiredorului cu înveliș din sticlă.

Scopul lucrării constă în elaborarea și dezvoltarea unor noi soluții tehnico-științifice pentru sporirea eficienței sistemelor de producție industrială a microfiredorului cu înveliș din sticlă, controlul calității microfiredorului turnate și dezvoltarea de aplicații avansate cu microfir.

Din scopul propus rezultă următoarele **obiective ale cercetării**:

1. Analiza particularităților procesului tehnologic de turnare a microfiredorului prin metoda Taylor-Ulitovsky și determinarea aspectelor cu impact major asupra eficienței sistemelor de producție.

2. Cercetarea și dezvoltarea unor noi modele, algoritmi și metode pentru sisteme inteligente de comandă și control a procesului de turnare a microfiredorului.

3. Dezvoltarea unei platforme tehnologice de achiziție și analiza datelor privind evoluția procesului de turnare a microfiredorului.

4. Proiectarea și elaborarea sistemelor/dispozitivelor încorporate pentru caracterizarea microfiredorului magnetice și suport decizional în controlul calității produsului finit.

5. Cercetarea spectrului de aplicații avansate cu microfiredor magnetice și dezvoltarea instrumentelor de suport tehnico-științific.

6. Implementarea rezultatelor obținute.

Suportul metodologic și teoretico-științific al cercetărilor este bazat pe analiza matematică, teoria algoritmilor, teoria mulțimilor vagi, tehnicile achiziției de date și „machine vision”, recunoașterea formelor, teoria circuitelor și tehnologii de programare orientate pe obiecte.

Noutatea și originalitatea științifică. Au fost elaborate noi modele și tehnici pentru comanda și controlul inteligent a procesului de turnare a microfiredorului, cu posibilitatea de a urmări și de a estima parametrii capilarului în condiții operaționale. Originalitatea soluțiilor propuse

constă în îmbinarea tehnicilor machine vision cu cele inteligente, care permit comanda și controlul procesului în regim de predicție a evoluției acestuia în timp real.

Problema științifică soluționată rezidă în elaborarea unui model original de estimare în timp real a formei geometrice a capilarului caracteristic procesului de turnare a microfiredelor prin metoda Ulitovsky-Taylor, fapt care a condus la dezvoltarea unei abordări predictive în comanda și controlul procesului respectiv, cu posibilitatea de creștere a calității microfiredului turnat.

Semnificația teoretică a lucrării o constituie propunerea soluțiilor inovative care pot servi la acumularea cunoștințelor operatorului uman de calificare foarte înaltă. Experiența și cunoștințele operatorului pot fi acumulate în timp real, formând astfel o bază de cunoștințe. Implementarea modelului propus presupune dezvoltarea unui algoritm de autoînvățare online pentru completarea și/sau modificarea bazei de cunoștințe. De asemenea, devine posibilă dezvoltarea strategiilor de luare a deciziilor pentru implementare la nivelul motorului de inferență al sistemului de comandă și control.

Valoarea aplicativă a lucrării. Platforma tehnologică încorporată pentru achiziția, procesarea și analiza datelor privind evoluția procesului de turnare a microfiredului a deschis posibilitatea de a continua cercetările în direcția optimizării sistemului de producție în cadrul întreprinderii „Microfir Tehnologii Industriale” SRL din Chișinău.

În premieră a fost proiectat, confecționat și implementat un sistem informațional de măsurare a parametrilor microfiredelor magnetice, care reprezintă un instrument de suport decizional în procesul de control a calității microfiredelor, permițând factorilor de decizie analiza și corecția procesului tehnologic în timp real. Sistemul elaborat permite măsurarea forței coercitive și a diametrului, respectiv monitorizarea calității prin rebobinarea și scanarea discretă a microfiredului. Datele achiziționate se afișează sub formă numerică și grafică, iar informația statistică ce conține parametrii, compoziția aliajului, codul operatorului și a instalației pe care a fost turnat microfiredul se stochează în baza de date a sistemului. Baza de date poate fi utilizată pentru atestarea calității microfiredelor la momentul furnizării către beneficiar.

Au fost elaborate și confecționate o serie de dispozitive încorporate pentru caracterizarea microfiredelor magnetice cu înveliș din sticlă care permit cercetarea și dezvoltarea unor aplicații de vârf, inclusiv în domeniul protecției documentelor și a hârtiilor de valoare.

Valoarea aplicativă a lucrării se confirmă inclusiv prin 2 acte de implementare a rezultatelor obținute.

Rezultatele științifice înaintate spre susținere:

1. Algoritmi de procesare a imaginii picăturii și metodă de extragere a datelor relevante pentru aproximarea conturului.

2. Model de aproximare a formei picăturii în timp real.
3. Model fuzzy pentru comanda și controlul procesului de turnare a microfirului.
4. Platformă tehnologică încorporată de achiziție și analiza datelor privind evoluția procesului de turnare a microfirului.
5. Sistem informațional de măsurare a parametrilor microfiredelor magnetice și suport decizional în procesul de producție industrială.
6. Soluții inovative încorporate pentru cercetarea și dezvoltarea aplicațiilor avansate cu microfiredelor magnetice.

Aprobarea rezultatelor lucrării. Rezultatele principale ale lucrării au fost prezentate la 25 foruri științifice (congrese, conferințe, saloane ale cercetării și inovării) din care vom menționa:

- International workshop on magnetic wires IWMW-2008, May 8-10, 2008, Zumaia, Spain.
- International Congress of Cybernetics and Systems of WOSC, Sep. 9 - 12, 2008, Wroclaw, Poland.
- International Conference on Systems Science ICSS-2010, Sep. 14 - 16, 2010, Wroclaw, Poland.
- European Exhibition of Creativity and Innovation – EUROINVENT 2011, May 12-14, 2011, Iasi, Romania.
- International Conference “Modelling and Development of Intelligent Systems” MDIS-2011, Sep. 29 - Oct. 02, 2011, Sibiu, Romania.
- European Exhibition of Creativity and Innovation – EUROINVENT 2012, May 10-12, Iasi, 2012, Romania.
- International Exhibition of Research, Innovation and Technological Transfer „INVENTICA 2012”, June 13-15, 2012, Iasi, Romania.
- Байкальская Международная конференция, Сентябрь 21-25, 2012, Иркутск, Россия.
- International Salon of Inventions and New Technologies „New Time”, Sep. 27-29, 2012, Sevastopol, Ukraine.
- International Warsaw Invention Show – IWIS 2012, October 16-19, 2012, Warsaw, Poland.
- Conferința Națională de Interacțiune Om-Calculator ROCHI 2013, Sept. 2-3, 2013, Cluj-Napoca, România.
- International Invention Show INOVA 2013, Nov. 12-17, 2013, Zagreb, Croatia.
- Salonul Internațional al Cercetării, Inovării și Inventicii PRO INVENT 2014, 19-21 martie 2014, Cluj-Napoca, România.

- Московский Международный Салон изобретений и инновационных технологий АРХИМЕД 2014, 1-4 апр. 2014, Москва, Россия.
- European Exhibition of Creativity and Innovation EUROINVENT-2014, May 22-24, 2014, Iasi, Romania.
- Moscow International Symposium on Magnetism MISM-2014, 29 June-3 July, 2014, Moscow, Russia.
- International Exhibition of Research, Innovation and Technological Transfer “Inventica 2014”, 2-4 July, 2014, Iasi, Romania.
- International Conference on Microelectronics and Computer Science ICMCS-2014, 22-25 October, 2014, Chişinău, Moldova.
- Salonul Internațional al Cercetării, Inovării și Inventicii PRO INVENT 2015, 25-27 martie 2015, Cluj-Napoca, România.
- Expoziția Internațională Specializată INFOINVENT 2015, 25-28 noiembrie 2015, Chişinău, Moldova.

Publicații științifice. La tema tezei au fost publicate 33 lucrări științifice (dintre care 5 fără coautori) cu un volum total de 2.96 coli de tipar, inclusiv 2 capitole în culegeri internaționale editate în SUA și indexate în baza de date SCOPUS, 2 articole publicate în reviste cu recenzii. Au fost obținute 11 medalii de aur, argint și bronz, 1 premiu special, 12 diplome. Au fost depuse la AGEPI și obținute 2 brevete de invenție.

Structura și volumul lucrării. Teza este compusă din introducere, patru capitole, concluzii finale, bibliografie (135 titluri) și 8 anexe. Conținutul de bază al tezei este expus pe 110 pagini, inserează 52 figuri și 3 tabele.

Conținutul de bază a lucrării.

În **Introducere** este prezentată argumentarea și actualitatea temei de cercetare. Este formulat scopul și sarcinile cercetării, sunt prezentate domeniul și obiectivele cercetării, elementele de noutate științifică a rezultatelor obținute, este prezentată semnificația teoretică și valoarea aplicativă a domeniului de studiu.

În capitolul I, **Analiza situației în domeniul sistemelor de producere a microfiredor,** sunt prezentate date cu privire la tehnici și tehnologii de turnare a microfiredorului, este descrisă instalația de turnare a microfiredorului prin metoda Taylor-Ulitovsky și elementele cheie ale obiectului tehnologic. Sunt prezentate informații privind aplicarea microfiredorului și specificul acestora. Este efectuată analiza liniei de producție a microfiredorului cu înveliș din sticlă și a factorilor cu impact major asupra indicatorilor de performanță a sistemului de producție industrială. Este prezentat modelul picăturii pe baza ecuațiilor Navier-Stokes și aspecte de

aplicabilitate a acestuia. Este formulată problema și direcția de cercetare. Sunt prezentate tehnologiile disponibile pentru realizarea soluțiilor încorporate în sisteme de producție industrială.

În capitolul II, **Modele și algoritmi pentru sisteme inteligente de control și suport decizional în producerea microfiredelor**, sunt reflectate aspecte de comandă și control în procesul tehnologic de turnare a microfiredelor cu prezentarea schemei procesului tehnologic și determinarea variabilelor de control, respectiv a mărimii de ieșire.

Este propusă și dezvoltată conceptual abordarea predictivă în modelarea și comanda procesului tehnologic cercetat. În acest context au fost elaborați algoritmi de procesare a picăturii. A fost elaborat modelul de aproximare a formei picăturii (capilarului) în timp real. A fost analizată acuratețea aproximării formei picăturii.

Este prezentată structura sistemului de comandă și control inteligent care are la bază tehnicile propuse și dezvoltate cu aplicarea logicii fuzzy. Au fost definite variabilele lingvistice și selectate funcțiile de apartenență, ținând cont de specificul procesului cercetat. Sunt prezentate regulile pentru motorul de inferență și unele rezultate ale simulărilor în mediul MATLAB.

Este descrisă elaborarea unei platforme tehnologice încorporată pentru achiziția, procesarea și analiza datelor privind mersul procesului de turnare a microfiredelor, având la bază tehnologii hardware și software moderne.

Capitolul III, **Sisteme pentru caracterizarea microfiredelor magnetice și suport decizional în procesul de producție**, este dedicat proiectării și construirii în premieră a unui sistem informațional de măsurare a parametrilor microfiredelor magnetice și suport decizional în procesul de producție industrială (sistemul elaborat nu are analoge existente la nivel mondial).

Este descris un sistem informațional de măsurare a parametrilor microfiredelor magnetice care a fost conceput ca un instrument de suport decizional în procesul de control a calității microfiredelor (sistemul permite operatorului uman luarea deciziilor și corecția procesului tehnologic în regim on-line), fiind constituit din: calculator personal pe care este rulată aplicația; subsistem complex de măsurare a forței coercitive și diametrului microfiredelor și subsistem electromecanic de rebobinare a microfiredelor. Sistemul elaborat permite măsurarea forței coercitive și a diametrului cu precizia 10-15%. Măsurarea parametrilor, respectiv monitorizarea calității este realizată prin rebobinarea și scanarea discretă a microfiredelor. Viteza de rebobinare poate fi setată de la 0,2 până la 9,5 m/s, pasul de rebobinare - 50...500 μm. Datele achiziționate se afișează sub formă numerică și grafică, iar informația statistică ce conține parametrii, compoziția aliajului, codul operatorului și a instalației pe care a fost turnat microfiredelul se stochează în baza de date a sistemului. Baza de date poate fi utilizată pentru atestarea calității microfiredelor la furnizare către beneficiar.

Este elaborat și confecționat un dispozitiv autonom de măsurare a diametrului miezului microfiredor magnetice, implementat în procesul de caracterizare a microfiredor cu înveliș din sticlă și dezvoltare de noi aplicații. Dispozitivul elaborat permite măsurarea diametrului miezului microfiredor cu izolație din sticlă în intervalul de la 10 până la 30 μm cu posibilitatea extinderii intervalului de măsurare până la 100 μm . Încercările experimentale au confirmat funcționalitatea dispozitivului în intervalul [10...30] μm . Eroarea introdusă nu depășește 0,5 μm în diapazonul de lucru. Dispozitivul este format din două componente: 1) bobinele de măsurare cu schema analogică de amplificare/filtrare a impulsului de răspuns al microfiredorului în câmp electromagnetic alternativ și 2) subsistemul de achiziții date cu prelucrare numerică a semnalelor pe bază de microprocesor. Valoarea calculată a diametrului miezului se afișează pe un ecran LCD. La dorință, dispozitivul poate fi conectat la un calculator gazdă, cu afișarea rezultatelor pe monitorul calculatorului.

Dispozitivul elaborat se caracterizează prin precizie și veridicitate ridicată comparativ cu estimarea vizuală la microscop, datorită eliminării efectelor optice cauzate de variația grosimii sticlei. Reducerea substanțială a timpului de măsurare a diametrului microfiredor cu izolație din sticlă reprezintă un alt avantaj important.

În capitolul IV, **Soluții Încorporate pentru aplicarea avansată a microfiredor magnetice**, sunt prezentate unele soluții inovative sub forma unor sisteme/dispozitive încorporate pentru utilizare în cercetarea și dezvoltarea aplicațiilor avansate pe bază de microfiredor.

Este prezentat un sistem reconfigurabil de caracterizare avansată a microfiredor magnetice, care a fost conceput ca un instrument flexibil, care poate fi simplu adaptat pentru noile măsurări și eventualele procesări a datelor. Acest sistem s-a regăsit în cadrul procesului de control a calității microfiredor, dar și în cadrul lucrărilor de cercetare, acumulare a statisticii, în vederea dezvoltării noilor aplicații pe bază de microfiredor. Sistemul elaborat permite măsurarea semnalelor de la trei canale analogice cu o rezoluție de 12 biți și o frecvență de eșantionare de până la 50 MSPS. În afară de aceasta, sistemul dispune de un generator reconfigurabil, care permite generarea câmpului magnetic cu amplitudine de la 100A/m până la 1000A/m și frecvența de 10Hz – 2 KHz. Folosind diferite adaptoare/senzori, sistemul permite efectuarea caracterizării avansate a microfiredor magnetice.

Este descris un dispozitiv staționar de identificare a etichetelor pe baza microfiredor magnetice care permite citirea unor etichete multibit pe bază de microfiredor cu compoziție specifică pentru asigurarea unui grad de protecție sporit contra falsurilor.

De asemenea, este propus un prototip al dispozitivului detector de marcaje aplicate în hârtii securizate, care poate fi folosit în domeniul protecției documentelor și a hârtiilor de valoare.

În **Concluzii și recomandări** sunt expuse cele mai importante rezultate ale tezei.

Anexele conțin schemele electrice principale ale sistemelor și dispozitivelor elaborate, cablajele imprimate ale acestora, date statistice acumulate în cadrul experimentelor, codurile AHDL, listinguri ale aplicațiilor, copiile actelor de implementare a elaborărilor tehnico-științifice.

1. ANALIZA SITUAȚIEI ÎN DOMENIUL SISTEMELOR DE PRODUCERE ȘI APLICARE A MICROFIRELOR

1.1. Procesul de turnare a microfiredor

Microfirele cu izolație de sticlă au fost inventate în anul 1941 de către G.E.Taylor. Pentru obținerea microfiredor, Taylor plasa metalul în poziție orizontală într-un tub de sticlă. Încălzirea metalului și a tubului de sticlă se efectua cu un arzător de gaze, iar după topirea metalului și înmuierea sticlei, tubul de sticlă era întins rapid. În anul 1948, prof. A.Ulitovsky a propus procedeul de obținere a microfiredor cu izolație de sticlă prin încălzirea metalului sau aliajului și tragerea capilarului de sticlă umplut cu metal [1].

Esența metodei [2-5] lui Ulitovsky (în literatura științifică este denumită ca metoda Taylor-Ulitovsky), constă în următoarele: într-un tub de sticlă sunt plasate câteva grame de metal sau aliaj, tubul de sticlă cu metal fiind deasupra unui inductor alimentat de un generator de frecvență înaltă. Sub influența câmpului magnetic al inductorului, metalul se topește și înmoaie pereții tubului de sticlă. Metalul topit învăluit de sticla înmuiată formează picătura ce planează deasupra inductorului. Ulterior, un tub subțire de sticlă este unit de fundul picăturii și este tras un capilar subțire de sticlă. Capilarul subțire este tras continuu spre o bobină ce se rotește. La anumite temperaturi în capilar este atras și metalul topit. Nemijlocit sub inductor se află jetul de lichid pentru răcire – apă sau ulei, și în timpul trecerii prin jet a microfiredor el este răcit până la stare solidă. Manipulând stările tehnologice ale procesului de turnare: viteza de recepție a microfiredor, viteza de deplasare a tubului de sticlă, puterea inductorului, presiunea gazului din tubul de sticlă, se pot obține microfiredor cu anumite dimensiuni geometrice.

Începând cu anii '50 ai sec. trecut în fabricarea și cercetarea microfiredor au fost implicate multiple instituții de cercetare din fosta URSS. În domeniul dat au activat cu succes Instituții de cercetare și dezvoltare din Republica Moldova:

- КНИИЭП
- ВНИИНК
- Institutul Politehnic S. Lazo
- Instituții de cercetare din cadrul Academiei de Științe a RM.

La fondarea și dezvoltarea acestei industrii în RM au contribuit diverse colective de cercetare conduse de savanți cu renume (E. Badinter, ș.a). Actualmente în acest domeniu își aduc aportul cercetătorii din cadrul: ELIRI S.A., Microfir Tehnologii Industriale SRL, Institutul de Inginerie Electronică și Nanotehnologii "D. Ghițu", UTM.

Pentru turnarea microfiredor sunt necesare echipamente tehnologice specializate. În anii șazeci ai secolului trecut, în institutul de cercetare științifică „ELIRI” SA a fost elaborată pentru prima dată tehnologia și echipamentul industrial în vederea producerii microfiredor trase în izolație de sticlă. În cadrul institutului au fost efectuate cercetări fundamentale și aplicative privind tehnologia procesului de turnare și proprietățile microfiredor. În același timp, colaboratorii întreprinderii de producere și cercetare „Microfir Tehnologii Industriale” SRL din Chișinău (foști angajați ai institutului „ELIRI” SA) de asemenea realizează lucrări de cercetare și fabricare a microfiredor.

Producția pe scară relativ largă și cercetarea noilor tehnologii și posibilități de aplicare a microfiredor este dezvoltată în mai multe țări (Franța, Spania, Rusia, Israel, Japonia). Totodată, cercetarea proprietăților microfiredor și a aplicațiilor avansate este efectuată în universități, instituții de cercetare și dezvoltare din diverse țări ale lumii.

Diametrul tipic al firului metalic tras este de 1 - 50 μm . Microfirul poate fi turnat fie din metale (cupru, aur, argint, cobalt, nichel etc.), fie din aliaje pe baza metalelor respective. Este de notat că diametrul firului tras poate varia în timpul procesului de turnare staționar. În dependență de diametrul programat al firului, precizia de tragere variază puternic: (5-10)% pentru microfiredor în diapazonul de la 5 la 10 micrometri, respectiv (10-20)% pentru microfiredor în diapazonul de la 10 la 30 micrometri. Pentru alte valori ale diametrului calitatea (în sensul parametrilor geometrici) scade puternic. Explicația constă în faptul că pentru tragerea microfiredorului, operatorul recurge la indicațiile unui traductor (măsurător) al rezistenței firului metalic. De precizia acestui dispozitiv depinde diametrul firului tras. Din păcate, dispozitivul în cauză devine practic nefuncțional la diametre mici și a celor de peste 30-40 micrometri.

Pe de altă parte, odată cu elaborarea tehnologiei de turnare a microfiredor magnetice cu caracter bistabil a început o nouă etapă în dezvoltarea acestui domeniu [5,8-10, 12,13]. Microfiredor din aliaje magnetice au deschis o mulțime de aplicații noi cum ar fi:

- Microsenzori – de forță, câmp magnetic, temperatură;
- Materiale ce absorb unde electromagnetice de frecvență înaltă;
- Sisteme de identificare și protecție a documentelor, hârtiilor de valoare, ambalajelor;
- Etc.

În contextul de mai sus trebuie menționat că, pe lângă diametrul firului metalic, calitatea și grosimea izolației de sticlă a microfiredorului este extrem de importantă pentru a asigura proprietățile electro-magnetice dorite sau necesare pentru dezvoltarea aplicațiilor avansate.

În prezent, se practică două tehnici principale de fabricație a microfiredor:

- Metoda UNITIKA
- Metoda Taylor-Ulitovsky

Metoda UNITIKA a fost elaborată de UNITIKA Ltd. R&D (Kyoto, Japonia) [6, 7]. Această metodă constă în injectarea sub presiune a aliajului topit/încălzit cu ajutorul unui inductor. Jetul de metal nimereste într-un vas cu apă ce se rotește și astfel metalul se răcește momentan.

Diametrul firului depinde de diametrul jetului, presiunea în tub, unghiul de injectare și viteza de rotire a vasului cu apă. Microfirele obținute la prima fază au un diametru de aproximativ 125 micrometri. Apoi aceste filamente sunt trase la rece până la un diametru de 20-30 micrometri (Figura 1.1).

A doua metodă a fost elaborată în anul 1924 de către G. E. Taylor. Pentru obținerea microfirului, Taylor pune metal într-un tub de sticlă amplasat orizontal. După ce tubul era înfierbântat cu un arzător cu gaz metalul în tub se topea și se înmuia tubul de sticlă. Atunci el repede întindea tubul, obținând microfir de diametru mic.

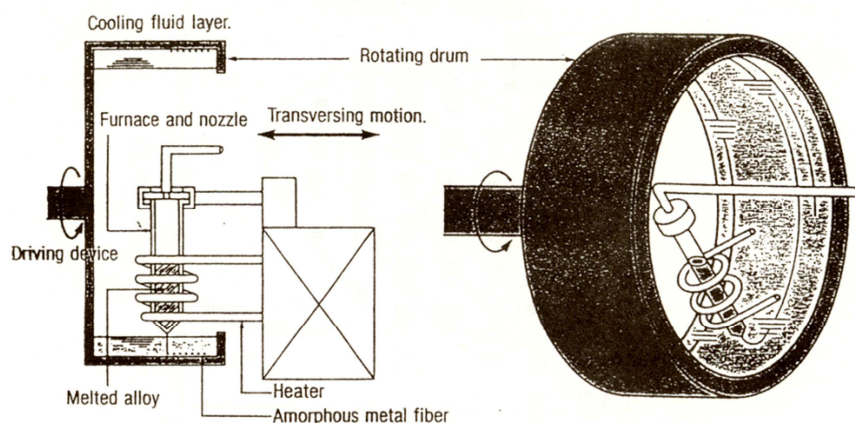


Fig. 1.1. Schema structurală a instalației UNITIKA Ltd.© [6].

În anul 1948, A. Ulitovsky a propus metoda în care metalul se topește cu ajutorul unui inductor de frecvență înaltă. În cazul dat, tubul de sticlă era amplasat vertical și când sub influența câmpului magnetic se topea metalul, la fel se înmuia și tubul de sticlă astfel în cât din el putea fi tras un capilar, care era ”umplut” cu metal/aliaj.

Tehnica Taylor-Ulitovsky este folosită pentru fabricarea microfiredorilor acoperite cu sticlă bazată pe turnarea directă din picătura de aliaj [10-13]. Structura unei astfel de instalații este prezentată în Figura 1.2. Tijă de aliaj cu compoziția respectivă este pusă într-un tub de sticlă pirex și plasat într-un încălzitor inductiv de înaltă frecvență. Aliajul este încălzit până la punctul său de topire, formând o picătură. În timp ce metalul se topește, porțiunea tubului de sticlă adiacentă metalului se înmoaie, învelind/înfășurând picătura de metal. Un capilar de sticlă este apoi extras de operator din porțiunea de jos a tubului și înfășurat pe o bobină ce se rotește. Rotindu-se bobina (receptorului) trage în continuu acest capilar, ce se umple cu metal din

picătură. La fel bobina se deplasează linear de-a lungul său ce permite aranjarea microfirului pe ea uniform cu un pas dorit. Viteza de rotire a bobinei este setată de operator și permite reglarea grosimii a capilarului.

Grosimea de sticlă a capilarului este echilibrată prin alimentarea continuă a tubului de sticlă prin zona inductorului. Avansul tubului se face cu ajutorul unui motor, iar viteza de deplasare la fel poate fi reglată de operator.

Alimentarea cu aliaj depinde de lungimea microfirului dorit. Pentru bobine de microfir cu lungimea de 500...1000 metri alimentarea se face o singură dată la începutul procesului. Pentru aceasta, operatorul introduce tija de aliaj în tubul de sticlă prin partea de jos, astfel încât tija nimereste în câmpul magnetic al inductorului. În scurt timp o parte din tije se topește și în acest timp operatorul lipește această porțiune de tubul de sticlă. De la temperatura înaltă a metalului se înmoaie și tubul sticlă. Manipulând cu această tijă operatorul formează o picătură de metal topit care este închis în sticlă.

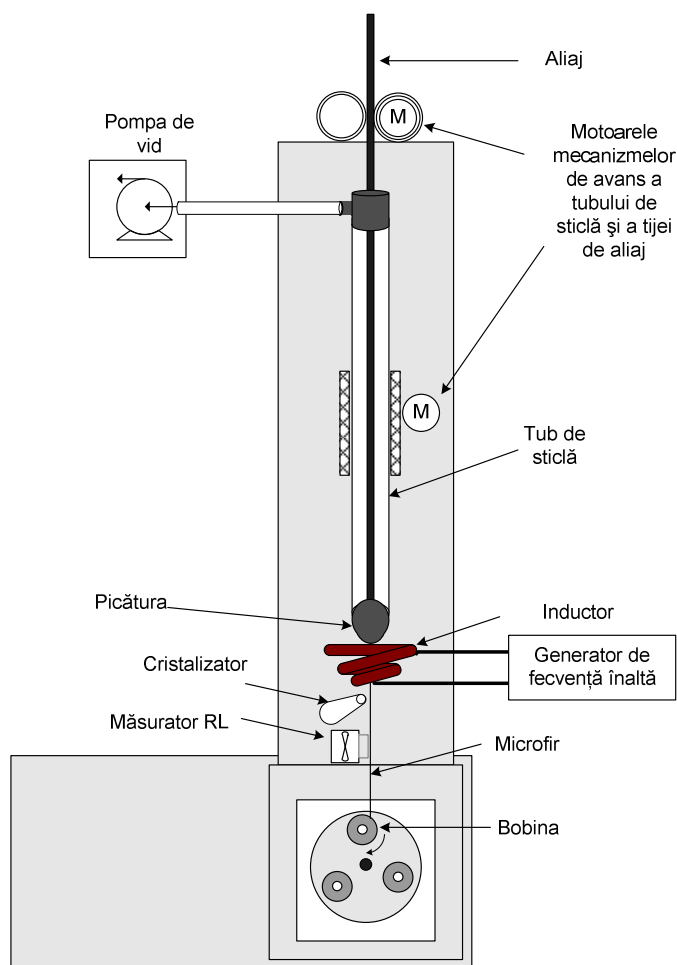


Fig. 1.2. Structura instalației de turnare a microfirului.

În caz că este nevoie de microfibre cu lungimea mai mare (2..10 km) alimentarea cu aliaj trebuie făcută pe durata întregului proces. Inițial picătura este formată de către operator după procedura descrisă mai sus, dar apoi ea este alimentată din partea de sus cu o tijă lungă de aliaj. În timpul procesului această tijă este deplasată foarte lent în jos cu ajutorul unui motor. Odată ce vârful tijeii intră în contact cu partea de sus a picăturii el se topește, și menține constantă dimensiunea picăturii.

Ca picătura să nu cadă din câmpul inductorului în tubul de sticlă se formează vid cu ajutorul unei pompe de aer. Variând presiunea în tub, operatorul poate schimba poziția picăturii pe axa verticală, menținând-o în poziția optimală față de inductor. Presiunea în tubul de sticlă joacă un rol foarte important, deoarece o mică schimbare a vidului duce la modificarea poziției picăturii față de câmpul magnetic și ca rezultat se schimbă temperatura ei.

Înainte de bobinare microfibrul trece printr-un jet de apă sau ulei – *Cristalizator*, care răcește sticla și miezul din metal. Astfel în microfibr se formează stresul rezidual care formează proprietățile magnetice.

Poziția jetului de apă a cristalizatorului, viteza de bobinare, puterea generatorului de câmp magnetic, cât și presiunea aerului în tub formează mecanismul/organele de control a procesului. Operatorul, variând acești parametri poate modifica mersul procesului cu scopul de a obține microfibrele cu diametrul necesar.

Din punct de vedere constructiv instalația de turnare a microfibrele este formată din următoarele blocuri/mecanisme:

- Generator de câmp magnetic pentru topirea aliajului. Acest generator produce un câmp magnetic de frecvență 144 kHz și putere cuprinsă între 3...7 kW.
- Mecanismul de avans a tubului din sticlă care deplasează tubul pe axa verticală. Viteza de deplasare a tubului influențează la grosimea învelișului din sticlă.
- Mecanismul de avans a tijeii de aliaj – se folosește doar în cazul procesului continuu de tragere a microfibrele de lungimi mari, atunci când este nevoie de alimentat în continuu picătura cu aliaj.
- Mecanismul de bobinare – este format din trei bobine motorizate pe care se bobinează microfibrul și mecanismul de deplasare a acestor bobine de-a lungul axei lor, care permite aranjarea uniformă microfibrului pe bobină cu pasul necesar. Mai multe bobine în bloc sunt necesare pentru a putea trece în timpul procesului de pe o bobină la alta fără necesitatea de a opri procesul. Aceasta permite de a lansa procesul folosind o bobină-ciornă, și când procesul se stabilizează de a trece la o altă bobină, pe care deja se va obține microfibrul de calitate necesară.

- Pompa de vid – care formează vid în interiorul tubului de sticlă pentru menținerea picăturii în poziția optimală.

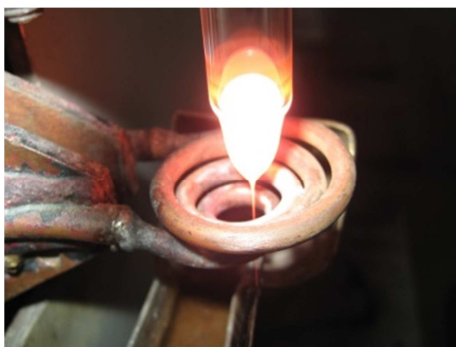


Fig. 1.3. Vedere a procesului real de turnare a microfirului.

Deoarece microfirul este înfășurat în sticlă, metoda este perfectă pentru producerea de microrezistențe și microbobine. În cazul microfirilor magnetice, sticla servește nu doar ca izolator, dar și ca sursă adițională de tensiune mecanică. Grosimea izolației de sticlă, pe lângă compoziția și diametrul miezului, la fel reprezintă unul din principalii parametri ce determină proprietățile microfirului magnetic [12,21].

1.2. Modelul hidrodinamic de aproximare a formei picăturii

Încercările de a elabora diverse modele matematice, inclusiv de a descrie geometria picăturii în procesul de turnare a microfirilor au fost realizate în [2,3, 14-17]. Dar procesul este destul de complicat, asupra formei picăturii influențează o mulțime de factori pe care este imposibil de luat în considerație.

În lucrarea [14] se conține descrierea detaliată a unui model matematic pentru exprimarea într-o formă foarte generală și cu multiple constrângeri a geometriei picăturii, folosind ecuațiile Navier-Stokes. În continuare este prezentat modelul respectiv.

1.2.1. Modelul picăturii pe baza ecuațiilor Navier-Stokes

Picătura de fluid newtonian, suprafața nedeformată a căreia poate fi aproximată cu o sferă de raza r , la un anumit moment de timp $t=t_0$ este supusă forței $\vec{F}(F_x, F_r, F_\theta)$, de forma

$$F_r = F_\theta = 0, F_x = \begin{cases} F_\theta, & \text{pentru } r < \xi_0 \\ 0, & \text{pentru } r > \xi_0 \end{cases} \quad (1.1)$$

În cazul dat $\xi_0 < \rho$, și se utilizează sistemul de coordonate cilindrice

$$x = x, r = \sqrt{z^2 + y^2}, \theta = \arccos \frac{z}{r} \quad (1.2)$$

În punctul $x = \rho + h$ lichidul se întărește (Figura 1.4), astfel încât viscozitatea η poate fi exprimată în funcție de x cu următoarea relație:

$$\eta(x) = \begin{cases} \eta_0 = \text{const} & \text{pentru } x < \rho + h \\ \infty & \text{pentru } x > \rho + h \end{cases} \quad (1.3)$$

Se propune ca scop analiza, cât se poate de aproximată a deformării hidrodinamice a picăturii, în special, partea cea mai interesantă este zona de jos ($0 < x < \rho + h$), unde se formează capilarul.

În calitate punct de pornire alegem ecuația Navier-Stokes pentru cazul staționar

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \nabla \vec{v} = -\frac{1}{\delta} \nabla p + \frac{\eta}{\delta} \Delta \vec{v} + \vec{F} \quad (1.4)$$

unde:

\vec{v} – viteza în punctul (x, y, z, t) sau (x, r, θ, t) ,

δ – densitatea lichidului,

p – presiunea.

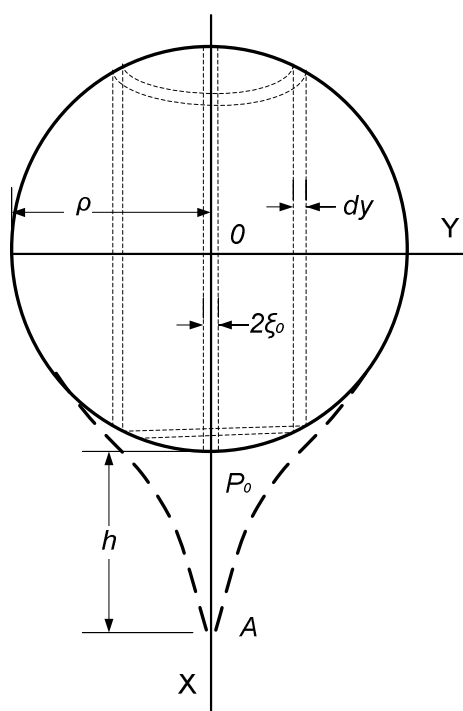


Fig. 1.4. Forma sferică.

Cu supoziția că picătura se afla într-o stare staționară:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = 0 \quad (1.5)$$

și ignorând dependența viscozității de temperatură:

$$\frac{\partial \eta}{\partial T} = 0 \quad (1.6)$$

Se presupune la fel că presiunea este uniformă:

$$\nabla p = 0, \quad (1.7)$$

$$\vec{v} \nabla \vec{v} = 0, \quad (1.8)$$

și se satisface ecuația continuității fluidului:

$$\nabla \vec{v} = 0 \quad (1.9)$$

Simplificările făcute se discută mai jos.

Reprezentând laplasiianul în stemul de coordonate cilindrice (x, r, θ) , se obține pentru componenta v_x ($v_r = v_\theta = 0$):

$$\frac{\eta_0}{\partial} \cdot \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_x}{\partial r} \right) = -F_x(r), \quad (1.10)$$

sau, folosindune de expresia 1.1, se obține:

$$\eta_0 d \left(r \frac{\partial v_x}{\partial r} \right) = \begin{cases} -\delta F_0 r dr & \text{pentru } r < \xi_0 \\ 0 & \text{pentru } r > \xi_0 \end{cases} \quad (1.11)$$

După cum se observă, expresia 1.11 poate fi obținută nemijlocit dacă de selectat un strat cilindric cu lungimea $l = \sqrt{\rho^2 - r^2}$, grosimea dr și analizând balanța forțelor ce influențează asupra lui. Forța de viscozitate ce influențează stratul:

$$df = \eta_0 2\pi l d \left(r \frac{\partial v_x}{\partial r} \right) \quad (1.12)$$

Forța ce „trage stratul”, creată de câmpul \vec{F} , poate fi reprezentată în forma

$$df' = 2\pi l r \delta F_x(r) dr \quad (1.13)$$

În acest caz condiția de staționare a fluidului ne dă relația 1.11 în forma următoare

$$df = -df' \quad (1.14)$$

Această metodă este folosită la obținerea modelului hidrodinamic cu două straturi a picăturii.

Condițiile limită, natural să fie alese sub forma:

$$v_x(r) \Big|_{r=\rho} = 0, \quad \frac{\partial v_x(r)}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0 \quad (1.15)$$

Problema se reduce la integrarea ecuației 2.10 în două regiuni diferite $r < \xi_0$ și $r > \xi_0$ și combinarea soluțiilor la hotarele lor

$$v_x^I(r) \Big|_{r=\xi} = v_x^{II}(r) \Big|_{r=\xi}, \quad \frac{\partial v_x^I}{\partial r} \Big|_{r=\xi} = \frac{\partial v_x^{II}}{\partial r} \Big|_{r=\xi} \quad (1.16)$$

Integrând în prima regiune (I), obținem

$$v_x^I(r) = -\frac{\delta F_0}{4\eta_0} r^2 + C_1^I \ln r + C_2^I \quad (1.17)$$

Limita vitezei pe axa x ($r=0$) ne dă

$$C_1^I = 0 \quad (1.18)$$

Cu alte cuvinte, constanta C_1^I este determinată de cea de a doua condiție limită din 1.15.

Astfel pentru $r < \xi_0$

$$v_x^I(r) = C_1^{II} - \frac{\delta F_0}{4\eta_0} r^2 \quad (1.19)$$

În a doua regiune (II)

$$v_x^{II}(r) = C_1^{II} \ln r + C_2^{II} \quad (1.20)$$

sau, dacă folosim prima condiție limită din (2.15)

$$v_x^{II}(r) = C_1^{II} \ln \frac{r}{\rho} \quad (1.21)$$

În final, combinând ambele soluții, obținem

$$v_x(r) = \begin{cases} v_x^I = -\frac{\delta F_0}{4\eta_0} r^2 \left[(r^2 - \xi_0^2) - 2\xi_0^2 \ln \frac{r}{\xi_0} \right] \\ v_x^{II} = -\frac{\delta F_0}{2\eta_0} \xi_0^2 \ln \frac{r}{\rho} \end{cases} \quad (1.22)$$

Ecuația curbelor sferice în forma generală poate fi reprezentată

$$\rho^2 = r^2 + \{x - \Omega(r, \tau)\}^2 \quad (1.23)$$

Unde $\Omega(r, \tau)$ – creșterea obținută în punctul (x, r, θ) , pe durata întregului timp de deformare τ sau timpul de formare a formei capilarului:

$$\Omega(r, \tau) = \int_0^\tau v_x(r, t) dt = v_x(r) (\tau - \tau') + \int_{\tau'}^{\tau} v_x(r, t) dt \quad (1.24)$$

În relația (2.24) τ' - timpul de relaxare hidrodinamică, iar $v_x(r)$ se determină prin relația 1.22.

Dacă să presupunem că timpul de stabilire a modului staționar este legat de τ prin următoarea expresie

$$\tau' \ll \tau \quad (1.25)$$

atunci

$$v_x(r)(\tau - \tau') \sim v_x(r)\tau \gg \int_0^{\tau'} v_x(r, t) dt \quad (1.26)$$

și τ poate fi definit prin relația

$$\tau = \frac{h}{v_x^*(0)} \quad (1.27)$$

În acest caz relația 1.23 în domeniul $r > \xi_0$ va avea forma următoare:

$$\rho^2 = r^2 + \left| x - \frac{2h}{(1+2 \ln \rho/\xi)} \ln \frac{r}{\rho} \right|^2 \quad (1.28)$$

În Figura 1.5 sunt prezentate curbele teoretice construite folosind relația 1.28 în spațiul $z = 0$ ($z = |y|$) și în spațiul $x > 0$ pentru trei cazuri:

- $\rho: h: \xi_0 = 1: 2: 0,01;$
- $\rho: h: \xi_0 = 1: 1: 0,01;$
- $\rho: h: \xi_0 = 1: 0,5: 0,01;$

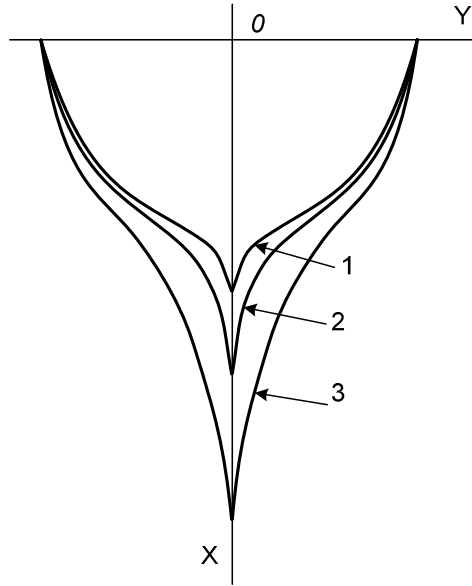


Fig. 1.5. Curbele sferice obținute.

1.2.2. Modelul cu două straturi

În cazul tragerii microfiredelor din picătura de aliaj fără alimentare prin tijă, dacă deconectăm câmpul $\vec{F} = 0$, configurația picăturii poate fi aproximată prin 0-forma parabolocilindrică cu două straturi (Figura 1.6). În acest caz, picătura se reprezintă ca un nucleu suspendat în câmpul magnetic al inductorului, într-o cochilie de sticlă topită. Dacă neglijăm neomogenitatea câmpului magnetic în tot spațiul unde este prezentă faza metalică, atunci ambele straturi se vor deosebi doar prin viscozitate (η, η') și densitate (δ, δ').

S-a presupus că cristalizarea metalului și vitrificarea se produce într-un punct $x = b + h$. Alegem aproximarea zero, analogic cazului cu un singur strat. Atunci, observând că ecuațiile paraboloidelor, ce descriu 0-forma, pot fi reprezentați în felul următor:

$$x = -\frac{b}{\rho^2}r^2 + b, \quad x = -\frac{b'}{\rho'^2}r^2 + b' \quad (1.29)$$

și dacă aplicăm ecuația echilibrului puterii 1.14, obținem

$$\begin{aligned} & 2\pi \left\{ -\eta \left(\frac{b}{\rho^2} - \frac{b'}{\rho'^2} \right) r^2 + \eta(b - b') - \eta' \frac{b'}{\rho'^2} r^2 + \eta' b' + \eta' c' + \eta(c - c') \right\} d \left(r \frac{\partial v_x}{\partial r} \right) \\ & = 2\pi \left\{ -\delta \left(\frac{b}{\rho^2} - \frac{b'}{\rho'^2} \right) r^2 + \delta(b - b') - \delta' \frac{b'}{\rho'^2} r^2 + \delta' b' + \delta' c' + \delta(c - c') \right\} r F_x dr \quad (1.30) \end{aligned}$$

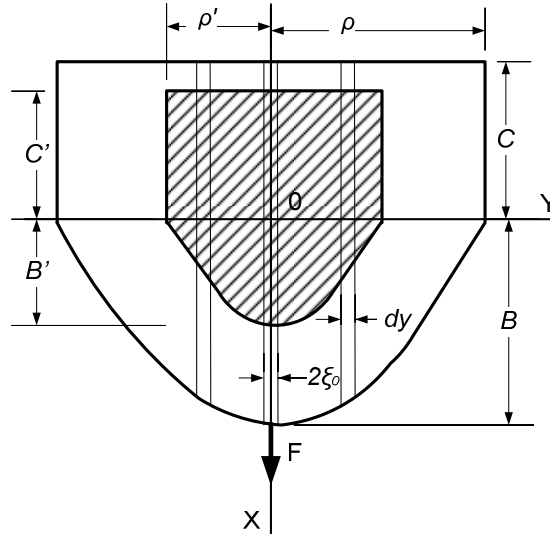


Fig. 1.6. Forma „0” bifazică paraboloid-cilindrică.

Grupând membrii și folosind relația 1.1, putem scrie în forma următoarea relație:

$$(\psi r^2 + \varphi) d\left(r \frac{\partial v_x}{\partial r}\right) = \begin{cases} -(\psi' r^2 + \varphi') r F_0 dr, & (I) \\ 0, & (II) \end{cases} \quad (1.31)$$

unde

$$\psi = -\left\{ \left(\frac{b'}{\rho'^2} (\eta' - \eta) + \eta \frac{b}{\rho^2} \right) \right\}, \quad \varphi = (\eta' - \eta)(c' + b') + \eta(b + c),$$

$$\psi' = \psi \left(\frac{\eta \rightarrow \delta}{\eta' \rightarrow \delta'} \right), \quad \varphi' = \varphi \left(\frac{\eta \rightarrow \delta}{\eta' \rightarrow \delta'} \right) \quad (1.32)$$

În regiunea (II) are loc 1.21. Integrarea în regiunea (I) în condiții limită, relația 1.15 aduce la

$$v_x^I(r) = C_2^I - \frac{F_0 \psi'}{4\psi} r^2 - \frac{F_0(\varphi' \psi - \varphi)}{2\psi^2} \Phi(r), \quad (1.33)$$

unde $\Phi(r)$ - integral care nu se exprimă prin combinație finită de funcții elementare

$$\Phi(r) = \int \frac{\ln(\psi r^2 + \varphi)}{r} dr \quad (1.34)$$

Combinând ambele soluții, obținem:

$$v_x(r) = \begin{cases} v_x^I = -\frac{F_0 \psi'}{4\psi} \left(\xi_0^2 - 2\xi_0^2 \ln \frac{\xi}{\rho} - r^2 \right) + \frac{F_0(\varphi' \psi - \varphi)}{2\psi^2} \Phi(\xi_0) - \Phi(r) - \ln(\psi \xi_0^2 - \varphi), & (I) \\ v_x^{II} = \left[\frac{F_0 \psi'}{2\psi} \xi_0^2 + \frac{F_0(\varphi' \psi - \varphi)}{2\psi^2} \ln(\psi \xi_0^2 - \varphi) \right] \ln \frac{\rho}{r} & (II) \end{cases} \quad (1.34)$$

Geometria curbei paraboloid cu o aproximare în 1.25 pentru regiunea $r > \xi_0$ poate fi exprimată prin ecuația 1.35, în care τ este definit prin relația 1.27:

$$x - \tau v_x^{\parallel}(r) = -\frac{b}{\rho_2} r^2 + b \quad (1.35)$$

1.2.3. Criteriile de aplicabilitate a modelului

Trebuie de menționat că modelul picăturii analizat este simplificat, și se justifica doar prin lipsa altora. Aplicarea acestui model a fost foarte limitată și necesita respectarea unor inegalități.

a) Cu toate că examinarea soluției staționare reprezintă interes propriu, construirea în baza ei a geometriei suprafeței picăturii este admisibilă doar cu aproximarea 1.25, adică când

$$\frac{\tau'}{\tau} \ll 1 \quad (1.36)$$

b) neglijarea a membrului $\frac{1}{\delta} \nabla \rho$ în ecuația Navier-Stokes este justificată doar cu condiția că gradientii a presiunii capilare, ce apar de la deformarea picăturii, sunt mult mai mici ca câmpul forțelor de masă:

$$\frac{1}{\delta} \nabla |\alpha_{01} \left(\frac{1}{R_a(x,r,\theta)} + \frac{1}{R_b(x,r,\theta)} \right)| \ll F_0 \quad (1.37)$$

unde α_{01} - coeficientul de tensiune superficială la hotarele lichidului analizat și aer,

R_a și R_b – principalele raze de curbură în punctul (x, r, θ) .

Observând că

$$\nabla \left[\alpha_{01} \left(\frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_b} \right) \right] \sim \frac{\alpha_{01}}{\rho^2} \quad (1.38)$$

obținem criteriul

$$\frac{\alpha_1}{\delta \rho^2 F_0} \ll 1 \quad (1.39)$$

care în cazul cu două straturi trebuie completat cu criteriul următor:

$$\frac{\alpha_{12}}{\delta' \rho'^2 F_0} \ll 1 \quad (1.40)$$

În care α_{12} - coeficientul de tensiune superficială la hotarul între straturi.

c) Problema se rezolvă ca lineară în caz când

$$\vec{v} \nabla \vec{v} \ll \frac{\eta}{\delta} \Delta \vec{v} \quad (1.41)$$

Deoarece

$$\vec{v} \nabla \vec{v} \sim \frac{|\vec{v}|^2}{\rho} \quad (1.42)$$

și

$$\frac{\eta}{\delta} \Delta \vec{v} \sim \frac{\eta |\vec{v}|}{\delta \rho^2} \quad (1.43)$$

atunci relația 1.41 înseamnă că

$$\frac{|\vec{v}|^2}{\rho} \ll \frac{\eta |\vec{v}|}{\delta \rho^2}, \text{ adică } Re = \frac{\delta \rho |\vec{v}|}{\eta} \ll 1. \quad (1.44)$$

Astfel ignorarea membrilor neliniari este acceptabil doar pentru în cazul când valoarea Reynolds este foarte mică, adică la analiza deformărilor lente, pentru picături destul de mici de lichide foarte vâscoase și suficient de ușoare.

d) Rezolvarea cu condiția 2.6 pentru majoritatea lichidelor, inclusiv pentru sticlă, care are o structură moleculară înlănțuită cu legături slabe și ca rezultat funcția puternică viscozitate de temperatură, poate fi analizată doar ca o aproximare brută.

e) Ignorarea cu efectului magnetohidrodinamic, este motivat dor în cazul când, regiunea, în care are loc scurgerea mediului conductor, se află într-un câmp magnetic uniform, în special

$$g - \frac{1}{c\delta r} [\vec{J} \cdot \vec{B}]_x \ll F_0 \text{ sau } \frac{g - \frac{1}{c\delta r} [\vec{J} \cdot \vec{B}]_x}{F_0} \ll 1, \quad (1.45)$$

unde g - accelerația gravitațională,

\vec{J} - vectorul de densitate a curentului,

\vec{B} - inducția magnetică,

c - viteza luminii,

$[\dots]_x$ - x -componenta a produsului vectorial.

e) În cazul când

$$\frac{\xi_0}{\rho} \ll 1 \quad (1.46)$$

și având răcire forțată, care de regulă se utilizează la turnarea microfiredor, presupunerea că ambele straturi se întăresc într-un punct, este aparent o idealizare.

1.3. Determinarea parametrilor microfiredelor în procesul de fabricare

Pentru caracterizarea microfiredelor în procesul de fabricare și postfabricare este nevoie de metode și mijloace speciale [18-24]. În dependență de tipul microfiredelor și domeniul de aplicare se măsoară următoarele valori:

- Rezistența lineară - Rl
- Forța Coercitivă - Hc
- Diametrul miezului - D_w , diametrul sticlei - D_g .

Rezistența lineară se măsoară prin metoda noncontact în timpul turnării acestuia [18-20]. Pentru anumite aliaje neferomagnetice rezistența este proporțională cu diametrul miezului. Aceasta permite controlul diametrului microfiredului în timpul procesului de fabricare prin măsurarea și control a rezistenței lineare. Problema măsurării rezistenței constă în faptul că această măsurare se poate face cu o eroare acceptabilă doar pentru microfiredele cu diametrul miezului relativ mic – 5.. 50 μm și pentru anumite aliaje cu caracter rezistiv. Pentru microfiredele cu diametrul mai mare această metodă de caracterizare devine inaplicabilă.

Forța coercitivă este un parametru de bază ce caracterizează microfiredele magnetice. Acest parametru este influențat inclusiv de grosimea învelișului de sticlă. Odată cu apariția noilor aplicații (sisteme de identificare și protecție, materiale de absorbție a undelor RF, microsenzori, etc.) necesitatea în astfel de microfiredele se află într-o continuă creștere. Totodată apare necesitatea de a produce noi tipuri de microfiredele cu caracteristici și comportament specific. Pentru măsurarea forței coercitive este necesar de elaborat aparataj special.

Măsurarea forței coercitive direct pe instalație este complicată de mai mulți factori. În primul rând zgomotul electromagnetic produs de generatorul inductiv de putere, care topește aliajul, influențează mult senzorii de măsurare. În al doilea rând pentru a măsura forța coercitivă este nevoie ca microfiredul să treacă printr-o bobină de excitație și bobină senzor. Trecerea microfiredului prin interiorul bobinei clasice tehnologic este imposibil, luând în considerație specificul începerii unui proces de turnare. O alternativă poate fi utilizarea unui senzor cu construcție specială, la baza cărui stă o bobină cu nucleul deschis. Lucrările în direcția aceasta continuă.

O altă problemă care nu permite măsurarea forței coercitive în timpul procesului de turnare este faptul că în timpul tragerii microfiredului se află sub stres, iar aceasta influențează mult rezultatele măsurării.

1.4. Platforme arhitecturale pentru aplicare în sisteme de producție industrială

În prezent pentru sisteme de control se utilizează mai multe platforme arhitecturale care se deosebesc din punct de vedere al eficienței (puterea de calcul/consum de energie), flexibilității și complexității de proiectare/programare [25-29]. Printre aceste platforme pot fi menționate:

- Circuite specializate (ASIC – Application Specific Integrated Circuits);
- Microcontrolere;
- Procesoare de prelucrare a semnalelor (DSP – Digital Signal Processor);
- Circuitele logice reconfigurabile (CPLD – Complex Programmable Logic Device, FPGA – Field Programmable Gate Array);
- Procesoare dedicate (SoC – System on Chip).

Circuitele specializate sunt foarte rapide, eficiente pentru o anumită aplicație, dar au o flexibilitate mică și nu pot fi adaptate la alte aplicații. Deoarece costurile de proiectare/lansare a unui microcircuit sunt mari utilizarea ASIC-uri devine eficientă doar atunci când merge vorba de producere la scară largă. Pentru serii mici costurile unui circuit specializat pot fi foarte mari, de aceea utilizarea lor se limitează doar la aplicații speciale – aerospațiale, militare, de cercetare.

Microcontrolerele moderne oferă o performanță sporită la un preț mic. Datorită numărului mare de producători, concurenței, prețurile astfel de sisteme se află într-o continuă scădere. Pe piața modernă există o gamă largă de familii de microcontrolere, începând cu cipuri de 8biti, cu o arhitectură relativ simplă, și terminând cu microcontrolere de 32 biți. De regulă, microcontrolere de 8 biți sunt încapsulate în microcircuite de 8..64 pini, se caracterizează printr-un consum mic de energie și dispun de medii de dezvoltare (IDE compilatoare, simulatoare, programatoare) oferite gratis. Aceasta le face foarte accesibile și permite dezvoltarea unor sisteme cu costuri mici – care este determinat de costurile de proiectare a cablajului imprimat, costul mijloacelor de proiectare/dezvoltare și costul microcontrolerului.

Primele poziții pe piața de microcontrolere de 32 biți îi aparține microcircuitelor cu nucleul ARM (Advanced RISC Machine). În aplicații de control se utilizează nucleul ARM Cortex M [30, 31]. Acesta este reprezentat de nucleele relativ simple cum sunt Cortex M0, Cortex M1, ce pot fi implementate inclusiv pe FPGA, și terminând cu Cortex M4, Cortex M7, care dispun de un UAL pentru operații în virgulă mobilă.

O soluție interesantă pentru aplicații de control în timp real reprezintă combinarea într-un singur chip a nucleului DSP și ARM Cortex M3, realizată în familia de microcontrolere F28M3x, de Texas Instruments. Aceste microcontrolere includ două componente - de *control* și *host*. Componenta de *control* este formată dintr-un nucleu de procesare a semnalelor C28x™ cu frecvența de operare până la 150 MHz, blocuri de memorie locală și module periferice rapide (ADC-uri, Temporizatoare/contoare, interfețe de comunicare). Sarcina acestui nucleu

implementarea algoritmilor de procesare/control ce necesită calcule intensive. A doua componentă, gazdă, este realizată pe un nucleu ARM Cortex M3™, ce poate opera la o frecvență de ceas de 100 MHz. Acest nucleu la fel dispune de memorie locală, module periferice și de comunicare. Sarcina acestui nucleu – operații de nivel înalt, comunicarea cu sistemele externe, implementarea sistemului de operare, etc. Pe lângă memoria și modulele periferice locale ambele nucleele au acces la o memorie și periferice partajate. Aceasta oferă posibilitatea de a realiza schimbul de date eficient între ambele nuclee. Este evident că îmbinarea într-un singur chip a nucleului DSP și ARM CortexM3 oferă caracteristici net superioare (viteza de comunicare între nuclee, viteza de procesare, preț, spațiu ocupat, consum de energie) față de realizarea unui asemenea sistem pe două microcircuite separate.

Circuitele logice programabile - CPLD/FPGA oferă o performanță superioară în proiectarea sistemelor dedicate, care necesită procesarea paralelă. Ele combină avantajele de performanță a logicii cablate, și flexibilitatea sistemelor programabile [32]. Pentru aplicații specializate, cu un număr relativ mic de produse, astfel circuite sunt extrem de importante, deoarece producerea circuitelor specializate ASIC necesită investiții mari, și din punct de vedere economic, este convenabil doar pentru producerea la scară largă.

Din punctul de vedere al tipului conexiunilor programabile, există două categorii principale de circuite FPGA: circuite cu memorii SRAM și circuite cu antifuzibile.

Logica în circuite FPGA este implementată cu ajutorul unor "tabele de adevăr" (lookup table) realizate din celulele de memorie statică. Intrările funcțiilor controlează liniile de adresă a acestor tabele. Fiecare tabelă de 2^n celule de memorie poate implementa orice funcție cu n intrări. Tabele combinate cu bistabile, formează blocuri logice configurabile. Aceste Blocuri logice sunt interconectate între ele și cu pinii de intrare/ieșire. Programarea circuitelor cu memorii SRAM se realizează prin înscrierea configurației în celule de memorie statică. Logica din circuit poate fi încărcată serial prin intermediul interfeței JTAG, sau circuitul o citește serial dintr-o memorie, de fiecare dată când circuitul este alimentat. Biți cuvântului de configurare setează valorile tuturor celulelor memoriei de configurare din circuit, setând astfel valorile tabelor și selectând segmentele care se vor conecta între ele. Circuitele cu memorii SRAM sunt reprogramabile, ce permite realizarea sistemelor extrem de flexibile. Ele pot fi actualizate în sistem, oferind posibilitatea de a dezvolta algoritmi elaborați, înlătura erorile, etc. Din această categorie de circuite FPGA fac parte cele ale firmelor Altera, Xilinx, Atmel, AT&T.

Circuite cu antifuzibile pot fi programate doar o singură dată. În schimb, antifuzibilile au dimensiuni reduse, astfel încât o arhitectură bazată pe antifuzibile poate conține milioane de antifuzibile. Un alt avantaj a acestor circuite - nivelul înalt de securizare, care împiedică

clonarea logicii implementate. Din categoria circuitelor FPGA cu antifuzibile fac parte circuitele firmelor Actel, Quicklogic, Cypress.

În afară de circuitele logice cu memorii SRAM și circuite cu antifuzibile se folosesc CPLD/FPGA care păstrează configurația în memorie EEPROM. Aceste circuite sunt nonvolatile, la fel ca FPGA cu antifuzibile și, totodată, ele pot fi reconfigurate, încărcând un nou cuvânt de configurare în memoria EEPROM.

Dezvoltarea industriei de dispozitive mobile a contribuit mult la dezvoltarea așa numitor SoC (System on Chip). Aceste sisteme conțin practic tot ce este necesar pentru construirea unor sisteme de calcul performante: procesoare cu unu sau mai multe nuclee, interfața cu memoria externă (DDR2/3 SDRAM) coprocesoare grafice, interfețe grafice RGB24b, HDMI, etc. Datorită interfețelor de comunicare (USART, CAN, USB, CAN, Ethernet) încorporate în astfel de chipuri. Ele au format o nouă clasă de sisteme de calcul – numită *Single Board Computer (SBC)* [33, 34].

Utilizarea acestor platforme permite extinderea spectaculoasă a funcționalității sistemelor tradiționale nu doar în domeniul de consum (cupatoare, frigider cu acces la internet, etc.), dar și în domeniul industrial – controlere inteligente cu GUI (Graphical User Interface), roboți industriali, etc.

1.5. Formularea problemei și a direcției de cercetare

La începutul anilor '50 domeniul de aplicare a microfiredor era limitat la construirea rezistențelor de precizie înaltă și a fuzibilelor. Pentru producerea unor astfel de microfired se utilizau aliaje cu caracteristici rezistive. Controlul procesului de producere impunea măsurarea rezistenței liniare a microfiredor în timpul fabricării – pentru a controla procesul propriu-zis, și după fabricare – pentru controlul calității.

O etapă nouă în industria microfiredor a început odată cu producerea microfiredor cu caracteristici magnetice. Astfel de microfired au deschis calea spre o nișă largă de aplicații și acest domeniu este într-o dezvoltare continuă. În special este vorba de microfired cu proprietăți GMI (Giant Magneto-Impedance). Aceste microfired se utilizează la producerea materialelor care absorb unde radio - (materiale anti radar, materiale de construcție radioizolante etc.). Altă nișă foarte importantă de aplicare este reprezentată de sisteme de identificare pe bază de microfired. Pentru asemenea aplicații se presupune producerea microfiredor cu anumite caracteristici unice și utilizarea lor la marcarea produselor medicale, documentelor de valoare, etc.

Problematika domeniului cercetat în teză poate fi divizată în două categorii:

- fabricarea și controlul calității microfiredor magnetice;
- dezvoltarea de aplicații noi în bază de microfired magnetice.

Ambele aspecte sunt extrem de importante, pe lângă aceasta fiind și strâns interconectate. În acest sens trebuie abordate tehnologiile inovative bazate pe inteligența artificială [35-41], care sunt cruciale pentru a asigura completivitatea unei economii. În mare parte procesele industriale moderne sunt automatizate. În cazul procesului cercetat resursa umană este indispensabilă datorită complexității tehnologiei. Elaborarea și implementarea tehnicilor avansate care să contribuie la optimizarea sistemelor de producție cu resursa umană în bucla de reacție este o problemă majoră. În contextul lucrării de față, dezvoltarea producerii impune soluționarea unui șir de probleme ce ar permite tragerea microfiredelor de lungime mare cu caracteristici strict prescrise și stabile. Automatizarea la maxim a procesului de fabricare folosind mijloacele tehnice noi ar permite diminuarea factorului uman, care la momentul actual prevalează. Folosind tehnici noi de procesare a datelor, inclusiv datelor video (computer vision) se pot obține soluții noi pentru comandă și control a procesului de fabricare a microfiredelor, atunci când tehnicile clasice nu pot face față.

Având în vedere rolul și ponderea în creștere a sistemelor încorporate inteligente pentru aplicații industriale este importantă rezolvarea problemelor specifice de cercetare-dezvoltare și implementare a unor soluții avansate pentru modelarea procesului tehnologic de turnare a microfiredului prin metoda Ulitovsky-Taylor, caracterizarea și controlul parametrilor microfiredului atât în faza de producere, cât și la etapa de control a calității produsului finit. Iar pentru a crește piața de desfacere, este necesară elaborarea de noi sisteme/dispozitive încorporate pentru cercetarea și dezvoltarea de noi aplicații pe baza microfiredelor cu înveliș din sticlă.

Se știe că optimizarea unui sistem de producție ține de operații specifice, agenți umani, mașini/echipamente și obiective țintă sub forma indicatorilor de performanță. Obiectivul lucrării de față constă în asigurarea unui suport decizional pentru îmbunătățirea indicatorilor de performanță, în condițiile unor schimbări operative (sau complexe) în procesul de producere și aplicare a microfiredelor. În sens larg, se impune cercetarea și dezvoltarea unor noi modele, metode și platforme tehnologice pentru sisteme de suport decizional, astfel încât factorii de decizie să poată găsi soluția optimă.

În general, organizarea eficientă a sistemului de producție industrială a microfiredelor cu înveliș din sticlă ține de atribuirea unor valori temporale resurselor participante la un proces, atunci când este necesar să fie îndeplinite mai multe constrângeri. O varietate vastă de activități din domeniile aplicative se confruntă cu probleme de planificare, ca exemplu în: fabricarea produselor industriale, activitățile echipelor de muncitori, proiectări în diferite domenii, activități în construcții etc. În majoritatea domeniilor, cea mai importantă problemă ține de planificarea obiectivelor temporale.

Crearea unui plan anticipat, pentru o anumită perioadă de timp, ține de planificare predictivă. Când este necesar să se schimbe planificarea din cauza evenimentelor apărute în momentul executării procesului de producție, apare noțiunea unui nou tip de planificare, numită planificare reactivă. Evenimente curente de care trebuie să se țină cont, ar putea fi defecțiuni de aparataj, necesitatea unor intervale de întreținere, sau apariția unor evenimente la nivelul logic, cum ar fi oferte noi sau oferte anulate. Planificarea reactivă presupune adaptarea programului de activități la situațiile noi apărute, folosind acțiuni adecvate pentru realizarea fiecărui eveniment.

Dacă se cercetează atent procesul de organizare-planificare dintr-o companie se observă că el este încorporat în structurile decizionale. Cu alte cuvinte, permanent există persoane care trebuie să decidă, să interacționeze sau să realizeze un control în cadrul proceselor. Astfel, în organizarea eficientă a sistemului de producție apare o dimensiune importantă - planificarea interactivă care combină planificarea predictivă și reactivă cu cerințele utilizatorului. Un sistem de organizare-planificare menține coerența părților informaționale ale procesului de producție și este folosit ca instrument de suport decizional.

Scenariile reale de planificare a unui proces tehnologic sunt determinate de condițiile și cerințele impuse operațiilor și utilajului atașat acestui proces, ca exemplu:

- cerințele de producere, aparataj alternativ, etc.
- caracterul dinamic și incert al mediului de producție, de exemplu defecțiunea de aparataj, etc.
- obiectivele organizaționale incompatibile, de exemplu minimizarea timpului de lucru, maximizarea resurselor utilizate, etc.
- necesitatea de a interacționa cu factorul uman.

În procesul de fabricație a microfiredelor pot interveni probleme specifice, cu caracter tehnologic, uman sau organizațional [2, 4, 8, 9, 42, 43].

Principala problemă tehnologică este de a menține pe parcursul procesului parametrii principali la valorile optime, cu scopul de a produce microfir cu un diametru stabil, inclusiv grosimea prestabilită a izolației de sticlă. Unii factori importanți, cum ar fi vibrațiile microfiredului la etapa de turnare, defecte de calitate a compoziției de sticlă și compoziției de aliaj, pot perturba în mod semnificativ procesul de turnare. Defectarea unei instalații de turnare, într-o anumită măsură afectează sistemul de producție, provocând un nou ciclu de turnare și de testare a calității, implicând pierderi de timp în producere.

Asigurarea calității este o operație foarte complexă, în special pentru anumite tipuri de microfired. Operația de testare este responsabilă de respectarea cerințelor impuse de beneficiar pentru fiecare bobină de microfir. Când microfiredul nu îndeplinește cerințele de calitate, intervin pierderi neprogramate de resurse. O rezolvare brută a acestei probleme este de a multiplica numărul instalațiilor de turnare cât și a echipamentelor de măsurare, pentru a permite sistemului

de producție să utilizeze două sau mai multe fluxuri de fabricație a microfirului. În ciuda unor neajunsuri esențiale, această strategie poate îmbunătăți performanțele sistemului.

Într-un sistem real de producție, o reconfigurare a resurselor devine necesară de fiecare dată când are loc o modificare substanțială în planul de producere. Într-o reconfigurare fiecare stație de lucru poate fi recunoscută sub formă de resursă alocată și sub formă de o locație în spațiul rezervat liniei de producere. Este foarte important, că nu numai echipamentul, dar și operatorii implicați în producție sunt atribuiți unei anumite stații. Ei sunt instruiți special pentru a efectua un volum de lucru specific, astfel încât o schimbare în plasamentul lor, ar putea fi asociată cu costuri de instruire. Prin urmare, este de dorit să se mențină linia reconfigurată cât mai aproape posibil de cea anterioară. Acest aspect trebuie luat în considerare de către sistemul de suport decizional.

Modelul simplificat al liniei de producție a microfiredelor conține cinci etape interconectate (Figura 1.7). Prima etapă efectuează operația de încărcare a instalației de turnare a microfirului cu tub de sticlă, tija de aliaj și una, două sau trei bobine goale. Etapa a doua ține de procesul de turnare. A treia etapă reprezintă punctul de control al calității. Firul testat este procesat conform programului de producție. În sfârșit, loturile de produse finale pe bază de microfir sunt depozitate.

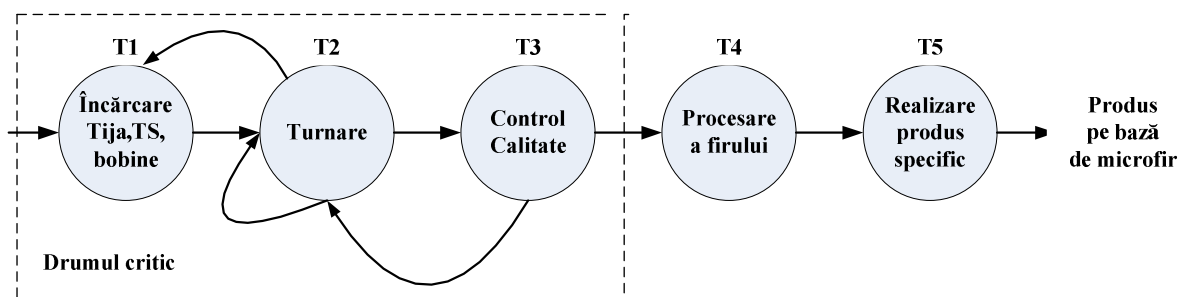


Fig. 1.7. Modelul simplificat al unei linii de producție a microfiredelor.

Acest model este pe deplin realistic. După cum se poate observa din figură, în linie există o cale critică. Această cale include etapa de încărcare, etapa de turnare, precum și etapa de control a calității. O altă observație importantă ține de feedbackul prezent în calea critică a liniei. Astfel problema de echilibrare și programare a unor astfel de linii devine foarte complexă.

1.6. Concluzii la capitolul 1

Au fost analizate tehnicile și tehnologiile de turnare a microfiredelor și aplicabilitatea acestora la scară industrială. A fost evidențiată importanța tehnologiei de turnare a microfiredelor

prin metoda Taylor-Ulitovsky și au fost determinate aspectele cu impact major asupra eficienței sistemelor de producție a microfiredor cu înveliș din sticlă și a calității acestora. În contextul procesului tehnologic respectiv a fost analizat modelul picăturii pe baza ecuațiilor Navier-Stokes și aspectele de aplicabilitate a acestuia. S-a constatat irelevanța practică a acestui model.

Au fost analizate posibilitățile și limitele dispozitivelor/sistemelor de măsurare și control în producerea microfiredor, în special a celor magnetice. Au fost analizate tehnologiile și mijloacele disponibile pentru elaborarea și dezvoltarea soluțiilor încorporate în sisteme de producție industrială cu scopul realizării unor abordări inovative în producerea microfiredor.

Analiza efectuată în domeniul studiat a permis de a formula problema și direcția de cercetare în vederea îmbunătățirii indicatorilor de performanță a sistemului de producție industrială și creșterea calității microfiredor.

2. MODELE ȘI ALGORITMI PENTRU SISTEME INTELIGENTE DE CONTROL ȘI SUPORT DECIZIONAL ÎN PRODUCEREA MICROFIRELOR

2.1. Procesul de luare a deciziilor în turnarea microfiredor

Luarea deciziilor reprezintă una dintre principalele probleme în contextul funcționării optime a liniei de producție a microfiredor. În procesul de turnare operatorii (agenții) umani joacă rolul factorilor de decizie. Procesul de luare a deciziilor în turnarea microfiredor înseamnă a face alegeri adesea bazate pe informații incomplete.

Structura unui sistem de suport decizional inteligent (SSDI) cu aplicare într-un sistem de producție industrial a microfiredor trebuie să conțină cel puțin următoarele elemente (Figura 2.1):

- Model picătură.
- Model viteze.
- Model costuri.
- Model calitate.
- Senzor imagine picătură.
- Echipamente de măsurare.
- Factor(i) de decizie.

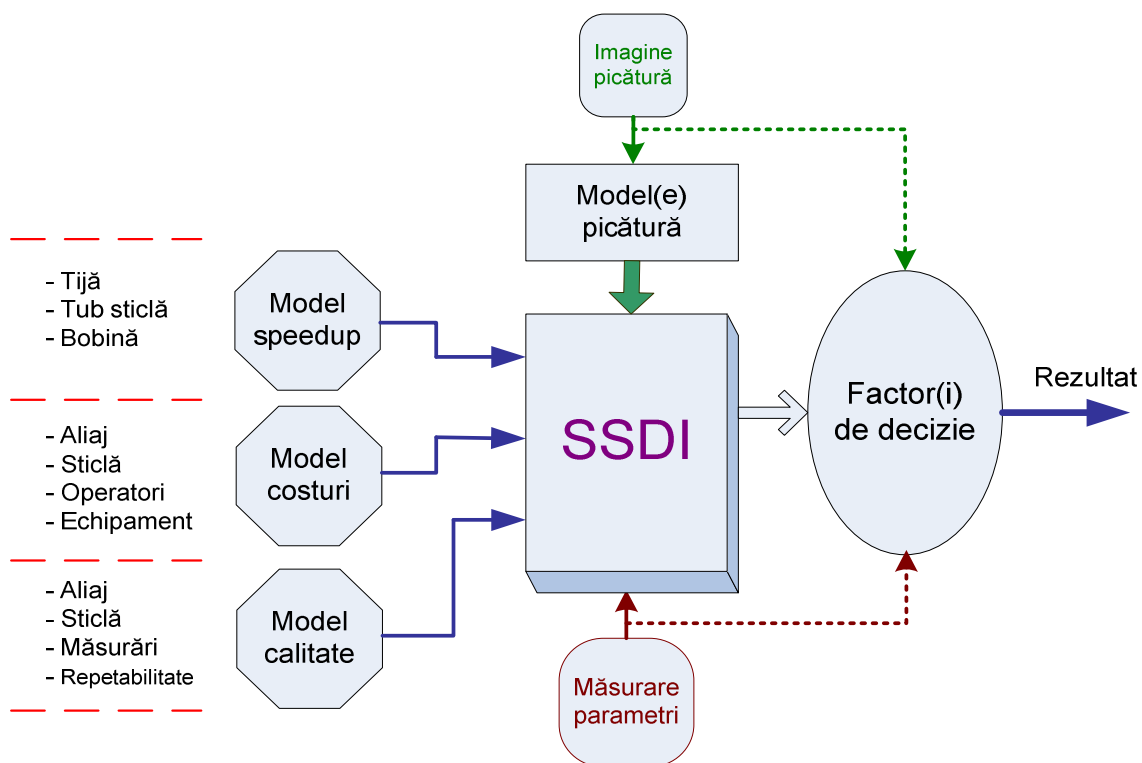


Fig. 2.1. Structura de luare a deciziilor în producerea microfiredorului.

Procesul de luare a deciziilor [44] ne obligă să analizăm o decizie în funcție de calitate, costuri și viteza de tragere a firului. Modelul de calitate trebuie să țină cont de calitatea aliajului și a tubului de sticlă, de calitatea senzorilor online și de alte echipamente de măsurare. În plus, un coeficient de repetabilitate a rezultatelor măsurărilor trebuie introdus în modelul de calitate. Costurile trebuie să includă aliajul, tubul de sticlă, echipamentul de măsurare și costurile umane. Modelul de viteze reflectă posibila accelerare a producției de microfibre. Se face referire la un set de valori pentru tijă, tubul de sticlă și viteza bobinei [42].

Este evident că calitatea produsului final, costurile de producție și creșterea volumului reprezintă criterii de evaluare în producția de microfibre. Pe de altă parte, toți acești factori sunt interconectați. După cum a fost menționat mai sus, operatorul uman joacă rolul de factor de decizie. Prin urmare, obiectivul operatorului este să evalueze în timp real calitatea firelor (parametrii săi, cum ar fi, de exemplu, diametrul) și să urmeze o acțiune pentru a satisface cerințele impuse.

Este necesar să spunem că un operator de înaltă calificare poate lua decizii bune asupra procesului de turnare numai prin utilizarea informațiilor capturate de ochi. Informația se referă la culoarea, poziția și forma picăturii. Prin urmare, tehnicile machine vision [35,36] ar trebui să fie potrivite pentru procesul cercetat. Tehnicile machine vision sunt utilizate cu succes în aplicații industriale. Această abordare a devenit o componentă vitală în proiectarea sistemelor avansate deoarece oferă un mijloc de menținere a controlului calității în timpul fabricării. Din acest motiv, structura din Figura 2.1 conține un senzor de imagine a picăturii. Ultimul este conectat ca intrare la modelul picăturii, ceea ce reprezintă unul dintre cele mai importante elemente ale structurii de luare a deciziilor. Un astfel de model trebuie să joace un rol major în proiectarea sistemului decizional pentru construirea unui sistem inteligent de turnare a microfibrelor.

2.2. Aspecte de comandă și control în procesul tehnologic de turnare a microfibrelor

În general, în orice proces tehnologic se urmărește eliminarea intervenției directe a omului în aceste procese, asigurându-se desfășurarea lor în conformitate cu anumite cerințe impuse, fără intervenția directă a operatorului. Astfel, se dorește automatizarea procesului [40, 45-47], principalele avantaje ale automatizării fiind bine cunoscute:

- creșterea productivității muncii,
- îmbunătățirea calității produsului finit,
- reducerea efortului intelectual depus de oameni în cadrul procesului de producție.

Există însă aplicații industriale de importanță majoră în care resursa umană este indispensabilă datorită complexității instalației tehnologice. Rolul omului este în asemenea situații esențial, el fiind inclus în bucla de reglare în sisteme de tip „om-calculator”. Problema

ține de suportul deciziilor în cazul tehnologiilor ce necesită recunoașterea și monitorizarea permanentă a unor forme complexe caracteristice procesului, etc. În asemenea situații doar un operator înalt calificat poate opera decizii satisfăcătoare pentru a asigura cerințele sistemului de producție.

În turnarea microfiredelor cu un diametru prestabilit, operatorul trebuie să controleze procesul prin monitorizarea mărimii de ieșire (diametrul microfiredului). Pentru a oferi operatorului date despre starea mărimii de ieșire în timpul procesului se folosesc anumite dispozitive de măsurare. După cum a fost menționat în cap.1 principalul canal, care oferă o informație cantitativă despre diametrul microfiredului tras, este măsurarea rezistenței lineare – *RL*. Pentru a menține valoarea prestabilită a diametrului firului, agentul uman operează cu un număr limitat de variabile de control a procesului și anume:

- Presiunea aerului în tubul de sticlă – *PTS*,
- Puterea generatorului de frecvență înaltă – *PG*,
- Viteza de avans a tubului de sticlă – *VTS*,
- Viteza de avans a tijeii de aliaj – *VTA*,
- Viteza de rotire a bobinei receptorului – *VBR*.

Astfel, schema procesului de turnare a microfiredului cu diametrul prestabilit se reprezintă ca cea din Figura 2.2. Operatorul uman trebuie să asigure comanda și controlul procesului folosind variabilele specificate. Unele variabile, cum ar fi, de exemplu, poziția cristalizatorului, nu sunt reflectate aici, deoarece sunt setate o singură dată și practic nu se schimbă pe parcurs. Pe de altă parte, puterea generatorului *PG*, viteza de îmbobinare *VBR*, viteza de avans a tubului de sticlă *VTS* precum și viteza de avans a tijeii de aliaj *VTA* sunt ajustate la începutul procesului și pot fi considerate ca fiind relativ stabile pe durata operației tehnologice.

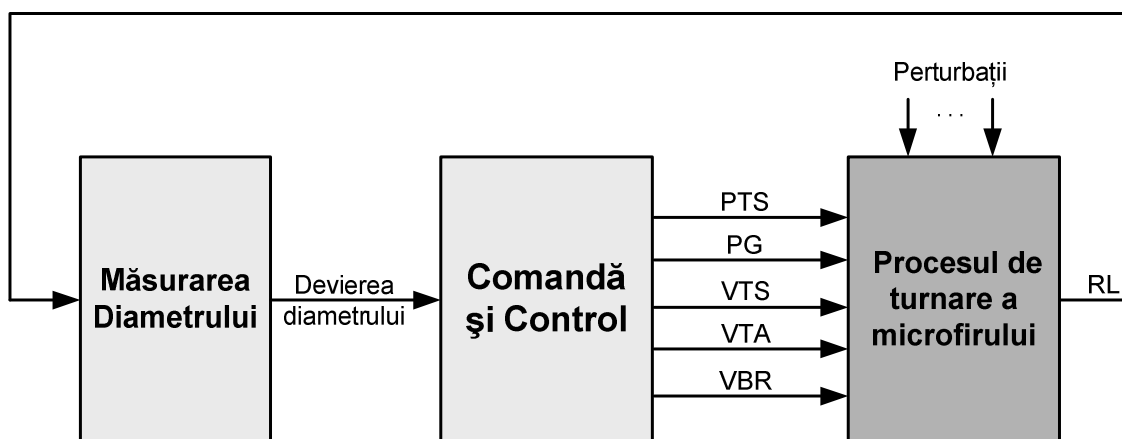


Fig. 2.2. Schema procesului de turnare a microfiredului.

Cel mai sensibil organ de control al procesului este presiunea aerului în tubul de sticlă *PTS*. Variind puterea pompei de vid operatorul modifică poziția picăturii și indirect influențează

temperatura și forma ei. Controlând forma picăturii operatorul controlează diametrul microfirului. Astfel, pentru a obține microfibre cu diametrul prestabilit operatorul trebuie să asigure anumite condiții termice și geometrice (forma picăturii, poziția).

Totodată procesul în curs este influențat din exterior de diferite perturbații cum ar fi vibrațiile în microfir, defecte în aliaj și tubul de sticlă, dar și variațiile puterii generatorului și a pompei de vid. Astfel de perturbații necesită intervenția permanentă a operatorului în vederea menținerii diametrului prestabilit.

După cum a fost menționat mai sus, la etapa de turnare informația de reacție parvine de la măsurătorul de rezistență lineară. Deoarece lungimea pe care se măsoară rezistența și compoziția aliajului rămân constante, noi putem determina diametrul microfirului în timpul tragerii, măsurând rezistența. Dar acest măsurător are anumite limite – el oferă o eroare de 5-10% doar pentru microfibre cu diametrul cuprins între 4...10 microni. Pentru microfibre cu diametrul mai mic/mare eroarea crește semnificativ, iar în unele cazuri măsurarea rezistenței devine practic imposibilă, traductorul respectiv devenind nefuncțional.

Aplicarea metodelor și dispozitivelor de măsurare a rezistenței lineare fiind limitată, apare necesitatea de a oferi soluții de alternativă în turnarea microfivelor în caz general. Este absolut evident că procesul tehnologic de turnare a microfivelor cu izolație din sticlă se caracterizează printr-un nivel de complexitate extrem de ridicat. Procesul respectiv reprezintă o îmbinare de procese mecanice, termice, electrodinamice, transformări și interacțiuni fizico-chimice. Dat fiind gradul înalt de complexitate, crearea unui model matematic complet și adecvat pentru automatizarea acestui proces reprezintă o problemă extrem de dificilă. Deci, abordarea fizico-matematică pură a procesului tehnologic în cauză nu reprezintă o soluție acceptabilă practic.

Pe de altă parte, în domeniul fabricării microfivelor s-a acumulat o cantitate mare de experiență umană, care poate fi exploatată pentru a automatiza, cel puțin parțial, procesul tehnologic respectiv. Procesul tehnologic considerat nu poate fi tratat prin prisma unor categorii precise ale teoriilor tradiționale. O dovadă în acest sens ar fi și faptul că operatorul uman nu supervizează procesul în baza unor reguli absolut stricte. Operatorul este “ajutat” în mare măsură de propria experiență tehnologică.

În cadrul tezei se propune de a efectua cercetarea și dezvoltarea unor astfel de soluții și tehnologii, în care luarea deciziilor cu scopul de a comanda și controla procesul de turnare a microfirului să se bazeze atât pe tehnici de procesare a informației captate de la diverși senzori, cât și pe experiența acumulată de către operatorul uman [36, 38, 39, 41, 47-51].

Este de departe evident că variațiile diametrului de-a lungul lungimii microfirului au un impact major asupra calității acestuia în procesul de fabricare. Prin urmare, obiectivul principal

al operatorului este evaluarea online a valorii diametrului firului și urmărirea unui curs de acțiune pentru a satisface criteriile de calitate a microfirului. Pentru a monitoriza diametrul, operatorul utilizează mărimea rezistenței lineare. Din punctul de vedere al posibilelor direcții de acțiune, baza de decizie conține următoarele alternative distincte: variația presiunii din interiorul tubului de sticlă, variația puterii inductorului de înaltă frecvență, variația vitezei tubului de sticlă, variația vitezei tije și, în final, variația vitezei bobinei. Presiunea din interiorul tubului de sticlă și puterea încălzitorului inductorului trebuie manipulate cu atenție în timp. Astfel, obiectivul principal al operatorului este de a selecta cea mai bună alternativă atunci când sunt luate în considerare criteriile de calitate.

Deciziile online ale unui operator puțin experimentat se bazează doar pe informațiile ce țin de mărimea rezistenței lineare, astfel încât calitatea microfirului este satisfăcătoare, fiind determinată de eroarea măsurătorului rezistenței. Figura 2.3.a ilustrează cazul (aici se utilizează unități relative pentru diametru și lungime).

S-a menționat că acuratețea tipică a măsurătorului rezistenței lineare este de ordinul a 5% până la 10% în limite destul de înguste. Din acest motiv, operatorul nu poate folosi informațiile ce țin de mărimea rezistenței lineare într-o gamă largă de diametre. Este binecunoscut faptul că în situații cu incertitudine sporită, experții utilizează decizii intuitive. Expertul urmează o schemă intuitivă pentru a se potrivi unui set de indicatori în experiența sa și pentru a ajunge imediat la o acțiune satisfăcătoare fără a estima alternative. În turnarea microfiredorilor, operatorul uman este ajutat în mare măsură de experiența proprie. Anume experiența și cunoștințele acumulate permit menținerea și prezicerea parametrilor procesului chiar și în condiții de ambiguități.

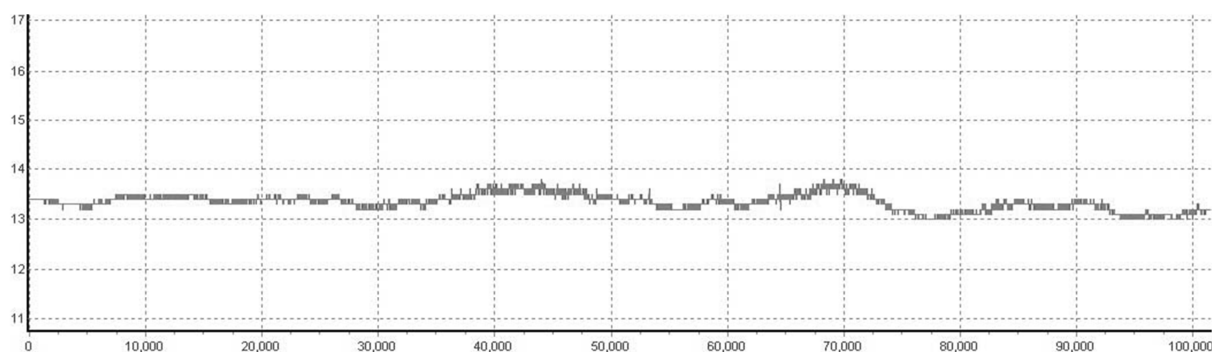


Fig. 2.3.a. Variația diametrului microfirului. Mostra nr.1.

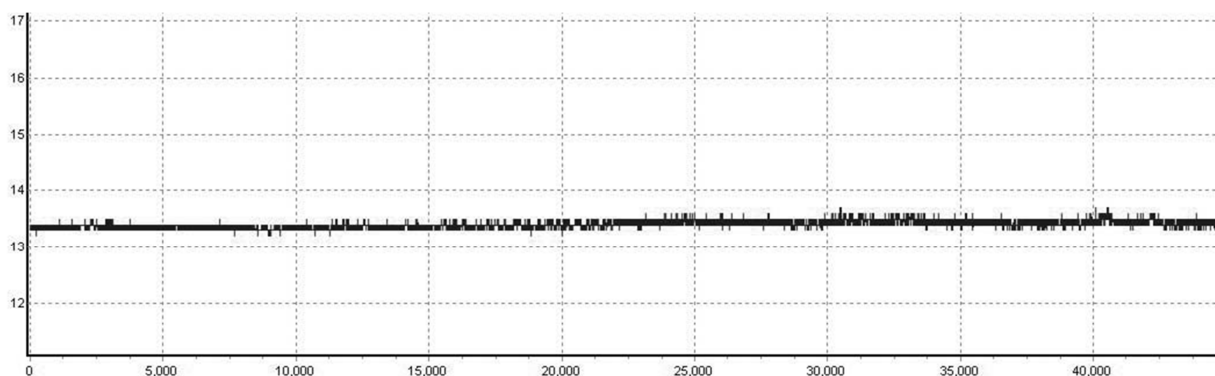


Fig. 2.3.b. Variația diametrului microfirului. Mostra nr.2.

Un operator uman experimentat este capabil să ia decizii asupra procesului prin folosirea informațiilor capturate cu ochii: culoarea și forma picăturii. Baza sa decizională intuitivă este una bogată. Prin urmare, un operator cu înaltă calificare și cu experiență poate produce microfibre de înaltă calitate. Figura 2.3.b arată calitatea unui astfel de microfibr (se utilizează unități relative pentru diametru și lungime). În acest caz, informațiile despre culoarea și forma picăturii, experiența operatorului, alternativele prezentate mai sus și informațiile despre rezistență sunt elementele pe care este bazată decizia în timp. Analiza comportamentului mai multor operatori a condus la concluzia, că adeseori cea mai bună calitate este obținută atunci când factorul de decizie (operatorul) urmează o abordare intuitivă [52], inclusiv elemente de prognoză. Cu alte cuvinte, operatorul este într-o oarecare măsură un predictor. De fapt, aceasta confirmă interconectarea binecunoscută între problemele de decizie și problemele de predicție [53].

Observațiile de mai sus au condus la analiza importanței formei picăturii, în special a formei geometriei capilarului în timpul turnării microfirului. În rezultatul analizei literaturii de specialitate s-a constatat [2, 14, 15, 17] că forma geometrică a picăturii și capilarului în timpul tragerii microfirului are impact decisiv asupra calității microfirului turnat.

În lucrarea [15] este analizată forma geometrică a capilarului în proces de turnare operațională (Figura 2.4). Această analiză este un argument în plus pentru a aborda problema modelării capilarului picăturii cu scopul de a oferi instrumente decizionale bazate pe predicție, respectiv eliminarea sau diminuarea rolului traductorului de rezistență lineară în procesul de turnare a microfirului, dar și a factorului uman.

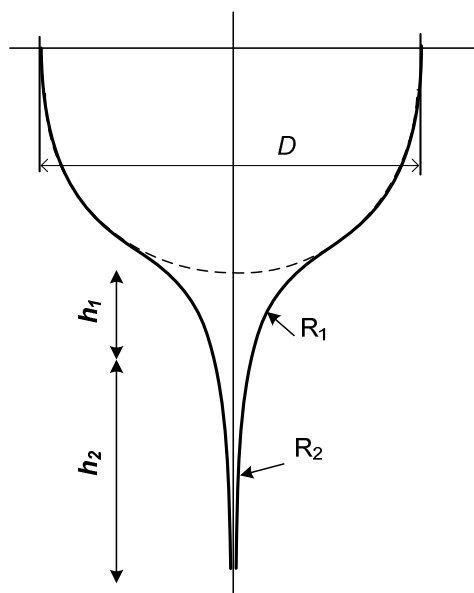


Fig. 2.4. Forma geometrică a capilarului „operațional”.

Deci, geometria capilarului, forma și poziția picăturii pot și trebuie considerați factori cheie în controlul procesului de turnare a microfiredelor cu parametri prestabiliți. Monitorizarea și analiza factorilor enumerați permit unui operator experimentat nu doar să fixeze starea curentă a procesului dar și să poată lua decizii predictive pentru a menține procesul în limitele prestabilite.

În cap.1 a fost prezentat modelul de aproximare a formei picăturii. Din păcate acest model [14] nu este aplicabil practic. Ținând cont de cele expuse până acum, găsirea unor soluții originale bazate pe considerarea formei picăturii, care ar putea fi aplicate în timp real, reprezintă o provocare necesară. În acest capitol se propune o abordare predictivă în controlul procesului tehnologic cercetat.

2.3. Abordarea predictivă în modelarea și comanda procesului tehnologic

Luând în considerație versatilitatea procesului de turnare modele matematice existente/elaborate, din punct de vedere practic, nu sunt aplicabile. Pe de altă parte, faptul că un operator experimentat poate controla procesul de tragere a microfiredelor urmărind vizual doar forma picăturii și ignorând adesea ori măsurătorul de rezistență lineară, indică posibilitatea de a construi sistemul de control bazat pe alte principii. Obiectivul de bază constă în folosirea tehnicilor *machine vision* pentru controlul procesului la fel cum o face un operator cu experiență. Primul pas spre atingerea acestui obiectiv este acumularea statisticii/baze de cunoștințe, care ar contura corelația între variabilele procesului și forma picăturii. Pentru aceasta a fost elaborat un sistem Hard&Soft de achiziție a datelor.

2.3.1. Schema experimentală pentru achiziția și analiza datelor

Pentru a analiza în detalii cum influențează parametrii procesului la forma picăturii de aliaj a fost elaborat un dispozitiv special. Sarcina acestui sistem este de a achiziționa datele de la organele de control în timpul procesului de turnare a microfiredelor și tot odată de a înregistra imaginea picăturii de aliaj în acest moment. În calitate de semnale de intrare au fost selectate doar cele mai relevante – presiunea în tub, puterea generatorului de frecvență înaltă, viteza de înbobinare și datele de la măsurătorul de rezistență lineară. Ceilalți parametri, cum ar fi poziția cristalizatorului sau viteza de avans a tubului din sticlă de regulă sunt fixate și nu se schimbă pe parcursul procesului de tragere, de aceea nu are sens să fie achiziționate. În afară de achiziția semnalelor analogice de la organele de control acest sistem poate genera semnale de comandă, astfel se poate crea o buclă închisă de control. Pentru aceasta el dispune de două canale analogice de ieșire, care pot dirija cu presiunea aerului în tubul de sticlă și cu puterea generatorului.

Elementul cheie care se folosește în acest sistem - modulul de achiziție și stocare a imaginii picăturii. Acest modul ne oferă posibilitatea de a stoca sincron cu datele de la organele de control și măsurători imaginea actuală a picăturii.

Partea hardware a sistemului de achiziție a semnalelor se bazează pe un microcontroler (Figura 2.5). Sistemul dispune de patru canale analogice de intrare și două canale analogice de ieșire. Deoarece semnalele sunt capturate de la diferite module a instalației, ce funcționează cu tensiuni diferite, toate canalele au fost proiectate în așa mod încât să fie izolate galvanic. Coeficientul de amplificare este setat pentru fiecare canal în parte ce permite achiziția cu un singur convertor analogic-digital a semnalelor diapazonul cărora este foarte diferit. Spre exemplu pentru canalul de măsurare a presiunii aerului – sensorul are un răspuns de $-10..+10\text{mV}$, iar măsurător de rezistență lineară generează un răspuns de $0..35\text{V}$. Schemele electrice principale și cablajele imprimate sunt prezentate în anexa 1.1-1.6.

După filtrarea preventivă și amplificare semnalele de intrare trec prin schema de optoizolare. Izolarea galvanică este realizată în bază de optocuple HCNR201. Pe amplificatoare operaționale este realizată schema de liniarizare a semnalului. Aceste optocuple au integrate o diodă luminiscentă și două fototranzistoare – unu pe partea de ieșire, pentru semnalul izolat, și al doilea fototranzistor pe partea primară, care se folosește ca feedback pentru schema de liniarizare. Această construcție permite transmiterea semnalelor analogice cu o eroare de nelinearitate mai mică de 0,01%. Alimentarea componentelor izolate se efectuează cu ajutorul modulelor *DC-DC* pe fiecare canal separat. După optocuple și schema de liniarizare semnalele sunt digitizate de un convertor analogic-digital integrat în microcontroler. Convertorul analogic digital are o rezoluție de 10 biți și frecvența de eșantionare de 15 kHz. Luând în considerație că semnalele de intrare au o frecvență mai mică de aproximativ 30 Hz. aceasta ne permite să

realizăm o supraeșantionare de 256 ori pentru toate canalele achiziționate. O filtrare suplimentară este realizată deja în aplicație folosind filtrul digital reconfigurabil [56]. Operatorul poate modifica frecvența de prag a filtrului, astfel în cât graficele afișate să reflecte cât mai puțin zgomotul/perturbațiile din exterior.

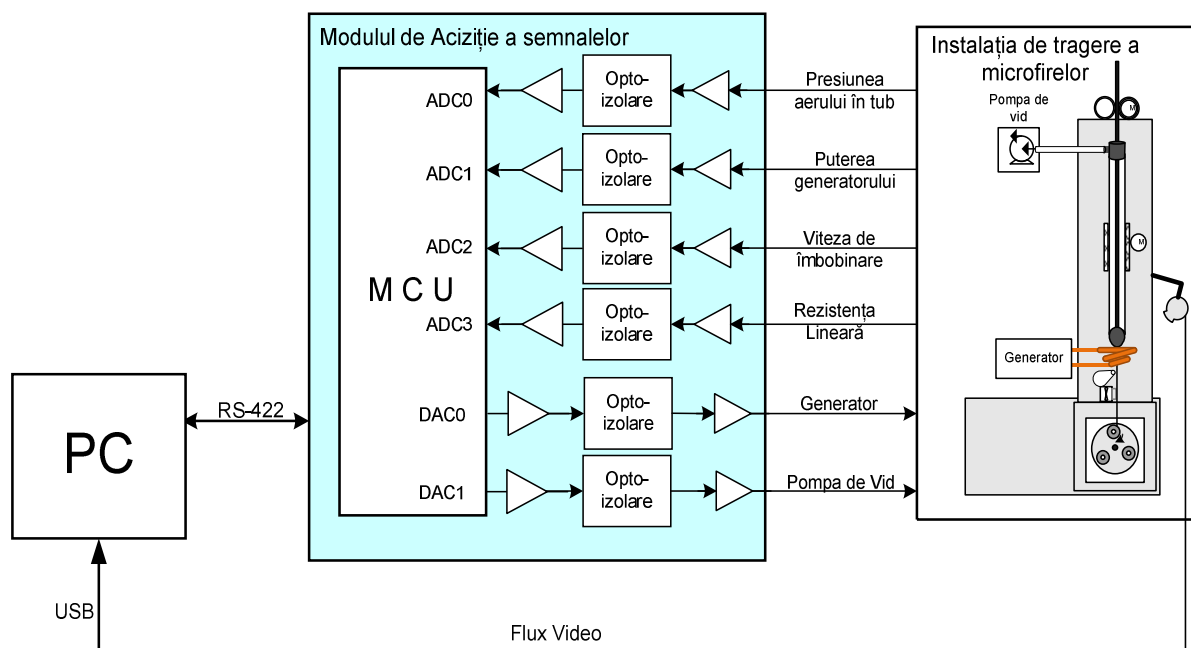


Fig. 2.5. Structura subsistemului de achiziție a datelor.

După digitizare, aceste semnale sunt buferizate și transmise către calculatorul gazdă prin interfața serială. La rândul său, calculatorul poate transmite datele necesare de reacție, care sunt convertite din forma digitală în semnale analogice și pot acționa asupra organelor instalației. Conectarea la calculator este realizată prin una din interfețe *RS-232* sau *RS422*. Conexiunea prin interfața *RS422* folosește cabluri torsadate și semnale diferențiale, ceea ce permite transmiterea datelor cu o rată înaltă chiar și într-un mediu cu zgomot electromagnetic.

Pentru capturarea imaginii picăturii în timpul procesului tehnologic se folosește o cameră video specială cu interfața *USB* (Figura 2.6). Aceasta oferă posibilitatea de a achiziționa imaginea cu un calculator personal sau cu un sistem dedicat ce dispune de port *USB-Host*. Optica acestei camere permite capturarea imaginii a picăturii de la o distanță de aproximativ 10cm. astfel în cât picătura să ocupe întreaga fereastră de vizualizare. Deoarece lungimea picăturii este mai mare ca diametrul ei, și matricea camerei are o rezoluție 1600x1200, pentru a captura toată picătura mai eficient camera este rotită/întoarsă cu 90°.

Pentru experimente cu capturarea și procesarea imaginii a fost realizată o aplicație cu interfața grafică, în limbajul *C++*, ce se rulează pe un calculator personal cu un sistem de

operare Windows. Accesul la fluxul video de la cameră se face prin intermediul librărilor *Microsoft DirectX*, în special *DirectShow*. Această librărie oferă funcțiile (*filter* - în terminologia *MS DirectX*) de capturare a imaginii de la cameră cadru după cadru – *SampleGrabber*. La fel librăria dispune și de codec-urile necesare pentru comprimarea fluxului video înainte de a fi stocat în fișier.

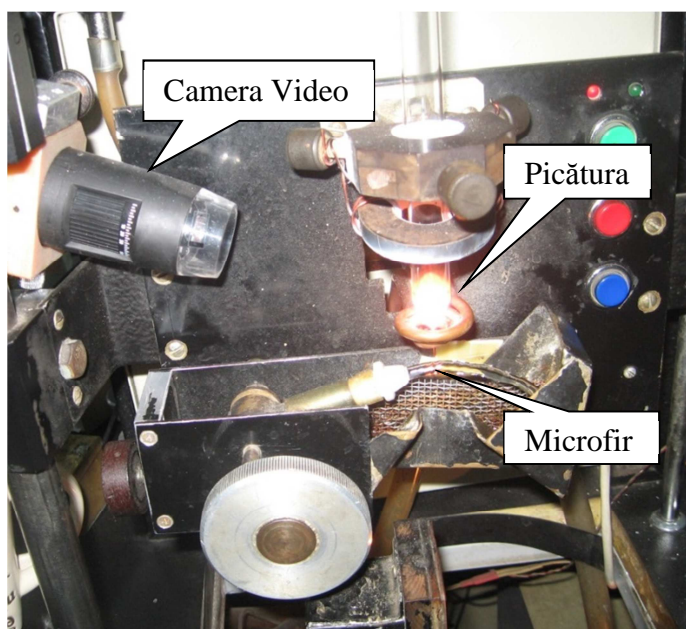


Fig. 2.6. Instalația de turnare cu camera video.

Această aplicație extrage cadru după cadru de la cameră, îl procesează, îl afișează conform modului ales și îl stochează într-un fișier. Frecvența cu care sunt capturate cadrele depinde de performanțele calculatorului, rezoluția imaginii și de complexitatea algoritmului de procesare. În cazul dat, folosind un calculator Pentium-4 2.4GHz a fost obținută o performanță de aproximativ 20 FPS.

Procesarea include următoarele operații asupra imaginii: transformarea RGB-YUV, segmentarea, extragerea conturului și afișarea hărții pseudo-termografice. În baza acestor transformări se efectuează deja extragerea trăsăturilor a picăturii: poziția, volumul, înălțimea și diametrul. Aceste date se afișează ca valori relative. Pentru a obține valorile absolute este nevoie de o calibrare după ce a fost fixată camera.

Odată cu afișarea graficilor operatorul poate vizualiza imaginea picăturii într-o fereastră adăugătoare, într-un mod mai potrivit. Aceste opțiuni includ:

- vizualizarea fără procesare;
- descompunerea imaginii pe componente RGB, sau YUV;
- afișarea muchiei a picăturii;

- harta pseudo-termografică.

Urmărind imaginea picăturii fără procesare, operatorul poate vizualiza forma picăturii la o scară mai largă și în același timp protejându-și vederea sa de iluminarea puternică a metalului topit.

Segmentarea imaginii picăturii în procesul de turnare a microfirului are ca scop evidențierea picăturii pe fundalul luminilor reflectate, și urmărirea conturului acesteia. Determinarea precisă a conturului are o importanță majoră, deoarece dimensiunile și forma se utilizează la luarea deciziilor în conducerea procesului.

În urma procesării, imaginea picăturii poate fi vizualizată sub formă de hartă termografică. Deoarece în instalația experimentală de turnare a microfirului a fost utilizată o cameră video obișnuită și nu un termoscop, care permite redarea doar informației relative de temperatură. Indirect temperatura poate fi determinată/urmărită după luminozitate, de fapt cum și o face operatorul. Pentru a prezenta informația legată de temperatura picăturii într-o formă mai relevantă, ea este redată în pseudoculori.

Astfel în afară de formă operatorul poate urmări și schimbarea temperaturii picăturii în timpul procesului cu o precizie mai înaltă. O schimbare slabă a luminozității imaginii naturale rezultă în schimbarea culorii în fereastra de vizualizare, de la negru, albastru – pentru temperaturi mai joase, spre verde, galben și în final, roșu – pentru temperaturi înalte. Adică culoarea neagră corespunde temperaturii minime, iar culoarea roșu – temperaturii maxime. În urma experimentelor, utilizând acest mod de afișare au fost observate și unele fluctuații a temperaturii legate de particularitățile construcției generatorului inductiv.

Interfața programului de acumulare a statisticii este prezentată în Figura 2.7. Acest program permite capturarea informației de la senzori și afișarea ei în formă numerică și în formă de grafice. Pentru asigurarea unei vizualizări corecte toate canalele de intrare pot fi ajustate, modificând coeficienții respectivi. Pentru a minimiza zgomotele și perturbațiile semnalelor la fiecare canal poate fi aplicat un filtru digital cu parametri variabili.

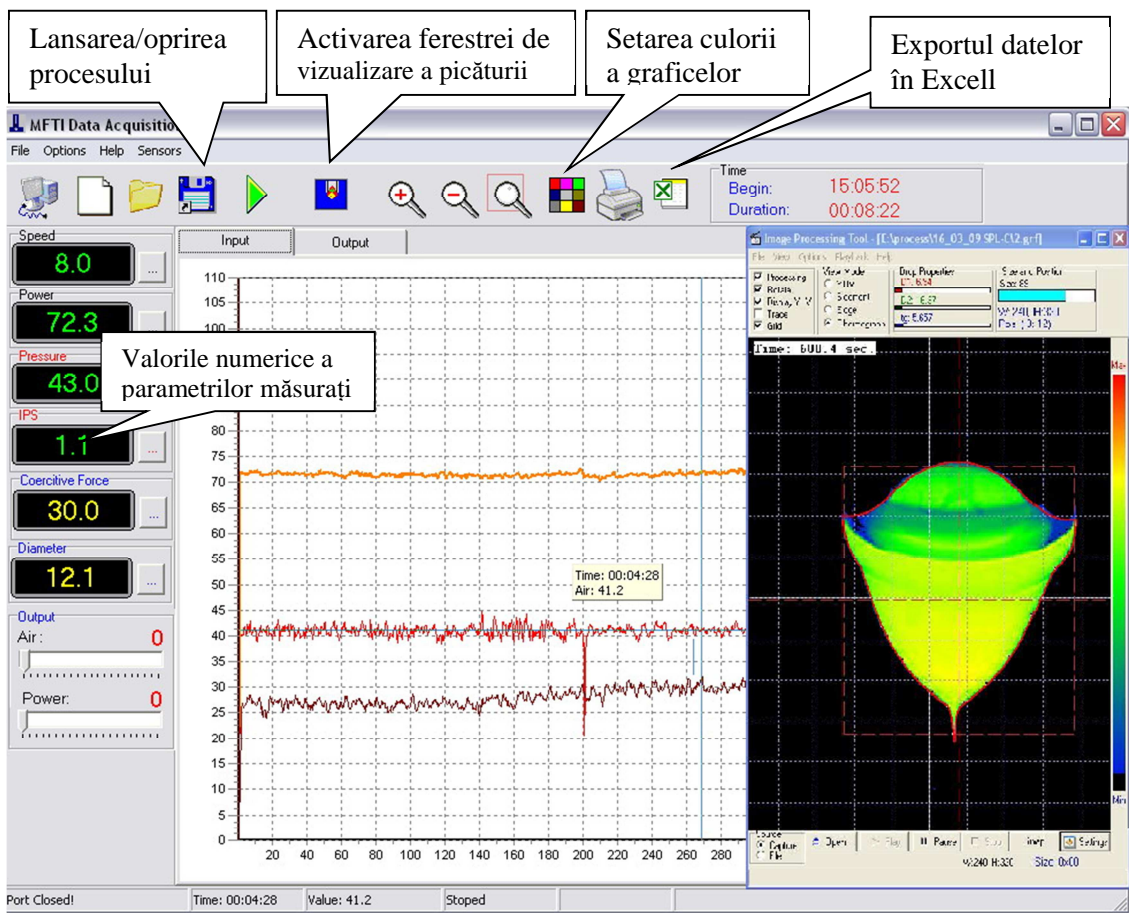


Fig. 2.7. Interfața aplicației de achiziție a datelor.

Datele achiziționate la rând cu imaginea capturată sunt stocate în fișier. Aceasta permite acumularea statisticii despre mersul procesului, care poate fi folosită pentru urmărirea calității microfirului și pentru îmbunătățirea procesului [54, 55]. În afară de aceasta datele acumulate pot fi exportate în formă de raport în programul *MS Excel*.

Aplicația poate funcționa precum în mod online așa și în mod offline. În mod *online*, ea este conectată la sistemul de achiziție și afișează datele achiziționate, și totodată le înregistrează în fișier. În mod *offline* pot fi deschise fișierele de statistică și vizualizate datele, inclusiv imaginea picăturii în orice moment de timp (anexa 2). Adică, mișcând cursorul pe grafice userul poate urmări valoarea numerică exactă în acest moment de timp și imaginea picăturii achiziționate în acel moment. Asupra imaginii picăturii pot fi aplicate aceleași transformări ca și în modul *online*.

Analiza rezultatelor experimentale a confirmat interdependența foarte puternică între variația parametrilor de control a procesului și forma, poziția, culoarea (temperatura) picăturii, respectiv geometria capilarului.

2.3.2. Algoritmii de procesare a imaginii picăturii

Procesarea imaginii urmărește ca obiectiv îmbunătățirea calității și extragerea trăsăturilor necesare. Algoritmii de procesare includ: filtrarea imaginii, transformarea dintr-un spațiu de culori în altul (RGB -> YUV), segmentarea și detectarea conturului.

Segmentarea reprezintă împărțirea imaginilor pe zone de interes. De regulă, segmentarea urmărește extragerea, identificarea sau recunoașterea unui anumit obiect dintr-o imagine. Segmentarea automată a imaginilor netriviabile reprezintă o problemă foarte complicată. În general metodele de segmentare pot fi divizate în trei categorii:

- metodele ce se bazează pe analiza intensității a fiecărui pixel în parte;
- metodele bazate pe analiza regiunilor;
- metodele bazate pe muchii;
- construirea curbei Lagrange;
- determinarea a punctului de inflexie și a punctului capilarului.

Metodele de prag presupun segmentarea imaginilor în baza analizelor intensității sau a culorii fiecărui pixel. Segmentarea se poate face cu un prag global sau cu un prag local pentru fiecare subdiviziune a imaginii sursă [57-59]. Pentru determinarea pragului de regulă se parcurge la analiza histogramelor. Stabilirea automată a pragului are la bază minimizarea probabilistică a erorii de clasificare a pixelilor ce aparțin obiectului și fundalului.

De obicei aceste praguri se aleg ca fiind corespunzătoare minimelor locale ale histogramei. În cazul imaginii bimodale, care conține două moduri dominante, segmentarea se reduce la operația de binarizare cu pragul T_B ce corespunde nivelului de minim local, plasat între aceste două moduri.

După alegerea pragului T_B toți pixelii imaginii inițiale sunt procesate după următoarea relație:

$$P_d(m,n) = \begin{cases} 0, & 0 \leq P_s(m,n) < T_B \\ 255, & T_B \leq P_s(m,n) < 255 \end{cases} \quad (2.47)$$

unde $p_s(m,n)$ reprezintă intensitatea unui pixel cu coordonatele m și n din imaginea sursă, iar $p_d(m,n)$ - pixelii imaginii segmentate.

Metodele de segmentare bazate pe regiuni au la baza lor analiza unor criterii de apartenență a pixelului curent sau a unei regiuni la un obiect. În calitate de criterii poate servi valoarea medie a luminozității, culoarea sau textura regiunii analizate [60].

În general, aceste metode pot fi divizate în trei categorii:

➤ *Segmentarea prin extindere (merging)*, în care se pornește de la un „punct de cristalizare” și se analizează iterativ punctele din vecinătate. În caz că criteriul de apartenență este satisfăcut atunci pixelul dat se adaugă la regiune. Astfel regiunea se extinde până când nu va include întregul obiect.

➤ *Segmentarea prin divizare (splitting)* – se începe de la o zonă mare, spre exemplu întreaga imagine care se divizează în mai multe regiuni. Dacă una din regiunile obținute nu sunt omogene atunci se continuă spargerea regiunii până când nu se obțin regiuni omogene.

➤ *Segmentarea prin divizare și unificare (split & merge)* – la fel presupune divizarea imaginii în regiuni mai mici, de obicei de dimensiune fixă, ca și în cazul segmentării prin divizare numai că după divizare regiunile omogene sunt unificate.

Cea mai potrivită, pentru aplicația dată, ar fi metoda de segmentare prin extindere, deoarece se cunoaște că avem doar un singur obiect care trebuie delimitat de fundal.

Principiul de segmentare pe care se bazează creșterea regiunilor este următoarea: se aleg în imagine pixeli reprezentativi pentru fiecare obiect individual, pe baza cărora se efectuează aglomerarea pixelilor vecini acestora, ce au aceleași proprietăți cu pixelii reprezentativi. În urma acestui proces de aglomerare se obțin zone de pixeli cu aceleași caracteristici. Procesul de aglomerare trebuie oprit în momentul în care fiecare pixel a fost alocat unei regiuni.

Deoarece ca scop în aplicația dată se urmărește segmentarea doar a imaginii picăturii și luând în considerație că zona picăturii se află neapărat în mijlocul imaginii în calitate de celulă de bază poate fi considerată regiunea din centrul imaginii. Această regiune este plasată în coadă după ce începe procesul iterativ de marcare, care constă în următorii pași:

- se extrage primul punct din coadă;
- se marchează toți vecinii acestui punct care satisfac condiția de similaritate;
- coordonatele punctelor vecini ce au fost marcate sunt plasate în coadă;
- se trece la următorul punct din coadă.

Astfel se obține imaginea binarizată a picăturii (Figura 2.8). Pentru extragerea conturului se aplică un algoritm de urmărire a conturului.

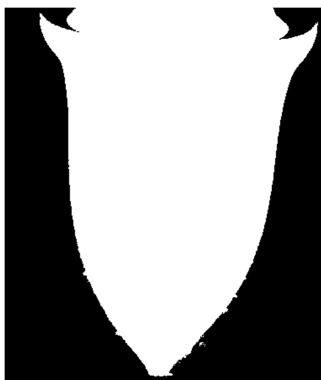


Fig.2.8. Imaginea picăturii după segmentare prin extindere.

Dezavantajul acestui tip de algoritm este faptul că rezultatul segmentării este foarte influențat de nivelul de zgomot ce nu permite determinarea corectă a formei picăturii. În afară de aceasta, imaginea este parcursă iterativ, ce necesită mult timp de procesare.

Metodele de segmentare bazate pe muchii folosesc algoritmi de detectare a muchiilor și construirea ulterioară a conturilor închise, care să descrie obiectul. În calitate de metode de detectare a muchiilor pot fi utilizate derivate de ordinul unu sau doi [61-65].

Detectarea muchiilor se efectuează prin localizarea a variațiilor locale de luminozitate. Aceste variații sunt reprezentate de vectorul gradient:

$$\nabla F = \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (2.48)$$

În cazul discret derivatele pot fi calculate utilizând relațiile 2.49, 2.50 :

$$\begin{aligned} \nabla_x f(x, y) &= f(x+1, y) - f(x, y) \\ \nabla_y f(x, y) &= f(x, y+1) - f(x, y) \end{aligned} \quad (2.49)$$

sau în cazul simetric:

$$\begin{aligned} \nabla_x f(x, y) &= f(x+1, y) - f(x-1, y) \\ \nabla_y f(x, y) &= f(x, y+1) - f(x, y-1) \end{aligned} \quad (2.50)$$

Deoarece operatorul de detecție a muchiilor trebuie să fie izotrop, pentru a răspunde similar la muchii de diferite direcții, ca detector se utilizează modulul gradientului:

$$\nabla f = |\nabla F| = \sqrt{[\nabla_x f(x, y)]^2 + [\nabla_y f(x, y)]^2} \quad (2.51)$$

sau pentru sporirea calculelor poate fi utilizată valoarea aproximativă:

$$\nabla f \approx |\nabla_x f(x, y)| + |\nabla_y f(x, y)| \quad (2.52)$$

Derivatele bidimensionale de ordinul unu, în cazul discret pot fi calculate utilizând convoluția cu operatorul Sobel, Kirsch sau Prewit. Opțional, pentru fiecare operator, la finalul convoluției, se poate face segmentarea cu un prag pentru a obține imaginea binară a muchiilor. În figura 2.8 este prezentat rezultatul convoluției imaginii picăturii cu operatorul Sobel din relațiile (2.53):

$$\nabla f_x = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} \quad \nabla f_y = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

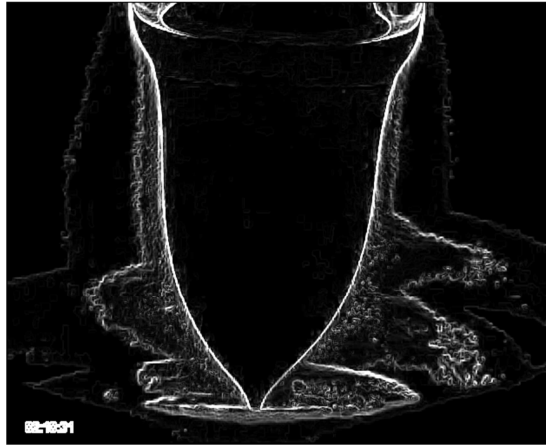


Fig 2.9. Imaginea picăturii după aplicarea operatorului Sobel.

După cum se vede din Figura 2.9 muchiile obținute au o lățime de câțiva pixeli. Lățimea lor depinde de aceea cât de brusc se schimbă luminozitatea. În afară de aceasta, detectarea muchiilor evidențiază și zgomotul din imagine.

De regulă, înainte de aplicarea operatorului de detecție a muchiilor se execută operația de netezire a imaginii. Utilizând măști de dimensiuni mai mari se pot efectua în același timp operația de netezire și detecție a muchiilor. Spre exemplu un operator compus numit *Derivative of Gaussian* utilizează o mască de netezire cu vecinătăți mari compusă după o lege gaussiană bidimensională împreună cu un operator de detecție a muchiilor de aceeași dimensiune.

O metodă optimă de detectare a muchiilor este metoda propusă de Canny [66]. Ea este formată din mai multe etape:

- netezirea imaginii;
- construirea hărții a modulului și direcției gradientului;
- suprimarea non-maximă;
- prăguire utilizând două nivele de prag cu histerezis de-a lungul conturului.

Netezirea imaginii se efectuează cu un filtru cu vecinătăți mari, compus după o lege gaussiană bidimensională.

$$g(x, y, k) = \frac{1}{2\pi k} e^{-(x^2 + y^2)/(2k)} \quad (2.54)$$

Variând coeficientul k se poate obține un răspuns a filtrului optimal. În aplicația dată a fost utilizată o mască 5x5 cu valoarea $k=1.4$:

$$f(x, y) = \frac{1}{159} \begin{bmatrix} 2 & 4 & 5 & 4 & 2 \\ 4 & 9 & 12 & 9 & 4 \\ 5 & 12 & 15 & 12 & 5 \\ 4 & 9 & 12 & 9 & 4 \\ 2 & 4 & 5 & 4 & 2 \end{bmatrix} \quad (2.55)$$

După netezire se construiește harta de intensități ai gradientului

$$|G(x, y)| = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (2.56)$$

și harta de direcție a gradientului pentru fiecare punct al imaginii, calculată după relația (2.57).

$$\alpha(x, y) = \arctg\left(\frac{G_x}{G_y}\right) \quad (2.57)$$

Această hartă de direcții este rotunjită până la patru valori, ce reprezintă direcția verticală, orizontală și două direcții diagonale:

$$\theta(x, y) = \begin{cases} 0^\circ, & 0^\circ \leq \alpha(x, y) < 22.5^\circ, \text{ sau } 157.5^\circ \leq \alpha(x, y) < 180^\circ \\ 45^\circ, & 22.5^\circ \leq \alpha(x, y) < 67.5^\circ \\ 90^\circ, & 67.5^\circ \leq \alpha(x, y) < 112.5^\circ \\ 135^\circ, & 112.5^\circ \leq \alpha(x, y) < 157.5^\circ \end{cases} \quad (2.58)$$

La următoarea etapă se efectuează suprimarea non-maximă. Pentru fiecare pixel se analizează pixelii vecini în direcția perpendiculară conturului și acest pixel este păstrat doar dacă modulul gradientului este mai mare decât în pixelii vecini, în caz contrar valoarea acestui pixel i se atribuie zero. Această procedură permite obținerea conturului cu lățimea de un singur pixel.

În final se aplică prăguire cu histerezis. Pentru aceasta se utilizează două praguri de selecție a punctelor de contur - un prag mare pentru selecția unui punct sigur de contur, care are valoarea maximă în harta de intensități ai gradientului, și un prag mic care selectează punctele din vecinătatea punctului de gradient mare. Această tehnică urmărește obținerea de muchii continue chiar când valoarea gradientului muchiei este mică.

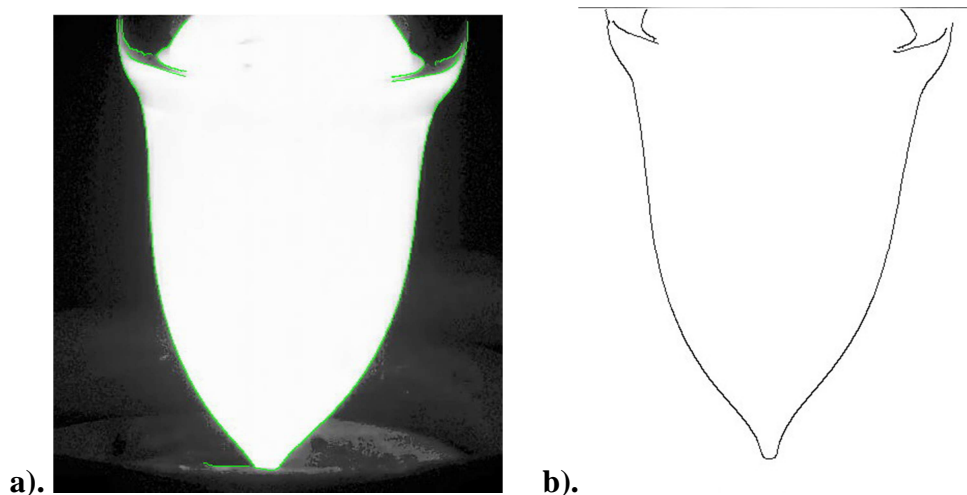


Fig 2.10. Imaginea picăturii după detectarea conturului prin metoda Canny:
a) imaginea conturului suprapusă pe imaginea inițială; b) imaginea conturului.

Pentru aplicarea metodei Canny au fost elaborați algoritmi de procesare a imaginii picăturii prezentați în [67, 68]. Rezultatul imaginii obținut cu ajutorul procesării respective este ilustrat în Figura 2.10. În urma analizei s-a observat că conturul picăturii este reconstruit cu o precizie destul de bună. Cu toate că în zona exterioară a picăturii sunt detectate contururi false, luând în considerație că ele nu se suprapun cu conturul extern a picăturii, ele nu influențează asupra rezultatelor.

2.3.3. Modelul de aproximare a formei picăturii în timp real

Ținând cont de rezoluția limitată a imaginii și reieșind din importanța și necesitatea descrierii fine a formei geometrice a capilarului, în continuare a fost necesar de a cerceta problema aproximării conturului. În acest scop s-a mers pe calea interpolării curbei ce descrie conturul, folosind un anumit număr de puncte de referință extrase de pe conturul obținut anterior.

Pentru a putea descrie zona de interes major în partea capilarului (Figura 2.4) este nevoie de a interpola întreaga curbă de la extrema de jos până la cea de sus. Rezultă necesitatea determinării punctelor de referință ca număr și poziție.

Cu scopul de a minimiza influența zgomotului pe imagine și obținerea coordonatelor punctelor de referință cu o precizie satisfăcătoare, a fost elaborată și validată o metodă care permite determinarea unui punct de referință prin medierea coordonatelor a cinci puncte adiacente, extrase de pe conturul detectat. În continuare este descrisă esența metodei propuse.

După detectarea muchiilor, de pe conturul picăturii se extrag câte 25 de puncte p_i echidistante din ambele părți, începând cu punctul de jos al capilarului (Figura 2.11). Aceste puncte se extrag din linia de contur, care este legată de grila (rezoluția) imaginii. Inițial

coordonatele acestor puncte sunt reprezentate în numere întregi. După mediere coordonatele punctelor de referință sunt în format cu virgulă flotantă.

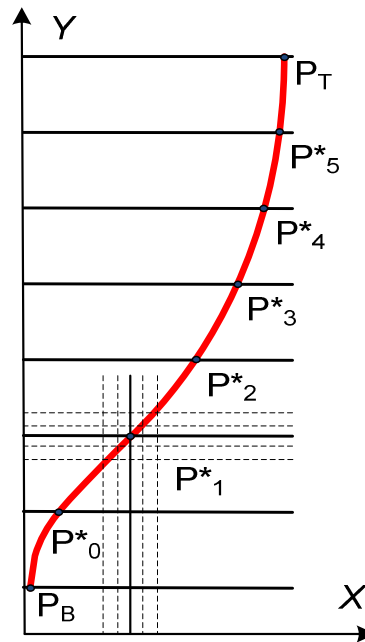


Fig. 2.11. Explicativă la metoda de extragere a punctelor de referință.

Procedura de mediere se realizează după formula 2.59:

$$P_i^* = \frac{p_{i-2} + 2p_{i-1} + 3p_i + 2p_{i+1} + p_{i+2}}{9}, \quad \{i=3 \dots 23 \text{ cu pasul } 5\} \quad (2.59)$$

Punctele de referință echidistante, împreună cu două puncte situate la extremitățile picăturii - cel mai de jos (care este comun pentru curba stânga și dreapta) și cele de sus (care reflectă conturul tubului de sticlă), servesc pentru a construi curbele de aproximare cu ajutorul polinomului Lagrange. Varianta polinomului Lagrange a fost selectată din două motive: a) la etapa de experimentare prealabilă interpolarea Lagrange s-a dovedit a fi mai exactă; b) în eventualitatea derivării funcției ce descrie forma picăturii polinomul Lagrange este aplicabil, spre deosebire de B-Spline [69-73].

Reamintim că aproximarea Lagrange folosește următoarele funcții de bază [74]:

$$L_j(x) = \frac{(x - x_0) \dots (x - x_{j-1})(x - x_{j+1}) \dots (x - x_p)}{(x_j - x_0) \dots (x_j - x_{j-1})(x_j - x_{j+1}) \dots (x_j - x_p)} \quad (2.60)$$

și polinomul Lagrange $P(x)$, asociat:

$$P(x) = \sum_{j=0}^p y_j L_j(x) \quad (2.61)$$

unde $x_0 < x_1 < x_2 < \dots < x_p$ sunt abscisele punctelor de control, iar $y_0, y_1, y_2, \dots, y_n$ respectiv ordonatele lor.

Pentru un număr de 7 puncte de referință funcțiile de bază Lagrange pot fi prezentate în felul următor:

$$L_0(x) = \frac{(x-x_1)(x-x_2)(x-x_3)(x-x_4)(x-x_5)(x-x_6)}{(x_0-x_1)(x_0-x_2)(x_0-x_3)(x_0-x_4)(x_0-x_5)(x_0-x_6)}, \quad (2.62)$$

$$L_1(x) = \frac{(x-x_0)(x-x_2)(x-x_3)(x-x_4)(x-x_5)(x-x_6)}{(x_1-x_0)(x_1-x_2)(x_1-x_3)(x_1-x_4)(x_1-x_5)(x_1-x_6)}, \quad (2.63)$$

$$L_2(x) = \frac{(x-x_0)(x-x_1)(x-x_3)(x-x_4)(x-x_5)(x-x_6)}{(x_2-x_0)(x_2-x_1)(x_2-x_3)(x_2-x_4)(x_2-x_5)(x_2-x_6)}, \quad (2.64)$$

$$L_3(x) = \frac{(x-x_0)(x-x_1)(x-x_2)(x-x_4)(x-x_5)(x-x_6)}{(x_3-x_0)(x_3-x_1)(x_3-x_2)(x_3-x_4)(x_3-x_5)(x_3-x_6)}, \quad (2.65)$$

$$L_4(x) = \frac{(x-x_0)(x-x_1)(x-x_2)(x-x_3)(x-x_5)(x-x_6)}{(x_4-x_0)(x_4-x_1)(x_4-x_2)(x_4-x_3)(x_4-x_5)(x_4-x_6)}, \quad (2.66)$$

$$L_5(x) = \frac{(x-x_0)(x-x_1)(x-x_2)(x-x_3)(x-x_4)(x-x_6)}{(x_5-x_0)(x_5-x_1)(x_5-x_2)(x_5-x_3)(x_5-x_4)(x_5-x_6)}, \quad (2.67)$$

$$L_6(x) = \frac{(x-x_0)(x-x_1)(x-x_2)(x-x_3)(x-x_4)(x-x_5)}{(x_6-x_0)(x_6-x_1)(x_6-x_2)(x_6-x_3)(x_6-x_4)(x_6-x_5)}. \quad (2.68)$$

Un avantaj al reprezentării funcției de aproximare sub forma Lagrange o constituie faptul că polinoamele L_j depind numai de alegerea nodurilor și nu cer condiții de restricții auxiliare [75].

Două caracteristici ale acestora limitează flexibilitatea curbelor rezultate:

- numărul vârfurilor poligonului determină gradul polinomului care definește curba;
- natura globală a polinoamelor Lagrange face ca o modificare a poziției unui singur vârf să se facă simțită pe întreaga curbă; practic se elimină posibilitatea de a produce schimbări locale în curbe.

După cum se poate vedea din Figura 2.12 curba de interpolare trece fin din forma convexă în cea concavă. Punctul acesta de trecere – punctul de inflexiune (*PI*), rămâne relativ stabil în timpul procesului. Acest punct îl putem folosi la determinarea zonei de interes în care

începe pârnia capilarului. Pentru a determina coordonatele lui este nevoie de a găsi derivata de ordinul doi a polinomului Lagrange. Această derivată a fost determinată în forma 2.69:

$$P''(x_{inf}) = \sum_{j=0}^p \left[\frac{y_j}{\prod_{i=0; i \neq j}^p (x_j - x_i)} \sum_{i_1=0}^p \sum_{i_2=0}^p \prod_{\substack{i=0 \\ i \neq j \\ i \neq i_1 \\ i \neq i_2}}^p (x_{inf} - x_i) \right] \quad (2.69)$$

Astfel coordonata punctului de inflexiune - x_{inf} o găsim iterativ ca punct în care $P''(x)$ trece prin zero, iar coordonata y_{inf} o calculăm după formula 2.61.

Punctul de intrare în pârnia capilarului – PC (Figura 2.11) îl determinăm acum ca punct de tangență a curbei pe intervalul de la originea capilarului până la punctul de inflexiune pe segmentul $[0, PI]$. În acest scop aplicăm cunoscuta formulă Lagrange 2.70:

$$f'(x_0) = \frac{f(b) - f(a)}{b - a}, \quad x_0 \in (a, b) \quad (2.70)$$

Rezultatele experimentale obținute sunt prezentate, ca exemplu, în Figura 2.12.b.

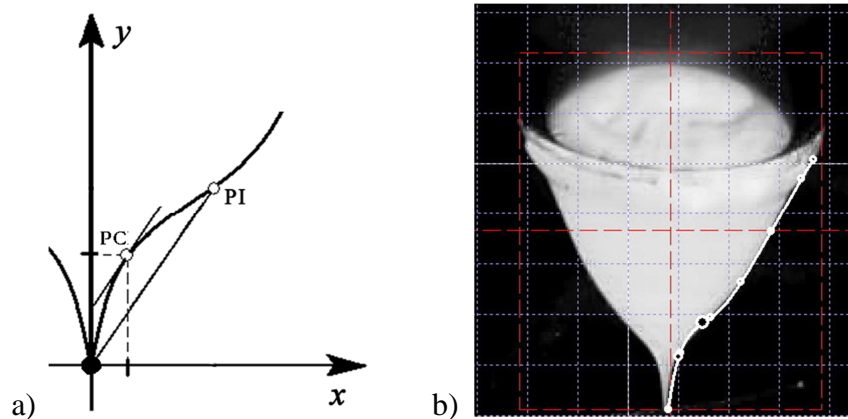


Fig. 2.12. Imaginea picăturii după aproximarea cu polinomul Lagrange:

- a) punctul de inflexiune PI , și punctul capilarului PC . b) imaginea reală cu curba aproximată.

Modelul propus este descris în [76, 77]. Acest model permite descrierea formei geometriei capilarului în timp real, ceea ce deschide calea în comanda și controlul procesului cercetat pe bază predictivă.

2.3.4. Acurateța aproximării formei picăturii

Funcționalitatea modelului elaborat a fost validată printr-o serie de experimente. Pentru a determina acurateța datelor obținute trebuie menționate următoarele. În primul rând, o anumită eroare este introdusă la etapa de achiziție a imaginii, deoarece camera se fixează sub un unghi de aproximativ 10° pentru a putea achiziționa și zona capilarului care se afla în interiorul inductorului. La fel erorile pot apărea la faza de detecție a muchiilor. Această eroare este strâns legată de rezoluția cu care este achiziționată imaginea. Evident că cu cât mai mare este rezoluția cu atât va fi mai mare acurateța obținută, dar totodată va crește timpul de procesare și volumul de date care trebuie stocat. Spre exemplu, dacă imaginea este achiziționată cu rezoluția 480x640 (camera este rotită cu 90°), tubul de sticlă cu diametrul de 12mm ocupă aproximativ 340 pixeli, respectiv dimensiunile unui pixel sunt de 35 microni. Ca volum de date necomprimate în format RGB24 o astfel de imagine v-a ocupa 921600 byte. Datele experimentale pentru diferite rezoluții sunt prezentate în tabelul 2.1. Deoarece, camera este rotită cu 90° , rezoluția se prezintă ca [lățime x înălțime]

Tabelul 2.1. Rezoluția imaginii

Rezoluția	Dimensiunile 1 pixel (microni)	Volumul de date (byte)
480 x 640	35	921600
600 x 800	28,2	1440000
1024 x 1280	16,5	3932160
1200 x 1600	14	5760000

Dacă ignorăm zgomotul care apare în imagine în timpul capturării, detectarea conturului se face cu o eroare ± 1 pixel. Rezultatele interpolării prin polinomul Lagrange depind de coordonatele punctelor de referință, iar specificul algoritmului Canny constă în aceea ca la faza de comprimare nonmaximă grosimea conturului se reduce până la un singur pixel, formând așa numiți ”dinți” pe conturul obținut. Pentru a reduce eroarea de granularitate, după faza de detecție a conturului picăturii, se aplică metoda de mediere descrisă anterior, formula 2.59.

Totodată rezultatul interpolării cu polinomul Lagrange depinde puternic de numărul de puncte de referințe utilizate.

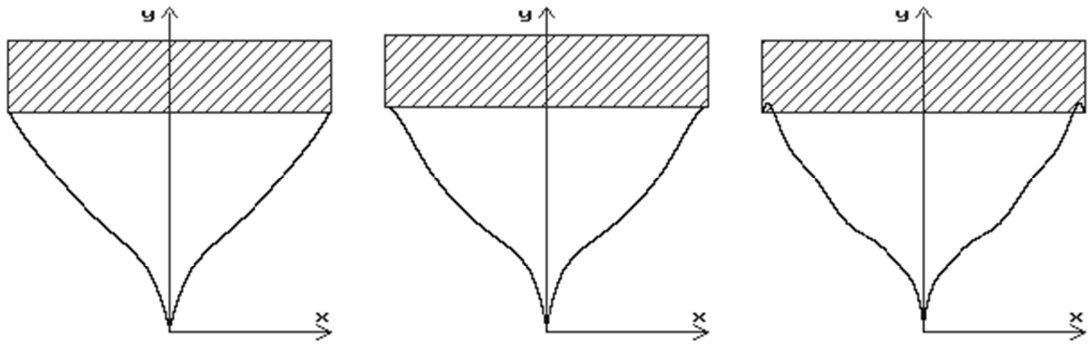


Fig. 2.13. Curbele Lagrange reconstruite din 5, 7 și 9 puncte de referință.

Numărul satisfăcător (7) de puncte necesare pentru construirea polinomului Lagrange a fost determinat experimental. După cum se vede din Figura 2.13 cu un număr mai mare de puncte pe curba interpolată apar "oscilații" nedorite, iar cu un număr mai mic deja nu este satisfăcută coincidența între conturul real al picăturii cu cel interpolat [42].

2.4. Comanda și controlul procesului prin logica fuzzy

Analiza rezultatelor experimentelor și datelor achiziționate în timpul procesului dirijat de un operator experimentat a condus la ideea de a cerceta și dezvolta un sistem inteligent de comandă și control a procesului de turnare a microfiredelor. Pentru a atinge obiectivul de control al procesului cu posibilitatea de a urmări și de a estima parametrii capilarului în timp real s-a propus soluția care constă în îmbinarea tehnicilor machine vision [35, 36] cu cele inteligente [37, 38, 41]. Această abordare este modernă, fiind aplicată în multe cazuri. În particular, metodele și algoritmi logicii fuzzy [78-87] sunt utilizate fie separat [88-92], fie combinat cu alte metode și tehnici [93, 94].

Structura propusă pentru construirea sistemului inteligent de comandă și control a procesului de turnare este prezentat în Figura 2.14. Acest sistem este format din subsistemul de procesare a imaginii, care extrage informația legată de geometria picăturii și controlerul fuzzy propriu-zis. Trebuie notat, că imaginea picăturii trebuie procesată în timp real, astfel încât subsistemul de procesare să asigure cu date despre geometria și temperatura picăturii subsistemul decizional. Legătura cu obiectul tehnologic se realizează prin intermediul blocurilor de fuzificare și defuzificare. De menționat, că operatorul uman la fel este prezent în bucla de luare a deciziilor, cel puțin în faza de testare și formare a bazei de cunoștințe.

Pentru început au fost determinate variabilele lingvistice care se folosesc ca intrări în subsistemul de control:

- *TPS* – temperatura picăturii în zona de sus,
- *TPJ* – temperatura picăturii în zona de jos,

- *PC* – punctul capilarului,
- *PI* – punctul de inflexiune,
- *PP* – poziția picăturii,
- *RL* – rezistența lineară (indicațiile de la măsurătorul de rezistență).

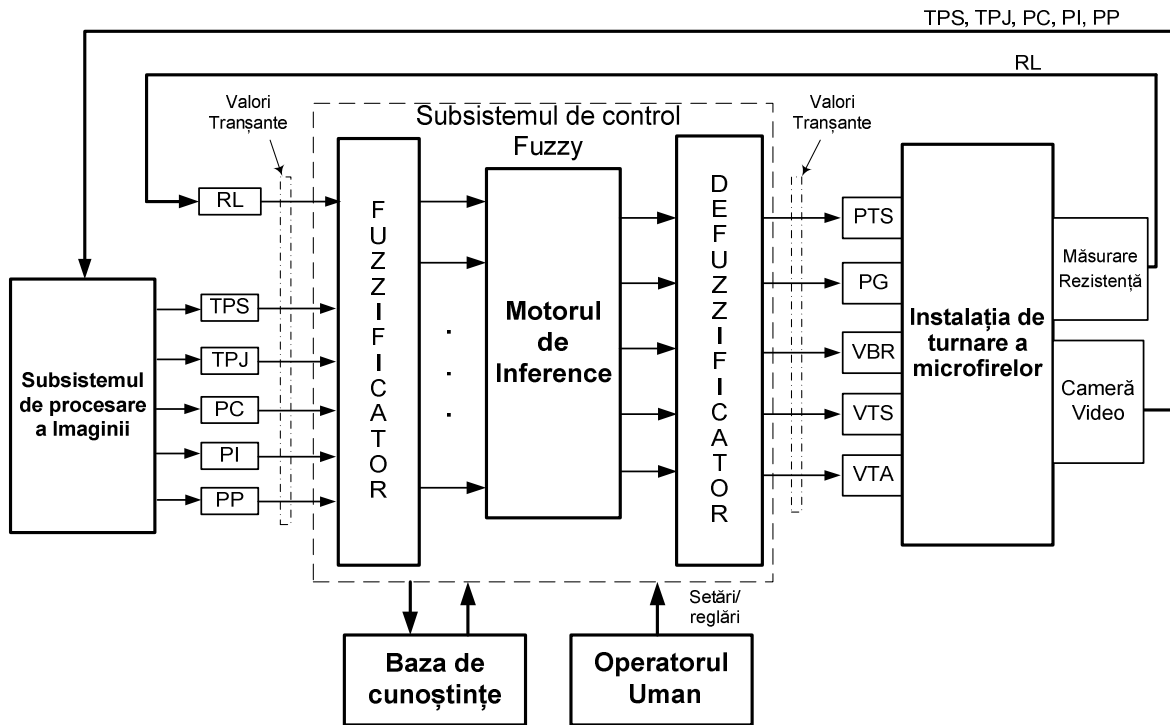


Fig. 2.14. Structura sistemului inteligent de comandă și control a procesului de turnare.

În calitate de ieșiri din subsistemul de conducere se propune de a folosi cinci variabile lingvistice. Fiecare variabilă lingvistică cuprinde între 3 și 5 calificative, în dependență de rolul și funcția ei (tabelul 2.2).

O problemă specială ține de alegerea funcțiilor de apartenență. Reieșind din analiza procesului cercetat, fiecărei variabile i-a fost atribuită o funcție de apartenență descrise în continuare.

Funcția triunghiulară se folosește pentru variabilele critice, cum ar fi presiunea în tubul de sticlă și indicațiile măsurătorului de rezistență lineară:

$$\mu_1(x, a, b, c) = \begin{cases} 0, & \text{if } x \leq a; \\ \frac{x-a}{c-a}, & \text{if } a < x \leq c; \\ \frac{b-x}{b-c}, & \text{if } c < x < b; \\ 0, & \text{if } x \geq b \end{cases} \quad (2.64)$$

Funcția gaussiană a fost selectată pentru variabilele ce indică temperatura picăturii TPS, TPJ ; punctul de inflexiune PI și poziția picăturii PP :

$$\mu_2(x, a, b) = \exp\left[-\frac{(x-a)^2}{2b^2}\right] \quad (2.65)$$

Pentru celelalte variabile a fost selectată funcția sigmoidă:

$$\mu_3(x, a, b) = \{1 + \exp[-a(x-b)]\}^{-1} \quad (2.66)$$

Tabelul 2.2. Variabilele lingvistice și calificativele utilizate în sistemul de control

Valoare	Variabilele Lingvistice	Funcția de apartenență
întă nominală joasă	PTS	(2.64)
foarte mare mare nominală mică foarte mică	RL	(2.64)
întă nominală joasă	TPS, TPJ	(2.65)
mare nominal mic	PC	(2.65)
mare nominal mic	PI	(2.65)
întă nominală joasă	PP	(2.65)
mare nominală mică	PG, VTS, VTA, VBR	(2.66)

Având datele despre temperatura, poziția și geometria picăturii, blocul de luare deciziilor poate genera comenzi pentru a menține procesul în limitele prestabilite. De menționat, că blocul de luare a deciziilor poate utiliza diferite strategii de comandă și control. Spre exemplu, pentru microfibre din aliaje cu caracter rezistiv și cu diametrul mic ca indicator se utilizează măsurătorul de rezistență lineară. Însă pentru microfibre din aliaje specifice cu caracter magnetic sau cu diametrul mare, atunci când eroarea măsurătorului de rezistență este inacceptabilă, blocul de

luare a deciziilor trebuie să urmeze o strategie în baza analizei formei geometriei capilarului și datele caracteristice picăturii în timp real.

Prima strategie de comandă poate fi prezentată în felul următor:

Dacă "RL este foarte mică (diametru foarte mare)" atunci setăm "PTS – mare" și "PG – mare"

Dacă "RL este mică" atunci setăm "PTS – mare" și "PG – moderat"

Dacă "RL este moderat" atunci setăm "PTS – moderat" și "PG – moderat"

Dacă "RL este mare" atunci setăm "PTS – mic" și "PG – moderat"

Dacă "RL este foarte mare (diametru foarte mic)" atunci setăm "PTS – mică" și "PG – mică"

Această strategie poate fi utilizată pentru producerea microfiredorilor cu diametrul cuprins între 4..10 microni. Presiunea în tubul de sticlă (*PTS*) trebuie ajustată în așa fel încât măsurătorul de rezistență microfiredorului să indice o valoare prestabilită. În caz dacă rezistența lineară a microfiredorului deviază semnificativ atunci trebuie ajustate ambele - presiunea în tubul de sticlă și puterea generatorului.

Regulile fuzzy pentru a doua strategie pot fi definite în felul următor:

Dacă "PP este joasă" atunci setăm "PTS – mic" și "PG – moderată" sau

"PTS – moderată" și "PG – mică"

Dacă "PP este exactă/necesară" atunci setăm "PTS – moderată" și "PG – moderată"

Dacă "PP este înaltă" atunci setăm "PTS – mare" și "PG – moderată" sau

"PTS – moderată" și "PG – mare"

Dacă "TPJ este înaltă" atunci setăm "PTS – mică" și "PG – mică" sau

"PTS – mică" și "PG – moderată" sau

"PTS – moderată" și "PG – mică"

Dacă "TPJ este moderată" atunci setăm "PTS – moderat" și "PG – moderat"

Dacă "TPJ este joasă" atunci setăm "PTS – mare" și "PG – mare" sau

"PTS – moderată" și "PG – mare" sau

"PTS – mare" și "PG – moderată"

Dacă "PC este mic" atunci setăm "PTS – mică" și "PG – mare" sau

"PTS – mic" și "PG – moderată" sau

"PTS – moderată" și "PG – mică"

Dacă "PC este moderat" atunci setăm "PTS – moderată" și "PG – moderată"

Dacă "PC este mare" atunci "PTS – mare" și "PG – mare" sau

"PTS – moderată" și "PG – moderată" sau

”PTS –mic” și ”PG – moderată” sau

”PTS –mic” și ”PG – moderată”

Micșorarea presiunii în tubul de sticlă presupune crearea vacuumului, ce duce la ridicarea picăturii față de inductor și, ca rezultat, la răcirea și la schimbarea formei capilarului.

Pentru microfibre cu diametrul mai mare de 30 micrometri poate fi aplicată doar a doua strategie de comandă, deoarece la diametre mari crește semnificativ eroarea de măsurare a rezistenței lineare. Pentru a menține temperatura și geometria picăturii în limitele stabilite se operează cu presiunea în tubul de sticlă. În unele cazuri, dacă este nevoie de o intervenție mai radicală, se modifică și puterea generatorului.

În paragraful 2.2 a fost remarcat faptul că operatorul uman reprezintă un ”regulator” care răspunde „cerințelor” de calitate. Ținând cont de aceasta, putem presupune că sistemul inteligent (Figura 2.14) ar fi bine să reproducă comportamentul operatorului uman de înaltă calificare. Astfel, se dorește captarea și reutilizarea experienței acestuia în procesul de turnare automată.

În acest context, s-a inițiat achiziția și analiza datelor experimentale, ținta fiind experiența și comportamentul operatorului uman de înaltă calificare. În procesul de achiziție și analiza datelor a fost observată tendința operatorului de a utiliza preponderent presiunea în tubul de sticlă ca parametru de reglare a procesului tehnologic. În primă fază s-a dorit confirmarea sau infirmarea funcției de apartenență triunghiulară pentru această variabilă, dar și pentru rezistența lineară, care sunt critice. În acest scop s-a mers pe utilizarea directă a datelor colectate și filtrate sau a setului de date sortat crescător [80].

Utilizând setul de date colectat în procesul de turnare cu scopul de a extrage funcțiile de apartenență caracteristice comportamentului operatorului uman, au fost obținute primele rezultate. Prin prelucrarea setului de date experimentale în mediul MATLAB, s-a obținut graficul pentru funcția de apartenență ce caracterizează variația presiunii în tubul de sticlă (Figura 2.15). Se poate observa o confirmare generală a formei triunghiulare pentru variabila presiune.

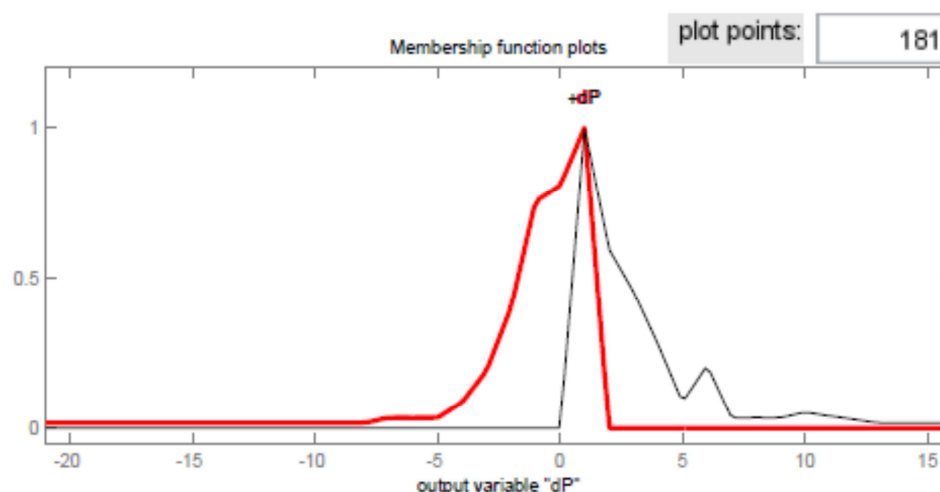


Fig. 2.15. Funcția de apartenență pentru variabila presiune.

Utilizând același set de date s-a obținut graficul pentru funcția de apartenență ce caracterizează intervenția operatorului uman în cazul rezistenței lineare (Figura 2.16). Se poate observa și aici o confirmare, cel puțin parțială, a formei triunghiulare selectate inițial pe baza logicii acțiunii agentului uman.

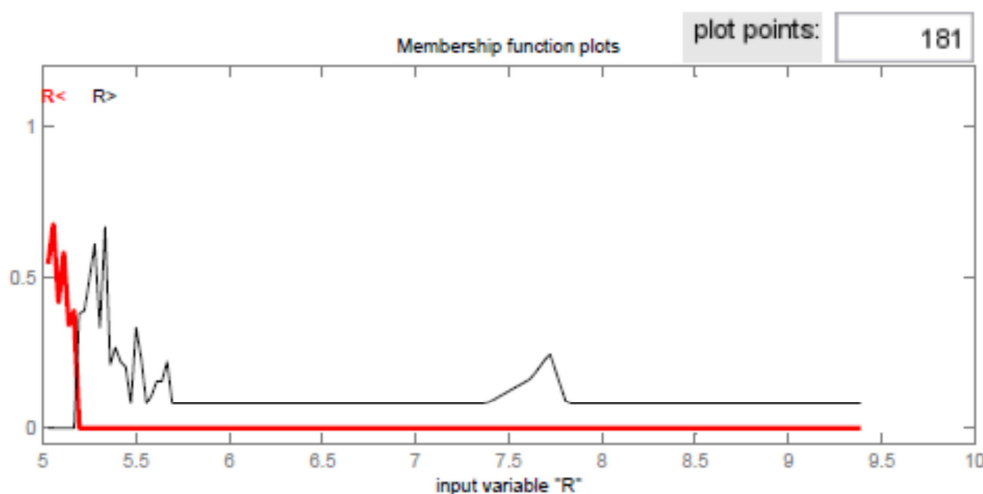


Fig. 2.16. Funcția de apartenență pentru variabila rezistență lineară.

Cercetările teoretice și experimentale în direcția extragerii cunoștințelor operatorilor de înaltă calificare urmează a fi realizate în paralel cu dezvoltarea și implementarea structurii sistemului de comandă și control propuse.

2.5. Implementarea sistemului de procesare a imaginii picăturii pe o platformă încorporată

După dezvoltarea și analiza algoritmilor de procesare a imaginii, a urmat etapa la care a fost portat sistemul de control de pe un calculator personal pe un sistem de calcul adaptat la condițiile industriale. După analiza mai multor platforme de calcul [95-98, 130] a fost selectat un sistem bazat pe nucleul ARM Cortex A15 cu un procesor OMAP-5432 de la *Texas Instruments* [99].

Nucleul acestui sistem îl constituie un SoC care conține (Figura 2.17):

- un procesor SMP (*Symmetric Multi Processor*) cu două nuclee *ARM Cortex A15* care pot funcționa la o frecvență de 1.5GHz;
- două nuclee *ARM Cortex M4*, care formează IPU (*Image Processing Unit*);
- procesor de prelucrare a semnalelor TMS-66xx (DSP subsystem);
- accelerator video – *IVA-HD* (Image and Video High Definition) subsystem;

În afară de procesor sistemul conține:

- Memorie operativă – 2GB DDR3L (MT41K256M16HA-125E - Micron);

- Memorie Flash – 4GB eMMC/iNAND (Sandisk P/N SDIN7DP2-4G);
- Interfața HDMI pentru conectarea unui monitor;
- Două porturi USB 2.0 host, și un port USB 3.0 OTG;
- Un port *Gbit Ethernet*;
- Un Port SATA 2;
- Porturi de expansiune pentru conectarea modulelor externe.

Alimentarea sistemului se face cu o sursă de 5-15V, și consumul constituie 10..17W, ce este cu mult mai puțin în comparație cu un PC Desktop.

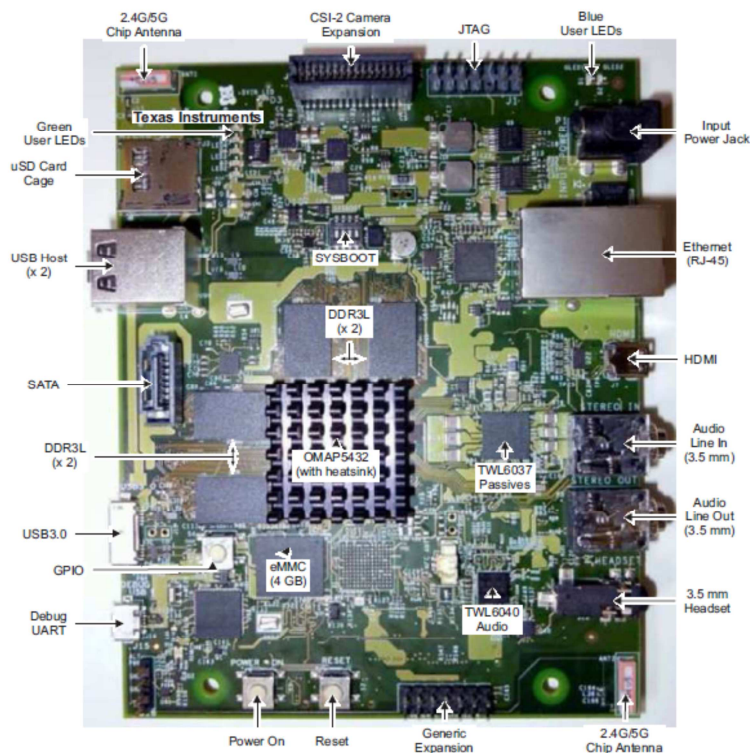


Fig. 2.17. Placa de dezvoltare OMAP5432 uEVM ES2.0 [©Texas Instruments].

În calitate de sistem de operare această platformă suportă Google Android sau Linux. Pentru sistemul dat a fost utilizat Linux Ubuntu. Aplicația a fost elaborată în mediul de dezvoltare Qt IDE [100, 101], care permite compilarea programului din limbajul C++ în cod nativ, pentru platforma specifică. Compilarea se face în două etape – la început programul scris în Qt (cu toate structurile specifice, cum ar fi GUI, blocurile de procesare a evenimentelor, etc.) se translează în cod C, apoi folosind compilatorul pentru platforma ARM - *arm-linux-gnueabi-hf-gcc*, se compilează în cod binar [102, 103]. Pentru achiziția imaginii de la camera video s-a utilizat driverul *v4l2-lib* (Video for Linux).

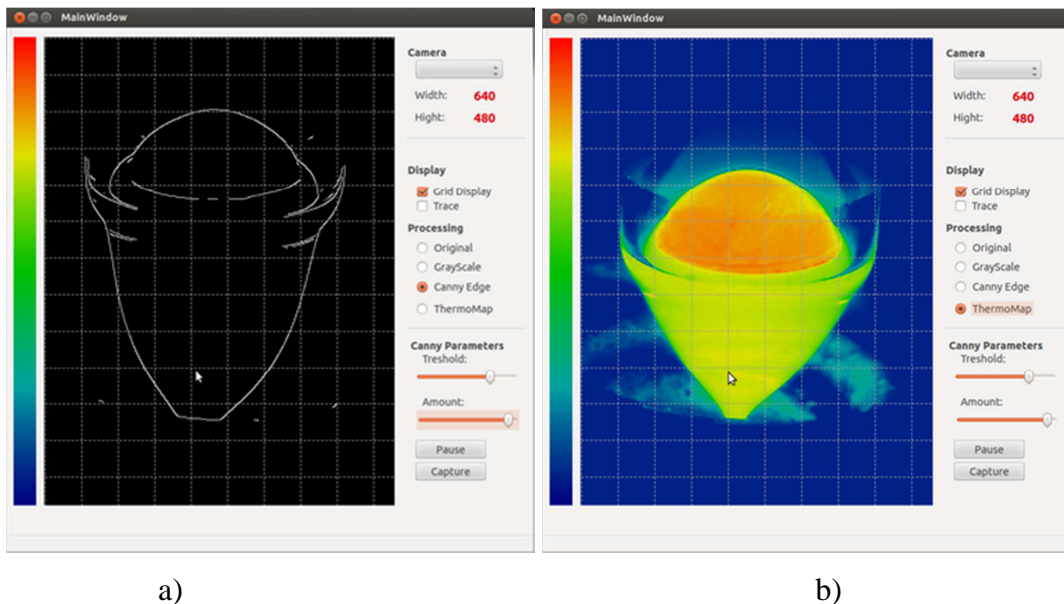


Fig. 2.18. Interfața programului de achiziție a imaginii:
 a) vizualizarea conturului picăturii; b) imaginea în mod termografic.

Deoarece, sistemul dispune de un port *HDMI* la care poate fi conectat un monitor cu rezoluția *FullHD 1920x1080*, afișajul rezultatelor se face pe acest monitor (Figura 2.18). Sistemul dat, spre deosebire de un calculator personal, are o fiabilitate mai mare, dimensiunile mult mai mici, consumul de energie sub 17 W, și în același timp o performanță suficientă pentru sarcina dată.

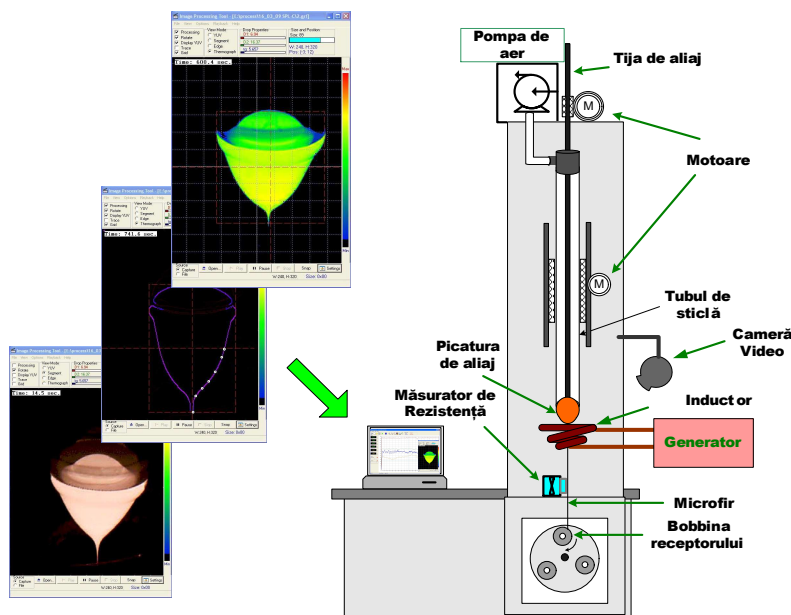


Fig. 2.19. Structura instalației modernizate.

Algoritmii de procesare a imaginii implementați pe platforma tehnologică încorporată au fost inițial testați în cadrul sistemului de achiziție experimental. Astfel, cu toate că platforma tehnologică încorporată se deosebește arhitectural (sub aspect hardware, software, sistem de operare) de sistemul experimental, algoritmii elaborați în mare parte s-au păstrat. Diferența

esențială o constituie doar modul în care se accesează fluxul video de la cameră. Modernizarea instalației de turnare a microfirelor este în curs de realizare conform structurii din Figura 2.19.

Rezultatele intermediare obținute în direcția dezvoltării unui sistem inteligent de comandă și control a procesului tehnologic au fost prezentate la conferințe internaționale [54, 55, 104] și saloane de inovare și transfer tehnologic [105].

2.6. Concluzii la capitolul 2

A fost propusă și dezvoltată conceptual abordarea predictivă în modelarea și comanda procesului tehnologic cercetat. În acest context au fost elaborați algoritmi de procesare a picăturii. A fost elaborat modelul de aproximare a formei picăturii (capilarului) în timp real. A fost analizată acuratețea aproximării formei picăturii.

A fost propusă structura sistemului de comandă și control inteligent care are la bază modelul elaborat îmbinat cu metodele și algoritmi logicii fuzzy. Au fost definite variabilele lingvistice și selectate funcțiile de apartenență, ținând cont de specificul procesului cercetat. Au fost elaborate regulile pentru motorul de inferență și obținute rezultate prelabile ale simulărilor în mediul MATLAB.

Pentru a asigura suportul în luarea deciziilor a fost elaborată o platformă tehnologică încorporată pentru achiziția, procesarea și analiza datelor privind mersul procesului de turnare a microfirului, care are la bază tehnologii hardware și software moderne.

3. SISTEME PENTRU CARACTERIZAREA MICROFIRELOR MAGNETICE ȘI SUPPORT DECIZIONAL ÎN PROCESUL DE PRODUCȚIE

Creșterea indicatorilor de performanță a sistemului de producere a microfiredor este în strânsă legătură cu două aspecte ce țin de: 1) controlul calității microfiredorului după faza de turnare, și 2) furnizarea informației de reacție operatorului pentru ajustarea parametrilor procesului. Al doilea aspect este important și din punctul de vedere al construirii și dezvoltării bazei de cunoștințe și ajustării strategiilor de luare a deciziilor în cadrul sistemului inteligent de comandă și control propus în capitolul precedent. Din aceste considerente elaborarea unor soluții încorporate pentru caracterizarea microfiredorlor magnetice și suport decizional în procesul de producție reprezintă o problemă interconectată cu problematica abordată în capitolul doi.

Aplicarea la scară largă a microfiredorlor a devenit posibilă doar după ce au fost elaborate metode și dispozitive de control a caracteristicilor acestora în timpul fabricării și după fabricare. În procesul de fabricare a microfiredorlor sunt implicate mai multe mijloace de măsurare a caracteristicilor lor, ce asigură calitatea necesară. Cerințele față de calitate/caracteristicile se stabilesc în dependență de aplicația concretă, și deja reieșind din aceste cerințe se stabilește și procedura de evaluare a calității.

Evident, calitatea microfiredorlor este influențată de mai mulți factori, cum ar fi:

- calitatea materiei prime - aliajele, tubul de sticlă;
- construcția și funcționarea corectă a instalației;
- și în mare parte - calificarea și experiența operatorului.

Controlul calității cuprinde mai multe etape. Dacă să ometem faza cu stabilirea componentei și pregătirea aliajelor, atunci următoarea etapă de control a calității (măsurare) se efectuează chiar în timpul, procesului de fabricare pe instalația de turnare. De regulă pe instalație se măsoară rezistența lineară a microfiredorului care se corelează cu diametrul miezului de metal. Însă măsurarea rezistenței lineare poate servi ca un parametru de control doar pentru microfiredor cu caracteristici rezistive, domeniul de aplicare a căror este relativ îngust. Odată cu creșterea diametrului crește și eroarea de măsurare a rezistenței, ceea ce face imposibilă măsurarea rezistenței cu o eroare acceptabilă a microfiredorlor groase. În acest caz devine foarte important factorul uman – experiența operatorului.

În ultimii ani, tot mai întregat pe piață devine microfiredorul cu proprietăți magnetice (bistabile). Pentru caracterizarea acestor microfiredor se utilizează alte metode de caracterizare – în special măsurarea forței coercitive, care poate fi făcută sau în mod static pe unele mostre /fragmente, sau în mod dinamic – în timpul rebobinării microfiredorului de pe o bobină pe alta. Dacă compoziția aliajului și a sticlei sunt stabilite atunci microfiredorurile pot fi caracterizate și prin

măsurarea diametrului miezului de aliaj și a grosimii învelișului de sticlă. Pentru aceasta se folosesc la rând cu sistemele/mijloacele optice clasice (microscopul) și metodele electronice.[106-108]

3.1. Caracterizarea microfiredelor prin măsurarea rezistenței lineare

În practică, la fabricarea microfiredelor din aliaje nemagnetice (rezistive), este suficient de a controla diametrul miezului de metal. La ora actuală sunt cunoscute și utilizate câteva metode non-contact de determinare a diametrului miezului. Cea mai frecvent utilizată metodă non-contact constă în interpretarea unui segment fix de microfir ca o linie de transmitere și determinarea impedanței acesteia [4, 18, 19]. Această metodă permite măsurarea rezistenței lineare și estimarea diametrului miezului în timpul procesului de fabricare. Datorită faptului că măsurarea se face pe instalație în timpul fabricării, pe segmentul de microfir obținut imediat după cristalizare, această metodă poate servi ca feedback pentru operator la luarea deciziilor de conducere a procesului.

Schema structurală de aplicare a acestei metode este prezentată în Figura 3.1.

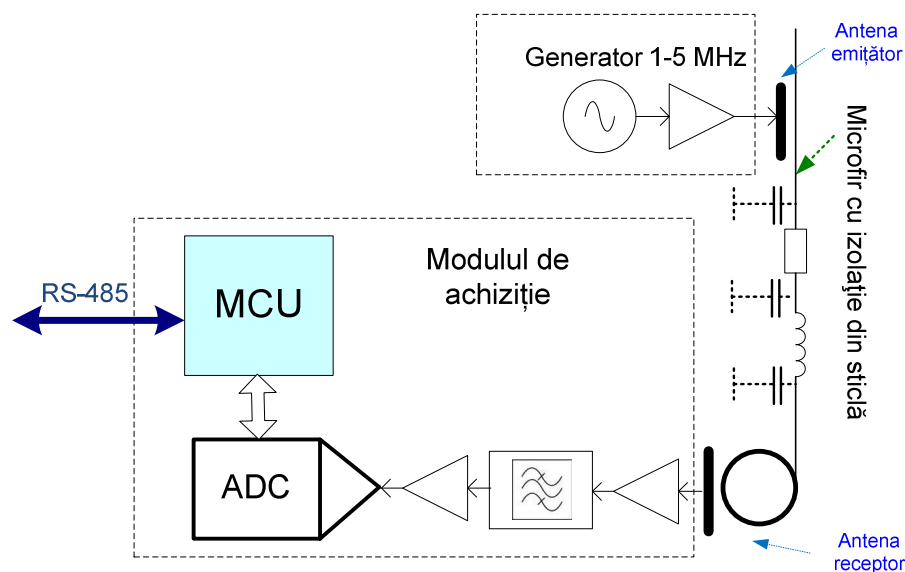


Fig. 3.1. Schema de măsurare a rezistenței lineare a microfiredelor cu înveliș din sticlă.

Schema de mai sus include:

- generator de semnal sinusoidal cu frecvența 5MHz și amplitudinea 35V,
- antena emițătorului, care prin cuplare capacitativă induce curentul alternativ în microfir,
- antena receptorului, care este formată din bobina receptorului pe care și se înbobinează microfirul
- circuitul de achiziție, amplificare, filtrare, digitizare și procesare/afișare.

Antena-emițător are forma de o plăcuță conductor amplasată sub cristalizator în așa mod, încât pe lângă ea este tras microfirul în timpul fabricării. Rolul de antenă-receptor o îndeplinește bobina pe care se înfășoară microfirul. Deoarece în timpul procesului bobina se rotește, ea se cuplează cu schema de achiziție cu ajutorul unui contactor electric.

Microfirul înfășurat pe această bobină poate fi considerat ca o linie de transmisie ce funcționează în gol. Impedanța de intrare a acestei linii poate fi calculată conform relației 3.1:

$$Z_{in} = Z \operatorname{cth} \gamma l = \sqrt{\frac{r + j\omega L}{g + j\omega C}} \operatorname{cth} \sqrt{(\gamma + j\omega L)(\gamma + j\omega C)l} \quad (3.1)$$

unde:

Z – impedanța caracteristică a liniei;

γ - factor de propagare;

r – rezistența liniară kOhm/m;

C – capacitatea lineară;

L – inductanța lineară;

g – conductanța activă;

ω - frecvența circulară;

l – lungimea firului (pe care se face măsurarea).

Dacă neglijăm inductanța firului și scurgerile prin stratul de izolație, deoarece sunt foarte mici putem obține:

$$Z_{in} = \sqrt{\frac{r}{j\omega C}} \operatorname{cth} \sqrt{r\omega C}l \quad (3.2)$$

Calcululele arată că diferența dintre Z_{in} și Z nu depășește 10% în cazul când

$$l \geq \frac{3}{\sqrt{r\omega C}} = l_k$$

unde l_k – lungimea liniei pentru care ea poate fi considerată infinită. Pentru frecvențe mai mari de 1 MHz lungimea l_k nu depășește 0.1m, de aceea putem simplifica formula 3.2:

$$Z_{in} = \sqrt{\frac{r_k}{\omega C_k}} \quad (3.3)$$

unde r_k și C_k – rezistența și respectiv capacitatea medie pe intervalul de măsurare.

Frecvența critică f_0 se determină conform relației 3.4:

$$f_0 = \frac{2.5}{2\pi C_e r l_e^2} \quad (3.4)$$

Reieșind din aceasta, obținem soluția pentru relația 3.1 în forma simplificată pentru cazul când $f < f_0$

$$z = \frac{2}{j\omega C_e l_e} + r \left(\frac{2}{3} l_e + l_p \right) \quad (3.5)$$

Și pentru cazul când $f > f_0$

$$z = 2 \sqrt{\frac{r}{j\omega C_e}} + r l_p \quad (3.6)$$

Componentele active și reactive pot fi determinate din aceste formule. După determinarea rezistenței active, și luând în considerație că lungimea segmentului pe care se face măsurarea este constantă putem determina diametrul microfirului pe segmentul dat.

Rezultatele măsurării sunt afișate în formă grafică, oferind operatorului posibilitatea de monitorizare a diametrului miezului microfirului cu scopul controlului procesului de turnare.

3.2. Caracterizarea microfiredor magneticor cu înveliș din sticlă

La momentul actual pe piață sunt tot mai întrebate microfiredor cu proprietăți magnetice. Noile aplicații în domeniul materialelor de absorbție RF, identificare noncontact, sau diferiți traductori ce se bazează pe schimbările proprietăților/comportamentului a microfiredor au deschis o nouă nișă pentru utilizarea microfiredor. Caracterizarea microfiredor după metoda descrisă anterior nu este întotdeauna eficientă, din cauza aliajelor utilizate la producerea acestor microfiredor.

Pentru majoritatea aplicațiilor, caracterizarea microfiredor feromagnetice se face prin măsurarea a forței coercitive H_c (câmpului coercitiv), care se caracterizează prin intensitatea câmpului magnetic necesar pentru demagnetizarea completă a acestui microfir. Forța coercitivă poate fi determinată din curba de histerezis (Figura 3.2). Din acest punct de vedere se disting materiale magnetice moi, caracterizate printr-un câmp coercitiv mic, și materiale magnetice tari, având un câmp magnetic mare.

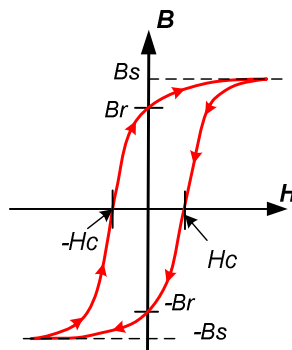


Fig. 3.2. Curba de histerezis specifică materialelor magnetice (la magnetizarea în câmpuri ciclice alternative).

Indirect caracterizarea acestor microfibre se poate face prin măsurare diametrului miezului și a grosimii învelișului din sticlă. Menținerea diametrului este la fel de importantă pentru unele aplicații, deoarece de diametrul miezului depinde cantitatea de material (feromagnetic) într-un segment și ca urmare, unele caracteristici la remagnetizare, spre exemplu, aria impulsului de reacție la un câmp magnetic extern [21-24].

Înainte de a produce un nou tip de microfibre este nevoie de preparat aliajul și de stabilit procesul tehnologic. Pentru menținerea caracteristicilor microfibrului în limitele stabilite de procesul tehnologic, operatorul este nevoit să controleze diametrul miezului și grosimea învelișului de sticlă. Un operator experimentat poate face aceasta urmărind forma picăturii. Modificând presiunea în tubul de sticlă, operatorul schimbă forma capilarului și astfel influențează diametrul miezului, iar variind viteza de avans a tubului - reglează cantitatea de sticlă, ce acoperă miezul. Pentru a avea un feedback, de regulă se fac câteva probe, care apoi trec o serie de măsurări, și astfel operatorul află dacă parametrii care el le-a ales sunt satisfăcătoare sau nu. Aceste măsurări includ măsurarea diametrului și a grosimii sticlei (cu ajutorul microscopului sau cu un dispozitiv specializat), măsurarea forței coercitive H_c în mod static, pe anumite porțiuni, sau în mod dinamic – pe toată lungimea microfibrului.

Caracterizarea complexă a parametrilor microfibrelelor feromagnetice și controlul calității acestora depinde de domeniul de aplicare. Pentru asigurarea parametrilor specificați în unele cazuri este suficient doar de a face câteva măsurări la capetele bobinei și de a analiza diagrama de rezistență lineară, ce se măsoară în timpul tragerii microfibrelelor direct pe instalație.

În alte cazuri, microfibrele sunt verificate în mod postfabricare pe toată lungimea. În cazul dat, se face măsurarea în mod dinamic a câmpului H_c și diametrului miezului pe o instalație specială de rebobinare. Măsurarea în mod dinamic se utilizează pentru separarea microfibrului ce satisface cerințele stabilite de cel neconform. În urma acestor măsurări microfibrul selectat obține un "pașaport", ce confirmă caracteristicile lui, iar restul transmite în rebut.

Teoretic, ar fi mult mai eficient de măsurat câmpul H_c direct în timpul fabricării pe instalație, dar în cazul dat apar anumite probleme. Măsurarea acestor parametri pe instalație în timpul fabricării este complicată de mai mulți factori. În primul rând pentru măsurarea câmpului H_c este nevoie ca firul să treacă printr-un senzor bobină, dar aceasta este imposibil în cadrul procesului tehnologic dat, din cauza că la lansare procesului, operatorul topește aliajul împreună cu sticlă și apoi trage (întinde) o parte de metal cu sticlă topită pe o bobină ce se rotește, și astfel se trage microfibrul din picătura de aliaj. Acest lucru face imposibilă trecere microfibrului prin bobina de măsurare.

Au fost efectuate experimente cu un senzor format dintr-o bobină "deschisă" de o construcție specială, dar din cauza câmpului magnetic neomogen pe această bobină, rezultatele

măsurării depind foarte mult de poziția microfirului. Pe de altă parte măsurarea H_c în timpul procesului este complicată și din cauza câmpului electromagnetic puternic indus de generatorul care topește aliajul ce „împiedică” măsurarea câmpurilor magnetice mici de la senzori. O altă problemă care împiedică măsurarea H_c în timpul procesului este faptul că în timpul tragerii firul se supune unui stres mecanic, ce la fel distorsionează rezultatele măsurării. În unele cazuri microfibrele după fabricare sunt tratate termic, ceea ce poate schimba H_c inițial.

Deoarece forța coercitivă H_c este puternic influențată de grosimea și calitatea învelișului de sticlă este extrem de importantă măsurarea și menținerea acesteia. În acest context au fost propuse noi căi de măsurare parametrilor magnetici a microfivelor [109]. Totodată s-a propus o metodă originală de determinare a diametrului miezului și grosimii sticlei, folosind caracteristicile de transparență optică a componentelor microfivelor. [110, 111]. În baza acestui concept a fost elaborat un prototip care este în curs de dezvoltare-testare [112-119].

Luând în considerație problemele expuse anterior, a fost luată decizia de a propune și implementa în producere soluții încorporate pentru caracterizarea și controlul calității microfivelor feromagnetice în regim postfabricare. Pentru aceasta au fost concepute și elaborate mai multe dispozitive și sisteme specializate, care au fost implementate în procesul de fabricare a microfivelor feromagnetice cu înveliș din sticlă. Unele dintre ele permit măsurarea parametrilor în mod dinamic, în timp ce microfirul este rebobinat de pe o bobină tehnologică pe una de transportare, altele se utilizează pentru măsurări în mod static pe un fragment de microfir.

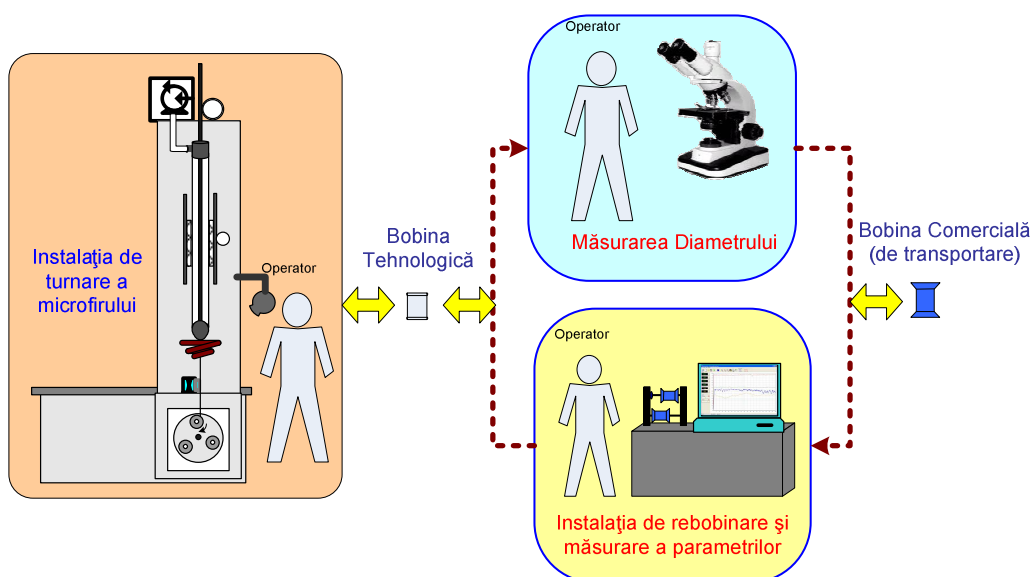


Fig. 3.3. Diagrama procesului de fabricare și control a calității microfivelor.

Schema avansată de fabricare a microfivelor este dată în Figura 3.3 și include dispozitive și sisteme încorporate pentru caracterizarea și controlul calității microfivelor feromagnetice. În

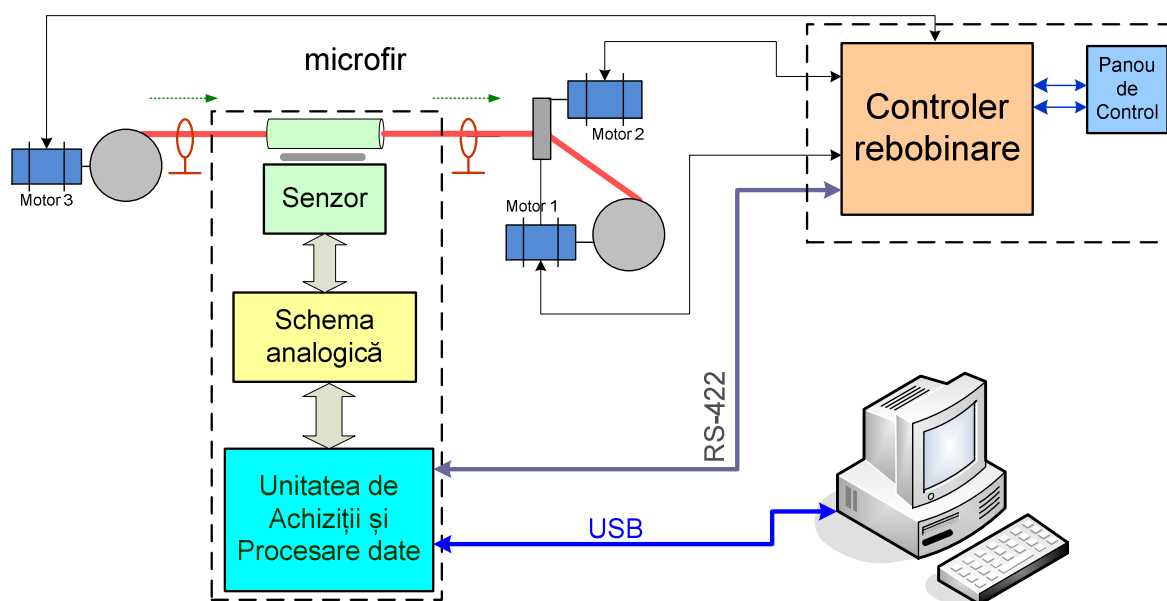
următoarele paragrafele sunt prezentate soluțiile și mijloacele tehnice utilizate în producerea microfirului și dezvoltarea aplicațiilor pe baza acestuia.

3.3. Proiectarea sistemului informațional de caracterizare a microfirilor magnetice în regim dinamic – MAGNUS

Sistemul dat permite măsurarea parametrilor microfirului în mod dinamic cu scopul asigurării controlului calității pe toată lungimea. Controlul se face în timpul rebobinării de pe o bobină tehnologică, adaptată la procesul de turnare, pe o altă bobină, adaptată la condițiile de transportare spre beneficiar.

Implementarea acestui sistem a fost dictată de cerințele impuse de beneficiar, care avea nevoie să fie înregistrată informația despre caracteristicile microfirului pe toată lungimea. Această informație este transmisă împreună cu microfirul propriu zis ca un fișier ce confirmă calitatea acestuia.

Structura acestui sistem este prezentată în Figura 3.4.



3.4. Structura Sistemului de caracterizare a microfirilor feromagnetice.

Fig.

Sistemul de caracterizare include următoarele componente:

- Submodulul de achiziție și procesare a datelor cu un senzor special;
- Subsistemul mecanic de rebobinare cu un controler a motoarelor;
- Calculator personal cu un soft special.

Acest sistem asigură măsurarea în timpul rebobinării microfirului de pe o bobină pe alta cu "aranjarea" acestuia într-un mod special. În timpul rebobinării submodulul de achiziție face măsurările câmpului H_c și transmite rezultatele la un calculator gazdă, prin intermediul interfeței

USB. Datele respective sunt sincronizate cu lungimea microfirului obținută de la submodulul de rebobinare, ceea ce permite localizarea segmentelor de microfibre neconforme. Rezultatele măsurării sunt transmise într-o aplicație specială, care pe lângă afișarea datelor în forma numerică și grafică permite stocarea lor în baza de date. Sistemul dezvoltat permite măsurarea forței coercitive și a diametrului cu precizie 10-15%. Măsurarea parametrilor, respectiv monitorizarea calității este realizată prin rebobinarea și scanarea discretă a microfirului. Viteza de rebobinare poate fi setată de la 0,2 până la 9,5 m/s, iar pasul de rebobinare - 5...1000 μm . Datele achiziționate se afișează sub formă numerică și grafică, iar informația statistică ce conține parametrii, compoziția aliajului, codul operatorului și a instalației pe care a fost fabricat microfirul se stochează în baza de date a sistemului. Baza de date se utilizează atât, pentru corectarea procesului tehnologic, cât și pentru atestarea calității microfibrele la furnizare către beneficiar.

3.3.1. Subsistemul de achiziție

Subsistemul de achiziție elaborat permite măsurarea câmpului H_c a microfirului în timp ce el se mișcă printr-un senzor/bobină. Măsurare se face cu o eșantionare de 500 Hz, ce permite analiza câmpului H_c cu pasul de aproximativ 10 mm, la viteza de rebobinare de 5 m/s.

Structura acestui submodul este prezentată în Figura 3.5. El conține un sintetizator de câmp magnetic alternativ, senzor de câmp magnetic cu amplificator și filtre analogice, convertor analogic/digital și elementul de control pe baza de circuit logic reconfigurabil.

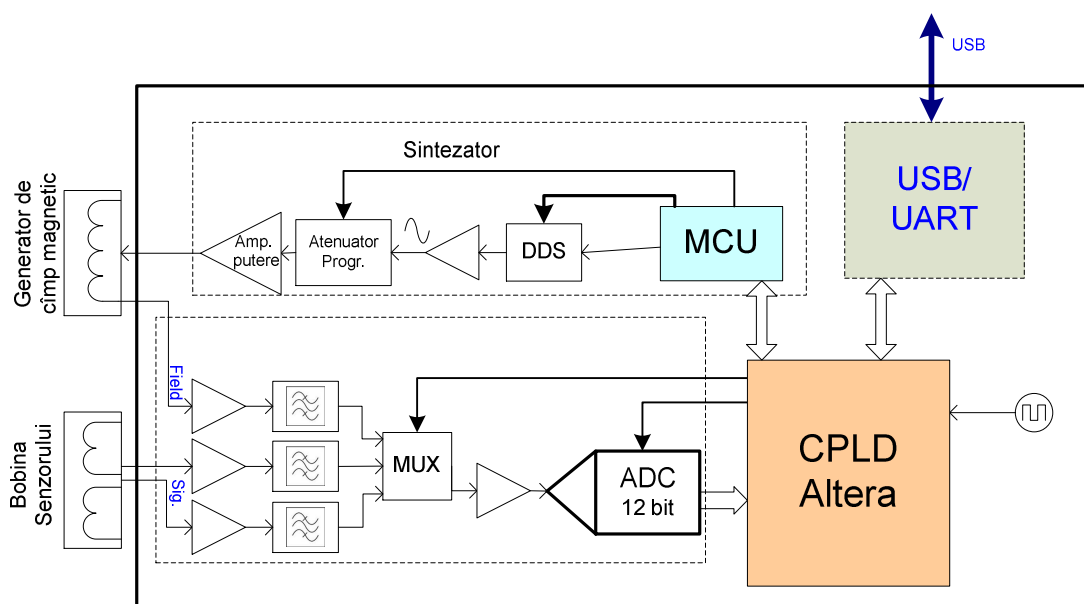


Fig. 3.5. Structura modului de achiziție MAGNUS.

Schema electrică principală și cablajul imprimat a sintetizatorului este prezentată în anexa 1.1 și, respectiv anexa 1.2. Generarea semnalului sinusoidal se realizează cu ajutorul unui circuit

specializat (ASIC) AD9833, care reprezintă un sintetizator direct de frecvență (*Direct Digital Synthesis - DDS*) cu o memorie internă de 1024 eșantioane și convertor digital analogic de 10 biți. Configurarea acestui sintetizator se face prin interfața serială SPI de un microcontroler. Semnalul generat de DDS trece printr-un atenuator programabil (DA2, DA3) cu 8 trepte la fel controlat de microcontroler. Aceasta permite selectarea intensității câmpului magnetic de excitație în timpul măsurării. După atenuator, semnalul trece printr-un filtru trece-jos de ordinul doi cu frecvența caracteristică de 2 kHz, realizat pe microcircuitul DA4A, și printr-un filtru trece-sus, pentru a elimina componenta DC. În final, semnalul obținut este amplificat până la tensiunea necesară de DA4B. Pentru asigurarea curentului necesar pe bobină este utilizat un amplificator de putere (DA5). De la ieșirea amplificatorului de putere semnalul se aplică la o bobină, pe care se generează câmpul magnetic alternativ în timpul măsurării.

Partea de achiziție conține o bobină – senzor. Aceasta bobină este formată din două secțiuni – de măsurare și de compensare. Măsurarea câmpului magnetic a microfirului se face prin scăderea din semnalul de pe bobina de măsurare a semnalului de pe bobina de compensare, cu ajutorul unui amplificator diferențial (instrumental). Pentru minimizarea zgomotului, ce s-ar putea induce în liniile de transmitere, acesta este încorporat nemijlocit în senzor. Semnalul amplificat deja se transmite în submodulul de achiziție. Acest semnal este trecut printr-un filtru ”trece jos” și digitizat de un convertor analogic digital de 12 biți.

Elementul de control este realizat pe un circuit logic reconfigurabil (*CPLD – Complex Logic Programmable Device*), care permite realizarea în timp real a achiziției datelor de la convertorul Analog/Digital, procesarea datelor și transmiterea rezultatelor la un calculator. Utilizarea circuitului reconfigurabil permite modificarea simplă a logicei de funcționare prin încărcarea unei noi configurații. Schema electrică principială și cablajul imprimat sunt prezentate în anexa 1.3 și 1.4.

Măsurarea câmpului H_c se efectuează prin detectarea impulsului de remagnetizare a microfirului și în acel moment, se măsoară amplituda câmpului magnetic de excitație. Amplituda câmpului magnetic se determină prin măsurarea curentului în bobina de excitație.

Măsurarea se face pe ambele semiperioade - pozitivă și negativă. Deoarece pentru achiziție se folosește doar un singur convertor analogic digital, semnalele de intrare sunt multiplexate în timp cu ajutorul unui multiplexor analogic. Pentru testarea și ajustarea ADC-ului se folosește un canal de rezervă, pe care se formează tensiunea de 1.25V.

După achiziție datele sunt împachetate în frame-uri ce conțin valoarea câmpului H_c , diametrul, offset-ul (contorul lungimii) și fanioanele de stare. Fanioanele semnalează microdefectele în microfir, ce se detectează prin lipsa impulsului de remagnetizare.

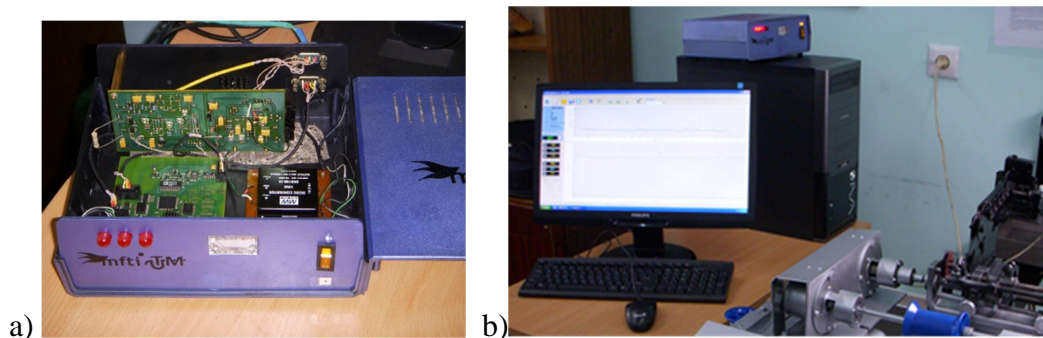


Fig. 3.6. Sistemul MAGNUS.

Subsistemul de achiziție este sincronizat cu subsistemul de rebobinare printr-o interfață diferențială, izolată galvanic. Astfel rezultatele măsurării sunt legate de poziția lor reală pe lungimea microfirului, ce oferă posibilitatea personalului de control să aleagă fragmentele de interes, s-au să scoată în rebut fragmentele, care nu satisfac cerințele impuse.

3.3.2. Subsistemul de rebobinare

Subsistemul de rebobinare asigură rebobinarea microfirului de pe bobina tehnologică pe una de transportare, cu aranjarea acestuia într-un mod special.

Acest subsistem este format din partea electromecanică ce include: suportul, mecanismul de ghidaj, trei motoare de tip BLDC (*Brushless Direct Current Motor*) și un dispozitiv de comandă. Alegerea motoarelor BLDC a fost dictată de necesitatea minimizării zgomotului electromagnetic, caracteristic motoarelor cu perii [120,121]. Totodată aceste motoare oferă o dinamică largă, în cazul dat - 0..5000 rot./min.

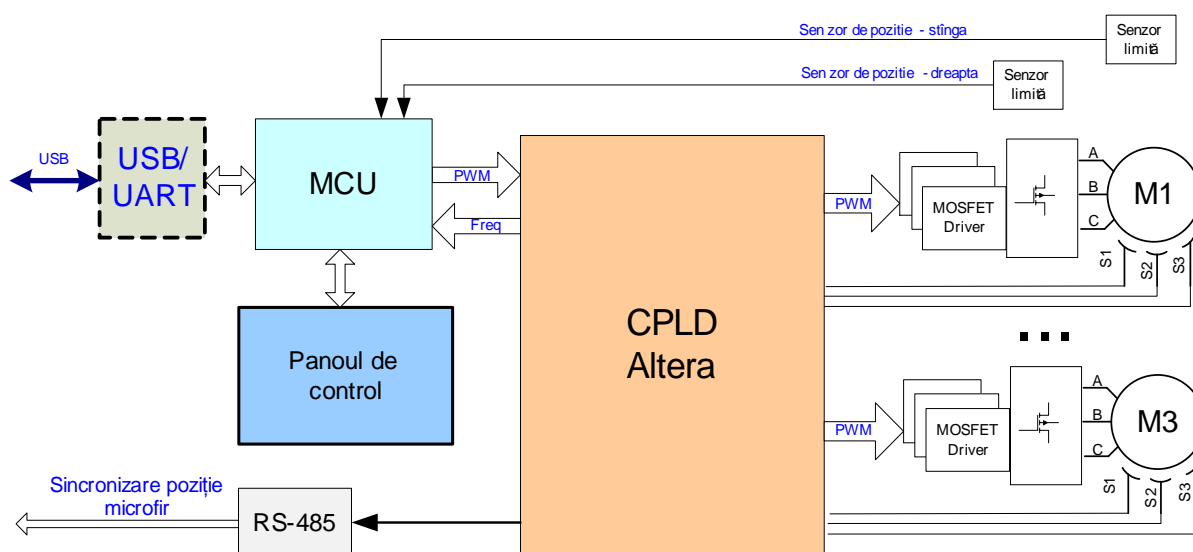


Fig. 3.7. Structura modulului de rebobinare MAGNUS.

Motorul 1 se utilizează pentru acționarea bobinei receptor, pe care se aranjează microfirul pentru transportare spre beneficiar. Al doilea motor acționează un mecanism, care aranjează microfirul pe bobina comercială cu un anumit pas. Motorul 3, ce acționează bobina tehnologică (de pe care se extrage microfirul) este opțional și se utilizează doar la rebobinarea microfiredel de diametrul mare, pentru a împiedica ondulara microfiredelului. În cazul microfiredelului subțire, extragerea de pe bobina tehnologică se face în mod natural, datorită montării perpendiculare a bobinei.

Aranjarea microfiredelului pe bobină-receptor se realizează prin deplasarea unui mecanism de ghidaj. Motorul ce realizează această deplasare este sincronizat cu viteza de îmbobinare, astfel se asigură un pas de aranjare a microfiredelului ce poate fi setat de operator.

Schemele electrice a dispozitivului de control sunt prezentate în anexele 1.5 – 1.9, iar cablajele imprimate – în anexele 1.10 – 1.11.

Funcția principală de control a motoarelor este realizată de un microcontroler ATmega64 din seria AVR. Acest microcontroler măsoară viteza și poziția curentă a motoarelor, și generează semnale *PWM* (*PWM – Pulse Width Modulation*), cu care se modulează curentul în motoare. Pentru stabilizarea vitezei de rotație se utilizează algoritmul PID [46, 123] (*PID-Proportional Integral Derivative*).

Măsurarea vitezei de rotire a fiecărui motor se realizează prin măsurarea perioadei impulsurilor de la senzorii *Hall*. În sistemul dat se utilizează motoare ce generează 36 impulsuri pe o rotație. Aceste semnale sunt capturate de unitatea *ICP* (*Input Capture Unit*) a Temporizatorului/Contorului, încorporat în microcontroler. Perioada impulsurilor de la motor se calculează ca produsul perioadei impulsurilor de ceas a Temporizatorului și numărul de tacte, acumulat în registrul de capturare. Cunoșcând perioada, putem determina viteza de rotire a motorului. După ce a fost măsurată viteza actuală a motorului, se calculează cu ajutorul algoritmului PID, efectul ce trebuie aplicat, pentru a menține rotațiile necesare.

Controlul vitezei de rotație pentru fiecare motor se face prin modulația curentului în motor folosind temporizatoare/contoare încorporate în microcontroler. Însă funcția de comutare pentru fiecare din cele șase tranzistoare din puntea de putere, este realizată pe un CPLD. În dependență de semnalele de la senzorii *Hall* a motoarelor, semnalul de direcție și semnalul *PWM* de la microcontroler. Bloc-diagrama a controlerului pentru un motor este prezentată în Figura 3.8. Descrierea în limbajul AHDL a acestui controler este prezentată în anexa 1.12.

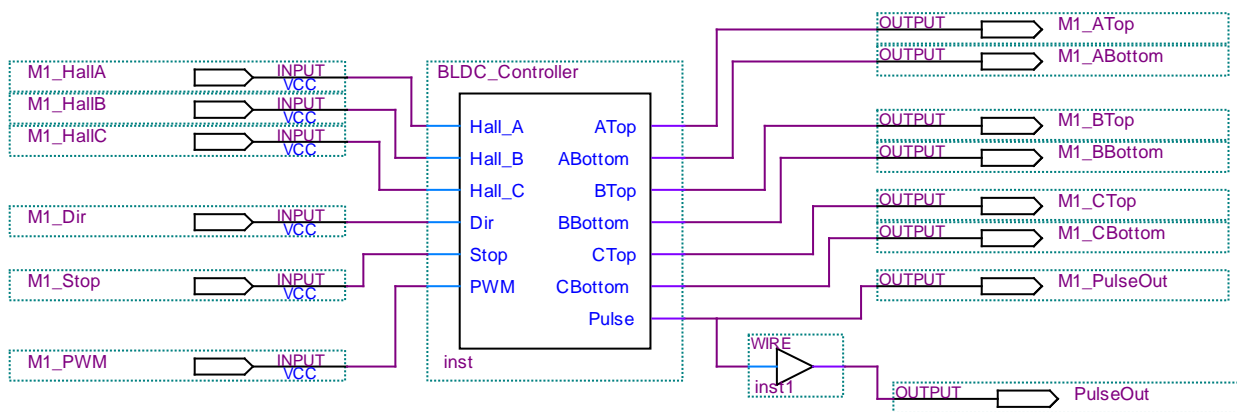


Fig. 3.8. Bloc-diagrama a logicii de control pentru un motor.

Generarea curentului 3-fazat pentru fiecare motor, se realizează prin comutarea a șase tranzistoare MOSFET. În anexa 1.8 este prezentat fragmentul de schemă electrică principală a părții de putere pentru un motor. Cum se vede din schemă, tranzistoarele VT1-VT6 formează trei semipunți pentru fiecare fază. Deschiderea/închiderea tranzistoarelor se face prin intermediul drivere-lor specializate IR2101.

Semnalele de comandă pentru fiecare tranzistor din semipunte se generează de CPLD în dependență de poziția curentă a rotorului și durata impulsului PWM de comandă. Poziția rotorului a fiecărui motor se determină cu ajutorul a 3 senzori Hall, și reieșind din direcția de rotire și secvența de comutare, se determină polaritatea pentru fiecare fază. Astfel microcontrolerul generează pentru fiecare motor semnalele de comandă PWM și direcție, iar logica implementată în CPLD, comutează aceste semnale (PWM) la tranzistoarele din punte, în conformitate cu secvența de comutare. În orice moment de timp, pentru fiecare motor, sunt deschise 2 tranzistoare din punte – unul de sus și unul de jos, astfel încât sunt polarizate două bobine ai statorului. Durata de timp cât sunt deschise aceste tranzistoare determină curentul în bobinele statorului, și respectiv viteza de rotire a rotorului.

Prin implementarea logicii de comutare pe CPLD, a fost redusă semnificativ sarcina îndeplinită de microcontroler. Cu alte cuvinte, pe microcontroler sunt implementate doar funcțiile de nivel înalt, cum ar fi interacțiunea cu operatorul, calculul semnalelor de comandă prin algoritmul PID, iar funcțiile de nivel jos, ce necesită un timp de reacție cât mai mic, au fost realizate pe logică reconfigurabilă. Datorită acestei scheme a fost realizat controlul a mai multor motoare cu resurse minime.

În Figura 3.9 este prezentată o vedere de ansamblu a instalației de rebobinare, iar în figura 3.10 - panoul de comandă a operatorului.



Fig. 3.9. Submodulul de rebobinare.

Comanda și controlul procesului de rebobinare poate fi efectuat de la calculator (din interfața aplicației sistemului) sau direct de pe panoul de comandă a subsistemului de rebobinare. Aceasta permite operatorului să manipuleze cu bobinele/microfirul foarte operativ.

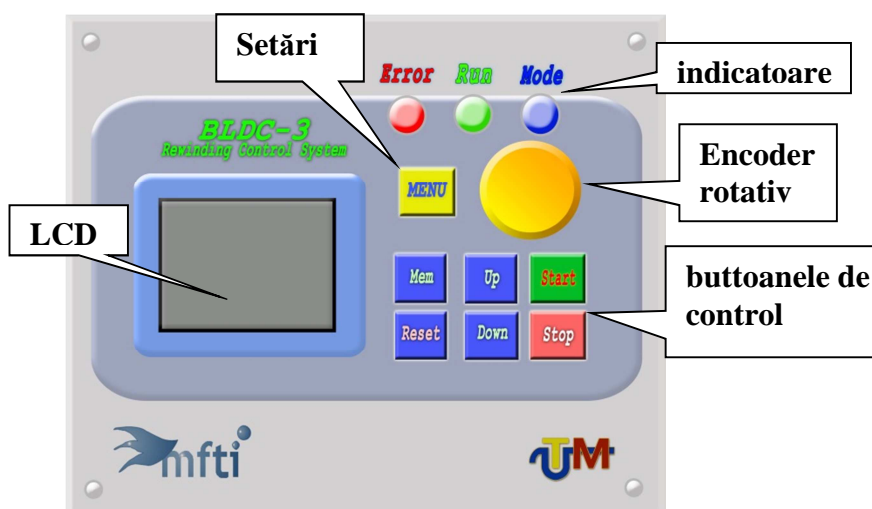


Fig. 3.10. Panoul de control a submodulului de rebobinare.

În timpul rebobinării pe panoul operatorului se afișează următoarea informație:

- Viteza de rebobinare (rot./min. sau m/min.);
- Pasul de îmbobinare a microfirului pe bobină (microni);
- Lungimea totală a firului rebobinat.
- Meniul de comandă a subsistemului de rebobinare

Operatorul poate modifica toate setările respective cum de pe panoul dat așa și din aplicația de pe calculator. Pe lângă funcțiile de bază, operatorul poate folosi operații suplimentare, cum ar fi rebobinarea unui anumit fragment de microfire, întoarcerea mecanismului de ghidaj în poziția inițială, etc.

3.3.3. Elaborarea aplicației de comandă și control

În cadrul acestui sistem a fost elaborat un soft specializat, care permite vizualizarea și stocarea informației primite de la subsistemul de achiziție. Totodată de la calculator se poate face configurarea și comanda părților componente a sistemului. Aplicația a fost elaborată în limbajul C++, folosind mediul de dezvoltare *Borland C++ Builder* [122]. Interfața acestei aplicații este prezentată în Figura 3.11.

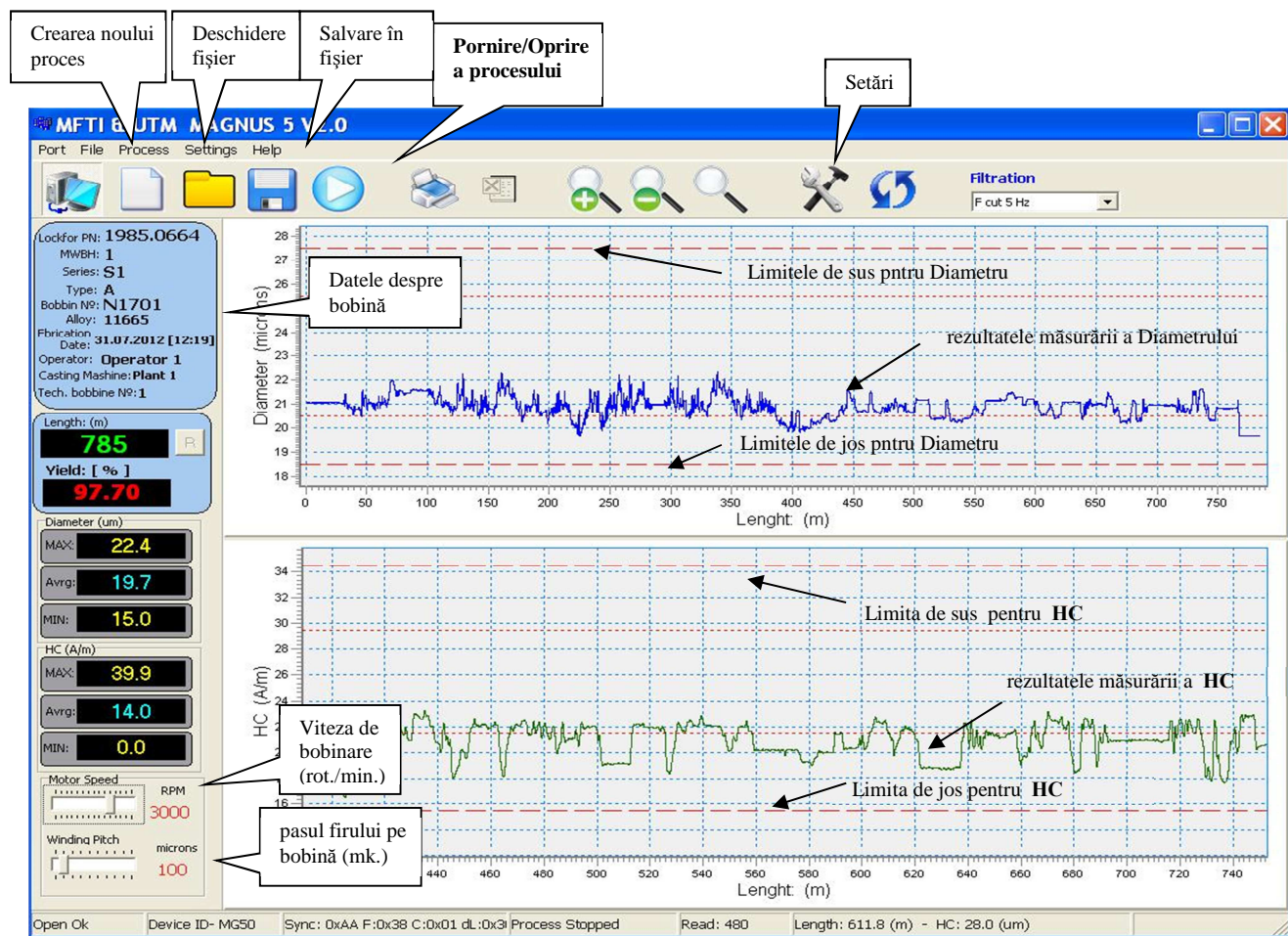


Fig. 3.11. Interfața aplicației de comandă și control a sistemului MAGNUS.

După cum se vede din Figura 3.11, interfața aplicației este divizată în trei zone. Zona de sus conține butoanele de bază, cum ar fi crearea/salvarea/deschiderea unui nou proces de măsurare, pornirea/oprirea măsurării, setarea opțiunilor. În zona din stângă se afișează datele curente de măsurare în forma numerică și informația despre bobina curentă. În partea centrală sunt afișate datele sub forma de grafice, ce se desfășoară pe parcursul procesului de măsurare. Operatorul are posibilitatea de a alege fereastra de vizualizare a graficelor cu scopul evidențierii și analizei anumitor porțiuni.

Aplicația este formată din două fire de execuție. Unul, cu prioritatea maximă, implementează recepționarea datelor prin interfața USB, procesarea și stocarea datelor în fișier

(anexa 1.13). Totodată datele respective sunt transmise către al doilea fir de execuție, care răspunde de afișarea lor și interacțiunea cu operatorul. Procesarea fiecărui pachet de date include verificarea limitelor și filtrarea digitală pentru o vizualizare mai comodă. În versiunea curentă a sistemului MAGNUS sunt implementate cinci filtre digitale trece-jos de ordinul patru [56] cu frecvențele respective 1Hz, 3Hz, 5Hz, 10Hz și 15Hz (anexa 1.14). Operatorul poate alege oricare din aceste opțiuni.

Cu ajutorul acestei aplicații operatorul poate iniția un nou proces de măsurare, vizualizare și analiză prin intermediul căruia se introduc următoarele informații:

- data și ora fabricării microfirului;
- numărul instalației și identificatorul operatorului care a turnat acest microfir;
- codul și componența aliajului;
- identificatorul unic al bobinei.

În afară de aceasta, operatorul alege tipul microfirului, și reieșind din aceasta aplicația alege automat profilul procesului, care definește criteriile utilizate la luarea deciziilor de conformitate. Limitele respective sunt afișate în fereastra grafică și oferă o vizualizare comodă a datelor. La apariția diferitor situații excepționale, cum ar fi depășirea limitelor impuse, ruperea microfirului, etc. aplicația generează mesaje sonore pentru atenționarea operatorului și/sau oprește rebobinarea.

Sistemul informațional de măsurare a parametrilor microfiredor a fost conceput ca un instrument de suport decizional în procesul de control a calității. El asigură măsurarea parametrilor microfiredor fabricate prin rebobinare și monitorizarea calității acestora în conformitate cu cerințele impuse de beneficiar.

În urma rebobinării informația respectivă se afișează pe ecranul calculatorului sub formă numerică și grafică. Totodată ele se stochează într-o bază de date. Pe lângă parametrii microfirului în baza de date se acumulează și statistica ce conține codul aliajului, codul operatorului uman și a instalației pe care a fost turnat acest microfir, etc. Datele acumulate sunt analizate și se utilizează pentru corectarea procesului de turnare a microfirului, dar și ca informație ce atestă calitatea microfiredor în timpul transmiterii lor la beneficiar.

3.3.4 Subsistemul grafic de vizualizare a rezultatelor măsurării

Subsistemul proiectat este format din trei module: coprocesorul grafic (pe baza circuitului ATmega-128), unitatea de interfață (pe baza de CPLD ALTERA EPM-1270) și circuitul

Controler Display Grafic - MB86290A (FUJITSU) [125]. Figura 3.12 reflectă structura Subsistemului Grafic.

Coprocessorul grafic primește datele prin intermediul interfeței seriale USART (*Universal Sincron Asincron Receiver Transmitter*). În sistemul de măsurare datele vin de la unitatea centrală de procesare, care efectuează achiziția și procesarea datelor.

Funcția de bază a coprocessorului grafic este efectuarea legăturii cu unitatea de achiziție și dirijarea cu controlerul grafic. El interpretează comenzile ce vin prin interfața serială și formează instrucțiuni pentru controlerul grafic. Setul de comenzi include la rând cu funcții primitive de desenare a liniilor, textului, setarea culorii ș.a., funcțiile de nivel înalt, cum ar fi recepția unui bloc de date și afișarea acestor date în formă numerică și grafică cu deplasarea ecranului, axelor etc. Implementarea funcțiilor primitive ușurează suficient proiectarea și depanarea sistemului. Pentru aceasta subsistemul se conectează la un calculator personal. După depanare aceste funcții au fost încorporate în coprocessor ca comenzi de nivel mai înalt cum ar fi afișarea unui bloc de date sau afișarea meniului.

Pentru interconectare între coprocessor și controler grafic a fost utilizat un circuit CPLD (*Complex Programmable Logic Device*). În acest circuit a fost realizată o punte între o magistrală de 16 biți din partea microcontrolerului ATmega-128 și o magistrală de 32 biți din partea controlerului grafic. Magistrala controlerului grafic este o magistrală sincronă ce poate atinge o frecvență de până la 100MHz. În subsistemul dat frecvența acestei magistrale este egală 50 MHz, deoarece viteza maximă de comunicare oricum este limitată de coprocessor, ce funcționează la frecvența de 16 MHz.

Diagrama de timp a cuplului Coprocessor-Controler grafic este prezentată în Figura 3.13. Proiectarea și simularea a fost realizată în mediul de proiectare QUARTUS al companiei ALTERA. Deoarece din partea coprocessorului se utilizează o magistrală de 16 biți dar controlerul grafic acceptă doar cuvinte de 32 biți toate tranzațiile de citire/scriere se efectuează în patru faze. Începutul tranzației este indicat de semnalul *MCU_BS*, tipul tranzației scriere/citire – de semnalul *WnR* respectiv “1” – scriere, “0”- citire din controler grafic. Faza de date/adrese este indicată de semnalul *DnA*.

În timpul operației de citire, la prima fază în porturile PORTF și PORTC se înscriu cei mai puțin semnificativi 16 biți de adresă ce se sincronizează cu semnalul *SYNC_LM*, apoi la faza a doua, tot în porturile acestea se înscriu cei mai semnificativi biți de adresă, fiind sincronizați cu semnalul *SYNC_MH*. Aceasta lansează automatul ce efectuează ciclul de citire a unui cuvânt de 32-biți din controlerul grafic, ce se stochează temporar într-un registru în CPLD. Sfârșitul operației este indicat coprocessorului prin intermediul semnalului *MCU_RDY*. După aceasta coprocessorul poate citi cuvântul de date din CPLD, la fel în două etape.

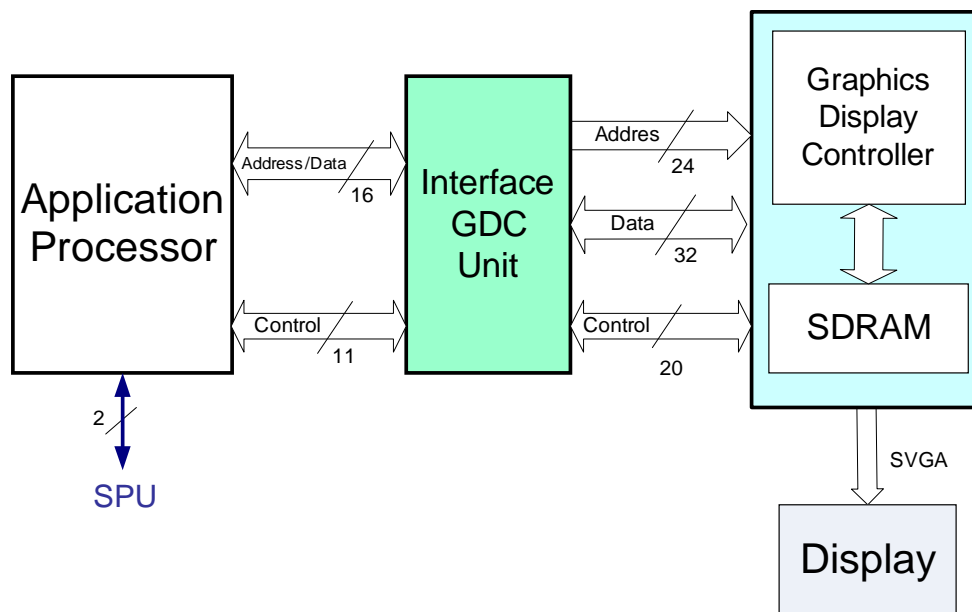


Fig. 3.12. Structura Subsistemului Grafic.

Scrierea se face la fel în patru faze – la primele două faze se înscrie adresa ce se sincronizează cu semnalele *SYNC_LM* și *SYNC_MH* în timp ce semnalul *DnA* = “1”, apoi semnalul *DnA* se inversează și se înscriu 32-biți de date, fiind strobate cu semnalele *SYNC_LM* și *SYNC_MH*.

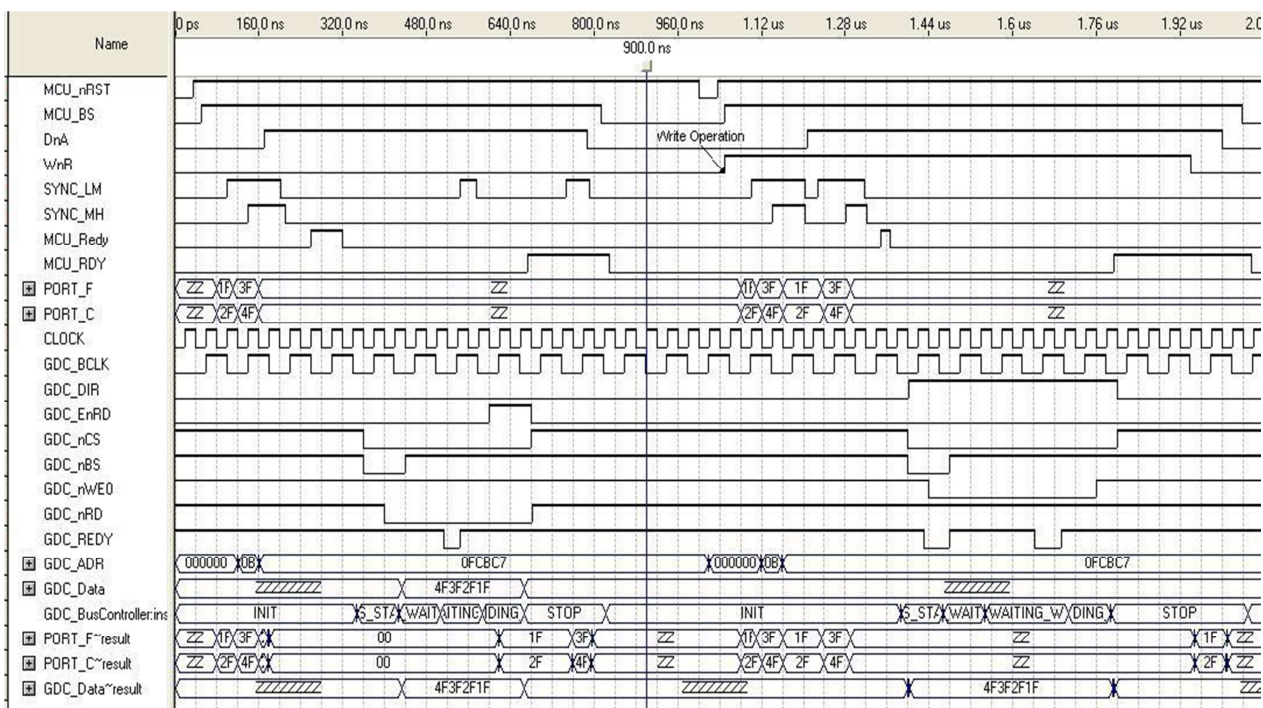


Fig.3.13. Diagrama de timp a cuplului Coprocesor-Controller grafic.

Controlerul grafic include un set de registre, prin care se configurează rezoluția, numărul de straturi, originile memoriei video pentru toate paginile ș.a.

Primitivele grafice pot fi implementate sau prin intermediul registrelor speciali sau prin intermediul unor comenzi. Aceste comenzi se înscriu într-un spațiu de memorie special. Acest spațiu este organizat ca un bufer *Fi-Fo* de comenzi și parametri – *DisplayList*. Nucleul grafic extrage comenzile și parametrii respectivi ce au fost înscrise în acest bufer și le interpretează, desenând în memoria video obiectele respective, copiind imaginea dintr-o zonă în alta sau modificând frame-ul activ.

Nucleul grafic include funcții 2D: *Point*, *Line*, *Triangle*, *Fast2DLine*, *Fast2DTriangle*, *Poligon*, *BLT*, și funcții 3D: *Point*, *Line*, *Triangle*. În afară de acesta sunt incluse un șir de funcții de desenare a texturilor, filtre: *Anti-aliasing*, *Alpha blending*, *Shading*.

Evaluarea performanțelor a subsistemului grafic

Pentru sistemul dat de măsurare un parametru critic este timpul de afișare a unui nou bloc de date. De aceea a fost evaluată performanța a subsistemului grafic.

Timpul de interpretare a unei instrucțiuni de către coprocesorul grafic este formată de următoarele componente:

Citirea registrului de stare a *Fi-Fo*, pentru a testa dacă buferul *DisplayList* nu este supraîncărcat;

În caz dacă buferul nu este plin atunci în el se înscrie următoarea comandă sau parametru, altfel se repetă etapa de citire a registrului de stare.

Fiecare operație de citire/scriere este formată din patru faze menționate anterior. Durata acestor operații însă depinde de Unitatea de Interfață a Controlerului Grafic – câte cicluri de așteptare (*Wait State*) vor fi înserate în timpul înscrierii/citirii a unui cuvânt de CPLD.

Evaluarea este complicată de faptul că performanța subsistemului depinde în mare parte de viteza de interpretare a nucleului grafic a comenzilor înscrise în *DisplayList*. De aceea pe lângă evaluarea teoretică a fost efectuată și măsurarea timpului real de execuție a unor operații de bază.

Măsurările au fost efectuate utilizând un *Timer/Counter* din cadrul coprocesorului grafic. Luând în considerație că acest *Timer* funcționează la frecvența de 16 MHz precizia obținută va constitui 62.5 nSec. Pentru aceasta, înaintea execuției a funcției respective timerul era resetat, iar la sfârșitul execuției valoarea timerului era transmisă către PC, unde într-un program special era calculat timpul real. Rezultatele acestor evaluări sunt prezentate în tabelul 3.1.

Tabel 3.1. Timpurile de execuție unor funcții de bază

Denumirea subrutinei	Timpul de exec. (μsec)	Funcția
GDC_SetFontSize(char size)	20	Setarea dimensiunii a simbolurilor (normal / x2)
GDC_LineStyle(char w,char style)	20	Setarea stilului și grosimii liniilor
GDC_PrintChar(int x, int y, char c)	200	Afișarea unui simbol cu coordonatele x și y
GDC_TextOut(int x, int y, char *p)	200*length	Afișarea unui șir de caractere
GDC_SetColor(char bc, char fc)	40	Setarea culorii
GDC_FillRect(int x0, int y0, int w, int h)	60	Umplerea regiunii dreptunghiulare cu o anumită culoare
GDC_Line(int x0, int y0, int x1, int y1)	50	Desenarea liniei
GDC_Shift(void)	10	Deplasarea ecranului
GDC_BitBlt(int x0, int y0, int x1, int y1, int w, int h)	50	Copierea regiunii dreptunghiulare
GDC_SetFrame(char fr)	80	Setează fereastra activă

În afara măsurării timpului de execuție a funcțiilor grafice au fost efectuate și unele evaluări mai detaliate pentru a depista „locurile înguste”. În special a fost evaluat numărul de cicluri de așteptare în timpul tranzacțiilor de citire/scriere între CPLD și Controlerul Grafic, și numărul ciclurilor de așteptare din cauza că buferul de comenzi *DisplayList* este supraîncărcat. Rezultatele acestor evaluări au arătat că viteza de execuție este în mare parte limitată de viteza de execuție comenzilor din *DisplayList* de către nucleul grafic. Schimbul de date între coprocesor și Controlerul Grafic puțin influențează aceste performanțe deoarece numărul de cicluri de așteptare în timpul tranzacțiilor citire/scriere nu depășește 3-5.

În lucrare se propune o realizare a subsistemului grafic pentru un sistem de măsurare. Acest subsistem având o ieșire VGA poate fi utilizat pentru afișarea informației grafice și text pe orice monitor cu o rezoluție 1280x1024. Datorită arhitecturii sale specializate sistemul atinge o performanță înaltă de procesare și stocare a informației capturată de senzori, care nu a putut fi obținută de sistemele bazate pe un PC. Acest sistem lucrează autonom fără calculator ce sporește suficient gradul de fiabilitate și înlătură neajunsurile legate de deservire a calculatoarelor personale.

Ca obiective pentru cercetările viitoare se prevede trecerea funcțiilor de bază de desenare pe logica CPLD. Aceasta ar permite eliberarea semnificativă a resurselor microcontrolerului pentru realizarea altor funcții și ar micșora schimbul de date între microcontroler și CPLD. La

rândul său aceasta ar permite de a mări suficient frecvența magistralei a GDC. Mai mult ca atât, circuitul CPLD utilizat are integrat pe chip 8K User Flash Memory, în care poate fi păstrată mapa de caractere, ce ar spori suficient viteza de afișare a informației text.

Subsistemul elaborat este descris în [124].

3.4. Dispozitiv autonom de măsurare a diametrului microfiredelor magnetice

Măsurarea diametrului face parte din procesul de control a calității. Pentru a spori viteza de procesare a microfiredelor, în scopul reducerii timpului și automatizării procesului de caracterizare, a fost elaborat un dispozitiv specializat care permite măsurarea diametrului miezului microfiredelor

Măsurarea se face prin metoda inductivă, integrând aria impulsului de remagnetizare a microfiredului într-un câmp magnetic alternativ (Figura 3.14). Pentru o anumită configurație a bobinei senzorului, aria acestui impuls va fi proporțională cu volumul materialului feromagnetic, în care a avut loc remagnetizarea.

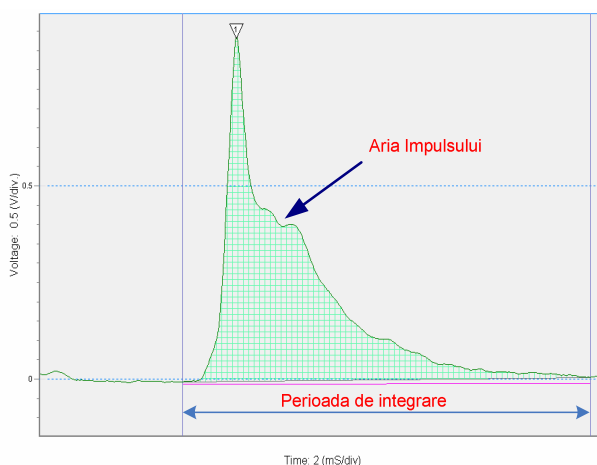


Fig. 3.14. Exemplu de semnal la măsurarea diametrului microfiredelor.

Dispozitivul elaborat este format din două module:

- 1) Modulul senzorului, care include bobinele de măsurare (senzorul) cu schema analogică de preamplificare și filtrare a semnalului;
- 2) Modulul de măsurare propriu-zis, format din generatorul câmpului magnetic alternativ și schema de achiziție a datelor cu prelucrare numerică a semnalelor pe bază de microprocesor.

Schema de structură a dispozitivului este prezentată în Figura 3.15.

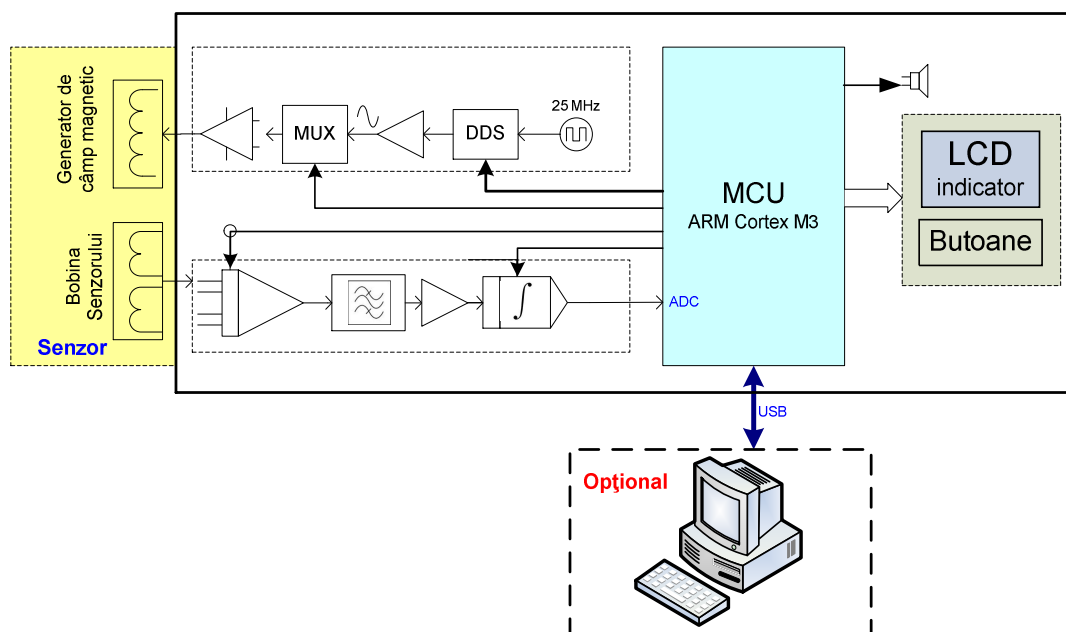


Fig. 3.15. Structura dispozitivului numeric de măsurare a diametrului microfiredor.

Modulul senzorului conține bobina de excitație, care generează câmpul magnetic alternativ și bobina de măsurare. Bobina de măsurare este formată din două părți – partea de măsurare și de compensare. Pentru minimizarea zgomotului care ar putea fi indus în linia de transmitere, amplificarea semnalului se realizează în modulul senzorului, cu ajutorul unui amplificator diferențial. După amplificare semnalul este transmis spre modulul de măsurare.

Elementul de control este implementat pe un microcontroler ARM CortexM3 [30] (DD1). Schema electrică principială este prezentată în anexa 2.1, iar cablajul imprimat – în anexa 2.2. Microcontrolerul comandă un sintetizator de frecvență DDS (DA1), care generează un semnal sinusoidal. Deoarece acest semnal sinusoidal are o amplitudă de 0.35V, el este amplificat cu ajutorul amplificatoarelor DA3, DA4. Multiplexorul DA2 se folosește pentru setarea amplitudinii câmpului de excitație. Amplificatorul de putere ce asigură curentul necesar în bobina de excitație este implementat pe microcircuitul DA5.

Câmpul magnetic alternativ provoacă remagnetizarea microfiredorului (probei). Cu ajutorul bobinei-senzor se măsoară câmpul magnetic a microfiredorului. La măsurarea câmpului de remagnetizare a microfiredorului se folosește un amplificator diferențial care scade din tensiunea pe bobina de măsurare tensiunea de pe bobina de compensare. Acest semnal este integrat și transmis la modulul de achiziție. Rezultatul integrării este digitizat cu ajutorul ADC-ului încorporat în microcontroler. Valoarea diametrului miezului se determină cu ajutorul relației 3.1.

$$d = \sqrt{(V_{in} - V_{offset}) * K_r} \quad (3.1)$$

unde:

V_{in} – tensiunea măsurată pe integrator,

V_{offset} – compensarea zgomotului integrat de integrator,

K_r – coeficientul determinat de compoziția aliajului,

Rezultatele măsurării se afișează pe un ecran LCD. Totodată, dispozitivul poate fi conectat la un calculator gazdă, cu afișarea rezultatelor pe monitorul calculatorului sau pentru a automatiza introducerea rezultatelor măsurării.

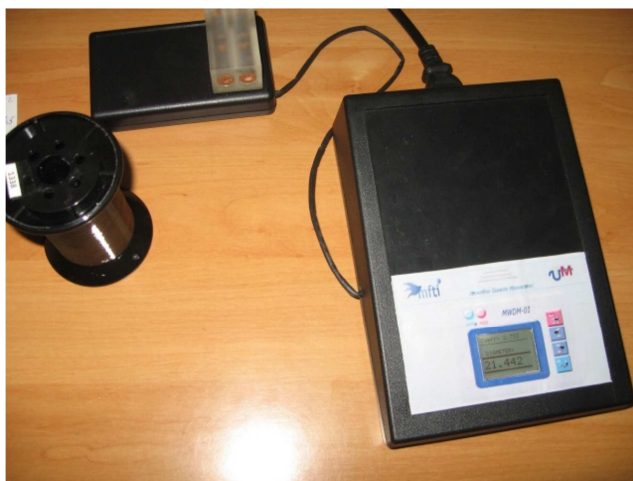


Fig. 3.16. Dispozitivul numeric de măsurare a diametrului microfivelor.

Dispozitivul permite măsurarea diametrului miezului microfivelor cu izolație din sticlă în diapazonul $[10...30] \mu m$ cu posibilitatea extinderii intervalului de măsurare până la $100 \mu m$. Eroarea introdusă nu depășește $0.5 \mu m$ în diapazonul de măsurare. Spre deosebire de măsurarea cu ajutorul microscopului, în cazul dat procedura se petrece mult mai repede, deoarece nu este nevoie de pregătiri speciale. Pentru a face măsurarea operatorul alege tipul microfivelor (aliajul) plasează proba în senzor, după ce pe ecran apare rezultatul. La măsurarea miezului cu ajutorul microscopului este necesar de eliminat învelișul din sticlă, și după aceea se iau măsurile a diametrului miezului.

3.5. Concluzii la capitolul 3

A fost proiectat, fabricat și ulterior implementat în premieră un sistem informațional de măsurare a parametrilor microfivelor magnetice, care a fost conceput ca un instrument de suport decizional în procesul de control a calității microfivelor (sistemul permite operatorului uman luarea deciziilor și corecția procesului tehnologic în regim on-line), fiind constituit din: calculator personal pe care este rulată aplicația; subsistem complex de măsurare a forței coercitive și diametrului microfivelor și subsistem electromecanic de rebobinare a microfivelor. Sistemul elaborat permite măsurarea forței coercitive și a diametrului cu precizia 10-15%.

Măsurarea parametrilor, respectiv monitorizarea calității este realizată prin rebobinarea și scanarea discretă a microfirului. Viteza de rebobinare poate fi setată de la 0,2 până la 9,5 m/s, pasul de rebobinare - 50...500 μm . Datele achiziționate se afișează sub formă numerică și grafică, iar informația statistică ce conține parametrii, compoziția aliajului, codul operatorului și a instalației pe care a fost turnat microfirul se stochează în baza de date a sistemului. Baza de date poate fi utilizată pentru atestarea calității microfiredelor la furnizare către beneficiar.

Sistemul informațional de măsurare a parametrilor microfiredelor magnetice a fost prezentat la diverse saloane de inovare și transfer tehnologic [126-129].

A fost elaborat și confecționat un dispozitiv autonom de măsurare a diametrului miezului microfiredelor magnetice, implementat în procesul de caracterizare a microfiredelor cu înveliș din sticlă și dezvoltare de noi aplicații. Dispozitivul elaborat permite măsurarea diametrului miezului microfiredelor cu izolație din sticlă în diapazonul [10...30] μm cu posibilitatea extinderii intervalului de măsurare până la 100 μm . Încercările experimentale au confirmat funcționalitatea dispozitivului în diapazonul [10...30] μm . Eroarea introdusă nu depășește 0,5 μm în diapazonul de lucru. Dispozitivul este format din două componente: 1) bobinele de măsurare cu schema analogică de amplificare/filtrare a impulsului de răspuns al microfirului în câmp electromagnetic alternativ și 2) subsistemul de achiziții date cu prelucrare numerică a semnalelor pe bază de microprocesor. Valoarea calculată a diametrului miezului se afișează pe un ecran LCD. La dorință, dispozitivul poate fi conectat la un calculator gazdă, cu afișarea rezultatelor pe monitorul calculatorului.

Dispozitivul elaborat se caracterizează prin precizie și veridicitate ridicată comparativ cu estimarea vizuală la microscop, datorită eliminării efectelor optice cauzate de variația grosimii sticlei. Reducerea substanțială a timpului de măsurare-analiză a microfiredelor cu izolație din sticlă reprezintă un alt avantaj important.

Rezultatele obținute în cadrul acestui capitol permit dezvoltarea, cercetarea și lansarea noilor tipuri de microfiredede magnetice pentru diferite aplicații.

4. SOLUȚII ÎNCORPORATE PENTRU APLICAREA AVANSATĂ A MICROFIRELOR MAGNETICE

Aplicațiile cu microfiri sunt într-o continuă creștere. Datorită evoluției mijloacelor de calcul incorporate, ce oferă suficientă performanță pentru efectuarea procesării semnalelor, se extinde și aria de utilizare a microfiredor. Aplicarea la scară largă a microfiredor la început era legată cu confecționarea rezistoarelor de precizie înaltă și a fuzibilelor. Datorită izolației din sticlă, din microfiri se mai confecționau microbobine. Odată cu lansarea producerii microfiredor din materiale cu proprietăți magnetice aria de aplicare a crescut considerabil. Evident, pentru a avea un ciclu de producere complet, pe lângă cercetarea și dezvoltarea noilor tipuri de microfiri, este nevoie de dezvoltat și noi dispozitive, soluții hardware și software pentru aplicații finale. Cu alte cuvinte, succesul comercial în industria de producere este determinat nu doar de microfiri ca materie primă, dar și de "suportul aplicativ", care la rândul său și dictează cererea de microfiri pe piață.

Printre aplicații cu microfiri pot fi enumerate următoarele:

- **Rezistoare de precizie înaltă.** În baza microfiredor se produc divizoare de tensiune înaltă [2, 3, 16] (până la 100 kV), ce se caracterizează de valoarea mică a coeficientului de temperatură și tensiune (nelinearitate). Parametrii acestor divizoare sunt net superioare celor ai transformatoarelor de tensiune, utilizate la măsurarea tensiunii. Masa divizoarelor rezistive este de 4-5 ori mai mică decât a transformatoarelor de tensiune de aceeași clasă de precizie.
- **Materiale absorbante a undelor RF.** Datorită efectului GMI (Giantic Megneto-impedante) pentru anumite frecvențe [12,131-133]. Astfel de materiale sunt confecționate sub formă de țesături din microfiri în combinație cu a alte fibre polimerice sau metalice.
- **Senzori de tensiune mecanică.** Funcționarea astfel de senzori se bazează pe faptul că sub influența stresului mecanic la microfiri magnetice se schimbă valoarea câmpului H_c . Un avantaj în plus – forța H_c poate fi măsurată prin metoda non-contact, ce permite monitorizarea stresului în diferite construcții în care au fost implantate microfiri.
- **Senzori de temperatură.** La momentul actual este organizată producere de termocuple folosind microfiri, care se deosebesc prin dimensiuni foarte mici. Un alt domeniu de perspectivă, care la moment se află la etapa de cercetare, reprezintă senzori de temperatură non-contact. În astfel de senzori se folosesc două microfiri, unul cu punctual de temperatură *Curie* mult mai mare ca temperatura ce se măsoară, iar al doilea microfiri se face din aliaj cu temperatura Curie apropiată de diapazonul de măsurare. Atunci când temperatura senzorului se apropie de punctual de temperatură *Curie*, al doilea microfiri

parțial își pierde proprietățile magnetice. Aceste schimbări se manifestă prin micșorarea ariei impulsului de remagnetizare al celui de al doilea microfir. Primul microfir cu punctul de temperatura Curie mult mai mare de diapazonul de măsurare, nu își schimbă proprietățile și servește ca referință.

- **Sisteme de identificare pe baza de microfire.** În baza de microfire pot fi confecționate etichete (marchere) unicate [134, 135], care pot păstra anumite informații (coduri) pe o durată îndelungată și în condiții extreme (temperatură, umiditate, medii agresive). Proprietățile unicate a microfirelor magnetice pot fi utilizate la construirea sistemelor de identificare, securitate, combaterea producerii contrafăcute etc. Spre deosebire de sistemele existente cum ar fi *RF-ID*, etichetele pe bază de microfir au dimensiuni și preț mult mai mic și sunt mult mai rezistente la condiții extreme.

Având în vedere cerințele pieței pe de o parte, rolul și ponderea în creștere a sistemelor încorporate inteligente pentru aplicații industriale pe de altă parte, este actuală și importantă efectuarea lucrărilor de cercetare-dezvoltare a noi sisteme/dispozitive încorporate pentru aplicații avansate pe baza microfirelor cu înveliș din sticlă.

4.1. Sistem reconfigurabil de caracterizare avansată a microfirelor magnetice

Necesitatea de a proiecta și construi un astfel de sistem a fost dictată, reieșind din cerințele actuale de analiză mai detaliată a unor caracteristici ale microfirelor magnetice și de a avea un sistem flexibil, care să permită adaptarea la noile cerințe și dezvoltarea de noi aplicații.

Sistemul dat este format dintr-un dispozitiv de achiziție a datelor și un soft specializat, care este utilizat în diverse aplicații specifice, care implică necesitatea de caracterizare avansată a microfirelor feromagnetice. Partea hardware conține un subsistem de achiziție a semnalelor analogice cu până la 3 canale. Fiecare canal poate fi digitizat cu o rezoluție de 12 biți și o viteză totală de eșantionare de 50 MSPS.

Structura sistemului de achiziție este prezentată în Figura 4.1. El este format din generator de semnal de excitație, schema analogică de amplificare a semnalelor, subcircuitul de achiziție și stocare a semnalelor în memorie, și interfața cu calculatorul personal. Schemele electrice principale sunt prezentate în anexa 5.1-5.5, iar cablajul imprimat în anexa 5.6.

Generatorul este realizat pe bază de sintezator digital (*DDS – Direct Digital Synthesis*). Sinteza digitală permite generarea semnalului sinusoidal cu o precizie înaltă. Frecvența acestui sintezator se setează cu un registru-acumulator de 28 biți, ce se determină cu ajutorul relației 4.1. În sistemul dat frecvența de ceas f_{MCLK} este de 25MHz, ceea ce permite generarea semnalului cu o frecvență, ce poate fi setată cu o rezoluție de 0.1 Hz.

$$f = \Delta Phase * f_{MCLK} / 2^{28} \quad (4.1)$$

unde:

$\Delta Phase$ – registrul-acumulator de fază, $0 < \Delta Phase < 2^{28} - 1$,

f_{MCLK} – frecvența de ceas (în schema dată – 25MHz).

Submodulul de achiziție este format din partea de amplificare și filtrare a semnalului analogic, care mai apoi este digitizat cu ajutorul unui convertor analogic/digital de 50 MSPS. Selecția și amplificarea primară a semnalului se face chiar în modulul sensorului, cu ajutorul amplificatorului diferențial. În modulul de achiziție se transmit semnalele cu amplituda până la 1V sau 2V p-p. Aceasta permite utilizarea sistemului dat în diferite măsurări. Pentru adaptarea la o altă aplicație trebuie doar schimbat modulul sensorului.

După digitizare, datele numerice achiziționate de convertorul analog-digital sunt înscrise într-o memorie rapidă de tip SRAM. După terminarea perioadei de achiziție informația este extrasă din memorie și transmisă spre PC.

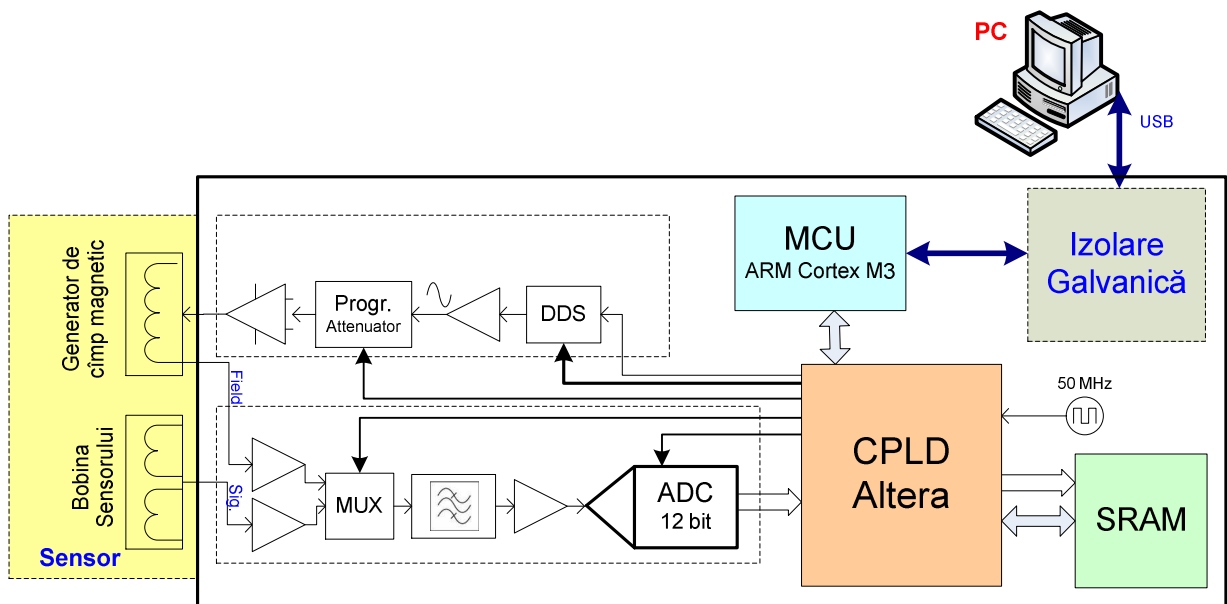


Fig. 4.1 Structura sistemului reconfigurabil de achiziție a datelor.

Controlul de nivel înalt este realizat pe un microcontroler de 32 biți cu nucleul ARM-CortexM. Acest microcontroler realizează interfața cu softul ce se rulează pe PC și submodulul de achiziție. Tot prin intermediul acestui microcontroler se transmit datele achiziționate. În momentul transmiterii datelor microcontrolerul efectuează filtrarea, folosind un filtru digital (programabil).

Funcțiile de nivel jos, cum ar fi dirijarea cu sintetizatorul, citirea datelor din convertorul analogic/digital și înscrisura în memorie, se realizează cu ajutorul circuitului logic programabil (CPLD – *Complex Programmable Logic Device*). Bloc-diagrama este prezentată în anexa 3.6. Elementele cheie din care se formează logica au fost descrise în limbajul AHDL.

Legătura între sistemul de măsurare și calculatorul personal se realizează prin interfața USB, care permite transmiterea datelor la viteză înaltă. Pentru a exclude zgomotele electromagnetice generate de calculator interfața între sistemul de măsurare și calculator este izolată galvanic.

Datorită construcției sale acest sistem este aplicat la mai multe etape de fabricare și cercetare-dezvoltare, folosind diferite aplicații software, elaborate pentru anumite cerințe de dezvoltare. Spre exemplu, una din aplicații este stația de măsurare a forței coercitive și a diametrului microfiredor, ce face parte din procesul de fabricare și postfabricare a microfiredorilor.

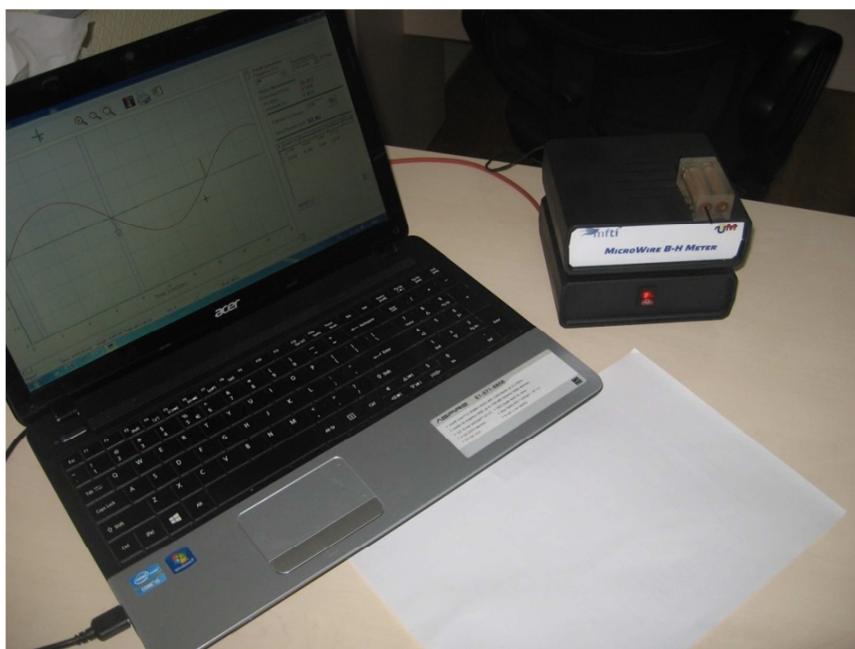


Fig. 4.2. Aplicarea sistemului pentru caracterizarea staționară a microfiredorilor.

Aceste caracterizări se fac înaintea rebobinării a microfiredorului de pe bobina tehnologică. Operatorul măsoară parametrii microfiredorilor de la ambele capete, și dacă rezultatele măsurării satisfac limitele impuse atunci se face rebobinarea cu măsurarea dinamică a parametrilor pe parcursul întregii lungimi. Dacă parametrii măsurăți de la capetele bobinei tehnologice nu se încadrează în limitele impuse, atunci se face o debobinare a unei porțiuni de microfiredor (se întâmplă de regulă din cauza că la sfârșitul procesului picătura de aliaj se micșorează în dimensiuni, în cazul când se utilizează procesul de turnare fără alimentarea continuă).

Acest sistem se mai utilizează de operatorii instalațiilor de turnare a microfiredorului pentru ajustarea procesului. Operatorul instalației, după câteva încercări de turnare, face măsurările

respective și în urma lor corectează parametrii de fabricare. Deoarece măsurarea câmpului H_c și a diametrului se face în mod automat și nu necesită pregătiri speciale, rezultatul se obține foarte rapid. Operatorul trebuie doar să introducă capătul de fir în senzorul de măsurare.

O altă aplicație a sistemului elaborat este caracterizarea microfiredel magnetice, unde sistemul este utilizat în regim de B/H -metru. Ca rezultat al acestor măsurări se construiesc curbele de histerezis pentru diferite frecvențe selectate de utilizator. Frecvența semnalului de excitație poate fi setată în diapazonul 10 Hz - 20 kHz cu pasul de 1 Hz . Totodată, utilizatorul poate selecta intensitatea câmpului de excitație de la 100 A/m până la 1000 A/m . În sistemul dat de măsurare a fost elaborat un senzor cu construcție specială. Pentru generarea câmpului magnetic cât mai uniform pe lungimea probei (de-a lungul probei), s-a folosit bobina Helmholtz.

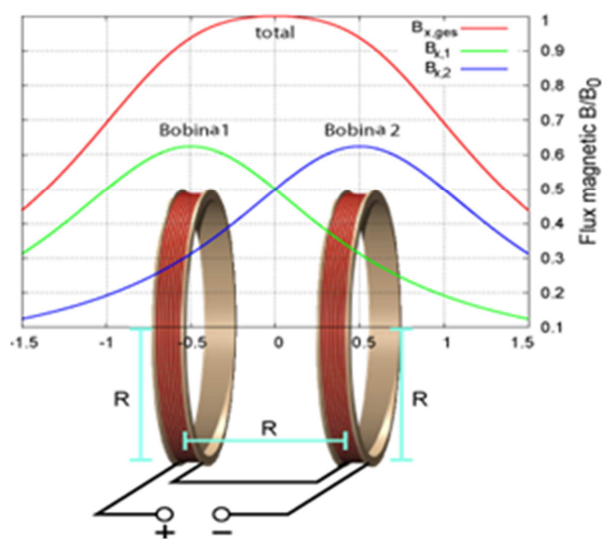


Fig. 4.3 Bobina Helmholtz.

Pentru asigurarea funcționării sistemului în regim de B/H metru a fost nevoie de modificarea softului, care interacționează cu subsistemul de achiziție, și după procesarea a câteva perioade de semnal, construiește histograma B/H (Figura 4.4).

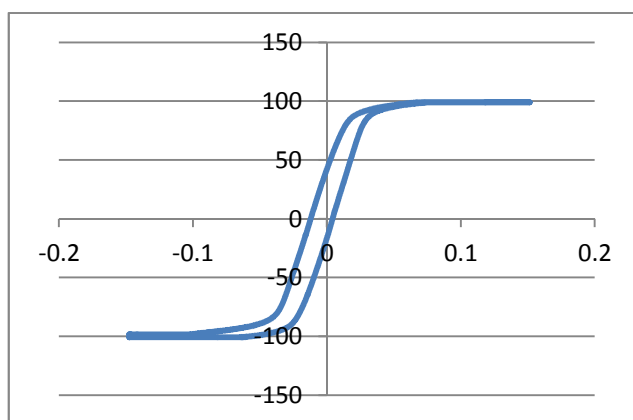


Fig. 4.4 Rezultatele măsurării și construirea histogramei B/H .

În afară de cele enumerate mai sus, sistemul elaborat se utilizează și pentru cercetări legate de eventualele aplicări avansate a microfired. Datorită rezoluției înalte, sistemul permite analiza detaliată a efectelor noi în microfired și acumularea datelor statistice, necesare pentru dezvoltarea de noi aplicații.

Una din direcțiile de cercetare-dezvoltare, având la bază sistemul elaborat este aplicația de codificare a informației (formarea amprentei-identificator) cu ajutorul a două sau mai multe microfired. La baza acestei modalități de codificare a informației stă utilizarea raportului ariei impulsurilor de remagnetizare a microfired bistabile într-un câmp electromagnetic alternativ. În cazul dat, softul permite detectarea impulsurilor de remagnetizare și măsurarea ariei fiecărui impuls. După ce se fac calculele respective sunt afișate parametrii impulsurilor și raportul între ele.

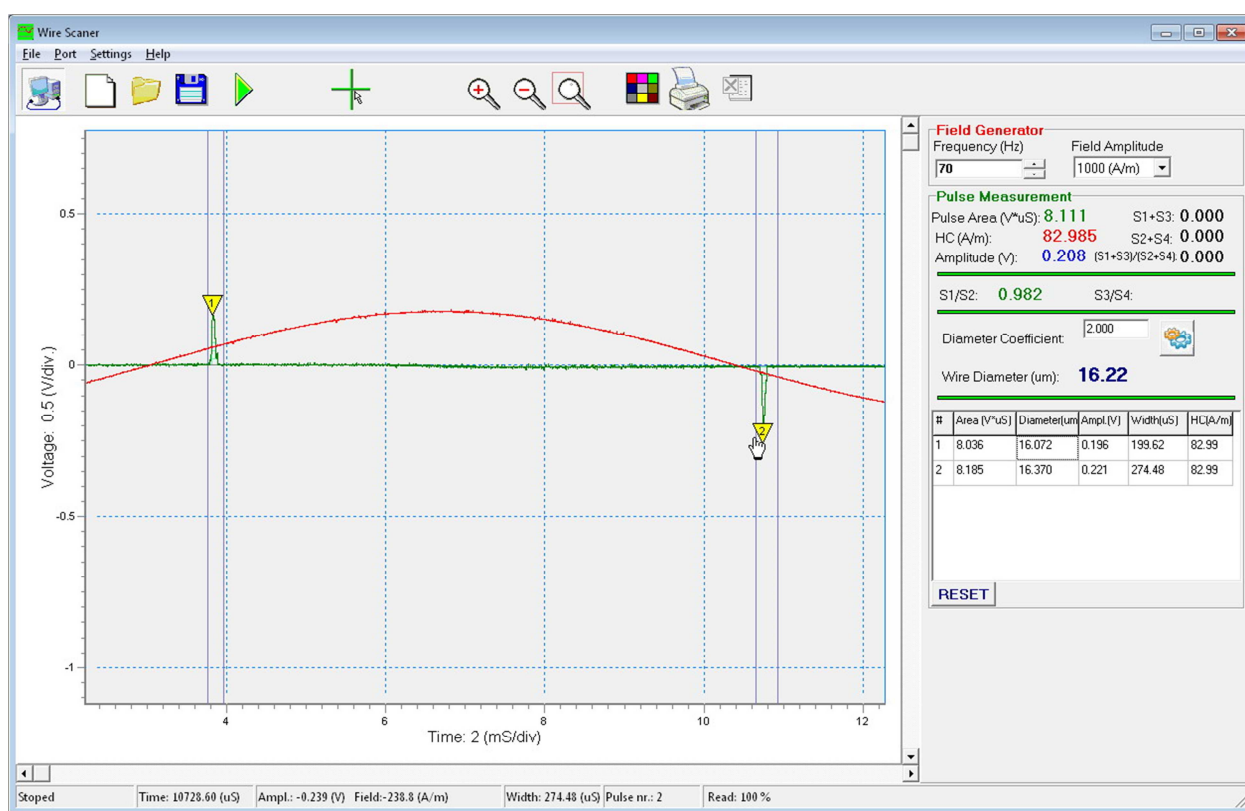


Fig. 4.5 Interfața aplicației de determinare a ariei impulsurilor de remagnetizare.

O altă aplicare a microfired feromagnetice, la baza căreia stă la fel determinarea ariei impulsurilor de remagnetizare, constă în măsurarea temperaturii, prin metoda non-contact, folosind un senzor format din două microfired.

Senzorul se formează din microfired de tipuri diferite. Unul din ele trebuie să fie cu punctul de temperatura Curie t_{c1} mult mai mare ca temperatura măsurată. Al doilea microfired se face din aliaj cu temperatura Curie t_{c2} apropiată de diapazonul de măsurare. Atunci când temperatura senzorului se apropie de temperatura t_{c2} , al doilea microfired parțial își pierde proprietățile

magnetice. Aceste schimbări se manifestă prin micșorarea ariei impulsului de remagnetizare al celui de al doilea microfir. Primul microfir cu punctul de temperatura Curie t_{c1} servește ca referință. Raportând ariile impulsurilor de remagnetizare se poate determina temperatura probei. Avantajul acestei metode constă în faptul că senzorul poate fi integrat în interiorul unui corp, iar citirea temperaturii poate fi făcută cu ajutorul unui scanner de la o distanță de câțiva centimetri.

Implementarea sistemului pe de o parte permite caracterizarea avansată și operativă a microfiredel feromagnetice în procesul de fabricare și postfabricare. Pe de altă parte, acest sistem este destinat pentru măsurări, experimente și acumularea statisticii în cadrul cercetării și dezvoltării de noi domenii de aplicare a microfiredel feromagnetice.

4.2. Dispozitiv staționar de identificare a etichetelor pe baza microfiredel magnetice

Pentru elaborarea propunerilor avansate în vederea aplicării microfiredelului cu înveliș din sticlă se impune efectuarea multiplelor lucrări de cercetare și măsurători a parametrilor microfiredel cu compoziție variată. În acest context, prezintă interes posibilitatea teoretică și practică de a construi etichete multibit pe bază de microfiredel magnetice cu compoziție specifică pentru asigurarea unui grad de protecție sporită contra falsurilor. La moment lucrările de cercetare-dezvoltare în această direcție continuă, fiind axate pe:

- Identificarea compoziției optime pentru microfiredel magnetice utilizate la fabricarea etichetelor multibit.
- Dezvoltarea platformelor tehnologice și a algoritmilor de prelucrare numerică a semnalelor cu scopul asigurării stabilității detectării codului multibit.
- Studiul comportamental în timp al unor astfel de etichete magnetice.
- Identificarea și studierea tehnologiilor de înglobare a etichetelor pe suporturi diverse, dar și studiul influenței suportului asupra stabilității în timp a etichetelor pe bază de microfiredel magnetice.

Problemele identificate mai sus fiind rezolvate, aplicațiile respective vor avea, cu siguranță, o perspectivă de succes. În acest context, un rol important revine cercetării și dezvoltării unor noi soluții încorporate sub formă de sisteme și dispozitive specializate. În continuare sunt prezentate rezultatele obținute în această direcție.

O direcție interesantă de aplicare a microfiredor este detectarea acestor marchere la distanțe mai mari (aprox. 1 m) ce permite construirea barierelor, care ar împiedica sustragerea unor documente (hârtii de valoare) din oficiu, sau scoaterea mărfurilor neachitate din market (înlocuind benzile magnetice).

O altă direcție nouă de cercetare (cu perspectivă), sunt sisteme de codificare a informației (amprente) cu ajutorul a două sau mai multe microfiredor.

Codificarea informației poate fi făcută prin mai multe metode:

1) amprenta este formată din mai multe microfiredor de același tip, decodificarea se face prin contorizarea impulsurilor care sunt formate de fiecare microfiredor sub influența câmpului magnetic exterior (care se formează de detector).

2) Amprenta este formată la fel din mai multe fire, dar care au H_c diferit. În cazul dat diapazonul de măsurare H_c este divizat în mai multe zone (cu un interval suficient de mare între ele să nu fie suprapunere). Adăugând sau nu în amprentă un microfiredor ce face parte din acest diapazon HC putem obține un impuls sau nu în timpul măsurării. Astfel se poate de utilizat o codificare binară cu un număr relativ mic de microfiredor.

3) Codificarea prin intermediul raportului a ariei impulsurilor de reacție. În acest caz la fel se utilizează microfiredor diferite, doar că spre deosebire de varianta precedentă la citirea informației se estimează raportul ariei impulsurilor de remagnetizare (între 2 sau mai multe impulsuri), astfel, dacă în momentul citirii apar anumite perturbații – ele influențează în aceleași măsură toate firele.

În colaborare cu compania „Microfiredor Tehnologii Industriale” SRL au fost construite mai multe dispozitive experimentale de detectare a amprentelor bazate pe microfiredor.

Primul sistem/detector (limitat în resurse), utiliza ca metodă de codificare contorizarea simplă a impulsurilor. Pentru aceasta se genera un câmp magnetic excitant și se achiziționa semnalul de la senzor. Erau contorizate doar impulsurile cu amplituda ce depășea un anumit prag. Contorizarea se făcea în ambele semiperioade (pozitivă și negativă) și se repeta de mai multe ori, până când nu se obține un rezultat stabil. După cum au arătat experimentele, metoda aceasta este destul de limitată la moment din mai multe considerente. În primul rând numărul de coduri care poate fi înglobat într-o amprentă este limitat din considerente tehnologice (greu de redat amprente cu mai multe microfiredor). În afară de aceasta, odată cu creșterea numărului de microfiredor devine mai complicat de a le detecta, deoarece mai multe microfiredor se pot uni și genera un singur impuls de răspuns.

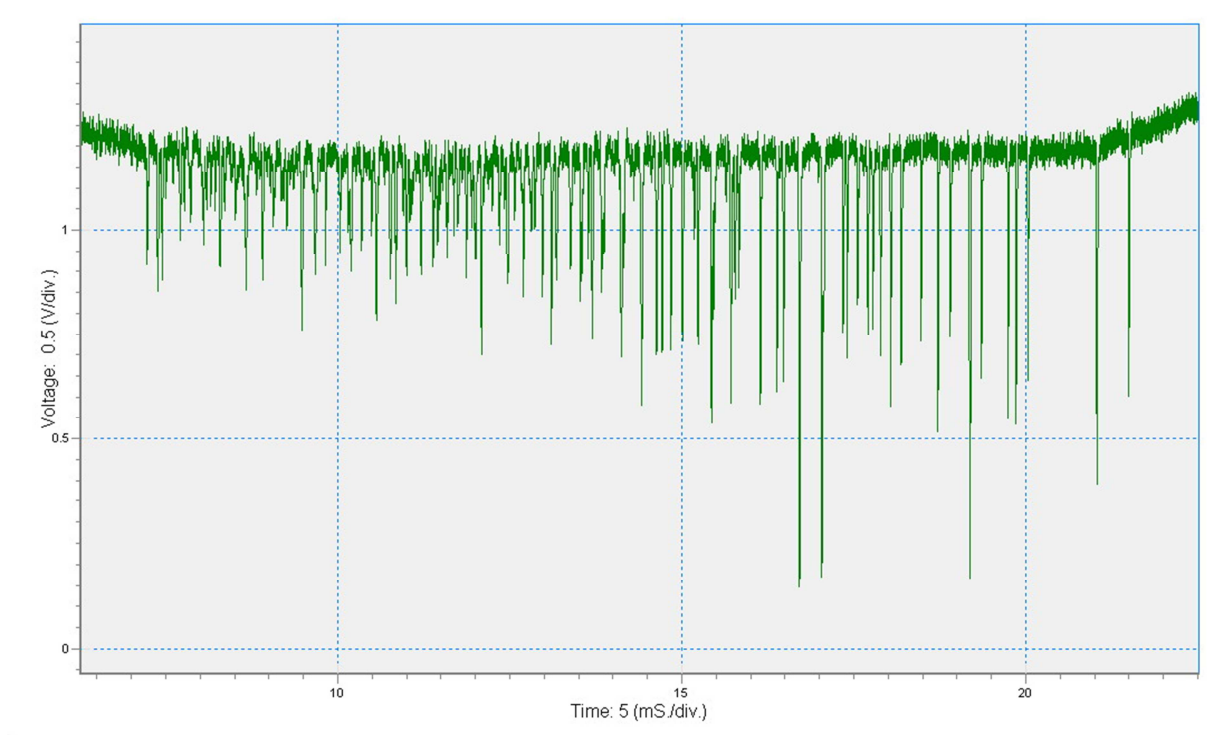


Fig. 4.6 Exemplu de diagramă a amprentei cu mai multe microfibre.

Altă problemă care apare la detectare este determinată de impulsurile false care sunt provocate de zgomot electromagnetic extern (surse de alimentare cu funcționare discontinuă, telefonie mobilă...). În acest caz este nevoie de un algoritm special de codificare care să asigure o fidelitate rezonabilă (spre exemplu de utilizat doar un cod par/impar, decodificare majoritară – codul este citit de mai multe ori și se consideră valid numai atunci când se repetă de un anumit număr de ori).

O variantă posibilă de a extinde numărul de combinații, ar fi utilizarea pe obiectul de identificare nu una dar mai multe astfel de amprente, amplasate la o anumită distanță una de alta. Citirea acestor amprente se face cu senzori separați (sau mișcând obiectul în câmpul sensorului). Astfel fiecare amprentă formează un câmp al codului.

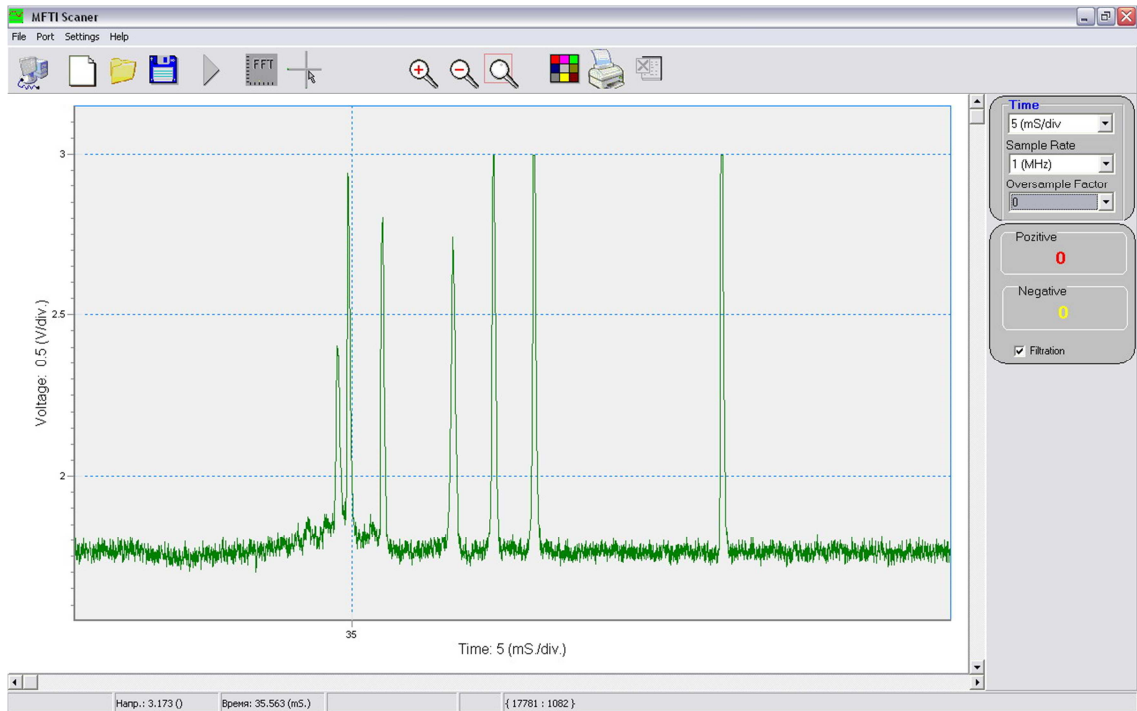


Fig. 4.7 Interfața aplicației.

Deoarece din punct de vedere a resurselor Hard&Soft primul detector era foarte limitat, și nu făcea față cerințelor noi venite din partea unei companii din străinătate fost construit un alt prototip. Acesta fiind utilizat în cercetarea comportamentului amprentelor confecționate, permitea achiziția întregii perioade a semnalului cu posibilitatea de postprocesare (filtrarea digitală, convoluția, detectarea impulsurilor) folosind resursele de calcul încorporate (CPU - ARM Cortex M3) sau prin transmiterea acestor date la un PC. Pe acest PC se rulează un soft special care permite vizualizarea semnalului sub forma de diagrame, stocarea lor pe suport extern pentru formarea bazei de date, și procesarea propriu zis folosind resursele PC-ului cu scopul analizei diferitor algoritmi.

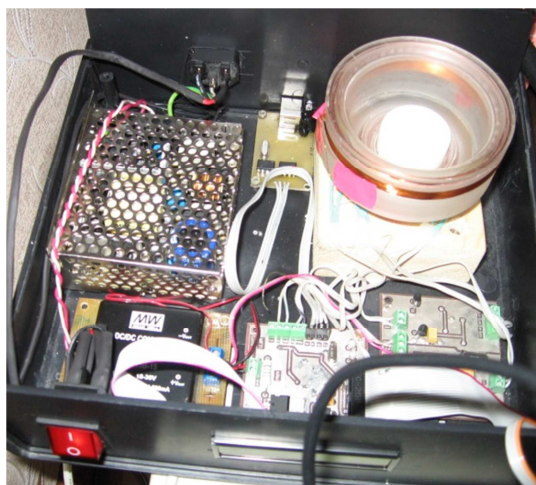


Fig. 4.8. Prototipul detectorului staționar de marcaje pe baza de microfire.

4.3. Detector de marcaje în hârtii securizate

Proprietățile unice ale microfirelor magnetice pot fi utilizate la construirea sistemelor de identificare, securitate, combaterea producerii contrafăcute etc. În bază de microfiri pot fi construite amprente (marchere) care pot păstra anumite informații (coduri) pe o durată îndelungată și în condiții extreme (temperatură, umiditate, mediu agresiv...).

La momentul actual, există mai multe aplicații în care microfiredle se utilizează pentru identificare.

Una din aplicații presupune protecția documentelor și a hârtiilor de valoare. Pentru aceasta la momentul producerii hârtiei în ea este înglobat un marker din microfiri cu anumite proprietăți magnetice. Existența acestui microfiri în hârtie poate fi detectată cu un dispozitiv special. La moment, softul elaborat permite dispozitivului detectarea existenței sau lipsei acestui marker. Tot odată continue cercetările în direcția extinderii funcționalului care să permită detectarea stabilă a "marcajelor multibit".

Pentru testarea acestei tehnologii a fost elaborat un prototip portativ cu alimentarea de la baterii. Inițial acest dispozitiv a fost gândit pentru aplicații care necesită detectarea doar prezenței sau absenței microfiredle în obiectul de control (spre exemplu în hârtie). Totodată, deoarece dispune de suficiente resurse de calcul, el poate fi utilizat și în sisteme de codificare mai complexe, spre exemplu păstrarea informației suplimentare (nivelul de securizare, data, etc.).

Pentru redarea informației dispozitivul dispune de un LCD grafic, dar afară de aceasta el poate fi conectat la un PC (prin interfața USB) care permite să transmită datele într-o aplicație specială.

Dispozitivul este format dintr-un senzor, circuitul de amplificare și filtrare analogică a semnalului, submodulul de procesare și sursă de alimentare (Figura 4.9). Schemele electrice principale sunt prezentate în anexa 7.1-7.2, iar cablajul imprimat în anexa 7.3.

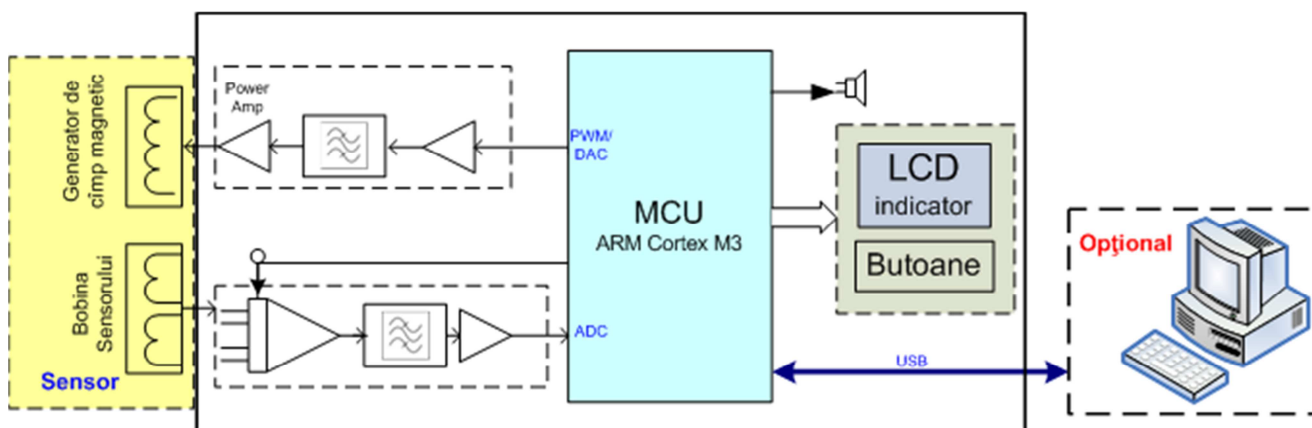


Fig. 4.9. Structura detectorului portabil.

Submodulul senzorial este format din patru bobine, două din care se folosesc pentru generarea câmpului magnetic de excitație, iar celelalte două pentru detectarea câmpului magnetic rezultat. Semnalele de la senzori sunt amplificate cu ajutorul unui amplificator diferențial, trecute printr-un filtru analogic și digitizate cu ajutorul unui convertor analogic/digital. Datele numerice achiziționate sunt înscrise în memorie rapidă de tip SRAM. După terminarea perioadei de achiziție informația este procesată. Procesarea include filtrarea semnalului folosind un filtru digital; detectarea și contorizarea impulsurilor. Detectarea impulsurilor se face pe ambele semiperioade a semnalului de excitație. Pentru detectarea corectă a impulsurilor valide și eliminarea/omiterea celor false, procesarea se face pentru mai multe perioade.

Generarea și procesarea semnalelor este realizată pe un microcontroler de 32 biți cu nucleul ARM-CortexM. Redarea informației pentru utilizator se realizează prin intermediul unui LCD grafic. Totodată interfața cu utilizatorul poate fi realizată cu ajutorul unui soft pe calculator personal.

Alimentarea dispozitivului se realizează de la un acumulator Li-Ion. Pentru a obține tensiunile necesare au fost proiectate și construite convertoare DC/DC. Partea de alimentare conține și un circuit de încărcare a acumulatorului, care permite reîncărcare de la sursă externă sau de la Portul USB.



Fig. 4.10. Detectorul portativ.

Dispozitivul poate fi conectat la calculator prin intermediul portului USB, care servește la transmiterea datelor achiziționate și pentru încărcarea bateriei.

4.4. Concluzii la capitolul 4

A fost proiectat și fabricat un sistem reconfigurabil de caracterizare avansată a microfivelor magnetice care a fost conceput ca un instrument flexibil. El poate fi simplu adaptat

pentru noile măsurări și eventualele procesări a datelor. Acest sistem s-a regăsit în cadrul procesului de control a calității microfiredor, dar și în cadrul lucrărilor de cercetare și acumulare a statisticii, în vederea dezvoltării noilor aplicații pe baza de microfiredor. Sistemul elaborat permite măsurarea semnalelor de la trei canale analogice cu o rezoluție de 12 biți și o frecvență de eșantionare de până la 50 MSPS. În afară de aceasta, sistemul dispune de un generator reconfigurabil care permite generarea câmpului magnetic cu amplitudine de la 100A/m până la 1000A/m și frecvența de 10Hz – 2 KHz. Folosind diferite adaptoare/senzori, sistemul permite efectuarea caracterizării avansate a microfiredor magnetice.

A fost elaborat un dispozitiv staționar de identificare a etichetelor pe baza microfiredor magnetice care permite citirea unor etichete multibit pe bază de microfiredor magnetice cu compoziție specifică pentru asigurarea unui grad de protecție sporit contra falsurilor.

De asemenea, a fost elaborat și confecționat un prototip al dispozitivului detector de marcaje aplicate în hârtii securizate care poate fi folosit în domeniul protecției documentelor și a hârtiilor de valoare.

Totodată, pentru continuarea lucrărilor de cercetare-dezvoltare și a experimentelor este nevoie de elaborat tehnici noi de codificare pe baza de microfiredor – constructive, algoritmice, de ales forma optimală a amprenteii, construcția, adezivul în care se înglobează microfiredorele, tehnologia de producere a amprentelor, etc.

CONCLUZII GENERALE

Lucrarea conține contribuții originale și include tehnici moderne utilizate în industria microfiredor. Aplicarea rezultatelor obținute permite sporirea calității microfiredor magnetice produse prin metoda Taylor-Ulitovsky.

Sintetizând rezultatele obținute, pot fi formulate următoarele concluzii generale:

1. Au fost elaborați algoritmi de procesare a imaginii picăturii [66, 67] și o metodă de extragere a datelor relevante care permite creșterea acurateții de aproximare a conturului detectat [42].

2. A fost propus și elaborat în premieră un model de estimare în timp real a formei geometrice a capilarului caracteristic procesului de turnare a microfiredor prin metoda Ulitovsky-Taylor, fapt care permite dezvoltarea unei abordări predictive în comanda și controlul procesului respectiv, cu posibilitatea de creștere a calității microfiredorului turnat [54, 55]. Acest model poate fi aplicat în dezvoltarea unor tehnologii de control și monitorizare bazate pe tehnici senzoriale la distanță.

3. A fost propus un sistem de comandă și control inteligent a procesului de turnare a microfiredor. Soluția propusă are la bază modelul de estimare elaborat, îmbină tehnicile machine vision cu metodele logicii fuzzy și permite predicția evoluției procesului în timp real [42-44, 54, 55, 76, 77, 84].

4. A fost dezvoltată o platformă tehnologică de achiziție și analiză a datelor care oferă posibilitatea de a amplifica cercetările în direcția optimizării sistemului de producție în cadrul întreprinderii „Microfir Tehnologii Industriale” SRL din Chișinău.[105, 109, 110]

5. A fost proiectat, fabricat și implementat un sistem informațional de măsurare a forței coercitive și diametrului microfiredor magnetice [104, 111-119] care servește ca instrument de suport decizional în procesul de control a calității microfiredor - sistemul permite agentului uman luarea deciziilor și corecția procesului tehnologic în timp real. [126-129] Sistemul elaborat permite măsurarea forței coercitive și a diametrului cu precizia 10-15%. Măsurarea parametrilor, respectiv monitorizarea calității este realizată prin rebobinarea și scanarea discretă a microfiredorului. Viteza de rebobinare poate fi setată de la 0,2 până la 9,5 m/s, pasul de rebobinare - 50...500 μm [120, 123, 124].

6. Au fost propuse un șir de soluții inovative încorporate pentru cercetarea și dezvoltarea aplicațiilor avansate în baza microfiredor magnetice[104,. 105, 126, 131]

RECOMANDĂRI

Ca direcții de cercetare de viitor putem menționa:

- Cercetarea posibilităților de creștere a acurateții modelului de estimare în timp real a formei geometrice a capilarului.
- Dezvoltarea cercetărilor în direcția „extragerii cunoștințelor” operatorului uman de calificare foarte înaltă. Experiența și cunoștințele extrase pot fi acumulate în timp real, formând astfel o bază de cunoștințe.
- Dezvoltarea unui algoritm de autoînvățare online pentru completarea și/sau modificarea bazei de cunoștințe.
- Dezvoltarea strategiilor de luare a deciziilor pentru implementare la nivelul motorului de inferență al sistemului de comandă și control.
- Elaborarea a noi algoritmi care ar permite detectarea sigură a impulsurilor din semnalul achiziționat (de găsit algoritmi care ar permite codificarea sigură a informației luând în considerație toleranțele la producerea microfiredor – variațiile HC, diametrului).
- Elaborarea tehnicilor noi de filtrare/procesare a datelor care ar îmbunătăți raportul semnal/zgomot și ar reduce amplituda impulsurilor false (de îmbunătățit sistemul de achiziție – construcția bobinei senzorului, de îmbunătățit partea analogică de amplificare/filtrare a semnalului).
- Elaborarea a noi algoritmi care ar permite detectarea și determinarea precisă a caracteristicilor impulsurilor (filtrarea digitală a semnalului, filtrarea adaptivă, de încercat detectarea impulsurilor prin tehnici noi - Fuzzy Logic).

BIBLIOGRAFIE

1. Улитовский А.В., Маянский И.М., Авраменко А.И. Способ непрерывного изготовления микропроволок в стеклянной изоляции. АС № SU128427. 1963.
2. Бадинтер Е. Я., Гришанов И И., Доника Ф. Г., Литой микропровод и его применение в науке и технике., научный редактор Гицу Д. В. Кишинев: Штиинца. 1988.
3. Бадинтер Е.Я., Берман Н.Р., Дробенко И. Ф., и др. Литой микропровод и его свойства. Кишнев, «Штиинца», 1973. 318 с.
4. Заборовкий В.И., Бугаков В.И., Иойшер А.М., и др. Технологическая линия по производству литого микропровода в стеклянной изоляции. АС № SU1081670., 1984.
5. Юданов Н.А., Разработка методов управления свойствами аморфных микропроводов и технологий изготовления высокочувствительных датчиков магнитного поля. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва 2016.
6. Abe Y., Miyazawa K., Nakamura M. and Ohashi T. “*The behavior of melt jet in the in-rotating-water spinning method*”, Trans. ISIJ, (1987) vol. 27, 929-935
7. Waseda Y., Ueno S., Hagiwara M. and Aust K., “Formation and mechanical properties of Fe- and Co-based amorphous alloy wires produced by in-rotating-water spinning method”, Progr. Mat. Sci., (1990) vol. 34, 149-260
8. Larin V., Torcunov A., Zhukov A., Gonzalez J., Vazquez M., Panina L. Preparation and properties of glass-coated microwires. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 224(1-2), 2002, 39-45 p., doi: 10.1016/S0304-8853(02)00501-2
9. Larin V., Zhukov A., Gonzalez J., Garcia C., del Val J. J. Fabrication and magnetic properties of Cu (FeSiBC) thin microwires. Journal of Non – Crystalline Solids, 353, 2007, 992-924 p., doi: 10.1016/j.jnoncrysol.2006,12,061.
10. Zhukov A., Sinnecker E., Paramo D., Guerrero F., Larin V., Gonzalez J., Vazquez M. Fabrication and magnetic properties of glass coated microwires from immiscible elements. Journal of Applied Physics, 85(8), 1999, 4482-4484 p., doi: 10.1063/1.370382.
11. Gorynin I.V., Farmakovskiy B. V., Khinsky A. P., et. all. Method of casting amorphous and microcrystalline microwires. patent number US 5.240.066A B22D, United States of America, 1993.
12. Cobeno A., Zhukov A., Blanco J., Larin V., Gonzalez J. Magnetoelastic sensor based on giant magnetoimpedance of amorphous microwire. Sensor and Actuators. A. Physical, 2001, 91, 95-98 p., doi: 10.1016/S0924-4247(01)00502-7.
13. Larin V., Zaporozhan S., Calmîcov I., Chicu, L., Bucatco I. Transformation of Magnetic Structures as a Result of Thermomechanical Processing. In: Moscow International

Symposium on Magnetism (MISM-2014), Moscow, Russia, 29 June-3 July, 2014: book of abstracts. Moscow, 2014, p. 287. ISBN 978-5-91978-025-0.

14. Чугаевский Ю. В. Об одной аппроксимированной модели капли. Зеликовски З. (ред.), Микропровод и приборы сопротивления. Кишинёв: Картя Молдовеняскэ, 1964, 16-26 с.
15. Шпирнов В.А. Форма жидкой капли при получении остеклованного микропровода. Микропровод и приборы сопротивления, вып. 2, Кишинёв: Картя Молдовеняскэ, 1963, 22-25 с.
16. Трояновский В. В. Достижения в области разработки, производства и применения микропроволоки в стеклянной изоляции. ЦИНТИ. Электропром, М., 1962.
17. Чугаевский Ю. В. О критерии вхождения металла в капилляр в условиях литья микропровода. Зеликовски З. (ред.), Микропровод и приборы сопротивления. Кишинёв: Картя Молдовеняскэ, 1964, 27-35 с.
18. Дегтярь Л. Э., Зеликовский З. И., Цетенс В. П. Измерение погонного сопротивления микропровода в процессе литья. Микропровод и приборы сопротивления. Вып. 1 стр. 24 – 30 «Штиинца», Кишинёв, 1962.
19. Зеликовский З. И., Михайлов В. А., Нестеровский И. А.. Бесконтактное измерение погонного сопротивления высокоомного микропровода. Микропровод и приборы сопротивления. Вып. 8 стр. 67 - 76 «Штиинца», Кишинёв, 1971.
20. Аввакумов Ю. И., Керницкий Л. П., Самосудов П.А., Цайреф К. М.. Способ и аппаратура для измерения диаметра тонких и сверхтонких проводов. Микропровод и приборы сопротивления. Вып. 9 стр. 71 – 76, «Штиинца», Кишинёв, 1972.
21. Молоканов В.В., Умнов П. П., Куракова Н. В., и др., Влияние толщины стеклообразного покрытия на структуру и свойства аморфного магнитомягкого кобальтового сплава. Перспективные материалы., 2006. № 2. с. 5-14.
22. Дорофеев И.О. Устройство квазиоптической резонаторной диагностики остеклованного литого микропровода / И.О. Дорофеев, Г.Е. Дунаевский. Дефектоскопия. 2014. №12. С. 50 – 57.
23. Дорофеев И.О., Дунаевский Г.Е. О возможности квазиоптического резонаторного контроля локальных неоднородностей остеклованного литого микро-провода. Тезисы докладов XX Всероссийской научно-технической конференции по неразрушающему контролю и технической диагностике. Москва, 2014. с. 227-230.
24. Measure and Control Instruments. Cersa Instrument Manager. User's Manual. CERSA-MCI. 2015. from www.cersa-mci.com.
25. Hennessy J., Patterson D. Computer Architecture: A Quantitative Approach. Morgan Kaufmann Publishers, San Mateo, 2007, 19-25 p., ISBN 0123704901.

26. Hennessy J., Patterson D. Computer Architecture: A Quantitative Approach. Morgan Kaufmann Publishers, San Francisco, 2003, 14-40 p., ISBN 1558605967.
27. Mueller S., Paul W. Computer Architecture: Complexity and Correctness. Springer, 2000., ISBN 3540674810.
28. Wang K. Advanced computer architecture: Parallelism, Scalability, Programmability. Mc Grawhill, 2nd edition, 1993, ISBN 9780070702103.
29. Staunstrup J. and Wolf W. Eds, "Hardware/Software Codesign: Principles and Practice". Springer, 1997, 15-40 p.
30. Yiu Joseph. The Definitive Guide to the ARM Cortex-M3, 2nd Edition. Elsevier, 2010, 479 p. ISBN-13: 978-1856179638
31. Valvano J. "Embedded Systems: Introduction to ARM Cortex-M Microcontrollers". CreateSpace Publishing, volume 1, 2015.
32. Documentation. FPGAs, CPLDs from <https://www.altera.com/support/literature/lit-index.html>.
33. Upton E., Duntemann J., Roberts R., et. al., Learning Computer Architecture with Raspberry Pi 1st Edition. John Wiley&Sons Inc., 2016, 580p.
34. Jerraya A., Yoo S., Verkest D., Wehn N., Embedded Software for SoC, Springer Science, 2004, 530p.
35. Forsyth D. A., Ponce J. Computer vision. A modern approach. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2003.
36. Davies E. R. Machine vision. Theory, algorithms, practicalities. Morgan Kaufmann Publishers, San Francisco, 2004.
37. Nilsson N. Artificial intelligence. A new synthesis. Morgan Kaufmann Publishers, San Francisco, 1998.
38. Russel S. , Norvig P. Artificial Inteligence. A modern approach. Upper saddle River, NJ: Prentice Hall, 2003.
39. Alty J. L., Coombs M. J. Expert systems. Concepts and examples. National Computing Centre, London, 1984.
40. Wiener N. Cybernetics or control and communication in the animal and the machine. MIT Press, Cambridge, 1961.
41. Yager R. R. Fuzzy set and possibility theory. Recent development. Pergamon Press, New York, 1982.
42. Zaporojan S., Plotnic, C.; Calmicov I., Some of the aspects of decision design in development of the intelligent wire casting machine. In: D. Simian (Ed). Proceeding of the 2nd International Conference "Modeling and Development of Intelligent Systems"

- (MDIS-2011), Sep. 29 - Oct. 02, 2011, Sibiu, Romania, Lucian Blaga University Press, 2012. pp. 226-231. ISSN 2067-3965.
43. Zaporojan S., Plotnic C., Calmîcov I. Some of the aspects of decision design in development of the intelligent wire casting machine. Abstracts of 2nd International Conference on Modeling and Development of Intelligent Systems. Sep. 29 - Oct. 02, Sibiu, Romania, 2011. p. 26.
 44. Carbune V., Calmîcov I., Gîscă V. Arhitectură pentru suport argumentativ al deciziilor luate în procesele industriale. In: The 8th International Conference on Microelectronics and Computer Science (ICMCS-2014): proceedings, Chişinău, Moldova, October 22-25, 2014. Ch.: Tehnica-UTM, 2014, pp. 483-486. ISBN 978-9975-45-329-5.
 45. Albertos P., Sala A. Multivariable control systems. An engineering approach. Springer - Verlag Publishers, London, 2004.
 46. Gozer R., Calcev G. A survey of PID auto-tuning methods. In I. Dumitrache (Ed.), 11th International Conference on Control System and Computer Science." Protehnica" University Press, volume 1, Bucharest, 1997, 18-27 p.
 47. Kickert W .J. M., Van Nauta Lemke. Application of a fuzzy controller in a warm water plant. Automatica, 12, 1976, 301-308 p., doi: 10.1016/0005-1098(76)90050-9.
 48. Krause B., Von Altrock C., Limper K., Schafers W. Development of a fuzzy knowledge-based system for the control of a refuse incineration plant. Fuzzy Application Library/Technical Application. Retrieved January 20, 2007, http://fuzzytech.com/e/e_a_mull.html.
 49. Terano T., Asai K., Sugeno M., Applied fuzzy systems. Mir Publishers, Moskva, 1993.
 50. Von Altrock C., Krause B. Optimization of a water treatment system. Fuzzy Application Library/Tehcnical Applications. Retrieved January 20, 2007, http://fuzzytech.com/e/e_a_dek.html.
 51. Weizenbaum J. Computer and human reason. From judgment to calculation. W. H. Freeman and Company, San Francisco, 1976.
 52. Guţuleac, E., Calmîcov, I., Zaporojan, S., Gîrleanu, I. Modelarea și analiza securității reţelelor de calculatoare prin reţele Petri markoviene fuzzy intuiţioniste cu jocuri stocastice. Meridian Ingineresc. 2017, nr.1, 16-25. ISSN 1683-853X.
 53. Cesa-Bianchi N., Lugosi G. Prediction, learning, and games. Cambridge University Press, New York, 2006, doi: 10.1017/CB09780511546921.
 54. Zaporojan S., Larin V., Plotnic C., Calmîcov I., Pavel V. Development of an intelligent plant for the fabrication of glass-coated microwires. Book of abstracts of the 14-th International Congress of Cybernetics and Systems of WOSC ICCS-2008. Sep. 9-12, Wroclaw, Poland, 2008, p. 72.

55. Zaporozjan S., Larin V., Plotnic, C.; Calmîcov I., Pavel V., Development of an intelligent plant for the fabrication of glass-coated microwires. In: Proceedings of the 14-th International Congress of Cybernetics and Systems of WOSC (ICCS-2008), Sep. 9 - 12, 2008, Wroclaw, Poland, pp. 739-746, ISBN 978-83-7493-400-8.
56. Ifeachor E., Jervis B., Digital Signal Processing. A practical Approach. 2nd Edition. Prentice Hall, 2002, 933 p., ISBN-13: 978-0201596199
57. Otsu N., A Threshold Selection Method from Gray-Level Histogram, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 9, pp. 62-66, 1976.
58. Kapur J.N., Sahoo P.K., Wong A.K.C., A New Method for Gray-Level Picture Thresholding Using the Entropy of the Histogram, Computer Vision, Graphics, and Image Processing, vol. 29, pp.273-285, 1985.
59. Kittler J., Illingworth J., Minimum Error Thresholding, Pattern Recognition, vol. 19, pp.41-47, 1986.
60. Paragios N., Deriche R. Geodesic active regions and level set methods for supervised texture segmentation. International Journal of Computer Vision, 46(3), 2002, 223-247 p., 10.1023/A:1014080923068.
61. Niblack W., An Introduction to Digital Image Processing, Prentice Hall, pp.115-116, 1986.
62. Haralick R. M.. Digital step edges from zero-crossings of second directional derivatives. IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intell., 6, 1984
63. Gonzales R. C., Woods R. E., "Digital Image Processing, 2nd edition", Prentice Hall. 2002.
64. Rogers D. F., „Procedural Elements for Computer Graphics”. McGraw-Hill, 1985
65. Pratt W. K., "Digital Image Processing", WILEY-INTERSCIENCE. 1978.
66. Canny J. A. Computational Approach to Edge Detection. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 8(6), 1986, 679-714 p., doi: 10.1109/TPAMI.1986.4767851.
67. Calmîcov I., Analiza algoritmilor de segmentare a imaginilor. Meridian Ingineresc. 2010, nr.2, 74-79. ISSN 1683-853X.
68. Calmîcov I., Analiza algoritmilor de segmentare a imaginilor pentru aplicații de timp real. In: The 6th International Conference on Microelectronics and Computer Science (ICMCS-2009): proceedings, Chișinău, Moldova, October 01-03, 2009. Ch.: Tehnica-UTM, 2009, pp.276 -279. ISBN 978-9975-45-045-4.
69. Barbulescu D., Bologea G. Shape analysis and classifying algorithms in videoinspection. In I. Dumitrache (Ed.), 11th International Conference on Control System and Computer Science." Protehnica" University Press, volume 2, Bucharest, 1997, 227-231 p.

70. Nixon M. S., Aguado A. S. Feature extraction and image processing. Academic Press, New York, 2007.
71. Sorkine O., Cohen-Or D., Irony A., Toledo S. Geometry – Aware Bases for Shape Approximation. IEEE Transaction on Visualization and Computer Graphics, 11(2), 2005, 171-180 p., doi: 10.1109/TVCG.2005.33
72. Vatavu R., Pentiu S., Grisoni L., Chaillou C. Modeling Shapes for Pattern Recognition: A simple low – cost spline – based approach. Advances in Electrical and Computer Engineering, 8(15), 2008, 67-71 p., doi: 10.4316/aece.2008.01012.
73. Zaharia M. D. Approaches for curve representation in spatial databases. In S. Holban (Ed.), Third International Conference on Technical informatics” Protehnica” University Press, volume 1, Timișoara, 1998.
74. Berrut J. P., Trefethen L. N. Barycentric Lagrange interpolation. Review of Society for Industrial and Applied Mathematics 46(3), 2004, 501-517 p.
75. Press W. H., Teukolsky S. A., Vetterling W. T., Flannery B.P. Numerical recipes in C. The art of scientific computing. Cambridge University Press, Cambridge, 1992.
76. Zaporojan S., Plotnic C., Calmicov I., Larin V. A knowledge-based approach for microwire casting plant control. In: Jozefczyk, J. and Orski D., eds. Knowledge-Based Intelligent System Advancements: Systemic and Cybernetic Approaches. Hershey PA: IGI Global, 2011, pp. 419-437. doi: 10.4018/978-1-61692-811-7.ch19.
77. Zaporojan S., Calmicov I., Plotnic C., Larin V. A knowledge-based approach for microwire casting plant control. In: Nanotechnology: Concepts, Methodologies, Tools and Applications. Hershey PA: IGI Global, 2014, pp. 1464-1482. doi: 10.4018/978-1-4666-5125-8.ch69.
78. Driankov D., Hellendorn H., Reinfrank M. An introduction to fuzzy control. Springer-Verlag Publishers, New York, 1993.
79. Passino K. , Yurkovich S. Fuzzy control. Reading, MA: Addison-Wesley Longman, 1998.
80. Yvonne C. Lucero, Patricia A. Nava, A. Method for Membership Function Generation from Training Samples.
<http://wwwold.ece.utep.edu/research/webfuzzy/docs/electro99/electro-99.html>
81. Kosko, Bart, Neural Networks and Fuzzy Systems: A Dynamical Approach to Machine Intelligence, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1992.
82. Hong, Tzung-Pei and C. Lee, Induction of fuzzy rules and membership functions from training examples, Fuzzy Sets and Systems, Vol. 84, pp. 33-47, Nov. 1996.
83. Patyra M., Grantner J., Koster K. Digital fuzzy logic controller. Design and implementation. IEEE Transaction on Fuzzy Systems, 4(4), 1996, 439-459 p., doi: 10.1109/91.544304.

84. Zaporozjan S., Carbune V., Calmicov I., Fuzzy logic control based on reconfigurable membership tables. In: Grzech A., Swiatec P., Drapala J., eds. *Advances in Systems Science*. Academic Publishing House EXIT, Warsaw, Poland, 2010, pp. 385-390. ISBN 978-83-60434-77-2.
85. Siler W., Buckley J. *Fuzzy expert systems and fuzzy reasoning*. NJ: John Wiley & Sons, Hoboken, 2005.
86. Babuska R., Mamdani E. Fuzzy control. *Scholarpedia*, 3(2), 2013, 2008, doi: 10.4249/scholarpedia.2103.
87. Banks W., Hayward G. *Fuzzy logic in embedded microcomputers and control system*. Waterloo: Byte Craft Limited, 2002.
88. Boiculescu L., Teodorescu H., Dimitriu G. Optimizatoin of fuzzy controllers by exhaustive, trial & error and genetic methods. Medical applications. *Computer Science Journal of Moldova*, 4(1), 1996, 69-87 p.
89. Chen C., Chen Y. Self-organizing fuzzy logic controller design. *Computers in Industry*, 22(3), 1993, 249-261 p., doi: 10.1016/0166-3615(93)90092-F.
90. Mastacan L., Alah I., Anita L. Fuzzy control for thermal plant. In A. Graur (Ed.), *International Conference on Development and applications systems: nr. 9, „Ștefan cel Mare” University Press, Suceava*, 1998, 107-112 p.
91. Mendel J. M., Mouzouris G. C. Designing fuzzy logic systems. *IEEE Transactions on Circuits and Systems –II: Analog and Digital Signal Processing*, 44(11), 1997, 885-895 p.
92. Von Altrock C. *Practical fuzzy logic design*. Fuzzy Application Library/Technical Applications. Retrieved February 19, 2008, http://fuzzytech.com/e/e_a_pdf.html.
93. Ketata R., De Geest D., Titli A. Fuzzy controller: design, evaluation, parallel and hierarchical combination with a PID controller. *Fuzzy Sets and Systems*, 71, 1995, 113-129 p., doi: 10.1016/0165-0114(94)00189-E.
94. Wan E. A. *Control systems: Classical, Neural and Fuzzy*, Oregon Graduate Institute – lecture notes., 1998.
95. Catsoulis J. *Designing Embedded Hardware*. O'Reilly, 2nd edition, 2005, [ISBN 0596007558](https://www.isbn-international.org/product/0596007558).
96. Noergaard T. *Embedded Systems Architecture. A Comprehensive Guide for Engineers and Programmers*. Elsevier, 2005, 35-60 p.
97. Berger A. *Embedded Systems Design. An Introduction to Processes, Tools and Techniques*. CMP Books, 2002, 17-31 p.
98. Wolf W. *Computers as Components. Principles of Embedded computing system design*. Morgan Kaufmann Publishers, 2nd edition, 2008, 18-27 p., ISBN_9780123743978.

99. OMAP5432 Multimedia Device Silicon Revision 2.0 Evaluation Module, Reference Guide, Texas Instruments OMAP™ Family of Products, May 2013, from <http://www.ti.com/lit/ug/swcu130/swcu130.pdf>
100. Blanchette J., Summerfield M., C++ GUI Programming with Qt 4, 2nd Edition. Prentice Hall, 2008, 718 p.
101. Шлее М., Qt 4.5. Профессиональное программирование на C++. БХВ-Петербург, 2010 896 с. ISBN 978-5-97775-0398-3.
102. Rubini A., Corbet J., Kroah-Hartman G. Linux Device Drivers, 3rd Edition. O'Reilly Media, 2005, 640p.
103. Matthew N., Stones R., Beginning Linux Programming, 3rd Edition. Wiley Publishing, 2004. 848 p.
104. Zaprojan S., Calmîcov I., Plotnic, C.; Carbone V., Monitorizarea procesului de fabricație a microfiredelor. In: STEFANUT, T. and C. RUSU, C., eds. "Conferința Națională de Interacțiune Om-Calculator" (ROCHI 2013): proceedings, Universitatea Tehnică Cluj-Napoca, Sept. 2-3, 2013. Matrix Rom, București, Romania, 2013, pp. 173-176. ISSN 2344 -1690.
105. Zaprojan S., Calmicov I., Plotnic C., Larin V., Pavel V. Intelligent system for the fabrication of glass-coated microwires. European Exhibition of Creativity and Innovation – EUROINVENT 2011, May 12-14, Iasi, Romania, 2011. p.100. ISBN 978-973-702-851-8.
106. Космин П. Л., Филиппов Н. Н.. К вопросу о неконтактном измерении поперечного сечения жилы микропровода в стеклянной изоляции на сверхвысоких частотах (СВЧ). Микропровод и приборы сопротивления. Вып. 5 стр. 119 – 122, «Штиинца», Кишинёв, 1967г.
107. Андреев В. А.. Влияние свойств материала микропровода на измерение диаметра жилы методами СВЧ. Микропровод и приборы сопротивления. Вып. 8 стр. 77 – 82, «Штиинца», Кишинёв, 1971г.
108. Андреев В. А., Космин П. Л., Тудоровский А. А.. Измерение параметров микропровода на СВЧ. Микропровод и приборы сопротивления. Вып. 8 стр. 83 – 89, «Штиинца», Кишинёв, 1971г.
109. Zaprojan S., Pavel V., Larin V., Calmicov I. An Approach for Measuring the Parameters of Magnetic Wires. Book of abstracts of the International workshop on magnetic wires IWMW-2008. May 8-10, Zumaia, Spain, 2008, p. 45.
110. Dorogan V., Zaprojan S., Munteanu E., Larin V., Pavel V., Vieru S., Vieru T., Calmîcov I. Dispozitiv pentru măsurarea diametrului miezului și grosimii învelișului din sticlă al microfirului. Brevet de invenție MD 941. 2016-03-31.


111. Dorogan V., Zaprojan S., Munteanu E., Larin V., Pavel V., Vieru T., Vieru S., Calmîcov I. Metodă de măsurare a diametrului miezului și grosimii învelișului din sticlă al microfirului. Brevet de invenție MD 942. 2016-03-31.
112. Dorogan V., Zaprojan S., Vieru, T., Munteanu E., Larin V., Pavel V., Vieru, S., Calmîcov I., Metodă de măsurare a diametrului miezului microfiredelor și a grosimii învelișului din sticlă. In: Salonul Internațional al Cercetării, Inovării și Inventicii PRO INVENT 2015, ed. a 13-a, Cluj-Napoca, România, 25-27 martie 2015. Cluj-Napoca: Ed: U.T.Press, 2015, p. 286. ISBN 978-606-737-048-5.
113. Dorogan V., Zaprojan S., Munteanu E., Larin V., Pavel V., Vieru, S., Vieru, T., Calmîcov I., Metodă și dispozitiv pentru măsurarea diametrului miezului și a grosimii învelișului din sticlă al microfirului. In: Expoziția Internațională Specializată INFOINVENT 2015, ed. a 14-a, Chișinău, Moldova, 25-28 noiembrie 2015. Chișinău: Ed: AGEPI, 2015, p. 82.
114. Dorogan V., Zaprojan S., Munteanu E., Larin V., Pavel V., Vieru, S., Vieru, T., Calmîcov I., Dispozitiv pentru măsurarea diametrului miezului și grosimii învelișului microfirului. In: Salonul Internațional al Cercetării, Inovării și Inventicii PRO INVENT 2014, ed. a 12-a, Cluj-Napoca, România, 19-21 martie 2014. Cluj-Napoca: Ed: U.T.Press, 2014, p. 178. ISBN 978-973-662-932-7.
115. Dorogan V., Zaprojan S., Munteanu E., Larin V., Pavel V., Vieru, T., Secieru, V., Vieru, S., Calmicov I., System for measuring the nucleus diameter and coating thickness of the microwire. In: European Exhibition of Creativity and Innovation EUROINVENT-2014: proceedings of the 6th ed., Iasi, Romania, 22-24 May 2014. Iași: Ed. Univ. A.I. Cuza din Iași, 2014, pp. 87-88. ISBN 978-606-714-037-8.
116. Dorogan V., Zaprojan S., Munteanu E., Larin V., Pavel V., Vieru, T., Vieru, S., Calmicov I., System for measuring the nucleus diameter and coating thickness of the microwire. In: The 18th International Conference of Inventics; The 18th International Exhibition of Research, Innovation and Technological Transfer "Inventica 2014", Iasi, Romania, July 2th-4th, 2014: Workshop Inventica 2014. Iași: Performantica, 2014, p. 509. ISSN 1844-7880.
117. Dorogan V., Zaprojan S., Larin V., Vieru, T., Calmîcov I., Vieru, S., Munteanu E., Dorogan A., Secieru V. Sistem optoelectronic pentru măsurarea diametrului miezului și grosimii învelișului din sticlă a microfiredelor. Catalogul Salonului Internațional al Cercetării, Inovării și Inventicii. Ediția a XI-a. 19 – 22 martie 2013. Cluj – Napoca, România. Editura U.T.Press Cluj-Napoca, 2013. p.221.
118. Dorogan V., Zaprojan S., Larin V., Vieru, T., Calmicov I., Vieru, S., Munteanu E., Dorogan A., Secieru V. Optoelectronic device for measuring the glass thickness and

- diameter of the micro-wires. Catalog of the 38-th International Invention Show INOVA - 2013. 12-17 noiembrie 2013. Zagreb, Croația. p.
119. Дороган В., Запорожан С., Мунтяну Е., Виеру С., Ларин В., Павел В., Калмыков И., Секриеру В., Виеру Т., Дороган А. Оптическая система для измерения диаметра жилы и толщины стеклянной оболочки микропровода. В: 17-й Московский международный Салон изобретений и инновационных технологий АРХИМЕД 2014, Москва, Россия, 1-4 апр. 2014. Каталог инноваций: Электричество, электроника, нанотехнологии. М., 2014, с.16.
 120. Calmîcov I., Устройство измерения угла поворота. Conferința Tehnico-Științifică a Colaboratorilor, Doctoranzilor și Studenților UTM. 17-18 noiembrie, 2006, Chișinău, U.T.M. – Vol.1, pp.197-200, ISBN 978-9975-45-025-6.
 121. Voultoury P., BLDC Application Note Sensorless Speed Controlled Brushless DC Drive using the TMS320C242 DSP Controller. Application Report, Texas Instruments Digital Signal Processing Solutions, 1998, 17 p.
 122. Бобровский С., Технологии C++ Builder. Разработка приложений для бизнеса. Учебный курс. Питер-Пресс, 2007, 560 с. ISBN 978-5-91180-213-4.
 123. Calmîcov I., Microcontrolere AVR în sisteme de acționare electrică. Conferința Tehnico-Științifică a Colaboratorilor, Doctoranzilor și Studenților UTM. 15-17 noiembrie, 2007, Chișinău, U.T.M. – Vol.1, pp.201-204, ISBN 978-9975-45-068-3.
 124. Calmîcov I., Subsistem grafic pentru aplicații de timp real. Conferința Tehnico-Științifică a Colaboratorilor, Doctoranzilor și Studenților UTM. 15-17 noiembrie, 2009, Chișinău, U.T.M. – Vol.1, pp.122-125, ISBN 978-9975-45-065-2.
 125. MB86290A - Graphics Controller Hardware Specifications., Revision 2.0b, FUJITSU LIMITED, 2000.
 126. Zaporozjan S., Calmîcov I., Pavel V., Larin V., Carbune V., Computer aided system for measuring the parameters of bi-stable magnetic wires. European Exhibition of Creativity and Innovation – EUROINVENT 2012, May 10-12, Iasi, Romania. 2012, p.145
 127. Zaporozjan S., Calmîcov I., Pavel V., Larin V., Carbune V., Sistem de măsurare a parametrilor firelor magnetice bistabile asistat de calculator. The XVI-th International Exhibition of Research, Innovation and Technological Transfer „INVENTICA 2012”, June 13-15, Iasi, Romania. 2012, pp.632-633. ISSN: 1844-7880.
 128. Zaporozjan S., Calmîcov I., Pavel V., Larin V., Carbune V., System for measuring the parameters of magnetic microwires. VIII International Salon of Inventions and New Technologies „New Time”, September 27-29, Sevastopol, Ukraine. 2012, pp.146-147.

129. Zaporozhan S., Calmicov I., Pavel V., Larin V., Carbune V. System for measuring the parameters of magnetic microwires. VI International Warsaw Invention Show – IWIS 2012, October 16-19, Warsaw, Poland. 2012, p.66.
130. Di Paolo Emilio M., Embedded Systems Design for High-Speed Data Acquisition and Control. Springer, 2015, 30-36 p.
131. Ларин В., Запорожан С., Калмыков И., Кику Л. Магнитные свойства литых микропроводов с индуцированной анизотропией. “Магнитные Материалы. Новые Технологии”: Сборник трудов V-ой Байкальской международной конференции. Сентябрь 21-25, Иркутск, Россия, 2012, pp. 63-64. ISBN 978-5-85827-756-9.
132. Устименко Л. Г., Хандогина Е. Н., Владимиров Д. Н. Применение наноматериалов для поглотителей электромагнитных волн. "Проблемы черной металлургии и материаловедения", №2, 2009 г., Москва, 2009
133. Попов В.В., Гигантский магнитный импеданс в аморфных микропроводах в диапазоне сверхвысоких частот. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Москва 2014.
134. Clare A., King W., LaCourse W., Liebermann H., O'Keefe J., patent number US 2006/0086528 A1, United States of America, 2006.
135. Liebermann H., LaCourse W., Clare A., King W., O'Keefe J., patent number US 7.233.249 B2, United States of America, 2007

DECLARAȚIA PRIVIND ASUMAREA RĂSPUNDERII

Subsemnatul, Calmîcov Igor, declar pe propria mea răspundere că materialele prezentate în teza de doctor se referă la propriile activități și realizări, în caz contrar urmînd să suport consecințele, în conformitate cu legislația în vigoare.

CURRICULUM VITAE		
<p>Numele: Prenumele: Data și locul nașterii:</p>	<p>Calmîcov Igor 2 februarie 1981, rn. Grigoriopol, s. Hîrtop, Republica Moldova</p>	
<p>STUDII: Superioare: Doctorat:</p>	<p>Universitatea Tehnică a Moldovei, 1998-2003, Facultatea Calculatoare Informatică și Microelectronică, specialitatea Calculatoare; 2006-2007 - studiile de masterat, specialitatea Calculatoare. Doctorand, studii cu frecvență redusă, Universitatea Tehnică a Moldovei, 2007-2010, specialitatea 232.01 – “Sisteme de conducere, calculatoare și rețele informaționale”</p>	
<p>Domenii de interes științific:</p>	<p>Sisteme încorporate; elaborarea și confecționarea dispozitivelor electronice.</p>	
<p>Activitatea profesională: 2003-2004 2003-2006 2006 - prezent</p>	<p>Inginer-proiectant la SRL ”COMELPRO”, Chișinău. Profesor de specialitate la catedra „Sisteme Informaționale”, Colegiul Politehnic din mun. Chișinău. Lector la catedra Calculatoare, Universitatea Tehnică a Moldovei.</p>	
<p>Participări în proiecte științifice naționale și internaționale:</p>	<p>Participant în proiecte 5 proiecte de transfer tehnologic, instituționale și internaționale.</p>	
<p>Participări la foruri științifice:</p>	<p>Participări la 25 foruri științifice din Republica Moldova și străinătate.</p>	
<p>Publicații:</p>	<p>Au fost publicate 35 de lucrări științifice în domeniul sistemelor încorporate, sistemelor de producție a microfidelor, procesării imaginilor.</p>	
<p>Premii, mențiuni, Distincții:</p>	<p>Diplome de excelență – 8; Medalii de aur – 5, de argint – 5, de bronz – 1.</p>	
<p>Cunoașterea limbilor:</p>	<p>Română, engleză, rusă.</p>	
<p>Date de contact:</p>	<p>str. Studenților 9/18, MD 2045, Chișinău, Republica Moldova tel.: +37369379194 email: igor.calmicov@calc.utm.md, igor.calmicov@gmail.com</p>	