

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”**

REZUMATUL TEZEI DE DOCTOR ÎN ȘTIINȚE INGINEREȘTI

CHIȘINĂU, 2024

Teza a fost elaborată în cadrul Departamentului Fizică, Facultatea Electronică și Telecomunicații, UTM.

Conducător științific:

Zaporojan Sergiu Doctor în tehnică, conferențiar universitar

Referenți Oficiali:

Manta Vasile Ion Doctor inginer, profesor universitar, Universitatea Tehnică “Gheorghe Asachi”, Iași.

Tronciu Vasile Doctor habilitat în științe fizico-matematice, profesor universitar, Universitatea Tehnică a Moldovei.

Componenta nominală a Consiliului Științific Specializat

Bolun Ion **Președinte**, doctor habilitat în tehnică, profesor universitar, Universitatea Tehnică a Moldovei.

Cojuhari Irina, **Secretar științific**, doctor în informatică, conferențiar universitar, Universitatea Tehnică a Moldovei.

Guțuleac Emilian Doctor habilitat în tehnică, profesor universitar, Universitatea Tehnică a Moldovei.

Secieru Nicolae Doctor în tehnică, conferențiar universitar, Universitatea Tehnică a Moldovei.

Beșliu Victor Doctor în tehnică, profesor universitar, Universitatea Tehnică a Moldovei.

Moraru Victor Doctor în tehnică, conferențiar universitar, Universitatea Tehnică a Moldovei.

Zgureanu Aureliu Doctor în științe fizico-matematice, conferențiar universitar, Academia de Studii Economice din Moldova.

Susținerea va avea loc la 17.01.2025, ora 14⁰⁰, în Ședința Consiliului Științific Specializat **D 232.01-24-34** din cadrul Universității Tehnice a Moldovei, pe adresa: str. Studenților 9/7, blocul de studii nr.3, aud. 208, MD 2045, Chișinău, Republica Moldova.

Teza de doctor și rezumatul științific pot fi consultate la Biblioteca tehnico-științifică a Universității Tehnice a Moldovei și pagina web ANACEC (<https://www.anacec.md> / www.cnaa.md).

Rezumatul științific a fost expediat la ”___” decembrie 2024

Secretar științific al Consiliului Științific Specializat,

Dr. în informatică, conf. univ. _____ Cojuhari Irina

Conducător științific

Dr. în tehnică, conf. univ. _____ Zaporojan Sergiu

Autor _____ Munteanu Eugeniu

Repere conceptuale ale cercetării

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. 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 [1, 2], 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 [3, 4]. 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. 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 aplicațiilor cu metode AI pe bază de 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. Salonul Internațional al Cercetării Științifice, Inovării și Inventicii PROINVENT 2022. Ediția a XX-a, 26 - 28 octombrie 2022, Cluj-Napoca, România.
4. 9th International Conference on Microelectronics and Computer Science & The 6th Conference of Physicists of Moldova, ICMCS 2017, October 19-21, 2017, Chișinău, Moldova.
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”, July 2-4, 2014, Iasi, Romania.
9. 38th 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 TEZEI

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 lucrării.

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 monitorizare în domeniul IoT).

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.

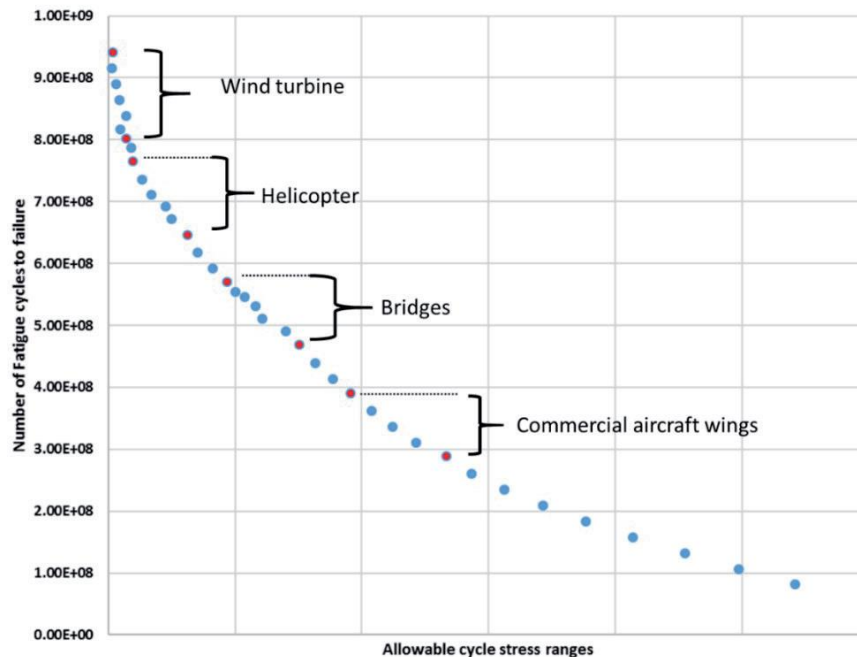


Fig. 1. Caracteristica de falimentare a palelor turbinei eoliene [5]

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 [3]. 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 este prezentată caracteristica de falimentare a palelor turbinelor eoliene în comparație cu pale din alte domenii. După cum se poate observa, numărul de falimentări datorat obosirii materialului compozit este cel mai ridicat în cazul turbinelor eoliene [5]. Totodată, din Fig. 2 se poate vedea că rata de falimentări crește odată cu puterea turbinei eoliene [6].

O abordare comună în mentenanța diverselor echipamente și sisteme ingineresti 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.

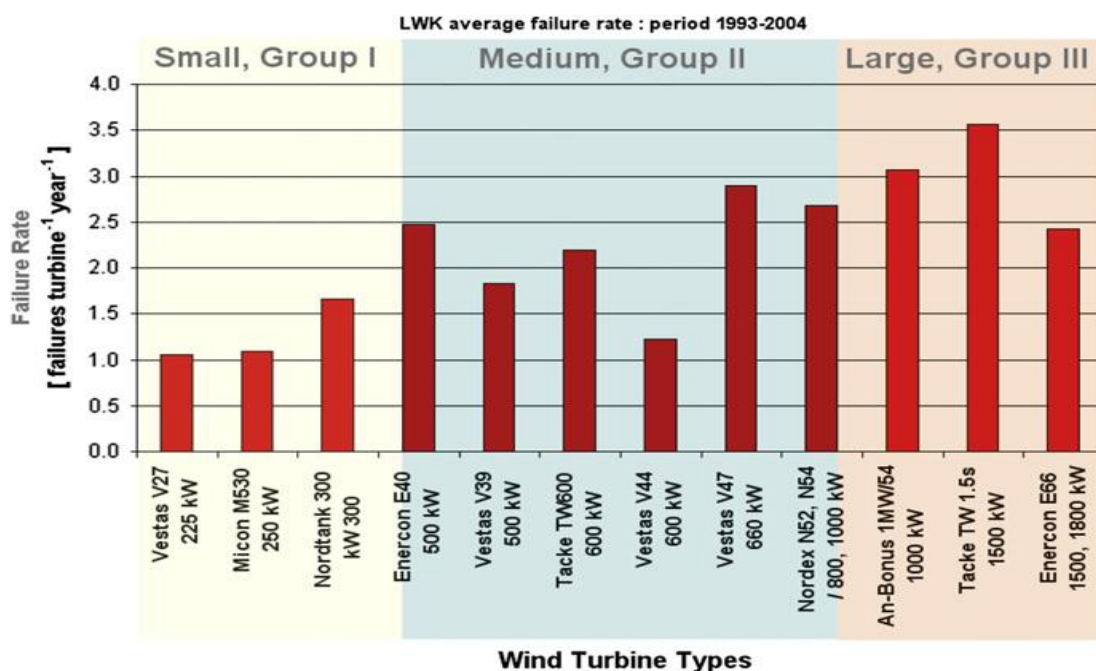


Fig. 2. Rata de falimentare a turbinelor eoliene [6]

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, capacitățile unui sistem de monitorizare a stării funcționale au la bază un anumit număr și tip de senzori, respectiv 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.

În capitolul II, **ELABORAREA DISPOZITIVELOR DE CALCUL LA MARGINE PENTRU DEZVOLTAREA APLICAȚIILOR FĂRĂ CONTACT**, este descrisă realizarea dispozitivelor cu senzori bazate pe microfibră pentru măsurarea fără contact a deformațiilor elastice. Sunt descrise potențialele direcții de utilizare a acestor dispozitive și diverse metode de îmbunătățire a caracteristicilor.

Baza de soluții existente în domeniul senzorilor tensiometrici (STeM) este destul de extinsă. Însă în mare parte, în contextul utilizării în sistemele încorporate, 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 [4, 7]. Integrarea unui senzor cu contact în construcția monitorizată poate afecta integritatea construcției, sau în dependență de tipul utilizat, poate oferi date imprecise referitor la

deformațiile existente. Astfel devine imperativă utilizarea STeM fără contact.

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 microfiredor, 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 domeniul de aplicare.

Ca urmare 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. De asemenea a fost efectuat un studiu pentru a găsi materiale potrivite, cu caracteristici definite, care să ofere un răspuns corespunzător în caracteristicile magnetice pentru firul turnat, atunci când este aplicată o forță de întindere.

Conform cercetărilor preliminare, pentru multe materiale a fost identificată o schimbare a forței coercitive (H_c) (Fig. 3). Mai multe probe au fost predispuse să ajungă în regiunea de îngustare (deformare plastică) sau chiar s-au rupt. Cu toate acestea majoritatea probelor au demonstrat posibilitatea de utilizare a microfiredor ca senzori tensiometrici.

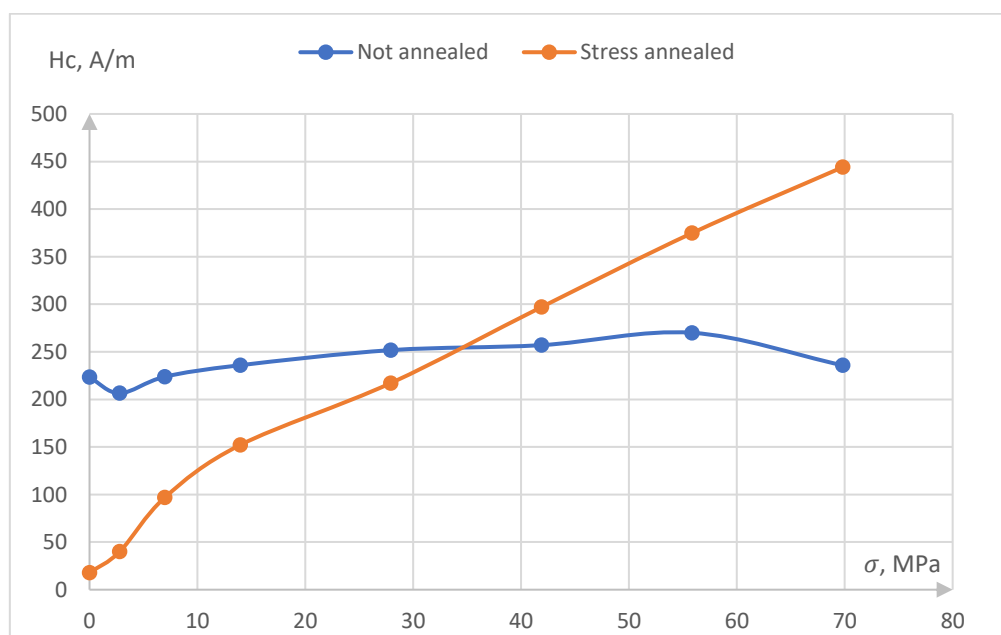


Fig. 3. Dependența forței coercitive (H_c) de tensiunea la întindere elastică (σ)

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 microfiredor se realizează prin expunerea unui microfir 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 microfirului este restructurat de-a lungul forței aplicate. La această temperatură, stratul de sticlă aproape că nu-și schimbă forma. Ca consecință, a fost dezvoltat un proces de cercetare dedicat PTM a microfiredel, pentru a identifica procesul

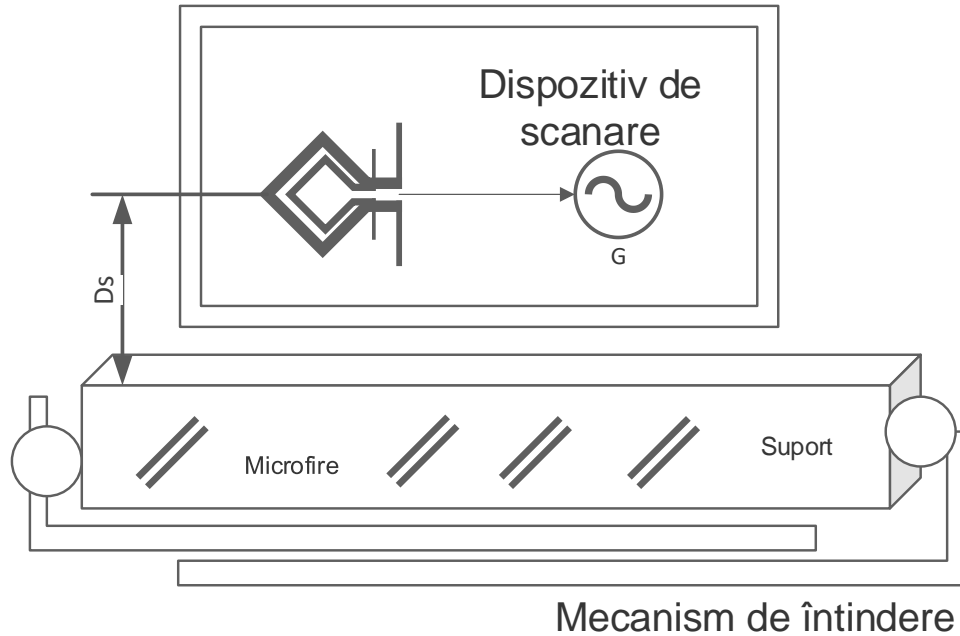


Fig. 4. Măsurarea caracteristicilor magnetice la deformări elastice

tehnologic corespunzător diverselor aplicații.

Pentru cercetarea caracteristicilor magnetice și elastice ale microfiredel a fost dezvoltat un sistem dedicat (Fig. 4). Acest sistem permite măsurarea caracteristicilor mai multor microfiredel în o singură iterație, fără a efectua operații repetate de ajustare a echipamentului de măsurare sau setare a deformațiilor elastice.

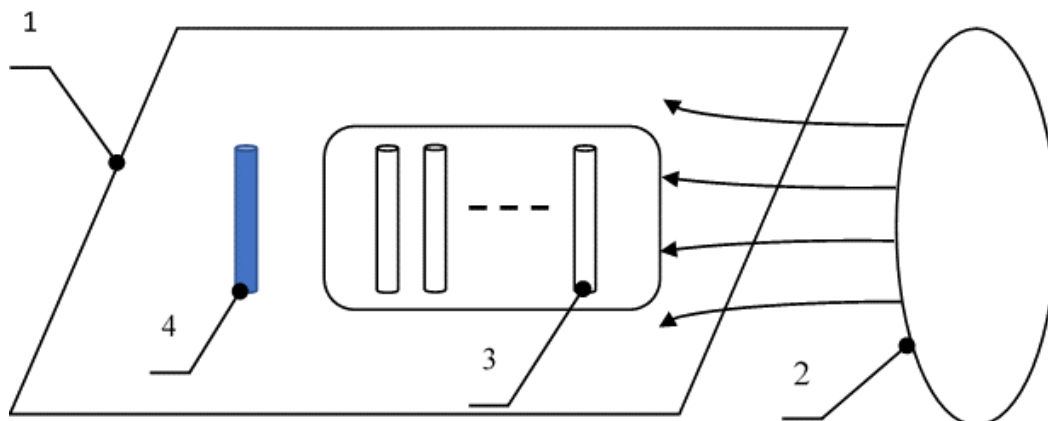


Fig. 5. Dispozitiv tensiometric bazat pe microfiredel

Pentru măsurarea fără contact a deformațiilor a fost obținut un brevet de invenție, care se referă la tehnica de măsurare, în special la extensometrie, și poate fi utilizat pentru măsurarea

deformațiilor corpurilor solide supuse la întindere (1 din Fig. 5), inclusiv a celor ireversibile, de exemplu a deformațiilor reziduale critice în recipiente sub presiune, în particular în cilindri din compozit de înaltă presiune.

Conform brevetului obținut, metoda de măsurare a deformațiilor presupune că bobinele de excitare și de detectare (2 din Fig. 5) trebuie să fie situate la o anumită distanță de senzorul propriu zis. Conform invenției, microfiringul de referință poate furniza un semnal de referință ce permite calcularea forței coercitive 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. 4) față de elementul sensibil (Fig. 5).

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 microfiring de referință, care nu este afectat de temperatură.

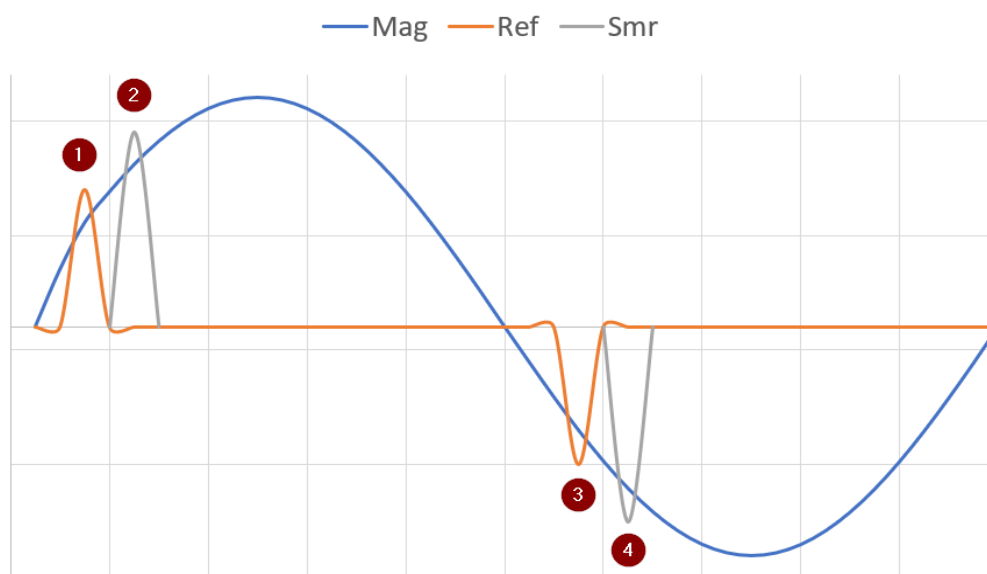


Fig. 6. Răspunsul magnetic al microfiringelor de referință și sensibile

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. 6) acționează asupra firului sensibil (semnalul *Smr* din Fig. 6) și asupra firului de referință (*Ref* din Fig. 6). 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. 6).

În Fig. 7 este prezentată structura dispozitivului de calcul la margine pentru măsurarea

deformațiilor elastice, elaborat în cadrul lucrării, care are la bază SMF. În această figură sunt descrise elementele cheie și interacțiunea între ele pentru implementarea algoritmului de calcul a deformațiilor elastice conform răspunsului magnetic al microfiredor (Fig. 6).

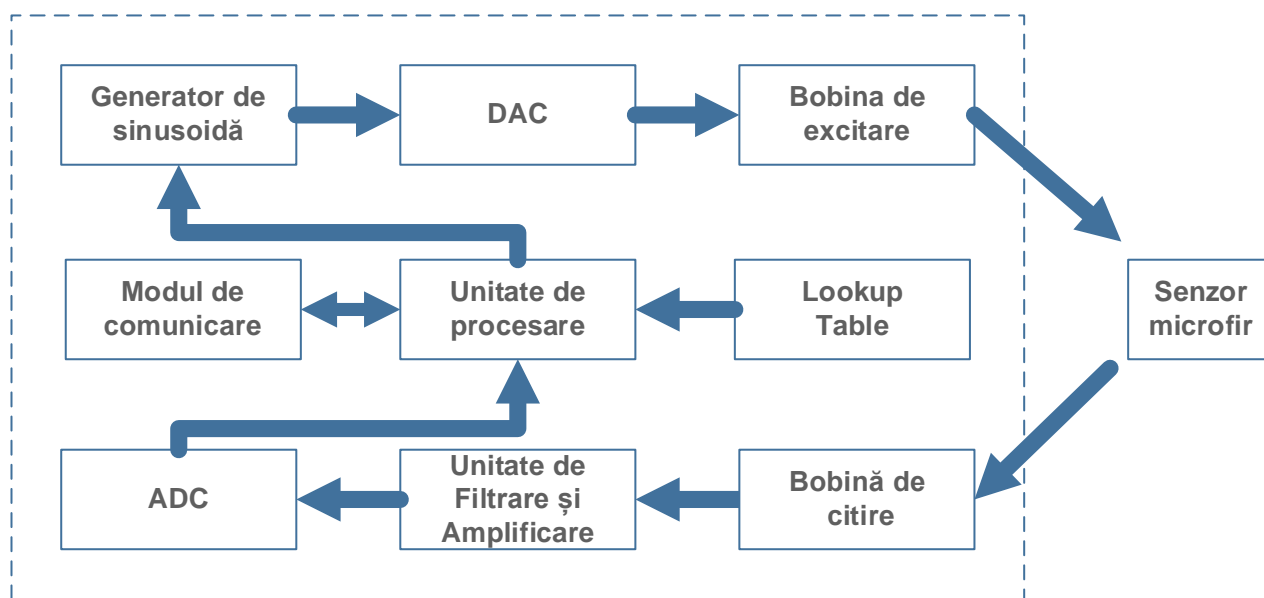


Fig. 7. Dispozitiv de calcul la margine pentru măsurarea deformațiilor elastice

Un alt aspect de cercetare ține de caracterizarea microfiredor selectate 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 curbilor m-H pentru câteva probe, care au avut diferențe de performanță în ciuda faptului că erau din același lot de producție. S-a demonstrat că forma geometrică și incluziunile influențează caracteristicile microfiredor [8]. Astfel devine importantă îmbunătățirea procesului de turnare [9] prin elaborarea și utilizarea unui dispozitiv inteligent încorporat bazat pe conceptul de măsurare a parametrilor geometrici, în baza transparenței optice a microfiredorului, metoda propusă fiind dezvoltată în teză.

Se cunoaște că coeficientul de transparență al sticlei depinde de lungimea de undă a luminii, respectiv pentru măsurarea grosimii învelișului din sticlă al microfiredorului poate fi folosit fenomenul de transparență optică a sticlei la lumină ultravioletă. Reieșind din obiectivele propuse și metodele de implementare a fost realizat un *Ansamblu de Colimare*, care se încadrează perfect în metoda elaborată. Ansamblul de colimare include următoarele părți distincte:

- emițătorul de lumină (1 din Fig. 8), care radiază în domeniul vizibil sau ultraviolet. În calitate de emițători sunt utilizați LED-uri și laseri;
- lentilă colimatoare (3 din Fig. 8) și focalizatoare (4 din Fig. 8). Pentru a măsura grosimea învelișului din sticlă precis este necesar ca fluxul de lumină emis să fie colimat, iar după atenuare de microfiredor să fie, după necesitate, focalizat pe foto-senzor;

- foto-senzor (5 din Fig. 8). În dependență de lungimea de undă a fluxului emis poate fi selectat foto-senzorul.
- obturator optic (2 din Fig. 8). Acest element poate avea formă dreptunghiulară sau ovală, astfel încât poziția unghiulară a axei sale față de axa miezului microfirului determină rata absorbției fluxului optic de către microfir.

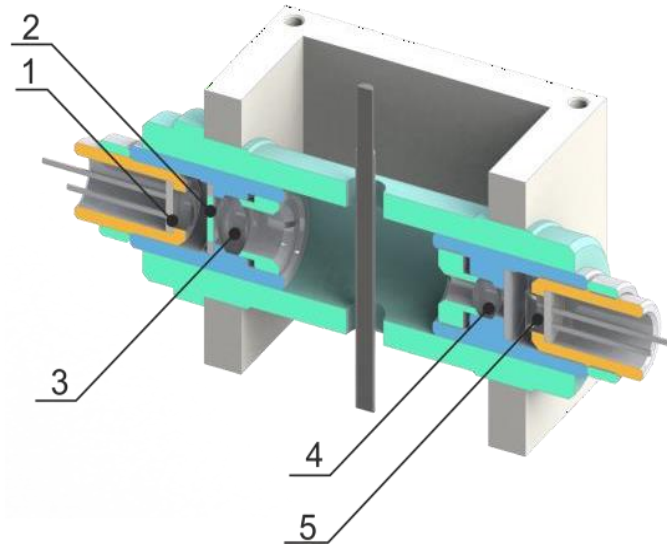


Fig. 8. Ansamblu de colimare

Pentru dispozitivul prezentat în Fig. 9, cadrul de formare a spotului de lumină (format de ansamblul de colimare din Fig. 8) va forma un semnal de ieșire cu valoarea:

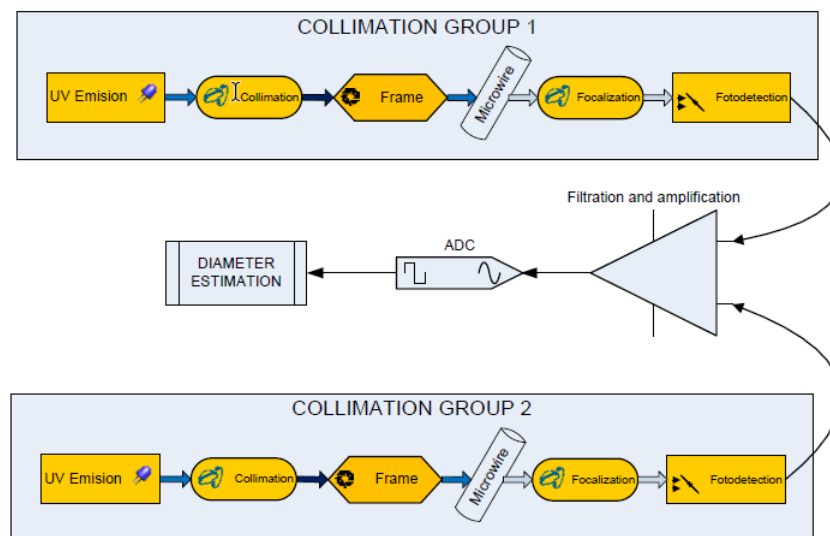


Fig. 9. Măsurarea semnalului utilizând ansamblurile de colimare

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

unde k – constantă, care reprezintă rata de conversie a energiei luminoase în semnal electric, d – diametrul microfirului. Dacă cadrul de formare a spotului de lumină are o formă dreptunghiulară sau ovală, diametrul microfirului poate fi aproximat cu:

$$d = W * [1 - I_{\lambda 11} / I_{\lambda 12}] \quad (2)$$

Pentru măsurări interactive a fost implementat prototipul platformei ce poate fi montată în instalația de turnare a microfilului. Pe platformă sunt instalate ansamblurile de colimare pentru măsurare a diametrului microfirului și ansamblurile de colimare pentru măsurarea diametrului miezului microfirului.

În capitolul III, **ELABORAREA MODELELOR PENTRU MENTENANȚĂ PREDICTIVĂ ÎN IOE**, este prezentat un caz de studiu cu aplicarea senzorilor de deformare fără contact, bazați pe SMF, la monitorizarea vaselor sub presiune din materiale compozite. La fel este prezentată cercetarea și realizarea unui cadru de mentenanță predictivă a paletelor turbinelor eoliene cu utilizarea SMF de deformare fără contact, subiect desfășurat în capitolul 2.

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 paletelor turbinelor eoliene, iar achiziția de date trebuie să includă măsurarea a diverși parametri de interes, și în special deformarea paletelor (Fig. 10).

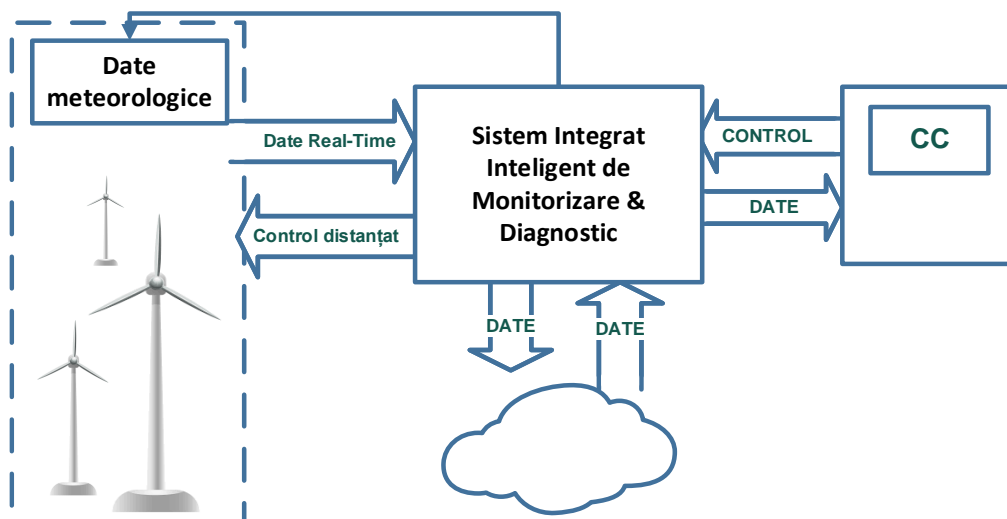


Fig. 10. Monitorizarea condițiilor de lucru pentru parc eolian

Datele colectate sunt necesare, dar pot fi insuficiente pentru un proces de luare a deciziilor eficient și 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.

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 consecință, toate elementele de informare necesare monitorizării stării palelor și care influențează procesul decizional pot fi grupate în următorul mod (Fig. 10):

- 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.

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.

Cu acest scop a fost inițiat un proces de studiu a deformărilor palelor turbinelor eoliene. Scopul primar a simulării deformării palelor este determinarea tensiunilor și deformațiilor echivalente, iar într-un final identificarea condițiilor de solicitare a palei cu stabilirea zonelor critice.

Au fost modelate diverse condiții limită de lucru a rotorului 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. Au fost efectuate simulări pentru viteze nominale a vântului (6-20 m/s). De exemplu, pentru viteza vântului de 16 m/s s-au obținut tensiuni echivalente $\approx 48 \text{ MPa}$ (Fig. 11). 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. Din Fig. 11 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.

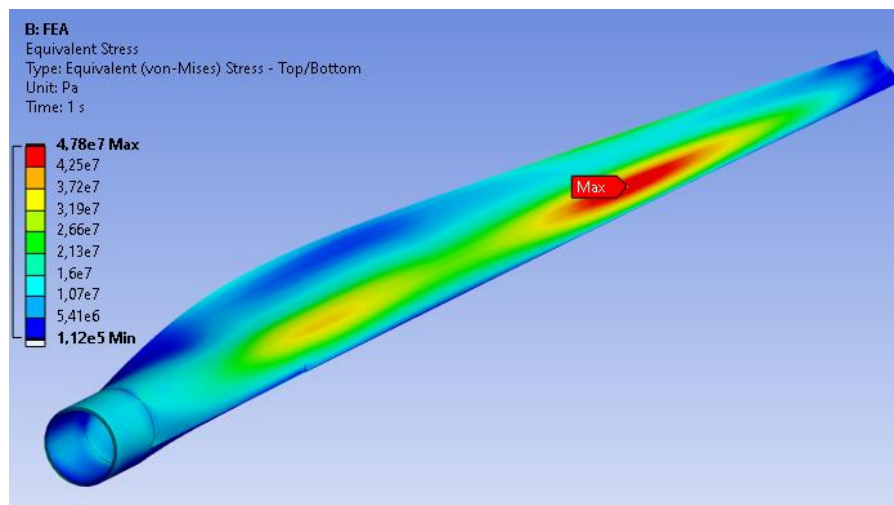


Fig. 11. Distribuția tensiunilor echivalente în învelișul palei la 16 m/s

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. Punctele de interes reprezintă locațiile cele mai vulnerabile ce au fost identificate la $0.18R - \epsilon_1$; $0.3R - \epsilon_2$; $0.5R - \epsilon_3$; $0.7R - \epsilon_4$, unde R – este raza rotorului. Pentru aceste locații au fost efectuate modelări numerice pentru caracterizarea deformațiilor specifice la diverse viteze a vântului.

Pentru modelarea comportamentului de deformare a palelor turbinelor eoliene, a fost proiectată și antrenată o rețea neuronală (ANN) cu un neuron în stratul de intrare (pentru a fi aplicată viteza vântului), zece neuroni în stratul ascuns și patru neuroni în stratul de ieșire (prezintă valorile deformațiilor echivalente pentru punctele de interes conform modelărilor numerice prezentate anterior).

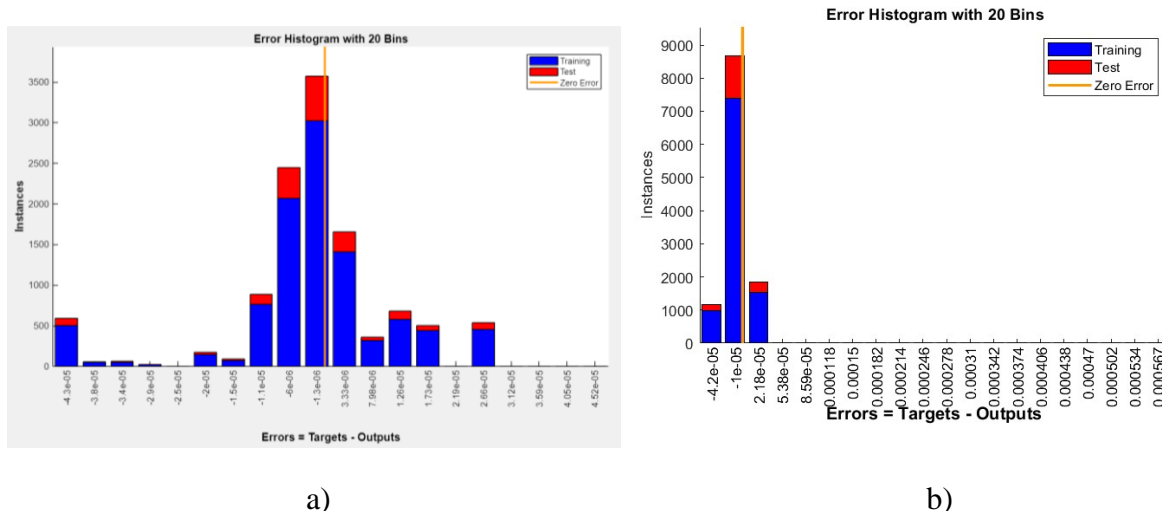


Fig. 12. Histograma erorii medii pătrate a ANN optimă (a) și invalidată (b)

Pentru ilustrarea acurateții modelului ANN, a fost construită histograma erorii medii

pătrate (MSE), Fig. 12. Histograma MSE oferă o perspectivă suplimentară asupra acurateții ANN dezvoltate.

O altă modalitate de evaluare a acurateții modelului ANN este prezentată în Fig. 13. Figura ilustrează modul în care modelul dezvoltat interpolează funcția de deformare specifică în funcție de viteza vântului în prima zonă a palei. Trebuie remarcat faptul că precizia modelului la viteza vântului mai mică de 5 m/s nu prezintă interes practic deoarece acest regim de lucru solicită nesemnificativ turbina eoliană.

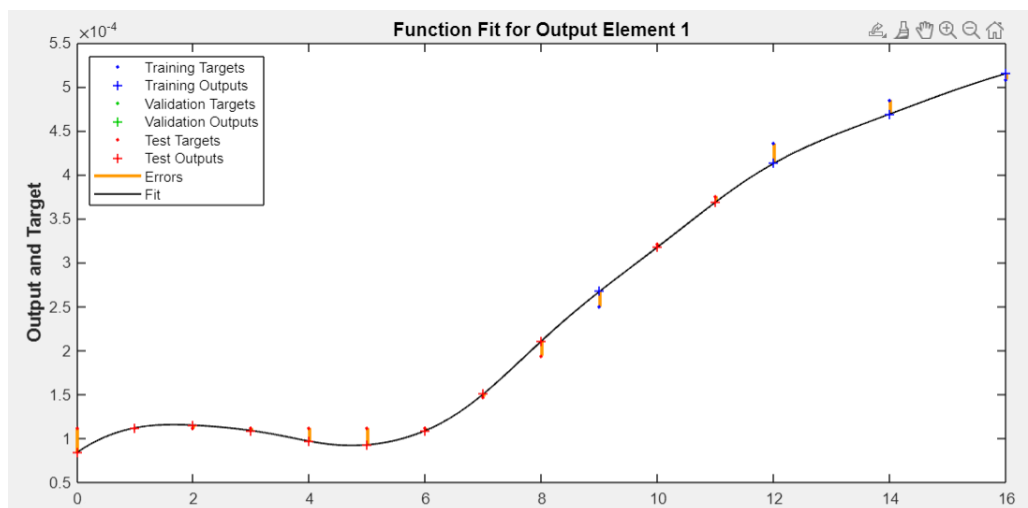


Fig. 13. Aproximarea deformării palei (locația #1)

În baza ANN antrenate s-a propus un model de predicție a tendinței de deformare a structurii din material compozit. Modelul neuronal este reprezentat în mediul de dezvoltare Simulink ca componenta "Function Fitting Neural Network" (Fig. 14), 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. 14. sunt incluse pentru simularea apariției aleatorii a 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.

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.

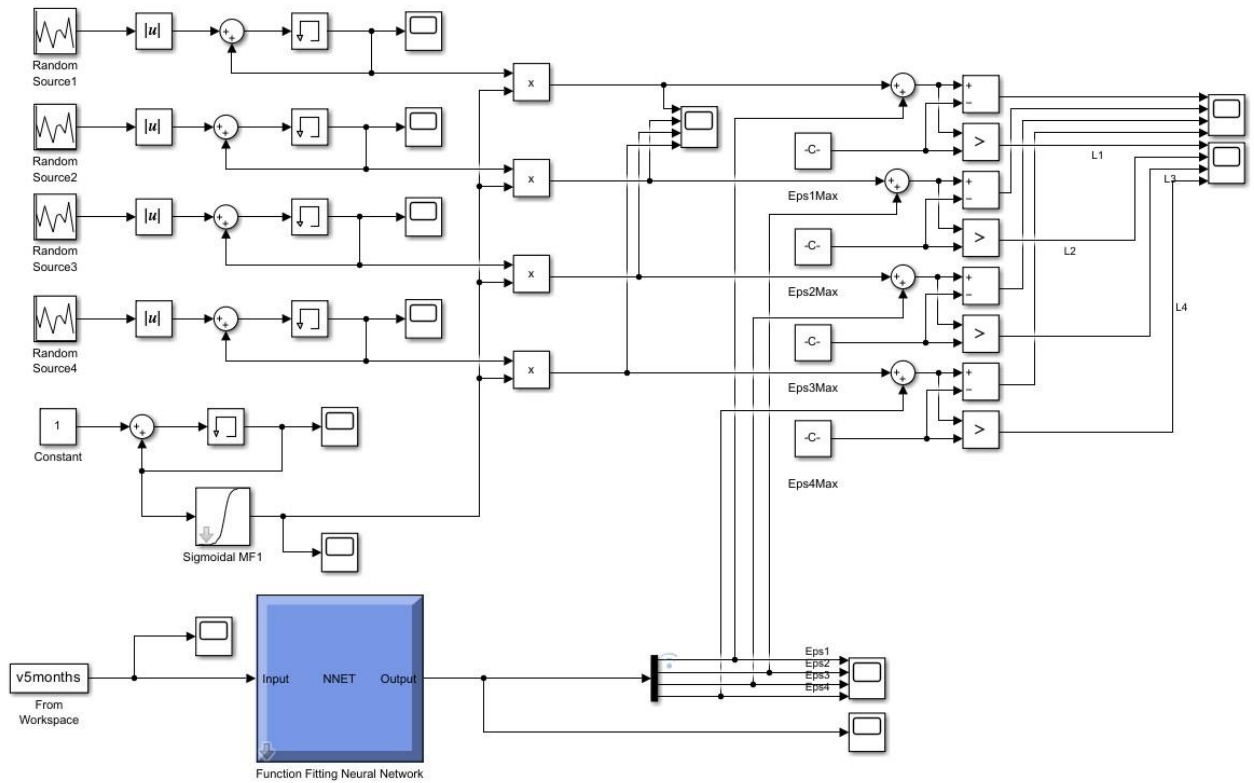


Fig. 14. Schema bloc Simulink a unui sistem de mentenanță predictivă

Pentru testarea modelului de predicție din Fig. 14. a fost utilizat un set de valori medii a vântului. Însă realitatea arată, că mai ales în condiții de câmpii sau podgorii intensificările de vânt 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.

În continuare, pentru a cerceta influența rafalelor de vânt asupra procesului de deformare a palelor turbinelor eoliene a fost implementat un model original în MATLAB Simulink (Fig. 15). Cu ajutorul instrumentului Neural Network Toolbox a fost creat un model de rețea neuronală pentru modelarea deformării palelor.

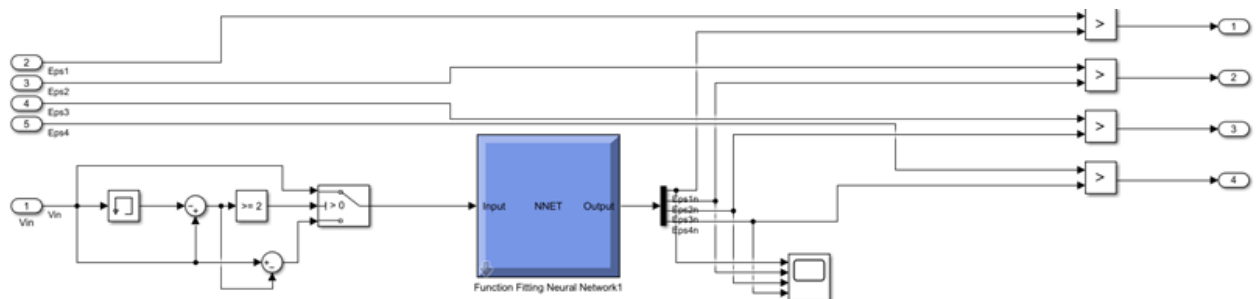


Fig. 15. Modelul de detectare a deformățiilor critice

Pentru modelare 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.

Bazându-ne pe ANN elaborată (în contextul schemei de mentenanță predictivă din Fig. 14) 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. Pentru aceasta datele despre viteza vântului sunt aplicate la intrarea V_{in} , respectiv la intrarea rețelei neuronale *Function Fitting Neural Network 1*, cu utilizarea mecanismului simplu de identificare a rafalelor specificat în Fig. 15. În continuare datele reale sunt comparate cu cele estimate de către rețeaua neuronală.

În capitolul IV, **Monitorizare și control fără contact a pendulului**, este desfășurat subiectul utilizării IoT în educație. În context este descris pendulul Foucault ca platformă educațională cu utilizarea tehnologiei de calcul la margine în era IoT.

După cum se cunoaște, 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, 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, este factorul determinant în atenuarea amplitudinii. Pentru a soluționa problema atenuării amplitudinii s-a propus un sistem bazat pe principiul calculului de margine. Sistemul a fost elaborat pentru a măsura parametrii de lucru și a menține amplitudinea pendulului.

În cazul pendulului Foucault amplasat în condiții reale, pierderile de energie și energia indusă de sistemul de compensare depind de o mulțime de factori secundari cum ar fi: amplitudinea curentă, densitatea aerului, temperatura, umiditatea, tensiunea de alimentare pentru sistemul de compensare etc. Pentru a menține amplitudinea relativ constantă este necesar ca:

$$\Delta E_{pend} < E_{comp} \quad (3)$$

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

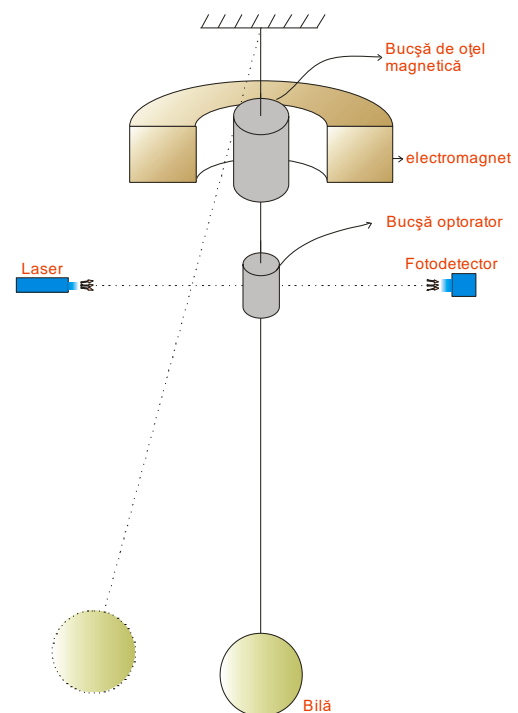


Fig.16. Metoda de măsurare a amplitudinii pendulului Foucault

suspensie este plasată o bușă (Fig.16), la fiecare oscilație a pendulului bușă amplasată pe fir acoperă fototranzistorul (fotodetectorul); măsurând durata de timp cât fototranzistorul este închis, care este proporțională cu viteza bușei, putem măsura și amplitudinea pendulului, deoarece perioada de oscilație, indiferent de viteza bilei, rămâne constantă [10]. Pentru perechea laser-fotodetector, care este plasată perpendicular planului de oscilație a pendulului, amplitudinea poate fi calculată conform:

$$A = \frac{d \cdot L \cdot T}{2\pi \cdot l \cdot t} \quad (4)$$

Pendulul Foucault, datorită forței Coriolis, își schimbă planul de oscilație datorită rotației pământului în jurul axei sale. Pentru a face posibilă măsurarea amplitudinii pentru orice poziție a planului de oscilație au fost efectuate simulări și conform rezultatelor s-a stabilit că pentru a asigura eroarea relativă a amplitudinii cerută de $\pm 2,5\%$ este necesară utilizarea a opt seturi de fotodetectoare.

Pentru menținerea oscilațiilor pendulului s-a utilizat un electromagnet toroidal (Fig.16). La aplicarea tensiunii continue bușă magnetică este atrasă de electromagnet, astfel introducând energie mai mare decât totalul de energie pierdută de pendulul Foucault.

În contextul riscurilor și problemelor depistate în procesul de dezvoltare, s-a decis modelarea forței aplicate bușei magnetice pentru a asigura un caracter aplanat a forței finale. În Fig. 17 este prezentat un model al semnalului de control pentru aplicarea tensiunii electromagnetului (U) și rezultanta forței aplicate (F) bușei pendulului.

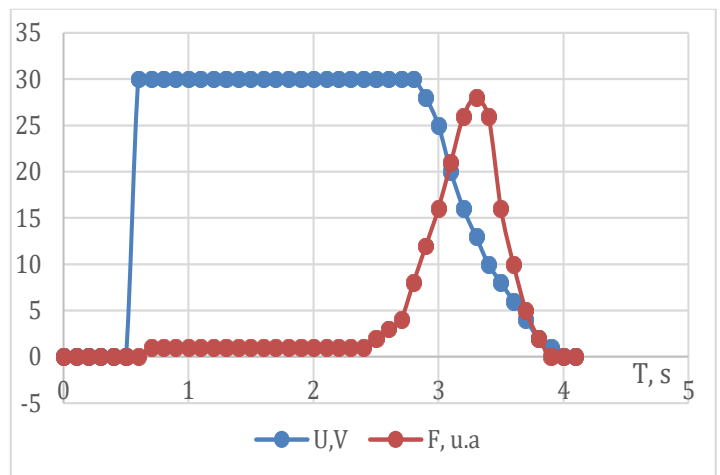


Fig. 17. Caracteristica forței aplicate pendulului

În **Concluzii generale** sunt expuse cele mai importante realizări și rezultate ale tezei. Concluziile generale asupra rezultatelor obținute 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 (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 (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 pe bază de microfir (Cap.2, §2.4, §2.5).
4. A fost propus și dezvoltat conceptul unui dispozitiv optoelectronic încorporat, care permite implementarea metodei optice propuse (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 (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 (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 (Cap.4, §4.2, §4.3).

BIBLIOGRAFIE

1. CESA-BIANCHI, N. și LUGOSI, G., Prediction, learning, and games, Cambridge University Press, 2006, 394 p.
2. MURPHY, K., Machine learning: A Probabilistic perspective, MIT Press, 2012, 1067 p.
3. DOGHRI, W., SADDOUD, A. și CHAARI Fourati, L., "Cyber-physical systems for structural health monitoring: Sensing technologies and intelligent computing", *Journal of Supercomputing*, vol. 78, pp. 766–809, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11227-021-03875-5>.
4. LAFLAMME, S., UBERTINI, F., DI MATTEO, A. et. al., "Roadmap on measurement technologies for next generation structural health", *Measurement Science and Technology*, vol. 34, no. 9, 093001, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6501/>.
5. OCHIENG, F., CRAIG Matthew, H., GETHIN Wyn, R., Le KERNEC, J. și MAALAWI, K., "Optimal Design and Operational Monitoring of Wind Turbine Blades", in *Design Optimization of Wind Energy Conversion Systems with Applications*, Rijeka, IntechOpen, 2020. DOI: 10.5772/intechopen.90258.
6. 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>.
7. 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, no. 1, pp. 128-131, 2013. DOI: doi.org/10.1109/TMAG.2012.2219854.
8. 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, 169456, 2022. DOI: doi.org/10.1016/j.jmmm.2022
9. ZAPOROJAN, S., PLOTNIC, C., CALMICOV, I. și LARIN, V., "A knowledge-based approach for microwire casting plant control", in *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.
10. ЗАБОЛОТНОВ, Ю., Теория колебаний, Самара: Самарский ГАУ им. акад. С.П.Королева, 1999, 168 p.

Lista lucrărilor publicate la tema tezei

Articole în reviste științifice

1. **MUNTEANU, E.**, SECRIERU, V., DOROGAN, A., Automation, control and monitoring of the rotation oscillation plane within Foucault pendulum. In *ACTA TECHNICA NAPOCENSIS, Series: Applied Mathematics, Mechanics, and Engineering*. vol. 67, No. 2s 2024, pp. 523-530, ISSN 1221 – 5872.
2. DULGHERU, V., GUȚU, M., ZAPOROJAN, S., **MUNTEANU, E.**, Aspects regarding operation predictability of wind turbines. In *ACTA TECHNICA NAPOCENSIS, Series: Applied Mathematics, Mechanics, and Engineering*. vol. 67, No. 2s 2024, pp. 671-680, ISSN 1221 – 5872.
3. ZAPOROJAN, S., **MUNTEANU, E.**, LARIN, V. PAVEL, V., CHICU, L., Embedded devices and methods for development of special non-contact applications. In *Journal of Engineering Science*. vol. XXX, no. 4 (2023), pp. 63-74.
[https://doi.org/10.52326/jes.utm.2023.30\(4\).05](https://doi.org/10.52326/jes.utm.2023.30(4).05)
4. **MUNTEANU, E.**, Sistem încorporat de măsurare și control a amplitudinii pendulului Foucault. In *Intellectus*. no. 2 (2022), pp. 109-113.
<https://agepi.gov.md/ro/intellectus/intellectus-2-2022>

Articole în culegeri științifice

5. **MUNTEANU, E.**; ZAPOROJAN, S.; DULGHERU, V.; SLAVESCU, R.R.; LARIN, V.; RABEI, I. Intelligent Condition Monitoring of Wind Turbine Blades: A preliminary approach. In: *Proceedings of the IEEE 18th International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing (ICCP 2022)*, September 22-24, 2022, Cluj-Napoca, Romania, pp. 9-16. DOI: [10.1109/ICCP56966.2022.10053939](https://doi.org/10.1109/ICCP56966.2022.10053939).
6. ZAPOROJAN S., CARBUNE V., SLAVESCU R.R., **MUNTEANU, E.**, DULGHERU V., GUȚU M. Modeling the deformation behavior of wind turbine blades using artificial neural networks. In: *Proceedings of the IEEE 19th International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing (ICCP 2023)*, October 26-28, 2023, Cluj-Napoca, Romania, pp. 19-25, doi: [10.1109/ICCP60212.2023.10398625](https://doi.org/10.1109/ICCP60212.2023.10398625).
7. DOROGAN, V., **MUNTEANU, E.**, SECRIERU, V. ZAPOROJAN, S., Metode Optice de Măsurare a Microfirului: Diametrului Miezului și Grosimii Învelișului. In *International Conference “Telecommunications, Electronics and Informatics”*, 2015, Chișinău, TUM, pp. 387-389, ISBN 978-9975-45-377-6.
8. DOROGAN, V., **MUNTEANU, E.**, ZAPOROJAN, S., et al. “Microwire Measurement Device”. In: *Proceedings of the 9-th International Conference on Microelectronics and*

- Computer Science& The 6th Conference of Physicists of Moldova, ICMCS 2017, Chisinau, Moldova, October 19-21, 2017, pp. 41-44. ISBN 978-9975-4264-8-0.
9. **MUNTEANU, E.**, SECRIERU V., BALICA, Ș., „Sistem de compensare a pierderilor de energie a Pendulului Foucault”, In “*Conferința Tehnico-Științifică a Colaboratorilor, Doctoranzilor și Studenților*” vol. 1, pp. 81-85, Chișinău, TUM, 2007, ISBN 978-9975-45-068-3
 10. **MUNTEANU, E.**, SECRIERU V., BALICA, Ș., „Principiul de funcționare a sistemului de măsurare a amplitudinii pendulului Foucault”, In “*Conferința Tehnico-Științifică a Colaboratorilor, Doctoranzilor și Studenților*” vol. 1, pp. 86-89, Chișinău, TUM, 2007, ISBN 978-9975-45-068-3
 11. BOSTAN, I., GERU, I., DOROGAN, V., SECRIERU, V., **MUNTEANU, E.** et al. „System of determination and compensation of losses in Foucault Pendulum”, In *Transactions on metrology and analytical methods of research*, Chisinau, Academy of Sciences of Moldova, 2010, pp. 8-20., ISBN 978-9975-62-276-9

Teze în culegeri științifice

12. DOROGAN, V.; ZAPOROJAN, S.; **MUNTEANU, E.**; LARIN, V. A Method For Measuring Microwire Parameters. In Book of abstracts of the *8th International Conference on Materials Science and Condensed Matter Physics (MSCMP 2016)*, September 12-16, 2016, Chisinau, Republic of Moldova, p.159. ISBN 978-9975-9787-1-2.
13. DOROGAN, V., ZAPOROJAN, S., **MUNTEANU, E.**, LARIN, V., PAVEL, V. Device for measurement of the microwire core diameter and the glass coating thickness by using the optical transparency phenomena. In: *Proceedings of The 9th Edition of European Exhibition of Creativity and Innovation, EUROINVENT 2017*, May 25 – 27, 2017, Iași, Romania, p. 168. ISBN 978-606-775-212-0.
14. DOROGAN, V., ZAPOROJAN, S., **MUNTEANU, E.**, LARIN, V., PAVEL, V., VIERU, T., VIERU, S., CALMÎCOV, I., System for measuring the nucleus diameter and coating thickness of the microwire. In: *The 18th International Exhibition of Research, Innovation and Technological Transfer “Inventica 2014”*, Iasi, Romania, July 2th-4th, 2014: Workshop Inventica 2014. Iași: Performantica, 2014, p. 509. ISSN 1844-7880.
15. DOROGAN, V., ZAPOROJAN, S., LARIN, V., VIERU, T., CALMÎCOV, I., VIERU, S., **MUNTEANU, E.**, DOROGAN, A., SECRIERU, V. Optoelectronic device for measuring the glass thickness and diameter of the micro-wires. In: Catalog of the 38-th International Invention Show INOVA -2013. Nov. 12-17, 2013. Zagreb, Croația. p. 118.
16. ZAPOROJAN, S., LARIN, V., TRONCIU, V., **MUNTEANU, E.**, PAVEL, V., CHICU, L. Senzor fără contact de măsurare a deformării bazat pe microfibre feromagnetice amorfe. In: *Catalogul Salonului Internațional al Cercetării Științifice, Inovării și Inventicii*

PROINVENT 2022. Ediția a XX-a, Cluj-Napoca 26 - 28 octombrie 2022. Editura U.T.PRESS, p.240. ISSN 2810-2789, ISSN-L 2810-2789.

17. ZAPOROJAN, S., CARBUNE, V., SLAVESCU, R.R., **MUNTEANU, E.**, DULGHERU, V., GUȚU, M. Modeling the deformation behavior of wind turbine blades using artificial neural networks. In: *Book of Abstracts of the IEEE 19th International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing (ICCP 2023)*, October 26-28, 2023, Cluj-Napoca, Romania, p.8.
18. SECRIERU, V., **MUNTEANU, E.**, BALICA, Ș., „Sistemul de protecție contra oscilațiilor de amplitudă excesivă a pendulului Foucault”, In “*Conferința Jubiliară Tehnico-Științifică a Colaboratorilor, Doctoranzilor și Studenților consacrată celei de-a 40-a Aniversari a Doctoranturii UTM*”, pp. 44-45, TUM, Chișinău, 2006, ISBN 978-9975-45-025-6
19. SECRIERU, V., **MUNTEANU, E.**, BALICA, Ș., „Pendulul Foucault. Metodica de înregistrare și indicare”, In “*Conferința Tehnico-Științifică a Colaboratorilor, Doctoranzilor și Studenților*”, pp.62-63, TUM, Chișinău, 2006, ISBN 978-9975-45-025-6
20. **MUNTEANU, E.**, SECRIERU V., BALICA, Ș., „Echipament de dirijare a Pendulului Foucault”, In “*Conferința Tehnico-Științifică a Colaboratorilor, Doctoranzilor și Studenților*” vol. 1, pp. 78-79, Chișinău, TUM, 2007, ISBN 978-9975-45-068-3

Brevete de invenții

1. DOROGAN, V., ZAPOROJAN, S., **MUNTEANU, E.**, et al. *Metodă de măsurare a diametrului miezului și grosimii învelișului din sticlă al microfîrului*. MD 942, BOPI nr. 8/2015., 04 06 2015. <http://db.agepi.md/Inventions/details/s%202015%200023>
2. DOROGAN, V., ZAPOROJAN, S., **MUNTEANU, E.**, et al. *Dispozitiv pentru măsurarea diametrului miezului și grosimii învelișului din sticlă al microfîrului*. MD 941, BOPI nr. 8/2015, 04 06 2015. <http://db.agepi.md/Inventions/details/s%202015%200022>
3. LARIN, V., ZAPOROJAN, S., **MUNTEANU, E.**, et al. *Senzor de deformare fără contact*. MD 4876, BOPI nr.11/ 2023, 30 11 2023. <http://db.agepi.md/Inventions/details/a%202022%200020>
4. DULGHERU, V., ZAPOROJAN, S., LARIN, V., MANOLI, I., **MUNTEANU, E.**, RABEL, I., *Dispozitiv și metodă de monitorizare predictivă a stării turbinei eoliene și de implementare a contramăsurilor*. MD 1701 Y., BOPI nr.3/2023, 30 06 2023. <http://db.agepi.md/Inventions/details/s%202022%2000030>

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/loE”, 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 loE.

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 loE, 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, systems with embedded intelligence.

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

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, IIoE, в частности, для приложений предиктивного обслуживания.

Внедрение научных результатов: применяются в учебном процессе ТУМ.

MUNTEANU EUGENIU

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

**232.01 “SISTEME DE CONDUCERE, CALCULATOARE ȘI REȚELE
INFORMAȚIONALE”**

REZUMATUL TEZEI DE DOCTOR ÎN ȘTIINȚE INGINEREȘTI

Aprobat spre tipar 06.12.2024

Formatul hârtiei 60x84 1/16

Hârtie ofset. Tipar RISO

Tirajul 50 ex.

Coli de tipar 2,0

Comanda nr.

UTM, 2004, Chișinău, bd. Ștefan cel Mare și Sfânt, 168

Editura "Tehnica-UTM"

MD 2045, Chișinău, str. Studenților, 9/9

© UTM, 2024