

UNIVERSITATEA TEHNICĂ A MOLDOVEI

Cu titlu de manuscris

C.Z.U.: 004.383; 681.5

MUNTEANU EUGENIU

**ELABORAREA SISTEMELOR INTELIGENTE ÎNCORPORATE
PENTRU APARATURĂ DE MĂSURARE ȘI CONTROL FĂRĂ
CONTACT**

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

Teză de doctor în științe inginerești

Conducător științific

Zaporojan Sergiu
dr. în șt. tehnice, conf.univ.

Autor

Munteanu Eugeniu

CHIȘINĂU, 2024

©Munteanu Eugeniu, 2024

CUPRINSUL

ADNOTARE.....	6
ANNOTATION	7
АННОТАЦИЯ	8
LISTA TABELELOR	9
LISTA FIGURILOR	10
LISTA ABREVIERILOR	12
INTRODUCERE.....	13
1. STADIUL ACTUAL ȘI TENDINȚE ÎN DEZVOLTAREA SISTEMELOR DE MĂSURARE/MONITORIZARE ȘI CONTROL ÎN CONTEXTUL IOT	21
1.1 Locul și rolul aparaturii de măsurare și control în era IoT	21
1.1.1 Definirea Industry 4.0 – premisele IoT	22
1.1.2 Caracterizarea IoT	25
1.1.3 Tendințe de dezvoltare IoT.	26
1.1.4 Aspectul inteligenței în sistemele și dispozitivele moderne.....	28
1.2 Sisteme și dispozitive inteligente încorporate: aspecte generale și tendințe.....	29
1.2.1 Mijloace pentru calcul la margine	29
1.2.2 FPGA și AI în calculul la margine	30
1.2.3 Inteligența artificială la margine	30
1.3 Paradigma calculului la margine și inteligența încorporată.....	32
1.3.1 Conceptul calculului la margine.....	32
1.3.2 Aspecte generale referitor la calculul la margine.....	33
1.3.3 Platforme orientate spre calculul la margine.....	34
1.4 Direcții prioritare de aplicare și dezvoltare a inteligenței încorporate la margine.....	38
1.4.1 Direcții prioritare a IoT și calcul la margine	38
1.4.2 Direcții de interes vital	40
1.4.3 Dezvoltarea aplicațiilor de interes social	41

1.4.4	Abordarea problemelor industriale.....	43
1.5	Formularea problemei de cercetare.....	43
1.6	Concluzii la capitolul 1	46
2.	ELABORAREA DISPOZITIVELOR DE CALCUL LA MARGINE PENTRU DEZVOLTAREA APLICAȚIILOR FĂRĂ CONTACT	47
2.1	Aplicații senzorige	47
2.2	Elaborarea senzorilor de deformare fără contact în baza microfiringelor	48
2.2.1	Materiale utilizate pentru turnarea microfiringelor	49
2.2.2	Tehnologii de prelucrare și cercetare a microfiringului	51
2.3	Elaborarea dispozitivului de calcul la margine pentru aplicații de monitorizare a deformațiilor	53
2.3.1	Măsurarea deformațiilor elastice.....	55
2.3.2	Dispozitiv de calcul la margine pentru monitorizarea/măsurarea deformațiilor elastice.....	56
2.3.3	Algoritmul de calcul la margine a deformațiilor elastice.....	58
2.4	Dispozitiv de măsurare și control a parametrilor geometrici a microfiringelor.....	61
2.4.1	Măsurări post producere a parametrilor	61
2.4.2	Măsurarea parametrilor în timpul turnării microfiringelor.....	62
2.4.3	Măsurarea și monitorizarea online a parametrilor microfiringului prin metode optice	63
2.5	Platforme și mecanisme de măsurare a parametrilor geometrici a microfiringelor	68
2.6	Concluzii la capitolul 2	72
3.	ELABORAREA MODELELOR PENTRU MENTENANȚĂ PREDICTIVĂ ÎN IOE.....	74
3.1	Studiu de caz introductiv	74
3.2	Modelări numerice ale deformațiilor elastice.	81
3.3	Arhitectura unui sistem de monitorizare a condițiilor de lucru și mentenanță predictivă.....	85

3.3.1	Abordări în mentenanța predictivă	86
3.3.2	Sisteme de mentenanță predictivă	87
3.4	Utilizarea rețelelor neuronale pentru mentenanță predictivă	90
3.4.1	Generarea rețelei neuronale.....	91
3.4.2	Acuratețea rețelei neuronale antrenate	93
3.4.3	Utilizarea ANN în mentenanță predictivă.....	94
3.4.4	Comportamentul modelului de mentenanță predictivă	96
3.5	Analiza și implementarea modelului de mentenanță	98
3.6	Concluzii la capitolul 3	101
4.	MONITORIZARE ȘI CONTROL FĂRĂ CONTACT A PENDULULUI	103
4.1	IoT în educație ca domeniu prioritar.....	103
4.2	Metodele și procedurile aplicate	104
4.3	Achiziții de date si metode de comunicare	109
4.3.1	Măsurarea și controlul pendulului.....	111
4.3	Performanță și fiabilitate.....	114
4.4	Concluzii la capitolul 4	117
	CONCLUZII GENERALE	121
	RECOMANDĂRI	122
	BIBLIOGRAFIE.....	123
	ANEXE	135
	Anexa 1. Rularea aplicației de monitorizare a deformațiilor în limbajul C	135
	Anexa 2. Rularea modelului de monitorizare a deformațiilor în limbajul C.....	137
	Anexa 3. Rețeaua neuronală generată în limbajul C	143
	Anexa 4. Brevete obținute și aprecieri ale rezultatelor științifice.....	145
	Anexa 5. Act de implementare pentru rezultatele obținute	150
	DECLARAȚIA PRIVIND ASUMAREA RĂSPUNDERII	151

ADNOTARE

la teza “Elaborarea sistemelor inteligente încorporate pentru aparatură de măsurare și control fără contact” prezentată de către Munteanu Eugeniu pentru conferirea titlului științific de doctor în științe inginerești, Chișinău, 2024

Structura tezei. Teza de doctor cuprinde introducerea, patru capitole, concluzii, bibliografia cu 125 titluri, 5 anexe, 109 pagini text de bază, inclusiv 55 figuri și 2 tabele. Rezultatele obținute sunt publicate în 20 lucrări științifice, au fost obținute 4 brevete de invenție.

Cuvinte cheie: internetul lucrurilor, sisteme încorporate, calcul/inteligență la margine, modele AI, senzori/dispozitive de măsurare fără contact, microfîr, mentenanță predictivă.

Domeniul de cercetare: tehnologii, modele, metode și sisteme inteligente încorporate.

Scopul lucrării: elaborarea de noi modele, metode și dispozitive inteligente încorporate pentru dezvoltarea aplicațiilor de măsurare/monitorizare fără contact în domeniul internetului industrial al lucrurilor, internetului energiei și educației.

Obiectivele cercetării: analiza tendințelor și cerințelor în dezvoltarea dispozitivelor inteligente încorporate cu aplicare pe continuumul „cloud - calcul la margine – IoT/IIoT/IoE”, elaborarea metodelor și dispozitivelor cu senzori în baza microfîrului, elaborarea modelelor AI și a structurilor de calcul la margine pentru sisteme de monitorizare fără contact în domeniu IoE.

Noutatea și originalitatea științifică: noi modele, metode și structuri de calcul la margine, cu implementarea modelelor de rețele neuronale, pentru dezvoltarea aplicațiilor de monitorizare fără contact. Originalitatea soluțiilor propuse constă în îmbinarea metodelor AI pe bază de seturi de date parțial sintetice cu tehnicile de proiectare a dispozitivelor la margine.

Problema științifică soluționată: cercetarea și elaborarea unor noi metode și dispozitive pentru măsurarea fără contact a unor mărimi precum deformațiile corpurilor solide supuse la întindere, inclusiv a celor ireversibile, și grosimea învelișului din sticlă al firului metalic în procesul de fabricare. Propunerea de generare prin modelare numerică a seturilor de date virtuale permite modelarea cu metode AI, în cazul aplicațiilor cu seturi de date statistice incomplete.

Semnificația teoretică: elaborarea metodelor originale de măsurare, monitorizare și control fără contact. Abordarea prezentată presupune dezvoltarea algoritmilor de AI prin crearea seturilor de date în baza datelor colectate și datelor sintetice obținute prin modelări numerice.

Valoarea aplicativă a lucrării: dispozitivele cu senzori, structurile de calcul la margine și modelele elaborate reprezintă o bază reală pentru dezvoltarea aplicațiilor în domeniul IIoT și IoE, în particular pentru aplicații de mentenanță predictivă.

Implementarea rezultatelor: Rezultatele sunt aplicate în procesul didactic la UTM.

ANNOTATION

for the thesis with title “Development of intelligent embedded systems for non-contact measurement and control equipment”, presented by Munteanu Eugeniu for conferring a Ph.D. title in engineering sciences, Chişinău, 2024

Thesis structure. The Ph.D. thesis comprises the introduction, four chapters, conclusions, and bibliography with 125 titles, 5 appendices, 109 pages of basic text, including 55 figures and 2 tables. The obtained results are published in 20 scientific papers, 4 invention patents were obtained.

Keywords: internet of things, embedded systems, edge computing/intelligence, AI models, non-contact sensors/measuring devices, microwire, predictive maintenance.

The study domain: technologies, models, methods, intelligent embedded systems.

The purpose of research: development of new models, methods and intelligent embedded devices for the development of non-contact measurement/monitoring applications in the field of Industrial Internet of Things, Internet of Energy and Internet of Education.

The research objectives: analysis of trends and requirements in the development of smart embedded devices with application on the "cloud - edge computing - IoT/IIoT/IoE" continuum, development of microwire-based sensor methods and devices, development of AI models and edge computing structures for contactless monitoring in the IoE domain.

The scientific novelty: new edge computing models, methods and structures with the implementation of neural network models, for the development of non-contact monitoring applications. The originality of the proposed solutions lies in combining AI methods based on partially synthetic data sets with edge device design techniques.

The solved scientific problem: research and development of new methods and devices for non-contact measurement of quantities such as the deformations of solid bodies subjected to stretching, including irreversible ones, and the thickness of the glass coating of the metal wire in the manufacturing process. The proposed approach of numerical modeling of virtual datasets enables modeling with AI methods in the case of applications with incomplete statistical datasets.

The theoretical significance: development of original non-contact measurement, monitoring, control methods. The presented approach involves the development of AI algorithms by creating datasets based on collected and synthetic data obtained through numerical modeling.

The applied value: sensor devices, edge computing structures and belabored models are a real basis for the development of IIoT and IoE applications, in particular for predictive maintenance applications.

The implementation of results: The results are applied in the didactic process at UTM.

АННОТАЦИЯ

к диссертации "Разработка встроенных интеллектуальных систем для бесконтактной контрольно-измерительной аппаратуры", представленной Мунтяну Еуджениу для присуждения ученой степени доктора технических наук, Кишинев 2024

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, выводов, библиографии из 125 наименований, 5 приложений, 109 страниц основного текста, включая 55 рисунков и 2 таблицы. Результаты опубликованы в 20-и работах, получены 4 патента.

Ключевые слова: интернет вещей, встроенные системы, граничные вычисления, модели ИИ, микропровод, предиктивное обслуживание.

Область исследования: модели, методы, встроенные интеллектуальные системы.

Цель работы: разработка новых моделей, методов, а также встроенных интеллектуальных устройств для разработки бесконтактных приложений в области промышленного интернета вещей, интернета энергии и образования.

Цели исследования: анализ тенденций и требований в развитии встроенных интеллектуальных устройств на континууме "облако - вычисления на границе - IoT/IIoT/IIoE", разработка моделей ИИ и вычислительных граничных вычислительных структур для бесконтактных мониторинговых систем в области IoE.

Новизна и научная оригинальность: модели, методы и граничные вычислительные структуры с внедрением моделей нейронных сетей для разработки бесконтактных приложений мониторинга. Оригинальность решений заключается в сочетании методов ИИ на основе частично синтетических наборов данных и проектирования граничных устройств.

Решённая научная задача: исследование и разработка новых методов/устройств для бесконтактного измерения деформации твердых тел, подвергаемых растяжению, включая необратимые, измерения толщины стеклянного покрытия микропровода при его изготовлении. Предложена генерация виртуальных данных для моделирования приложений с неполными наборами данных методами ИИ.

Теоретическое значение: разработка методов мониторинга, контроля и бесконтактного измерения. Представленный подход предполагает разработку алгоритмов ИИ на основе наборов данных, полученных посредством численного моделирования.

Практическая значимость: датчики, граничные вычислительные структуры и разработанные модели представляют собой реальную основу для разработки приложений в области IIoT, IoE, в частности, для приложений предиктивного обслуживания.

Внедрение научных результатов: применяются в учебном процессе ТУМ.

LISTA TABELELOR

Tabelul 3.1 Parametrii constructivi și funcționali ai rotorului analizat

Tabelul 3.2 Rezultatele simulării deformațiilor specifice ε

LISTA FIGURILOR

- Fig. 1.1. Infrastructura Calculului la margine
- Fig. 1.2. Dinamica interesului față de Calculul la Margine
- Fig. 1.3. Performanțele cu accelerator ML
- Fig. 1.4. Structura acceleratorului MVP
- Fig. 1.5. Caracteristica de falimentare a palelor turbinei eoliene
- Fig. 1.6. Rata de falimentare a turbinelor eoliene
- Fig. 2.1. Stand pentru verificarea răspunsului caracteristicilor magnetice
- Fig. 2.2. Dependența forței coercitive (H_c) de tensiunea la întindere elastică (σ)
- Fig. 2.3. Măsurarea caracteristicilor magnetice la deformări elastice
- Fig. 2.4. Dispozitiv tensiometric bazat pe microfibr
- Fig. 2.5. Variația forței coercitive (H_c) funcție de deformarea elastică ($\Delta l/L$)
- Fig. 2.6. Variația forței coercitive (H_c) funcție de deformarea elastică ciclică ($\Delta l/L$)
- Fig. 2.7. Răspunsul magnetic al microfibrilor de referință și sensibile
- Fig. 2.8. Dispozitiv de calcul la margine pentru măsurarea deformărilor elastice
- Fig. 2.9. Algoritm de calcul la margine a deformărilor elastice
- Fig. 2.10. Citirea senzorilor în arhitectură radială
- Fig. 2.11. Transparența sticlei în funcție de lungimea de undă a luminii
- Fig. 2.12. Ansamblu de colimare
- Fig. 2.13. Forma fascicolului de lumină și poziția microfibrului
- Fig. 2.14. Măsurarea semnalului utilizând ansamblurile de colimare
- Fig. 2.15. Platformă de colimare
- Fig. 2.16. Măsurarea microfibrului în procesul de turnare
- Fig. 3.1. Exemplu de vas sub presiune cu filament și carcasă din compozit
- Fig. 3.2. Diagrama deformațiilor echivalente pentru recipientul din oțel (MPa)
- Fig. 3.3. Monitorizarea condițiilor de lucru pentru parc eolian
- Fig. 3.4. Modelul discretizării palei în elemente finite
- Fig. 3.5. Distribuția tensiunilor echivalente în învelișul palei la 16 m/s
- Fig. 3.6. Structura dispozitivului de calcul la margine cu număr limitat de senzori (a) și implementare pentru număr extins de noduri vulnerabile (b)
- Fig. 3.7. Procedura de luare a deciziilor în cadrul sistemului de monitorizare
- Fig. 3.8. Structura sistemului inteligent de monitorizare
- Fig. 3.9. Algoritm de monitorizare a deformațiilor în palele turbinelor

Fig. 3.10. Formatul protocolului de date pentru senzori(a) și actuatori(b)

Fig. 3.11. Diagrama de antrenare a ANN optimă (a) și invalidată (b)

Fig. 3.12. Structurile ANN optimă (a) și invalidată (b)

Fig. 3.13. Histograma erorii medii pătrate a ANN optimă (a) și invalidată (b)

Fig. 3.14. Aproximarea deformării palei (locația #1)

Fig. 3.15. Schema bloc Simulink a unui sistem de mentenanță predictivă

Fig. 3.16. Viteza vântului pentru perioada analizată

Fig. 3.17. Graficul semnalelor de avertizare generate de model

Fig. 3.18. Graficul deformațiilor specifice generate de modelul ANN

Fig. 3.19. Modelul rafalei aplicate

Fig. 3.20. Deformări critice

Fig. 3.21. Depășirea valorilor nominale de deformare

Fig. 3.22. Modelul de detectare a deformațiilor critice

Fig. 4.1. Metoda de măsurare a amplitudinii pendulului Foucault

Fig. 4.2. Schema de plasare a perechilor Laser-Fotodetector

Fig. 4.3. Schimbarea coeficientului de eroare K

Fig. 4.4. Structura sistemului de măsurare și control cu pendulul Foucault

Fig. 4.5. Caracteristica forței aplicate pendulului

Fig. 4.6. Arhitectura orologiului gravitațional

Fig. 4.7. Structura perifericilor pendulului Foucault

Fig. 4.8. Diagrama de control și măsurare a amplitudinii

Fig. 4.9. Structura funcțională a SI periferic

Fig. 4.10. Schema schiță a pendulului Foucault

Fig. 4.11. Structura ansamblului de citire cu magistrală RS485

LISTA ABREVIERILOR

HW – Hardware

IoT – internetul lucrurilor (Internet of Things)

IIoT – internetul lucrurilor industriale (Industrial Internet of Things)

IoE – internetul energiei (Internet of Energy)

AI – inteligență artificială (Artificial Intelligence)

EAI – inteligență artificială la margine (Edge Artificial Intelligence)

IoMT - internetul lucrurilor medicale (Internet of Medical Things)

SW – Software

RTOS – sistem de operare în regim de timp real (real-time operating system)

SI – sisteme integrate

MVP – procesor de vectori matricial (Matrix Vector Processor)

LUT – tabel de corespondență (look up table)

PTM – prelucrare termomecanică

DClcMa – dispozitiv de calcul la margine

SEM - scanare microscopică electronică (Scanning Electron Microscope)

SHM – monitorizare a integrității structurale (Structural Health Monitoring)

CMS – sistem de monitorizare a stării (Condition Monitoring System)

SMF – Senzor bazat pe microfibr

STeM – Senzor tensiometru

ANN – rețea neuronală artificială (Artificial Neural Network)

MSE - eroarea medie pătrată (Mean square error)

FPGA – Field Programable Gate Array

CPLD – Complex Programable Logic Device

ASIC – application specific integrated circuits

DSP – digital signal processor

SoC – System on Chip

WT – turbină eoliană (Wind turbine)

Timestamp – etichetă de timp

ID – etichetă de identificare (identification document)

EDA – automatizarea designului electronic (Electronic Design Automation)

MRLM – măsurător de rezistență liniară a microfibrului

INTRODUCERE

Actualitatea temei de cercetare. Este bine cunoscut că internetul lucrurilor (IoT) reprezintă una dintre cele mai importante tehnologii moderne, aceasta avansând pe măsură ce companiile realizează potențialul și impactul dispozitivelor conectate pentru menținerea unui nivel suficient de competitiv. O consecință de neglijat a internetului lucrurilor, dispozitivelor și aplicațiilor pe care le înglobează este volumul imens de date generate. Având în vedere că puterea de calcul se apropie de margine, Comisia Europeană coinvestește în implementarea unor spații europene comune ale datelor pentru sectoare precum agricultura, energia, asistența medicală, transporturile, etc. pentru a se asigura că datele devin disponibile pentru a fi utilizate în economie și societate [1]. Se poate afirma cu certitudine că cercetarea științifică pe axa “IoT - dispozitive de calcul la margine” reprezintă un domeniu emergent esențial pentru Industria 4.0/5.0, dar și pentru sfera socială, societate în ansamblu.

Volumul imens de date disponibile combinat cu puterea în creștere spectaculoasă a metodelor inteligenței artificiale (AI) oferă posibilitatea de a aborda probleme complexe, care nu erau accesibile în urmă cu câțiva ani. Progresele de ultimă oră în AI se datorează dezvoltării rapide a algoritmilor de învățare automată. În particular constatarea se referă la modelele de algoritmi și rețele neuronale. Noile progrese în știința materialelor, dispozitivele cu senzori și calculul la margine pot oferi un suport științifico-tehnic pentru luarea deciziilor bazate pe date consistente, coerente. Tehnologia sau paradigma de calcul la margine presupune realizarea dispozitivelor și sistemelor inteligente încorporate capabile să ia decizii în timp real, fără a necesita o conexiune constantă la cloud. Astfel, aplicațiile moderne pot avea un impact benefic doar luând în considerare abordările moderne AI/învățare automată, împreună cu cele mai recente tehnologii pe continuumul „cloud - calcul la margine - IoT” și, nu în ultimul rând, constrângerile impuse de aplicațiile dezvoltate. Din analiza tendințelor de dezvoltare în domeniu se poate trage concluzia că capacitatea de învățare automată are o limită fundamentală care ține de caracteristicile resurselor electronice și/sau platformelor hardware. Cu alte cuvinte, resursele electronice utilizate în implementarea algoritmilor de inteligența artificială reprezintă un aspect critic al cercetării.

La ora actuală inteligența încorporată reprezintă un domeniu de cercetare emergentă care are obiectivul de a îngloba algoritmi de învățare automată și algoritmi de luare a deciziilor în sisteme încorporate și/sau în diverse dispozitive de margine. Odată cu creșterea funcționalităților și complexității inteligenței încorporate crește și complexitatea sistemelor inteligente încorporate în aplicații de învățare automată. În contextul de mai sus, implementarea hard&soft (hardware/software deployment) reprezintă un subiect care atrage mult interes și atenție.

Rezumând, devine evidentă tendința de a elabora, dezvolta și integra soluții bazate pe AI/învățare automată [2, 3], în particular pe soluții ce înglobează modele de învățare automată și dispozitive electronice de calcul inteligent la margine. Acesta din urmă se pretează foarte bine la o gamă largă de potențiale aplicații fără contact. De exemplu, pentru a modela și/sau monitoriza sisteme/obiecte de inginerie complexe, abordările de astăzi se bazează pe un mix de tehnologii și metode. Acestea au ca scop detectarea și colectarea datelor esențiale, analiza și procesarea datelor, dar și elaborarea modelelor computaționale capabile să monitorizeze starea funcțională sau să prezică comportamentul sistemelor/obiectelor în cauză [4, 5]. O problemă critică ține de proiectarea unor soluții de detectare fezabile și viabile, aceasta fiind o sarcină dificilă [3]. Implementarea pe scară largă a soluțiilor de detectare este încă la început, atribuită diferitelor probleme economice și tehnice. În context, soluțiile de detectare pe bază de microfibre cu înveliș din sticlă ar putea fi utilizate pentru diverse aplicații fără contact, de la monitorizarea integrității diferitelor structuri, mașini, etc. până la dispozitive medicale inteligente. Pe de altă parte, este necesară cercetarea, elaborarea și alocarea componentei de inteligență la margine. Cercetările pe acest palier științific sunt actuale și pot oferi soluții tehnologice inovatoare în domeniul Internetului industrial al lucrurilor (IIoT)/Industria 4.0, cel al Internetului energiei (IoE), în particular pentru elaborarea și dezvoltarea aplicațiilor de măsurare/monitorizare și control fără contact.

O altă prioritate aplicativă IoT ține de domeniul educației [6]. Sfera IIoT/Industria 4.0 are capacitatea necesară de a imprima o evoluție avansată pe această dimensiune. În general, această evoluție este cunoscută sub denumirea de medii inteligente de învățare. Actualitatea și importanța IoT în domeniul educației este imperativă prin faptul că această prioritate este inclusă ca subiect tematic în numeroase conferințe în domenii ce țin de AI, electronică, telecomunicații, tehnologii emergente. Instituțiile de învățământ pot folosi sisteme IoT automatizate și avansate în programele lor de cercetare și studiu în cadrul unor discipline precum fizică, inginerie, astronomie, medicină etc. Prin abordarea de mai sus, elevii și studenții au posibilitatea de a învăța concepte și fenomene cu tehnologii avansate, totodată ea poate oferi instructorilor instrumente eficiente didactice. Pentru a accelera inovația, aceștia pot folosi, de asemenea, capacitățile AI și ML pentru a conecta echipamente specializate și baze de date, pentru a crește eficiența procesului educativ.

Astfel, dispozitivele de calcul la margine dețin potențialul de a transforma educația prin dezvoltarea unor aplicații viitoare specifice. După cum s-a menționat aici, tehnologia bazată pe dispozitive inteligente la margine, deși diferită de Cloud, este strâns legată și se completează reciproc. Odată ce școlile își virtualizează ecosistemele, este necesar de analizat cum să se facă alinierea nevoilor specifice cu elaborările pe continuumul „cloud - calcul la margine - IoT” pentru a obține beneficii pentru studenți, cadre didactice și școlii în ansamblu. Privit din acest unghi de

vedere, calculul la margine are un potențial enorm pentru aplicații de realitate augmentată și virtuală, cum ar fi laboratoarele și experimentele în sala de clasă. De exemplu, ar putea fi implementată comunicarea directă sau prin Cloud cu dispozitive inteligente la margine, cu condiția înglobării lor, de exemplu, în Pendule Foucault, care ar putea fi accesate la nivelul universităților și muzeelor științifice. Aceasta înseamnă să se asigure sinergii între lumea fizică și cea virtuală, ceea ce reprezintă abordări de actualitate.

Domeniul de cercetare. Teza de doctorat are ca domeniu de cercetare tehnologii, modele și metode pentru elaborarea dispozitivelor/sistemelor inteligente încorporate, având ca scop final utilizarea acestora la dezvoltarea aplicațiilor IIoT de măsurare/monitorizare și control fără contact.

Ipoteza de cercetare. Pornind de la tendințele de dezvoltare aplicativă avansată pe continuumul „cloud - calcul la margine – IoT”, crește substanțial rolul și importanța dispozitivelor inteligente încorporate în diverse aplicații de măsurare, monitorizare și control cu dispozitive la margine. Totodată, având în vedere impactul major al volumelor mari de date (big data) în cercetarea și dezvoltarea aplicațiilor moderne, se prefigurează necesitatea efectuării cercetărilor teoretice și aplicative care au la bază colectarea datelor din experimente și utilizarea tehnicilor inteligente în prelucrarea datelor generate prin simulări numerice. Astfel pot fi atinse obiective științifice specifice, care țin de elaborarea conceptuală a metodelor, modelelor și dispozitivelor cu aplicare în măsurarea/monitorizarea fără contact, aspect care reprezintă un pilon în aplicațiile moderne.

Scopul lucrării constă în elaborarea unor noi modele, metode și structuri care se pretează pentru crearea dispozitivelor inteligente încorporate necesare la dezvoltarea aplicațiilor de măsurare/monitorizare fără contact în domeniul internetului industrial al lucrurilor, internetului energiei și educației.

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

1. Analiza stadiului actual, a tendințelor și cerințelor în dezvoltarea dispozitivelor inteligente încorporate cu aplicare pe continuumul „cloud - calcul la margine – IoT/IIoT/IOE”;
2. Efectuarea cercetărilor experimentale și elaborarea metodelor și structurilor pentru crearea dispozitivelor la margine cu senzori în baza microfirului cu înveliș din sticlă;
3. Elaborarea conceptuală a unei metode și a dispozitivului încorporat pentru măsurarea/monitorizarea parametrilor geometrici ai microfirului;
4. Elaborarea modelelor de rețele neuronale și a dispozitivelor de calcul inteligent la margine pentru aplicații/sisteme de monitorizare fără contact în domeniul IOE;

5. Dezvoltarea sistemului încorporat de măsurare și control al amplitudinii pendulului Foucault cu accesarea virtuală a sistemelor cu pendul în domeniul industriei educației.

Sinteza metodologiei de cercetare și justificarea metodelor de cercetare alese.

Cercetările efectuate au la bază tehnicile de măsurare și control fără contact, experimentele științifice, tehnicile de achiziție și prelucrare a datelor, metodele modelării numerice, modelele de algoritmi și rețele neuronale, proiectarea sistemelor încorporate. Pe parcursul activităților de cercetare a fost utilizată metodologia ipotetico-deductivă. Argumentarea utilizării acestei metode reiese din natura experimentală a proceselor cercetate și din posibilitatea verificării experimentale a corectitudinii ipotezelor și presupunerilor formulate pe parcursul procesului de cercetare. În cadrul cercetării a fost realizată analiza datelor experimentale și a datelor statistice colectate cu generalizările de rigoare.

Noutatea și originalitatea științifică. Au fost elaborate noi modele, metode și structuri de calcul la margine, cu implementarea modelelor de rețele neuronale, pentru dezvoltarea aplicațiilor de monitorizare fără contact în domeniul IIoT și IoE, cu precădere pentru aplicații de mentenanță predictivă. Originalitatea soluțiilor propuse constă în îmbinarea metodelor de învățare automată pe bază de seturi de date parțial sintetice (virtuale) cu tehnicile de proiectare a dispozitivelor la margine cu senzori fără contact. Aceștia din urmă fiind elaborați în baza microfirului cu înveliș din sticlă, asigurându-se totodată calitatea microfirului prin măsurarea/monitorizarea parametrilor geometrici, având ca reper caracteristicile de transparență optică a microfirului.

Problema științifică soluționată constă în cercetarea și elaborarea unor noi metode și dispozitive atât pentru măsurarea fără contact a unor mărimi precum deformațiile corpurilor solide supuse la întindere, inclusiv a celor ireversibile, cât și pentru măsurarea fără contact a grosimii învelișului din sticlă al firului metalic în procesul de fabricare. Propunerea de generare prin modelare numerică a seturilor de date virtuale permite modelarea cu metode AI aplicațiilor cu seturi de date statistice incomplete.

Semnificația teoretică a lucrării o reprezintă elaborarea metodelor originale de măsurare, monitorizare și control fără contact a anumitor mărimi și procese tehnologice. Totodată, abordarea prezentată presupune dezvoltarea algoritmilor de AI prin crearea seturilor de date necesare procesului de învățare apelând la date statistice colectate și la date virtuale obținute prin modelări numerice. Acest fapt face posibilă modelarea și cercetarea sistemelor de suport decizional inerent aplicațiilor abordate.

Valoarea aplicativă a lucrării. Dispozitivele cu senzori, structurile de calcul la margine și modelele de rețele neuronale elaborate reprezintă o bază reală pentru dezvoltarea aplicațiilor de

monitorizare fără contact în domeniul IIoT și IoE, de exemplu pentru aplicații de mentenanță predictivă, iar sistemul încorporat de măsurare și control al amplitudinii pendulului Foucault poate oferi posibilitatea accesării virtuale a sistemelor cu pendul în medii inteligente de învățare.

Implementarea rezultatelor științifice. Rezultatele obținute au fost implementate în procesul didactic la UTM, respectiv în realizarea pendulului Foucault, amplasat în corpul administrativ al universității (proiect realizat sub conducerea acad. I. Bostan).

Rezultatele științifice înaintate spre susținere:

1. Metodă și dispozitiv de calcul la margine cu senzori fără contact în baza microfirului cu înveliș din sticlă.
2. Metoda și conceptul unui dispozitiv încorporat pentru sisteme de măsurare/monitorizare online a parametrilor geometrici ai microfirului, având ca reper caracteristicile de transparență optică a microfirului.
3. Modele de rețele neuronale artificiale cu implementare pe structuri de calcul la margine pentru dezvoltarea aplicațiilor de mentenanță predictivă în domeniul IoE.
4. Modele Matlab pentru modelarea și cercetarea sistemelor de suport decizional inerent aplicațiilor de mentenanță predictivă în domeniul IoE.
5. Sistem încorporat pentru măsurarea și controlul amplitudinii pendulului Foucault, ca parte componentă a conceptului IoT în domeniul educației.

Aprobarea rezultatelor lucrării. Rezultatele principale ale lucrării au fost apreciate și prezentate la următoarele conferințe științifice internaționale/naționale, simpozioane internaționale de inventică:

1. International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing, 2022, 2023, Cluj-Napoca, România.
2. 27th Edition of Innovative Manufacturing Engineering & Energy Conference, October 12-14, 2023, Chisinau, Republic of Moldova.
3. Salonului Internațional al Cercetării Științifice, Inovării și Inventicii PROINVENT 2022. Ediția a XX-a, Cluj-Napoca 26 - 28 octombrie 2022.
4. 9-th International Conference on Microelectronics and Computer Science & The 6th Conference of Physicists of Moldova, ICMCS 2017, Chisinau, Moldova, October 19-21 2017.
5. 9th Edition of European Exhibition of Creativity and Innovation, EUROINVENT 2017, May 25 – 27, 2017, Iași, Romania.
6. 8th International Conference on Materials Science and Condensed Matter Physics (MSCMP 2016), September 12-16, 2016, Chisinau, Republic of Moldova.

7. International Conference “Telecommunications, Electronics and Informatics”, 2015, Chisinau, Republic of Moldova.
8. 18th International Exhibition of Research, Innovation and Technological Transfer “Inventica 2014”, Iasi, Romania, July 2th-4th, 2014.
9. 38-th International Invention Show INOVA -2013. 12-17 noiembrie 2013. Zagreb, Croația.
10. Conferința Tehnico-Științifică a Colaboratorilor, Doctoranzilor și Studenților, 2006, 2007, Chișinău, Republica Moldova

Publicații științifice. La tema tezei au fost publicate 20 de lucrări științifice, dintre care două articole în reviste WoS, două articole în reviste de categoria B+, respectiv categoria B, inclusiv unul ca unic autor, cinci articole în culegeri științifice, dintre care două publicate în culegeri indexate WoS și Scopus, două articole la conferințe naționale și nouă teze în lucrările conferințelor științifice internaționale/naționale. De asemenea, la tema tezei au fost obținute patru brevete de invenție. Rezultatele obținute au fost apreciate cu 7 medalii de aur, 2 medalii de argint, 1 medalie de bronz.

Structura și volumul lucrării. Teza este compusă din introducere, patru capitole, concluzii finale, bibliografie (125 titluri) și 5 anexe. Conținutul de bază al tezei este expus pe 109 pagini, inserează 55 figuri și 2 tabele.

Conținutul de bază a lucrării.

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

În capitolul 1, **STADIUL ACTUAL ȘI TENDINȚE ÎN DEZVOLTAREA SISTEMELOR DE MĂSURARE/MONITORIZARE ȘI CONTROL ÎN CONTEXTUL IOT**, este realizată analiza conceptuală a domeniului de calcul la margine. A fost investigat stadiul actual de dezvoltare al Industriei 4.0 și rolul său în era IoT. A fost efectuat studiul modului în care s-a dezvoltat IoT, a soluțiilor tehnice, științifice și SW care au contribuit la aceasta. Au fost analizate problemele cu care se confruntă sistemele moderne inteligente și modul în care acestea se îmbunătățesc. Ca consecință au fost puse în evidență concepte noi și platforme de calcul la margine care contribuie la integrarea inteligenței la margine. Este efectuată trecerea în revistă a domeniilor impactate de IoT și a modului în care domeniile afectate au suferit îmbunătățiri. Este formulată problema și direcția de cercetare (triada metode și dispozitive cu senzori fără contact – modelare cu rețele neuronale – dezvoltare aplicații de măsurare și de monitorizare în domeniul

IoT).

În capitolul 2, **ELABORAREA DISPOZITIVELOR DE CALCUL LA MARGINE PENTRU DEZVOLTAREA APLICAȚIILOR FĂRĂ CONTACT**, este realizată o analiză a domeniului de utilizare a senzorilor fără contact și a domeniului de aplicare. Este analizată perspectiva de realizare a astfel de senzori în baza microfiredelor și descrise potențialele domenii de utilizare. Sunt cercetate diverse metode de îmbunătățire a sensibilității la deformații. Sunt descrise metoda și instrumentele de măsurare și cercetare a caracteristicilor de interes. Sunt dezvoltate modalități de calcul a deformațiilor.

A fost propusă și dezvoltată o metodă de măsurare a deformațiilor elastice pe bază de microfir cu înveliș din sticlă. Au fost studiate problemele aferente în procesul de măsurare și propuse soluții pentru îmbunătățirea mecanismelor de detectare/măsurare a deformațiilor.

Au fost expuse modalități de măsurare a parametrilor geometrici. Este propusă și prezentată o metodă și un dispozitiv de măsurare a parametrilor geometrici ai microfirului prin metode optice. Sunt analizate neajunsurile, problemele și limitările metodei elaborate.

În contextul studiului referitor la impactul parametrilor geometric asupra caracteristicilor microfiredelor utilizate în calitate de senzori tensiometru (STeM) [7], a fost propus un cadru de dezvoltare a metodei de măsurare optice a parametrilor microfirului nemijlocit în procesul de producere pentru a îmbunătăți caracteristicile finale. Au fost definite cerințele și elementele tehnice pentru realizarea acestei sarcini.

În capitolul 3, **ELABORAREA MODELELOR PENTRU MENTENANȚĂ PREDICTIVĂ ÎN IOE**, sunt analizate direcțiile prioritare a aspectului de mentenanță predictivă a turbinelor eoliene. Este efectuat un studiu a zonelor de risc în agregatele turbinei eoliene și sunt expuse mecanismele de îmbunătățire a duratei de exploatare. Este propus un model de mentenanță predictivă în contextul condițiilor mediului de exploatare și a practicilor de control.

Este prezentat un cadru de analiză a deformărilor elastice în palele turbinelor eoliene (cu diametru de 83m). Au fost efectuate simulări a deformațiilor elastice a palelor în domeniul de exploatare. Ca rezultat au fost stabilite puncte de interes care sunt expuse cel mai mult la deformații în domeniul nominal de lucru.

În contextul analizei efectuate a fost propus un sistem de mentenanță predictivă. Acest sistem de monitorizare utilizează date meteorologice, statutul stării de la diferite componente ale sistemului, inclusiv de la palele turbinelor, pentru luarea deciziilor inteligente de control și mentenanță.

Utilizând rezultatele simulărilor de deformații ale palelor a fost elaborat un ANN cu un neuron de intrare, zece neuroni în stratul ascuns și patru neuroni de ieșire. La intrarea ANN este

aplicată viteza curentă a vântului iar la ieșire sunt calculate deformațiile conform simulărilor. Deformațiile calculate sunt comparate cu deformațiile estimate, utilizând senzori bazați pe microfir. Implementând un algoritm de identificare a anomaliilor în deformații (cauzate de rafale de vânt sau vibrații de altă natură), de calculare a stresului cumulativ ca urmare a altor factori de mediu, se propune un sistem de mentenanță predictivă a palelor turbinei eoliene.

În capitolul 4, **MONITORIZARE ȘI CONTROL FĂRĂ CONTACT A PENDULULUI**, este descrisă elaborarea un sistem de monitorizare și control al pendulului Foucault. În acest sens au fost efectuate calcule și proiectată o platformă care permite implementarea unui orologiu gravitațional cu posibilitatea monitorizării și a altor fenomene astronomice. Platforma implementată poate fi integrată în sisteme Cloud pentru observații astronomice, sau inclusă în diverse programe de educație inteligentă.

Pentru realizarea obiectivelor propuse au fost implementate diverse dispozitive de calcul la margine. A fost descrisă structura dispozitivelor proiectate și modul în care ele se integrează în sistemul elaborat. În contextul continuității funcționării pendulului Foucault a fost descris un cadru de monitorizare a stării pendulului utilizând diverși senzori și procedee de măsurare. A fost descrisă aplicarea acestui cadru pentru menținerea oscilațiilor pendulului.

Sistemul de monitorizare și control a pendulului Foucault a fost analizat din perspectiva instrumentelor și soluțiilor tehnice utilizate. A fost analizată problema mentenanței pendulului, compatibilității și dezvoltării de noi funcționalități prin prisma tendințelor moderne IoT.

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

Anexele, cinci la număr, conțin: codul sursă pentru rularea aplicației de mentenanță predictivă a palelor turbinei eoliene; codul generat în baza modelului MATLAB pentru monitorizarea deformațiilor; interpretarea în limbajul C a rețelei neuronale modelate pentru calcularea deformațiilor în baza vitezei curente a vântului; brevetele obținute la tematica tezei, aprecierile rezultatelor științifice; actul de implementare a rezultatelor obținute.

1. STADIUL ACTUAL ȘI TENDINȚE ÎN DEZVOLTAREA SISTEMELOR DE MĂSURARE/MONITORIZARE ȘI CONTROL ÎN CONTEXTUL IOT

1.1 Locul și rolul aparaturii de măsurare și control în era IoT

Era moderna a IoT presupune diverse abordări nu doar de implementare, dar și de control, achiziție de date, măsurări. Pentru implementarea acestor abordări este necesară dezvoltarea de noi concepte pentru aparatură de măsurare și control.

Prin definiție aparatura reprezintă totalitatea aparatelor care asigură funcționarea și controlul unei anumite instalații, mașini e.t.c. În contextul IoT orice periferic care duce la implementarea paradigmei în sine poate fi atât aparat separat cât și soluții HW separate sau integrate în dispozitiv. Prin urmare orice dispozitiv IoT poate fi definit ca aparatură de măsurare și control cu capacități extinse de comunicare și integrare în rețeaua globală prin care poate să-și extindă funcționalitățile de bază.

La nivel de aplicație, IoT reprezintă o colecție de servicii și software care integrează datele primite de la diferite dispozitive. Utilizează tehnologia de învățare automată sau inteligență artificială (AI) pentru a analiza aceste date și a lua decizii informate. IoT este una dintre cele mai importante tehnologii și continuă să avanseze pe măsură ce mai multe companii realizează potențialul dispozitivelor conectate pentru a le menține competitive.

La general IoT poate fi divizat în 3 segmente majore:

- IIoT – care reprezintă direcția industrială (Industrial IoT);
- CIoT – este orientat spre soluții de larg consum (Customer IoT);
- EIoT – reprezintă următoarea fază în evoluția IoT, în care întreprinderile investesc din ce în ce mai mult în produse fizice conectate pentru dezvoltarea de sisteme globale (Enterprise IoT).

IIoT este folosit în principal pentru aplicații industriale, cum ar fi în sectoarele de producție și energie. La general și alte industrii folosesc IoT pentru optimizarea resurselor prin senzori utilizați și elementele de control în producție. Ca definiție putem spune că: IIoT este un ecosistem de dispozitive, senzori, aplicații și echipamente de rețea asociate care lucrează împreună pentru a colecta, monitoriza și analiza date din operațiunile industriale. Astfel, prin conectarea dispozitivelor și sistemelor, companiile pot automatiza procesele și pot reduce cerințele de muncă manuală, ceea ce duce la o eficiență îmbunătățită și la costuri mai mici pentru forța de muncă. De exemplu: un producător poate folosi senzori IoT pentru a monitoriza performanța liniei de

producție, pentru a identifica zonele ce necesită îmbunătățire și pentru a reduce timpul de stagnare din cauza defecțiunilor sau operațiilor de mentenanță.

IIoT beneficiază semnificativ prin integrarea la nivel de sistem a straturilor de calcul la margine, decentralizate sau Cloud pentru a executa acțiuni specifice aproape în timp real. Alcătuind rețelele inteligente și participând la managementul energiei se aduce aport semnificativ formarea paradigmei IoT a energiei (IoE) [8].

La etapa actuală IoT poate include dispozitive care utilizează învățarea automată și inteligența artificială. Chiar dacă în unele segmente AI este utilizat doar pentru procese de control [9], în IoT utilizarea AI poate fi chiar crucială, deoarece îmbunătățește capacitățile IoT, permițând analiza datelor, implementând diverse aspecte predictive, automatizare și luare de decizii inteligente. AI procesează cantitatea mare de date generate de dispozitivele IoT, făcând sistemele IoT mai inteligente, mai eficiente și capabile de acțiuni pro active.

1.1.1 Definirea Industry 4.0 – premisele IoT

A patra revoluție industrială sau Industry 4.0 definește un concept ce are la bază dinamica actuală industriei și tehnologiei, procesele sociale și modelele, ca consecință a automatizărilor recente (inteligente) și creșterii gradului de inter-conectivitate. Termenul a fost popularizat în 2015 de Klaus Schwab, fondatorul Forumului Economic Mondial și președintele executiv de atunci, acest termen a fost folosit în numeroase articole din domeniul economiei, politicii și științei cu referire la epoca actuală a înaltei tehnologii emergente. Schwab susține că transformările ce pot fi evidențiate, nu țin doar de eficientizare, dar și exprimă o modificare însemnată în capitalismul industrial [10].

O parte a acestei etape în evoluția industrială este unirea diverselor tehnologii cum ar fi AI, editarea genelor și robotica cu grad avansat care șterge contururile între lumea fizică, digitală și biologică.

La moment, se atestă schimbări esențiale a modului de funcționare în rețeaua internațională de producție, au loc schimbări fundamentale în modul în care funcționează rețeaua globală de alimentare, livrare și producție, având la bază automatizarea reieșind din practicile de producție și industriale, cu aplicarea de diverse tehnologii inteligente, comunicare la scară largă de la mașină la mașină (M2M) și IoT. Această evoluție are ca rezultat creșterea nivelului de automatizare, îmbunătățirea calității telecomunicațiilor, popularizarea telemetriei, iar implementarea mașinilor cu inteligență folosind aceste tehnologii într-un final permite analiza și diagnosticarea diverselor regimuri de lucru, defecțiuni, oferirea diverselor statistici fără intervenția operatorilor [11].

De asemenea, Industry 4.0 a provocat diverse schimbări în economie, politică și societate având ca punct de pornire era digitală intersecția secolelor XX și XXI, iar la moment se dezvoltă într-o eră a SI cu grad înalt de comunicare și interconectare, ce se distinge prin creșterea comunității ce utilizează tehnologia pentru cunoașterea lumii.

Prin esența sa, Industry 4.0 este o tendința de a utiliza tehnologiile moderne de transmitere a datelor și de automatizare în procesele de producție ce include: inteligența artificială; Cloud Computing; internetul lucrurilor (IIoT); IoT; diverse sisteme ciber-fizice (CPS) [12].

A 4-a revoluție industrială a fost definită ca dezvoltări tehnologice în sistemele ciber-fizice, cum ar fi:

- conectivitatea de mare capacitate: noi moduri de interacțiune om-mașină, cum ar fi interfețele senzore și sistemele de realitate virtuală;
- îmbunătățiri în transferul instrucțiunilor digitale în lumea fizică, inclusiv robotică și imprimare 3D (producție aditivă);
- Internetul lucrurilor (IoT); „Big Data” și Cloud Computing;
- sisteme bazate pe inteligență artificială;
- Îmbunătățirea și adoptarea sistemelor de energie regenerabilă în afara rețelei/autonome: baterii solare, eoliene, valurilor, hidroelectrice și electrice (sisteme de stocare a energiei regenerabile cu litium-ion (ESS) și EV).

Una din performanțele semnificative Industry 4.0 este creșterea eficienței operaționale. În acest sens putem defini patru subiecte care caracterizează Industry 4.0:

- Interconectare: capacitatea oamenilor, senzorilor, dispozitivelor, mașinilor de a se conecta și de intercomunicare prin intermediul IoT sau Internetul oamenilor (IoP). Interconectivitatea permite operatorilor colectarea unor cantități de date imense din toate zonele procesului de producere, să identifice ariile importante ce pot fi îmbunătățite pentru creșterea performanțelor sau funcționalităților[30];
- transparența informațiilor: Industry 4.0 oferă transparență a informației pentru a permite operatorilor date complete necesare la luarea deciziilor.;
- asistență tehnică: modernizarea tehnologică a utilajelor astfel încât să faciliteze operatorii în luarea deciziilor, soluționarea problemelor tehnice și tehnologice în contextul diverselor sarcini dificile sau care necesită analize complexe;
- decizii dispersate: capacitatea de luare a deciziilor în sisteme ciber-fizice pentru realizarea sarcinilor în mod autonom. În caz de inferențe, obiective contradictorii sau careva excepții

se efectuează delegarea procesului decizional la un nivel mai superior(de ex. operatorului).

În principal, Industry 4.0 este implementat prin următoarele dispozitive și tehnologii:

- dispozitive mobile;
- platforme IoT;
- senzori inteligenți;
- interfețe avansate om-mașină;
- tehnologii de detectare a locației (identificare electronică);
- autentificare și detectarea fraudelor;
- procese avansate și ”Big Analytics”;
- profilarea și interacțiunea cu clienți la mai multe nivele;
- vizualizarea datelor în regim real.e.t.c

Aceste tehnologii pot fi în următoarele componente majore, ce de fapt definesc termenul de „fabrică inteligentă” în contextul „Industry 4.0” [13]:

- internetul lucrurilor (IoT);
- sisteme ciber-fizice;
- disponibilitatea la cerere a diverselor resurse inteligente din sistemul informatic (de exemplu, cloud computing);
- calcul cognitiv.

Industry 4.0 se dezvoltă în mai multe direcții, printre care este și ”Mentenanța Preventivă”. La baza acestei direcții ar sta utilizarea și posibilitățile senzorilor implementați prin IoT. Mentenanța preventivă (sau predictivă) poate identifica problemele în regimul de funcționare a utilajelor în timp real, astfel permițând personalului responsabil de utilaje și aparatură să efectueze întreținere la momentul potrivit, înainte ca utilajul să se defecteze sau să fie deteriorat, astfel măbind timpul de exploatare a utilajului și micșorând cheltuielile de mentenanță.

Direcția de senzori și instrumentele ghidează inovația, nu numai pentru Industry 4.0, ci și pentru alte mega-tendințe „inteligente”, cum ar fi fabricile inteligente, producția inteligentă, mobilitatea inteligentă, casele inteligente, orașele inteligente [14].

Senzorii inteligenți sunt SI care generează diverse date care țin de mediul sau condițiile de utilizare cu ajutorul cărora permit realizarea diverselor funcționalități cum ar fi: automonitorizare, autoconfigurare sau chiar monitorizare de diverse procese cu complexitate ridicată. Dacă aceștia dețin capacității de comunicare fără fir, este posibilă instalarea unei rețele de senzori mai dense iar eforturile de instalare sunt reduse semnificativ. În Industry 4.0 importanța senzorilor pentru

evaluări inteligente și a științei măsurării este ferm recunoscută de diverși experți astfel încât se poate de declarat „Sistemele de senzori reprezintă fundamentul Industry 4.0”.

Cu toate acestea, există câteva probleme majore care țin de utilizarea rețelelor de senzor cum ar fi: pierderea datelor, gestionarea unor cantități mari de date colectate, sincronizarea datelor, fapt ce limitează semnificativ implementarea anumitor funcționalități în sisteme complexe. Mai mult decât atât, limitări adiționale de funcționalități sunt condiționate și de capacitățile bateriilor utilizate în cazul lipsei unei surse de alimentare continue. În context, ceasurile inteligente reprezintă un exemplu de integrare a senzorilor inteligenți în dispozitivele electronice.

Mai multe țări au inițiat diverse mecanisme instituționale pentru a încuraja adoptarea tehnologiilor Industry 4.0. Aici putem regăsi țările cu cea mai dezvoltată industrie. În Germania eforturile instituționale sunt reprezentate prin politica ”Industrie 4.0” sau I4 care a fost inițiată în 2011 prin promovarea computerizării producerii. În SUA promovarea începe cu introducerea termenului și analiza domeniului ”Industrial Internet of Things”, efectuat de către Departamentul pentru Securitate Internă în 2019.

1.1.2 Caracterizarea IoT

IoT cunoaște o istorie lungă de dezvoltare care începe în anii 80 al secolului XX cu primele aparate pentru vândut băuturi răcoritoare [15]. Premisele dezvoltării sunt în strânsă concordanță cu dezvoltarea calculatoarelor [16] ce treptat a dus la definirea conceptului de IoT [17]. La sfârșitul anilor 90 câteva companii cu renume au definit modulul de comunicare dispozitiv-dispozitiv ca parte componenta a framework-ul “Six Webs” [18].

Inițial IoT a fost văzut prin prisma schimbului de date cu scopul monitorizării, evaluării statutului, manipulării și controlului cu alte dispozitive. În acest sens IoT [19] a fost corelat cu RFID ca mijloc de comunicare între dispozitive.

Se poate de spus că era IoT sa stabilit în momentul în care mai multe „lucruri sau obiecte” au fost conectate la internet, decât ființe umane”. În astfel de ordine de idei Cisco Systems estimează că IoT s-a „născut” între 2008 și 2009. Această estimare vine din studiul conform căruia raportul dintre dispozitive/oameni este în creștere, de la 0,08 în 2003 la 1,84 în 2010 [20].

Domeniile de aplicare ale IoT cuprinde o mulțime de domenii și spații pentru consumatori, soluții comerciale, industriale și de infrastructură. Cel mai popular domeniu fiind consumul. Se poate de spus că acest domeniu are de asemenea cea mai mare dinamică de creștere incluzând:

- conectivitatea vehiculelor;
- automatizări casnice;
- tehnologii portabile;

- sănătate și conectivitate;
- alte aplicații cu monitorizare de la distanță.

Aportul cel mai mare în popularizarea IoT l-au adus automatizările casnice. De fapt anume această direcție cuprinde cele mai diverse abordări, soluții și implementări cum ar fi: iluminare, încălzire și condiționare, sisteme multimedia, de securitate și camere. Pentru aceste soluții beneficiile pe termen lung sunt : eficiența energetică, automatizarea proceselor, confortul e.t.c.

Un aspect important in domeniul respectiv reprezintă îngrijirea persoanelor în vârstă sau cu dizabilități. În acest sens se dezvoltă sisteme specifice de asistență menite să îmbunătățească condițiile de trai a beneficiarilor [21]. Aceste sisteme se bazează pe controlul cu vocea , rețele de senzori pentru monitorizarea stării sănătății sau a aparatelor de asistență.

Astfel, ca direcție cu caracter specific, apare Internet of Medical Things (IoMT) [22], care este descris ca: "Sănătate inteligentă" [23]- tehnologia pentru crearea unui sistem de sănătate digitalizat, care interconectează resursele medicale disponibile și serviciile de sănătate. Dispozitivele IoMT pot fi utilizate pentru a monitoriza starea sănătății de la distanță și a activa sistemele de notificare de urgență. Aceste dispozitive de monitorizare a sănătății pot varia de la monitoare de tensiune arterială și de ritm cardiac la dispozitive avansate capabile să monitorizeze implanturi specializate, cum ar fi stimulatoare cardiace, brățări electronice.

Mai mult, sistemele bazate pe IoT sunt orientate spre pacient, ceea ce aduce la flexibilitate în interacțiunea cu starea sănătății pacientului. IoMT în industria asigurărilor oferă acces la informații mai consistente și mai noi, în dinamică. Aceasta include soluții bazate pe senzori, cum ar fi: biosenzori, dispozitive portabile, dispozitive de sănătate conectate și aplicații mobile pentru a urmări comportamentul pacienților.

De asemenea IoT poate fi asistent la integrarea proceselor de control și informare în diverse sisteme de transport. Aplicarea IoT se extinde asupra tuturor aspectelor de transport (vehicule, infrastructura drumurilor și transporturilor, utilizatorul sau conducătorul). La baza IoT cu specializare în transport stă conceptul de V2X (vehicle to everything) , care unește mai multe abordări pentru fiecare din entitățile de transport (vehicul-pieton, vehicul-vehicul e.t.c) .

Un alt domeniu de aplicare al IoT, care are o importanță majoră în economie, este domeniul Industrial. Cunoscut și sub numele de IIoT, dispozitivele industriale IoT achiziționează și analizează date de la echipamentele conectate, tehnologia operațională, locații și oameni. Combinat cu dispozitivele de monitorizare a tehnologiei operaționale, IIoT ajută la reglarea și monitorizarea sistemelor industriale.

1.1.3 Tendințe de dezvoltare IoT.

În industrie, în contextul producerii, IoT poate conecta diverse aparaturi de pe linia producție. În acest sens diverse utilaje sau aparataj sunt dotate cu capacități de detectare, identificare, procesare, comunicare, acționare și rețea [24]. Controlul și gestionarea rețelei a echipamentelor de producție, managementul activităților și situației sau controlul procesului de producție permit utilizarea IoT pentru aplicații industriale și producție inteligentă. Iar la rândul lor, sistemele inteligente IoT, permit fabricarea și optimizarea rapidă a noilor produse și răspunsul rapid la cerințele către produse.

Paradigma IoT nu ar fi posibilă fără existența unei rețele de comunicare între dispozitive. În acest sens un rol crucial îndeplinesc tehnologiile de comunicare cu, și fără fir [25]. În contextul tehnologiilor de comunicare (prin originile de dezvoltare) un aspect de implementare al IoT este adresabilitatea. De altfel era comunicării fără fir IoT începe cu apariția RFID, care a ajuns la maturitate prin utilizarea adreselor IP sau de adresa URI. În astfel de ecosisteme obiectele, aparatura, nu conversează, dar pot fi referențiate de către alte obiecte, cum ar fi servere performante care pot centraliza datele din întreg sistemul în beneficiul utilizatorului final [26].

După tehnologiile de comunicare, IoT utilizează următoarele categorii de comunicare:

- fără fir de rază mică. Aici pot fi incluse următoarele tehnologii: BlueTooth, NFC, RFID, Wi-Fi, Zigbee;
- fără fir de rază medie cum ar fi LTE, 5G;
- fără fir de rază lungă: LPWAN, VSAT;
- cu fir: Ethernet, PLC (Power-line communication).

Ca rezultat, putem afirma IoT devine suficient de matur pentru a utiliza diverse tehnologii de comunicare, în special, la etapa actuală, cele de comunicare fără fir, ceea ce aduce un aport semnificativ în dezvoltarea domeniului de soluții mobile.

Una din problemele majore cu care se confruntă dezvoltatorii de produse IoT, este procesarea și interpretarea unui volum de date enorm colectat de senzori. Pentru a aplană problema respectivă există o soluție pentru analiza informațiilor de la senzori. Această soluție se referă la conceptul "Rețele de Senzori fără Fir", propusă pentru analiza informațiilor denumite ca rețele de senzori fără fir [27]. Aceste rețele partajează date între nodurile de senzori, care sunt trimise către un sistem distribuit, pentru a analiza datele de la senzori.

Securitatea este cea mai mare preocupare în implementarea tehnologiei IoT. Această preocupare se amplifică datorită ritmului rapid de dezvoltare a domeniului fără a fi luate în considerare provocările de securitate la general și regulamentele de securitate care sunt impuse pe parcurs [28]. Dezvoltarea rapidă a IoT a permis miliardelor de dispozitive să se conecteze la rețea.

Din cauza prea multor dispozitive conectate și a limitării tehnologiei de securitate a comunicațiilor, în IoT apar treptat diverse probleme de securitate [29].

Cele mai multe probleme tehnice de securitate sunt similare cu cele ale serverelor convenționale, stațiilor de lucru și smartphone-urilor [30]. Aceste probleme includ utilizarea mecanismelor de autentificări neperformante, schimbarea periodică a credențialelor, mesajele necriptate trimise între dispozitive, injecții SQL, gestionarea defectuoasă a actualizărilor de securitate e.t.c. Cu toate acestea, datorită faptului că multe din dispozitivele IoT au limitări de performanță, implicit le sunt limitate și posibilitățile operaționale.

Securitatea IoT în domeniul industriei prezintă provocări diferite și perspective diferite. În UE și Germania, protecția datelor este în mod constant menționată în politică de producție și digitală, în special reflectându-se în standardul I4.0.

1.1.4 Aspectul inteligenței în sistemele și dispozitivele moderne

Tendința actuală de dezvoltare a sistemelor Cloud presupune diversificarea modelelor de transfer de date și de prelucrare a datelor. Acest fapt este dictat de creșterea continuă a volumelor de date ce circulă în infrastructura Cloud [31]. O problemă majoră care se conturează este timpul de reacție pentru sistemele Cloud, mai ales când serviciile Cloud sunt accesate de sistemele integrate cu grad de autonomie ridicat și/sau care utilizează AI.

În acest sens se conturează două direcții de optimizare, ambele presupunând implementarea paradigmei calculului de margine:

- 1) Optimizarea datelor care interacționează cu serviciile Cloud;
- 2) Implementarea soluțiilor AI parțial, sau total în dispozitivul de margine.

Beneficiul implementării calculului de margine este evident:

- Utilizarea mai eficientă a benzii de comunicare atât cu altă aparatură cât și cu serviciile de calcul;
- Micșorarea încărcării sistemelor Cloud;
- Timp de reacție mai operativ;
- Eficientizarea energetică pentru anumite sarcini e.t.c;

Este evident că calculul la margine a devenit mai popular în contextul dezvoltării continue a industriei circuitelor integrate. În acest sens și-a adus aportul său majorarea gradului de integrare a circuitelor, dezvoltarea bazei tehnologice de proiectare a circuitelor, popularizarea implementărilor specifice integrate în circuit, implementarea virtualizării în scară mică.

Sub aspect funcțional cea mai mare problemă, pentru sistemele care implementează AI sau utilizează alte servicii de Cloud, ar fi gradul de maturitate redus sau lipsa soluțiilor de actualizare

generice pentru calculul la margine. Parțial problema dată este rezolvată pentru dispozitivele care implementează tehnologii de virtualizare a sistemelor integrate.

În contextul sistemelor integrate, IoT reprezintă o formă de implementare a paradigmei calculului de margine dispozitivelor

O nouă direcție recentă a calculului la margine este Edge AI. Edge AI este diferit de cadrul tradițional cu aplicarea AI, în care datele generate de tehnologiile conectate sunt transmise unui sistem Cloud backend. În loc să ruleze modele AI pe backend, acestea sunt configurate pe procesoare în interiorul dispozitivelor de calculul la margine (DCIcMa). Acest lucru adaugă un strat de inteligență la margine în care DCIcMa nu numai că colectează valori și le analizează, dar este capabil să acționeze asupra lor, deoarece există un model de învățare automată (ML) integrat în dispozitivul de margine care implementează o adevărată AI la margine [32].

1.2 Sisteme și dispozitive inteligente încorporate: aspecte generale și tendințe

1.2.1 Mijloace pentru calcul la margine

În prezent sistemele destinate pentru calcul la margine se bazează pe diferite soluții și platforme care se deosebesc din punct de vedere al flexibilității, complexității de proiectare, eficienței, performanței [33, 34, 35, 36, 37]. În acest context pot fi menționate următoarele cele mai distincte:

- microcontrolerele (MCU);
- procesoare destinate prelucrării semnalelor (DSP – digital signal processor);
- procesoare și sisteme dedicate (SoC – System on Chip);
- circuite specializate (ASIC – application specific integrated circuits);
- circuite logice reconfigurabile (CPLD – Complex Programmable Logic Device, FPGA – Field Programmable Gate Array).

Microcontrolerele la etapa actuală sunt destul de performante și sânt foarte răspândite având un preț mic. Sunt foarte mulți producători de microcontrolere, și ca consecință concurența între ei aduce la o cădere continuă a prețurilor. În același timp putem vedea că complexitatea și setul de periferice disponibile în microcontrolere este în continuă creștere. Ca rezultat devine posibilă dezvoltarea unui sistem foarte performant cu microcontroler la prețuri reduse, în mare parte prețul final fiind dictat de costurile cablajului imprimat și a altor mijloace de proiectare și asamblare.

DSP-urile în continuare rămân microprocesoare dedicate prelucrării semnalelor având ca proprietate specifică disponibilitatea instrucțiunii MAC. Această funcționalitate îi permite să

implementeze diferiți algoritmi de prelucrare a semnalelor pentru diferite domenii cum ar fi: timp, spațiu, frecvență și unde. Una din paradigmele sondate, care poate fi implementate cu DSP-urile, este paradigma de procesare în flux pentru domeniul de timp [38].

Dezvoltarea domeniului dispozitivelor mobile a contribuit semnificativ la apariția SoC. Aceste soluții conțin practic tot necesarul pentru proiectarea sistemelor de calcul performante: unitate centrală de procesare, interfețe de comunicare cu diverse periferice, coprocesoare, interfețe grafice, audio etc. Datorită interfețelor de comunicare integrate, aceste platforme au creat o nouă clasă în sisteme de calcul – numită Single Board Computer (SBC).

1.2.2 FPGA și AI în calculul la margine

Rapid Silicon, furnizorul de AI și FPGA-uri inteligente focalizate pe calculul la margine, a anunțat o investiție de 30 de milioane de dolari în Seria A. Această recentă finanțare, spune compania, va fi folosită pentru a investi în continuare în portofoliul său de produse, pentru a sprijini lansarea Gemini - produsului său principal FPGA din gama LowEnd, La fel investiția are ca scop consolidarea adoptării soluțiilor software open-source pentru aplicații comerciale.

Gemini este un dispozitiv logic programabil (PLD) care este optimizat și fortificat pentru necesități de procesare a multitudinii de senzori, profiluri termice compacte și soluții minimaliste orientate către aplicațiile încorporate și calcul de margine. Software-ul companiei, Raptor Design Suite, este oferit ca prima suită comercială FPGA EDA din lume, ce este bazată pe software open-source end-to-end.

„Clienții caută modalități inovatoare de a programa FPGA-uri, de a reduce încărcarea suportului prin valorificarea ecosistemului open-source de expertiză activă și ingineri de dezvoltare și de a scurta timpul de lansare pe piață”, spune Dr. Naveed Sherwani, Președinte și CEO Rapid Silicon. „Cu software-ul open-source, Rapid Silicon înlătură barierele și oferă clienților săi un flux de lucru robust de proiectare FPGA end-to-end. Software-ul open-source permite utilizatorilor să proiecteze aplicații complexe rapid și eficient pe dispozitivele noastre FPGA.”

Rapid Silicon este gata să revoluționeze timpul de livrare de la design la siliciu și să ofere soluții care satisfac diverse necesități moderne, depășesc performanțele existente, puterea, satisfac cerințele de “time-to-market” pentru aplicațiile de generații viitoare. Se vede un potențial imens în instrumentele EDA îmbunătățite de AI ale companiei și chiar are experiența necesară pentru a aduce aceste soluții pe piața globală [39].

1.2.3 Inteligența artificială la margine

Direcția în curs de dezvoltare al inteligenței artificiale este – inteligența la margine (edge AI). Inteligența artificială la margine (EAI) este implementarea inteligenței artificiale într-un mediu de calcul la margine, care permite ca calculele să fie efectuate aproape de locul în care sunt colectate efectiv datele, mai rapid decât într-o facilitate centralizată de Cloud Computing sau un centru de prelucrare a datelor extern. EAI permite dispozitivelor să ia decizii inteligente mai rapid, fără a se conecta la Cloud sau la centrele de prelucrare a datelor externe.

Progresele recente în ceea ce privește eficiența AI, răspândirea dispozitivelor IoT și apariția calculului la margine au declanșat direcții promițătoare pentru EAI. Aproape fiecare sector are astăzi sarcini care ar putea beneficia de la utilizarea EAI. Spre deosebire de stocarea tuturor datelor unei organizații într-un singur loc centralizat, cum ar fi centrul de date al unui furnizor de servicii Cloud sau un centru de date privat, EAI permite ca calculele AI să fie efectuate aproape de utilizatorii de la marginea rețelei. Deoarece internetul este accesibil pe tot globul, orice zonă ar putea fi considerată ca fiind periferia sa. Semnalele de trafic omniprezente, echipamentele autonome și telefoanele mobile sunt doar câteva exemple. Companiile de toate taliile se străduiesc să-și automatizeze mai multe procese, deoarece acest lucru îmbunătățește productivitatea, eficacitatea și siguranța. Software-ul de calculator poate ajuta în acest sens prin capacitatea de a recunoaște tipare și de a efectua în mod sigur sarcini identice în mod repetat. Cu toate acestea, este o provocare să transmitem pe deplin toate datele într-un sistem de algoritmi și reglementări. Progresul substanțial în domenii importante a permis implementarea practică a modelelor AI la margine. Mai mult, evoluțiile rețelelor neuronale, împreună cu alte domenii ale AI, au pus bazele pentru ML universal. Multe companii descoperă că pot antrena cu succes modele AI și le pot pune în acțiune la margine. AI la periferie necesită resurse de calcul distribuite pe scară largă. Progresele recente în GPU-uri cu capacități de paralelizare enorme permit rularea eficientă a rețelelor neuronale [8].

Pe măsură ce calculul la margine aduce stocarea datelor mai aproape de locația dispozitivului, algoritmi AI procesează datele care sunt create sau colectate pe dispozitiv, cu sau fără conexiune la internet. Acest lucru permite procesarea datelor în milisecunde, oferind feedback în timp real. EAI permite ca răspunsurile să fie livrate aproape instantaneu. Acest lucru poate fi oferit siguranță mai mare dacă date sensibile au șansa să nu părăsească marginea.

EAI este diferit de cadrul tradițional de aplicație AI, în care datele generate de tehnologiile conectate sunt transmise unui sistem Cloud extern. În loc să ruleze modele AI pe Cloud, acestea sunt configurate pe procesoare în interiorul dispozitivelor conectate care operează la marginea rețelei. Acest lucru adaugă un strat de inteligență la margine în care dispozitivul de margine nu numai că colectează valori și analize, dar este capabil să acționeze asupra acestora, deoarece există

un model de învățare automată (ML) integrat în dispozitivul de margine care implementează o adevărată AI la margine. Unul din neajunsurile acestor implementări este necesitatea implementării unui mecanism de actualizare a AI de la margine, lucru care nu ar fi necesar cu utilizarea unui Cloud care oferă backend pentru AI.

1.3 Paradigma calculului la margine și inteligența încorporată

1.3.1 Conceptul calculului la margine

Calculul la margine reprezintă o paradigmă de calcul distribuit, care aduce calculul și stocarea datelor mai aproape de sursele de date. Se așteaptă ca acest lucru să îmbunătățească timpii de răspuns și să economisească din lățimea benzii de comunicare [40]. Calculul la margine este mai degrabă o arhitectură decât o tehnologie specifică, în același timp și o formă de calcul distribuită sensibilă la topologie și la locație. Cu toate acestea, calculul la margine presupune și disponibilitatea de conexiune web, pentru a efectua anumite sarcini în timp rezonabil, așa că este preferențială utilizarea calculului la margine pentru aplicații care pot rula autonom, fără control centralizat pentru perioade de timp îndelungat. De la originile sale din rețelele de livrare de conținut, calculul distribuit s-a maturizat într-un curent, ca paradigmă de calcul de margine care plasează resursele de calcul cât mai aproape de sursa de date [8].

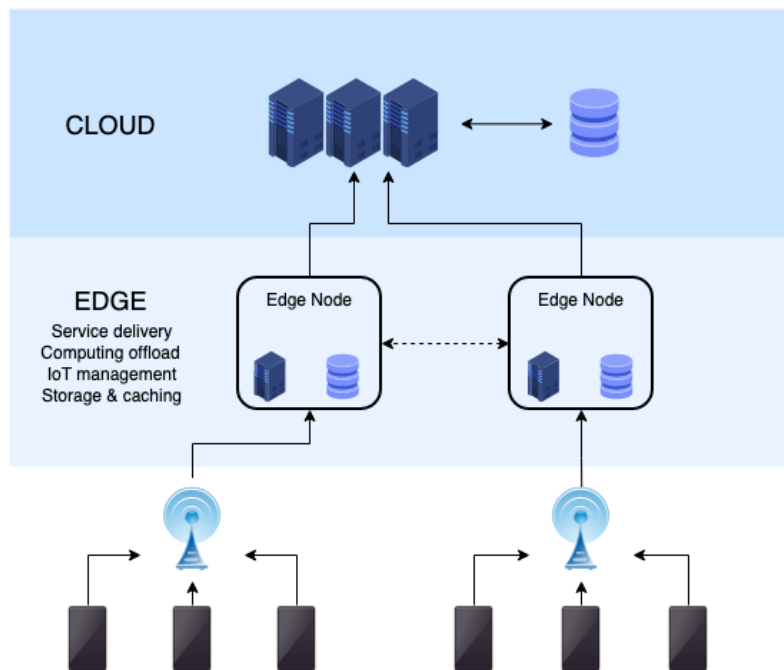


Fig. 1.1. Infrastructura Calculului la margine [46]

Originile Calculului la Margine se află în rețelele distribuite după conținut care au fost create la sfârșitul anilor 1990 pentru a oferi servicii web și video de la serverele la margine, ce au fost instalate aproape de utilizatori. La începutul anilor 2000, aceste rețele au evoluat pentru a

găzdui aplicații și componente ale aplicațiilor pe serverele de margine, rezultând în primele servicii comerciale de calcul la margine, care găzduiau aplicații precum localizarea cărucioarelor de cumpărături, aparatură de agregare a datelor în timp real, aparatură de afișare a anunțurilor. IoT este un exemplu de calcul la margine, chiar dacă din greșeală sunt tratate ca sinonime.

O definiție a Calculului la Margine este utilizarea oricărui tip de program de calculator care oferă o latență scăzută aflându-se mai aproape de sursa de date. Karim Arabi, inginer și vicepreședinte Qualcomm, în cadrul unui seminar la MIT în 2015 [41], a definit Calculul la Margine în sens larg ca fiind toate calculele din afara Cloud-ului, ce au loc la marginea rețelei și mai precis în aplicații în care este necesară prelucrarea datelor în timp real. Prin definiția sa, Cloud Computing este orientat cu operarea Big Data, în timp ce Calculul la Margine operează cu „date instantanee”, care sunt date generate în timp real de senzori sau de utilizatori.

1.3.2 Aspecte generale referitor la calculul la margine.

Calculul la margine poate folosi și tehnologii de virtualizare pentru a facilita implementarea și rularea unei game largi de aplicații pe servere la margine. [42].

Se preconizează că volumul de date în lume va crește cu 61%, până la 175 Zetta Octeți până în 2025 [43]. Potrivit firmei de cercetare (Gartner), aproximativ 10% din datele generate de întreprinderi sunt create și procesate în afara unui centru de date centralizat tradițional sau a unui Cloud. Gartner estimează că până în 2025 această cifră va ajunge la 75%. Creșterea numărului de dispozitive IoT la marginea rețelei aduce la rândul său la o creștere masivă de date - stocarea și utilizarea tuturor acestor date în centrele de date, în Cloud, impune cererea de creștere lățimii benzilor de comunicare până la limitele disponibile. În ciuda îmbunătățirilor majore aduse de noile tehnologii de comunicare, centrele de date nu pot garanta capacități de transfer și timpi de răspuns acceptabile, ceea ce poate fi o cerință critică pentru multe aplicații [44]. În plus, dispozitivele la Margine consumă în mod constant date provenite din Cloud, forțând companiile să descentralizeze stocarea datelor și furnizarea de servicii, valorificând apropierea fizică față de utilizatorul final.

În mod similar, scopul calculului la margine este de a muta calculul departe de centrele de date, spre marginea rețelei, exploatând aparatură inteligentă, telefoane mobile sau gateway-uri de rețea pentru a îndeplini sarcini și a furniza servicii în numele Cloud-ului [45]. Prin mutarea serviciilor la margine, este posibilă stocarea în cache-uri a conținutului, furnizarea de servicii, stocarea persistentă a datelor și gestionarea IoT, ceea ce rezultă într-un final în timpi de răspuns și rate de transfer mai bune. În același timp, distribuirea la margine, către diferite noduri de rețea [46], aduce noi probleme și provocări.

Natura distribuită a paradigmei calculului la margine introduce o schimbare în schemele de securitate utilizate pentru calculul în Cloud. În calculul la margine, datele pot călători între diferite noduri distribuite conectate prin Internet și, prin urmare, necesită mecanisme speciale de criptare independente de Cloud. Nodurile marginale pot fi, de asemenea, dispozitive cu resurse limitate, limitând alegerea în ceea ce privește metodele de securitate [47]. În plus, este necesară o trecere de la o infrastructură centralizată de sus în jos, la un model de încredere decentralizat. Pe de altă parte, prin păstrarea și procesarea datelor la margine, este posibilă creșterea confidențialității prin minimizarea transmiterii de informații sensibile către Cloud.

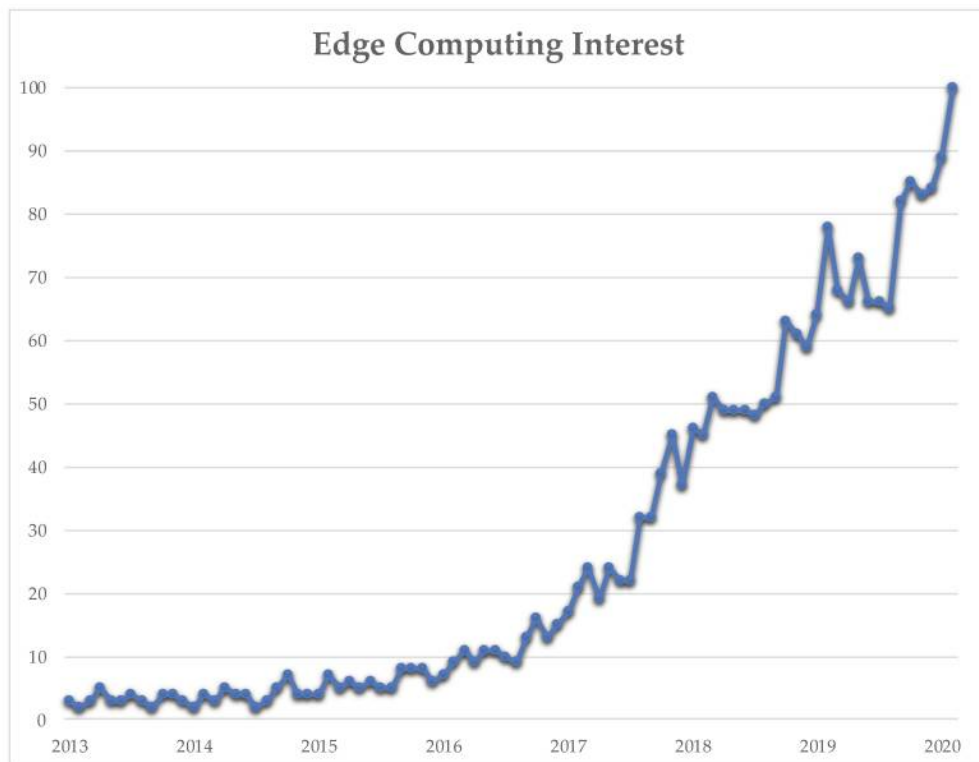


Fig. 1.2. Dinamica interesului față de Calculul la Margine [45]

1.3.3 Platforme orientate spre calculul la margine

Elementul cheie în implementarea calculului la margine este însăși dispozitivul de calcul. Preponderent, sub aspectul domeniului de aplicare, dispozitivul de calcul reprezintă un microcontroler cu capacități de calcul specifice, ce în contextul cerințelor actuale sunt capabile de a implementa AI. În limbaj tehnic, aceste microcontrolere dispun de acceleratoare de calcul orientate către ML (Fig. 1.3).

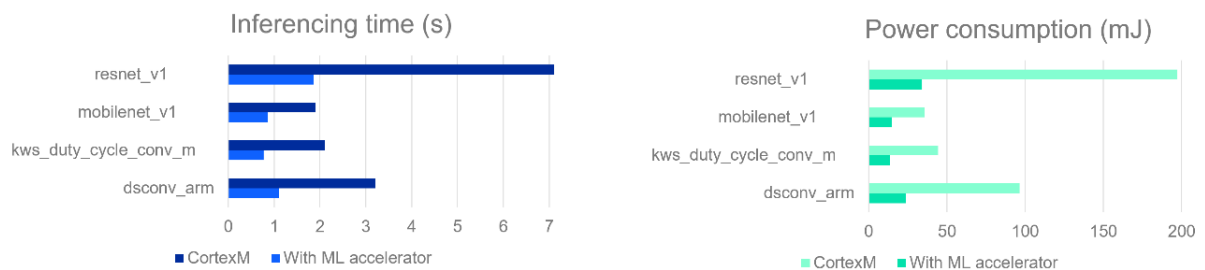
Din punct de vedere istoric, Inteligența Artificială (AI) a fost o tehnologie dependentă de GPU / CPU sau chiar de DSP. Cu toate acestea, mai recent AI se mută în sistemele de achiziție de

date prin integrare în aplicații specifice, care rulează pe microcontrolere mai compacte. Această tendință este determinată în principal de piața (IoT) și cerințele acesteia.

Pentru a aborda această nouă tendință IoT, Silicon Labs a anunțat un MCU wireless care poate efectua operațiuni AI accelerate hardware. Pentru a realiza acest lucru, acest MCU a fost proiectat să încorporeze un procesor vectorial matricial (MVP), și anume EFR32xG24 [48].

Folosind ML, un sistem poate face predicții și se poate îmbunătăți (sau se poate antrena) după utilizarea repetitivă a ceea ce se numește model. Un model este utilizarea unui algoritmul antrenat care va fi folosit în cele din urmă pentru a emula luarea de decizii. Acest model poate fi antrenat prin colectarea de date sau prin utilizarea seturilor de date existente. Atunci când acest sistem își aplică modelul „antrenat” la datele nou achiziționate pentru a lua decizii, ne referim la el ca Inferență de învățare automată.

Faster Inferencing and Lower Power Consumption with ML Accelerator



2-4x Faster Inferencing and Up to 6x Lower Power Consumption (ML model dependent)

Performance benchmarking with standard ML models (EEMBC) and two internal smaller and simpler ML models. Results are purely for inferencing, not for the complete application speed and system power consumption.

© 2021 Silicon Laboratories, Inc.

Fig. 1.3. Performanțele cu accelerator ML [49]

După cum sa sugerat anterior, inferența are nevoie de putere de calcul care era de obicei oferită de computerele high-end. Cu toate acestea, acum putem rula inferențe pe dispozitive mai limitate în resurse, ce nu trebuie să fie conectate la computere high-end sau resurse Cloud..

Prin efectuarea de inferențe pe un MCU, putem considera că implementăm calculul la margine. Astfel, calculul la margine implică rularea algoritmilor de procesare a datelor în cel mai apropiat punct de unde sunt achiziționate datele respective. Exemple de dispozitive de margine sunt, de obicei, dispozitive simple și compacte, cum ar fi senzori sau dispozitive de acționare de

bază (becuri, termostate, senzori pentru uși, contoare de electricitate și așa mai departe). Aceste dispozitive funcționează de obicei pe MCU-uri de clasă ARM Cortex-M cu putere redusă.

EFR32xG24 este un MCU wireless securizat care acceptă mai multe canale de comunicare ce sunt utilizate de IoT (cum ar fi așa protocoale ca: Bluetooth Low Energy, Matter, Zigbee și OpenThread). De asemenea acest MCU oferă performanțe ridicate la un consum de energie redus [49], include Secure Vault, care este un set îmbunătățit de caracteristici de securitate care este comun tuturor platformelor Silicon Labs Series 2.

Cu toate acestea, pe lângă securitatea îmbunătățită și conectivitatea unică pentru acest MCU, există un accelerator hardware pentru modelele de învățare automată ”Inference” (printre alte accelerări), numit Matrix Vector Processor (MVP)(Fig. 1.4).

MVP oferă capacitatea de a rula mai eficient inferențe de învățare automată cu o putere de consum de până la 6 ori mai mică și o viteză de 2-4 ori mai mare în comparație cu ARM Cortex-M fără accelerare hardware (îmbunătățirea reală depinde de model și aplicație).

MVP este proiectat să descarce CPU prin gestionarea operațiunilor intensive în virgulă mobilă. Este special conceput pentru înmulțiri și adunări complexe de matrice în virgulă mobilă.

MVP constă dintr-o unitate hardware aritmetică logică dedicată (ALU), o unitate de încărcare/stocare (LSU) și un secvențiator(Fig. 1.4).

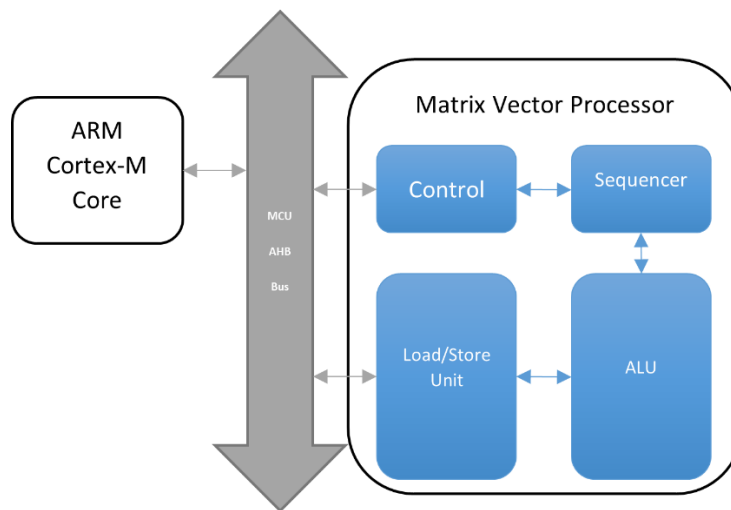


Fig. 1.4. Structura acceleratorului MVP [48]

Ca rezultat, MVP ajută la accelerarea procesării și la economisirea energiei pentru o mare varietate de aplicații, cum ar fi Angle-of-Arrival (AoA), Machine Learning (Eigen sau Basic Linear Algebra Subprograms BLAS) și așa mai departe.

Deoarece acest dispozitiv este un simplu MCU, nu poate implementa toate abordările AI/ML. Este conceput pentru a aborda următoarele categorii enumerate mai jos (cu exemple de aplicații din viața reală):

- procesare de semnale de la sensor: mentenanță preventivă, analiza semnalelor biomedicale, analiza datelor de pe accelerometre e.t.c;
- potrivirea modelului audio: identificarea spargerii sticlei, detectare de împușcături;
- comenzi vocale: seturi de comenzi pentru aplicații inteligente, identificarea cuvintelor de deșteptare;
- vizualizări de rezoluție mică: detectare de prezență, contorizări, amprente digitale.

Pentru implementările de mai sus Silicon Labs pune la dispoziție exemple de aplicații bazate pe un framework orientat AI/ML care se numește TensorFlow.

TensorFlow este o platformă open-source end-to-end de la Google, pentru învățarea automată. Dispune de un ecosistem cuprinzător și flexibil de instrumente, biblioteci și resurse comunitare, care le permite cercetătorilor să promoveze cea mai avansată tehnologie în ML, iar dezvoltatorilor să construiască și să implementeze cu ușurință aplicații bazate pe ML.

Proiectul Tensor Flow are și o variantă hardware optimizată pentru sisteme incorporate, numită TensorFlow Lite for Microcontrollers (TFLM). Este un proiect open-source, în care cea mai mare parte a codului este contribuită de ingineri comunitari, inclusiv Silicon Labs și alți furnizori de circuite. În prezent, acesta este singurul cadru oferit cu Silicon Labs Gecko SDK Software Suite pentru a crea aplicații AI/ML.

O tendință modernă de implementare a calculului la margine este modularitatea DCIcMa. În acest context se elaborează diverse sisteme de monitorizare care utilizează diverși senzori și elemente de control. Din motiv că direcțiile și locațiile de monitorizare și control sunt amplasate în locuri diferite și necesită abordări diferite au fost create rețele de DCIcMa. Această abordare permite instalare și controlul mai rapid și chiar sub unele aspecte face întreg sistemul mai robust [50].

Mai nou, compania Intel se lansează cu produsele Ultra [51] orientate AI care pot fi integrate în sisteme de calcul la margine, conștientizând că calculul la margine transformă continuu producția, oferindu-ne fabrici mai inteligente, mai sigure și mai eficiente. Acest lucru se poate întâmpla doar cu ajutorul inovatorilor. Astfel s-a ajuns la derularea Intel® Edge Solutions Challenge [52], care sprijină partenerii Intel în utilizarea arhitecturii și soluțiilor propuse pentru a transforma fabricile de mâine. Competiția lansată are ca obiectiv să dezvolte și să implementeze soluții optimizate de producție inteligentă, analizând două domenii cheie: 1) Optimizarea controlului și autonomie; 2) Inspecția producției.

1.4 Direcții prioritare de aplicare și dezvoltare a inteligenței încorporate la margine

Calculul la margine care include și aplicațiile IoT stăpânesc lumea digitală și revoluționează capacitățile de calcul și tehnologia de colectare a datelor și analitică. Putem spune IoT este o platformă în care multe dispozitive încorporate sunt conectate între ele prin internet sau alte mecanisme de comunicare securizate. Aceste dispozitive colectează și schimbă date între ele. Datorită colectării de date relevante, IoT este capabil să interacționeze și să învețe unul de la celălalt, similar ființelor umane.

Utilizarea activă a IoT este acțiunea care poate face de fapt un oraș „inteligent”. Sub acest aspect IoT oferă implementări cu ajutorul analizei predictive [53] și al învățării automate, iar combinarea ambelor poate crește cu ușurință eficiența anumitor zone de lucru.

În implementările de larg consum dispozitivele IoT colectează informații și le livrează unui server de date central. Serverul central de date procesează, colecționează, filtrează și efectuează multe alte sarcini cu informațiile colectate. Aplicațiile IoT aduc beneficiu mediului de afaceri, consumatorilor individuali. Câteva exemple de dispozitive IoT sunt laptopurile, smartphone-urile, frigiderele, aparatele de cafea, ceasurile Apple, Google Home, Fitbits etc. De fapt orice dispozitiv echipat cu conexiune la internet și senzori poate fi folosit pentru aplicații IoT.

La etapa actuală IoT generează cantități uriașe de informații, ceea ce devine caracteristica Big Data. Astfel toate informațiile din IoT sunt Big Data. Cu toate acestea, nu toate Big Data provin din IoT.

1.4.1 Direcții prioritare a IoT și calcul la margine

Aplicațiile IoT sunt utilizate în sectorul public și privat. Ajută oamenii să urmărească lucruri precum sistemele de securitate ale casei lor, obiecte pierdute sau animale de companie, programul de întreținere a gadgeturilor etc.

Consumatorii pot folosi aplicațiile IoT pentru a-și supraveghea sănătatea generală și progresul exercițiilor fizice, pentru a face rezervări la restaurante. Companiile folosesc aplicații IoT pentru a urmări comportamentele de cheltuieli ale clienților, pentru a supraveghea lanțurile de aprovizionare, pentru a supraveghea și a menține nivelurile de inventar și pentru a efectua întreținerea predictivă a dispozitivelor lor.

ITIL este un set de aplicații de management al serviciilor IT și IoT care sunt utile în același timp. Aplicațiile IoT sunt utile în ITIL, deoarece departamentele IT sunt inevitabile în această lume digitală, iar dependența de rețelele wireless este în creștere.

În contextul dezvoltării dispozitivelor de calcul la margine și IoT ca parte componentă putem distinge următoarele cele mai populare tipuri de aplicații, cu impactul acestora asupra schimbărilor din diverse industrii:

- sănătate : îmbunătățirea calității îngrijirii pacienților și eficientizarea sistemului medical prin colectarea datelor în regim real și utilizarea tehnologiilor de comunicare;
- agricultură : avansarea agriculturii inteligente cu ajutorul senzorilor, chipurilor RFID și sistemelor de automatizate pentru agricultură sustenabilă și eficientă;
- orașe inteligente : transformarea eficienței și sustenabilității urbane;
- energetică : monitorizarea fluxurilor de energie prin utilizarea contoarelor, liniilor de transport, monitorizarea proceselor de producere și distribuție a energiei, toate fiind echipate cu senzori dedicați sau specifici domeniului;
- managementul rețelelor de distribuție a resurselor: optimizarea procedeeleor de urmărire, direcționare inteligentă, monitorizarea flotei de livrare în regim real pentru eficientizare și ridicarea fiabilității;
- producere: revoluționarea procesului de mentenanță, monitorizare în regim real și dezvoltarea producerii pentru eficientizare avansată.

Companiile de utilități caută în IoT un mecanism de a îmbunătăți eficiența energetică. Contoarele de energie, liniile de transport, fabricile de producție și terminalele de distribuție pot avea senzori corespunzători pentru a crea o rețea inteligentă. Potrivit unei estimări McKinsey [54], IoT în sectorul energetic ar putea oferi avantaje anuale de 40-70 de miliarde de dolari până în 2025.

Domeniul energetic este impactat de IoT prin intermediul următoarelor aplicații de bază:

- **senzorii și rețea inteligentă**: Senzorii au o gamă bogată de cazuri de utilizare: pot genera notificări în cazul unei întreruperi de transmisie a energiei în orice moment, pot detecta nereguli de linie, pot urmări consumul de energie și pot colecta date despre consum la nivel regional. , la nivel organizațional și individual;
- **reducerea amprentei de carbon** : Datele provenite de la senzori ajută utilizatorii obișnuiți să-și evalueze consumul de energie, să ia măsuri pentru economisirea energiei și să-și reducă amprenta de carbon. Este, de asemenea, o soluție pentru reducerea cheltuielilor atunci când prețurile energiei cresc;
- **reunirea mai multor surse de energie** : Companiile de utilități se îndepărtează de la sistemele cu combustibil fosil și se bazează în schimb pe o serie de surse de energie, inclusiv surse regenerabile, pompe de căldură, biomasă și altele. Folosind o rețea

inteligentă, aceștia pot comuta cu ușurință între aceste diverse surse de energie și se pot asigura că parametrii specifici sunt în conformitate cu așteptările utilizatorilor;

- **mentenanță predictivă** : Rețelele inteligente și contoarele inteligente de energie permit întreținerea predictivă, care reduce semnificativ costurile operaționale.

Internetul lucrurilor se referă la aducerea obiectelor fizice în lumina erei digitale, iar cel mai util pentru comunitate domeniu de aplicare este cel al industriei și producției. Internetul lucrurilor, la nivel industrial, este cunoscut sub numele de Industrial IoT (IIoT), care chiar face parte din standardul Industry 4.0, ce se include în al patrulea val al revoluției industriale.

Sub aspect de implementare a IIoT o atenție deosebită necesită managementul mentenanței – Majoritatea producătorilor folosesc managementul activelor întreprinderii și sistemele computerizate de management al mentenanței (CMS). Combinarea acestora cu senzori activați pentru intermediul IoT crește semnificativ durata de viață exploatare a utilajelor, asigurând totodată disponibilitatea și fiabilitatea.

Monitorizarea în timp real a dispozitivului – aceasta permite mentenanța predictivă și asigurarea stării optime de funcționare a mașinii. Mentenanța bazată pe condițiile de funcționare este o metodă de mentenanță care monitorizează starea de sănătate a componentelor critice a mașinii sau instalației, ca consecință semnalizează necesitatea de întreținere numai atunci când este necesar. IoT facilitează acest lucru, reducând în același timp și cheltuielile. Dar în contextul complexității structurii mașinii sau dispozitivului poate fi necesară implementarea senzorilor sau actuatorilor cu destinație specială.

1.4.2 Direcții de interes vital

Există multe direcții în care aplicațiile IoT continuă să se dezvolte și să ofere noi funcționalități. Unul din domeniile în creștere pentru IoT este agricultura și combaterea dăunătorilor. Agricultura este esențială pentru supraviețuirea umană, iar datorită modului în care populația continuă să crească, poate fi greu să menții o agricultură eficientă la scară largă fără o revoluție majoră.

Integrarea aplicațiilor IoT cu agricultura poate ajuta la creșterea producției și la menținerea acesteia în conformitate cu creșterea demografică care are loc pe tot globul. Aplicațiile IoT pot duce la agricultura de precizie – adică utilizarea datelor analitice pentru a înțelege nivelul de umiditate a solului, schimbările climatice, cerințele plantelor etc. și, astfel, să mărească randamentul și să încurajeze utilizarea eficientă a resurselor.

Această metodă poate fi folosită și pentru gestionarea animalelor. O amenințare cu care s-a confruntat întotdeauna sectorul agricol este infiltrarea dăunătorilor. Cu toate acestea, într-unul

dintre cazurile recente de utilizare IoT, o companie, Semios, folosește senzori pentru a urmări populația dăunătorilor [55]. Există și alte sisteme IoT care ar putea fi folosite pentru a prinde dăunători și pentru a notifica autoritățile despre acest lucru.

Fermierii pot folosi aplicații agricole IoT pentru a simplifica mai multe procese agricole plictisitoare. Aplicațiile IoT îi ajută să revoluționeze agricultura. Aceste aplicații pot decide momentul cel mai bun pentru producerea culturilor, identificarea nutrițiilor din sol și cantitățile de umiditate, pregătirea profilurilor de îngrășăminte în funcție de chimia solului. Fermierii pot instala senzori în întreaga fermă pentru a supraveghea fermă și sănătatea animalelor.

Aplicațiile IoT sunt utilizate pentru plantarea interioară pentru a monitoriza și gestiona condițiile de microclimă. Acest lucru îmbunătățește în cele din urmă producția de culturi. Dispozitivele IoT sunt, de asemenea, folosite pentru plantarea exterioară pentru a detecta nutrimentele din sol și umiditatea. Mai mult, aceste dispozitive pot urmări datele meteorologice pentru a îmbunătăți sistemele de îngrășăminte și irigarea inteligentă. Una dintre cele mai bune aplicații IoT pentru agricultură este controlul cu stropitorile care distribuie apa doar atunci când este necesar, astfel fiind evitată risipa de apă.

Unele dintre domeniile în care funcționează IoT este protejarea albinelor. Albinele se confruntă cu o amenințare în această lume poluată. Respectiv schimbările climatice afectează și pe apicultori. Cu toate acestea, prin implantarea dispozitivelor IoT, apicultorii se pot ocupa mai eficient de conservarea stupilor. Folosind IoT cu senzori conectați, este posibil de monitorizat temperatura stupului, cantitatea de hrană prezentă în stupi și, de asemenea, colectarea polenului. IoT poate fi folosit și în gestionarea deșeurilor, ajutându-ne să avem mai multă grijă de mediu.

În ultima perioadă, devenim din ce în ce mai conștienți de mediul înconjurător și de daunele pe care le-au provocat activitățile umane. Acum pot fi folosite aplicațiile IoT pentru a rezolva anumite probleme de mediu. Astfel, aplicațiile IoT pot folosi un sistem inteligent de gestionare a deșeurilor pentru a determina cantitatea de deșeurii generată într-un anumit loc. Autoritățile pot decide cum să proceseze și să elimine deșeurile pe baza datelor generate. Mai mult, autoritățile determină cum să deducă datele pentru planificarea apelor uzate. Proiectele de renovare a orașului pot fi realizate rapid atunci când datele colectate și soluțiile de analiză sunt combinate. În consecință, aplicațiile IoT în viața de zi cu zi contribuie la un mediu mai curat.

1.4.3 Dezvoltarea aplicațiilor de interes social

Casele inteligente este probabil direcția cea mai răspândită de utilizare IoT. Conceptul de case inteligente se rotește în jurul internetului de mai mult timp. O casă inteligentă funcționează cu utilizarea activă a aplicațiilor IoT. Dispozitivele pentru casă inteligentă colectează și partajează

informații între ele într-o platformă integrată și își automatizează acțiunile în funcție de preferințele proprietarului. Prin urmare, este clar că se angajează într-un proces de învățare pentru a înțelege preferințele proprietarului lor.

Există multe cazuri de utilizare IoT legate de electrocasnicele inteligente, dar unul dintre ele poate fi Smart Thermostats, care monitorizează și controlează temperaturile casei pentru confortul proprietarului. În plus, există și iluminare inteligentă, unde iluminarea se ajustează în funcție de preferințele utilizatorului, precum și de iluminatul extern. Totuși, în contextul aplicațiilor casnice, implementările IoT cu utilizarea actuatorilor sunt mai puțin răspândite.

Utilizarea IoT în sectorul sănătății poate redefini asistența medicală per ansamblu. Întregul sector de asistență medicală cuprinde medici, pacienți, spitale și companii de asigurări de sănătate. IoT poate viza și îmbogăți fiecare dintre aceste părți. Pacienții au deja acces la mai multe forme de portabile, cum ar fi benzile de fitness și monitoare de tensiune arterială, pentru a ajuta în domeniul sănătății.

Există și mecanisme de alertă introduse în aceste dispozitive pentru a anunța medicii sau membrii familiei în cazul unor urgențe. Pentru medici, este destul de ușor să intre în istoria unui pacient prin intermediul dispozitivului IoT și să acceseze cu ușurință datele de sănătate în timp real. Datele de sănătate în timp real pot fi, de asemenea, utilizate pentru a crește eficiența studiilor clinice. Dispozitivele IoT pot fi folosite în spitale pentru a urmări locațiile dispozitivelor medicale, cum ar fi defibrilatoarele sau scaunele cu roțile, și, de asemenea, pot ajuta la gestionarea inventarului, monitorizarea mediului și reglarea temperaturii. Mai multe detalii despre aplicațiile de învățare automată din industria sănătății pot fi găsite în [56].

Mai multe guverne intenționează să dezvolte conceptul de "orașe inteligente", adică orașe care folosesc intens IoT din mai multe motive, cum ar fi gestionarea traficului, transportul public, parcare, facturarea utilităților etc. Orașele inteligente pot fi denumite aplicații IoT la scară largă care acoperă o mulțime de zonele problematice dintr-un oraș. Deși o astfel de aplicare este costisitoare, poate fi spus cu siguranță că beneficiile depășesc cu mult costul. Cu combinația de senzori, colectarea datelor GPS și platformele Cloud, va fi mai ușor să se monitorizeze condițiile de trafic dintr-o anumită zonă, să se planifice programe de construcție prin prezicerea impactului acestora asupra traficului și să se găsească rute alternative atunci când este necesar.

Utilizarea facturării inteligente pentru consumul casnic de energie și a iluminatului stradal inteligent poate ajuta la gestionarea consumului de energie. Un alt caz de utilizare al IoT este îmbunătățirea siguranței publice prin utilizarea camerelor inteligente sau a microfoanelor inteligente pentru a ajuta la detectarea criminalității în orice zonă dintr-un oraș.

O direcție importantă de utilizare a IoT este domeniul de educație. Deși, aparent sistemul educațional are un istoric și abordări generice, este absolut necesar să se adapteze la condițiile sociale contemporane. Aici vine în ajutor IoT cu astfel de aplicații cum ar fi sisteme de monitorizare, table și diverse dispozitive care fac mai interactiv procesul educațional, ceea ce ca rezultat aduce la mărirea eficienței și siguranței procesului de studiu [57].

1.4.4 Abordarea problemelor industriale

Utilizarea IoT în sectorul industrial inițial era văzută ca fiind similară cu revoluția industrială, ca până la urmă să devină parte componentă din o nouă revoluție în industrie.

În sectorul de producție, IoT poate fi utilizat în managementul activelor și gestionarea stocurilor. Implementarea IoT în sectorul de producție poate ajuta la urmărirea eficienței sistemelor utilizate, la detectarea oricăror erori ale mașinilor, la detectarea cauzelor lipsei de eficiență etc. IoT în industrie poate ajuta și la abordarea timpilor de oprire neplanificați.

Aplanarea problemelor industriale este o aplicație predominantă din viața reală a programelor care utilizează internetul. Astfel aplicațiile IoT sunt utilizate pe scară largă în automatizarea industrială și producție. Tehnologiile GPS și RFID pot permite producătorului să urmărească un produs de la fabricare până la destinație. Acești senzori colectează informații despre condițiile produsului, timpul de călătorie și condițiile de mediu impuse produsului.

Echipamentele din fabrică dotate cu senzori pot ajuta la recunoașterea ”congestiei” în linia de producție. Prin urmare, reduce risipa și economisește timp. Alți senzori echipați pe acele echipamente pot urmări, de asemenea, performanța echipamentului. Ei pot prezice când echipamentul va avea nevoie de mentenanță. Abordarea problemelor industriale este una dintre acele aplicații IoT din viața de zi cu zi care evită defecțiunile costisitoare prin implementarea de mentenanță predictivă [58].

1.5 Formularea problemei de cercetare

În introducerea a fost menționată tendința actuală de a elabora, dezvolta și integra soluții bazate pe metode AI, în particular pe soluții ce înglobează modele de învățare automată și dispozitive electronice de calcul inteligent la margine. Acesta din urmă se pretează pentru o gamă largă de aplicații. Astfel, la ora actuală modelarea și monitorizarea sistemelor/obiectelor de inginerie complexe se bazează pe un mix de tehnologii și metode, care au ca scop detectarea și colectarea datelor esențiale, analiza și procesarea datelor, respectiv elaborarea modelelor computaționale capabile să monitorizeze starea funcțională sau să prezică comportamentul sistemelor/obiectelor în cauză.

În acest sens, o problemă critică ține de proiectarea unor soluții de detectare fără contact fezabile. O posibilă cale de rezolvare a acestei probleme ține de cercetarea și elaborarea dispozitivelor cu senzori pe bază de microfibre cu înveliș din sticlă, care ar putea fi utilizate pentru diverse aplicații fără contact, de exemplu, monitorizarea stării funcționale a structurilor compozit, inclusiv a vaselor de înaltă presiune, mașinilor, etc. Ca parte indispensabilă, este necesară cercetarea, elaborarea și implementarea componentei de inteligență la margine. Cercetările pe acest palier științific sunt necesare pentru a oferi noi soluții tehnologice inovatoare în domeniul IIoT, respectiv IoE, în particular pentru elaborarea și dezvoltarea sistemelor și/sau aplicațiilor de măsurare/monitorizare și control fără contact.

După cum a fost arătat în acest capitol problematica întreținerii (mentenanței) predictive a fost și va fi în continuare una dintre aplicațiile prioritare în domeniul IIoT, dar și IoE [4, 59, 60]. În general, monitorizarea stării funcționale în timp real a unui echipament care ar permite întreținerea predictivă și sănătatea optimă a acestuia reprezintă un subiect interdisciplinar fierbinte. Dacă ne referim la domeniul energiei putem afirma că fiabilitatea palelor turbinelor eoliene are un impact major în funcționare și întreținere, palele rotorului reprezentând una dintre părțile greu de monitorizat.

În Fig. 1.5 este prezentată caracteristica de falimentare a palelor turbinelor eoliene în comparație cu pale utilizate în alte domenii. După cum se poate observa din Fig. 1.5 numărul de falimentări datorat obosirii materialului compozit este cel mai ridicat în cazul turbinelor eoliene

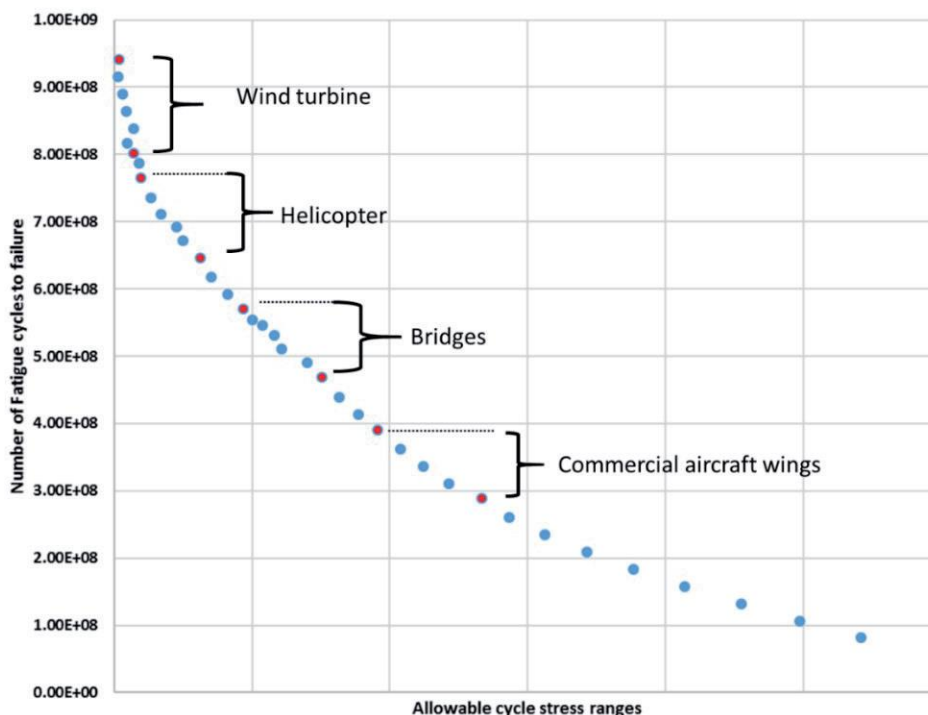


Fig. 1.5. Caracteristica de falimentare a palelor turbinei eoliene [61]

[61]. Totodată, din Fig. 1.6 se poate vedea că rata de falimentări crește odată cu puterea turbinei eoliene [62].

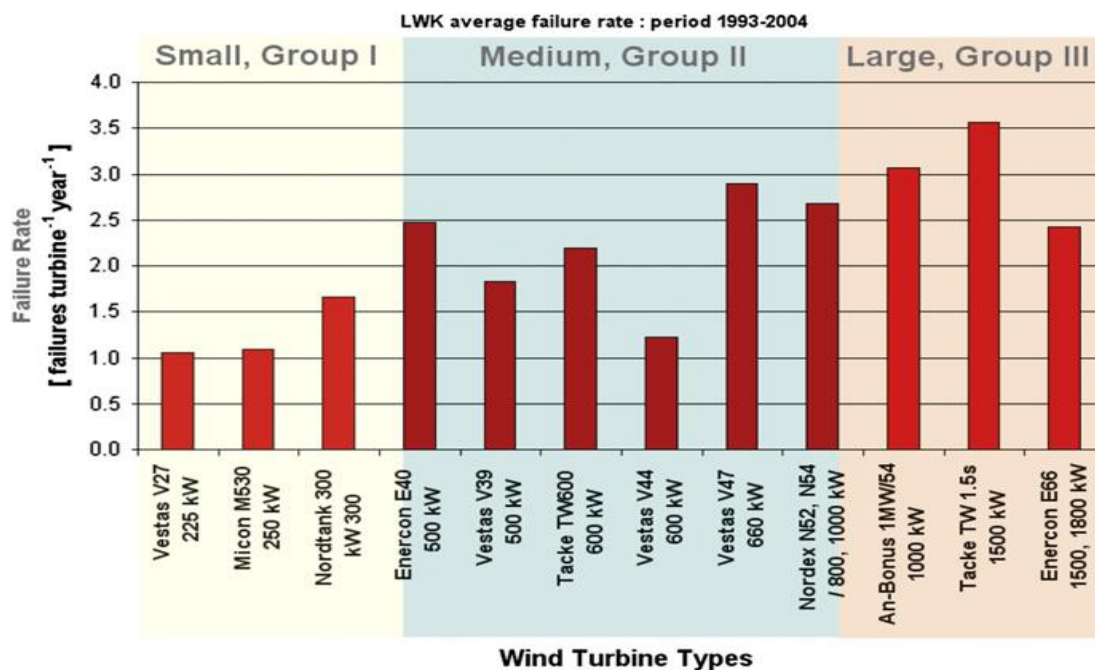


Fig. 1.6. Rata de falimentare a turbinelor eoliene [62]

O abordare comună în mentenanța diverselor echipamente și sisteme inginerești este utilizarea senzorilor de vibrații. Metoda de monitorizare a stării în baza analizei vibrațiilor este descrisă ca cea mai eficientă abordare în cazul echipamentelor rotative, vibrațiile produse fiind specifice. De exemplu, o turbină eoliană nouă are asociat un semnal de vibrație relativ neted în timpul funcționării normale, dar pe măsură ce degradează se modifică caracteristicile semnalului. Integritatea turbinei poate fi evaluată prin compararea detaliată a spectrelor de vibrații noi și vechi. Deoarece punctele mici deteriorate nu provoacă modificări semnificative în cursul rotației sau în comportamentul aerodinamic, rezultă că nici în spectrele de zgomot nu există indicii asupra originii și/sau extinderii oricărui punct deteriorat. În cele mai multe cazuri, deteriorările critice trebuie să fi avut loc mai întâi pentru a putea determina amploarea deteriorării.

Având în vedere necesitatea unor soluții fiabile de monitorizare, control și mentenanță predictivă a palelor turbinelor eoliene, este foarte important să se studieze și să se propună noi soluții și tehnici pentru monitorizarea fără contact a stării lor funcționale. În teză această problemă urmează a fi abordată din perspectiva utilizării dispozitivelor la margine cu senzori de deformare fără contact pe bază de microfibre cu înveliș din sticlă.

Prin prisma abordării adoptate, monitorizarea inteligentă a stării turbinei eoliene necesită achiziția și procesarea datelor privind deformațiile curente în interiorul palelor. Pentru a face față acestei provocări este necesar de rezolvat următoarele probleme:

- alegerea judicioasă a locațiilor vulnerabile pe structura compozit. Pentru a rezolva această problemă este necesar un model de calcul cu elemente finite a rezistenței unei pale tipice. Astfel, în rezultatul simulărilor numerice pot fi stabilite coordonatele exacte ale locațiilor prioritare pentru montarea unui număr potrivit de senzori de deformare fără contact;
- indiferent de tehnicile utilizate, capabilitățile unui sistem de monitorizare a stării funcționale au la bază un anumit număr și tip de senzori, respectiv pe metodele de procesare utilizate pentru a extrage informații necesare din datele achiziționate;
- cercetarea și elaborarea unor noi abordări și tehnici de calcul la margine, care presupune dezvoltarea algoritmilor AI prin crearea seturilor de date necesare procesului de învățare automată, apelând la date statistice colectate și la date sintetice obținute prin simulări numerice.

Totodată, având în vedere potențialul calculului la margine pentru dezvoltarea aplicațiilor ce asigură conexiuni între lumea fizică și cea virtuală, se propune de a dezvolta un sistem încorporat de control al amplitudinii pendulului Foucault, care să permită implementarea comunicării directe, sau prin Cloud, cu dispozitive inteligente la margine, respectiv accesarea sistemelor cu pendul în medii inteligente de învățare. Aceasta ar putea permite instituțiilor de învățământ să acceseze aplicații în baza sistemelor IoT pentru programe de cercetare și studiu în cadrul unor discipline precum fizică, inginerie, astronomie, etc.

1.6 Concluzii la capitolul 1

A fost realizată analiza stadiului actual și tendințele de dezvoltare pe continuumul „Cloud - Calcul la margine – IoT”. A fost investigat stadiul actual și tendințele de dezvoltare ale domeniului IoT. A fost relevat rolul și importanța sistemelor și dispozitivelor inteligente încorporate în multiple aplicații de măsurare, monitorizare și control cu dispozitive la margine, care conțin diverși senzori. În context a fost evidențiată importanța cercetării și elaborării dispozitivelor de calcul la margine cu senzori fără contact. Au fost analizate problemele care apar în dezvoltarea și utilizarea sistemelor moderne inteligente, modul în care acestea avansează. În consecință au fost scoase în evidență concepte noi și platforme de calcul care contribuie la integrarea inteligenței la margine. Este efectuată trecerea în revistă a domeniilor prioritare cu utilizarea IoT și a modului în care aceste domenii au suferit îmbunătățiri. A fost formulată problema și direcția de cercetare științifică sub forma triadei: metode și dispozitive cu senzori fără contact – modelare cu rețele neuronale – dezvoltare aplicații de măsurare și de monitorizare în domeniul IoT.

2. ELABORAREA DISPOZITIVELOR DE CALCUL LA MARGINE PENTRU DEZVOLTAREA APLICAȚIILOR FĂRĂ CONTACT

2.1 Aplicații senzorige

Era modernă IoT presupune controlul și monitorizarea diverselor procese sau dispozitive. În dependență de domeniul de aplicare este foarte important și tipul sau performanțele senzorilor utilizați.

La moment putem vorbi despre o bază de elemente senzorige destul de vastă, datorită evoluției continue a cercetărilor și sarcinilor tehnice care derivă din problemele cu care se confruntă industria. Desigur pentru domenii industriale sau critice din punct de vedere a securității construcțiilor [63] sunt necesare implementarea unor soluții cu utilizarea senzorilor cu destinație specială. În acest sens schimbarea de paradigmă pe care o provoacă senzorii de ultimă generație, este trecerea de la măsurarea precisă a deformării la detectarea directă a deteriorării, adică utilizarea deformării ca indicator de deteriorare mai degrabă decât principalul parametru observat.

În continuare se poate de menționat etapele importante de evoluție în tehnologiile de comunicare, inginerie electrică și informatică, matematică și informatică, care au avut ca rezultat crearea de tehnologii fără fir, ce au îmbunătățit considerabil SHM de la distanță, dezvoltarea statisticilor și a tehnicilor ML care au permis noi abordări în analiza datelor, care la rândul său, au îmbunătățit semnificativ înțelegerea datelor colectate de senzori și crearea de procesoare și servere puternice care au permis calcularea rapidă, accesul și stocarea volumelor de datelor mari.

O direcție importantă de cercetare explorată în prezent este înțelegerea completă a datelor colectate prin intermediul tehnicilor moderne de detectare a deformării și evaluarea capacităților de măsurare a deformării care urmează să fie utilizate pentru predicția viitoarelor comportamente ale structurilor monitorizate folosind abordări bazate pe datele colectate (statistici și ML). Deși această direcție nu abordează în mod direct dezvoltarea senzorilor, este extrem de importantă, deoarece subliniază importanța senzorilor dincolo de simpla măsurare a deformării și are potențialul de a permite activarea sau implementarea structurilor inteligente și de a le transforma în sisteme ciber-fizice [4].

Aplicația senzorilor tensiometrici (STeM) este măsurarea deformărilor elastice care sunt descrise de legea lui Hook prin formula:

$$F = k \cdot x \quad (2.1)$$

unde F este forța aplicată, k – este constantă care caracterizează proprietățile elastice ale arcului, x – este abaterea de la poziția de relaxare.

Dacă abstractizăm o construcție sau un segment al unei construcții cu o bară, atunci (2.1) poate fi descris ca:

$$\sigma = E * \varepsilon \quad (2.2)$$

unde σ – este tensiunea elastică, E – modulul elasticității construcției, ε – deformarea elastică care poate fi descrisă ca:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (2.3)$$

unde ΔL – este extinderea elastică, L – lungimea totală a obiectului supus deformării.

În contextul interesului sporit față de STeM, care pot fi integrați în diverse structuri, au fost efectuate cercetări în vederea elaborării senzorilor capabili să măsoare deformările elastice (2.3).

2.2 Elaborarea senzorilor de deformare fără contact în baza microfiringelor

Baza de soluții existente în domeniul STeM este destul de extinsă. Însă în mare parte, în contextul utilizării în sistemele integrate, putem vorbi doar despre disponibilitatea STeM cu contact. Ca regulă senzorii sunt montați pe suprafețele elastice sau flexibile.

Pentru unele domenii este critică măsurarea tensiunilor elastice în interiorul construcției monitorizate [5]. Integrarea unui senzor cu contact în construcția monitorizată poate afecta integritatea construcției, sau în dependență de tipul senzorului utilizat, poate oferi date imprecise referitor la deformațiile existente. Astfel devine imperativă utilizarea STeM fără contact.

Cu părere de rău, baza de elemente pentru STeM fără fir este destul de redusă. Prin puținele soluții existente sunt STeM bazați pe microfir. Aceste tipuri de senzori pot avea un impact extraordinar în domeniu dacă vor fi luate în considerare toate aspectele de utilizare cum ar fi constrângerile legate de producere, abordări moderne ML, cele mai recente tehnologii de calcul la margine cu o rată de integrare avansată în microcontrolere sau utilizarea de Cloud Computing.

Există aplicații care necesită abordări speciale pentru fiecare dintre părțile utilizate. STeM fără contact bazați pe microfir cu magnetostricție pozitivă necesită procese tehnologice specifice începând cu turnarea microfiringelor, până la dezvoltarea unui dispozitiv senzoric fără contact. Senzorii fără contact dezvoltați pot fi încorporați în diferite părți sau componente critice din diferite domenii industriale care necesită monitorizare sau mentenanță continuă. În acest context, apare necesitatea dezvoltării dispozitivelor încorporate specifice și o arhitectura specifică pentru a oferi soluții robuste în dependență de domeniu de aplicare. Prin urmare este necesar:

- de a identifica aliajele optime pentru microfiringe care prezintă interes ca STeM;
- de a descrie procesul tehnologic de turnare a microfiringelor;
- de a specifica metodele de îmbunătățire a procesului de turnare;

- de a identifica un proces tehnologic de prelucrare a microfirului pentru îmbunătățirea caracteristicilor de sensibilitate.

De asemenea, este foarte important ca pentru senzorii dezvoltati să fie prezentată o platformă de utilizare, cu specificul utilizării în dependență de domeniul de aplicare, cu impactul și dezavantajele aferente.

2.2.1 Materiale utilizate pentru turnarea microfiredor.

În cadrul activităților de cercetare și producție de microfiredor a companiei MicroFirdor Tehnologii Industriale” sunt elaborate atât metode de turnare a microfiredor, cât și tehnologii de prelucrare a microfiredor și dispozitive de măsurare a caracteristicilor. În colaborare cu secția de cercetare de la ”MicroFirdor Tehnologii Industriale” au fost analizate și identificate domeniile de aplicare și tehnologii de producere a microfiredor.

În contextul celor expuse mai sus au fost întreprinse acțiuni și organizate activități de cercetare pentru a identifica tehnologia de fabricație a STeM pe bază de microfiredor, a fost stabilit un program tehnologic și de testare a microfiredor. Obiectivele programului au fost definite ca:

- cercetarea proceselor de ordonare a structurii amorfe sub acțiunea temperaturii și a proceselor de întindere a microfiredor din aliaje cu magnetostricție pozitivă și negativă;
- identificarea compoziției aliajelor, a metodelor de prelucrare, cu scopul de a obține microfiredor cu dependență mare între forță coercitivă și tensiunilor mecanice externe aplicate microfiredor;
- cercetarea microfiredor prelucrate, în special a caracteristicilor magnetice în funcție de tensiunile de întindere aplicate microfirdorului;

Diferite microfiredor au fost selectate pentru cercetare. Acestea pot fi grupate în funcție de proprietățile materialelor după cum urmează:

- cu magnetostricție pozitivă : $Fe_xB_ySi_z$, $Co_wFe_xB_ySi_z$, $Co_vFe_wCr_xB_ySi_z$.
- cu magnetostricție negativă sau aproape de 0: $Co_vFe_aCr_xB_ySi_z$, $Co_aFe_bB_ySi_z$.
- dimensiunea microfirdorului selectat a fost de 20 ± 3 ; 30 ± 3 ; 45 ± 5 μm cu un strat de sticlă de 3 ± 1 ; 6 ± 1 μm .

Pentru firele selectate au fost vizate următoarele cercetări și măsurători:

- măsurarea diametrelor reale ale miezului și a grosimii stratului de sticlă.
- măsurarea caracteristicilor magnetice la adăugarea sarcinilor de întindere (forme impulsului în timpul demagnetizării și parametrii buclei de histerezis).

- măsurarea caracteristicilor magnetice în intervalul de temperatură de 20 - 50 ° C (de preferință 20 - 100 ° C).
- studiul structurilor cu analiză radiografică (dacă este posibil, la unghiuri mici de dispersie).

A fost efectuat un studiu pentru a găsi materiale mai potrivite, cu caracteristici definite, care au fost capabile să ofere un răspuns în caracteristicile magnetice pentru firul turnat, atunci când li se aplică o forță de întindere. Cu acest scop a fost elaborat un stand simplu pentru a efectua aceste cercetări preliminare.

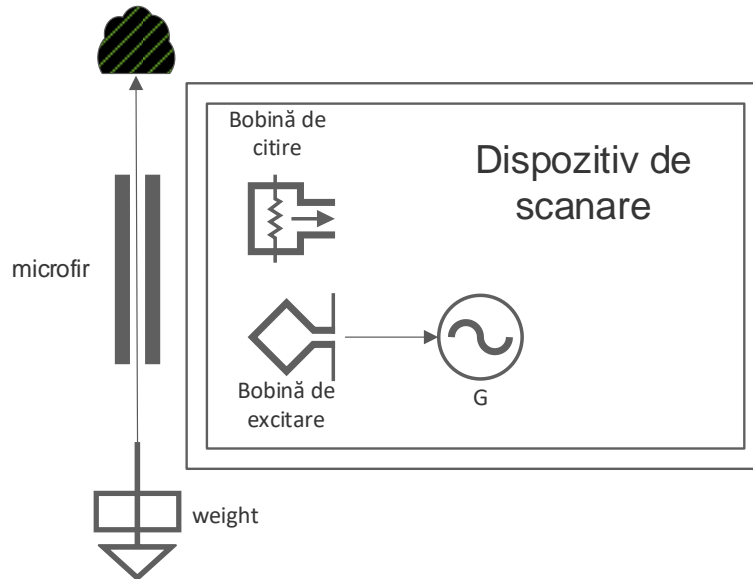


Fig. 2.1. Stand pentru verificarea răspunsului caracteristicilor magnetice

Standul prezentat în Fig. 2.1 presupune lipirea unui cârlig de microfirul testat. Ulterior, de acest cârlig se suspendau greutăți etalon până la 50g și, utilizând un măsurător a caracteristicilor magnetice a microfirului, se înregistra răspunsul magnetic.

Pentru această metodă de înregistrare a caracteristicilor au fost identificate următoarele neajunsuri:

- cârligul de suspendare avea greutate proprie de 2g, din care cauza nu era posibilă înregistrarea răspunsului magnetic fără deformări elastice;
- procedeul de lipire a cârligului de suspendare era dificil din punct de vedere tehnologic, iar în unele cazuri chiar afecta caracteristica microfirului;
- standul nu permitea protejarea regimului de întindere elastică a microfirului – deseori microfirul era rupt accidental;
- procedeul de ridicare a caracteristicilor era foarte lent;

Cu toate acestea s-a reușit identificarea aliajelor care prezentau interes iar cercetările ulterioare au fost replanificate.

Conform cercetărilor preliminare pentru multe materiale a fost identificată o schimbare a forței coercitive (H_c) (Fig. 2.2). Pentru probele măsurate s-a identificat faptul că microfibrele au ajuns în regiunea de întărire a tulpinii, iar schimbarea forței coercitive a fost relativ scăzută pentru o gamă largă de tensiuni aplicate. Mai multe probe au fost predispuse să ajungă în regiunea de îngustare (deformare plastică) sau chiar rupt, ceea ce ar face imposibilă utilizarea microfibrele ca senzori de tensiune. Rezultatele obținute confirmă comportamentul aliajelor tari la deformări, în mare parte deformările plastice fiind imposibile [64].

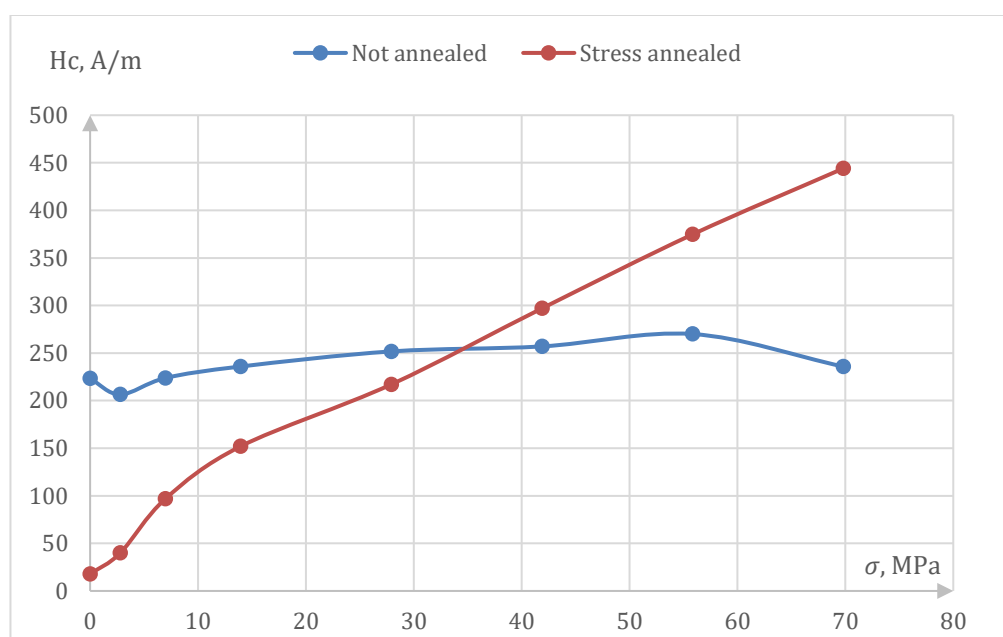


Fig. 2.2. Dependența forței coercitive (H_c) de tensiunea la întindere elastică (σ)

2.2.2 Tehnologii de prelucrare și cercetare a microfibrului

Chiar dacă unele dintre materialele studiate pot prezenta o sensibilitate scăzută la întindere, acest lucru poate fi îmbunătățit prin efectuarea prelucrării termice sau prelucrării termo-mecanice (PTM). PTM a microfibrele se realizează prin expunerea unui microfibr amorf bazat pe aliaj feromagnetic la o temperatură mai mare, în stare întinsă. Temperatura de expunere este mai mică decât temperatura de cristalizare, astfel miezul din aliaj menține starea amorfă, dar stratul atomic cel mai apropiat de învelișul de sticlă a microfibrului este restructurat de-a lungul forței aplicate. La această temperatură, stratul de sticlă aproape că nu-și schimbă forma. După PTM, în condiții normale, tensiunea mecanică din miezul microfibrului este scăzută sau chiar are o caracteristică de constrângere [65].

În rezultatul PTM a microfiredelor se adeverește o scădere semnificativă a coercitivității, care are un impact mare asupra efectului de magnetoimpedanță [66]. Astfel, este foarte important să se efectueze o cercetare a procesului de PTM, pentru a obține o sensibilitate mai mare pentru SMF.

Conform rezultatelor preliminare ale cercetărilor în colaborare cu „Microfir Tehnologii Industriale”, microfiredele care au fost supuse PMT, au avut o sensibilitate mai ridicată într-un domeniu de deformări elastice mai extins, în funcție de material și de tehnologia PTM, se putea obține o gamă mai largă de domenii de sensibilitate (Fig. 2.2).

Astfel, a fost dezvoltat un proces de cercetare dedicat PTM a microfiredelor, pentru a identifica procesul tehnologic corespunzător diverselor aplicații. Prelucrarea microfiredelor a inclus cercetări având în vedere valoarea diferită a temperaturii, forțele de întindere și viteza prin cuptorul de procesare.

Pentru microfiredele în baza aliajelor de interes care au fost cercetate, a fost aplicată procedura de PTM și pentru domeniul de interes a caracteristicilor a fost identificată temperatura de aproximativ $500^{\circ}C$. Standul de prelucrare mecanică efectua întinderea microfiredului sub acțiunea unei greutate de $\sim 50g$.

Raportul dintre tensiunea de tracțiune pentru microfiredele poate fi calculat în funcție de expresia:

$$\sigma_m = \frac{kP}{kS_m + S_{gl}} \quad (2.4)$$

unde k – este E_m/E_{gl} : Modulul Young pentru metalul (aliajul) folosit și sticlă, P este forța de întindere aplicată, S_{gl} și S_m sunt aria secțiunilor transversale pentru sticlă și metal folosit. În conformitate cu expresia (2.4), un set de greutăți a fost utilizat pentru a aplica o tensiune de tracțiune în intervalul $[50-500] MPa$. Având în vedere impactul PTM și (2.4), expresia pentru calcularea forței coercitive poate fi definită ca:

$$Hc = f(\sigma_m, V_a, T_a) = K_0 + K_1\sigma_m + K_2V_a + K_3T_a \quad (2.5)$$

unde V_a și T_a sunt viteza de prelucrare termică și respectiv temperatura de recoacere. K_0 , K_1 și K_3 sunt coeficienți care pot fi identificați pentru un anumit proces de PMT și pentru un anumit tip de microfired pentru a crea STeM cu caracteristicile dorite.

Elementul sensibil poate fi utilizat în aplicații cu măsurători fără contact pentru materiale compozite [67]. Prin integrarea microfiredului în mediul monitorizat, accesul la acesta poate fi dificil sau, în funcție de procesul de încorporare a elementului sensibil, răspunsul său poate varia. Pentru această situație ar trebui luată în considerare o procedură specială de ajustare, dar acest lucru nu ar fi potrivit pentru cazurile de producție în masă.

Având în vedere faptul că microfibrele se bazează pe materiale amorfe, este important să se efectueze cercetări privind caracteristicile sale elastice. Scopul acestei cercetări a fost de a identifica impactul mai multor cicluri de întindere asupra caracteristicilor microfibrului, în special asupra microfibrele dezvoltate pentru măsurarea tensiunii.

Pentru cercetarea caracteristicilor magnetice și elastice ale microfibrele a fost dezvoltat un sistem dedicat(Fig. 2.3). Sistemul include următoarele componente principale:

- BH metru, conceput pentru microfibre sensibile încorporate;
- Mecanism de întindere;
- Suport pentru instalarea microfibrele.

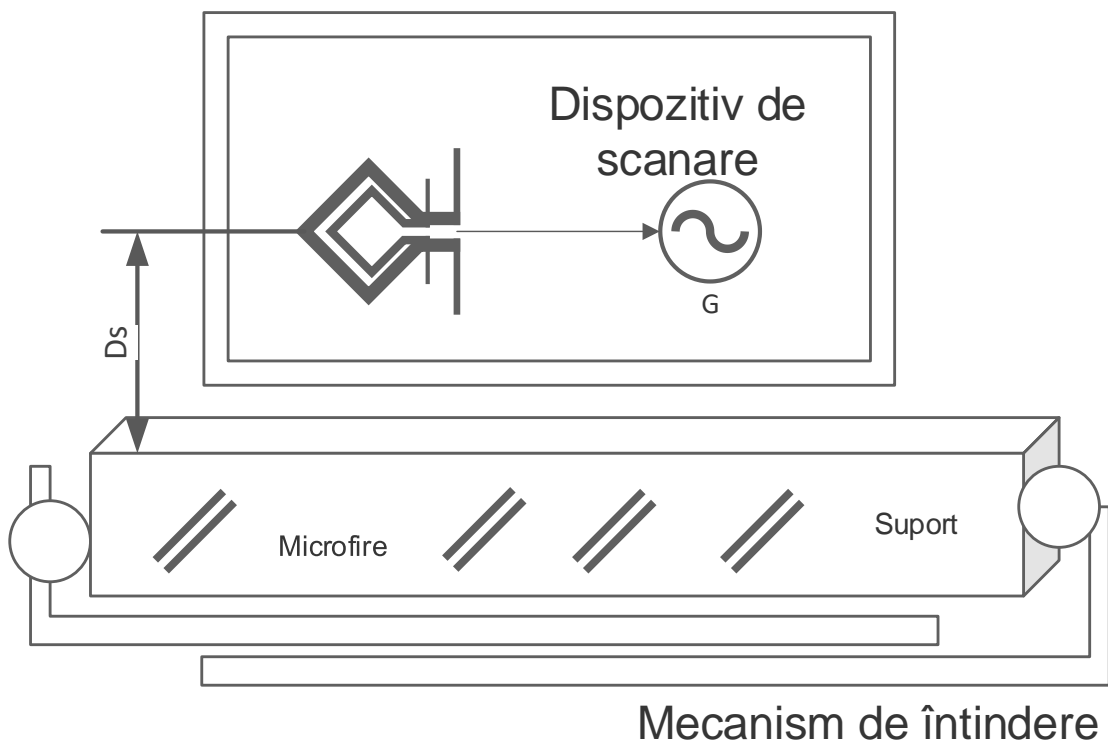


Fig. 2.3. Măsurarea caracteristicilor magnetice la deformări elastice

Acest sistem (Fig. 2.3) permite măsurarea caracteristicilor mai multor microfibre într-o singură iterație, fără a efectua operații repetate de ajustare a echipamentului de măsurare sau setare a deformațiilor elastice.

2.3 Elaborarea dispozitivului de calcul la margine pentru aplicații de monitorizare a deformațiilor

Pentru măsurarea fără contact a deformațiilor a fost obținut brevetul de invenție: „*Senzor de deformare fără contact*” [68]. Brevetul obținut se referă la tehnica de măsurare, în special la extensometrie, și poate fi utilizată pentru măsurarea deformațiilor corpurilor solide supuse la întindere (1 din Fig. 2.4), inclusiv a celor ireversibile, de exemplu a deformațiilor reziduale critice în recipiente sub presiune, în particular în cilindri din compozit de înaltă presiune.

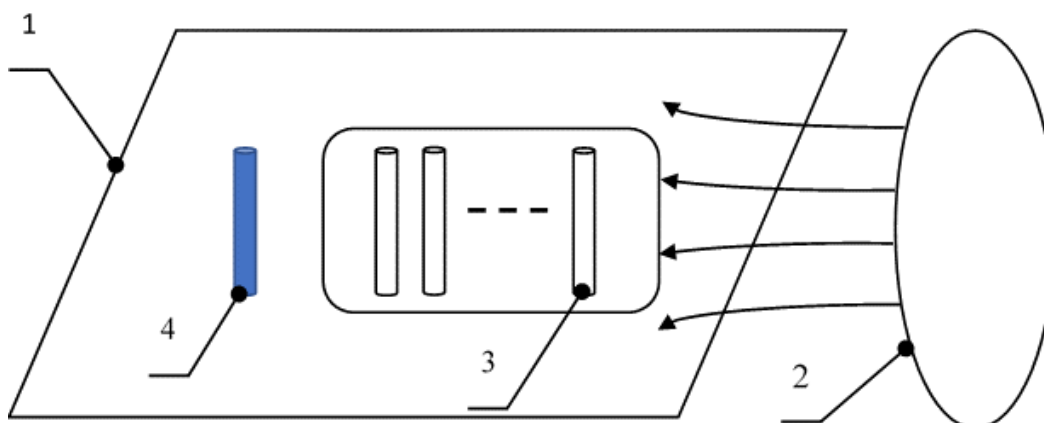


Fig. 2.4. Dispozitiv tensiometric bazat pe microfir

Conform brevetului obținut [68], metoda de măsurare a deformațiilor presupune că bobinele de excitare și de detectare (2 din Fig. 2.4) trebuie să fie situate la o anumită distanță de senzorul propriu zis. Îndepărtarea acestor bobine de la senzor chiar și pentru o distanță mai mare, precum și o modificare a poziției bobinelor de excitare și de detectare față de senzor, nu va conduce la erori în măsurarea deformării, deoarece semnalul util de la elementul sensibil este raportat la semnalul elementului de referință. Totodată, senzorul este ușor de fabricat și instalat pe obiectul testat, iar rezultatele măsurătorilor nu depind în mare măsură de temperatura mediului de operare.

Conform invenției, senzorul conține ca element nou cel puțin două segmente de microfir cu înveliș din sticlă, având miezul realizat din aliaje diferite, totodată un segment de microfir este utilizat în calitate de fir sensibil (4 din Fig. 2.4), realizat pe bază de aliaj cu temperatura Curie înaltă și sensibilitatea la deformare ridicată, iar un alt segment de microfir este utilizat în calitate de fir de referință (3 din Fig. 2.4), realizat pe bază de aliaj cu temperatura Curie joasă și sensibilitatea la deformare apropiată de zero. Segmentele de microfir sunt realizate din aliaje feromagnetice cu structură amorfă, având un comportament bistabil la remagnetizare.

Caracteristicile de răspuns la deformări elastice pot fi îmbunătățite prin utilizarea unui microfir de referință care este tolerant deformărilor [68], dar are o forță coercitivă apropiată microfiredorilor sensibile. Astfel, procesul de cercetare a luat în considerare și microfiredorile care au o magnetostricție aproape de 0.

Microfirul de referință poate furniza un semnal de referință care face ca dispozitivul de măsurare să calculeze forța coercitivă indiferent de anumite restricții (distanță, poziționare) prin faptul că acest semnal de referință este unul exact. Ca rezultat dispozitivul de măsurare devine mult mai tolerant la deplasarea D_s (Fig. 2.3) față de elementul sensibil (Fig. 2.5).

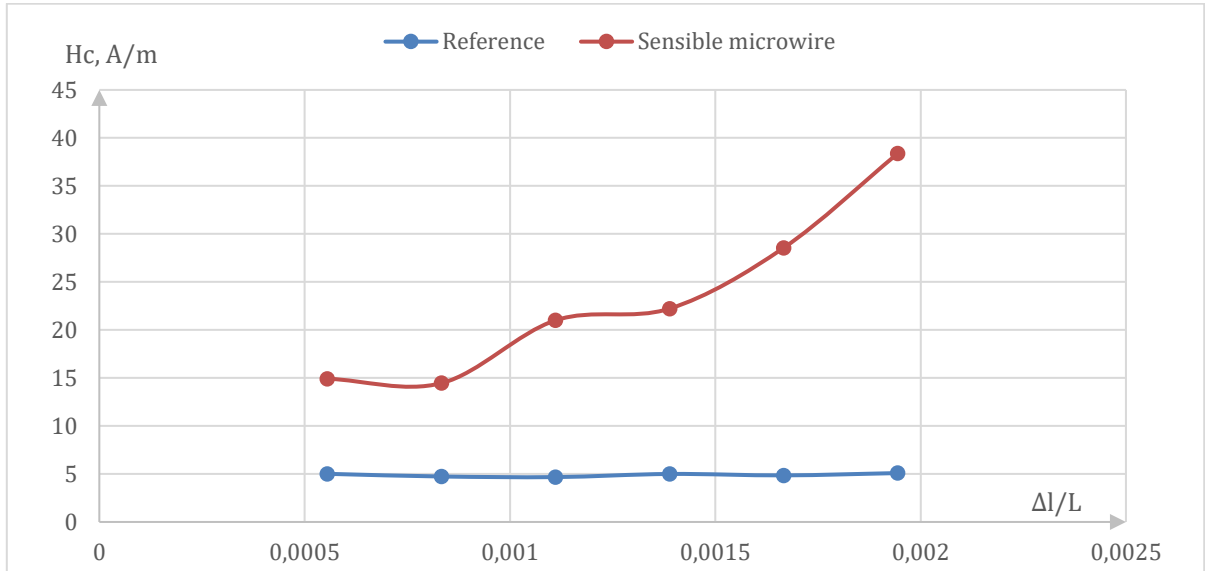


Fig. 2.5. Variația forței coercitive (H_c) funcție de deformarea elastică ($\Delta l/L$)

2.3.1 Măsurarea deformărilor elastice

Procesul de cercetare a identificat, de asemenea, microfibrele de referință cele mai potrivite pentru microfibrele sensibile cu caracteristicile obținute. Multe microfibre au putut fi instalate pe suportul măsurătorilor, ceea ce a făcut posibilă măsurarea caracteristicilor tuturor microfibrele instalate într-un singur ciclu de măsurare. Conform măsurătorilor efectuate, microfibrele investigate au arătat o sensibilitate stabilă în intervalul de testare. În general, răspunsul magnetic nu s-a

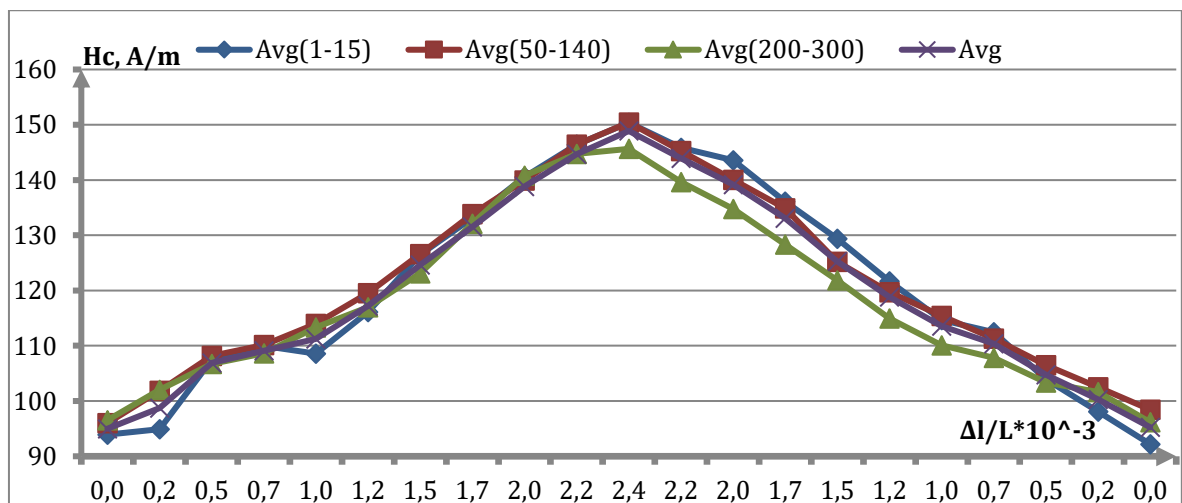


Fig. 2.6. Variația forței coercitive (H_c) funcție de deformarea elastică ciclică ($\Delta l/L$)

schimbat pe parcursul multor cicluri de întindere (Fig. 2.6), astfel încât se poate considera că pentru întinderile elastice sensibilitatea este stabilă.

2.3.2 Dispozitiv de calcul la margine pentru montorizarea/măsurarea deformărilor elastice

Având în vedere că STeM dezvoltati sunt destinați pentru utilizarea în medii cu o gamă largă de temperaturi (temperaturi negative până la -50°C , în funcție de cerințele specifice dispozitivului), este necesar să se dezvolte un prototip de dispozitiv bazat pe calculul la margine(DClcMa). DClcMa-ul dezvoltat ar trebui să fie capabil să gestioneze măsurarea SMF împreună cu răspunsul magnetic de la un microfir de referință, care nu este afectat de temperatură.

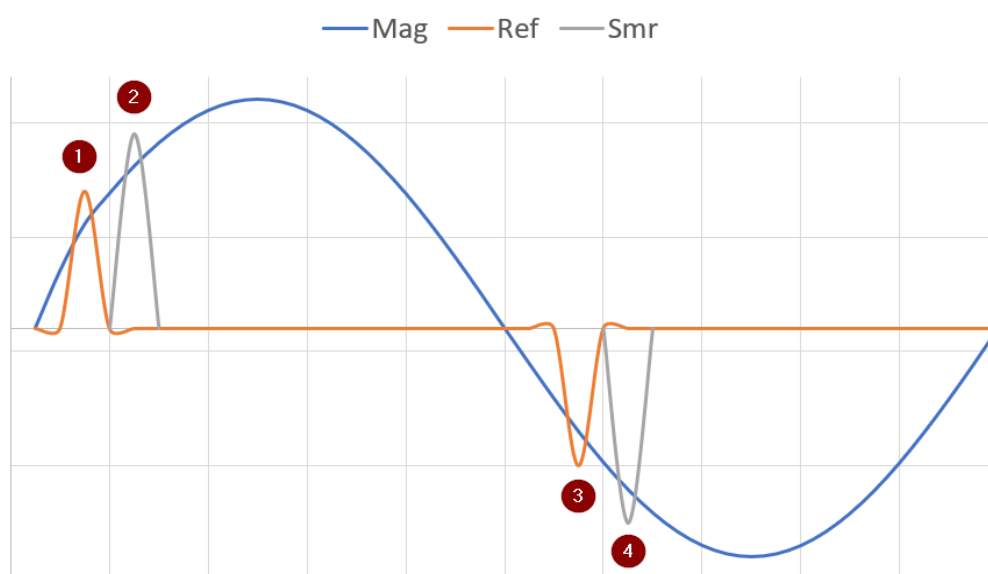


Fig. 2.7. Răspunsul magnetic al microfiredor de referință și sensibile

Când dispozitivul de detectare este apropiat de un corp pe care este fixat senzorul, câmpul magnetic generat de un curent alternativ sinusoidal (semnalul *Mag* din Fig. 2.7) acționează asupra firului sensibil (semnalul *Smr* din Fig. 2.7) și asupra firului de referință (*Ref* din Fig. 2.7). Datorită comportamentului bistabil la remagnetizare, răspunsul magnetic al senzorului este caracterizat printr-un salt Barkhausen pronunțat, care permite inducerea unor impulsuri electromagnetice scurte (2 și 4 din Fig. 2.7). Impulsurile 1 și 3 (Fig. 2.7) induse la remagnetizarea firului de referință, respectiv, impulsurile 2 și 4 (Fig. 2.7) induse la remagnetizarea firelor sensibile au o amplitudine suficientă pentru a fi detectate de dispozitivul de detectare. Răspunsul magnetic al senzorului la câmpul magnetic alternativ aplicat depinde de deformările elastice căror sunt supuse microfiredor.

Cu alte cuvinte, modificarea caracteristicilor magnetice ale buclei de histerezis este corelată cu deformarea la care este supus materialul magnetic [68].

În cazul firului sensibil la deformări, aria buclei de histerezis, respectiv forța coercitivă crește odată cu deformarea. În același timp, deformările elastice a firului de referință, și respectiv aria buclei de histerezis, nu au vreo dependență. Răspunsul magnetic al sensorului poate fi determinat prin detectarea impulsurilor electromagnetice induse la remagnetizare și calcularea valorii numerice a raportului dintre aria buclei de histerezis a firului de detectare și aria buclei de histerezis a firului de referință. Valoarea rezultată trebuie recalculată în funcție de coeficientul de sensibilitate la întindere al firului sensibil cu un algoritm încorporat în DCIcMa. Rezultatul obținut în urma calculelor va reprezenta dimensiunea deformării, care, în general, nu depinde de distanța de la dispozitivul de detectare (Fig. 2.3 - distanța de detectare D_s). Astfel, prin aplicarea metodei de comparare a caracteristicilor magnetice ale buclelor de histerezis ale firului sensibil și ale firului de referință, se poate determina magnitudinea deformației unui corp solid (2.6).

$$\frac{S_{smw}^{loop}}{S_{rmw}^{loop}} \Rightarrow \varepsilon \quad (2.6)$$

unde S_{smw}^{loop} este bucla de histerezis a microfirului sensibil, S_{rmw}^{loop} reprezintă bucla de histerezis a microfirului de referință și este deformarea elastică. Având în vedere că mulți parametri ai dispozitivului de măsurare sunt constanți sau nu variază, deformarea elastică poate fi calculată folosind un LUT (Fig. 2.8), care poate fi ajustat în timpul calibrării dispozitivului.

Trebuie remarcat faptul că un astfel de senzor/dispozitiv pentru măsurarea deformărilor elastice fără contact, poate fi montat cu ușurință pe suprafața corpului solid sau pe căptușeala oricărui obiect supus deformărilor elastice. Datorită faptului că segmentele de microfir sunt situate aproape unul de altul, pot fi ușor integrate în tehnologii existente de fabricație a pieselor din compozit. Contextul aplicației respective va fi desfășurat în capitolul 3.

În Fig. 2.8 este prezentată structura dispozitivului de calcul la margine pentru măsurarea deformațiilor elastice care au la bază SMF, propusă în [69]. În această figură sunt descrise elementele cheie și interacțiunea între ele pentru implementarea algoritmului de calcul a deformărilor elastice conform răspunsului magnetic al microfiredor (Fig. 2.7).

Conform schemei dispozitivului, unitatea centrală de procesare inițiază generarea unui semnal sinusoidal corespunzător setărilor pentru obținerea unei sensibilități maxime, în dependență de tipul microfirului.

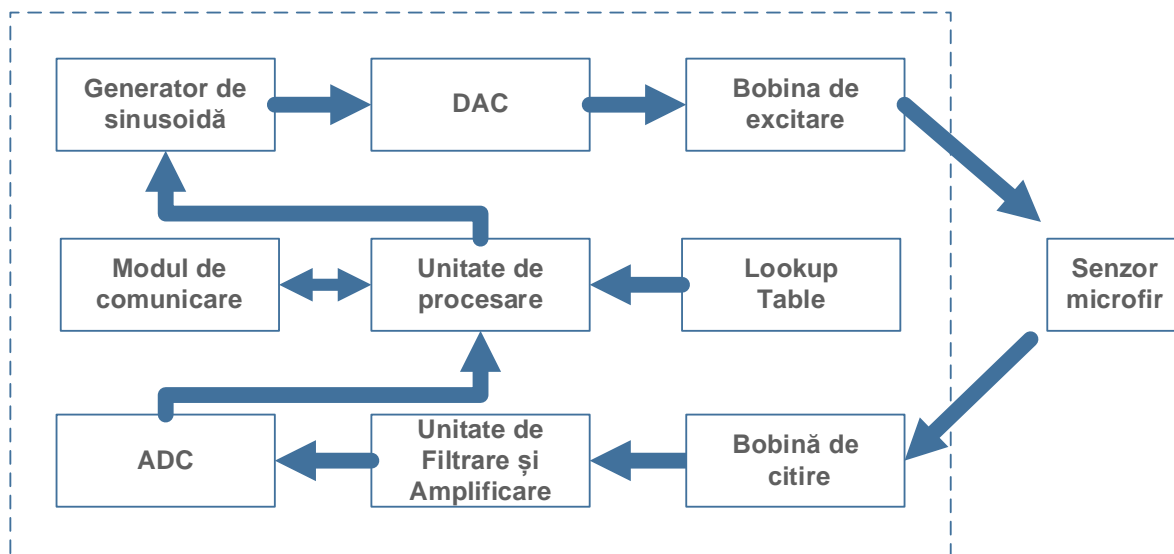


Fig. 2.8. Dispozitiv de calcul la margine pentru măsurarea deformărilor elastice

În dependență de performanțele modulelor HW integrate în microcontroler este de menționat că conversiile digital-analogic și analog-digital pot fi implementate folosind mai multe convertoare sau unul multicanal. Semnalul sinusoidal este amplificat înainte de a fi aplicat la bobină de excitație. Pentru utilizare practică, frecvența undei sinusoidale de ieșire ar trebui să fie de ordinul zecilor de Hz.

Generarea semnalului sinusoidal impune o limitare clară a timpului de citire și analiză a răspunsului sensorului. De fapt, timpul τ necesar pentru a calcula valoarea deformației în funcție de răspunsul sensorului este de aproximativ 100 ms. Într-o configurație experimentală a sensorului de deformare, a fost utilizat un microcontroller din familia STM32F4 pentru crearea dispozitivului de măsurare.

Este necesar de menționat că perechea de bobine de excitație-recepție trebuie să fie situată la o distanță predeterminată de microfirul sensibil. Distanța respectivă nu este foarte restrictivă. Pe de altă parte, distanța dintre bobinele de recepție a excitației și modulul de calcul de margine poate fi de până la sute de milimetri. Acest fapt este important din punct de vedere al realizării fizice și influențează semnificativ algoritmul de calcul a deformației [69, 70].

2.3.3 Algoritmul de calcul la margine a deformărilor elastice

Din punct de vedere a implementării algoritmului de măsurare (Fig. 2.9) s-a acordat o deosebită atenție interacțiunii cu interfețele de intrare/ieșire a bobinelor. Astfel a fost implementat un algoritm de sincronizare între semnalul sinusoidal transmis bobinei de magnetizare (semnalul S_{mr} din Fig. 2.7) și răspunsurile de remagnetizare primite de la microfir.

Pentru generarea semnalului sinusoidal au fost analizate 2 abordări:

1) Folosirea unui LUT care include valorile necesare corespunzător unui semnal sinusoidal;

2) Calcularea interactivă a valorii conform formulei (2.7);

$$A_{(t)} = A_m * \sin(\omega t) \quad (2.7)$$

unde $A_{(t)}$ – amplitudinea semnalului de ieșire, A_m – amplitudinea maximă a semnalului de ieșire al DAC-ului . A 2-a abordare permite flexibilitate în contextul ajustărilor necesare pentru calibrarea dispozitivului sau adaptarea la noi tipuri de microfir. În contextul performanțelor microcontrolerului selectat și a altor limitări de proiect, a fost utilizat un LUT pentru formarea semnalului sinusoidal. Această abordare a permis eliberarea resurselor pentru eșantionarea răspunsului de la ADC citit și procesarea ulterioară.

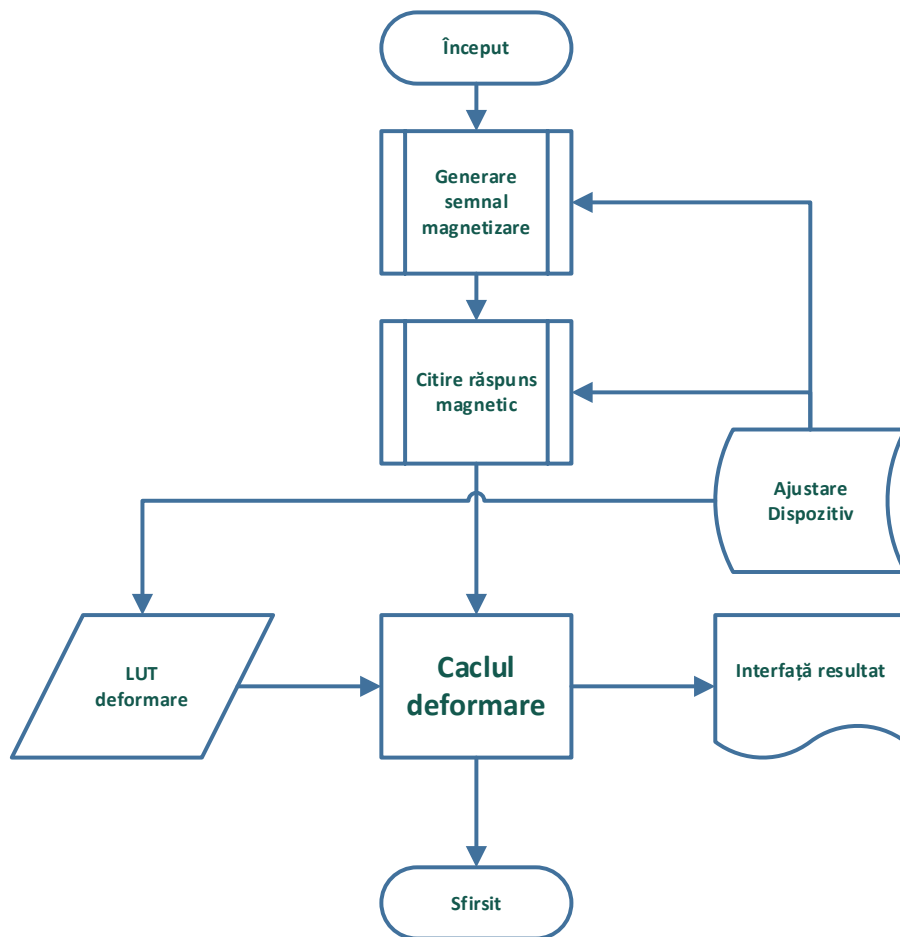


Fig. 2.9. Algoritm de calcul la margine a deformărilor elastice

În continuare pentru calcularea deformării sunt procesate datele obținute timp de o perioadă a semnalului sinusoidal. Această procesare presupune identificarea maximelor răspunsului de remagnetizare (de exemplu impulsurile 2 și 4 din Fig. 2.7). În cazul că impulsurile de remagnetizare în ambele semiperioade nu coincid (ca amplitudine și defazaj), măsurătoarea este invalidată.

La citirea validă a răspunsului de remagnetizare se efectuează calculul deformării elastice conform unui LUT. Ajustarea LUT are loc în procesul de calibrare a dispozitivului final. Această operație este necesară deoarece în contextul stabilității parametrilor microfiredelor produse, integrării microfiredelor în corpul supus deformărilor, montării dispozitivului de scanare pe acest corp, nu este posibilă o configurare a dispozitivului astfel încât deformările elastice să fie transpuse în mărimile fizice măsurate cu o eroare admisibilă.

În unul din prototipurile dispozitivului a fost folosită tehnologia Ethernet pentru interfațare la rezultatele măsurărilor. Această decizie vine din limitările microcontrolerului și obiectivul de bază al prototipului elaborat: o platformă de studiu a caracteristicilor SMF care sunt integrați sau montați pe suprafețele obiectelor supuse deformărilor. Astfel acest dispozitiv efectuează doar măsurarea răspunsului de remagnetizare și efectuează calculele aferente în acest sens. Rezultatele măsurate sunt achiziționate de un calculator care poate fi privit ca o platformă de Cloud Computing.

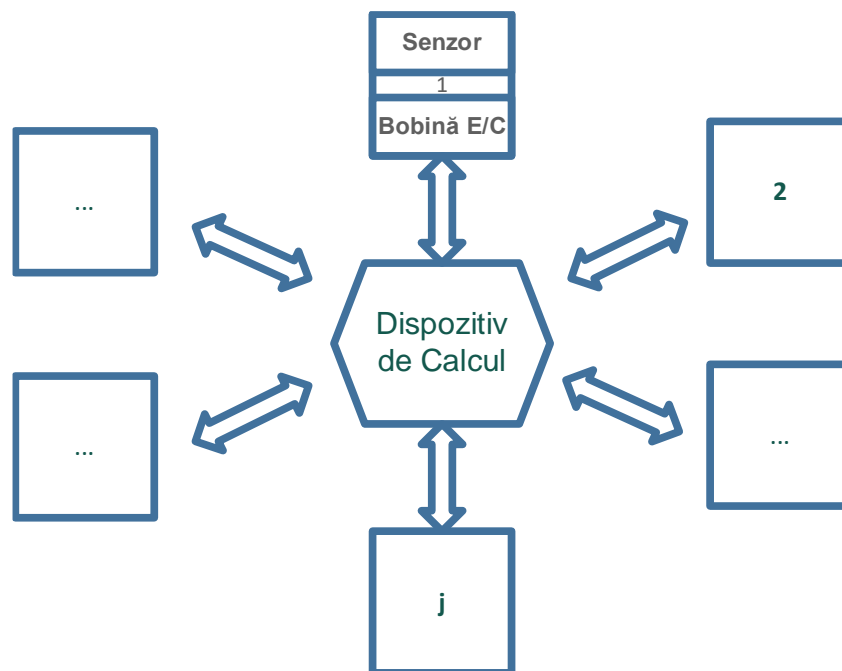


Fig. 2.10. Citirea senzorilor în arhitectură radială

Dispozitivul elaborat pentru măsurarea deformațiilor (Fig. 2.8) este capabil să opereze cu mai mulți senzori implementând o structură radială a sistemelor integrate [71]. Pentru aceasta, în condiții reale este necesar ca în vecinătatea fiecărui SMF să fie amplasată câte o pereche de bobine de excitație și citire (Fig. 2.10). Una din limitările de bază a unei astfel de abordări este distribuția senzorilor față de DCIcMa: Aici sunt critice 2 aspecte:

- 1) interferența între semnalele citite de pe senzori. Este evident că senzorii trebuie amplasați la o distanță suficient de mare de alți senzori astfel încât să nu fie afectate semnale de pe bobinele de citite;
- 2) calitatea semnalelor citite din perspectiva distanței de la senzor până la dispozitiv – este evident că cu cât distanța este mai mare între senzori și dispozitiv, cu atât mai dezavantajos este raportul semnal util față de zgomot.

Totodată pentru o astfel de arhitectură este necesar de considerat și aspectul de timp la scanarea senzorilor:

$$n \leq \frac{T_{window}}{T_{proc}} \quad (2.8)$$

unde n este numărul maxim de senzori care poate fi procesat de către dispozitiv, T_{proc} - este timpul de procesare a unui senzor, T_{window} – este timpul alocat pentru procesarea tuturor SMF.

În cazul în care există limitare de timp la scanarea SMF și/sau intervin restricții de distanță în amplasare a bobinelor conectate la dispozitiv (construcții de dimensiuni mari) este preferențială structura distribuită a dispozitivelor de calcul. Aceasta evident aduce la creșterea costurilor din cauza creșterii numărului de dispozitive de citire, implementării la nivel de sistem a algoritmilor de citire, însă din punct de vedere a simplității instalării dispozitivelor este indiscutabilă utilizarea distribuită a senzorilor. În cazul în care există un număr limitat de puncte de interes pentru măsurarea deformațiilor în vecinătatea dispozitivului, dar cu condiția că se respectă restricția din (2.8), poate fi implementat un sistem mixt: radial/distribuit.

2.4 Dispozitiv de măsurare și control a parametrilor geometrici a microfiredor

Un alt aspect de cercetare ține de caracterizarea microfiredor selectate în cadrul întreprinderii de producere și cercetare "MicorFir Tehnologii Industriale" și analiza calității probelor de microfiredor preparate. În acest scop a fost necesară efectuarea analizei radiografice a mostrelor. A fost efectuată cercetare separată prin măsurarea curbelor m-H pentru câteva probe, care au avut diferențe de performanță în ciuda faptului că erau din același lot de producție.

2.4.1 Măsurări post producere a parametrilor

S-a decis observarea proprietăților magnetice, geometrice și chimice prin utilizarea scanării microscopice electronice (SEM). De asemenea, firele au fost studiate inclusiv cu ajutorul spectroscopiei de raze X cu dispersie energetică și difracția Scatter a electronilor reflectați.

Observațiile microscopice folosind SEM au condus la evidențierea a mai multor factori care pot duce la diferențe de performanță pentru senzorii pe bază de microfibre. Pentru câteva mostre s-ar putea deduce că acoperirea cu sticlă în ceea ce privește miezul său metalic aduce un zgomot mai bun al sensorului. Pentru alte probe s-a observat că circularitatea microfibrelelor, precum și uniformitatea lor în grosimea stratului de sticlă sunt aspecte foarte importante ale distribuției stresului și omogenității aplicate miezului metalic [7].

Rezultatul analizei radiografice a fost că procesul de producție a microfibrelelor bazat pe metoda Taylor-Ulitovskiy ar trebui să se concentreze mai mult pe monitorizarea și controlul parametrilor geometrici. În consecință, rezultatul optimizării producției de microfibre ar trebui să conducă la omogenizarea formei geometrice a microfibrelelor și la stabilitatea acestora în procesul de turnare. Utilizarea unui măsurător a rezistenței liniare a microfibrului (MRLM) în timpul turnării nu este suficientă, având în vedere că acesta asigură doar o precizie de 5 până la 10% cu limite destul de înguste. În plus, MRLM nu poate fi utilizat pentru o gamă largă de diametre a microfibrelelor, și ceea ce este extrem de important, nu este prevăzut pentru măsurarea grosimii învelișului din sticlă al microfibrului. Având în vedere importanța grosimii învelișului de sticlă pentru omogenitatea microfibrului, și totodată absența soluțiilor/dispozitivelor pentru măsurarea grosimii stratului de sticlă, rezultă necesitatea cercetării acestei probleme și propunerea/elaborarea unui cadru tehnic care ar rezolva problema respectivă.

2.4.2 Măsurarea parametrilor în timpul turnării microfibrelelor

În mod tradițional, procesul de turnare a microfibrelelor se bazează pe experiența operatorului și pe capacitatea acestuia de a interfera cu procesul de turnare. Astfel este important să se furnizeze informații utile despre proces, în special atunci când diametrul microfibrului, circularitatea și stratul de sticlă se îngroașă, ceea ce este critic pentru producția de SMF. Doar furnizarea acestor informații în timp util, în timpul turnării poate îmbunătăți calitatea finală a microfibrelelor.

Având în vedere că procesul de turnare în conformitate cu metoda Taylor-Ulitovskiy reprezintă un mediu dificil pentru măsurarea parametrilor geometrici ai microfibrului [72], este necesar să fie proiectată și implementată o abordare specială, folosind calculul la margine. Rezultatul măsurării interactive a parametrilor geometrici ar presupune integrarea operativă în procesul tehnologic de turnare a microfibrelelor a setărilor necesare pentru a menține sau ajusta instalația de turnare a microfibrului fără intervenții majore ale operatorului.

Deoarece procesul de turnare a microfibrelelor reprezintă un prim pas pentru obținerea microfibrelelor cu caracteristici dorite, s-au făcut cercetări în rezultatul cărora a fost propusă o metodă optică [73] și dispozitiv [74] pentru măsurarea online a parametrilor geometrici ai microfibrului

[75]. Metoda și dispozitivul propuse în lucrare pot oferi tehnici avansate pentru monitorizarea procesului de turnare, și anume a diametrului miezului și a grosimii stratului de sticlă [76].

La etapa actuală tehnologia de producere a microfirului a avansat substanțial în contextul progresului microelectronicii, automatizării și roboticii. În contextul extinderii domeniilor de aplicare a microfiredor, inclusiv STeM, se observă o creștere a cererii față de microfiredor, a cerințelor față de parametrii electrici/magnetici și a celor geometrice ai microfirului. Se evidențiază nu doar necesitatea sporirii capacităților de producere, dar și a controlului calității în timpul producerii.

2.4.3 Măsurarea și monitorizarea online a parametrilor microfirului prin metode optice

De obicei microfiredorle sunt caracterizate după producerea lor: se măsoară parametrii magnetici, electrici, diametrul miezului și grosimea învelișului. Diametrul miezului se măsoară prin metode magnetice (cu o eroare semnificativă la diametru mic al microfirului) sau optice. Grosimea învelișului din sticlă, care este un parametru important mai ales pentru SMF, este măsurată doar cu ajutorul microscopului. În acest sens o îmbunătățire semnificativă a procesului de turnare poate aduce un dispozitiv inteligent încorporat utilizând conceptul de măsurare ale diametrului bazat pe transparența microfirului [77].

O soluție convenabilă pentru analiza interactivă ar fi analiza desenului de difracție proiectat de microfiredor pe o matrice fotosensibilă la iluminarea transversală. Un neajuns al acestei metode este faptul că rezoluția matricei fotosensibile depinde direct precizia cu care poate fi măsurat diametrul microfirului, iar mărirea rezoluției matricei aduce la majorarea considerabilă a prețului dispozitivului de măsurare. Însă cel mai mare neajuns al acestei metode este faptul că ea nu oferă soluții veridice pentru a măsura nu doar diametrul miezului, dar și grosimea învelișului din sticlă. În acest context, a devenit oportun identificarea unei metode sau soluții tehnice care ar face posibilă și măsurarea grosimii învelișului din sticlă în dinamică, adică în timpul „tragerii” microfirului.

Se cunoaște că coeficientul de transparență al sticlei depinde de lungimea de undă a luminii (Fig. 2.11). De exemplu pentru ultravioletul îndepărtat (diapazonul C), transparența sticlei este cu câteva ordine mai mică de cât pentru domeniul vizibil al luminii.

Prin urmare, pentru măsurarea grosimii învelișului din sticlă al microfirului poate fi folosit fenomenul de transparență optică a sticlei la lumină ultravioletă.

Microfirele produse au ca regulă un diametru total cuprins între 5 și 50 μm . Este evident că astfel de dimensiuni pot fi măsurate doar cu ajutorul unui microscop sau proiectând imaginea microfirului pe o matrice fotosensibilă de rezoluție mare. Pentru controlul interactiv al parametrilor geometrici ai microfiredor este necesară utilizarea unui soft specializat capabil de calcularea diametrului microfirului și grosimea învelișului, utilizând imaginile majorate optic. Pentru majorarea optică a imaginii este necesar ca microfirul să fie bine localizat în timpul fotografierii – un lucru greu de realizat în timpul producerii.

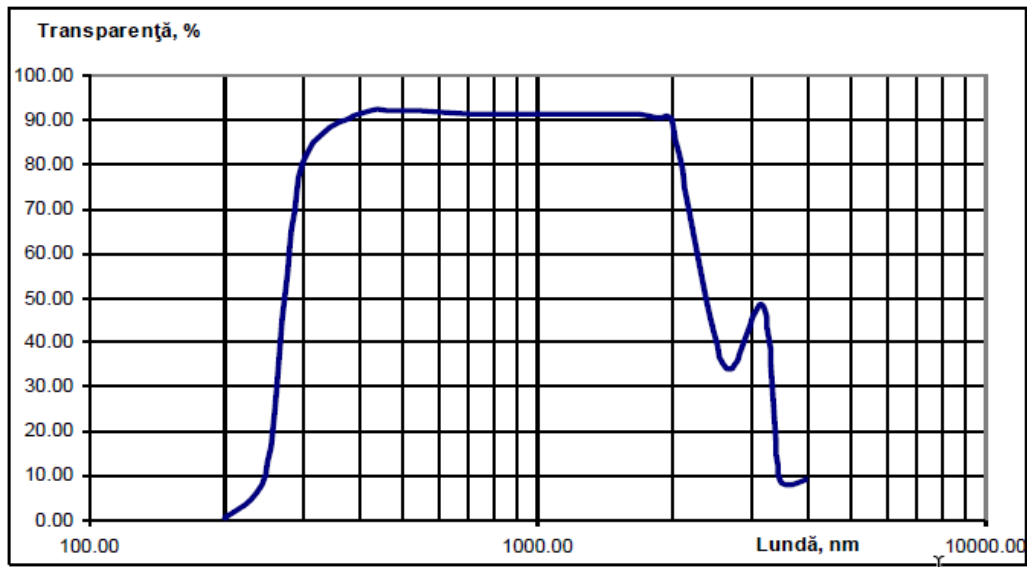


Fig. 2.11. Transparența sticlei în funcție de lungimea de undă a luminii

Deci metoda de măsurare trebuie:

- să presupună faptul că microfirul nu se află într-o poziție bine fixată;
- să poată măsura diametrul miezului microfirului și grosimea învelișului din sticlă;
- să ofere în regim interactiv valorile măsurate ale diametrului.

Însăși dispozitivul de măsurare, și anume sistemul optic de măsurare trebuie să satisfacă anumite condiții pentru a fi integrat în instalația de producere a microfirului:

- fiabilitate înaltă;
- acces pentru deservire și ajustare;
- comoditate în exploatare;

Reieșind din condițiile tehnice, obiectivele propuse și metodele de implementare am realizat un *Ansamblu de Colimare*, care se încadrează perfect în metoda elaborată.

Ansamblul de colimare include următoarele părți distincte:

- emițătorul de lumină (*I* din Fig. 2.12), care radiază în domeniul vizibil sau ultraviolet. În calitate de emițători sunt utilizați LED-uri și laseri. Dacă emițătorii de lumină vizibilă sunt accesibili (pe piață la preț rezonabil), chiar și laseri, atunci emițătorii ultravioletă sunt mai

scumpi, iar laserii în genere lipsesc pe piață. Contextul disponibilității reduse este și procesul tehnologic de fabricare foarte scump. Eficiența cuantică interioară și exterioară este foarte mică, fapt care condiționează semnificativ puterea optică de ieșire în comparație cu diodele luminescente în domeniul roșu;

- lentilă colimatoare (3 din Fig. 2.12) și focalizatoare (4 din Fig. 2.12). Pentru a măsura învelișul din sticlă precis este necesar ca fluxul de lumină emis să fie colimat, iar după atenuare de microfibr să fie, după necesitate, focalizat pe foto-senzor;
- foto-senzor (5 din Fig. 2.12). În dependență de lungimea de undă a fluxului emis poate fi selectat foto-senzorul.
- obturator optic (2 din Fig. 2.12). Acest element poate avea formă dreptunghiulară sau ovală, astfel încât poziția unghiulară a axei sale față de axa miezului microfibrului determină rata absorbției fluxului optic de către microfibr.

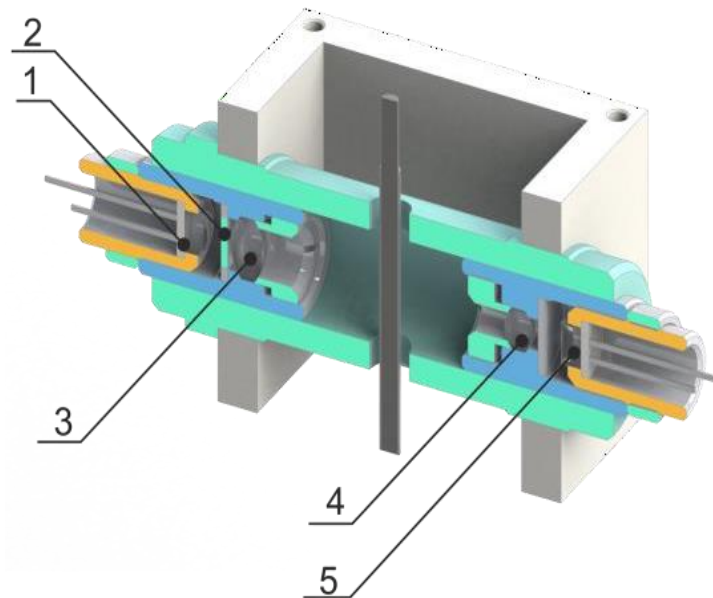


Fig. 2.12. Ansamblu de colimare

Ansamblul de colimare reprezintă un element de caracterizare calitativă a microfibrului, dar împreună cu alte ansambluri de colimare și un sistem electronic de comandă și captare a datelor face posibilă și caracterizarea cantitativă a microfibrului, adică măsurarea diametrului miezului metalic și a învelișului din sticlă.

Ansamblurile de colimare funcționează în modul următor: Fluxul de lumină emis de către emițătorul de lumină (1 din Fig. 2.12) este colimat de lentilă (3 din Fig. 2.12) pentru a obține un flux de lumină paralel. Pentru a avea o precizie mai mare a măsurărilor este necesar ca intensitatea fluxului optic incident pe microfibr, emis de către emițătorul ansamblului de colimare, să fie de o valoare cât mai mare. Pentru aceasta este necesar ca focarul lentilei să fie la o distanță cât mai mică de lentilă, astfel încât obturatorul optic să fie plasat între ele.

Plasarea obturatorului optic între emițător și colimator este necesară pentru a ridica fiabilitatea sistemului optic la particule de praf. Colimatorul, fiind astfel asamblat, necesită doar curățirea lentilelor (după caz). În același timp deteriorarea involuntară a obturatorului în timpul curățirii este evitată.

Metoda de măsurare descrisă propune ca microfirul să intersecteze fasciculele de lumină astfel încât atenuarea și împrăștierea luminii să atingă valori maxime. Axele formei fasciculului de lumină trebuie să fie perpendiculare între ele (Fig. 2.13).

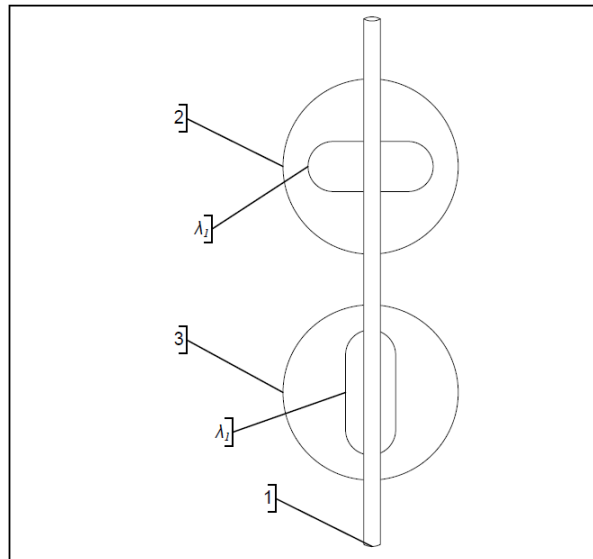


Fig. 2.13. Forma fascicolului de lumină și poziția microfirului

După cum am menționat, obturatorul poate fi de formă ovală sau dreptunghiulară, cu o lățime mai mare de cât diametrul microfirului măsurat. Construcția sistemului optic (din ansambluri de colimare) trebuie să permită atenuare maximă a fluxului de lumină emis (λ_1 din Fig. 2.13) de către emițătoarele optice, în cazul în care coincide axa obturatorului cu axa microfirului emis (I din Fig. 2.13). În același timp, dacă pentru ansamblul de colimare adiacent, axa obturatorului este perpendiculară față de axa microfirului, iar atenuarea fluxului optic trebuie să fie diferită de zero, dar comparabilă cu atenuarea în cazul coincidenței axelor.

O pereche de grupuri de colimare de orientate perpendiculară trebuie să fie identică, ceea ce presupune că lungimea de undă a emițătorilor de lumină, intensitatea luminii emise, forma luminii, calitatea colimării, focalizarea luminii și sensibilitatea spectrală a fotodetectorilor trebuie să fie absolut identici. Este evident că repetabilitatea construirii unui astfel de ansamblu reprezintă o dificultate. Posibilitatea efectuării ajustărilor mecanice este foarte dificilă.

Conform metodei construcției ansamblului de colimare, putem identifica suprafața fluxului de lumină proiectate pe microfir conform formulei:

$$S_{\lambda_1} = H * W \quad (2.9)$$

unde: H – este lungimea cadrului de formare a fluxului de lumină proiectat, W – lățimea cadrului.

În mod normal, dacă nu sunt bariere de lumină în interiorul grupului de colimare (2 și 3 din Fig. 2.13), fotodectoarele lor ar furniza aceleași valoare a semnalului:

$$I_{\lambda 11} = I_{\lambda 12} \quad (2.10)$$

unde $I_{\lambda 11}$ și $I_{\lambda 12}$, sunt valorile semnalului de ieșire pentru grupul de colimare 1 și, respectiv 2 (Fig. 2.14). Grupurile de colimare folosesc emițători de lumină cu aceeași lungime de undă $\lambda 1$.

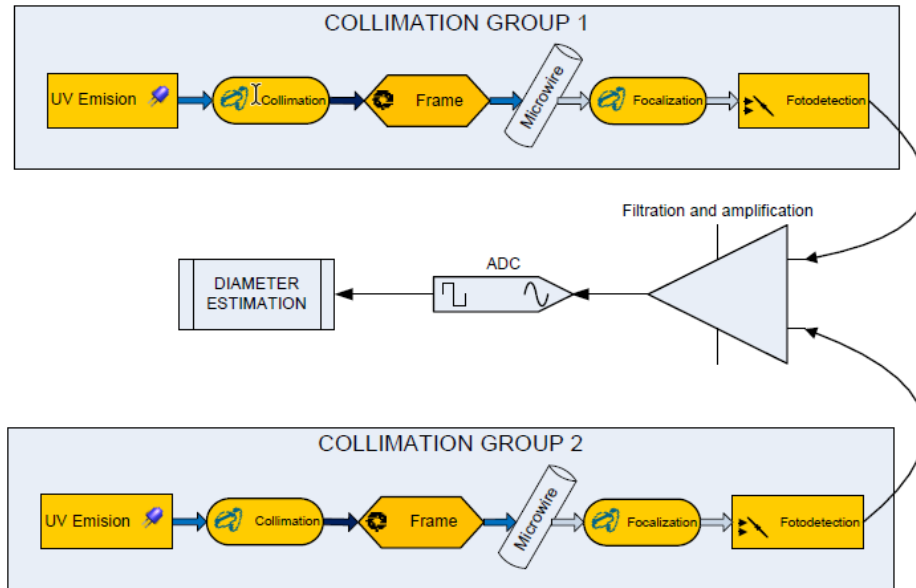


Fig. 2.14. Măsurarea semnalului utilizând ansamblurile de colimare

Cadrul de formare a spotului de lumină pentru grupul de colimare 1 (Fig. 2.14) este prezentat în Fig. 2.13 de componenta 2. Valoarea semnalului de ieșire este:

$$I_{\lambda 11} = \kappa * \Phi_{\lambda 1} * [(H * W) - (H * d)] \quad (2.11)$$

unde κ – constantă, care reprezintă rata de conversie a energiei luminoase în semnal electric, d – diametrul microfirului. Valoarea semnalului de ieșire poate fi reprezentată și ca:

$$I_{\lambda 11} = K_{\lambda 1} * H * [W - d] \quad (2.12)$$

Rata de conversie pentru fluxul de lumină al grupului de colimare este $K_{\lambda 1}$ și este aceeași pentru „grupul de colimare 2”. Cadrul de formare a spotului de lumină al „grupului de colimare 2” este reprezentat de componenta 3 din Fig. 2.13. Valoarea semnalului de ieșire pentru „grupul de colimare 2” este:

$$I_{\lambda 12} = K_{\lambda 1} * \Omega * [H - d] \quad (2.13)$$

Odată ce grupurile de colimare au aceeași rată de conversie a semnalului optic în electric generate de fotodectoare, ele pot fi descrise prin proporționa între (2.12) și (2.13):

$$I_{\lambda 12} / (W * [H - d]) = I_{\lambda 11} / (H * [W - d]) \quad (2.14)$$

În continuare expresia (2.14) poate fi scrisă ca:

$$I_{\lambda 12} / (W * [H - d]) = I_{\lambda 11} / (H * [W - d]) \quad (2.15)$$

Pentru a asigura o rată cât mai bună a semnalului util, cadrul de formare a spotului de lumină trebuie să fie cât mai îngust, comparabil cu diametrul microfirului. În acest context înălțimea cadrului este cu mult mai mare decât lățimea, și respectiv:

$$[H - d] \approx H \quad (2.16)$$

Prin urmare diametrul poate fi calculat prin substituirea (2.16) în (2.15):

$$d = W * [1 - I_{\lambda 11} / I_{\lambda 12}] \quad (2.17)$$

Conform metodei valorile semnalului de ieșire $I_{\lambda 11}$ și $I_{\lambda 12}$ sunt preamplificate. Semnalele sunt aplicate la intrările unui amplificator diferențial după preamplificare. Semnalul de ieșire al amplificatorului diferențial reprezintă rata amplificată ($I_{\lambda 11} / I_{\lambda 12}$). Odată convertită la o valoare digitală, valoarea semnalului poate fi inserată în expresia (2.17) pentru estimarea diametrului microfirului.

Pentru ansamblurile de colimare care au surse de lumină cu lungimea de undă $\lambda 1 = 550nm$ este posibilă estimarea diametrului miezului microfirului. În mod similar pentru măsurarea diametrului microfirului cu tot cu înveliș, în ansamblurile de colimare sunt utilizate emițătoare de lumină lungimea de undă $\lambda 2 = 260nm$.

2.5 Platforme și mecanisme de măsurare a parametrilor geometrici a microfiredor

Pentru măsurarea diametrului miezului și a grosimii microfirului a fost implementat prototipul platformei de măsurare conform metodei brevetate [73]. Platforma a fost proiectată astfel încât poate fi montată în instalația de turnare a microfiredorului.

Operatorul poate porni procesul de turnare a microfiredorului cu ușurință: nu este necesară vreo operație adițională de complexitate medie sau ridicată, este doar necesar ca microfiredorul (I din Fig. 2.15) să fie instalat în canalul de stabilizare a microfiredorului. Pe platformă sunt instalate ansamblurile de colimare pentru măsurare a diametrului microfiredorului (2 și 3 din Fig. 2.15) și ansamblurile de colimare pentru măsurarea diametrului miezului microfiredorului (3 și 4 din Fig. 2.15).

Mediul în care se află microfiredorul în procesul de turnare are un anumit grade de instabilitate care poate provoca abaterea microfiredorului din spotul de lumină a ansamblului de colimare. Acest fenomen este unul ordinar însă poate diminua semnificativ rezultatele calculării parametrilor geometrici a microfiredorului turnat.

În acest context devine necesară considerarea unui șir de măsuri de îmbunătățire, cu atât mai mult că în perioada recentă a devenit accesibilă o bază de elemente microelectronice cu

performanțe ridicare. O primă soluție de îmbunătățire este montarea pe platforma de colimare a unui ansamblu de stabilizare și orientare a microfirului în zona spoturilor de lumină ale ansamblurilor de colimare.

O măsură de îmbunătățire este îngustarea cadrului de formare a fluxului de lumină. Astfel se poate obține un raport mai bun a semnalului util față de zgomot. Însă vibrațiile microfirului în procesul de turnare aduce la abaterea zonală a microfirului din regiunea spotului de lumină și ca rezultat la incapacitate de a măsura corect. Ca soluție de rezolvare a acestei probleme este rotirea ansamblurilor de colimare cu aproximativ 10^0 , astfel ambele ansambluri de colimare setate pentru măsurarea unui parametru geometric vor acoperi microfirul.

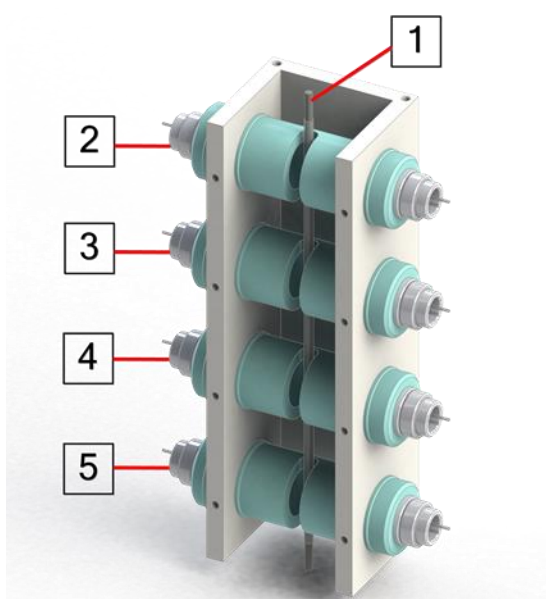


Fig. 2.15. Platformă de colimare

Această îmbunătățire de re poziționare unghiulară aduce la necesitatea adaptării formulei de calcul **Error! Reference source not found.** Un alt efect care limitează aplicabilitatea și precizia metodei descrise este difracția luminii care trebuie considerat la aplicarea metodei descrise. În acest sens, cu cât diametrul microfirului este mai mic, cu atât mai mică este și precizia de măsurare.

Există alți factori secundari care pot afecta metoda de măsurare, cum ar fi: diametrul miezului (care modelează procesul de difracție), aliajele utilizate pentru turnare (influențează dispersia luminii), tipul și grosimea învelișului de sticlă. Toți acești factori, în contextului metodei implementate, afectează semnificativ rezultatul final al măsurărilor. Ca consecință o mai bună abordare este implementare unui algoritm de estimare a valorilor măsurate în baza unui LUT, utilizând date statistice evaluate după procesul de turnare.

Se poate de afirmat că metoda propusă este suficient de precisă pentru diametre mari ale miezului microfirului și a stratului gros de sticlă ($>20\mu m$). Pentru astfel de microfibre, procesul de turnare este suficient de precis pentru a asigura o uniformitate circulară a miezului și calitate a stratului de sticlă.

În timpul bobinării, microfirul nu are o poziție strictă în spațiu și ca urmare microfirul poate atinge marginea sau poate să se abată din fasciculul laser și senzorul de lumină, chiar dacă au fost folosite ansambluri de centrare. Acest lucru duce la neconcordanțe sau la măsurători eșuate ale microfirului. O soluție pentru această problemă ar fi remodelarea fasciculului laser, dar pentru microfibre mai mici, dar astfel, sensibilitatea este afectată datorită efectului de difracție pe defectele microfirului sau învelișului de sticlă.

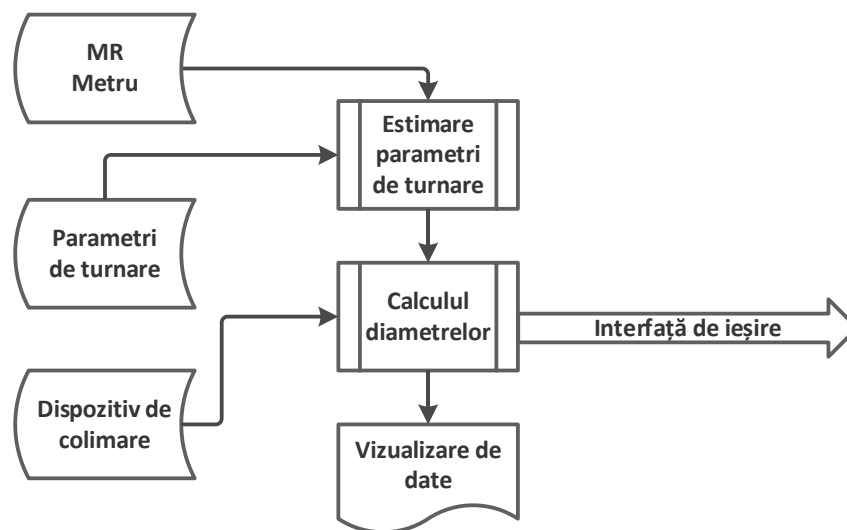


Fig. 2.16. Măsurarea microfirului în procesul de turnare

Având în vedere condițiile dure ale turnării și solicitările speciale de producere a microfibrele pentru senzorii de măsurare a tensiunii, s-a dezvoltat un nou dispozitiv (Fig. 2.16), care implementează unele caracteristici ale metodei de măsurare propuse [77].

Noul concept ar trebui să fie capabil să măsoare diametrul pentru o gamă largă de dimensiuni a microfibrele. Cele mai problematice sunt microfibrele mici. Pentru aceste tipuri de microfibre sunt necesare scanere liniare cu sensibilitate corespunzătoare în spectrul ultraviolet și vizibil. Similar cu metoda propusă și descrisă în paragraful precedent, scannerul liniar înlocuiește fotodetectorul. Este posibil ca scannerul liniar să necesite unele ajustări din fabrică sau în timpul turnării.

Conform noii metode [70], diametrul microfirului poate fi calculat în funcție de expresia:

$$D = (N_{sh} + N_{hsh} \delta_m) K_s \quad (2.18)$$

Această expresie (2.18) ia în considerare dimensiunea liniară medie a diametrului microfirului calculată prin utilizarea scannerului liniar. Dimensiunea liniară măsurată este una calculată, pentru ambele scanere liniare pe care microfirul este proiectat de un fascicul laser. Principalul argument pentru calcularea expresiei (2.18) este N_{sh} , dimensiunea liniară a pixelilor umbriți de către microfir – proiecția microfirului pe scanner.

În funcție de dimensiunea microfirului, umbra proiectată poate fi dispersată, în special pe scannerul aliniat cu direcția de bobinare a microfirului. Scopul inițial al acestui grup de colimare a fost de a furniza un semnal de referință pentru măsurarea diametrului. Dar cu cât mai mică este dimensiunea microfirului, cu atât mai mare este probabilitatea ca microfirul să se abată de la fasciculul acestui grup de colimare, ceea ce duce la măsurători eronate. După cum s-a menționat anterior această problemă poate fi rezolvată prin deplasarea unghiulară a ansamblului față de microfir, ce aduce la scăderea calității semnalului de referință.

Pentru a îmbunătăți măsurarea semnalului microfirului aliniat la fascicul, s-a decis utilizarea unui scanner liniar cu sensibilitate îmbunătățită în o gama largă a spectrului. Această soluție poate oferi diagnosticarea stării de măsurare prin verificarea dacă proiecția microfirului este inclusă în zona scanată. Dar, în special pentru acest grup de colimare, efectul de umbrire este mai pronunțat, iar datele eșantionate pentru pixelii semi-umbrit pot duce la îmbunătățirea măsurării prin includerea acestora în expresia de calcul ca N_{hsh} . Deoarece N_{hsh} nu reprezintă o valoare strictă, trebuie aplicat un factor de amplificare - δ_m . Factorul de amplificare corespunzător poate fi derivat din rezultatele măsurării diametrului cu ajutorul MRLM-metrului (Fig. 2.16) în timpul turnării.

Eșantionarea utilizând scanerele liniare este suficient de rapidă, dar pentru îmbunătățirea rezultatelor măsurate, pentru a obține o imagine mai precisă, trebuie mărit contrastul. Creșterea contrastului trebuie să fie efectuat de software, cu ajutorul un filtru de imagine digitală, care ca consecință va duce la un răspuns întârziat al măsurătorii. De asemenea, în funcție de poziția microfirului ca urmare a bobinării, în mod natural se generează un zgomot în semnalul filtrat. Acest zgomot (K_s) poate fi inclus ca factor de atenuare în formula de calcul (2.19).

$$K_s = f(V, A) = k_v V + A \quad (2.19)$$

unde V este viteza liniară de bobinare, A – reprezintă un set de factori de mediu care reflectă lumina din mediu, temperatura mediului etc.

Dispozitivul de măsurare a diametrului microfirului (Fig. 2.16) încorporează multe componente hardware și sisteme autonome. Componentul cheie este ansamblul de colimare care, conform metodei [76] , are cel puțin două grupuri de colimare care utilizează lasere în spectrul

vizibil ($\sim 700nm$) și două grupuri de colimare care utilizează emițătoare de lumină ultravioletă [$200nm:400nm$].

Asamblarea grupului de colimare este un proces complicat care necesită alinierea mai multor componente (lentilă, senzor, laser) și poziționarea sa aliniată cu zona de bobinare a microfirului. Rezultatul alinierii nu este perfect și necesită post-ajustări care pot fi efectuate digital. Ca rezultat, un ansamblu de colimare trebuie să reprezinte un dispozitiv integrat cu capacități de ajustare în dependență de rezultatul asamblării și medul de turnare a microfirului. De aceea dispozitivul de măsurare a diametrului microfirului trebuie să fie dotat cu interfețe pentru ajustările necesare în timpul turnării și trebuie să fie capabil să ofere rezultatele identificării N_{sh} și N_{hsh} .

De asemenea un aspect important al N_{hsh} și K_s ține de conectarea la instalația de turnare a microfirului și respectiv a dispozitivului MRLM. Măsurările necesare și calculele sunt efectuate de instalația de turnare, care poate fi definit ca un dispozitiv de calcul la margine, la fel ca și dispozitivul de calculare a diametrului.

2.6 Concluzii la capitolul 2

În rezultatul cercetărilor efectuate, a fost propusă și elaborată o nouă metodă pentru construirea dispozitivelor de măsurare/monitorizare a deformării pe bază de microfibre cu înveliș din sticlă cu magnetostricție pozitivă cu lungimea de $30-50mm$. Metoda propusă permite elaborarea dispozitivelor la margine cu senzori în baza microfirului cu înveliș din sticlă, care permite măsurarea/monitorizarea fără contact a unor mărimi precum deformațiile corpurilor solide supuse la întindere, inclusiv a celor ireversibile. Abordarea propusă în acest capitol asigură creșterea semnificativă a distanței de detectare/măsurare, până la $10-15mm$, toleranță la poziționarea detectorului față de senzorul propriu-zis, toleranță la temperatură. În context a fost elaborată structura unui dispozitiv de calcul încorporat, cuplat cu senzori pe bază de microfir cu rezistența la rupere prin tracțiune de până la sute de MPa, pentru dezvoltarea aplicațiilor specifice în domeniul internetului industrial al lucrurilor IIoT sau internetului energiei IoE.

Totodată, în urma unor cercetări experimental-tehnologice, inclusiv identificarea procesului de prelucrare termomecanică a microfibrelelor s-a stabilit îmbunătățirea semnificativă a sensibilității dispozitivului cu senzor propus în lucrare.

Indirect, conform rezultatelor preliminare expuse în paragraful 2.1, a fost confirmat faptul că geometria microfibrelelor și calitatea lor au un impact semnificativ asupra caracteristicilor senzorilor fabricați. Pentru îmbunătățirea procesului tehnologic de turnare a microfibrelelor și a calității lor, a fost propusă o metodă originală și un dispozitiv optoelectronic de măsurare a parametrilor geometrici ai microfibrelelor, iar rezultatele au fost apreciate la diverse saloane

internaționale de invenție [78, 79, 80, 81]. În cazul măsurării/monitorizării grosimii învelișului din sticlă metoda propusă este unică și poate fi utilizată pentru asigurarea omogenității firului - caracteristică esențială în fabricarea senzorilor de performanță pe bază de microfir.

3. ELABORAREA MODELELOR PENTRU MENTENANȚĂ PREDICTIVĂ ÎN IOE

3.1 Studiu de caz introductiv

După cum s-a menționat în capitolul 2, domeniul de aplicare al SMF se referă la deformațiile elastice ale corpurilor din plastic sau compozit. Un domeniu specific de aplicare sunt vasele sub presiune înaltă. Un vas sub presiune este un recipient închis conceput pentru a reține gaze sau lichide la o presiune substanțial diferită de presiunea ambientală. Vasele sub presiune din industrie utilizate ca recipiente sub presiune etanșe, de obicei sunt de formă cilindrică sau sferică, cu diferite configurații ale capului. De obicei acestea sunt realizate din fontă sau inox și asamblate prin sudură, și chiar dacă are o multitudine de performanțe, acest tip de vase are un raport mare a greutății față de rezistență și proprietăți corozive. Din acest motiv ele nu sunt preferate în industria aerospațială, a petrolului și gazelor. O alternativă acceptabilă sunt vasele din materiale compozite.

Compozitele constau din două sau mai multe materiale și, macroscopic, în funcție de combinația și șirul de materiale, acestea au o caracteristică mecanică anizotropă. În special, un material compozit este compus din fibra care primește sarcina primară și matricea care joacă un rol în transmiterea sarcinii și menține forma. Materialul compozit are o rigiditate și o rezistență specifică mai mare decât materialele convenționale, cum ar fi plasticul și metalul. Din acest motiv, are o eficiență structurală ridicată. Prin urmare, acestea sunt aplicate în mai multe structuri de proiectare.

Recipientele sub presiune compozite cilindrice se constituie din o căptușeală internă metalică, o bobină de filament și o carcasă exterioară compozită, așa cum se arată în Fig. 3.1. Căptușeala metalică este necesară pentru a preveni scurgerile, în timp ce unele dintre căptușelile metalice oferă, de asemenea, rezistență pentru a distribui presiunea internă. Pentru vasele



Fig. 3.1. Exemplu de vas sub presiune cu filament și carcasă din compozit [82]

compozite sub presiune, cea mai mare parte a sarcinii aplicate este suportată de straturile exterioare puternice din material compozit înfășurat cu filament.

Deoarece vasele din compozit au o structură complexă, respectiv și procesele fizice care se desfășoară în aceste vase sub acțiunea presiunii au la fel un caracter complex. Ca consecință devine imperativă caracterizarea proceselor pentru a identifica condițiile și limitările acestor tipuri de vase. O metodă eficientă de caracterizare este modelarea numerică cu ajutorul ANSYS. Conform modelărilor efectuate în [82] s-au obținut deformări elastice echivalente de până la 460MPa (Fig. 3.2).

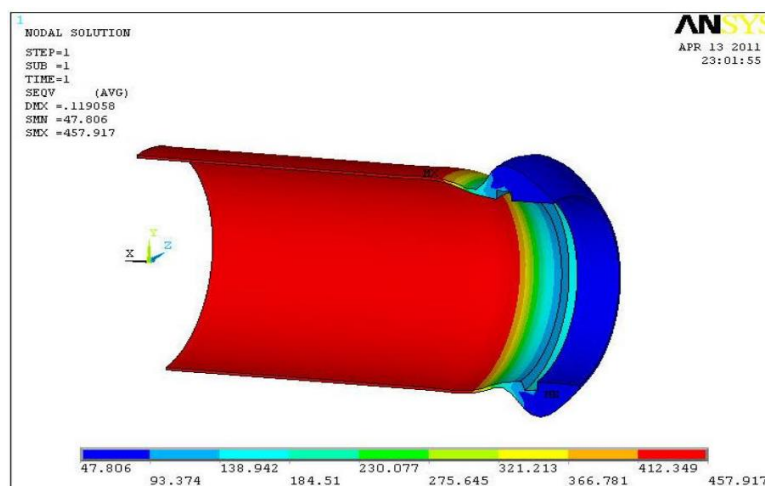


Fig. 3.2. Diagrama deformațiilor echivalente pentru recipientul din oțel (MPa) [82]

Pentru astfel de condiții de exploatare pretează utilizarea SMF expuse în capitolul 2. SMF pot fi impregnate în căptușeala vasului care are grosime de până la 10mm. În dependență de tipul și rezultatele prelabile ale modelărilor numerice pot fi utilizate mai multe SMF plasate în diferite regiuni ale vaselor. Pentru astfel de aplicații este importantă detectarea regimurilor critice de deformare ale vaselor. Considerând că condițiile de temperatură sunt stabile sau accesul la zona instalării SMF nu prezintă o dificultate, nu este necesară utilizarea unui microfibr de referință. În acest context este posibilă utilizarea dispozitivului din Fig. 2.8 cu simplificarea algoritmului de calcul astfel încât să fie considerat doar semnalul util al firului sensibil (Fig. 2.7).

Dacă ne referim la recipiente din compozit de înaltă presiune, ca regulă sunt utilizate în condiții de exploatare moderate după intensitatea și duritatea factorilor externi care ar afecta integritatea lor. Însă în alte domenii, materialele din compozit, părțile componente sau structura lor sunt afectate de sarcini mecanice externe, vibrații, variații ale condițiilor de mediu, care pot duce la o degradare majoră a integrității structurii sau a performanțelor de lucru [83].

În acest sens un exemplu de utilizare a materialelor din compozit în condiții dure, care variază în timp, sunt palele turbinelor eoliene. Problemele aferente integrității paletelor turbinelor eoliene și degradării lor [84] iau amploare în contextul dezvoltării domeniului de energie

regenerabilă. Acest domeniu este în continuă cercetare, iar dezvoltarea sa scot în evidență noi abordări pentru o utilizare mai mare a fermelor de turbine eoliene datorită cererii de energie în creștere la nivel mondial. După cum se știe, inițial scopul a fost utilizarea energiei regenerabile pentru a reduce efectele schimbărilor climatice și ale încălzirii globale, care deveniseră o tendință. Cu toate acestea, unul dintre principalii factori în creșterea cererii de energie regenerabilă este lipsa surselor alternative de energie, având în vedere criza energetică din Europa din cauza ultimelor evenimente.

Din statisticile cunoscute [85] se poate concluziona următoarele:

- cel puțin 62,9% din toate cauzele defecțiunilor sunt moduri interne de defecțiuni legate de inginerie, în timp ce restul se datorează efectelor externe, în principal legate de vreme;
- aproximativ 82,5% din întreaga activitate de întreținere este legată de hardware și astfel înseamnă că un echipaj de întreținere trebuie să se deplaseze la fabrică pentru a remedia problema. Acest lucru este deosebit de problematic atunci când centrala electrică este offshore;
- în medie, o defecțiune va apărea o dată pe an pentru WT cu mai puțin de 500 kW, de două ori pe an pentru WT între 500 și 999 kW și de 3,5 ori pe an pentru WT cu o putere mai mare de 1 MW;

În contextul statisticilor expuse este necesar de menționat că fiabilitatea palelor este vitală în funcționarea și întreținerea unei turbine eoliene. De fapt, palele rotorului turbinei reprezintă una dintre părțile cel mai greu de monitorizat. La zi, una din soluțiile mai populare pentru monitorizarea stării palelor rotorului, este utilizarea senzorilor de vibrații [86, 87, 88, 89, 90, 62], montați pe fiecare pală. Analiza vibrațiilor este ca regulă prezentată ca cea mai informativă metodă de monitorizare a stării, în special pentru echipamentele rotative, deoarece vibrațiile produse nu sunt specifice echipamentelor și pot fi ușor identificate. O turbină eoliană nouă, ca regulă, are asociate vibrații relativ netede, fără maxime pronunțate, în timpul funcționării normale. Dar pe măsură ce degradează sau se uzează, în turbina vor fi afectate caracteristicile semnalului de vibrație.

Integritatea turbinei poate fi evaluată prin compararea detaliată a spectrelor de vibrații noi și vechi, ceea ce presupune o aliniere a semnalelor la zi cu cele inițiale la finisarea producerii. Deoarece punctele mici deteriorate pe suprafața palei nu provoacă modificări semnificative în cursul rotației sau în comportamentul aerodinamic, rezultă că în spectrul de zgomot nu există indicii asupra vreunui punct de deteriorare situat în zona palelor rotorului. În cele mai multe cazuri, deteriorările cardinale aduc la semnalarea deteriorării, fără a da vreo metrică în amploarea deteriorării.

Măsurarea deformării este o tehnică comună [62] și calculează stresul mecanic, de exemplu în palele turbinei. În calitate de senzori ca regulă se propun spre utilizare senzori de tip rezistiv, cel mai des bazate pe aliaj de constantan. În pofida disponibilității și costului redus, trebuie remarcat că STeM tip rezistiv au un șir de dezavantaje, printre care coeficient de sensibilitate redus.

Un alt dezavantaj major al acestui tip de senzor este metoda de utilizare. STeM sunt montați pe pală și astfel nu reflectă în totalitate tensiunile elastice cărora le sunt supuse palele. Un alt dezavantaj în acest sens este și expunerea senzorului la condiții de exploatare mai dure fiind expus în mediu. O soluție ar fi integrarea STeM în structura compozitului, însă cablarea spre acest senzor ar aduce la complicarea semnificativă a procesului tehnologic de producere a palei.

Având în vedere importanța extremă a fiabilității palelor turbinei eoliene, este foarte important să se studieze și să se propună noi soluții pentru monitorizarea fără contact a stării acestora, prin integrarea senzorilor în structura palei. În continuare, această problemă este abordată din perspectiva utilizării unor senzori de deformare pe bază de microfibre cu magnetostricție pozitivă.

După cum este cunoscut, un sistem de monitorizare inteligentă a stării turbinei implică achiziția, procesarea, analiza și interpretarea datelor. Adicional, un astfel de sistem trebuie să poată extrage informații relevante din datele colectate și să ia decizii credibile. În acest context, tehnicile de învățare automată pot fi interpretate ca instrumente de predicție și luare a deciziilor bazate pe date. Totodată, pentru un sistem de măsurare este importantă achiziționarea datelor în timp real, procesarea și distribuirea spre observator sau unui centru de control.

Scopul unui astfel de sistem este monitorizarea în special a palelor turbinelor eoliene, iar achiziția de date trebuie să includă măsurarea a diverși parametri de interes, și în special deformarea palelor (Fig. 3.3).

Datele colectate sunt necesare, dar pot fi insuficiente pentru un proces de luare a deciziilor eficient sau corect. Din acest motiv, putem considera că procesul decizional este activat, dar nu gestionat de informațiile colectate. În consecință, cunoașterea procesului decizional este de o importanță esențială. Acest lucru se datorează faptului că calitatea slabă a informațiilor poate duce la decizii greșite. Datele colectate trebuie să includă elementele de informare necesare pentru monitorizarea stării și pentru luarea deciziilor corecte. Din această cauză, trebuie luate în considerare atât calitatea informației semantice cât și calitatea informațiilor pragmatice [91].

Un exemplu funcțional a acestei paradigme este o invenție [88] care își găsește implementare prin soluția furnizată de Sensoria™ [89]. Soluția este de fapt un SHM al palelor rotorului care detectează și raportează defecte în timp real, inclusiv fisuri, lovituri de fulgere, rupturi ale învelișului și perforații (inclusiv cele cauzate de eroziunea în regiunea de vârf),

delaminare și multe altele [92]. Prin trimiterea imediată de alerte despre defecte către operatori, sistemul le permite să maximizeze timpul de funcționare a palelor și totodată capacitatea de generare a energiei, prevenind în același timp agravarea daunelor.

Pe parcurs au fost analizate criteriile de calitate pragmatice și semantice pentru a sintetiza lista completă de date necesare pentru a construi un sistem inteligent de monitorizare a stării palelor turbinei. În rezultatul studiului efectuat am identificat următoarele criterii pragmatice importante: actualitatea, relevanța și suficiența. Este evident că datele sau informațiile citite la momentul nepotrivit nu au nicio valoare sau chiar pot aduce la decizii greșite. Deci este necesar să se ia în considerare și criteriile semantice precum intersubiectivitatea (datele obținute trebuie să fie interpretate fără ambiguitate de către toți observatorii potențial interesați) și rezoluția măsurărilor. Este de menționat că cu ajutorul calibrărilor poate fi asigurat un nivel decent de intersubiectivitate al senzorilor.

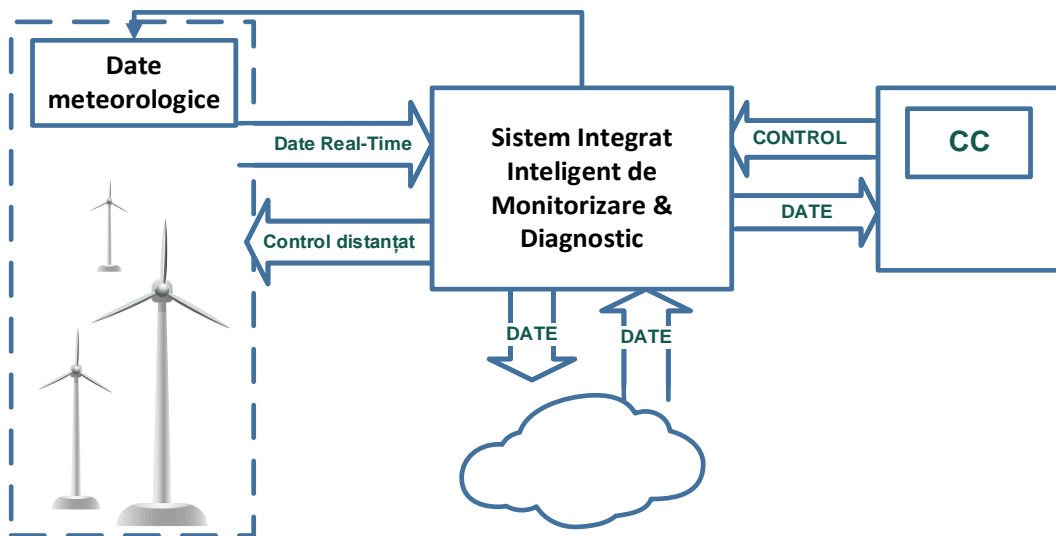


Fig. 3.3. Monitorizarea condițiilor de lucru pentru parc eolian

În consecință, toate elementele de informare necesare monitorizării stării palelor și care influențează procesul decizional poate fi grupat în următorul mod (Fig. 3.3):

- după datele referitoare la deformarea din interiorul palelor, precum și datele referitoare la temperatura de suprafață a palelor;
- date meteorologice (date de prognoză);
- alte date referitoare la turbinele eoliene.

Datele referitoare la deformare și temperatură trebuie colectate de la senzorii de deformare fără contact utilizați, respectiv senzorii de temperatură.

Datele meteorologice trebuie să includă următoarele:

- temperatura exterioară (a mediului ambiant);
- viteza vântului (trebuie luat în considerare intervalul critic de funcționare 15-25 m/s);
- direcția vântului (schimbarea direcției vântului);
- umiditatea;
- nivelul de precipitații;
- indicele de iradiere UV (poate afecta în timp materialul compozit al palelor).

Sunt importante și alte date legate de turbinele eoliene precum:

- viteza vântului în timp real (măsurată cu anemometrul instalat pe nacela turbinei);
- durata de viață a palei (nu are ca rezultat o rată de defectare semnificativ mai mare, dar poate conta pentru turbinele cu puterea nominală mai mare de 1 MW [85]);
- orientarea turbinei și direcția de rotație (poate fi utilă).

Prin prisma abordării adoptate, este clar că monitorizarea inteligentă a stării turbinei eoliene presupune achiziția, procesarea și stocarea datelor privind deformațiile curente din palele turbinelor. Pentru a face față unei astfel de provocări este nevoie, în primul rând, de alegerea corectă a locațiilor vulnerabile de pe pală. Pentru a rezolva o astfel de problemă este importantă elaborarea unui model de calcul cu elemente finite a rezistenței pentru pale tipice. Astfel pot fi stabilite coordonatele locațiilor și respectiv numărul de senzori de deformare fără contact potriviți pentru a fi integrați în palele turbinelor eoliene.

Deteriorarea palelor turbinei eoliene poate fi clasificată ca deteriorare a suprafeței, deteriorare a rășinii și/sau a interfeței și deteriorarea elementelor. Defectele de suprafață pot fi cauzate de eroziune (provocată de ploi, nisip și grindină) sau ca rezultat al impactului cu obiecte mici. Suprafața deteriorată și rugoasă reduce performanța aerodinamică a palei, nu împiedică funcționarea turbinei eoliene. Dar trebuie de accentuat că defectele de suprafață cresc și se dezvoltă și pot duce la deteriorarea structurală a palei [84].

În general, mecanismele de defectare ale palelor turbinelor eoliene sunt analizate, folosind următoarele metode principale:

- analiza post-distrugere a palelor defectate;
- testarea la scară completă a palelor în laboratoare cu observare video și monitorizare a stării structurale;
- analiza bazelor de date și culegeri de rapoarte de incidente;
- monitorizarea directă a deformării și degradării palei în timpul funcționării;
- testarea proiectării subcomponentelor, reproducând părți sau elemente ale palelor;
- modelarea computerizată a deformării și deteriorării palei.

Monitorizarea directă a deformării și deteriorării palelor turbinelor eoliene poate fi efectuată folosind metode de testare nedistructivă și metode de monitorizare a sănătății structurale [93]. În timp ce monitorizarea sănătății structurale este, de regulă, dezvoltată pentru controlul palei, poate fi folosită și pentru a înțelege mecanismele de defecțiune. Astfel de experimente sunt întreprinse pentru investigarea eroziunii la suprafața palelor. O analiză mai detaliată este oferită în lucrarea [93].

În timp ce modelarea computațională a degradării palelor turbinelor eoliene este una dintre cele mai eficiente abordări ale analizei mecanismelor de defecțiune, modelele includ, de regulă, unele mecanisme de deteriorare predefinite și presupuse. De exemplu, este făcută o analiză statică pentru a stabili zona critică a palei și apoi se simulează propagarea fisurilor de oboseală în acea zonă.

Modelele de calcul sunt destul de eficiente și au o gamă largă de aplicații. Cu toate acestea, aplicarea lor necesită o cunoaștere prealabilă a mecanismelor de deteriorare așteptate.

Mai multe segmente ale palelor turbinei eoliene sunt în mod special, sensibile la degradare. Printre acestea, segmentele supuse celor mai intense încărcări sunt sectoarele de tranziție, porțiuni de interfață. Potrivit cercetărilor [94] cele mai afectate zone ale palei sunt: lângă bază (30–35% din lungimea coardei de la bază) și lângă vârf (70% în lungimea coardei de la baza palei), baza palei, bordul de fugă pe partea de presiune înaltă și bordul de atac.

Vârful palei reprezintă o zonă critică datorită faptului că această zonă este expusă la viteza cea mai mare. Ca consecință sunt afectate cel mai mult bordul de atac și bordul de fugă. Mai mult decât atât, fulgerele pot lovi palele în apropierea vârfului și poate duce la separarea învelișului în apropierea vârfului sau de lonjeron [95].

Bordul de atac, spre exemplu, este supus eroziunii sub acțiunea picăturilor de ploaie, grindinei, nisipului și impacturilor succesive. Dacă eroziunea de suprafață nu este reparată rapid, poate duce la fisurarea laminatelor sau va permite pătrunderea apei în zona de lipire.

Bordul de fugă al palelor turbinei eoliene se poate defecta prin dezlipirea îmbinării adezive (de exemplu, din cauza tensiunilor de exfoliere) și/sau prin flambarea panourilor *sandwich*. Flambajul poate duce la defectarea finală a îmbinării adezive pe bordul de fugă la sarcini mult mai mici decât cele maxime.

Alte sectoare potențial deteriorabile sunt în zona de tranziție de la secțiunea circulară la profilul aerodinamic, din cauza trecerii bruște de la laminatul gros la geometria fină și a panourilor laminate mari în zona secțiunii cu coarda maximă care pot fi sensibile la flambaj.

Îmbinările de la bordul de atac și de fugă, între înveliș și elementele de rigidizare interne se pot deteriora sau dezlipi, iar acest lucru duce la flambajul structurilor [95]. Distrugerea palei poate apărea dacă lonjeronul se desprinde de înveliș și se buclează.

Mecanismul de defectare al palelor cel mai des observat sunt fisurile transversale în zona secțiunii cu coarda maximă (inițiate ca o dezlipire a stratului exterior de la miezul sandwich) și dezlipirea nervurilor de rigidizare de învelișul palei în zona de tranziție de la bază (declanșată de tensiunile de exfoliere pe porțiunile de legătură cu adeziv). Aceste efecte sunt amplificate de defectele de fabricație și de solicitările la torsiune ale palei [94].

Astfel, sectoarele cele mai periclitare ale palelor unei turbine eoliene sunt părțile proeminente (vârful, bordul de atac), zonele cu secțiuni de tranziție și cele de lipire a elementelor structurale. Fortificarea acestor zone poate spori semnificativ durabilitatea și durata de exploatare a palelor turbinelor eoliene.

3.2 Modelări numerice ale deformărilor elastice.

În paragraful 3.1 a fost prezentată aplicarea DCIcMa cu SMF pentru monitorizarea/măsurarea deformațiilor elastice în diverse domenii aplicative, inclusiv în palele turbinelor eoliene. Soluția ideală de monitorizare a deformărilor în pală ar fi instalarea de-a lungul întregii pale a STeM. Însă o astfel de abordare ar aduce la complicarea semnificativă a procesului de producere, creșterea semnificativă a costurilor. În același timp, chiar dacă presupunem că sistemele moderne de calcul la margine ar fi capabile să achiziționeze datele de la o multitudine de senzori, este discutabilă procesarea măsurărilor redundante sau care nu au impact semnificativ. Astfel este important de analizat și perspectiva limitării numărului de senzori instalați pe pală. În acest sens trebuie de analizat măsurări a deformărilor palelor în regimuri nominale de lucru. O modalitate de eficientizare a unui astfel de studiu este modelarea numerică comportamentului palelor în diverse regimuri de lucru.

Cu acest scop a fost inițiat un proces de studiu a deformărilor palelor turbinelor eoliene în colaborare cu Centrul de Elaborare a Sistemelor de Conversie a Energiilor Regenerabile (CESCER), Laboratorul de Aerodinamică. Scopul primar a studiului este determinarea tensiunilor și deformațiilor echivalente, iar într-un final identificarea condițiilor de solicitare a palei cu stabilirea zonelor critice. Având geometria rotorului proiectată în SolidWorks, în programul DesignModeler din mediul ANSYS Workbench a fost ulterior importată această geometrie. Ulterior, în ANSYS Workbench, au fost efectuate modelări numerice în domeniul fluidului [96]. Pentru economisirea timpului de calcul și pentru a simplifica analiza CFD (*Computational fluid dynamics*) a fost modelată 1/3 din întregul domeniu. Presupunând condiții de periodicitate, a fost

creat cu o singură pală un volum CFD care include 120° din rotor. Solul, turnul sau alți factori considerați nesemnificativi (alte turbine eoliene, rafalele vântului) la etapa de configurare a modelării numerice au fost neglijați. Pentru a asigura curgerea liberă fără a influența limitele domeniului s-a ținut cont de bunele practici și recomandări din alte cercetări [97, 98], astfel fiind alese dimensiunile domeniului computațional al fluidului. Pentru simulări în ANSYS a fost utilizat un rotor tipic pentru turbine eoliene cu următorii parametri de intrare (Tabelul 3.1):

Tabelul 3.1 Parametrii constructivi și funcționali ai rotorului analizat

Putere nominală, MW	1,5 - 3
Viteza nominală a rotorului, min^{-1}	18 - 20
Viteza vântului, m/s	6 - 20
Diametrul rotorului, m	83
Variația grosimii învelișului și lonjeronului, m	0,1 – 0,005

Pentru simplificarea analizei structurale s-a presupus că materialul compozit poate fi omogenizat în baza mai multor proprietăți ortotropice ale materialului. Totodată s-a acordat o atenție sporită generării rețelei cu elemente pentru a obține un rezultat al calculului numeric mai precis. Astfel, pentru un rezultat mai bun, domeniul fluidului a fost împărțit în $\sim 3\,000\,000$ elemente. Rezultatul discretizării învelișului palei este prezentat în Fig. 3.4.

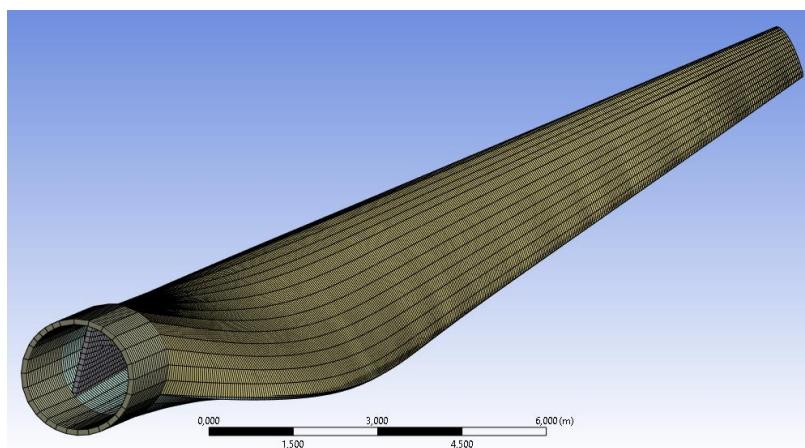


Fig. 3.4. Modelul discretizării palei în elemente finite

Au fost modelate diverse condiții limită de lucru a rotorului (6 - 20 m/s) la viteza de rotație nominală ($18 - 20 \text{ min}^{-1}$). Au fost analizați vectorii de viteză pe suprafața palei la viteza de rotație nominală de 18 min^{-1} . Ulterior au fost efectuate modelări numerice a variației presiunii aerului care parcurge zona rotorului. La fel au fost efectuate și modelări numerice a distribuției presiunii ca rezultat a efectelor aerodinamice. S-a confirmat faptul că pala este supusă solicitărilor complexe de încovoiere și torsiune.

După efectuarea modelării comportamentului palei au fost extrase rezultatele care prezintă interes. În mare parte au fost efectuate modelări pentru viteze apropiate vitezei nominale a vântului de (≈ 11 m/s). De exemplu, pentru viteza vântului de 16 m/s s-au obținut tensiuni echivalente ≈ 48 MPa (Fig. 3.5). Considerând că rezistența la rupere a adezivilor pe bază de rășinile epoxidice cel mai des utilizate în construcția palelor reprezintă 30 – 40 MPa, este evident ca exploatarea turbinelor la viteze mai mari este periculoasă. De fapt în condiții reale, la viteze mai mari decât regimul nominal de lucru al rotorului, în turbina eoliană se activează treptat frâna aerodinamică.

Din Fig. 3.5 se face clar că există regiuni locale cu valori mărite a tensiunilor echivalente. În acest context este necesar de făcut un studiu pentru domeniul vitezelor vântului care ar corespunde regimului nominal de lucru a turbinei eoliene astfel încât să fie identificate regiunile de interes comune pentru măsurarea tensiunilor echivalente în regim real.

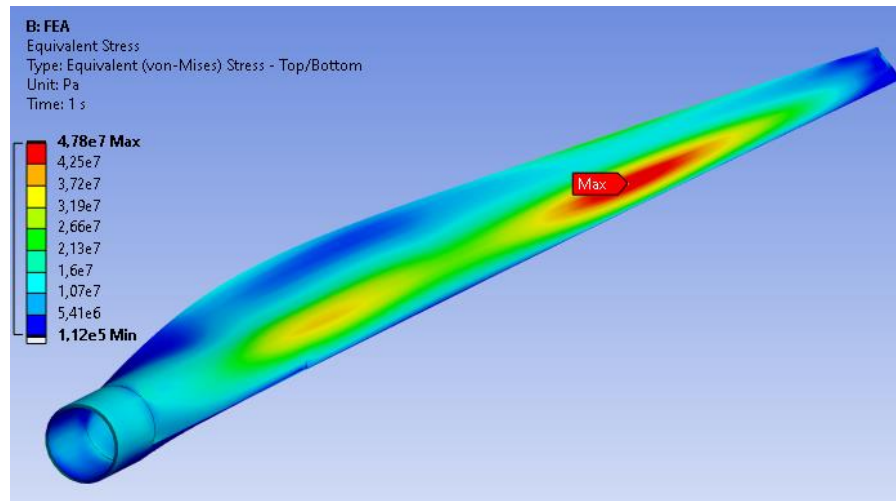


Fig. 3.5. Distribuția tensiunilor echivalente în învelișul palei la 16 m/s

Ca consecință s-a decis identificarea unui număr de puncte de interes pentru măsurarea tensiunilor în regim real, astfel încât prin modelarea unui CMS să fie ușor integrat într-un DCIcMa.

Să presupunem cazul ideal, atunci când trebuie să scanăm cel puțin odată în timpul unei rotații toți senzorii încorporați în palele unei turbine eoliene. Să presupunem, de asemenea, că vor fi efectuate măsurători succesive ale răspunsului senzorilor. Dacă notăm prin α numărul de pale într-o turbină și prin ω viteza unghiulară a rotorului, atunci putem determina numărul de senzori necesari (pe o pală în cazul măsurărilor succesive a deformațiilor) pentru o pală conform formulei:

$$n = \frac{1}{\omega} : \alpha : \tau \quad (3.1)$$

Unde τ este timpul necesar pentru procesarea răspunsului senzorului [69].

După cum am menționat mai sus, viteza nominală de rotație a rotorului este de 18 – 20 min^{-1} , deci în modelarea respectivă, cu rezervă, se poate de considerat o viteză a rotorului de până la 40 min^{-1} . Numărul de pale este de obicei 3. Dacă vom folosi SMF descriși în Fig. 2.8, τ este egal

cu 100 ms. Prin urmare, numărul maxim de senzori de deformare care pot fi încorporați într-o pală nu depășește 5. Această cantitate este suficientă pentru a monitoriza punctele cele mai critice, din zona rădăcinii palei și de la vârf. Ulterior pentru a îmbunătăți detalierea procesului de modelare și pentru a extinde limitările legate de timpul de calcul a deformațiilor am decis identificarea a 4 puncte de interes pe pala turbinei.

Locațiile cele mai vulnerabile au fost identificate la $0.18R - \varepsilon_1$; $0.3R - \varepsilon_2$; $0.5R - \varepsilon_3$; $0.7R - \varepsilon_4$, unde R – este raza rotorului. Pentru aceste locații au fost efectuate modelări numerice pentru caracterizarea deformațiilor specifice la diverse viteze a vântului (Tabelul 3.2).

Tabelul 3.2 Rezultatele simulării deformațiilor specifice ε

$v(m/s)$	ε_1	ε_2	ε_3	ε_4
6	0,00011193	0,00020590	0,00014216	0,00015978
7	0,00014756	0,00023891	0,00017523	0,00020242
8	0,00019415	0,00028222	0,00021926	0,00025846
9	0,00024986	0,00033406	0,00027193	0,00032547
10	0,00032159	0,00040445	0,00034200	0,00041427
11	0,00037561	0,00044206	0,00038765	0,00046807
12	0,00043541	0,00048600	0,00043907	0,00052743
13	0,00047357	0,00051688	0,00047163	0,00056061
14	0,00048489	0,00052548	0,00048007	0,00057013
15	0,00050527	0,00054230	0,00050137	0,00060046
16	0,00050823	0,00056261	0,00051115	0,00061130
17	0,00050256	0,00055931	0,00050591	0,00060786
18	0,00048769	0,00054592	0,00048926	0,00058399
19	0,00049479	0,00055662	0,00049755	0,00059360
20	0,00047646	0,00054591	0,00047814	0,00055970

Conform rezultatului modelărilor numerice observăm că pentru cele patru puncte de interes deformațiile maxime au fost obținute la viteza vântului de 16 m/s. Pentru viteze mai mari se atestă o descreștere a deformației, probabil din cauza redistribuirii deformațiilor pe întreaga lungime a palei. Acest lucru, indirect vine în susținerea deciziei de limitarea a punctelor de interes în procesul de monitorizare a deformației palelor.

3.3 Arhitectura unui sistem de monitorizare a condițiilor de lucru și mentenanță predictivă

Următoarea etapă care ține de senzorii descriși în paragraful 2.2 este aplicarea lor într-un sistem de monitorizare a integrității structurale pentru o turbină eoliană. Acest lucru poate fi realizat folosind metode de testare nedistructivă și diverse metode CMS [93] pentru a preveni degradarea sau distrugerea palelor [99]. Senzorii sunt atașați sau integrați în palele ce sunt monitorizate pentru detectarea proceselor de deformare și deteriorare. În timp ce CMS este de obicei dezvoltat pentru controlul structural al palelor turbinelor eoliene, poate fi folosit și pentru a înțelege mecanismele de defectare.

Deoarece în contextul simulărilor descrise în paragraful 3.2 este necesară măsurarea deformațiilor în multiple locații ale palei, o alegere potrivită și de perspectivă ar fi senzorii de măsurare a deformării pe bază de microfibre cu magnetostricție pozitivă [67, 100]. Este important de menționat, că rezistența la rupere prin tracțiune a materialului pentru microfibrele amorfe din aliaj pe bază de *Fe* este de aproximativ 1,5 Gpa [100], valoare ce depășește cu mult valorile tensiunilor maxime în învelișul palei (≈ 48 MPa) și care corespund vitezei vântului de 16 m/s (Fig. 3.5).

În acest context senzorul de deformare fără contact propus [68] poate fi luat în considerare pentru aplicație în CMS, în special la monitorizarea deformărilor elastice ale palelor turbinelor eoliene. Acest tip de senzor conține cel puțin două segmente de microfibră, realizate pe bază de aliaje feromagnetice cu structură amorfă, care trebuie montate pe suprafața unui corp sau pot fi integrate într-un corp care este supus deformărilor elastice. Materialele din care sunt fabricate microfibrele sunt descrise în paragraful 2.2.1 iar modul de operare și prototipul DCIcMa este expus în paragraful 2.2 și Fig. 2.8. După cum se cunoaște, calculul la margine presupune și efectuarea unei anumite părți a algoritmului aplicației pe dispozitivele din apropierea sursei de date. Structura propusă pentru dispozitivul de calcul la margine poate fi reutilizată în contextul CMS pentru turbine eoliene în 2 variante. În Fig. 3.6 a) este descrisă implementarea unui dispozitiv de calcul la margine pentru CMS reieșind din formula (3.1).

Conform implementării propuse DCIcMa efectuează măsurările deformațiilor într-un număr limitat de puncte de interes utilizând mai multe bobine de excitare și de citire. Această abordare permite calculul și prelucrarea centralizată a deformațiilor de pe o pală. Respectiv integrarea unui astfel de dispozitiv într-un sistem existent de CMS este mai ușoară. Dar o astfel de abordare vine și cu neajunsurile sale cum ar fi limitarea numărului de senzori - fapt ce poate provoca analiza incorectă în cazul reutilizării sistemului dat în pale care diferă prin construcție de cele modelate și respectiv distribuția deformațiilor echivalente la diverse viteze a vântului pot să

difere de cele expuse în paragraful 3.2 . Un alt neajuns este cablarea mai complexă, și respectiv complicarea procesului de montare a dispozitivului și bobinelor de citire, ceea ce în consecință aduce la scăderea fiabilității finale pentru senzori.

Pentru implementarea reprezentată în Fig. 3.6 b) avem avantaje în sensul flexibilității în cadrul producerii și o simplitate în procesul de citirea a datelor de pe SMF. Indiferent de dimensiunea și forma palei putem utiliza un număr cât mai apropiat numărul zonelor critice din pală. Însă apare necesitatea utilizării unui dispozitiv adițional de calcul la margine care ar efectua analiza metricilor necesare folosind rezultatele achiziției de pe senzori sau ar fi necesară utilizarea Cloud Computing pentru evaluarea stării palei.

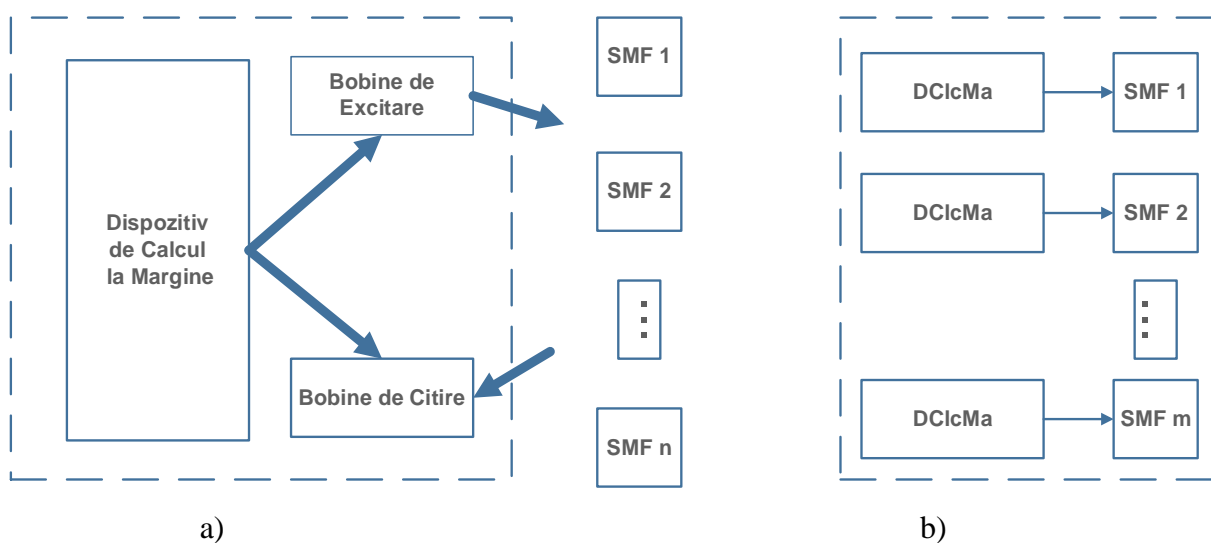


Fig. 3.6. Structura dispozitivului de calcul la margine cu număr limitat de senzori (a) și implementare pentru număr extins de noduri vulnerabile (b)

3.3.1 Abordări în mentenanța predictivă

Un sistem de monitorizare a stării turbinei este integrat într-o platformă de mentenanță predictivă. După cum a fost menționat în [101], procesul decizional pentru mentenanța predictivă bazată pe monitorizarea stării funcționale, implică evaluarea stării curente, analiza modificării parametrilor de lucru în timp și precizarea stării viitoare a părților componente a sistemului monitorizat. În Fig. 3.7 este prezentat un cadru decizional care se concentrează pe diagnosticul actual și pe precizarea stării viitoare în dependență de evenimentele înregistrate. Un aspect important al pronosticului este analiza stresului mecanic cumulativ. La fel, trebuie de luat în considerare și alți factori care pot influența semnificativ starea de stres cumulativ cum ar fi înghețurile sau gradientul de temperatură, radiația ultravioletă [102, 69].

Activitățile de mentenanță predictivă pot fi programate în funcție de nivelul estimat al stării de stres cumulativ. Pentru a oferi o decizie cu un grad înalt de corectitudine, este necesară o

combinație optimă a unei astfel de evaluări mixte. Acest lucru se datorează faptului că este posibil să nu existe suficient timp pentru planificarea întreținerii dacă analiza arată că palele au atins limita de eșec.

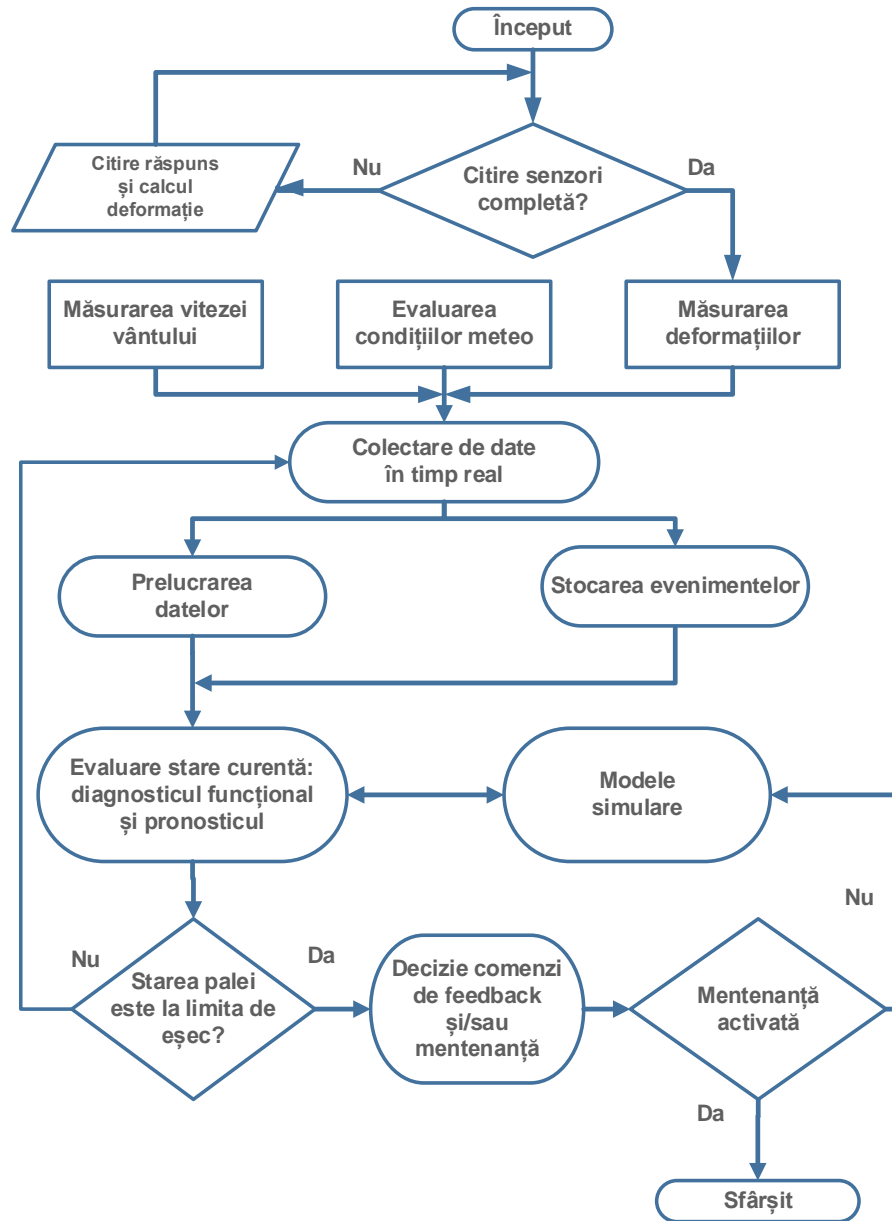


Fig. 3.7. Procedura de luare a deciziilor în cadrul sistemului de monitorizare

3.3.2 Sisteme de mentenanță predictivă

Dispozitivele integrate inteligente moderne, având o capacitate de procesare foarte ridicată și având disponibil spațiu de stocare a datelor majorat, pot lua decizii la nivel local, adică în interiorul dispozitivului. Luând decizii la nivel local, nu este nevoie ca datele brute să fie trimise către un sistem de tip Cloud Computing, ci este suficient de a transmite doar rezultatul inferenței.

Respectiv dacă datele brute nu trebuie transferate spre Cloud pentru a fi procesate, deciziile de control pot fi sintetizate în timp real, chiar pe DCIcMa în cazul dacă are capacități de AI.

De fapt, senzorii creează o cantitate imensă de date în timp real care, la rândul lor, necesită o lățime a benzii de date mai mare. Astfel, prin transmiterea doar a rezultatului inferenței, sistemele incorporate reduc semnificativ lățimea benzii de date necesare pentru conexiune. Analiza locală a datelor senzorilor economisește cheltuielile de utilizare a infrastructurii Cloud și a traficului.

În Fig. 3.8 este prezentată structura sistemului inteligent de monitorizare a stării turbinelor eoliene, considerând optimizările descrise mai sus. Acest sistem conține un modul de comunicare fără fir – o componentă indispensabilă în era modernă IoT. În acest sistem este inclus ca separat un modelul de colectare a datelor, un subsistem AI și unul de simulare conform datelor de intrare pentru a evalua starea palelor și a interveni cu decizii. Pentru mentenabilitate sistemul este dotat și cu interfețe dedicate, fie pentru a oferi posibilitate de a interveni în procesul decizional, fie pentru a realiza CMS cu ajutorul unui Cloud Computing.

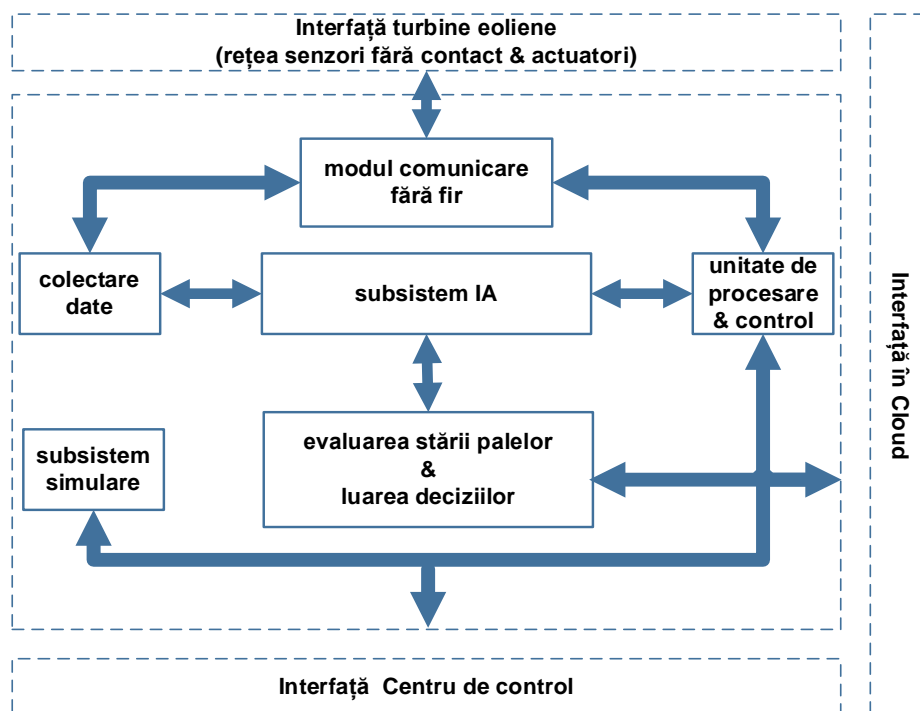


Fig. 3.8. Structura sistemului inteligent de monitorizare

În contextul structurii prezentate în Fig. 3.8 prin intermediul modului de colectare a datelor sunt colectate date despre deformările palelor utilizând DCIcMa prezentate în Fig. 3.6. Ulterior, unitatea de procesare și control asigură implementarea algoritmului de monitorizare a deformațiilor în palele turbinelor (Fig. 3.9).

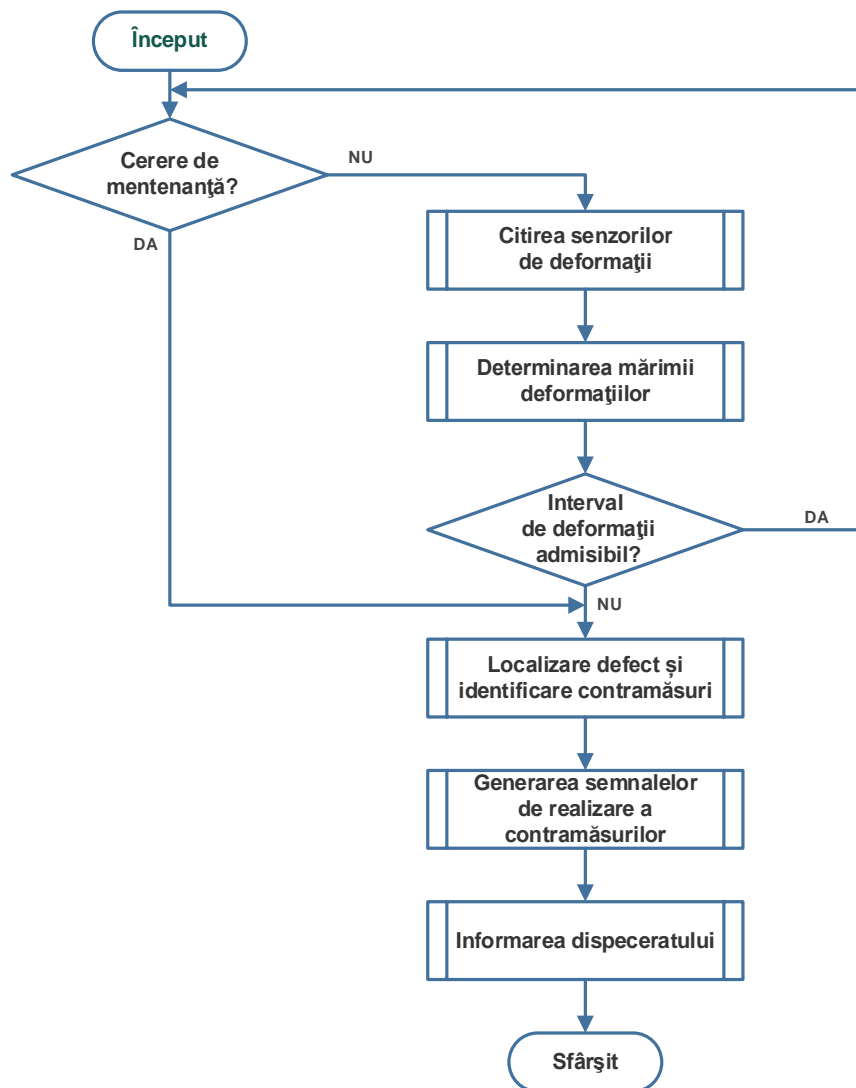


Fig. 3.9. Algoritm de monitorizare a deformațiilor în palele turbinelor

Conform algoritmului expus în Fig. 3.9 are loc citirea continuă a SMF și determinarea deformațiilor. Procesul decizional de identificare a contramăsurilor presupune evaluarea intervalului de deformații. Această evaluare nu se bazează doar pe starea curentă a deformațiilor, dar presupune o evaluare predictivă bazată pe ANN [103].

Colectarea datelor de la senzorii de deformație presupune și implementarea unui mecanism de împachetare a datelor corespunzătoare pentru transmiterea lor în continuare prin intermediul canalelor de comunicare fără fir către unitatea decizională din cadrul sistemului inteligent de monitorizare și control (Fig. 3.3). În articolul [69] a fost propus un cadru de împachetare a datelor conform Fig. 3.10. Conform protocolului descris un pachet de date trebuie să conțină ”Identificator de date” care atâta pentru pachetele specifice senzorilor cât și celor actualelor specifică tipul de date. În cazul utilizării unui sistem distribuit de stocare a datelor generate în sistem este importantă specificarea ”Clasei” de senzor sau actuator pentru a fluidiza sau canaliza pachetele rapid spre

consumatorul final de date. Utilizarea câmpului "Destinatar" este imperativă în cazul comunicării directe dintre două dispozitive ale rețelei sau în caz de urgențe pentru a adresa mesaje direct spre turnul de control. Pe lângă informația utilă din pachet ce este reprezentată de câmpurile "Valoare Senzor" fie "Valoare de control", este o practică bună de a include și "Câmpuri Rezervate" pentru a extinde setul de date ce poate fi transmis. O aplicație utilă a unui astfel de "Câmp rezervat" ar fi partajarea informației utile care ține de criptarea/decriptarea datelor utile din pachet.

Se cunoaște că una din problemele majore cu care se confruntă sfera IoT este securitatea [29]. Această problemă poate afecta direct implementarea protocolului de comunicare expus într-un sistem WT. În contextul posibilităților moderne ale microcontrolerelor, pot fi utilizate soluții care au integrate blocuri de criptare/decriptare complexe [104, 48], ce pot fi utilizate în IoT sau EoT și respectiv în implementarea protocolului prezentat în Fig. 3.10 [69].

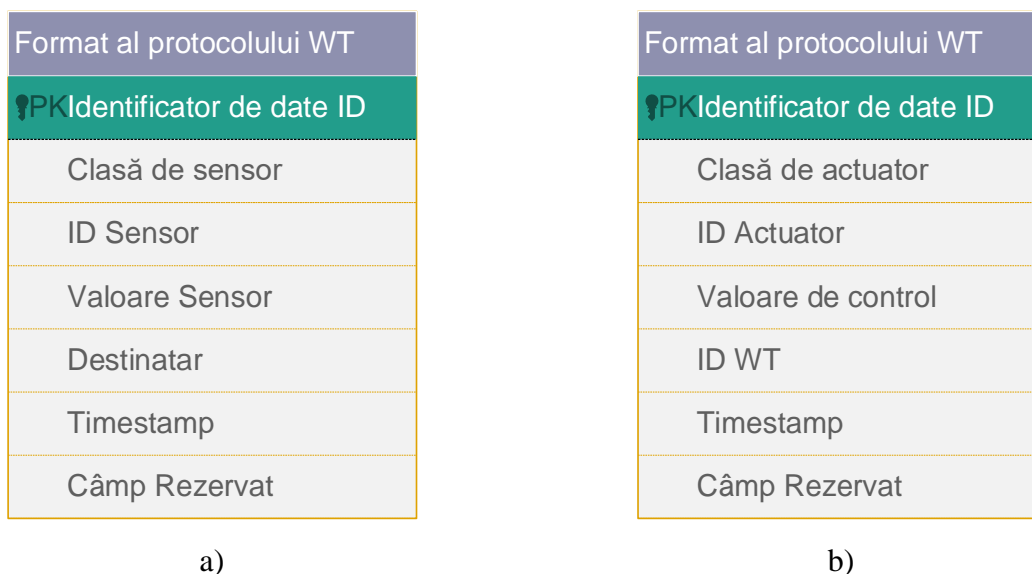


Fig. 3.10. Formatul protocolului de date pentru senzori(a) și actuatori(b)

3.4 Utilizarea rețelelor neuronale pentru mentenanță predictivă

Rezultatele modelărilor numerice expuse în Tabelul 3.2 au servit la crearea unui model de rețea neuronală artificială care este capabil să prezică valorile specifice de deformare în locații de interes în funcție de viteza vântului, și nu numai. Trebuie luate în considerare atât valorile curente ale parametrilor meteorologici, cât și valorile prognozate ale vântului. Construirea unui astfel de model predictiv de deformare a palelor poate fi utilă pentru monitorizarea stării palelor turbinelor eoliene. O modificare semnificativă a deformației specifice în punctele de interes identificate poate fi premisa de defect a materialului în regiunea punctului, și ca rezultat poate semnala necesitatea unor lucrări de mentenanță sau reparație.

Modelarea și monitorizarea comportamentului la deformare a palelor turbinelor eoliene este esențială pentru a asigura performanța și siguranța acestor instalații energetice. Utilizarea ANN în predicția procesului de degradare a palelor turbinelor eoliene poate oferi o abordare inovatoare și eficientă pentru monitorizarea și mentenanța acestora. ANN pot identifica modele de comportament care indică etapele incipiente ale degradării palelor turbinei eoliene [103]. Astfel, defecțiunile pot fi detectate înainte ca acestea să devină majore, facilitând intervențiile preventive și reducând costurile de întreținere.

3.4.1 Generarea rețelei neuronale

Pentru modelarea comportamentului de deformare al palelor turbinelor eoliene, a fost proiectată și antrenată o ANN cu un neuron în stratul de intrare, zece neuroni în stratul ascuns și patru neuroni în stratul de ieșire (Fig. 3.12, a). Una din variantele inițiale a rețelelor proiectate a presupus utilizarea a 50 neuroni în stratul ascuns (Fig. 3.12, b). Neuronii din stratul ascuns au folosit funcția de activare *Tanh*, iar neuronii din stratul de ieșire au folosit activarea liniară. S-a utilizat un neuron în stratul de intrare pentru a fi aplicată viteza vântului. Zece neuroni în stratul ascuns au fost identificați experimental ca rezultat al antrenărilor repetitive și a oferit o aproximare a rezultatului final acceptabilă (s-a evitat overfittingul rețelei și s-a obținut o eroare rezonabilă). Cei patru neuroni de ieșire prezintă valorile deformațiilor echivalente pentru punctele de interes conform modelărilor numerice prezentate în Tabelul 3.2.

Inițial, pentru antrenarea ANN s-a folosit un set de date meteo reale [105]. Acest set de date conținea viteza medie a vântului pentru intervale de 3 ore. Pentru antrenare au fost utilizate în total 2920 de valori. Aceste date au fost organizate ca un vector de intrare V (viteza vântului) la o ANN și utilizate pentru a crea o matrice cu 4 coloane asociată cu deformațiile specifice în fiecare din punctele de interes stabilite. În structura ANN, neuronii stratului ascuns folosesc o funcție de activare sigmoid, iar stratul de ieșire utilizează o funcție de activare liniară.

După procedura de antrenament, regresia R s-a dovedit a fi 0,9513, iar după testele inițiale și suplimentare ale modelului cu alt set de date s-au obținut valori de regresie de 0,9476 și, respectiv, 0,9508. Valorile respective caracterizează predicțiile (ieșirea) rețelei cu privire la răspunsurile (obiective) ca fiind rezonabil de precise. Pentru o potrivire perfectă a rezultatelor, datele ar trebui să se afle de-a lungul unei linii de 45 de grade, unde rezultatul la ieșirea rețelei sunt egale cu cele reale.

Din diagrama din Fig. 3.11 (a) se poate observa că scopul procesului de antrenare al ANN este de a obține precizia necesară de ordinul 10^{-10} , ceea ce la modelarea procesului de deformare a fost atins într-o singură epocă. Acest fapt se datorează unei structuri relativ simple a ANN și a

unui număr relativ de mic de neuroni, precum și simplității modelului. Trebuie remarcat faptul că în timpul procesului de antrenare repetată au existat cazuri când aceeași rețea a obținut precizia necesară în mai multe epoci (până la 13) iar rezultatul prezentat în Fig. 3.11 (a) este cel mai reușit.

La fel, Fig. 3.11 (a) arată o diferență relativ mică între modelarea procesului de către ANN bazată pe datele de antrenament și datele pentru testare. Astfel, putem concluziona că modelul aproximează bine comportamentul procesului modelat chiar și cu un set diferit de date de intrare-ieșire.

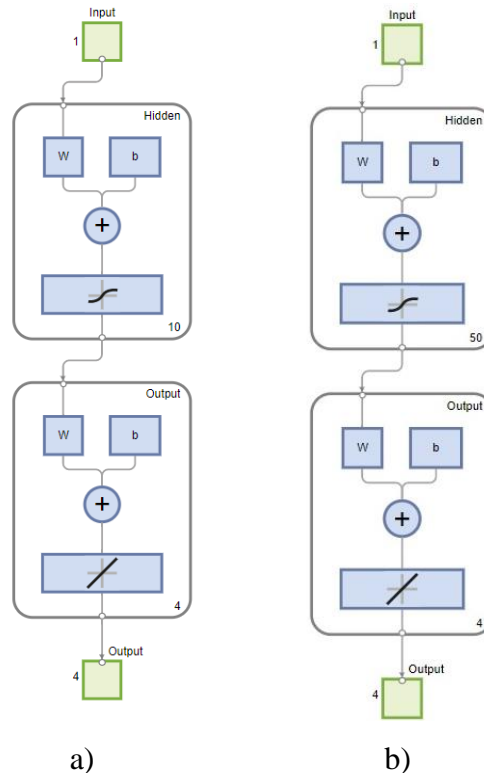


Fig. 3.12. Structurile ANN optimă (a) și invalidată (b)

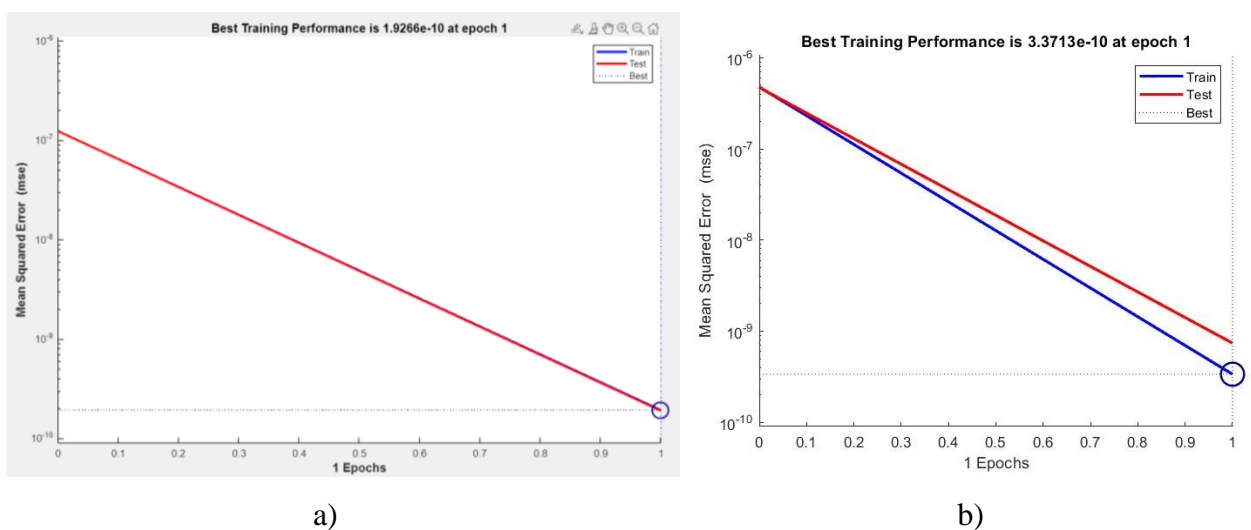


Fig. 3.11. Diagrama de antrenare a ANN optimă (a) și invalidată (b)

ANN a fost antrenată cu ajutorul algoritmului de normalizare Bayesian. Acest algoritm este mai lent dar va generaliza mai ușor modelul Simulink pentru simularea deformațiilor în pala turbinei.

3.4.2 Acuratețea rețelei neuronale antrenate

Pentru ilustrarea acurateții modelului ANN, a fost construită histograma erorii medii pătrate (MSE), Fig. 3.13. Histograma MSE oferă o perspectivă suplimentară asupra acurateții ANN dezvoltate. Coloanele albastre reprezintă date de antrenament, iar coloanele roșii reprezintă date de testare.

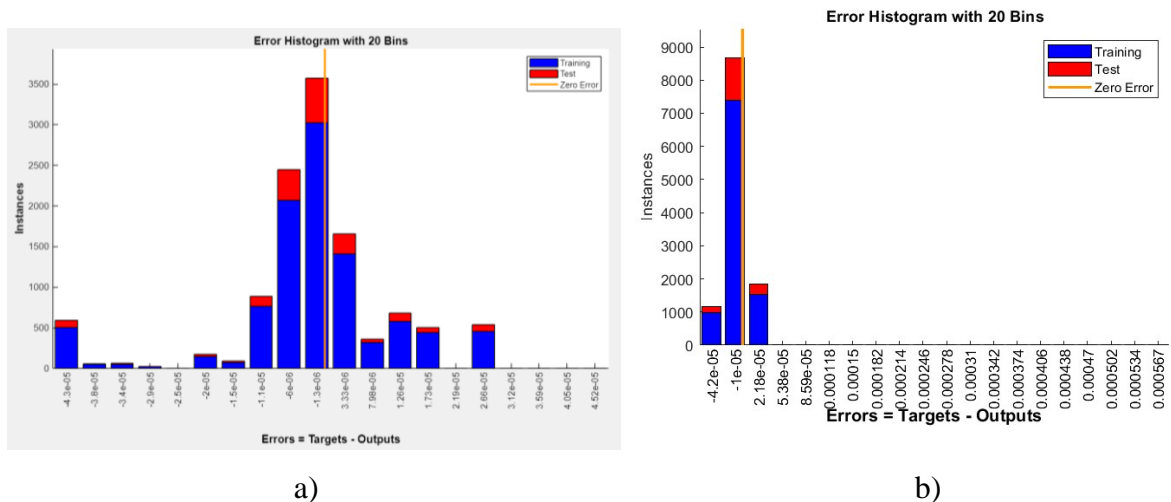


Fig. 3.13. Histograma erorii medii pătrate a ANN optimă (a) și invalidată (b)

Histograma oferă informații despre eroarea medie pătrată, care reprezintă punctele de date de referință pentru care potrivirea este semnificativ mai mică decât majoritatea datelor. Analiza MSE face posibilă determinarea dacă datele sunt slab corelate sau dacă acest subset de date din setul de date utilizat diferă de restul setului de date.

Din analiza histogramei MSE, se poate observa că în procesul de modelare a deformațiilor, majoritatea erorilor medii pătrate se află în imediata vecinătate a zonei prezentate de linia de eroare zero (linia portocalie din Fig. 3.13). Acest fapt dovedește că ANN identificată ca optimă, este de precizie înaltă, după cum se poate observa din Fig. 3.13 (a), și respectiv poate fi utilizată în cercetările ulterioare.

O altă modalitate de evaluare a acurateții modelului ANN este prezentată în Fig. 3.14. Figura ilustrează modul în care modelul dezvoltat interpolează funcția de deformare specifică în funcție de viteza vântului în prima zonă a palei (locația #1 reprezentată de ε_I din Tabelul 3.2). Trebuie remarcat faptul că precizia modelului la viteza a vântului mai mică de 5 m/s nu prezintă interes practic deoarece acest regim de lucru solicită nesemnificativ turbina eoliană.

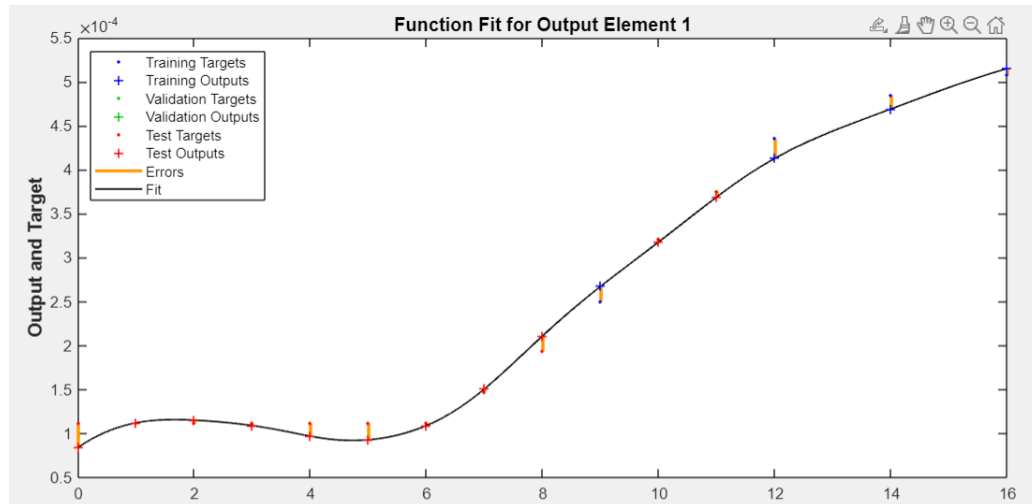


Fig. 3.14. Aproximarea deformării palei (locația #1)

3.4.3 Utilizarea ANN în mentenanță predictivă

Utilizarea ANN pentru a modela comportamentul de deformare al palelor turbinelor eoliene poate fi o abordare eficientă cu un mare potențial pentru monitorizarea stării structurii palei și de a prezice posibila degradare a acesteia. În acest sens a fost utilizat pachetul Simulink din MATLAB pentru a elabora un sistem de mentenanță bazat pe predicția deformărilor din palele turbinelor (Fig. 3.15).

La baza modelului de predicție a tendinței de deformare a structurii este ANN antrenată anterior. Modelul neuronal este reprezentat în mediul de dezvoltare Simulink ca componenta "Function Fitting Neural Network", generată automat de instrumentul "Neural Network Start" (nnstart). Pentru a crea un model bazat pe prezicerea tendinței de deformare, precum și pentru a implementa un astfel de sistem în software-ul MATLAB Simulink, în structura modelului au fost introduse mai multe blocuri funcționale specifice în Simulink.

Astfel, blocurile Random Source1 – 4 din Fig. 3.15 sunt incluse pentru simularea apariției aleatorii stresului cumulativ în structura compozită a palelor turbinei. Împreună cu blocurile de memorie care stochează valoarea anterioară a tensiunilor cumulate, acestea îndeplinesc funcția de a simula acumularea în timp a diferitelor influențe ale mediului asupra stării structurii palei în fiecare loc de interes [102].

Valoarea parametrului aleatoriu are funcția de a descrie influența cumulativă a diverși factori care pot afecta structura materialului compozit a palei, cum ar fi umiditatea ridicată, lumina ultravioletă, rafale de vânt, temperaturi ridicate, temperaturi scăzute, furtuni, etc. În cazul real, pe baza datelor statistice, influența tuturor acestor factori poate fi luată în considerare separat, dar în momentul de față s-a decis să se cumuleze toți acești „coeficienți” din lipsa datelor experimentale și, de asemenea pentru a face posibilă dezvoltarea un concept simplificat al modelului sistemului de mentenanță predictivă.

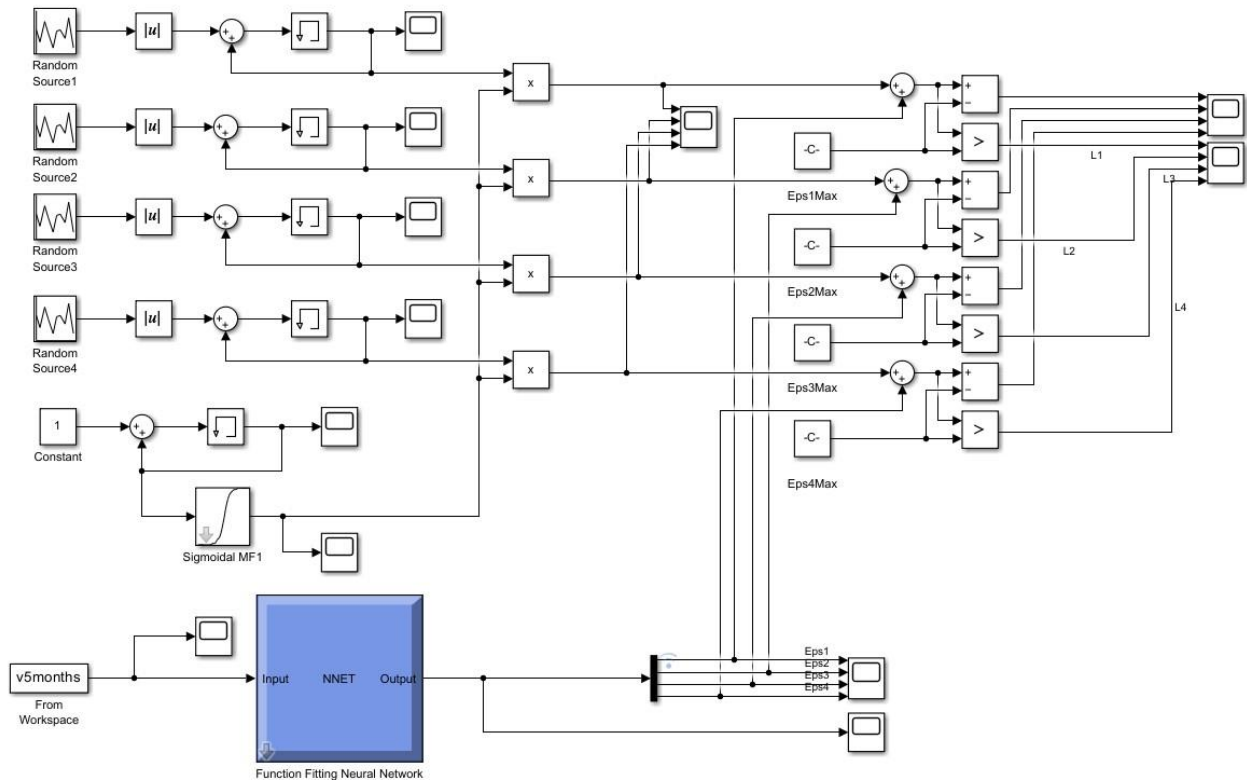


Fig. 3.15. Schema bloc Simulink a unui sistem de mentenanță predictivă

Se știe că durata de exploatare planificată a palelor turbinelor eoliene este de zeci de ani [101]. Pe de altă parte, defecțiunile tehnice și degradarea materialului compozit ale palelor pot apărea atât în stadiul inițial de funcționare din cauza nerespectării procesului tehnologic în etapa de producție, cât și la sfârșitul perioadei de garanție. În aceste condiții, modelarea întregului proces de operare ar necesita o mulțime de resurse și timp. Prin urmare, s-a decis includerea în structura modelului a unei funcții care poate activa sau dezactiva influența distructivă a stresului cumulativ într-o anumită perioadă de timp.

Din acest motiv, a fost adăugat un bloc comun Sigmoidal MF1 (Fig. 3.15), care reprezintă funcția de membru sigmoidal utilizată în logica fazăică. Parametrizarea acestei componente permite configurarea MF1 pentru a crea o formă sigmoidală de la 0 la 1, unde 0 înseamnă că stresul cumulat

nu are nicio influență asupra structurii lamei în acel interval de timp. Pe de altă parte, o valoare de 1 înseamnă un impact semnificativ al stresului cumulativ.

Modificând forma funcției și parametrii componentei Sigmoidal MF1, este posibilă modelarea momentului de apariție a unei stări critice, în care se poate manifesta stresul cumulativ. În același timp, prin schimbarea formei funcției de la sigmoid la trapezoid, Gaussian sau Bell, este posibil să fie estimată nu numai apariția defectelor, ci și eventual perioada de mentenanță.

3.4.4 Comportamentul modelului de mentenanță predictivă

Pentru a modela numeric comportamentul de deformare al paletei turbinei eoliene, a fost utilizat un set de date reale (un total de 1005 eșantioane) care conținea viteza vântului pe o durată de aproximativ 5 luni (Fig. 3.16). Setul de date a fost aplicat la intrarea ANN dezvoltate. Este necesar de menționat că setul de date reprezenta viteza medie a vântului pentru perioade de 3 ore.

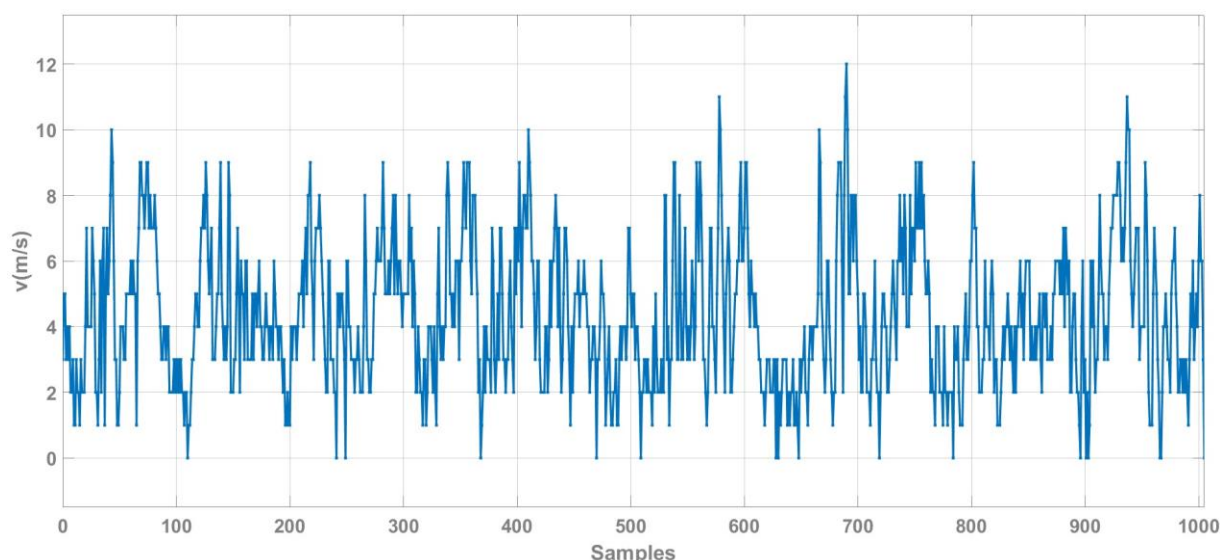


Fig. 3.16. Viteza vântului pentru perioada analizată

În Fig. 3.18 este prezentat rezultatul deformărilor în cele patru puncte de interes. Se poate de observat că conform maximelor, graficul deformărilor se corelează cu graficul vitezei vântului utilizate (Fig. 3.16).

Pentru a semnala deviațiile de la regimul de funcționare normal a paletei turbinei, modelul sistemului de mentenanță proiectat include patru constante Eps1Max - Eps4Max (din Fig. 3.15), care reprezintă maximul deformării elastice echivalente la fiecare locație de interes: 0,00050823, 0,00056261, 0,00051115 și, respectiv, 0,00061130. Aceste valori corespund unei viteze a vântului de 16 m/s și sunt legate de solicitările maxime din învelișul palei (vezi Tabelul 3.2).

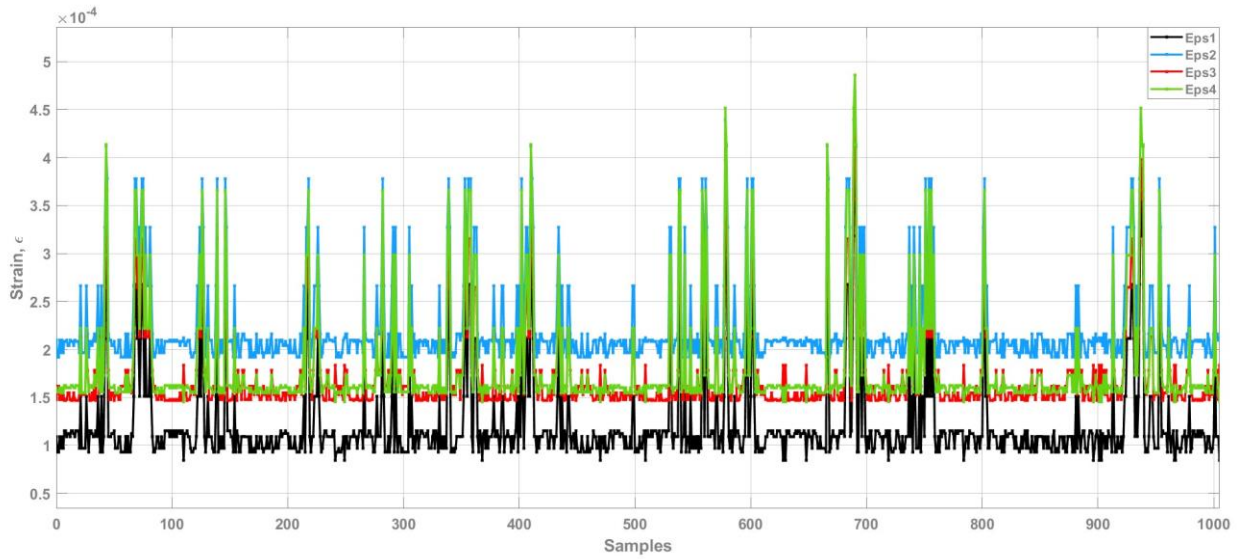


Fig. 3.18. Graficul deformațiilor specifice generate de modelul ANN

După sumarea deformației prezise cu valoarea crescută a stresului cumulativ, valorile obținute sunt comparate cu valorile maxime ale deformării elastice echivalente la fiecare locație de interes. Dacă valoarea obținută este mai mare, atunci la ieșirea sistemului se generează valoarea 1, ceea ce semnifică o abatere a deformației de la valoarea normală de lucru a palei turbinei, respectiv este necesară investigație din partea echipei de mentenanță pentru locația corespunzătoare. În Fig. 3.17 sunt proiectate semnalele de avertizare simulate despre o posibilă abatere de la starea normală a structurii palei în locațiile 2, 3, 1 și 4, care sunt afișate în albastru, roșu, negru și respectiv verde.

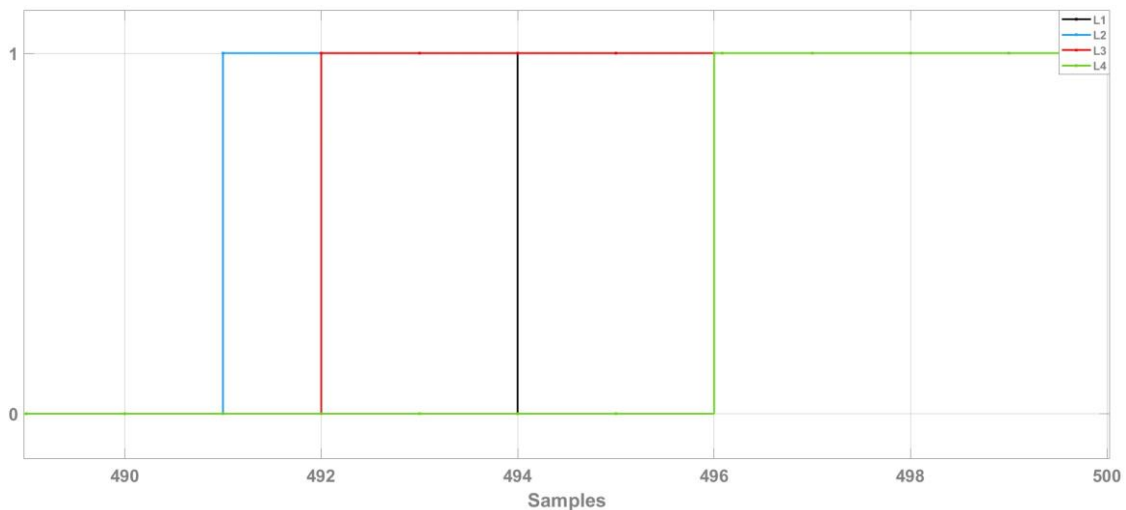


Fig. 3.17. Graficul semnalelor de avertizare generate de model

3.5 Analiza și implementarea modelului de mentenanță

Lipsa datelor reale referitor la deformațiile palelor în timpul lucrului necesită o atenție sporită din perspectiva validării modelului de predicție elaborat. Problema monitorizării stării palelor este una acută și la etapa actuală se încearcă modelarea numerică a procesului de degradare în condiții de temperatură și vibrații cât mai aproape de cele reale. O pală a turbinei eoliene a fost expusă unei mișcări oscilante simple, similară mișcării reale atunci când pala este montată pe rotorul unei turbine eoliene. Sarcinile interne ale structurii palei, cauzate de deviațiile în timpul mișcării oscilatorii, asigură disiparea energiei în structura internă a materialului. Disiparea energiei, datorată tensiunilor elastice din structură, a fost detectată cu o cameră termică în infraroșu. A fost utilizată analiza de frecvență modală cu elemente finite a modelului cu scanare 3D, pentru a evalua comportamentul structural global și a aproba rezultatele analizei de stres termic. Cu o sonda ultrasonică a fost posibil de caracterizat structura palei. Ca urmare, a fost propusă o procedură simplă pentru analiza structurii nedistructive a palelor turbinei eoliene imediat la finisarea procesului de producție [106].

Însă această abordare nu presupune modificarea comportamentului deformațiilor în timp, sub acțiunea altor factori externi. Unul din astfel de aspecte este exploatarea turbinelor în condiții de intensificări rapide ale vântului.

Pentru testarea modelului de predicție din Fig. 3.15 au fost utilizate un set de valori medii a vântului (Fig. 3.16). Însă realitatea arată, că mai ales în condiții de câmpii sau podgorii intensificările de vânt [107] pot avea valori net superioare vitezei medii a vântului. Astfel de condiții în mod inevitabil reprezintă un stres cumulativ majorat pentru modelul de predicție elaborat.

Astfel, pentru a cerceta influența rafalelor de vânt asupra procesului de deformare a palelor turbinelor eoliene a fost implementat un nou model în MATLAB Simulink. Cu ajutorul instrumentului Neural Network Toolbox a fost creat un model de rețea neuronală pentru modelare deformării palelor. Pentru modelarea nouă a fost utilizat un set de date care conținea viteza vântului în intervale de 30 minute. Aceste date au fost interpolate cu scopul de a obține un alt set de date cu intervalul de discretizare de 10 minute, care și caracterizează apariția rafalelor în condiții reale.

Pentru a modela procesul aleatoriu de apariție a rafalelor a fost utilizat blocul de generare a numerelor aleatorii Random Source cu repartiție uniformă pe intervalul [0 1], care activa alior prezența rafalelor de vânt. Reieșind din analiza datelor meteorologice din regiune [107] a fost identificată viteza medie a rafalelor de vânt care variază uniform pe intervalul [0 m/s:5 m/s]. Pentru a apropia și mai mult comportamentul modelului de condițiile reale a fost introdus blocul Diff. Sigmoidal MF care are funcția de a amplifica rafalele cu viteza din intervalul [6m/s:12 m/s] cu

lungimile proiecțiilor pantelor de 2 și respectiv 4 m/s. Astfel am obținut un model a rafalei de vânt aplicate pe valorile reale a vitezei vântului (Fig. 3.19).

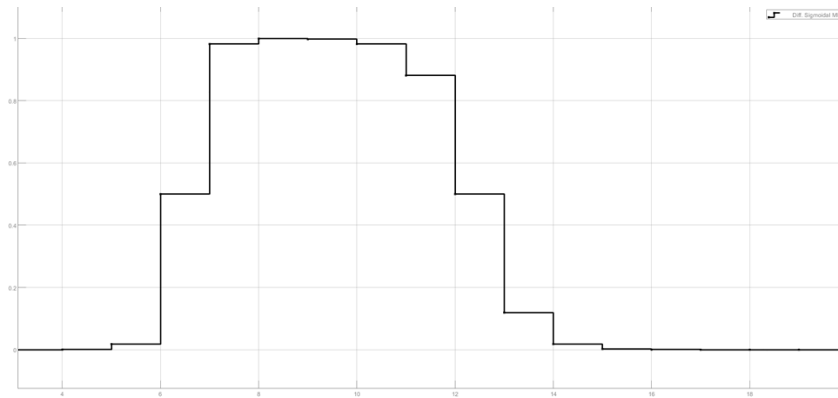


Fig. 3.19. Modelul rafalei aplicate

Pentru a compara diferența între comportamentul normal al sistemului și cel influențat de intensificări ale vântului, a mai fost adăugat un bloc identic cu cel al rețelei neuronale artificiale la care au fost aplicate datele vitezei vântului fără rafale. Reieșind din faptul că în model se introduc datele despre viteza vântului fără rafale, rafalele fiind introduse artificial, și în condițiile reale rafalele trebuie determinate, a fost implementat un algoritm simplu de calcul al rafalelor de vânt care constă în compararea vitezei vântului la momentul curent cu cea măsurată la momentul de timp precedent (cu 10 minute în urmă) și dacă această diferență este pozitivă și are o valoare mai mare decât o valoare de prag considerată egală cu 2m/s, atunci aceasta este scăzută din viteza măsurată a vântului. Anume valoarea calculată a vântului în așa mod este aplicată la cel de-al doilea bloc al rețelei neuronale artificiale. În final se compară valorile corespunzătoare ale deformațiilor prezise în punctele de interes ale acestor 2 modele.

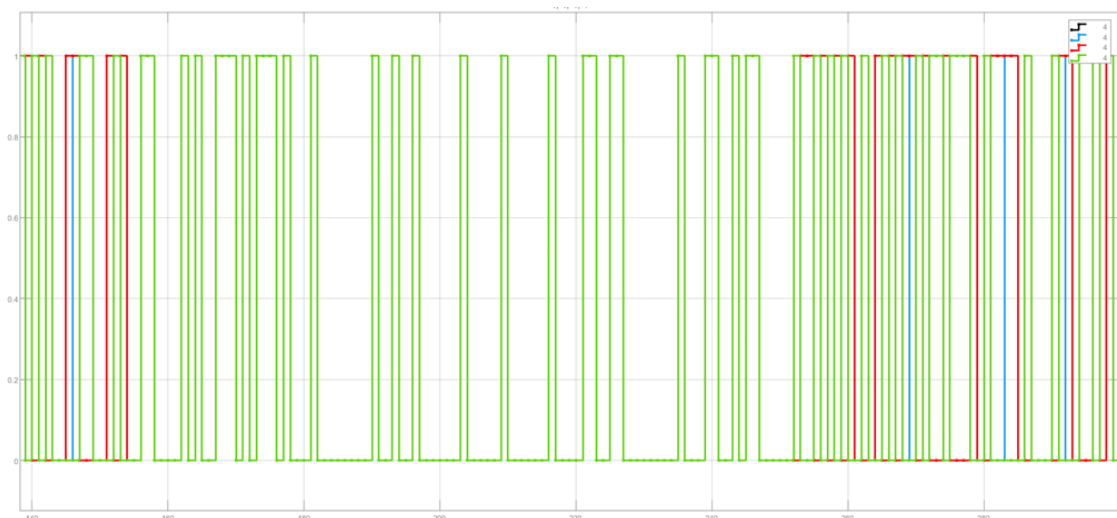


Fig. 3.20. Deformări critice

Ca consecință, la ieșirea sistemului vor fi semnalate momentele de timp în care valorile deformațiilor generate de modelul la care sunt aplicate datele vitezei vântului cu rafala depășesc valorile deformațiilor generate de modelul la care sunt aplicate datele vitezei vântului fără rafale (Fig. 3.20).

În consecință, impactul rafalelor este vizibil pe diagrama de deformare în punctele de interes (Fig. 3.21). Astfel de modificări rapide în deformare de fapt este un element de provocare a proceselor de vibrații în structura palei care grăbește procesul de degradare și într-un final poate aduce la rupturi.

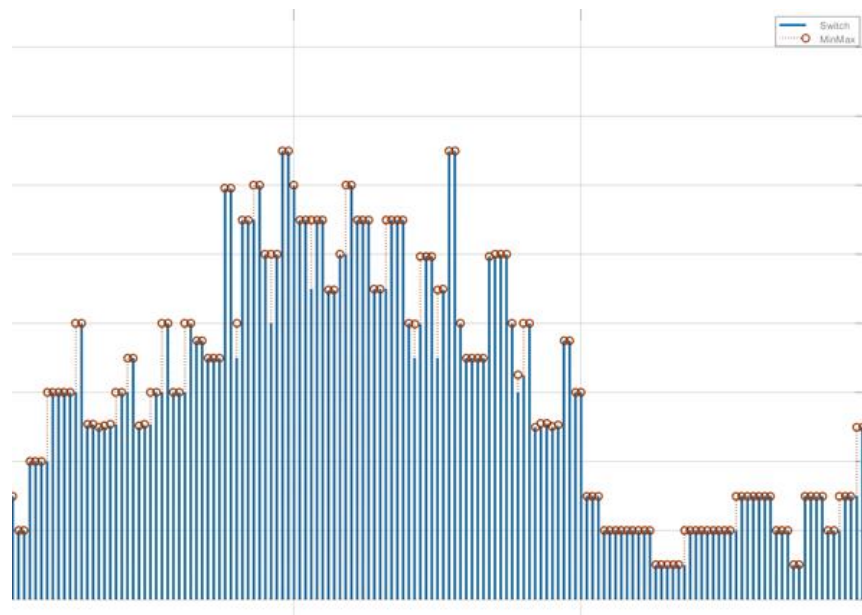


Fig. 3.21. Depășirea valorilor nominale de deformare

Pentru implementarea algoritmului de monitorizare a deformațiilor (Fig. 3.9) a fost elaborat mecanism de identificare a regimurilor critice de funcționare - Fig. 3.22. În acest context este foarte important de ținut cont de comportamentul dinamic al forțelor care acționează asupra palelor și comportamentul relativ previzibil al deformațiilor în dependență de intensitatea vântului.

Pentru detectarea deformațiilor critice este importantă citirea deformațiilor în regim real. În acest sens la intrările Eps1-Eps4 din Fig. 3.22 se aplică deformațiile calculate cu ajutorul DCIcMa din Fig. 2.8 pentru SMF.

Bazându-ne pe ANN elaborat în contextul algoritmului de mentenanță predictivă din Fig. 3.15 și pe studiul comportamentului deformațiilor în dependență de rafalele de vânt putem pune în aplicare un mecanism de comparare a deformațiilor curente cu cele aplicate.

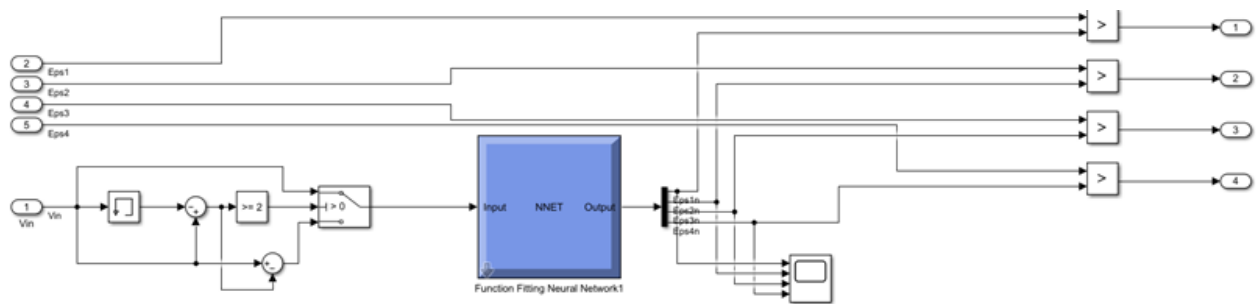


Fig. 3.22. Modelul de detectare a deformațiilor critice

Pentru aceasta datele despre viteza vântului sunt aplicate la intrare V_{in} și utilizând mecanismul simplu de identificare a rafalelor utilizat în Fig. 3.22 aplicate la intrarea rețelei neuronale *Function Fitting Neural Network 1*. În continuare datele reale sunt comparate cu cele estimate de către rețeaua neuronală.

3.6 Concluzii la capitolul 3

Materialul prezentat în capitol oferă o abordare exploratorie și preliminară a problemei monitorizării stării palelor turbinelor eoliene. În acest context, detectarea solicitărilor mici și interne devine posibilă folosind senzori de deformare fără contact încorporați în pală. Abordarea propusă poate oferi o bază pentru evaluarea fezabilității construirii unui CMS inteligent. Ca urmare, ar putea apărea o nouă oportunitate de mentenanță predictivă a fermelor WT.

În general, fiecare turbină eoliană are un comportament individual în ceea ce privește deformarea palelor. Utilizarea ANN pentru a modela comportamentul la deformare a palelor turbinelor eoliene poate fi o abordare eficientă cu un mare potențial de a monitoriza starea structurii palelor și de a prezice posibila degradare a acesteia. Cadrul propus pentru modelarea și predicția comportamentului deformării palei include două componente. În primul rând, deformațiile elastice dintr-o pală tipică trebuie modelate numeric. Cu acest scop a fost luat în considerare un rotor al unei turbine eoliene de 1,5 - 3,0 MW. Gama de viteze nominale a vântului a fost de la 6 la 20 m/s. Scopul modelării numerice este de a determina și analiza valorile deformațiilor echivalente în funcție de viteza vântului. Au fost luate în considerare patru puncte de interes pentru care s-a făcut analiza deformațiilor elastice. În al doilea rând, a fost dezvoltat un model de sistem de mentenanță, bazat pe prezicerea tendinței de deformare a palei folosind ANN. Pentru a modela comportamentul de deformare al palei, a fost dezvoltată o rețea neuronală artificială cu o intrare în stratul de intrare, zece neuroni în stratul ascuns și patru neuroni în stratul de ieșire. În al treilea rând a fost elaborat un model de simulare a deformațiilor neprevăzute, care nu corespund deformațiilor elastice

calculate reieșind din viteza curență a vântului. În contextul recentelor cercetări [93] această situație poate să influențeze procesul de degradare a structurii palei turbinei eoliene.

Rezultatele experimentale preliminare obținute demonstrează viabilitatea abordării propuse și dezvoltate în acest capitol. Această concluzie avansează posibilitatea dezvoltării modelului propus pentru aplicații care utilizează senzori de deformare fără contact încorporați în paletelile turbinei. În acest sens, un DCIcMa combinat cu un ANN va avea mijloacele de a colecta și transmite propriile seturi de date pentru antrenament. Cercetările ar trebui continuate pentru a construi și testa modele adecvate și algoritmi AI pentru a prezice valori specifice de deformare în funcție de, dar fără a se limita la, viteza vântului. În acest context, o problemă aparte se referă la căutarea unei formule corespunzătoare pentru a exprima stresul cumulativ, ca rezultate a vibrațiilor induse (din cauza rafalelor de vânt sau degradării altor părți componente a turbinei eoliene) sau a altor factori de mediu.

Sistemele și soluțiile expuse în acest capitol se bazează pe posibilitățile tehnologice ale industriei microelectronice, de telecomunicații și software contemporane. În mare parte accentul pe calculul la margine este o consecință a exploatării eficiente a funcționalităților extinse accesibile în majoritatea SI, care astfel a deschis noi orizonturi în prelucrarea și stocarea datelor, evaluarea lor pentru procese decizionale complexe. Desigur, acum două decenii era cu totul altă situație, chiar dacă era posibilă dezvoltarea IoT, erau și multe limitări. Caracterul soluțiilor tehnice în cazul sarcinilor complexe era prin centralizarea calculelor, ceea ce în mod inevitabil a adus la extinderea paradigmei de Cloud. SI în mare parte erau orientate spre colectarea datelor sau implementarea unor algoritmi de control de complexitate limitată. Sistemele de monitorizare și control avansate utilizau alte dispozitive aferente sau se bazau pe platforme HW complexe, cu grad de integrare ridicat în sisteme mecatronice. Deseori, realizarea unor sisteme fiabile cu măsurări și control precise necesita o proiectare minuțioasă a întregului sistem: a componentelor mecanice, electrice, electronice și software.

4. MONITORIZARE ȘI CONTROL FĂRĂ CONTACT A PENDULULUI

4.1 IoT în educație ca domeniu prioritar

Accesul la internet, și în special conexiunea la internetul fără fir, a îmbunătățit comunicarea cu studenții. Aici, IoT intră în forță prin aspectul de inovație și improvizație a procesului educațional. IoT a contribuit în mod deosebit în diverse industrii, cum ar fi automatizarea inteligentă a locuinței, utilaje interconectate, telefoane inteligente, învățământ la distanță etc. În plină dezvoltare competitivă a aplicațiilor educaționale, fiecare instrument care ajută studenții să activeze și să implementeze informații face parte din IoT, și respectiv face parte dintr-o practică pedagogică solidă. Instituțiile de învățământ au nevoie de o cantitate semnificativă de energie în sediul lor pentru a-și alimenta infrastructura și pentru a menține diverse utilități. Ele își vor putea reduce consumul de energie din contul automatizării proceselor, astfel pot fi economisiți bani, timp și efort folosind soluții IoT.

Importanța IoT în domeniul educației este imperativă prin faptul că aspectul educației este inclus în numeroase conferințe cu tematică de electronică, telecomunicații, tehnologii emergente. Instituțiile de învățământ pot folosi sisteme IoT automatizate avansate, în programele lor de cercetare și studiu dedicate unor domenii precum inginerie, medicină etc. Sistemele IoT nu numai că le pot oferi studenților posibilitatea de a învăța conceptele cu tehnologii avansate, ci poate oferi și instructorilor posibilitatea de a-și crește eficiența. Pentru a accelera inovația, aceștia pot folosi, de asemenea, capacitățile AI și ML pentru a conecta baze de date, pentru a obține înțelegere și pentru a examina datele colectate [6].

În Capitolul 1 a fost menționată importanța IoT în educație. Impactul IoT asupra acestui domeniu este valorificat atât prin modelele noi didactice cât și prin esența sa, oferind studenților și elevilor oportunitatea de a dezvolta direcții noi aplicative și a îmbunătăți soluțiile existente. În capitolul 2 a fost descrisă metoda optică de măsurare a diametrului miezului microfibrului [73]. La baza dezvoltării acestei metode stă experiența acumulată în proiectele dezvoltate în cadrul Laboratorului de Micro-Optoelectronică. Activitățile științifico-didactice comune cu alte departamente de la Universitatea Tehnică din Moldova au evidențiat și alte direcții de implementare a dispozitivelor de calcul la margine care implementează metode de măsurare și control fără contact. Chiar dacă implementările inițiale erau orientate spre medicină și industrie care la moment prezentau interes major, dezvoltarea tehnologiilor de comunicare și experiența acumulată au prezentat un fundament semnificativ pentru a contribui la proiecte cu impact major în educație.

Procesul de studiu presupune însușirea cunoștințelor teoretice la diverse obiecte prin efectuarea exercițiilor practice de măsurare și calcul în baza măsurărilor efectuate. Acest proces interactiv de studiu poate fi valorificat prin utilizarea diverselor dispozitive moderne de calcul la margine cu conectare la tablete, calculatoare sau platforme Cloud. Spre exemplu, reușita a multor experimente relevante pentru cursul fundamental de fizică depinde de calitatea echipamentelor și soluțiile tehnice folosite pentru efectuarea măsurărilor. Astfel, cu scopul îmbunătățirii industriei educației, o provocare din punct de vedere științific și ingineresc este realizarea monitorizării și controlul pendulului Foucault.

După cum se cunoaște, pendulul Foucault inițial a fost utilizat pentru a demonstra că pământul se rotește în jurul axei sale. Un astfel de sistem reprezintă un model de utilizare a dispozitivelor de calcul la margine cu resurse limitate, care prin soluțiile tehnice bine gândite, oferă posibilitate de implementare a metodelor de măsurare și control fără contact, capabile să facă față provocărilor moderne IoT în domeniul educației.

Cu ajutorul pendulului Foucault se poate de monitorizat și alte fenomene astronomice, care necesită foarte mult timp. Deci un impediment în acest sens este faptul că, în mod natural, datorită pierderilor de energie la expunerea în mediul real, amplitudinea pendulului se micșorează până la oprirea lui totală. Pentru ca un pendul să mențină o valoare constantă a amplitudinii, este necesar ca oscilațiile să fie armonice, într-un sistem ideal, în care nu sunt pierderi de energie. Prezența aerului în mediul în care oscilează pendulul, oscilațiile cărui sunt armonice, este factorul determinant în atenuarea amplitudinii. Pentru a soluționa problema atenuării amplitudinii sa propus un sistem bazat pe principiul calculului de margine. Sistemul a fost elaborat pentru a măsura regimul de lucru [108, 109] și a menține amplitudinea pendulului Foucault [110, 111, 112] instalat în incinta UTM. Rezultatele au fost prezentate în [113, 114, 115, 116].

4.2 Metodele și procedurile aplicate

Deoarece pendulul Foucault oscilează în condiții reale în care sunt prezenți mai mulți factori externi care duc la atenuarea amplitudinii să presupunem că:

$$\Delta E_{pend} = E_{comp} \tag{4.1}$$

Unde ΔE_{pend} – pierderea energiei pendulului pentru o perioadă, E_{comp} – energia transmisă pendulului într-o perioadă pentru a compensa pierderile. În astfel de condiții pendulul își va menține amplitudinea dorită.

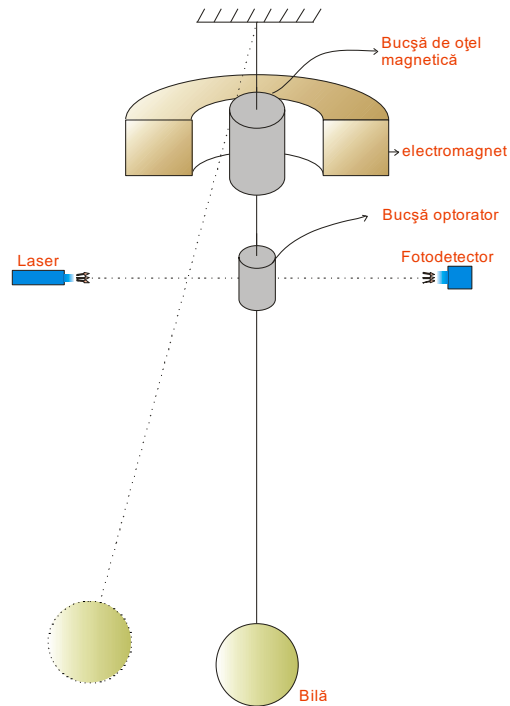


Fig. 4.1. Metoda de măsurare a amplitudinii pendulului Foucault

În cazul pendulului Foucault amplasat în condiții reale, de mizat pe presupunerea de mai sus (4.1) ar fi o greșeală enormă, pentru că atât pierderile de energie cât și sistemul de compensare a energiei depind de o mulțime de factori secundari cum ar fi: amplitudinea curentă, densitatea aerului, temperatura, umiditatea, tensiunea de alimentare pentru sistemul de compensare e.t.c. În cele din urmă relația este:

$$\Delta E_{pend} \neq E_{comp} \quad (4.2)$$

Pentru a menține amplitudinea relativ constantă este necesar ca:

$$\Delta E_{pend} < E_{comp} \quad (4.3)$$

Și atât timp cât $A > A_{max}$ (A - amplitudinea), să deconectăm sistemul de compensare – $E_{comp}=0$.

Pentru a măsura amplitudinea pendulului s-a stabilit următoarea metodică: pe firul de suspensie este plasat o bucșă (Fig. 4.1), la fiecare oscilație a pendulului bucșa amplasată pe fir acoperă fototranzistorul (fotodetectorul), măsurând durata de timp cât fototranzistorul este închis (care este proporțională cu viteza bucșei) putem măsura și amplitudinea pendulului, deoarece perioada de oscilație, indiferent de viteza bilei, rămâne constanta [117].

Viteza bucșei se determina conform expresiei:

$$V = A\omega \cos(\omega t) \quad (4.4)$$

Unde A – amplitudinea, ω – viteza unghiulară. Conform metodicii de măsurare, poate fi determinat timpul de trecere prin punctul normal de suspensie, unde bila are viteză maximă, componenta $\cos(\omega t) = 1$, deci [118]:

$$V = A\omega = A * 2\pi/T \quad (4.5)$$

Viteza bușei la trecerea prin punctul normal de suspensie V_{opt} va fi:

$$V_{opt} = d/t \quad (4.6)$$

unde: d – diametrul bușei, t – timpul de trecere a bușei prin fascicolul de lumină laser.

Pentru sistemul de măsurare este adevărat raportul:

$$\frac{V}{V_{opt}} = \frac{l}{L} \quad (4.7)$$

Unde: l – distanța între punctul de suspensie și fascicolul de lumină; L – lungimea firului de suspensie pentru pendul. La înlocuirea **Error! Reference source not found.** în (4.7):

$$V = \frac{d \cdot l}{t \cdot L} \quad (4.8)$$

Se obține formula de calcul a amplitudinii prin înlocuirea (4.8) în (4.5):

$$A = \frac{d \cdot L \cdot T}{2\pi \cdot l \cdot t} \quad (4.9)$$

Pentru oscilații armonice, perioada T poate fi calculată:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}} \quad (4.10)$$

Pendulul Foucault, datorită forței Coriolis, își schimbă planul de oscilație datorită rotației pământului în jurul axei sale. La poli, pendulul Foucault își schimbă planul de oscilație cu 360° , la ecuator rămâne neschimbat, iar la latitudinea la care se află pendulul în incinta blocului 1 al UTM, cu aproximativ 261° [119].

Metoda folosită la calculul amplitudinii constă în utilizarea unor seturi de perechi *Laser-Fotodetector*. Orientându-ne la t cel mai scurt vom putea calcula amplitudinea cu o anumită eroare.

Reieșind din obiectivele și funcționalitățile planificate pentru sistemul elaborat, este necesar de menținut amplitudinea la valoarea de 1.2 m, cu o eroare de 3 cm. Este evident faptul că cu cât numărul de senzori va fi mai mare, cu atât eroarea va fi mai mică. S-a stabilit ca pentru proiectul eroarea relativă a amplitudinii trebuie să se încadreze în $\pm 2,5\%$.

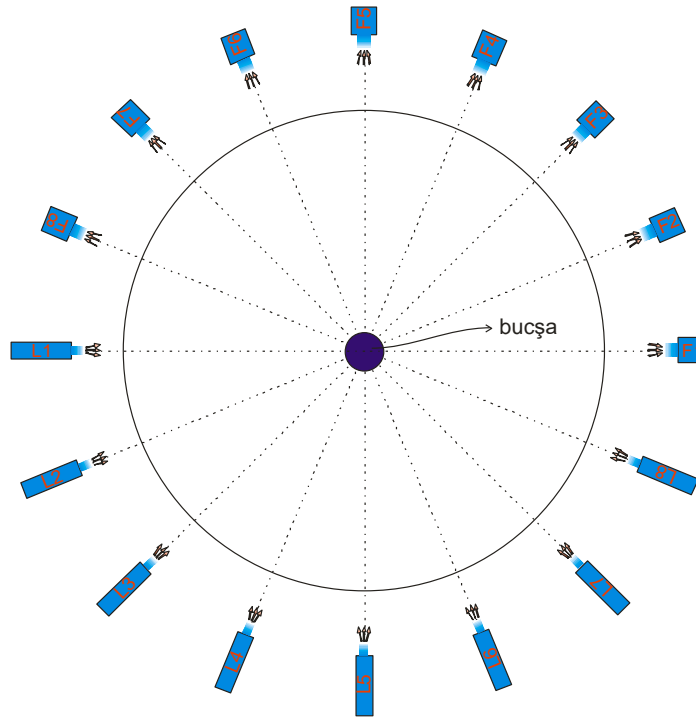


Fig. 4.2. Schema de plasare a perechilor Laser-Fotodetector

Când fascicolul de lumină laser este abătut de la normala planului de oscilație al pendulului, amplitudinea reală a pendulului va fi:

$$A_{real} = K * A_{calculat} \quad (4.11)$$

Sau :

$$A_{real} = A_{calculat} / \cos \varphi \quad (4.12)$$

unde: φ – este unghiul de abatere de la normala planului de oscilație. În cazul în care vom folosi 8 perechi *Laser-Fotodetector*, unghiul între doi senzori va fi de $22,5^{\circ}$, prin urmare φ_{max} de abatere de la normală a fascicolului de lumină cel mai apropiat va fi $11,25^{\circ}$ (Fig. 4.2).

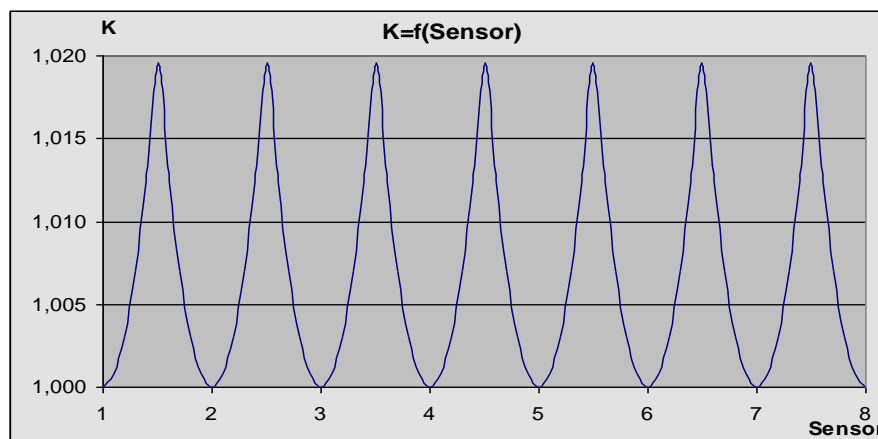


Fig. 4.3. Schimbarea coeficientului de eroare K

Prin urmare coeficientul K va fi aproximativ egal cu 1,02 , ceea ce va impune o eroare relativă de $\pm 2\%$ (Fig. 4.3).

Blocurile de măsurare și control reprezintă un set de dispozitive ce include microcontrolere ATMEL și au fost proiectate pentru a ajuta utilizatorul în cadrul ajustării sistemului de măsurare, de a executa funcția de măsurare a timpului de trecere a obturatorului prin intersecția fasciculelor de lumină (Fig. 4.4). Dispozitivul de calcul de margine oferă un set de funcționalități de măsurare, comunicare, sincronizare pe întreg sistemul Pendul Foucault.

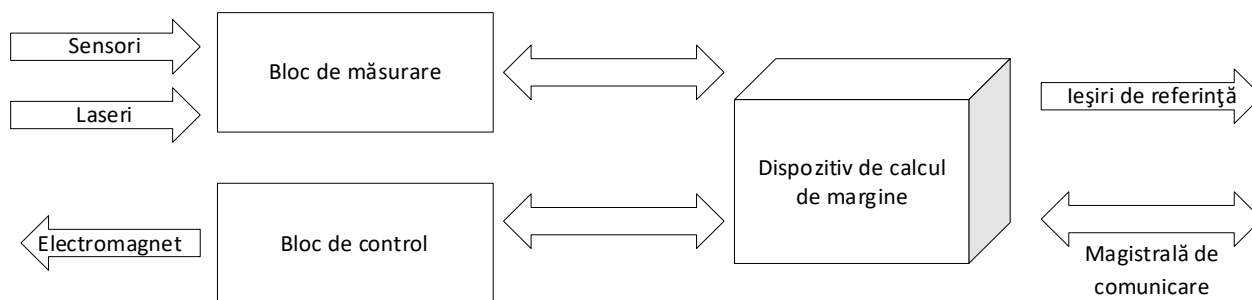


Fig. 4.4. Structura sistemului de măsurare și control cu pendulul Foucault

Deoarece este necesară conectarea laserilor practic în momentul trecerii obturatorului prin fascicule, putem ridica esențial timpul de viață a laserelor deconectându-le când pendulul este abătut de la poziția normală de suspensie. Situația deconectării laserilor este tratată de setul de senzori în mod similar cu acoperirea lor. De aceea funcția suplimentară executată de bloc, este măsurarea corectă concomitent cu funcția de ridicare a timpului de viață a laserilor.

Ieșirea de referință reprezintă rezultatul măsurării timpului de trecere a obturatorului prin fasciculul laser, maxim apropiat, de normala la planul de oscilație a pendulului Foucault. În continuare acest rezultat va fi folosit pentru calcularea aproximativă a amplitudinii.

Magistrala de comunicare este utilizată pentru implementarea unui set de funcții adăugătoare necesare sistemului. Funcția cea mai importantă este ridicarea preciziei de măsurare a amplitudinii. Aceasta se realizează pornind de la faptul că $A_{calculat}$ este utilizat pentru estimarea A_{real} prin calcule. În același timp măsurările efectuate de către sistem pot fi transmise în Cloud pentru a fi prelucrate, stocate și utilizate ulterior pentru calcule astronomice.

Pentru menținerea oscilațiilor pendulului s-a utilizat un electromagnet toroidal (Fig. 4.1). La aplicarea tensiunii continue bușca magnetică este atrasă de electromagnet, astfel introducând energie mai mare decât totalul de energie pierdută de pendulul Foucault. Însă deoarece forța de atragere a bușcii de către electromagnet tinde către infinit cu micșorarea distanței [120] se conturează următoarele probleme majore:

- risc ca bușca magnetică să se lipească de electromagnet deoarece ea este montată pe un fir flexibil;
- în cazul aplicării unei tensiuni insuficiente electromagnetului exista posibilitate ca energia introdusă în sistem să fie insuficientă pentru a compensa pierderile;
- deoarece bușca magnetică este montată pe un fir flexibil, în cazul aplicării unei forțe cu caracter aspru există riscul ca firul să intre într-un regim de oscilații transversale care poate afecta atât măsurarea amplitudinii cât și să sporească riscul de „lipire” a bușei de magnet.

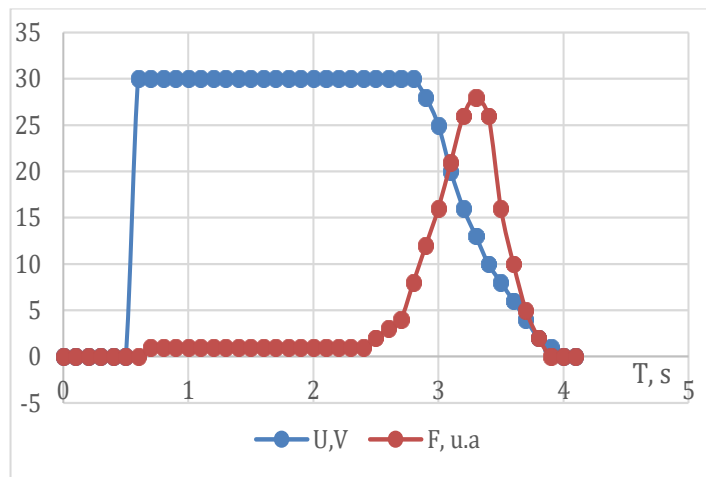


Fig. 4.5. Caracteristica forței aplicate pendulului

În contextul riscurilor și problemelor expuse mai sus, s-a decis să nu fie aplicată forță bușei magnetice atunci când pendulul se află în imediata apropiere a punctului normal de suspensie, în regiunea unde se activează regimul de măsurare a amplitudinii. Un alt aspect important este aplanarea forței aplicate bușei în dependență de distanța până la electromagnet.

În Fig. 4.5 este prezentat un model a semnalului de control pentru aplicarea tensiunii electromagnetului (U) și rezultanta forței aplicate (F) bușei pendulului. Însă această forță depinde și de remanența magnetică a electromagnetului care în condiții reale sporește riscul de „lipire” a bușei de magnet, fapt ce a impus necesitatea unei adaptări a caracteristicii semnalului de control [121].

4.3 Achiziții de date si metode de comunicare

Pendulul Foucault oscilează într-un plan vertical care-și schimbă orientarea odată cu rotirea Pământului. În punctul de suspensie a pendulului se duce o normală până la suprafața podelei. În acest punct se construiește un cerc cu diametrul amplitudinii maxime a pendulului.

Sarcina de bază a instalației date este de a oferi cât mai multă informație referitor la starea pendulului Foucault atât sub formă vizuală cât și digitală:

- rotirea planului de oscilație;

- amplitudinea oscilațiilor;
- perioada oscilațiilor

În acest sens bază informativă constituie coordonatele planului de oscilare ale pendulului Foucault. Forma vizuală de indicare a planului de oscilație a pendulului este semnalată cu ajutorul unor puncte luminoase amplasate pe discul cu numere, iar forma digitală se obține prin transmiterea informației la calculator de către o unitate de procesare.

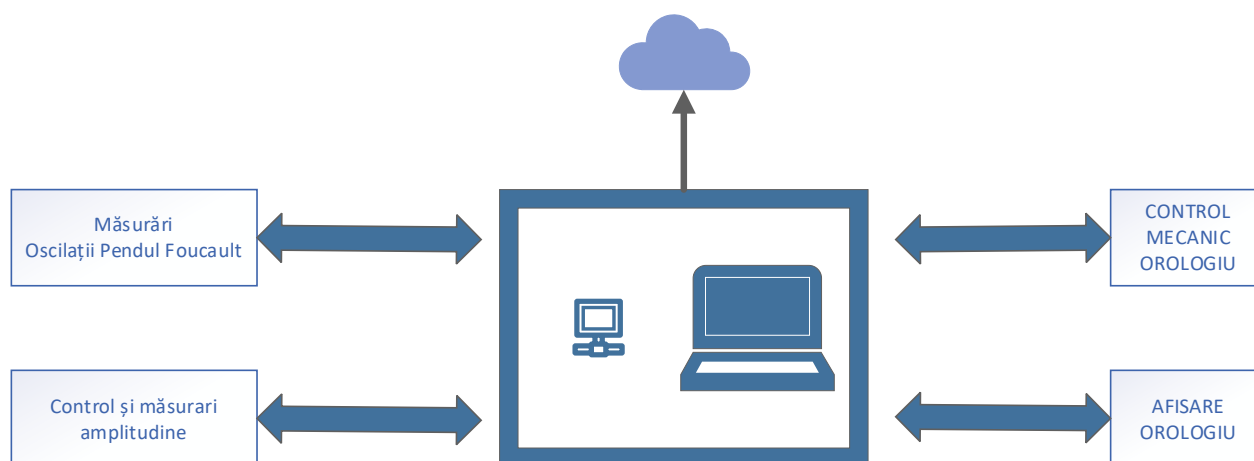


Fig. 4.6. Arhitectura orologiului gravitațional

În conformitate cu sarcina, a fost elaborat următorul concept pentru orologiul gravitațional în baza pendulului Foucault (Fig. 4.6). Acest concept presupune conectarea instalației la un sistem Cloud pentru a extinde funcționalitățile și posibilitățile de măsurări astronomice ale pendulului Foucault. În acest context, în primă instanță accesul la serviciile de Cloud poate fi efectuat prin intermediul unui calculator. Totodată acest calculator îndeplinește și funcția de interconectare și sincronizare a tuturor subsistemelor relevante ale instalației cum ar fi :

- sistemul de măsurări ale oscilațiilor pendulului;
- controlul și măsurarea amplitudinii;
- controlul mecanic a platformei orologiului;
- afișare date orologiu;
- alte subsisteme adiționale.

Sistemul folosește o magistrală unică pentru toate perifericele pendulului Foucault. Interconectarea între module poate fi realizată prin intermediul unei magistrale asincrone adresabile. La nivel fizic această interconectare a fost realizată prin intermediul convertoarelor TTL-RS485.

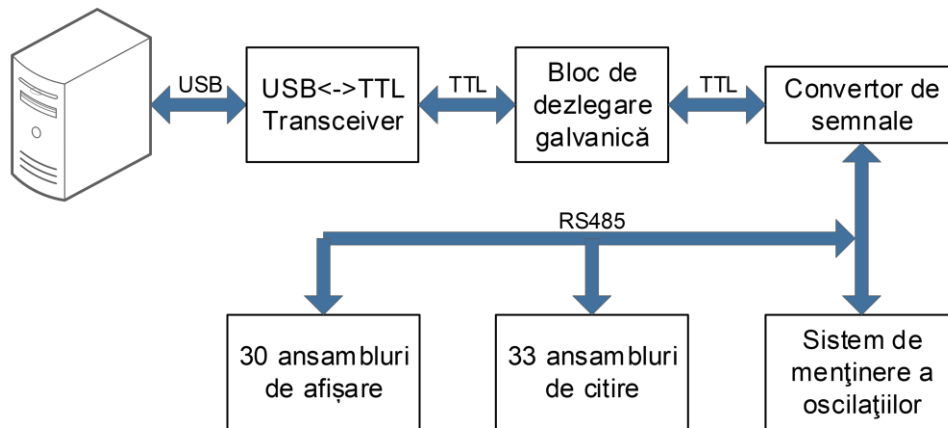


Fig. 4.7. Structura perifericilor pendulului Foucault

Magistrala de tip RS485 oferă o fiabilitate ridicată de transmitere a datelor care utilizează metoda de transmite prin inversie de semnal, cu dezlegare galvanică prin intermediul oglinzilor de curenți. Acest procedeu sporește fiabilitatea transmiterii datelor deoarece nu permite trecerea zgomotului prin liniile de alimentare.

Pentru o gestionare mai comodă a sistemelor pendulului de la calculator, am folosit porturile USB pentru conectarea perifericilor. Recepția și transmiterea datelor prin intermediul USB la o magistrală asincronă adresabilă a fost realizată cu un USB<->RS485 transceiver. Datorită simplității în utilizare și suportului soft avansat am utilizat circuitele FT232RL ale companiei FTDI Chip. Aceste circuite au port asincron și pini cu destinație specială, care pot fi utilizați la implementarea unei magistrale RS485

Pe perimetrul zonei de oscilare sunt amplasate 33 de „felinare” tricolore cu traductor magnetic (Fig. 4.9). Acestea reprezintă un ansamblu mecanic alcătuit din sticlă organică în trei culori, cu capac din aluminiu în interiorul căruia este instalat un dispozitiv de calcul la margine – în continuare va fi numit ”ansamblu de citire”. Pe perimetru zonei de oscilare mai sunt instalate 30 de ”felinare” suplimentare care reprezintă un ansamblu alcătuit dintr-un corp din sticlă organică semitransparentă și un dispozitiv de calcul la margine – ”ansamblu de afișare”. Informația oferită de traductori este indicată cu ajutorul ansamblurilor de afișare.

Poziția planului de oscilație a pendulului este determinată cu ajutorul ansamblurilor de citire amplasate pe perimetrul zonei de oscilare a pendulului. În interiorul fiecărui ansamblu de citire este amplasat un traductor care își schimbă starea la intrarea pendulului în zona ansamblului de citire. Tot în interiorul ansamblului de citire există un emițător multicolor comandat care indică poziția planului de oscilare. Ansamblul de citire de fapt reprezintă un sistem integrat individual.

4.3.1 Măsurarea și controlul pendulului

În contextul sarcinii de compensare a pierderilor de energie a pendulului Foucault a fost elaborat un algoritm de măsurare a amplitudinii și perioadei, de control a amplitudinii (Fig. 4.8).

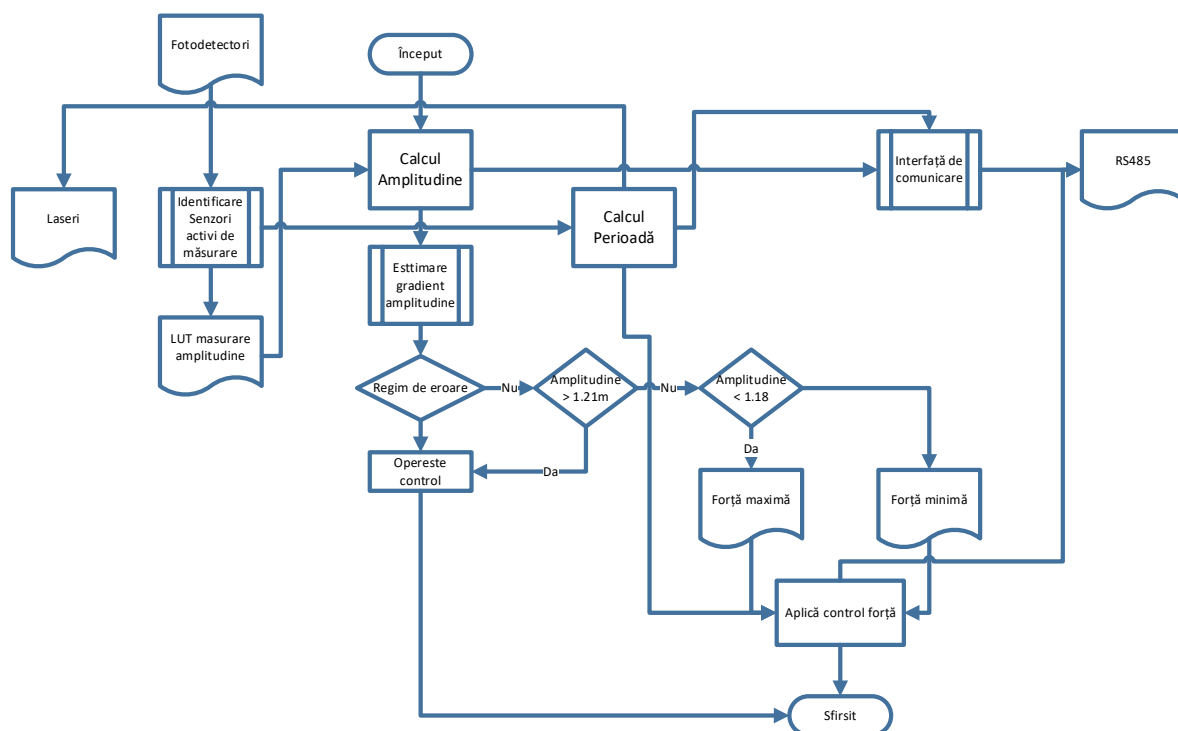


Fig. 4.8. Diagrama de control și măsurare a amplitudinii

Modelările de calcul a amplitudinii pendulului (Fig. 4.3) au sugerat necesitatea implementării unui algoritm dedicat pentru măsurare. Componenta SW care măsoară timpul de acoperire a semnalului optic emis de laser de către obturatorul optic, calculează cel mai scurt timp τ_{ref} pentru a identifica cea mai apropiată pereche laser-fotodetector de perpendiculara planului de oscilație a pendulului. Reieșind din **Error! Reference source not found.** alți factori externi (F_{ext}) amplitudinea reală poate fi calculată conform formulei:

$$A_{real} = F_{ext} \times f(\tau_{ref}) \quad (4.13)$$

unde $f(\tau_{ref})$ reprezintă valoarea calculată a amplitudinii. Deoarece microcontrolerul utilizat nu oferea performanțe ridicate fiind lipsit de modulul de calcul în virgulă mobilă, a fost utilizat un LUT care oferă posibilitatea de calcul a valorii amplitudinii cu o eroare de 1%, conform factorilor externi din mediul real.

Componenta SW care măsoară τ_{ref} în același timp oferă datele necesare pentru modulul de calcul a perioadei P a pendulului. Modulul de calcul a perioadei reprezintă un important nod în procesul de control a amplitudinii, îndeplinind mai multe funcții:

- de informare despre perioadă pentru întreg sistemul pendul Foucault;

- generare a semnalului de control pentru laseri;
- sincronizare a semnalului de control pentru compensarea pierderii amplitudinii;

Semnalul de control pentru laseri este utilizat pentru deconectarea laserilor. Regimul de deconectarea a laserilor este activat dacă sunt întrunite următoarele condiții:

- obturatorul optic este în afara zonei de acoperire a fasciculelor perechilor laser-fotodetector optime pentru măsurarea amplitudinii;
- nu sunt depistate erori ale regimului de măsurare a amplitudinii;
- amplitudinea pendulului este în zona optimă de compensare a pierderilor;

Algoritmul de deconectare a fost setat astfel în cât timp de 4 secunde laserii pot fi deconectați. Acest lucru a adus la majorarea semnificativă a perioadei de exploatare a platformei optice de măsurare (Fig. 4.2).

Este evident că pentru funcționarea corectă a regimului de compensare a pierderilor este necesară utilizarea unui semnal de sincronizare care ar activa electromagnetul conform semnalului de control calculat (Fig. 4.5) astfel încât semnalul de control pentru electromagnet să fie sincronizat cu perioada pendulului.

În contextul diagramei de control din Fig. 4.8, bucla de control pentru electromagnet are 3 regimuri de lucru:

- aplicare de forță maximă corespunzătoare amplitudinii (1,10-1,18m);
- aplicare forță de menținere a oscilațiilor (1,18-1,21m). Reprezintă o caracteristică modificată a semnalului de control (Fig. 4.5), astfel încât se obține o rampă mai abruptă a fazei de descendență inițială a semnalului de control;
- deconectarea electromagnetului. Acest regim corespunde cu situația când pendulul atinge valoare maxim admisibilă a amplitudinii sau conform măsurărilor a fost identificat regimul de eroare.

O importanță majoră are detectarea regimului de eroare pentru măsurarea amplitudinii [108]. Contextul unei abordări specifice în acest sens sunt limitările mecanice foarte stricte a platformei mecanice cu electromagnet. În regim de amplitudine maximă, în dependență de remanența magnetică a bușei atrase de electromagnet, sau stabilității rețelei de alimentare a electromagnetului, forța reală aplicată pendulului poate să difere de cea estimată conform semnalului de control (Fig. 4.5). Ca consecință, în vecinătatea amplitudinii maxime, forța aplicată bușei magnetice tinde către infinit, și ca rezultat are loc “lipirea” bușei de electromagnet. După deconectarea electromagnetului, deoarece bușca magnetică este montată pe fir flexibil, va fi provocat un proces oscilant al firului în planul de oscilație a pendulului. Acest proces oscilant,

fiind transmis și bușei-obturator, va induce erori sporadice în procesul calcul, iar ca consecință amplitudinea calculată nu poate fi validată pentru includerea în bucla de control, și respectiv compensarea pierderilor oscilațiilor este stopată.

Regimul de eroare este identificat efectuând prima dată calculul amplitudinii după deconectarea electromagnetului. Deoarece perioada oscilației firului este foarte scurtă (<1sec) în comparație cu perioada pendulului, amplitudinea estimată este mult peste 1,21 – acest lucru aduce la invalidarea amplitudinii pe un timp echivalent cu o perioadă normală a pendulului. În acest timp oscilațiile firului se atenuează parțial, iar semnalul de control nu este aplicat electromagnetului.

Oscilațiile firului se atenuează un timp îndelungat (~60 sec) până la o valoare admisibilă pentru calculul amplitudinii în marja de eroare absolută de 1cm. În acest timp amplitudinea pendulului scade sub valoarea nominală de minim 1,18m. Pentru a reduce timpul regimului de eroare, bucla de control reia aplicarea semnalului de control pentru o semiperioadă, dar cu o forță redusă. Astfel energia acumulată în fir ca rezultat a procesului oscilației firului, este transmisă pendulului și în următoarea semiperioadă regimul de control cu forța aplicată de electromagnet revine la normal, conform amplitudinii calculate.

4.3 Performanță și fiabilitate

Unul din aspectele importante în elaborare unui SI este fiabilitatea. Inițial, pentru a reduce costurile, au fost utilizate în calitate de nucleu, microcontrolere cu performanță redusă care în același timp aveau în dotare și un set limitat de periferice. În acest context s-a decis implementarea software a magistralei sincrone I2C (sau TWI pentru unii producători de microcontrolere).

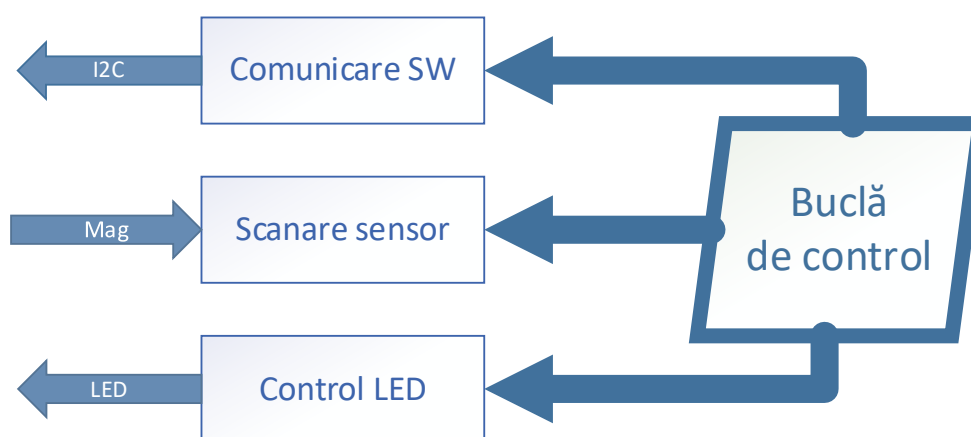


Fig. 4.9. Structura funcțională a SI periferic

În contextul performanțelor limitate ale microcontrolerelor au fost implementate următoarele funcționalități de bază pentru ansamblurile de citire (Fig. 4.9):

- Magistrală sincronă de comunicare (prioritate maximă);

- Scanare în regim real a senzorului magnetic (prioritate medie);
- Controlul cu emițătoarele tricolore LED (prioritate minimă);
- Bucla de control (implementare limitată a unui SO).

În contextul performanțelor limitate, implementarea software a magistralei I2C s-a dovedit a fi o decizie provocatoare. Microcontrolerul utilizat (PIC10F204), dispune doar de 256 cuvinte de program și implementarea magistralei adresabile, chiar dacă era de tip sincron, a consumat mai mult de jumătate de resursele disponibile. În același timp, din punct de vedere a resurselor de procesare, algoritmul la fel a consumat ~30% din resursele de procesare.

Restul resurselor s-au dovedit a fi suficiente pentru implementarea unui algoritm simplu de filtrare a semnalului citit de pe senzorul magnetic integrat, precum și pentru implementarea algoritmului de control cu emițătoarele LED.

Dispozitivul final reprezintă un cablaj cu elemente de centrare în capacul de aluminiu al ansamblului de citire pentru a identifica planul de oscilație a pendulului Foucault. Elementul sensibil este orientat spre centrul discului orologiului, astfel încât să fie asigurată detectarea oscilațiilor pendulului la o amplitudine minimă de 1,19m.

În timpul exploatarei în condiții reale, periodic se defecta portul de sincronizare al magistralei I2C care colecta datele de la ansamblurile de citire. S-au făcut eforturi suplimentare pentru a depista ce stă la baza acestei probleme, dar fără succes. Presupunând că străpungerea portului avea loc din cauza acumulării de potențial electrostatic pe firele de comunicare sau întreprins măsuri suplimentare de protecție a magistralei. Măsurile întreprinse nu au adus la nici o îmbunătățire.

Fiind evidentă problema potențialului de referință flotant datorită construcției și plasării firelor de comunicare s-a decis reorganizarea principiului de comunicare între dispozitive. Un element cheie este utilizarea circuitelor de dezlegare galvanică de tip RS485 care are ca consecință îmbunătățirea semnificativă a fiabilității.

Arealul de utilizare a circuitelor RS485 este pentru implementarea magistrelor asincrone și sincrone unidirecționale. Acest lucru presupune utilizarea de fire adiționale pentru a reutiliza implementarea anterioară. Din punct de vedere tehnic acest lucru devine imposibil în contextul limitelor mecanice ale platformei pe care sunt instalate ansamblurile de citire și afișare (Fig. 4.10).

În acest context s-a decis următoarele abordări pentru îmbunătățirea performanțelor și fiabilității:

- păstrarea construcției mecanice (platformă, cablaje și ansambluri);
- utilizarea magistralei de comunicare RS485 în regim half-duplex;

- utilizarea unui microcontroler mai performant care are în dotare modul HW de tip UART;
- îmbunătățirea rețelei de alimentare a ansamblurilor de citire;

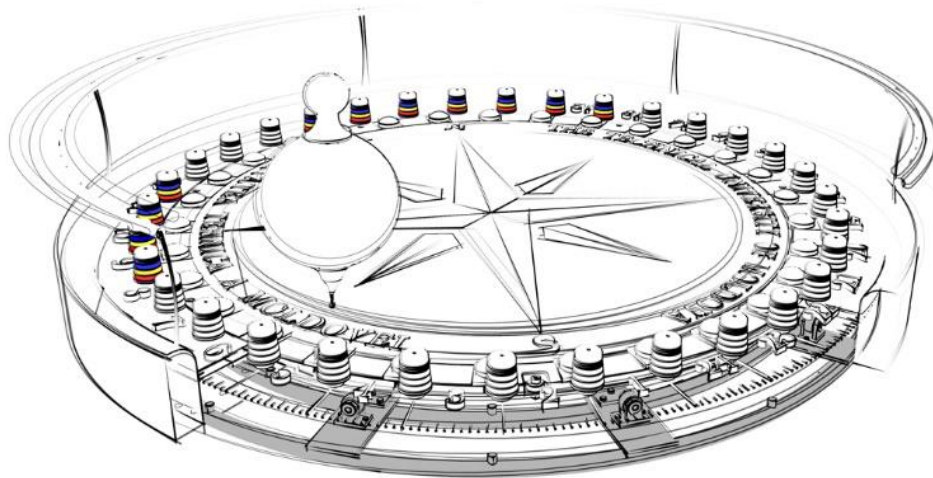


Fig. 4.10. Schema schiță a pendulului Foucault

Desigur că aceste noi abordări au adus și costuri noi dar fiabilitatea obținută este net superioară. În acest fel, din punct de vedere al procesului, a fost demonstrat că pentru dezvoltarea unui sistem integrat fiabil este absolut necesar de a utiliza la maxim componente HW integrate specializate.

În varianta finală de implementare a ansamblurilor de citire, a fost utilizată magistrală asincronă în regim half-duplex (Fig. 4.11). Deoarece a fost utilizat modul UART integrat în microcontroller, resursele de procesare nu au fost utilizate la maxim. În acest context, bucla de control s-a dovedit a fi mai simplă decât în varianta anterioară (Fig. 4.8), iar necesitatea prioritarii componentelor SW a dispărut.

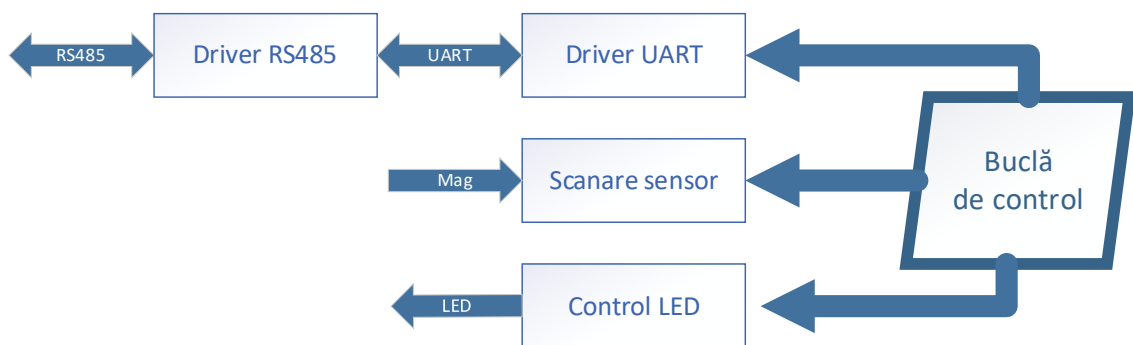


Fig. 4.11. Structura ansamblului de citire cu magistrală RS485

Prin intermediul magistralei de date a fost posibil de determinat poziției planul de oscilare al pendulului comunicând cu microcontrolerul situat în fiecare ansamblu de citire.

Cele 33 ansambluri de citire destinate indicării planului de oscilație a pendulului Foucault, sunt situate pe o platformă mobilă ce efectuează circa 50 de rotații în jurul axei sale pe an. Contactul magistralei de comunicare și alimentării ansamblurilor de citire se efectuează prin perii electrice amplasate pe perimetrul platformei mobile.

Ansamblurile de afișare, în număr de 30, sunt destinate pentru minute și au incluse dirijarea cu 2 emițătoare de lumină. Unul multicolor este folosit pentru iluminarea lentilelor emițătorului. Alt emițător – alb, este folosit pentru iluminarea inscripției „UNIVERSITATEA TEHNICĂ A MOLDOVEI” și a gradației mobile. Fiecare emițător constă din diode supraluminiscente de diferite culori. Alimentarea LED – urilor se face de la 17.5V curent continuu. Fiecare LED este comandat cu ajutorul unui tranzistor.

4.4 Concluzii la capitolul 4

Sistemul elaborat urmează paradigma modernă a calculului la margine și reprezintă o soluție perfectă pentru măsurări și control a amplitudinii pendulului Foucault. Datele de ieșire din sistem pot fi utilizate pentru analize primare a forței Coriolis, care acționează asupra pendulului, iar în acest sens sistemul poate fi conectat la servicii de Cloud prevăzute pentru măsurări astronomice. Sistemul poate detecta oscilațiile transversale a firului de suspensie dar pentru a diminua sau exclude influența acestui fenomen este necesară reproiectarea părții constructive a pendulului, și anume, dimensiunea și plasarea bușei magnetice. Pendulul elaborat împreună cu sistemul aferent bazat pe calcul la margine, reprezintă o soluție ieșită din comun față de alte pendule din regiune [122]. Rezultatul final implementează soluții moderne și are perspective de dezvoltare.

Având în vedere că sistemul a fost elaborat în intervalul 2007 – 2010, este evident că din punct de vedere tehnologic (microcontrolerele, circuitele digitale și analogice, componentele SW utilizate) acest sistem este învechit. Însă datorită abordărilor tehnice și resurselor investite sistemul reprezintă un model al fiabilității și designului sistemic chiar și la etapa contemporană.

În contextul tendințelor moderne orice sistem integrat este tratat prin prisma dezvoltării de componente software și utilizării lor în contextul unui RTOS. Acesta de fapt duce la o penetrare scăzută a analizei de programare în procesele de dezvoltare a software-ului industrial pentru rețele de dispozitive. Cu toate acestea, în domenii izolate, astfel de rețele care funcționează în timp real există [123]. Un exemplu bun în acest sens reprezintă sistemul dezvoltat pentru pendulul Foucault. În mod consecvent, dezvoltarea sistemului a presupus următoarele aspecte:

- mentenabilitate a sistemului ;
- scalarea sistemului;

- performanță în contextul sarcinilor ;
- reutilizare componente HW si SW;
- fiabilitate la nivel de sistem integrat și global;

Din punct de vedere a flexibilității platformei ”Pendul Foucault” față de un sistem modern, nu se întrușchipează tocmai toate tehnicile moderne de dezvoltare a SI. La nivel de HW desigur este preferințială utilizarea unei platforme existente (gen ARDUINO), dar în contextul limitărilor și restricțiilor impuse de platforma mecanică, acest lucru ar deveni imposibil.

Cu toate acestea, atât ansamblurile de citire cât și cele de afișare a perioadei reprezintă un model în contextul sarcinilor care le îndeplinește:

- detectarea planului de oscilație;
- indicarea dinamică a orei;
- indicarea dinamică a perioadei de oscilație.

Dispozitivele elaborate cu acest scop pot fi ușor adaptate pentru altă platformă datorită faptului că au fost utilizate elemente standard atât pentru indicatorii luminoși cât și pentru senzorii magnetici. Evident că în cazul necesității extinderii funcționale ar fi necesară o replanificare a platformei HW elaborate, însă efortul depus ar fi minim și ar depinde doar de numărul de LED-uri conectate și/sau nivelul de discretizare necesar pentru detectarea planului de oscilație al pendulului.

Microcontrolerele utilizate în SI elaborate, chiar dacă sunt destul de limitate în funcționalități în comparație cu dispozitivele prezente pe piață la zi, satisfac pe deplin sarcinile cu care se confruntă.

Un alt aspect din punct de vedere al mentenabilității reprezintă disponibilitatea bazei de elemente pe piață. Cel mai vulnerabil element din sistemul elaborat reprezintă microcontrolerul utilizat. Însă atât microcontrolerele utilizate pentru funcționalitatea de orologiu, cât și cele utilizate pentru compensarea pierderilor oscilațiilor sunt disponibile. Microcontrolerele de la cei doi producători utilizați la elaborarea sistemului, continuă colaborarea ca rezultat a fisiunii lor în 2016 [124], și oferă produse noi care au un grad de compatibilitate cu versiunile similare de microcontrolere scoase din producție sau care au o actualizare majoră.

Unul din aspectele importante a sistemului elaborat pentru pendulul Foucault este posibilitatea reutilizării a soluțiilor tehnice utilizate. Aici este foarte important de avut o înțelegere clară atât a posibilităților tehnice cât și a limitărilor sistemului.

Sub aspectul preciziei de detectare a poziției planului de oscilație cu ajutorul ansamblurilor de citire, este cel mai importantă proiectarea mecanică a discului pe care sunt plasate ansamblurile.

Este evident că atât distanța între ansambluri de citire/afișare cât și numărul de ansambluri care poate fi instalate pe discul de montare, este dependent de latitudinea geografică la care este instalat pendulul. Sub acest aspect constrângerile care pot interveni sunt de natură pur mecanică.

Sub aspect funcțional din punct de vedere a utilizării SI elaborate nu sunt restricții majore. Fiecare dispozitiv dispune de adresa sa unică care reprezintă o valoare de 8 biți în contextul magistralei adresabile utilizate. Deci teoretic este posibil de detectat o deplasare a planului de oscilație a pendulului Foucault chiar și pentru intervale de 10 minute, astfel utilizându-se doar maxim 144 de valori din spațiul de adrese disponibil. Însă atât limitările mecanice cât și obiectivele de evaluare a proceselor astronomice nu corespund cu astfel de precizie.

Un aspect funcțional modern care ține de dezvoltarea SI este utilizarea de bootloader [125]. Acest aspect este foarte important în contextul flexibilității sistemului: este foarte important ca orice SI să dispună de un mecanism de actualizare a firmware-ului. În contextului sistemului elaborat aceasta funcționalitate de bootloader ar permite utilizarea unui soft standard de actualizare a firmware-ului pentru a seta adresa individuală pentru fiecare element din sistem (ansamblu de citire, ansamblu de afișare, sistem de compensare, element de control cu ansamblurile, dispozitiv de gestionare cu sistemul).

Deoarece o parte din SI rulau pe microcontrolere cu posibilități limitate, iar unele din ele nu aveau spațiu dedicat pentru instalarea bootloaderului [125], a fost luată decizia de a nu utiliza bootloader ceea ce a adus la limitări de flexibilitate a firmware-ului instalat, și anume: pentru fiecare dispozitiv din sistem se compila un firmware dedicat și instalarea lui avea loc prin metode standard de flashing pentru microcontroller.

În contextul bazei de elemente pentru SI, la etapa actuală tot mai puțin se pune accentul pe performanța unităților de procesare utilizate. Fondul acestei abordări este de fapt integrarea în unitățile de procesare a diverselor funcționalități cu ajutorul unor periferice hardware. În mare parte microcontrolerele, în dependență de perifericele instalate, presupun utilizarea în anumite domenii specifice cum ar fi:

- sisteme AI : procesor vectorial matricial;
- DSP: sisteme inteligente și prelucrări de semnale;
- CPLD: prelucrări de semnale și control a proceselor e.t.c.

Rezultatul utilizării perifericelor prin alegerea corectă a microcontrolerului presupune ridicarea performanței întregului sistem astfel încât puterea de calcul a unității de procesare nu mai este la fel de importantă. Resursele disponibile în mare parte fiind utilizate fie pentru sarcini secundare, fie pentru implementarea unei arhitecturi mentenabilitate a sistemului elaborat.

În acest context distribuirea implementării protocolului de comunicare spre perifericele microcontrolerului, a adus la îmbunătățiri majore sub aspect de performanță în dispozitivele din sistemul pendul Foucault. Citirea datelor și estimarea planului de oscilație a pendulului a devenit mai precisă.

Anume utilizarea inteligentă a componentelor hardware disponibile în dispozitivul pentru menținerea amplitudinii pendulului Foucault a contribuit la calculul amplitudinii și implementarea buclei de control. Semnalele citite de pe senzorii optici sunt prelucrate cu ajutorul unui timer integrat și calculul amplitudinii depinde în totalitate de rezoluția timerului, care s-a dovedit a fi suficientă pentru a asigura o precizie de măsurare a amplitudinii de aproximativ 10mm. Această precizie raportă la lungimea pendulului de aproximativ 19m, a permis calcularea în regim real a amplitudinii pendulului.

Bucla de control a fost setată pentru a menține o amplitudine strictă în intervalul de [1100-1200]mm. Precizia de măsurare și algoritmul inteligent a buclei a permis implementarea următoarelor funcționalități pentru sistemul de control al amplitudinii:

- implementarea unui algoritm inteligent de aplicare a forței magnetice asupra pendulului;
- detectarea planului de oscilație;
- implementarea unui algoritm de invalidare a măsurărilor;
- ajustarea în regim real a forței aplicate în dependență de amplitudine;
- raportarea și comunicarea cu unitatea de control a sistemului.

CONCLUZII GENERALE

Concluziile generale asupra rezultatelor obținute în teză sunt după cum urmează:

1. A fost propusă o nouă metodă pentru construirea dispozitivelor cu senzori în baza microfirului cu înveliș din sticlă cu magnetostricție pozitivă, care permite măsurarea/monitorizarea fără contact a unor mărimi precum deformațiile corpurilor solide supuse la întindere, inclusiv a celor ireversibile, asigurând toleranță la poziționarea detectorului față de senzorul propriu-zis și creșterea semnificativă a distanței de detectare, până la 10-15mm [68, 70, 81] (Cap.2, §2.3, §2.5, Cap.3, §3.3).
2. A fost elaborată structura unui dispozitiv de calcul încorporat, cuplat cu senzor în bază de microfir cu rezistența la rupere prin tracțiune de până la sute de MPa, care permite construirea aparaturii de măsurare/monitorizare fără contact a deformațiilor corpurilor solide și/sau dezvoltarea aplicațiilor specifice în domeniul internetului industrial al lucrurilor IIoT sau internetului energiei IoE [69, 70] (Cap.2, §2.3, §2.5, Cap.3, §3.2, §3.3).
3. A fost propusă o metodă optică originală pentru măsurarea/monitorizarea online a parametrilor geometrici ai microfirului, în cazul grosimii învelișului din sticlă aceasta fiind unică, fapt care poate asigura omogenitatea firului, caracteristică esențială în fabricarea senzorilor de performanță pe bază de microfir [73, 75, 76] (Cap.2, §2.4, §2.5).
4. A fost propus și dezvoltat conceptul unui dispozitiv optoelectronic încorporat, care permite implementarea metodei optice propuse [74, 77, 78, 79, 80] (Cap.2, §2.4, §2.5).
5. Au fost elaborate modele de rețele neuronale artificiale cu implementare (deployment) pe structuri de calcul la margine, care permit dezvoltarea aplicațiilor de mentenanță predictivă în domeniul IoE, în particular a palelor turbinelor eoliene [69, 96, 102, 103] (Cap.3, §3.2, §3.3, §3.4).
6. Au fost dezvoltate modele Simulink cu înglobarea modelelor de rețele neuronale artificiale elaborate, care oferă o modalitate originală de modelare și cercetare a sistemelor de suport decizional inerent aplicațiilor de mentenanță predictivă a palelor turbinelor eoliene [103] (Cap.3, §3.3, §3.4).
7. A fost elaborat, implementat și dezvoltat un sistem încorporat pentru măsurarea și controlul amplitudinii pendulului Foucault, cu capabilități de comunicare cu medii inteligente de învățare, fapt care permite utilizarea sistemului pentru dezvoltarea aplicațiilor IoT în domeniul educației [108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116] (Cap.4, §4.2, §4.3).

RECOMANDĂRI

Direcții de cercetare de viitor:

1. Trebuie continuate cercetările, inclusiv experimentale, care țin de dezvoltarea dispozitivelor de calcul la margine cu senzori fără contact în baza microfîrului pentru a obține rezultate a măsurărilor reproductibile.
2. De asemenea, este de perspectivă continuarea lucrărilor de elaborare și cercetare a modelelor AI cu implementare pe dispozitive de calcul la margine, cu scopul de a dezvolta o posibilă aplicație de mentenanță predictivă a palelor turbinelor eoliene.
3. Dezvoltarea în continuare a modelelor Simulink în baza rețelelor neuronale artificiale, având în vedere o cale posibilă de estimare a factorului de stres cumulativ.
4. Este important de dezvoltat aspectul de securizare a datelor care sunt colectate de la dispozitive de calcul la margine ce efectuează măsurarea deformațiilor elastice în palele turbinelor. Acest aspect trebuie tratat prin prisma vulnerabilității datelor transmise prin undele radio.

BIBLIOGRAFIE

1. „Internetul obiectelor și viitorul tehnicii de calcul la margine în Europa,” 2022-06-28. [online]. [citat 2024-01-16]. Disponibil: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/ro/news/iot-and-future-edge-computing-europe>
2. MURPHY, K., *Machine learning: A Probabilistic perspective*, MIT Press, 2012, 1067 p..
3. CESA-BIANCHI, N. și LUGOSI, G., *Prediction, learning, and games*, Cambridge University Press, 2006, 394 p..
4. DOGHRI, W., SADDOUD, A. și CHAARI Fourati, L., „Cyber-physical systems for structural health monitoring: Sensing technologies and intelligent computing,” 2022. 766–809 p.. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11227-021-03875-5>.
5. LAFLAMME, S., UBERTINI, F., DI MATTEO, A. și al., e., „Roadmap on measurement technologies for next generation structural health,” *Measurement Science and Technology*, vol. 34, nr. 9, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6501/>.
6. NAGAR, T., „Benefits of IoT in Education Industry,” devtechnosys, 2023-03-27. [citat 2024]. [online]. Disponibil: <https://devtechnosys.com/insights/iot-in-education-industry/>
7. MURATA, N., SHIMIZU, T., HARA, Y. și HARA, T., „Magnetic, geometrical, and chemical observations of glass-coated amorphous wires employing scanning electron microscopy (SEM) for noise investigation of orthogonal fluxgate sensors,” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 557, 2022.
8. SINGH GILL, S., WU, H., PATROS, P., OTTAVIANI, C., ARORA, P., CASAMAYOR PUJOL, V. și HAUNSCHILD, D., „Modern computing: Vision and challenges,” *Telematics and Informatics Reports*, vol. 13, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.teler.2024.100116>.
9. GROSU, R., „Keynote Lecture Towards Neuro-Symbolic AI,” în *Conference on Intelligent Computer Communication and Processing (ICCP)*, Cluj-Napoca, 2022. pp. vii-vii. DOI: 10.1109/ICCP56966.2022.10053958.
10. PHILBECK, T. și DAVIS, N., „The Fourth Industrial Revolution,” *Journal of International Affairs*, vol. 72, 17–22 p., 2018.

11. MOORE, M., „What is Industry 4.0? Everything you need to know,” TechRadar, 2019-11-5. [citat 2023-01-05].[online]. Disponibil: <https://www.techradar.com/news/what-is-industry-40-everything-you-need-to-know>
12. GAZZANEO, L., PADOVANO, A. și UMBRELLO, S., „Designing Smart Operator 4.0 for Human Values: A Value Sensitive Design Approach,” *Procedia Manufacturing*, vol. 42, pp. 219-226, 2020. ISSN 2351-9789. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.073>.
13. ERBOZ, G., „How To Define Industry 4.0: Main Pillars Of Industry 4.0,” în *Managerial trends in the development of enterprises in globalization era*, Slovak University of Agriculture in Nitra, Slovakia, 2017. pp. 761-767.
14. IMKAMP, D., BERTHOLD, J., HEIZMANN, M., KNIEL, K. et.al., „Challenges and trends in manufacturing measurement technology – the “Industrie 4.0” concept,” *Journal of Sensors and Sensor Systems*, vol. 5, pp. 325-335, 2016.
15. University, C., „The "Only" Coke Machine on the Internet" .,” 2014-11. [online]. Disponibil: https://www.cs.cmu.edu/~coke/history_long.txt
16. WEISER, M., „The Computer for the 21st Century”,” *Scientific American*, vol. 265, pp. 94-104, 1991.
17. MATTERN, F. și FLOEKEMEIER, C., „From the Internet of Computer to the Internet of Things”,” *Informatik-Spektrum*, vol. 33, pp. 107-121, 2010.
18. PONTIN, J., „ETC: Bill Joy's Six Webs”,” *MIT Technology Review*, 2005.
19. ASHTON, K., „That 'Internet of Things' Thing”,” *RFiD Journal*, 2009-06.
20. EVANS, D., „The Internet of Things: How the Next Evolution of the Internet Is Changing Everything”,” CISCO White Paper, 2011-04. [online]. Disponibil: https://www.cisco.com/c/dam/en_us/about/ac79/docs/innov/IoT_IBSG_0411FINAL.pdf
21. DEMIRIS, G. și HENSEL, K., „Technologies for an Aging Society: A Systematic Review of 'Smart Home' Applications”,” *IMIA Yearbook of Medical Informatics*, vol. 17, pp. 33-40, 2008.
22. GATOULLAT, A., BADR, Y., MASSOT, B. și SEJDIC, E., „Internet of Medical Things: A Review of Recent Contributions Dealing with Cyber-Physical Systems in Medicine”,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 5, 3810–3822 p., 2018.

23. DEY, N., HASSANIEN, A., BHATT, C., ASHOUR, A. și et.al, , „Internet of things and big data analytics toward next-generation intelligence,” *Springer International Publishing*, 2018.
24. YANG, C., SHEN, W. și WANG, X., „The Internet of Things in Manufacturing: Key Issues and Potential Applications,” *IEEE Systems, Man, and Cybernetics Magazine*, vol. 4, pp. 6-15, 2018.
25. WANT, R., SCHILIT, B. și JENSON, S., „Enabling the Internet of Things,” *Computer*, vol. 48, pp. 28-35, 2015.
26. SHENG, M., QUN, Y., YAO, L. și BENATALLAH, B., *Managing the Web of Things: Linking the Real World to the Web*, Elsevier Science, 2017.
27. GUBBI, J., BUYYA, R., MARUSIC, S. și PALANISWAMI, M., „Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions,” *Elsevier*, vol. 29, nr. 7, pp. 1645-1660, 2013.
28. FEAMASTER, N., „Mitigating the Increasing Risks of an Insecure Internet of Things,” 2017-02-18. [online]. Disponibil: <https://freedom-to-tinker.com/2017/02/18/mitigating-the-increasing-risks-of-an-insecure-internet-of-things/>
29. ZIEGELDORF, J., MORCHON, O. și WEHRLE, K., „Privacy in the Internet of Things: threats and challenges,” *Security and Communication Networks*, vol. 7, 2728–2742 p., 2013.
30. SHANCANG, L. și LI DA, X., *Securing the Internet of Things*, Elsevier Science, 2017.
31. COMER, D., *The Cloud Computing Book*, Chapman & Hall, 2023. ISBN 9780367706845.
32. „What is edge AI?” RedHat, 2023-06-27. [citat 2024-01-11].[online]. Disponibil: <https://redhat.com/en/topics/edge-computing/what-is-edge-ai>
33. HENNESSY, J. și PATTERSON, D., *Computer Architecture: A Quantitative Approach*. 5th ed, San Francisco: Morgan Kaufmann, 2012.
34. HENNESSY, J. și PATTERSON, D., *Computer Architecture: A Quantitative Approach*, 6th ed., Cambridge: Morgan Kaufmann, 2019, 1527 p..
35. MUELLER, S. și PAUL, W., „Computer Architecture: Complexity and Correctness,” *Springer*, 2000.

36. HWANG, K. și JOTWANI, N., *Advanced computer architecture: Parallelism, Scalability*, 3rd ed., Delhi: McGraw-Hill Education, 2010. ISBN 978-0070702103.
37. STAUNSTRUP, J. și WOLF, W., „Hardware/Software Co-Design: Principles and Practice,” *Springer*, 1997.
38. STRANNEBY, D. și WALKER, W., *Digital Signal Processing and Applications*, 2nd ed., Elsevier, 2004. ISBN 0-7506-6344-8.
39. PEEL, R., „AI-enabled FPGA company announces \$30M Series A round,” *eeNews EUROPE*, 2023-01-11. [online]. Disponibil: https://www.eenewseurope.com/en/ai-enabled-fpga-company-announces-30m-series-a-round/?utm_source=mautic&utm_medium=email&utm_campaign=2012-01-12-eene-automotive
40. HAMILTON, E., „What is Edge Computing: The Network Edge Explained,” *cloudwards.net*, 2018-12-27. [citat 2023-01-28]. [online]. Disponibil: <https://www.cloudwards.net/what-is-edge-computing/>
41. ARABI, K., „Opportunities and Challenges Driving Architecture and Design of Next Generation Mobile Computing and IoT Devices,” 2015. [citat 2023]. [online]. Disponibil: <https://www.mtl.mit.edu/seminars/trends-opportunities-and-challenges-driving-architecture-and-design-next-generation-mobile>
42. MUNOZ, S., „Edge virtualization manages the data deluge, but can be complex,” *IT Operations*, 2020-01-28. [citat 2020]. [online]. Disponibil: <https://www.techtarget.com/searchitoperations/feature/Edge-virtualization-manages-the-data-deluge-but-can-be-complex>
43. PATRIZIO, A., „IDC: Expect 175 zettabytes of data worldwide by 2025,” *Network World*, 2018-12-03. [citat 2023]. [online]. Disponibil: <https://www.networkworld.com/article/3325397/idc-expect-175-zettabytes-of-data-worldwide-by-2025.html>
44. SHI, W., CAO, J., ZHANG, Q., LI, Y. și XU, L., „Edge Computing: Vision and Challenges,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 3, nr. 5, pp. 637-646, 2016. DOI: 10.1109/JIOT.2016.2579198.
45. MERENDA, M., PORCARO, C. și IERO, D., „Edge Machine Learning for AI-Enabled IoT Devices: A Review,” *Sensors*, vol. 20, nr. 9, 2533 p., 2020-04-29. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20092533>.

46. WATKINSON, N., ZAITSEV, F., SHIVAM, A. și DEMIREV, M., „EdgeAvatar: An Edge Computing System for Building Virtual Beings,” *Electronics*, vol. 20, nr. 3, 2021-01-20. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics10030229>.
47. GARCIA Lopez, P., MONTRESOR, A., EPEMA, D., DATTA, A., HIGASHINO, T. et.al., „Edge-centric Computing,” *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 45, nr. 5, pp. 37-42, 2015.
48. RODRIGUES, B., „Implementing accelerated machine-learning applications with an advanced MCU,” *Embedded.com*, 2022-04-26. [citată 2023]. [online]. Disponibil: https://www.embedded.com/implementing-accelerated-machine-learning-applications-with-an-advanced-mcu/?oly_enc_id=7576C3192245G1R
49. ELSHIMI, A., „Smart buildings and the IoT: Zoning systems,” 2022. Disponibil: <https://www.microcontrollertips.com/smart-buildings-and-the-iot-zoning-systems-faq/>
50. „Modular edge data center monitoring,” *InfraSensing Distribution BV*, [citată 2024-01-11]. [online]. Disponibil: <https://infrasensing.com/solutions/edge.asp>
51. „Intel® Core™ Ultra Processors,” INTEL, [citată 2024]. [online]. Disponibil: <https://www.intel.com/content/www/us/en/products/details/processors/core-ultra/products.html>
52. „Intel® Edge Solutions Challenge,” INTEL, [citată 2024]. [online]. Disponibil: https://app.plan.intel.com/e/er?cid=em&source=elo&campid=smggmo_EMEA_gmocom a_EN_2023_EMEA-AON-Int-IoT-101_C-MKA-30159_T-MKA-39379&content=smggmo_EMEA_gmocom a_EMN_EN_2023_EMEA-AON-Int-IoT-101_C-MKA-30159_T-MKA-39379&elq_cid=50594&em_id=96392&elqrid=9b1f724
53. upGrad, , „4 Types of Data Analytics to Improve Business Decision Making,” upGrad, 2019-11-18. [citată 2024]. [online]. Disponibil: https://www.upgrad.com/blog/types-of-data-analytics/#3_Predictive_data_analytics_Getting_an_idea_about_the_future
54. CHUI, M., COLLINS, M. și PATEL, M., *The Internet of Things: Catching up to an accelerating opportunity*, McKinsey & Company, 2021.
55. SEMIOS, , „Insect Pest Management,” [citată 2024]. [online]. Disponibil: <https://www.iotforall.com/solution/semios-integrated-pest-management>
56. KATHURIA, P., „12+ Machine Learning Applications Enhancing Healthcare Sector 2024,” [citată 2024]. [online]. Disponibil: <https://www.upgrad.com/blog/machine-learning-applications-in-healthcare/>

57. BAGHERI, M. și HAGHIGHI MOVAHED, S., „The Effect of the Internet of Things (IoT) on Education,” în *International Conference on Signal-Image Technology & Internet-Based Systems*, Naples, 2016.
58. OLESEN, J. și SHAKER, H., „Predictive maintenance within combined heat and power plants based on a novel virtual sample generation method.,” *Energy Conversion and Management*, vol. 227, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113621>.
59. KALOGIORU, S., „Artificial neural networks in renewable energy systems applications: a review.,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 5, nr. 4, pp. 373-401, 2001. ISSN 1364-0321. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(01\)00006-5](https://doi.org/10.1016/S1364-0321(01)00006-5).
60. PEREZ, E., NTAIMO, L. și DING, Y., „Multi-component wind turbine modeling and simulation for wind farm operations and maintenance,” *SIMULATION*, vol. 91, nr. 4, pp. 360-382, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1177/0037549715572490>.
61. OCHIENG, F., CRAIG Matthew, H., GETHIN Wyn, R., Le KERNEC, J. și MAALAWI, K., „Optimal Design and Operational Monitoring of Wind Turbine Blades,” în *Design Optimization of Wind Energy Conversion Systems with Applications*, Rijeka, IntechOpen, 2020. DOI: 10.5772/intechopen.90258.
62. MARQUEZ, F., TOBIAS, A., PEREZ, J. și PAPAELIAS, M., „Condition monitoring of wind turbines: Techniques and methods,” *Renewable Energy*, vol. 46, pp. 169-178, 2012. ISSN 0960-1481. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.03.003>.
63. GISNIC, B., „Concise Historic Overview of Strain Sensors Used in the Monitoring of Civil Structures: The First One Hundred Years,” *Sensors*, vol. 22, nr. 6, 2397 p., 2022. DOI: 10.3390/s22062397.
64. BADINTER, E., BERMAN, N., DRABENCO, I., ZABROVSKY, V., ZELIKOVSKY, Z. și CEBAN, V., Cast microwire and its properties (Litoý mikroprovod i ego svoystva), Chisinau: Știința, 1973, 320 p..
65. ZHUKOV, A. și LARIN, V., „Magnetic properties of microwires with amorphous structure after thermo mechanical treatment,” *Phys. Status Solidi (c)*, vol. 6, nr. 4, pp. 958-961, 2009. DOI: doi.org/10.1002/pssc.200881266.
66. GONZALEZ-LEGARRETA, L., CORTE-LEON, P., ZHUKOVA, V., IPATOV, M. și et.al, , „Optimization of magnetic properties and GMI effect of Thin Co-rich Microwires for GMI Microsensors,” *Sensors*, vol. 20, nr. 6, 1558 p., 2020. DOI: doi.org/10.3390/s20061558.

67. PRASLIČKA, D., BLAŽEK, J., ŠMELKO, M., HUDÁK, J., ČVERHA, A., MIKITA, I., VARGA, R. și ZHUKOV, A., „Possibilities of Measuring Stress and Health Monitoring in Materials Using Contact-Less Sensor Based on Magnetic Microwires,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 49, nr. 1, pp. 128-131, 2013. DOI: doi.org/10.1109/TMAG.2012.2219854.
68. LARIN, V., ZAPOROJAN, S., MUNTEANU, E. et.al., „Senzor de deformare fără contact”. Moldova Brevet MD 4876 B1., BOPI nr.11/ 2023.
69. MUNTEANU, E., ZAPOROJAN, S., DULGHERU, V., SLAVESCU, R., LARIN, V. și RABEI, I., „Intelligent Condition Monitoring of Wind Turbine Blades: A Preliminary Approach,” în *International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing (ICCP)*, Cluj-Napoca, 2022. pp. 9-16. DOI: [10.1109/ICCP56966.2022.10053939](https://doi.org/10.1109/ICCP56966.2022.10053939).
70. ZAPOROJAN, S., MUNTEANU, E., LARIN, V., PAVEL, V. și CHICU, L., „Embedded devices and methods for development of special non-contact applications,” *Journal of Engineering Science*, vol. 30, nr. 4, pp. 63-74, 2023. DOI: [https://doi.org/10.52326/jes.utm.2023.30\(4\).05](https://doi.org/10.52326/jes.utm.2023.30(4).05). Disponibil: <https://press.utm.md/index.php/jes/issue/view/2023-30-4>
71. VIKKY, K., „12 Types of Embedded Systems,” 2023-10-22. [online]. Disponibil: <https://embeddedhardwaredesign.com/12-types-of-embedded-systems/>
72. ZAPOROJAN, S., PLOTNIC, C., CALMICOV, I. și LARIN, V., „A knowledge-based approach for microwire casting plant control,” în *Knowledge-Based Intelligent System Advancements: Systemic and Cybernetic Approaches*, Hershey, IGI Global, 2011, pp. 419-437. DOI: 10.4018/978-1-61692-811-7.ch019.
73. DOROGAN, V., ZAPOROJAN, S., MUNTEANU, E., LARIN, V., PAVEL, V., VIERU, S., VIERU, T. și CALMICOV, I., „Metodă de măsurare a diametrului miezului și grosimii învelișului din sticlă al microfirului”. Moldova Brevet MD 942, BOPI nr. 8/2015.
74. DOROGAN, V., ZAPOROJAN, S., MUNTEANU, E., LARIN, V., PAVEL, V., VIERU, S., VIERU, T. și CALMICOV, I., „Dispozitiv pentru măsurarea diametrului miezului și grosimii învelișului din sticlă al microfirului”. Moldova Brevet MD 941, BOPI nr. 8/2015.

75. DOROGAN, V., **MUNTEANU, E.**, SECRIERU, V. și ZAPOROJAN, S., „Metode Optice de Măsurare a Microfirului: Diametrului Miezelui și Grosimii Îvelișului,” în *International Conference “Telecommunications, Electronics and Informatics” ICMCS*, Chisinau, 2015. pp. 387-389. ISBN 978-9975-45-377-6.
76. DOROGAN, V., ZAPOROJAN, S., **MUNTEANU, E.** și LARIN, V., „A method for measuring microwire parameters,” în *International Conference on Materials Science and Condensed Matter Physics (MSCMP)*, Chisinau, 2016. pp. 159. ISBN 978-9975-9787-1-2.
77. DOROGAN, V., **MUNTEANU, E.**, ZAPOROJAN, S., TINCOVAN, S., SECRIERU, V. și GORGAN, D., „Microwire measurement device,” în *International Conference on Microelectronics and Computer Science (ICMCS)*, Chisinau, Republic of Moldova, 2017. pp. 41-44. ISBN 978-9975-4264-8-0.
78. DOROGAN, V., ZAPOROJAN, S., **MUNTEANU, E.**, LARIN, V. și PAVEL, V., „Device for measurement of the microwire core diameter and the glass coating thickness by using the optical transparency phenomena,” în *Proceedings of The 9th Edition of European Exhibition of Creativity and Innovation, EUROINVENT*, Iasi, 2017. pp. 168 . ISBN 978-606-775-212-0.
79. DOROGAN, V., ZAPOROJAN, S., **MUNTEANU, E.**, LARIN, V., PAVEL, V., VIERU, T., VIERU, S. și CALMÎCOV, I., „System for measuring the nucleus diameter and coating thickness of the microwire,” în *International Exhibition of Research, Innovation and Technological Transfer “Inventica 2014”*, Iasi, 2014. pp. 509 . ISSN 1844-7880.
80. DOROGAN, V., ZAPOROJAN, S., LARIN, V., VIERU, T., CALMÎCOV, I., VIERU, S., **MUNTEANU, E.**, DOROGAN, A. și SECRIERU, V., „Optoelectronic device for measuring the glass thickness and diameter of the micro-wires,” în *International Invention Show “INOVA-2013”*, Zagreb, 2013. pp. 118 .
81. ZAPOROJAN, S., LARIN, V., TRONCIU, V., **MUNTEANU, E.**, PAVEL, V. și CHICU, L., „Senzor fără contact de măsurare a deformării bazat pe microfibre feromagnetice amorfe,” în *Catalogul Salonului Internațional al Cercetării Științifice, Inovării și Invenției PROINVENT 2022*, Cluj-Napoca, 2022. pp. 240. ISSN 2810-2789, ISSN-L 2810-2789.

82. AKKIMARDI, K. și KHADABADI, U., „Design and analysis of composite cylinder,” *International Research Journal of Engineering and Technology*, vol. 03, nr. 02, pp. 991-995, 2016. ISSN 2395-0056.
83. REZAMAND, M., KORDESTANI, M., CARRIVEAU, R., TING, D., ORCHARD, M. și SAIF, M., „Critical Wind Turbine Components Prognostics: A Comprehensive Review,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 69, pp. 9306-9328, 2020. DOI: 10.1109/TIM.2020.3030165.
84. MISHNAEVSKY, L., „Root Causes and Mechanisms of Failure of Wind Turbine Blades: Overview,” *Materials*, vol. 15, nr. 9, 2959 p., 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15092959>.
85. BANGER, P., „Failures of Wind Power Plants.” [online]. Disponibil: http://www.algorithmica-technologies.com/en/case_studies/failures-of-wind-power-plants.
86. BENBOUZID, M., BERGHOUT, T., SARMA, N., DJUROVIC, S., Wu, Y. și Ma, X., „Intelligent Condition Monitoring of Wind Power Systems: State of the Art Review,” *Energies*, vol. 14, nr. 18, 5967 p., 2021-09-20. DOI: 10.3390/en14185967.
87. SOPCIK, P. și O’SULLIVAN, D., „How Sensor Performance Enables Condition-Based Monitoring Solutions,” *Analog Dialogue*, nr. 53.
88. LOWENHAR, P. E., BRADSHAW, T. și COLE, T. P., „Wind turbine blade monitoring systems”. US Brevet 11168668B2, 2021-11-09.
89. MistrasGroup, „Mistras receives patent on its innovative Sensoria™ wind blade monitoring technology,” [online]. [citat 2023]. Disponibil: <https://www.jeccomposites.com/news/mistras-receives-patent-on-its-innovative-sensoria-wind-blade-monitoring-technology>
90. FLAHERTY, N., „Solid state battery for wind turbine blade monitor,” 2021-09-24. [online]. [citat 2024]. Disponibil: <https://www.eenewspower.com/en/solid-state-battery-for-wind-turbine-blade-monitor>
91. PETRI, D., CARBONE, P. și MARI, L., „Quality of Measurement Information in Decision-Making,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 70, pp. 1-16, 2021. DOI: 10.1109/TIM.2020.3047954.
92. CHEN, X., „Fracture of wind turbine blades in operation - Part I: A comprehensive forensic investigation,” *Wind Energy*, nr. 21, pp. 1046-1063, 2018.

93. McGUGAN, M. și MISHNAEVSKY, L., „Damage Mechanism Based Approach to the Structural Health Monitoring of Wind Turbine Blades,” *Coatings*, vol. 10, nr. 12, 1223 p., 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings10121223>.
94. BLADENA, , „Cost and Risk Tool for Interim and Preventive Repair (CORTIR) EUDP.,” EUDP Project, Bladena, Denmark, 2021.
95. ROBINSON, C. și PARAMASIVAMAM, E., „Study and Development of a Methodology for the Estimation of the Risk and Harm to Persons from Wind Turbines.,” *MMI Engineering Ltd.*, pp. 86, 2013. Disponibil: <https://www.aph.gov.au/DocumentStore.ashx?id=a7a6bb7c-5450-4c5a-a383-9a9ea2749d5d&subId=304908>
96. DULGHERU, V., GUȚU, M., ZAPOROJAN, S. și MUNTEANU, E., „Aspects regarding operation predictability of wind turbines,” *ACTA TECHNICA NAPOCENSIS - Series: APPLIED MATHEMATICS, MECHANICS, and ENGINEERING*, vol. 67, No. 2s 2024, pp. 671-680, ISSN 1221 – 5872.
97. WANG, Z., TSAI, G. și CHEN, Y., „One-Way Fluid-Structure Interaction Simulation of an Offshore Wind Turbine,” *International Journal of Engineering and Technology Innovation*, vol. 4, pp. 127-137, 2014.
98. ELELE, H., „Catchment Based Aerodynamic Performance Analysis of Small Wind Turbine Using a Single Blade Concept for a Low Cost of Energy,” *Energies*, vol. 13, nr. 21, 5838 p., 2020. DOI: 10.3390/en13215838.
99. KONG, K., DYER, K., PAYNE, C., HAMERTON, I. și WEAVER, P., „Progress and Trends in Damage Detection Methods, Maintenance, and Data-driven Monitoring of Wind Turbine Blades – A Review,” *Renewable Energy Focus*, vol. 44, pp. 390-412, 2023.
100. AKSENOV, I. O., FUKS, A. A. și ARONIN, S. A., „Mechanical stress measurement sensor based on micro-wires with positive magnetostriction.”. RUSSIA Brevet 2746765, 2021-06-07.
101. BOSTAN, V., BOSTAN, I., DULGHERU, V., ZAPOROJAN, S., SECRIERU, N., GUȚU, M. și RABEI, I., *Sisteme Inteligente de Conversie a Energiilor Regenerabile. Aplicații*, Chisinau: Bons Offices, 2022. ISBN 978-997-166-49-2.

102. DULGHERU, V., ZAPOROJAN, S., LARIN, V., MANOLI, I., **MUNTEANU, E.** și RABEI, I., „Dispozitiv și metodă de monitorizare predictivă a stării turbinei eoliene și de implementare a contramăsurilor”. Moldova Brevet MD 1701 Y., BOPI nr.3/2023.
103. ZAPOROJAN, S., CARBUNE, V., SLAVESCU, R., **MUNTEANU, E.**, DULGHERU, V. și GUȚU, M., „Modeling the deformation behavior of wind turbine blades using artificial neural networks,” în *International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing (ICCP)*, Cluj-Napoca, Romania, 2023. pp. 19-25. DOI: 10.1109/ICCP60212.2023.10398625.
104. TMIENOVA, N. și SUS, B., „Hardware Data Encryption Complex Based on Programable Microcontrollers,” în *CEUR Workshop Proceedings*, 2018.
Disponibil: <http://ceur-ws.org/Vol-2318/paper17.pdf>
105. „Arhiva meteo în Chișinău,” <https://rp5.ru/>, [citat 2023].[online]. Disponibil: https://rp5.ru/Arhiva_meteo_%C3%AEn_Chi%C5%9Fin%C4%83u
106. KRSTULOVIC-OPARA, L., KLARIN, B. și DOMAZET, Ž., „A non-destructive wind turbine blade analysis based on the Thermal Stress Analysis,” *ResearchGate*, pp. 1-10, 2009. Disponibil: https://www.researchgate.net/publication/268013035_A_non-destructive_wind_turbine_blade_analysis_based_on_the_Thermal_Stress_Analysis
107. MEYER, J., „Wind Speed and Power Characteristics at Different Heights for a Wind Data Collection Tower in Saudi Arabia,” *Research Gate*, 2011. Disponibil: <http://dx.doi.org/10.3384/ecp110574082>
108. SECRIERU, V., **MUNTEANU, E.** și BALICA, Ș., „Sistemul de protecție contra oscilațiilor de amplitudă excesivă a pendulului Foucault,” în *Conferința Jubiliară Tehnico-Științifică a Colaboratorilor, Doctoranzilor și Studenților consacrată celei de-a 40-a Aniversari a Doctoranturii UTM*, Chisnau, 2006. ISBN 978-9975-45-025-6.
109. SECRIERU, V., **MUNTEANU, E.** și BALICA, Ș., „Pendulul Foucault. Metodica de înregistrare și indicare,” în *Conferința Jubiliară Tehnico-Științifică a Colaboratorilor, Doctoranzilor și Studenților consacrată celei de-a 40-a Aniversari a Doctoranturii UTM*, Chisnau, 2006. ISBN 978-9975-45-025-6.
110. **MUNTEANU, E.**, SECRIERU, V. și BALICA, Ș., „Echipament de dirijare a Pendulului Foucault,” în *Conferința Tehnico-Științifică a Colaboratorilor, Doctoranzilor și Studenților*, vol. 1, Chisnau, UTM, 2007, pp. 78-79. ISBN 978-9975-45-068-3.

111. **MUNTEANU, E.,** SECRIERU, V. și BALICA, Ș., „Sistem de Compensare a perderilor de energie a pendulului Foucault,” în *Conferința Tehnico-Științifică a Colaboratorilor, Doctoranzilor și Studenților*, Chisinau, UTM, 2007, pp. 81-85. ISBN 978-9975-45-068-3.
112. **MUNTEANU, E.,** SECRIERU, V. și BALICA, Ș., „Principiul de funcționare a sistemului de măsurare a amplitudinii pendulului Foucault,” în *Conferința Tehnico-Științifică a Colaboratorilor, Doctoranzilor și Studenților*, vol. 1, Chisinau, UTM, 2007, pp. 86-89. ISBN 978-9975-45-068-3.
113. SECRIERU, V., **MUNTEANU, E.** și BALICA, S., „Pendul Foucault - Orologiu Gravitational UTM și cercetarea științifică studențească,” *Mesager Universitar*, vol. 1, pp. 3, 2013.
114. **MUNTEANU, E.,** SECRIERU, V. și DOROGAN, A., „Automation, control and monitoring of the rotation oscillation plane within Foucault pendulum,” *ACTA TECHNICA NAPOCENSIS - Series: APPLIED MATHEMATICS, MECHANICS, and ENGINEERING*, vol. 67, No. 2s 2024, pp. 523-530, ISSN 1221 – 5872.
115. **MUNTEANU, E.,** „Sistem încorporat de măsurare și control a amplitudinii Pendulului Foucault,” vol. 2, pp. 109-113, 2022. ISSN 1810-7087. DOI: 10.56329/1810-7087.22.2.11. Disponibil: <https://doi.org/10.56329/1810-7087.22.2.11>
116. BOSTAN, I., GERU, I., DOROGAN, V., SECRIERU, V., **MUNTEANU, E.,** BALICA, Ș., RUSU, S. și et.al, „System of determination and compensation of losses in Foucault Pendulum,” în *Transactions on metrology and analytical methods of research*, Chisinau, Academy of Sciences of Moldova, 2010, pp. 8-20. ISBN 978-9975-62-276-9.
117. ЗАБОЛОТНОВ, Ю., Теория колебаний, Самара: Самарский ГАУ им. акад. С.П.Королева, 1999, 168 p..
118. BAKER, G. și BLACKBURN, J., „The Pendulum: A Case Study in Physics.,” *Oxford university press*, 2005.
119. STOMME, H. și MOORE, D., An Introduction to the Coriolis Force, Columbia University Press, 1989, 297 p.. ISBN-10 0231066368.
120. FITZPATRICK, R., Maxwell's Equations and the Principles of Electromagnetism, Infinity Science Press, 2008, 450 p..
121. HOLMES, D. și LIPO, T., „Pulse Width Modulation for Power Converters: Principles and Practice,” *IEEE PRESS Series on Power Engineering*, 2003.

122. RĂDULESCU, N., NAIMAN, M., OLENICI, D. și TIRON, Ș., „Pendule Foucault în România și Republica Moldova,” *Astroclubul Bucuresti*, 2022-09-29. Disponibil: <https://www.astroclubul.ro/wp-content/uploads/2022/09/pFromold.pdf>
123. ZURAWSKI, R., *Embedded Systems Handbook 2-Volume Set*, Boca Raton: CRC Press, 2009.
124. PICKER, L., „Microchip Technology to Buy Atmel for Nearly \$3.6 Billion,” *The New York Times*, 2016-01-19. Disponibil: <https://www.nytimes.com/2016/01/20/business/dealbook/microchip-technology-to-buy-atmel-for-nearly-3-6-billion.html>
125. LACAMERA, D., „Bootloaders,” în *Embedded Systems Architecture*, Packt Publishing, 2018. ISBN 9781788832502.

ANEXE

Anexa 1. Rularea aplicației de monitorizare a deformațiilor în limbajul C

```
#include <stddef.h>
#include <stdio.h>          /* This example main program uses printf/fflush */
#include "ModelForDeployment.h" /* Model header file */

void rt_OneStep(void);
void rt_OneStep(void)
{
    static boolean_T OverrunFlag = false;

    if (OverrunFlag) {
        rtmSetErrorStatus(ModelForDeployment_M, "Overrun");
        return;
    }

    OverrunFlag = true;
    ModelForDeployment_step();
    OverrunFlag = false;
}
```

```

}

int_T main(int_T argc, const char *argv[])
{
    /* Unused arguments */
    (void)(argc);
    (void)(argv);

    /* Initialize model */
    ModelForDeployment_initialize();

    /* Attach rt_OneStep to a timer or interrupt service routine with
    * period 0.4 seconds (base rate of the model) here.
    * The call syntax for rt_OneStep is
    *
    * rt_OneStep();
    */
    fflush((NULL));
    while (rtmGetErrorStatus(ModelForDeployment_M) == (NULL)) {
        /* Perform application tasks here */
    }

    /* Terminate model */
    ModelForDeployment_terminate();
    return 0;
}

```


Anexa 2. Rularea modelului de monitorizare a deformațiilor în limbajul C

```
/*
 * File: ModelForDeployment.c
 * Target selection: ert.tlc
 * Embedded hardware selection: ARM Compatible->ARM Cortex
 * Emulation hardware selection:
 *   Differs from embedded hardware (MATLAB Host)
 * Code generation objectives: Unspecified
 * Validation result: Not run
 */

#include "ModelForDeployment.h"
#include <math.h>
#include "rtwtypes.h"

/* Block signals (default storage) */
B_ModelForDeployment_T ModelForDeployment_B;

/* Block states (default storage) */
DW_ModelForDeployment_T ModelForDeployment_DW;

/* External inputs (root inport signals with default storage) */
ExtU_ModelForDeployment_T ModelForDeployment_U;

/* External outputs (root outports fed by signals with default storage) */
ExtY_ModelForDeployment_T ModelForDeployment_Y;

/* Real-time model */
static RT_MODEL_ModelForDeployment_T ModelForDeployment_M_;
RT_MODEL_ModelForDeployment_T *const ModelForDeployment_M =
    &ModelForDeployment_M_;

/* Model step function */
```

```

void ModelForDeployment_step(void)
{
    real_T rtb_DotProduct_e_0;
    real_T rtb_DotProduct_f_0;
    real_T rtb_DotProduct_o_0;
    real_T rtb_Sum1;
    real_T rtb_Sum1_b;
    int32_T i;

    /* Sum: '<Root>/Sum1' incorporates:
    * Inport: '<Root>/Vin'
    * Memory: '<Root>/Memory'
    */
    rtb_Sum1 = ModelForDeployment_U.Vin -
        ModelForDeployment_DW.Memory_PreviousInput;

    /* Switch: '<Root>/Switch' incorporates:
    * Constant: '<S1>/Constant'
    * Inport: '<Root>/Vin'
    * RelationalOperator: '<S1>/Compare'
    * Sum: '<Root>/Sum2'
    */
    if (rtb_Sum1 >= 2.0) {
        rtb_Sum1 = ModelForDeployment_U.Vin;
    } else {
        rtb_Sum1 = ModelForDeployment_U.Vin - rtb_Sum1;
    }

    /* Bias: '<S27>/Add min y' incorporates:
    * Gain: '<S27>/range y // range x'
    * Switch: '<Root>/Switch'
    */
    rtb_Sum1 = 0.15384615384615385 * rtb_Sum1 - 1.0;

```

```

ModelForDeployment_B.Sum1_o[0] = 1.0 / (exp((-4.20646029691048 * rtb_Sum1 +
4.2519045579802874) * -2.0) + 1.0) * 2.0 - 1.0;
ModelForDeployment_B.Sum1_o[1] = 1.0 / (exp((4.4614089350724839 * rtb_Sum1 -
2.9866790551503408) * -2.0) + 1.0) * 2.0 - 1.0;
ModelForDeployment_B.Sum1_o[2] = 1.0 / (exp((-4.32394360671808 * rtb_Sum1 +
2.1515688392271857) * -2.0) + 1.0) * 2.0 - 1.0;
ModelForDeployment_B.Sum1_o[3] = 1.0 / (exp((-4.8827374579430494 * rtb_Sum1 +
0.90307960936143061) * -2.0) + 1.0) * 2.0 - 1.0;
ModelForDeployment_B.Sum1_o[4] = 1.0 / (exp((-4.2527519801883624 * rtb_Sum1 +
0.84639279944382) * -2.0) + 1.0) * 2.0 - 1.0;
ModelForDeployment_B.Sum1_o[5] = 1.0 / (exp((-4.8026345450148238 * rtb_Sum1 -
0.95549169383464727) * -2.0) + 1.0) * 2.0 - 1.0;
ModelForDeployment_B.Sum1_o[6] = 1.0 / (exp((8.7374751712434886 * rtb_Sum1 +
2.6335675843187332) * -2.0) + 1.0) * 2.0 - 1.0;
ModelForDeployment_B.Sum1_o[7] = 1.0 / (exp((-4.1340609790351 * rtb_Sum1 -
2.5113629409604377) * -2.0) + 1.0) * 2.0 - 1.0;
ModelForDeployment_B.Sum1_o[8] = 1.0 / (exp((-3.9702343603187575 * rtb_Sum1 -
3.8215669676114929) * -2.0) + 1.0) * 2.0 - 1.0;
ModelForDeployment_B.Sum1_o[9] = 1.0 / (exp((-4.0399992078454581 * rtb_Sum1 -
4.4843041923798079) * -2.0) + 1.0) * 2.0 - 1.0;

/* DotProduct: '<S23>/Dot Product' */
rtb_Sum1 = 0.0;

/* DotProduct: '<S24>/Dot Product' */
rtb_DotProduct_e_0 = 0.0;

/* DotProduct: '<S25>/Dot Product' */
rtb_DotProduct_f_0 = 0.0;

/* DotProduct: '<S26>/Dot Product' */
rtb_DotProduct_o_0 = 0.0;
for (i = 0; i < 10; i++) {

```

```

/* DotProduct: '<S23>/Dot Product' incorporates:
 * Constant: '<S21>/IW{2,1}(1,:)"
 */
rtb_Sum1_b = ModelForDeployment_B.Sum1_o[i];
rtb_Sum1 += ModelForDeployment_ConstP.IW211_Value[i] * rtb_Sum1_b;

/* DotProduct: '<S24>/Dot Product' incorporates:
 * Constant: '<S21>/IW{2,1}(2,:)"
 */
rtb_DotProduct_e_0 += ModelForDeployment_ConstP.IW212_Value[i] * rtb_Sum1_b;

/* DotProduct: '<S25>/Dot Product' incorporates:
 * Constant: '<S21>/IW{2,1}(3,:)"
 */
rtb_DotProduct_f_0 += ModelForDeployment_ConstP.IW213_Value[i] * rtb_Sum1_b;

/* DotProduct: '<S26>/Dot Product' incorporates:
 * Constant: '<S21>/IW{2,1}(4,:)"
 */
rtb_DotProduct_o_0 += ModelForDeployment_ConstP.IW214_Value[i] * rtb_Sum1_b;
}

/* Output: '<Root>/Point1' incorporates:
 * Bias: '<S28>/Add min x'
 * Bias: '<S28>/Subtract min y'
 * Constant: '<S4>/b{2}'
 * DotProduct: '<S23>/Dot Product'
 * Gain: '<S28>/Divide by range y'
 * Inport: '<Root>/In2'
 * RelationalOperator: '<Root>/Relational Operator4'
 * Sum: '<S4>/netsum'
 */
ModelForDeployment_Y.Point1 = (ModelForDeployment_U.Eps1 > ((rtb_Sum1 +
0.31217957551525405) + 1.0) * 0.00018082 + 0.00011193);

```

/* Output: '<Root>/Point2' incorporates:

- * Bias: '<S28>/Add min x'
 - * Bias: '<S28>/Subtract min y'
 - * Constant: '<S4>/b{2}'
 - * DotProduct: '<S24>/Dot Product'
 - * Gain: '<S28>/Divide by range y'
 - * Inport: '<Root>/In3'
 - * RelationalOperator: '<Root>/Relational Operator1'
 - * Sum: '<S4>/netsum'
- */

ModelForDeployment_Y.Point2 = (ModelForDeployment_U.Eps2 >
((rtb_DotProduct_e_0 + 0.5351165635722398) + 1.0) * 0.00015549000000000004 +
0.0002059);

/* Output: '<Root>/Point3' incorporates:

- * Bias: '<S28>/Add min x'
 - * Bias: '<S28>/Subtract min y'
 - * Constant: '<S4>/b{2}'
 - * DotProduct: '<S25>/Dot Product'
 - * Gain: '<S28>/Divide by range y'
 - * Inport: '<Root>/In4'
 - * RelationalOperator: '<Root>/Relational Operator5'
 - * Sum: '<S4>/netsum'
- */

ModelForDeployment_Y.Point3 = (ModelForDeployment_U.Eps3 >
((rtb_DotProduct_f_0 + 0.023764801378656386) + 1.0) * 0.000164735 +
0.00014216);

/* Output: '<Root>/Point4' incorporates:

- * Bias: '<S28>/Add min x'
- * Bias: '<S28>/Subtract min y'
- * DotProduct: '<S26>/Dot Product'
- * Gain: '<S28>/Divide by range y'

```

* Inport: '<Root>/In5'
* RelationalOperator: '<Root>/Relational Operator6'
* Sum: '<S4>/netsum'
*/

ModelForDeployment_Y.Point4 = (ModelForDeployment_U.Eps4 >
((rtb_DotProduct_o_0 - 0.00601650955139954) + 1.0) * 0.000200415 +
0.00015978);

/* Update for Memory: '<Root>/Memory' incorporates:
* Inport: '<Root>/Vin'
*/

ModelForDeployment_DW.Memory_PreviousInput = ModelForDeployment_U.Vin;
}

/* Model initialize function */
void ModelForDeployment_initialize(void)
{
/* (no initialization code required) */
}

/* Model terminate function */
void ModelForDeployment_terminate(void)
{
/* (no terminate code required) */
}

/*
* File trailer for generated code.
*
* [EOF]
*/

```

Anexa 3. Rețeaua neuronală generată în limbajul C

```
/*
* File: ModelForDeployment_data.c
*
* Code generated for Simulink model 'ModelForDeployment'.
*
* Model version          : 1.79
* Simulink Coder version : 9.8 (R2022b) 13-May-2022
*
* Target selection: ert.tlc
* Embedded hardware selection: ARM Compatible->ARM Cortex
* Emulation hardware selection:
*   Differs from embedded hardware (MATLAB Host)
* Code generation objectives: Unspecified
* Validation result: Not run
*/

#include "ModelForDeployment.h"

/* Constant parameters (default storage) */
const ConstP_ModelForDeployment_T ModelForDeployment_ConstP = {

    { -0.075994599871925417, 0.29242151057973187, -0.25325426668961215,
      -0.24950680248427448, -0.1215105715612802, -0.0028770626768331309,
      0.044291688727441436, 0.047221934399093404, -0.27076271620251346,
      0.518106066725839 },

    { -0.28352611460894162, -0.11864930356869974, -0.53778810882316175,
      -0.13892107979852819, -0.29026053861000478, 0.032343012078866695,
      0.02161679225034141, -0.036187971638480421, 0.035432017037449776,
      0.407143483375203 },
```

{ -0.12231578438363265, 0.23204728989840417, -0.27644759220926496,
-0.26502884964625512, -0.13679870795319748, 0.11928621564612707,
0.18362349877062778, 0.11437472889011469, -0.375868410584175,
0.26435328107710043 },

{ -0.14142927913150011, 0.27764084295379354, -0.20120116223805012,
0.039458732983064015, -0.53931349303969922, 0.087746849140067987,
0.046778429491378615, -0.0849057598479559, 0.24886169772604447,
-0.27192321296982735 }

};

Anexa 4. Brevete obținute și aprecieri ale rezultatelor științifice



REPUBLICA MOLDOVA
Agenția de Stat pentru
Proprietatea Intelectuală

**BREVET
DE INVENȚIE
DE SCURTĂ DURATĂ**

Nr. 941

Eliberat în temeiul Legii nr. 50/2008 privind protecția invențiilor

Titlul: Dispozitiv pentru măsurarea diametrului miezului și grosimii învelișului din sticlă al microfirului

Titular: UNIVERSITATEA TEHNICĂ A MOLDOVEI, MD

Data depozit: 2015.02.20
Durata brevetului : 6 ani

Descrierea invenției, revendicările și desenele constituie parte integrantă a prezentului brevet de invenție de scurtă durată

Director General



CHIȘINĂU





REPUBLICA MOLDOVA

Agenția de Stat pentru
Proprietatea Intelectuală

**BREVET
DE INVENȚIE
DE SCURTĂ DURATĂ**

Nr. 942

Eliberat în temeiul Legii nr. 50/2008 privind protecția invențiilor

Titlu: Metodă de măsurare a diametrului miezului și grosimii învelișului din sticlă al microfirului

Titular: UNIVERSITATEA TEHNICĂ A MOLDOVEI, MD

Data depozit: 2015.02.20

Durata brevetului : 6 ani

Descrierea invenției, revendicările și desenele constituie parte integrantă a prezentului brevet de invenție de scurtă durată

Director General



CHIȘINĂU



INSTITUTUL NAȚIONAL DE CERCETARE-DEZVOLTARE
PENTRU INGINERIE ELECTRICĂ ICPE-CA București



PRO INVENT 2022



DIPLOMĂ DE EXCELENȚĂ

se acordă **AL. S. ZAPOROIAN, M. V. IARIN, M. V. TRONCU, M. G. Munteanu, M. V. PAVEL, M. L. CRICI**
pentru invenția **SENZOR PĂRĂ CONTACT DE MĂSURARE A DEFORMĂRII BAZAT PE**
MICROPIRE FEROMAGNETICE AMORFE

prezentată la

**A XX-a ediție a Salonului Internațional al Cercetării Științifice,
Inovării și Inventicii PRO INVENT**

Cluj-Napoca, România
26—28 octombrie 2022

Director General INC DIE ICPE-CA
Dr. ing. Sergiu NICOLAIE





SALONUL INTERNAȚIONAL AL CERCETĂRII ȘTIINȚIFICE, INOVĂRII ȘI INVENTICII

PRO INVENT



EDIȚIA XXI, 25-27 OCTOMBRIE 2023
CLUJ-NAPOCA

DIPLOMA DE EXCELENȚĂ ȘI MEDALIA DE AUR

Se acordă **Sergiu Zaporozjan, Vasile Tronciu, Eugeniu Munteanu, Victor Pavel, Lilian Chicu**

De la **UNIVERSITATEA TEHNICĂ A MOLDOVEI**

Pentru **ABORDARE ÎN DEZVOLTAREA DE APLICAȚII SPECIFICE FĂRĂ CONTACT**

PREȘEDINTELE SALONULUI,
Prof. dr. ing. **VASILE TOPA**
Rector al Universității Tehnice din Cluj-Napoca

PREȘEDINTELE JURIULUI,
Prof. dr. ing. **RADU MUNTEANU**

Radu Munteanu





SALONUL INTERNAȚIONAL AL CERCETĂRII ȘTIINȚIFICE, INOVĂRII ȘI INVENTICII

PRO INVENT

EDIȚIA XX, 26-28 OCTOMBRIE 2022
CLUJ-NAPOCA



DIPLOMA DE EXCELENȚĂ ȘI MEDALIA DE AUR

Se acordă **Sergiu Zaporozjan, Vladimir Larin, Vasile Tronciu, Eugeniu Munteanu,
Victor Pavel, Lilian Chicu**

De la **Universitatea Tehnică a Moldovei**

Pentru **SENZOR FĂRĂ CONTACT DE MĂSURARE A DEFORMĂRII BAZAT PE MICROFIRE
FEROMAGNETICE AMORFE**

PREȘEDINTELE SALONULUI,
Prof. dr. ing. **VASILE ȚOPA**
Rector al Universității Tehnice din Cluj-Napoca

PREȘEDINTELE JURIULUI,
Prof. dr. ing. **RADU MUNTEANU**



Anexa 5. Act de implementare pentru rezultatele obținute



Aprob:

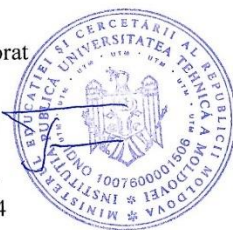
Decană
Facultatea Electronică și Telecomunicații
dr., conf. univ.,
Lilia Sava

„10” 01 2024

Aprob:

Prorector
pentru cercetare și doctorat
dr. hab., prof. univ.
Vasile Tronciu

„10” 01 2024



ACT

de implementare a rezultatelor științifice obținute
în cadrul tezei de doctor
a domnului MUNTEANU Eugeniu

Prin prezentul confirmăm utilizarea în procesul de studiu, disciplina *FIZICA I* și *FIZICA II*, a rezultatelor științifice obținute în cadrul tezei de doctor cu tema „Elaborarea sistemelor inteligente încorporate pentru aparatură de măsurare și control fără contact”, autor dl Munteanu Eugeniu, asistent universitar, Departamentul Informatică și Ingineria Sistemelor.

Disciplina *FIZICA I* și *FIZICA II* este predată studenților anului I universitar, studii superioare de licență, ciclul I, la următoarele programe de studii: 0713 *Energetică și inginerie electrică* și 0714 *Electronică și automatizări*, în cadrul Facultăților: Electronică și Telecomunicații, Energetică și Inginerie Electrică și Calculatoare, Informatică și Microelectronică, UTM.

Șef Departament Fizică
dr., conf. univ., Constantin Pârțac

DECLARAȚIA PRIVIND ASUMAREA RĂSPUNDERII

Declarația privind asumarea răspunderii Subsemnatul, declar pe răspundere personală că materialele prezentate în teza de doctorat sunt rezultatul propriilor cercetări și realizări științifice. Conștientizez că, în caz contrar, urmează să suport consecințele în conformitate cu legislația în vigoare.

Munteanu, Eugeniu

Semnătura

Data 26.03.2024

Nume Prenume Data nașterii Locul nașterii	Munteanu Eugeniu 10 august 1980 s. Cărpineni, r. Hâncești, Moldova	
Cetățenie	RM	
Studii	Universitatea Tehnică a Moldovei – Facultatea: Calculatoare, Informatică și Microelectronica 1997-2002, specialitatea – microelectronică; Doctorale la Universitatea Tehnică a Moldovei 2002-2005;	
Stagii	Nu sunt	
Domenii de interes științific	Sisteme încorporate, Inteligența artificială, proiectarea dispozitivelor cu microcontrolere, robotică.	
Participări în proiecte științifice naționale și internaționale	Participant la proiecte de transfer tehnologic , instituționale și internaționale	
Participări la manifestări științifice	Participant la conferințe științifice	
Lucrări științifice	153 de lucrări științifice, 5 brevete de invenție	
Premii, mențiuni, distincții	49 mențiuni, inclusiv Premiul municipal Chișinău pentru tineret la categoria știință 2009.	
Apartenență la societăți științifice	Nu sunt	
Activități în cadrul colegiilor de redacție ale revistelor științifice	Nu sunt	
Cunoașterea limbilor	Română, Rusă, Engleză(B2)	
Date de contact de serviciu	+373 79591596; eugen.munteanu@iis.utm.md	