



UNIVERSITATEA „POLITEHNICA” din BUCUREȘTI

ȘCOALA DOCTORALĂ DE INGINERIE ELECTRICĂ

TEZĂ DE DOCTORAT

**OPTIMIZAREA ȘI CONTROLUL SISTEMELOR
ELECTRICE DESTINATE AUTOMATIZĂRII
UNUI STAND DE ÎNCERCĂRI PENTRU
PROPULSIE SPAȚIALĂ**

- Rezumatul Tezei de Doctorat -

Doctorand: **Ing. Adrian Stoicescu**

Conducător de doctorat: **Prof.univ.Dr.-Ing. Valentin Năvrăpescu**

BUCUREȘTI 2023

Cuprins

Lista abrevierilor	iv
1. Introducere	5
1.1 Prezentarea domeniului de doctorat	5
1.2 Scopul tezei	6
1.3 Conținutul tezei	6
2. Standuri automatizate pentru propulsie aerospațială	8
2.1. Conceptul de automatizare.....	8
2.1.1. Senzorii și instrumentarea.....	8
2.1.2. Elementele de execuție (actuatorii).....	9
2.1.3. Elementele de infrastructură (cabluri, tablouri, etc.)	11
2.1.4. Sistemul de monitorizare și control. Software-ul. Achiziția de date și postprocesarea.....	11
2.1.5. Problemele și neajunsurile actuale în domeniu	12
2.1.6. Inovațiile în domeniu	12
2.2. Automatizări pentru standuri de testare elemente de propulsie aerospațială	14
2.2.1. Stand de testare propulsie clasică (turbomotor de aviație)	14
2.2.2. Stand de pompare aer pentru testare cameră de ardere.....	15
2.2.3. Stand de testare propulsie aerospațială electrică.....	19
2.2.4. Stand de testare turbopompă moleculară pentru motor de rachetă.	23
3. Funcționarea aplicației	24
3.1. Cerințele specifice.....	24
3.2. Parametrii de intrare.....	24

3.3. Parametrii de ieșire	25
3.4. Tipul de control.....	25
4. Dezvoltarea automatizării și aspectele cercetate.....	26
4.1. Identificarea soluțiilor de instrumentare	26
4.2. Studiul unor soluții de instrumentare inovativă	27
4.2.1. Senzori optici	27
4.2.2. Senzori autonomi/wireless	28
4.2.3. Soluții energetice din tehnologii nepoluante. Studiu de caz practic	29
4.3. Controlul automat al aplicației	31
4.3.1. Soluția hardware	31
4.3.2. Dezvoltarea software	33
4.3.3. Testarea automatizării. Metoda HIL (Hardware-in-the-Loop)	36
5. Concluzii	39
5.1. Rezultate obținute	39
5.2. Contribuții originale.....	40
5.3. Lista lucrărilor originale	41
5.4. Perspective de dezvoltare ulterioară	42
Bibliografie	44

Lista abrevierilor

- \$ - Dolar(i) american(i)
- AC – Alternating Current (curent alternativ)
- COMOTI – Institutul National de Cercetare-Dezvoltare Turbomotoare COMOTI din București
- DAQ – Data Acquisition (achiziție de date)
- DC – Direct Current (curent continuu)
- DSP – Digital Signal Processor (procesor de semnal digital)
- DV – Discharge Valve (vana de descărcare a standului de compresor)
- EMC – Electromagnetic Compatibility
- ECU – Engine Control Unit – (unitatea de control a motorului)
- FADEC – Full Authority Digital Engine Control
- FBG – Fiber Bragg Grating (termen utilizat în cazul senzorilor cu fibră optică)
- FFT – Fast Fourier Transform (transformata Fourier rapidă)
- FPGA – Field Programmable Gate Array (rețea de porți programabile)
- GB – Gigabyte
- HIL – Hardware-in-the-Loop
- I/O – Input/Output (intrări/ieșiri)
- IEPE – Integrated Electronics Piezo-Electric
- NGV – Nozzle Guide Vane (ajutaj cu palete culisante de ghidare)
- P2 – Presiunea de ieșire a aerului din compresor
- PC – Personal Computer (computer personal)
- PID – Proportional Integral Derivativ
- PLC – Programmable Logic Controller (automat logic programabil)
- RAM – Random-access memory
- RF – Radiofrecvență
- RX – Recepție
- SCADA – Supervisory control and data acquisition
- SDR – Software Defined Ratio (sistem cu parametri definiți software)
- SSD – Solid-state drive
- TRL – Technology Readiness Level (nivel de pregătire tehnologică)
- Turbofan – Tip de turbomotor care utilizează o turbină și un ventilator pentru a împinge aerul în spate
- Turbojet – Tip de turbomotor care utilizează o turbină și un ajutoraj de propulsie
- TX – Transmisie
- USB – Universal Serial Bus
- WSN – Wireless Network Sensor (rețea de senzori wireless)

Capitolul 1

Introducere

1.1 Prezentarea domeniului tezei de doctorat

Optimizarea și controlul sistemelor electrice reprezintă un aspect esențial pentru dezvoltarea și îmbunătățirea performanțelor sistemelor de propulsie aerospațială. Propulsoarele aerospațiale (turbomotoare, propulsoare pentru spațiu, etc.) sunt inima oricărei misiuni aeronautice sau spațiale, de aceea este foarte important ca acestea să fie testate în standuri de testare special concepute pentru a asigura siguranța și performanța optimă a acestora.

Standurile de încercări pentru propulsie aerospațială sunt utilizate pentru a testa și valida performanțele motoarelor și sistemelor de propulsie. Ele sunt utilizate în mod obișnuit în industria aeronautică și spațială, dar și în alte domenii în care sunt necesare sisteme de propulsie cu combustie. Standurile sunt proiectate să simuleze condiții relevante pentru funcționarea propulsoarelor în mediul în care acestea trebuie să funcționeze: la altitudini mari sau în spațiu.

Principalele componente ale standurilor de testare pentru propulsoare includ motorul de testare sau propulsorul propriu-zis, instalația de alimentare cu combustibil, instalația de răcire și/sau de ungere, sistemul de evacuare, sistemele electrice și electronice, inclusiv sistemul de control și achiziția de date.

Controlul și optimizarea sistemelor electrice ale acestor standuri de încercare sunt esențiale pentru a asigura precizia și siguranța testelor. Standurile de încercări pentru propulsie aerospațială includ o varietate de componente electrice și electronice care trebuie controlate și monitorizate pentru a asigura funcționarea corectă a sistemului. Acestea includ: senzori, actuatori (cum ar fi clapete, robinete/vane, pompe, ventilatoare), software de control. Software-ul poate include algoritmi de control, sisteme de reglare și sisteme de protecție împotriva supratensiunilor sau a altor probleme.

Optimizarea sistemelor electrice în standurile de încercări pentru propulsie aerospațială poate îmbunătăți performanța și eficiența ansamblelor testate și ale standului. Există mai multe tehnici de optimizare care pot fi utilizate, cum ar fi:

- **Controlul automat:** Controlul automat este utilizat pentru a ajusta parametrii propulsorului în timp real, bazându-se pe datele colectate de senzori și pe instrucțiunile de control programate în software-ul de control. Controlul automat poate fi realizat utilizând o varietate de tehnici, cum ar fi decizii logice, controlul PID (proporțional-integral-derivativ) sau controlul adaptiv.

Controlul automat poate asigura o reglare precisă și rapidă a parametrilor motorului, îmbunătățind performanța și reducând consumul de combustibil.

- **Monitorizarea performanței:** Monitorizarea performanței sistemului poate fi utilizată pentru a identifica problemele de performanță și pentru a optimiza parametrii motorului. Aceasta poate fi realizată prin monitorizarea parametrilor critici, cum ar fi consumul de combustibil, temperatura și viteza motorului și prin analiza datelor colectate pentru a identifica tendințe sau probleme.
- **Optimizarea circuitelor electrice:** Optimizarea circuitelor electrice poate fi utilizată pentru a îmbunătăți eficiența sistemului și pentru a reduce pierderile de energie. Aceasta poate fi realizată prin utilizarea componentelor de înaltă performanță, prin minimizarea interferențelor parazite și prin proiectarea circuitelor pentru a minimiza pierderile de energie.
- **Utilizarea energiei regenerabile:** În sistemele electrice, energia regenerabilă este energia generată de componente care se alimentează din energii neconsumatoare de resurse vitale, care există deja în mediul din jur și sunt în mod tradițional neutilizate (soare, vânt, vibrații, ș.a.). Această energie poate fi stocată și utilizată pentru a alimenta alte componente ale sistemului, reducând astfel consumul de energie și costurile de operare.

1.2 Scopul tezei de doctorat

Pe măsură ce industria aerospațială se dezvoltă și se extinde, se estimează că cererea pentru standuri de testare pentru propulsoare aerospațiale va crește semnificativ. Scopul tezei de doctorat este de a cerceta și a contribui la dezvoltarea de soluții eficiente și fiabile pentru monitorizarea și controlul procesului de testare a propulsoarelor utilizate în aeronave și vehicule spațiale. Aceste sisteme joacă un rol crucial în asigurarea unei funcționări sigure și eficiente a standului și a sistemului de propulsie, fiind responsabile de controlul turației și a altor elemente de execuție, precum și de monitorizarea temperaturii, vibrațiilor și altor parametri relevanți.

În această teză, se explorează importanța dezvoltării și a optimizării controlului sistemelor electrice destinate automatizării unui stand de încercări pentru propulsie aerospațială. Se discută diversele componente ale acestor sisteme, inclusiv senzorii, actuatorii și software-ul de control, și se va analiza modul în care acestea pot fi optimizate pentru a îmbunătăți performanța și eficiența sistemului.

1.3 Conținutul tezei de doctorat

În capitolul 2 se prezintă noțiuni privind soluțiile pentru standuri automatizare de testare a propulsoarelor spațiale. Se introduc aspecte tehnice privind componentele principale ale automatizărilor pentru astfel de standuri: senzori (instrumentare), elemente de execuție (actuatori), elemente de infrastructură (cabluri, tablouri, etc.), sistem de monitorizare și control, aspecte legate de software și achiziția de date. Se prezintă neajunsurile, cât și inovațiile din domeniu. Dincolo de acestea, se prezintă 4 exemple de standuri unde am avut o contribuție importantă în dezvoltarea sistemelor de control: stand de testare propulsie clasică (turbomotor de aviație), stand de pompare aer pentru testare cameră de ardere a turbomotoarelor, stand de testare a unui

Optimizarea și controlul sistemelor electrice destinate automatizării unui stand de încercări pentru propulsie spațială

model experimental de propulsie aerospațială electrică, și un stand de testare pentru turbopompe moleculare utilizate în motoare de rachetă.

În capitolul 3, se prezintă mai în detaliu aspecte legate de funcționarea unuia dintre standurile enumerate mai sus, anume standul de testare pentru turbopompă moleculară pentru rachetă. Aceste aspecte servesc la descrierea funcționării aplicației și la conturarea unor cerințe care stau la baza dezvoltării automatizării dedicate, printre care: cerințe specifice de funcționare, parametrii de intrare și de ieșire, tip de control.

În capitolul 4 se descrie dezvoltarea automatizării, cu accent pe sistemul de control automat al standului: controler, semnale, software. În cadrul dezvoltării se prezintă și o identificare a soluțiilor de instrumentare pentru această automatizare. Mai mult decât atât, se prezintă un studiu propriu privind tehnologii de instrumentare inovative. În cadrul lui, am studiat posibilități de conversie a energiei disipate prin vibrații în energie electrică utilizabilă. Am studiat aspecte precum: structura și caracteristicile generatoarelor piezoelectrice, rețelele de harvesting, aplicativitatea și optimizarea lor. În sensul dezvoltării sistemului de comandă, am prezentat o arhitectură pentru un sistem de instrumentare autonom, cu transmisie wireless și alimentat cu ajutorul energiei din vibrații. Am mai studiat, de asemenea, la nivel teoretic, senzori optici și senzori wireless, analizându-se aplicarea lor în aplicațiile cu turbomotoare. Dincolo de acestea, am prezentat soluția finală și funcțională pentru un sistem de control dezvoltat special pentru acest stand. Testarea sistemului s-a realizat atât prin metode clasice, cât și prin metoda Hardware-in-the-Loop, o metodă suplimentară, inovativă, de a testa controllerul și software-ul de control, prin simularea echipamentelor testate, înainte de disponibilitatea fizică acestora. Am dezvoltat această simulare în urma cercetării aplicării ei la aplicații similare la nivel mondial.

În capitolul 5 sunt prezentate concluziile, contribuțiile originale și perspectivele de dezvoltare ulterioară.

Capitolul 2

Standuri automatizate pentru propulsie aerospațială

2.1 Conceptul de automatizare

Automatizarea este un concept care se referă la utilizarea sistemelor electromecanice pentru a efectua sarcini fără intervenția umană sau cu o intervenție umană cât mai mică. Acest concept a devenit din ce în ce mai important odată cu avansarea tehnologiei și cu nevoia de eficientizare a proceselor industriale, precum și a altor activități care necesită procese repetitive și precise.

Sistemele de automatizare sunt utilizate pentru a efectua o varietate de sarcini, cum ar fi controlul temperaturii și presiunii, controlul instalațiilor, încărcarea și descărcarea, monitorizarea stării echipamentelor și multe altele. Unul dintre marile avantaje ale automatizării este acela că se pot reduce costurile și se poate îmbunătăți eficiența sistemului în ansamblul său. Sistemele de automatizare pot funcționa non-stop, fără pauze sau erori umane, ceea ce poate reduce timpul de procesare și poate crește producția. De asemenea, automatizarea poate reduce costurile prin reducerea numărului de angajați necesari pentru a efectua o anumită sarcină.

Automatizarea poate fi realizată prin utilizarea unui sistem de control care monitorizează și controlează activitățile. Sistemele de control automatizate sunt compuse dintr-o unitate de procesare centrală, senzori și actuatori. Unitatea de procesare centrală preia datele de la senzori și utilizează aceste date pentru a controla acțiunile actuatorilor. Senzorii sunt responsabili pentru măsurarea parametrilor fizici, cum ar fi temperatura, presiunea, viteza și nivelul. Actuatorii sunt responsabili pentru controlul proceselor, cum ar fi deschiderea și închiderea supapelor, pornirea și oprirea motoarelor, și multe altele.

Mai departe descriu principalele componente ale unei automatizări tipice de stand de încercări.

2.1.1 Senzorii și instrumentarea

Instrumentarea aplicațiilor de standuri de testare pentru turbomotoare și propulsoare aerospațiale presupune utilizarea unui set complex de senzori care permit măsurarea unor parametri critici, precum presiunea, temperatura, debitul de aer sau combustibil, vibrațiile și alte informații importante pentru a evalua performanța și fiabilitatea acestor echipamente.

Optimizarea și controlul sistemelor electrice destinate automatizării unui stand de încercări pentru propulsie spațială

Senzorii cu comunicație la distanță, conectați la sistemul de automatizare, sunt parte integrantă din acesta și din logica de control în buclă închisă pe care acesta o poate realiza. Pe baza valorilor transmise de senzor către sistemul de control, software-ul poate identifica dacă valorile măsurate depășesc limitele admise și poate declanșa secvențe care să avertizeze operatorul, să comande manevre de îndepărtare a pericolului (ex: deschiderea unei vane de evacuare) sau să decidă oprirea funcționării instalațiilor principale.

Limitele senzorilor pot ține de: acuratețea măsurării, rezoluția semnalului sau timpul de răspuns, aspecte care pot contribui sau afecta performanța sistemului. De asemenea, tipul de interfață trebuie să fie compatibilă cu celelalte interfețe ale sistemului cu care senzorul comunică.

În funcție de parametrii mășurați, senzorii pot fi de următoarele tipuri: senzori de presiune, temperatură, debit, vibrații.

În realizarea unei automatizări, este important să se ia în considerare toate aspectele tehnice relevante și să se aleagă senzorii potriviți pentru aplicația de testare în cauză. Alegerea trebuie să se facă nu doar după tipul de parametru măsurat, cât și după caracteristicile de precizie și de interfață care influențează integrarea senzorului în sistem și realizarea unei măsurători la calitatea dorită. De exemplu, o interfață de senzor compatibilă cu restul lanțului de măsurare, până la controller, optimizează procesul de măsurare prin faptul că nu mai sunt necesare măsuri suplimentare de compatibilizare, precum convertoare de semnal sau interconexiuni suplimentare. Aceste măsuri sunt de evitat deoarece interconexiunile sau orice electronică suplimentară pot adăuga întârzieri sau chiar perturbații suplimentare pe lanțul de măsură.

De asemenea, este important să se asigure că senzorii sunt calibrați corespunzător și să se facă ajustările și testele prelabile necesare pentru a asigura precizia măsurătorii.

2.1.2 Elementele de execuție (actuatorii)

Elementele de execuție sunt acele echipamente care primesc comenzi de la sistemul de control și, cu ajutorul unei forme de energie, execută manevre fizice pentru a realiza obiectivele instalației, a standului în cazul de față. Printre cele mai des întâlnite elemente de execuție în standurile de testare pentru un sistem de propulsie aerospațială pot fi: motoarele electrice, vanele, pompele electrice (care au în componență tot motoare electrice) și rezistențele de încălzire.

Vanele. Majoritatea aplicațiilor de control mai complexe din ziua de azi utilizează vane cu acționare electrică. Actuatorul vanei primește comanda de la sistemul de control și poziționează cu precizie vana în poziția dorită. Actuatorii pot închide și deschide vana complet sau pot permite și poziții intermediare. Ei pot conține contacte sau alte metode de semnalizare a poziției vanei către sistemul de control.

Motoarele actuatorilor electrici ale vanelor sunt motoare adaptate special pentru astfel de aplicații, fiind necesar să funcționeze în condiții de mediu extreme și să aibă un cuplu de pornire mai mare decât la motoarele obișnuite. Majoritatea motoarelor sunt motoare asincrone trifazate, monofazate sau motoare de curent continuu. Aplicațiile descrise în această lucrare utilizează cu precădere motoare monofazate de curent alternativ. Motivele sunt atât tehnice (mai facil de automatizat schimbarea de sens cu ajutorul a două relee), cât și economice.

Limitatoarele actuatorilor semnalizează capetele cursei unei vane. În cazul vanelor cu poziții intermediare, generarea unui semnal electric analogic, sub formă de curent 4-20 mA sau tensiune, este necesară pentru citirea poziției exacte a vanei. Pentru comanda de la distanță se impune, de asemenea, transmiterea unui semnal analogic de la sistemul de control către actuatorul vanei.

Pentru comanda și citirea poziției sunt necesare echipamente electrice corespunzătoare tipului de acționare, care să preia și să traducă semnalul citit sau prescris în semnal util. Ele pot consta în convertoare analog-digital/digital-analog, relee, contactoare și alte elemente care interfațează cu dispozitivul principal de control (PLC, panou de operare, placă de achiziții de date, etc.). Adaptoarele de semnal, inclusiv barierele de siguranță pentru semnale, trebuie să corespundă inclusiv cu cerințele de siguranță aferente aplicației, cum ar fi îndeplinirea certificării în aplicații cu potențial exploziv, dacă este cazul. Aceasta presupune, printre altele, izolarea galvanică a semnalului între PLC, aflat în zonă protejată și echipamentul din stand, aflat în zonă cu risc sporit de explozie.

În lucrarea *“Electronic Improvements Made for Industrial Valve”*, C. Nicolescu, B. Varaticeanu, A. Stoicescu, C. Nechifor, *Electrotehnica Electronica Automatica (EEA) Journal*, 2020, Vol. 68, nr. 3, pp. 05-12 [8], am participat la o campanie de cercetări teoretice și practice privind îmbunătățirile și optimizările care pot fi aduse vanelor industriale, ca parte din sisteme de automatizare pentru instalații cu gaz. Cercetările au inclus:

- testarea înlocuirii contactelor mecanice de poziție cu contacte optice;
- utilizarea unui senzor de tip Pt1000 pentru monitorizarea temperaturii interne;
- utilizarea unui senzor de umiditate pentru determinarea condensului
- considerarea oportunității studierii altor îmbunătățiri.

Realizată în cadrul unui proiect de transfer de cunoștințe dintre Institutul COMOTI și întreprinderea ICPE, campania pe care am coordonat-o a explorat posibilitățile și limitele acestor îmbunătățiri, în încercarea de a prototipa un actuator de vană cu dotări suplimentare celor uzual întâlnite. Principalul impediment rămas de îmbunătățit a fost legat de gabaritul soluției cu contacte optice, având în vedere că în toate aspectele studiate s-au utilizat piese componente existente pe piață.

Motoarele electrice reprezintă elemente deosebit de importante deoarece acestea pot angrena ansamble mecanice, mașini care pot fi obiectul central de studiu al aplicațiilor, sau fluide prin intermediul pompelor electrice.

Pe lângă motorul însuși, principala componentă a sistemului electric de angrenare mai poate fi un **convertizor de frecvență** care să poată acționa motorul cu o turație variabilă comandată de la distanță, din sistemul de control al standului. Rolul convertizorului este de a permite operațiunii de reglaj al turației, în funcție de comanda dată de utilizator sau de secvențe automate pre-programate, și de a oferi un nivel de siguranță ridicat prin adăugarea unor condiții care să intervină automat în control. În funcție de solicitările aplicației, cu ajutorul controller-ului conectat la convertizor, se pot implementa secvențe complexe de variație sau de menținere a turației motorului în funcție de parametrii citați, calculați sau diverse tipuri de logică preprogramată.

Pe lângă aplicațiile unde motorul electric acționează o mașină termică sau alte angrenaje mecanice, mai există și situații de stand în care motorul electric este folosit ca generator de către o mașină termică. O astfel de situație a fost studiată și prezentată în lucrarea *„Asynchronous Three-Phase Machine Driven as Generator by a Twin-Screw Expander”*, C. Borzea, A. Săvescu, I. Vlăducă, A. Stoicescu, *SME'20 (Electric Machines, Materials and Drives Present and Trends / Actualități și Perspective în*

Optimizarea și controlul sistemelor electrice destinate automatizării unui stand de încercări pentru propulsie spațială

Domeniul Mașinilor Electrice, 2020 [12]. Aici, au fost studiate regimurile de funcționare ale unei mașini asincrone trifazate, utilizate într-un stand automatizat, acționate de către aerul comprimat generat de către un expander cu șurub, în vederea generării de electricitate în rețeaua electrică.

2.1.3 Elementele de infrastructură (cabluri, tablouri, etc.)

Prin elemente de infrastructură s-au desemnat acele elemente care nu fac parte din categoriile de mai sus, însă sunt indispensabile pentru construirea unei automatizări complete de stand. Infrastructura unei automatizări cuprinde foarte multe tipuri de elemente, de la cabluri, tablouri electrice și convertoare de semnal, până la elemente auxiliare dintre cele mai simple.

Cablurile electrice joacă un rol important în sistemele de automatizare pentru standuri, fiind utilizate pentru transmiterea energiei electrice și a semnalelor de control între dispozitivele din stand. De exemplu, cablurile pot fi utilizate pentru a conecta senzorii la controlere, pentru a transmite semnale de măsurare și monitorizare a proceselor. De asemenea, cablurile pot fi utilizate pentru a conecta motorul la controller, pentru a transmite semnale de pornire, oprire și reglare a turației.

Tablourile electrice reprezintă structuri care au rolul de a grupa și proteja componente electronice (adaptoare de semnal, convertoare, surse de alimentare, etc.) și elemente de conectică pentru cabluri, precum și de a facilita (re)distribuirea energiei electrice și a semnalelor în funcție de arhitectura și cerințele sistemului deservit și ale subansamblelor acestuia.

Adaptoarele sau convertoarele de semnal sunt utilizate pentru a converti semnalele de la senzori sau alte echipamente într-un format adecvat pentru a fi utilizate de alte echipamente sau dispozitive, de regulă de către sistemul de control al standului. Adaptoarele pot fi utilizate pentru a converti semnale analogice în semnale digitale, sau viceversa, sau de a converti semnale analogice de diverse tipuri (ex: curent 4-20 mA, tensiune 0-10 V, etc.). De exemplu, un adaptor de semnal poate fi utilizat pentru a converti semnalele analogice de la un senzor de temperatură în semnal 4-20 mA, astfel încât acestea să poată fi utilizate de către un PLC cu modul de intrări 4-20 mA. Acesta este un caz foarte des întâlnit în cadrul standurilor de testare la care am contribuit.

Releele sunt dispozitive electromecanice utilizate pentru a facilita controlul circuitul electric prin intermediul unui semnal electric. Rolul releelor în sistemele de automatizare și control este de a conecta și deconecta circuitele a diverse dispozitive, cum ar fi motoare, vane, încălzitoare, ventilatoare și alte echipamente, în urma unei comenzi. Astfel, releele pot fi utilizate pentru a conecta sau izola circuitele de alimentare, încât funcționarea echipamentelor să poată fi comandată în mod individual din sistemul de comandă. De exemplu, un releu poate fi utilizat pentru a porni o pompă de ulei, pentru a deschide sau închide o vană sau pentru a activa convertizorul de frecvență al motorului electric.

2.1.4 Sistemul de monitorizare și control. Software-ul. Achiziția de date și postprocesarea

Standurile de testare pentru propulsoare sunt utilizate pentru a testa și a colecta date în timpul procesului de testare. Testarea se face în condiții controlate, ceea ce permite colectarea de date concrete și precise privind întreaga gamă de parametrii de

Optimizarea și controlul sistemelor electrice destinate automatizării unui stand de încercări pentru propulsie spațială

interes. Pentru a le colecta, standurile sunt echipate cu sisteme de achiziție de date concepute și dimensionate în funcție de caracteristicile aplicației și ale instrumentării.

Sistemele de achiziție de date colectează, stochează și procesează datele generate în timpul testelor de propulsie. Aceste date includ date despre performanța propulsoarelor, cum ar fi puterea, consumul de combustibil, temperatura și presiunea.

Controlul automat al standului se programează prin rutine software, adesea în cadrul aceleiași aplicații software care realizează și achiziția de date, deoarece accesul la canalele aferente senzorilor se realizează în mod continuu pentru ambele scopuri.

În această teză (capitolul 4.3.2), am descris un software complet pe care l-am dezvoltat în întregime pentru a facilita și optimiza monitorizarea, controlul automat și înregistrarea datelor pentru un stand de testare a turbopompelor moleculare de rachetă. De asemenea, alte contribuții pe care le-am avut la dezvoltarea de software pentru standuri de testare au fost descrise în capitolul 2.2.

2.1.5 Problemele și neajunsurile actuale în domeniu

Una dintre problemele majore ale optimizării și controlului sistemelor electrice este o oarecare deficiență în ceea ce privește claritatea și coerența standardelor din industria sistemelor electrice și de automatizare.

O altă problemă este legată de factorii de mediu. Sistemele de propulsie testate și sistemele lor electrice însoțitoare trebuie să funcționeze în medii ostile, cum ar fi la altitudini mari sau în spațiu, unde sunt expuse la radiații ionizante și extreme de temperaturi.

Calitatea datelor de testare este de asemenea un subiect important. Datele de testare trebuie să fie precise și fiabile pentru a asigura derularea corectă a testărilor. Cu toate acestea, datele de testare pot fi influențate de o serie de factori, cum ar fi erorile de măsurare și interferențele electromagnetice. Pentru a evita aceste probleme, trebuie să se ia în considerare acești factori la dezvoltarea sistemelor și să se proiecteze sistemele pentru a minimiza interferențele.

În cadrul tezei de doctorat, prezint mai multe cazuri concrete de aplicații unde am contribuit și modul de rezolvare a cerințelor și problemelor aferente menționate.

2.1.6 Inovațiile în domeniu

Cele mai importante inovații din domeniul sistemelor de control automat sunt:

1. Testare în timp real

Un caz practic în acest domeniu este utilizarea unor senzori cu timp de răspuns mic (de ordinul ms), pentru a monitoriza debitul, presiunea și alți parametri relevanți în timp real. Aceste date sunt apoi procesate de algoritmi de control care ajustează parametrii în mod automat în funcție de schimbările în parametrii de testare. Astfel de aplicații unde timpul de detecție și de răspuns al sistemului de control este foarte important să fie scurt sunt aplicații unde se pot anticipa fenomene rapide, precum aprinderi (combustia unui propulsor) sau componente armonice ale vibrațiilor unui turbomotor de turații mari, unde se dorește ca evenimentul să fie surprins de către instrumentare și înregistrat în detaliu, dar și unde se dorește ca anumite procese de control să fie declanșate extrem de rapid.

2. Sisteme cu inteligență artificială

Sistemele de testare inteligente pot fi utilizate pentru a analiza datele colectate în timpul testelor și pentru a identifica modele și tendințe care pot fi utilizate pentru a îmbunătăți procesele de testare. Aceste sisteme pot fi, de asemenea, utilizate pentru a

îmbunătăți eficiența testelor, prin reducerea timpului necesar pentru a finaliza testele și prin creșterea preciziei și exactității măsurărilor.

În ultimul deceniu s-au realizat cercetări în domeniul controlului inteligent al turbomotoarelor. În [14], autorii au studiat o combinație de două tehnici: logică fuzzy și algoritmi evolutivi. Parametrii de control au cuprins deschiderea vanei de aspirație și aria de ajutoraj. O cercetare similară s-a realizat în [15] în proiectarea și evaluarea a două tipuri de controller-e fuzzy prin reglajul presiunii la combustie. În [16], s-a prezentat un controller pe bază de rețele neurale pentru turbinele cu gaz. Deși tehnicile de control tradiționale sunt consacrate și fiabile, tehnicile de control moderne promet să ofere un control îmbunătățit și o performanță crescută [1],[17]. În ultimele decenii, majoritatea problemelor legate de control au fost formulate prin cunoașterea obiectivă a unor sisteme date (ex: modele matematice). Majoritatea acestor abordări ce au la bază modele matematice și-au găsit calea către practică și s-au dovedit a fi soluții satisfăcătoare pentru spectrul de sisteme complexe [18]. Sistemele inteligente pot fi antrenate să identifice defectele într-un motor, pe baza datelor și imaginilor capturate în timpul testului.

În octombrie 2018, am publicat un articol științific despre un concept de sistem de control auto-adaptiv:

“Self-Learning Control System Concept for APU Test Cells”, R. Ciobanu, A. Stoicescu, C. Nechifor, A. Țăranu, MATEC Web of Conferences, 2018, Vol. 210 [19].

În cadrul articolului, împreună cu ceilalți coautori, s-a propus un sistem de control inovativ, compatibil cu un stand de testare existent pentru sisteme de pornire a turbomotoarelor de aviație. Sistemul identifică nevoile și distribuie eficient energia în subsistemele avionului, în funcție de parametrii reali și parametrii generați de modele matematice ale aeronavei.

3. Utilizarea simulării Hardware-in-the-Loop

Simularea *Hardware-in-the-Loop* este o altă inovație importantă în domeniul standurilor de testare pentru propulsoarele aerospațiale. Această inovație implică utilizarea de modele matematice pentru a simula comportamentul propulsorului în diferite condiții de testare. Simularea poate fi utilizată pentru a testa diferite scenarii și condiții de funcționare, înainte de a efectua testele fizice. Astfel se contribuie la reducerea costurilor și a timpului necesar pentru a finaliza testele și poate asigura că testele sunt efectuate în condiții de siguranță.

În cadrul acestei lucrări, am realizat și testat o astfel de simulare pentru un stand de testare turbopompe aerospațiale (vezi capitolul 4.3.3).

4. Utilizarea senzorilor inovativi

În domeniul senzorilor utilizați pentru standurile de testare a propulsoarelor aerospațiale există diverse tehnologii care capătă un interes crescut. Tipologiile tehnice diferă de la caz la caz și mai multe exemple au fost studiate în cadrul capitolelor 4.2.1 și 4.2.2, unde am realizat o analiză a tehnologiei senzorilor cu fibră optică, a senzorilor wireless și a gradului lor de utilizare în aplicații cu turbomotoare.

În capitolul 4.2.3, am realizat un studiu teoretic și experimental privind soluțiile de recoltare a energiei din vibrații, în vederea alimentării senzorilor autonomi.

2.2 Automatizări pentru standuri de testare elemente de propulsie aerospațială

În cadrul acestui capitol am descris patru standuri de testare pentru diverse elemente de propulsie aerospațială. De la turbomotor de aviație, până la propulsoare spațiale inovative, aceste standuri acoperă o gamă variată de exemple unde s-au realizat automatizări și unde am avut contribuții în dezvoltarea unor sisteme de monitorizare și control, care să faciliteze și să optimizeze modul cum se testează propulsoarele sau subsansamblele lor.

2.2.1 Stand de testare propulsie clasică (turbomotor de aviație)

Turbomotoarele de aviație sunt mașinării complexe, iar cu cât motorul este mai vast, cu atât standul va fi mai sofisticat. În acest exemplu, se prezintă realizarea unui sistem pentru comanda și reglarea procesului de ardere în cazul unei instalații de postardere multimodulare tip ST18, unde am realizat un software de stație (computer) care preia datele de la PLC în vederea monitorizării și înregistrării datelor din timpul testelor.

Senzorii transmit semnalele către PLC, de pe care sunt vizualizate pe panoul operator și pe stația de monitorizare, care și înregistrează datele. comenzile se realizează din consola de comenzi, prin automatul de ardere, către elementele de execuție de pe stand. Din consolă se comandă și ventilatoarele de aer.

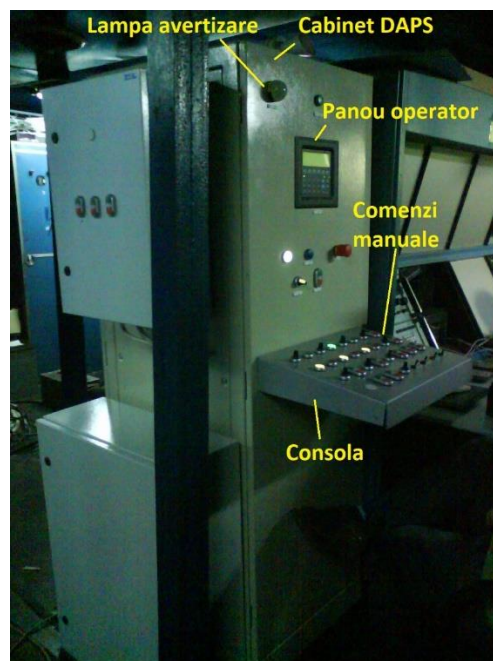


Fig. 1. Dulapul DAPS pentru automatizarea standului de turbomotoare

Concepția software-ului pentru stația de monitorizare și înregistrare a datelor pe care l-am dezvoltat s-a făcut după următoarele idei și etape:

- Am realizat o schemă grafică a standului, cu care operatorul se poate familiariza ușor;

Optimizarea și controlul sistemelor electrice destinate automatizării unui stand de încercări pentru propulsie spațială

- Am plasat datele de la senzori pe schema grafică în mod intuitiv, similar cu poziția senzorilor în stand, astfel încât parametrii acestuia să poată fi ușor de reperat și citit;
- Am repartizat parametrii pe schema grafică astfel încât operatorul să identifice ușor cele 4 zone principale de monitorizare: circuitul de alimentare cu gaz combustibil (galben), circuitul de aer primar (aer proaspăt), circuitul de aer secundar (aer camera postardere) și zona de evacuare a camerei de postardere – Fig. 2;
- Am implementat un led „Semnal lipsă!” pentru a avertiza operatorul privind deconectarea oricăruia dintre semnale;
- Am implementat înregistrarea datelor în format *csv* pentru toți parametrii de pe ecran, la o frecvență de 1 Hz, conform cerinței;
- Am realizat un grafic pentru media temperaturilor din zona de postardere, care este de interes ridicat: $TPAM = \text{medie}(TPA1...TPA4)$;
- Am realizat un ecran separat cu graficul lărgit al variației TPAM și ale valorilor debitelor, valori calculate în PLC din valorile presiunilor, presiunilor diferențiale și ale secțiunilor țevilor.

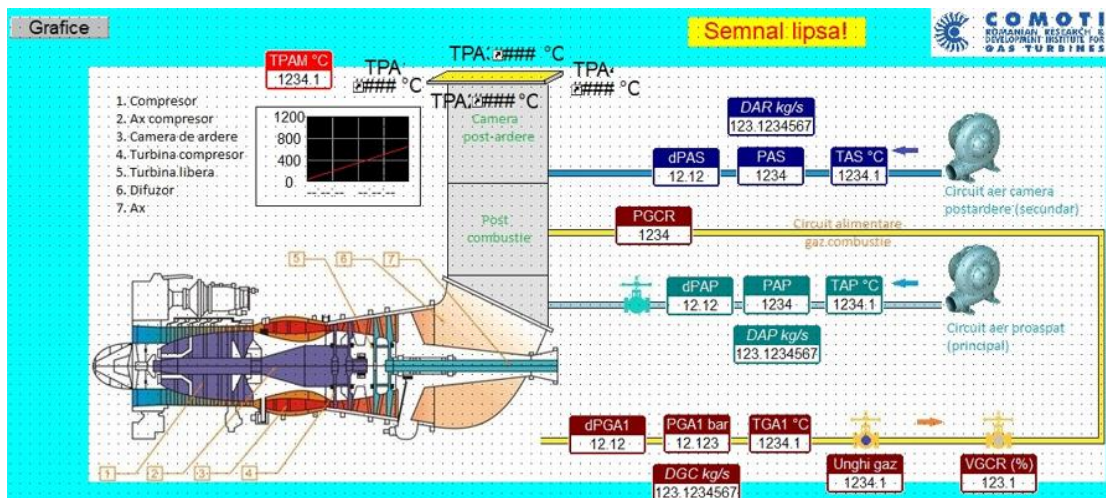


Fig. 2. Schema grafică a unui stand pe software de interfață postardere

Software-ul pe care l-am realizat pentru monitorizarea și înregistrarea parametrilor standului de testare pentru turbomotoare din cadrul COMOTI a optimizat procesele de evaluare a performanțelor turbomotoarelor testate, oferind specialiștilor date precise pentru post-analiza funcționării instalației.

2.2.2 Stand de pompare aer pentru testare cameră de ardere

Acest stand servește la generarea de aer comprimat către un banc de experimentare a camerelor de ardere pentru turbomotoare mici, inclusiv de aviație. Standul realizat utilizează un compresor de aer centrifugal care furnizează niveluri variate de debit și de presiune, care pot fi ajustate în vederea simulării fluxului de aer din partea unui turbomotor către camera sa de combustie.

Acest stand a fost un prototip, proiectat și realizat pentru prima dată în această configurație, astfel încât să îndeplinească cerințe specifice ale beneficiarului bancului de testare a camerei de ardere. Inovația standului de compresor, cât și a sistemului său

Optimizarea și controlul sistemelor electrice destinate automatizării unui stand de încercări pentru propulsie spațială

de control, este posibilitatea de a realiza funcționarea compresorului într-un domeniu larg de regimuri de lucru.

Contribuțiile mele la acest stand, descrise pe larg în acest capitol, sunt:

- Am dezvoltat în întregime, din punct de vedere software, sistemul de control automat și monitorizare, prin PLC și panou operator, conform detaliilor de mai jos;
- Acest sistem de control optimizează standul prin programarea de calcule matematice în PLC, pentru calculul curbelor de funcționare ale compresorului, fără a utiliza un traductor de debit de aer;
- Am creat un program pe laptop pentru conectare la PLC, în vederea înregistrării datelor de experimentare;
- Am participat la teste cu instalația, în vederea testării funcționării acesteia și îmbunătățirii controlului și a optimizării algoritmilor.
- Am publicat dezvoltarea și rezultatele metodei de control într-o lucrare științifică.

În acest capitol al tezei prezint o descriere sumară a standului, iar spre finalul capitolului software-ul și logica de control pe care am utilizat-o pentru acest stand.

Descrierea standului

După ce aerul este comprimat în compresor, este dirijat prin conducta de refulare spre instalația camerei de ardere prin intermediul unei vane numite EV (prescurtare de la *Exhaust Valve*). Scopul acesteia este să deschidă accesul aerului comprimat către instalația de testare a camerei de ardere. În același timp, vana de descărcare proporțională DV se ocupă de eliberarea unei părți din debitul de aer în atmosferă și de a menține presiunea necesară instalației camerei de ardere pentru a putea fi supusă testelor. Pentru a începe experimentele cu camera de ardere, primul pas constă în pornirea compresorului, care mai întâi este supus unei funcționări la un regim minim de stabilitate cu vana EV în poziție închisă. Atunci când EV este deschisă, DV trebuie să fie reglată automat astfel încât să poată menține presiunea cerută și regimul de funcționare.

Puterea necesară pentru comprimarea aerului este de circa 260 kW, iar variația turației se face prin convertizorul de frecvență. Din aceste considerente, s-a ales un motor de 315 kW cu turație nominală de 2970 rpm.

Standul include: ansamblu mecanic; dulap electric ce cuprinde partea de forță - convertizorul de frecvență (variatorul de turație); echipamente electrice de comandă și cablurile de legătură dintre ele; partea de control (de automatizare) care cuprinde controllerul programabil (PLC) ce primește informația de la echipamentele de instrumentare (senzorii diferiților parametri) și transmite comenzi spre elementele de execuție, prin cabluri electrice.

Convertizorul alimentează și controlează motorul asincron utilizat în acționarea compresorului, este responsabil cu varierea turației motorului în funcție de comanda software, protejarea motorului de mișcări bruște, etc.

Controller-ul este un automat logic programabil (PLC) VersaMax de la General Electric, care include următoarele componente:

- Sursă de alimentare;
- Procesor 128K;
- 1 x modul Intrări analogice (AI), 15 intrări / 15 biți;
- 1 x modul Ieșiri analogice (AO), 4 ieșiri / 12 biți;
- 1 x modul Intrări digitale (DI), 32 intrări, 24 Vcc;
- 1 x modul Ieșiri digitale (DO), 32 ieșiri, 24 Vcc 0.5A;

Optimizarea și controlul sistemelor electrice destinate automatizării unui stand de încercări pentru propulsie spațială

- 4 x șasiu de module intrări/ieșiri (I/O).

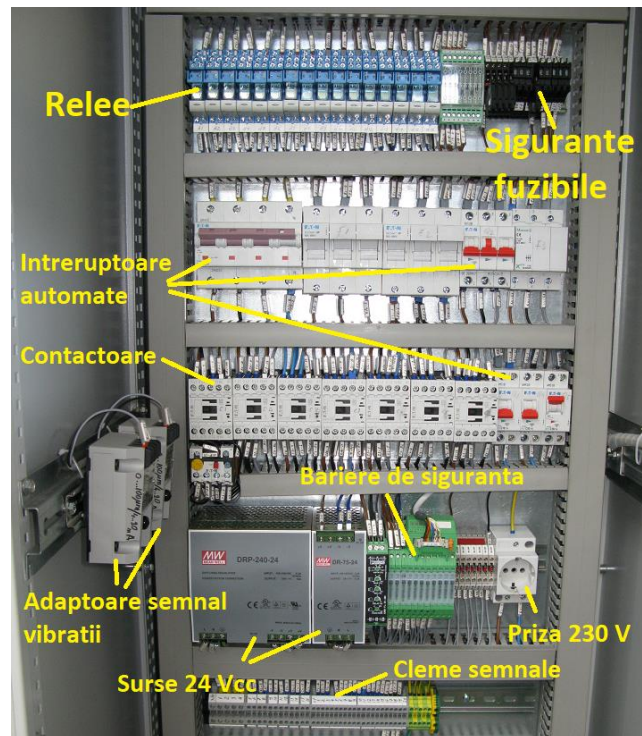


Fig. 3. Dulapul de comandă (interior)

Pe ecranul software principal al display-ului (Fig. 4) se pot vedea valorile senzorilor monitorizați.

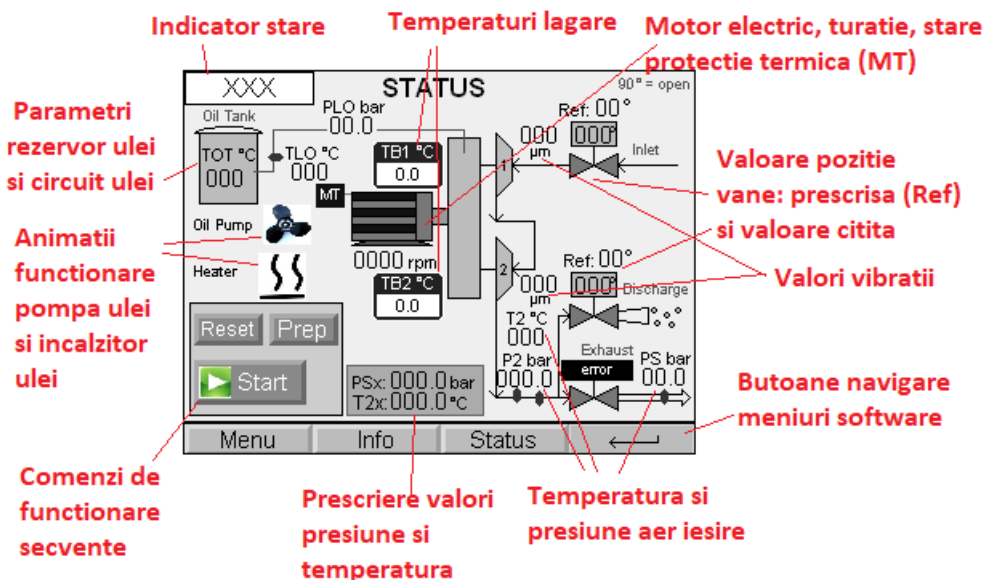


Fig. 4. Display software principal panou de comandă

Realizarea logicii de control în software

Pentru conturarea logicii principale, a fost necesar să studiez metode de control al pompajului în compresoare. Este ideală o abordare preventivă în a atinge limita de pompaj. Această abordare se poate face printr-un sistem automat capabil să facă calcule în timp real pe baza parametrilor monitorizați și a algoritmilor

implementați. Când apare un pompaj, sistemul poate fi controlat și stabilizat utilizând un regulator PID (Proportional Integral Derivativ). Apoi acest regulator convențional mai poate fi înlocuit cu un controller fuzzy. Diverse lucrări au analizat asemenea tehnologie [24, 25] și a reieșit că performanțele controller-elor fuzzy sunt similare cu controllerul PID.

În cadrul acestei aplicații am implementat o metodă de control multi-referință, în sensul că se realizează controlul aceluiași compresor (controlul presiunii de ieșire $P2$) prin reglarea a doi parametri: turația motorului electric și gradul de deschidere/închidere a vanei de descărcare DV. Din punct de vedere al operatorului, acesta trebuie să introducă, înainte de pornire, doar presiunea $P2$ dorită de la compresor către camera de ardere, și să selecteze una din cele trei curbe de funcționare automată, în funcție de preferințele de debit și presiune pentru cameră.

În ciuda faptului că debitul de aer a fost utilizat în definirea graficului de performanță, metoda de control a fost dezvoltată astfel încât compresorul să nu necesite informația directă de debit, așadar să nu necesite un traductor de debit dedicat. Aceasta duce la o optimizare a costurilor cu senzorii și liniile de măsură, după familiarizarea dezvoltatorului cu determinarea graficelor de performanță pentru astfel de compresoare.

Secvența de reglaj a vanei DV se face prin compararea presiunii măsurate $P2$ cu presiunea de referință $P2_{ref}$ la fiecare 3 secunde, iar dacă diferența este mai mare de 0.1 bar, vana se închide sau se deschide, după caz, cu câte 1° .

În Fig. 5 se poate observa grafic un exemplu cu rezultatele obținute, care au fost publicate de către autorul tezei și în lucrarea [26]: “Automated Multi-Reference Control for Centrifugal Compressor”, **A. Stoicescu**, O. Dumitrescu, G. Fetea, 9th International Conference on Energy and Environment (CIEM 2019), 17-18 Oct 2019, Proceedings IEEE, Timișoara, România.

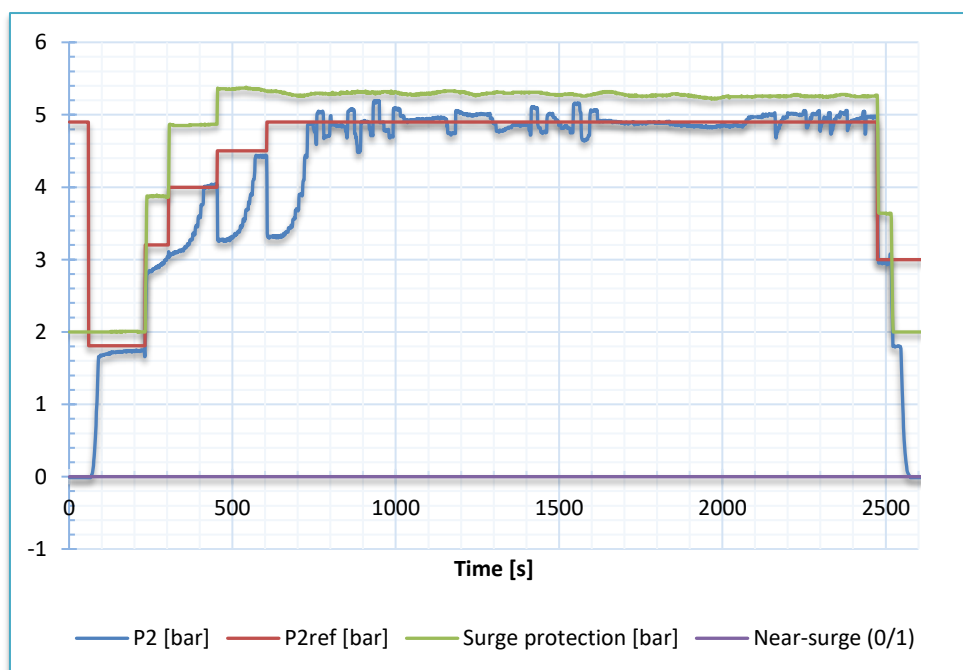


Fig. 5. Performanța sistemului de control asupra presiunii livrate de compresorul de aer [26]: **Albastru** – presiunea măsurată ($P2$), **roșu** – presiunea prescrisă ($P2_{ref}$), **verde** – limita de protecție la pompaj, care nu a fost depășită

În timpul acestui test din exemplu, presiunea (albastru), urmărind referința (roșu), nu a depășit în niciun moment linia de protecție la pompaj (verde), chiar dacă s-a operat aproape de aceasta, sistemul de control evitând cu succes orice situație de genul și menținând o precizie a controlului de ± 0.3 bar, îndeplinind cerințele tehnice.

Astfel, am putut demonstra succesul acestui sistem electric și software în atingerea și menținerea, prin intermediul automatizării și a unor secvențe software de control, a presiunii de la ieșirea din compresor, fără a fi nevoie de traductor de debit, cu o protecție eficientă împotriva fenomenului de pompaj.

În concluzie, optimizările pe care le-am adus prin dezvoltarea acestui sistem de control au ținut atât de interfață, cât și de secvențele de funcționare implementare.

2.2.3 Stand de testare propulsie aerospațială electrică

Propulsia spațială electrică este considerată aceea prin care propulsorul utilizează mijloace electrice și eventual magnetice pentru a genera forța de propulsie necesară deplasării. Aplicația aleasă este stabilită în jurul unui propulsor de radiofrecvență (RF) de tip Helicon. Aceasta este o tehnologie inovativă ce a făcut obiectul proiectului de cercetare „Assessments to Prepare and De-Risk Technology Development: Helicon Plasma Thruster”, câștigat de COMOTI și finanțat de Agenția Spațială Europeană.

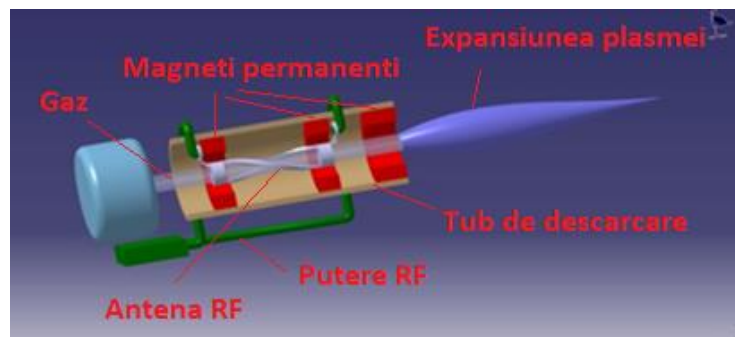


Fig. 6. Model 3D propulsor RF

Propulsorul (Fig. 6) este compus dintr-o incintă de descărcare cilindrică din material dielectric, unde este generată plasma, o antenă RF înfășurată în jurul tubului de descărcare, și un ajutoraj magnetic. Testarea de stand se face într-o cameră de vid, simulându-se astfel condiții de mediu apropiate de cele din spațiu. Puterea RF este furnizată antenei cu ajutorul unui sistem de generare extern. Combustibilul (argon) este furnizat printr-un sistem de alimentare atașat camerei de vid. De asemenea, un set de magneți dispuși în jurul tubului de descărcare generează câmpul magnetic necesar, atât în zona de descărcare magnetică, cât și în zona de expansiune a plasmei, formând un ajutoraj magnetic.

Se evidențiază următoarele elemente din Fig. 7:

- **Stație PC** (1) – laptop cu software destinat controlului echipamentelor și înregistrării datelor;
- **Sistem de pompare cu vid** (2) – livrează vid către camera de vid;
- **Sistem RF** (3) – livrează putere RF către propulsor la frecvență 13.56 MHz și putere de până la 800 W;
- **Flow controller** (4) – regulator de debit pentru gaz;
- **Jojă de presiune** (5).

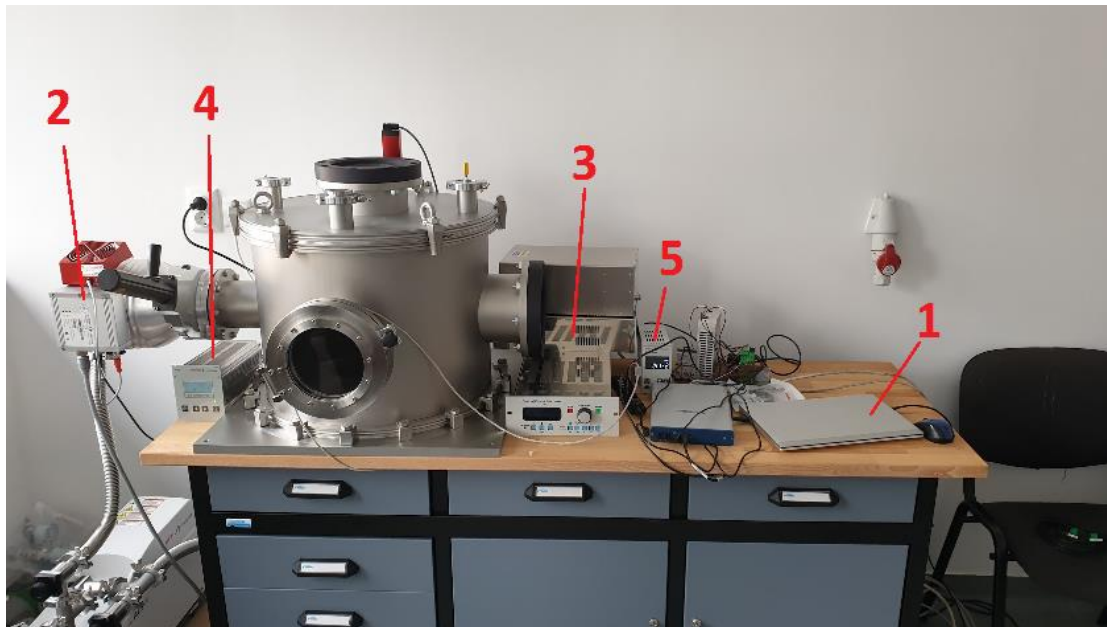


Fig. 7. Privire de ansamblu – ministand de testare propulsor Helicon, realizat în cadrul proiectului Helicon Plasma Thruster, dezvoltat la COMOTI Măgurele

Contribuția mea în echipa de dezvoltare a fost interconectarea sistemelor cu sistemul de control și achiziție de date, realizarea software-ului de control și înregistrare a datelor, precum și în alegerea și studiul eficientizării sistemului de generare a puterii RF.

Generatorul RF aparține unei game de modele special destinate aplicațiilor de procesare a plasmă. În timpul experimentelor, generatorul a fost poziționat în exteriorul camerei de vid și conectat la sarcină (plasmă) prin treceri de cablu special destinate incintelor vidate. Pentru alegerea lui, a fost necesară cunoașterea câtorva aspecte, mai jos fiind detaliată contribuția mea la studiul acestora.

Generatoarele RF pot opera la diferite frecvențe. Acestea determină comportamentul ionilor de plasmă. De exemplu, la frecvențe mai joase sunt create lungimi de undă mai lungi, care fac ca ionii să capete energii cinetice mai mari. Totodată, se creează o densitate mai mare a ionilor, așadar mai multe particule de plasmă pe unitatea de volum. Cu cât frecvența este mai mare, cu atât mai scurtă este lungimea de undă, ducând la procese mai rapide, dar care necesită mai multă energie de operare.

13.56 MHz este una dintre frecvențele desemnate la nivel internațional pentru aplicații Industriale, Științifice și Medicale (așa-zisa bandă ISM). Aceasta permite anumite aplicații de putere, fără a deranja eventuale comunicații din jur.

Generatorul ales generează o frecvență RF de 13.56 MHz, la o putere maximă de 600 W. Impedanța sarcinii este considerată a fiind 50Ω rezistiv, deoarece acesta este standardul industrial pentru măsurarea și transferarea puterii electrice de mare frecvență. Totuși, plasma nu este o astfel de sarcină. Modele de descărcare RF au fost propuse de cercetători de mulți ani, ducând la modele de circuite echivalente pentru plasmă [30-33], în vederea cuantificării naturii ei (rezistivă, rezistiv-inductivă, rezistiv-capacitivă) și a amplitudinii impedanței. Mai este cert că un tip de incintă cu plasmă, precum cea din cazul de față, posedă caracteristici care sunt nu doar diferite față de o sarcină „standard”, dar și dinamice [34]. La o scară macro-temporală, plasma este considerată un obiect electric nelinier [35]. Pentru ca transferul de putere de la

Optimizarea și controlul sistemelor electrice destinate automatizării unui stand de încercări pentru propulsie spațială

sursă la plasmă să fie optim, trebuie considerate toate interacțiunile dintre cele două. Acordarea impedanței plasmei la impedanța de ieșire a generatorului RF necesită un circuit suplimentar, pentru a contracara componentele inductivă și/sau capacitivă ale camerei și a le acorda la o impedanță de 50Ω pur rezistivă. Dacă acordarea nu este completă, o parte din puterea RF va fi reflectată înapoi către sursa de putere. Astfel, întregul sistem este mai puțin eficient și pot apărea situații care să ducă la supraîncălzire, defectarea echipamentelor, etc.

Pentru a rezolva situația, am introdus un circuit pentru eliminarea diferenței impedanțelor, un dispozitiv numit „**Matching Box**”. Acesta dispune de ajustare automată a impedanței pe o plajă mai mare. El este practic o unitate răcită cu aer, cu motoare pas cu pas care își ajustează automat condensatoarele în funcție de valorile necesare de impedanță.

Pentru transmiterea puterii RF, echipa a decis folosirea cablu coaxial, format dintr-un conductor central înconjurat de o izolație dielectrică, înconjurată la rândul său de un conductor exterior. Cu acest tip de cablu, puterea RF se propagă prin materialul dielectric, între conductorul interior și cel exterior.

O atenție specială a trebuit acordată aspectelor ce țin de EMC (compatibilitate electromagnetică). O cameră cu plasmă, cu fenomene RF și magnetice, trebuie tratată ca o aplicație care necesită o atenție sporită în acest sens, pentru a putea asigura un transfer de semnale și putere adecvat între elementele sistemului.

Pentru transmisia puterii RF, cablul RF trebuie să formeze o linie coaxială dezechilibrată, permițând o cale de retur împământată. În acest fel, câmpurile magnetice și electrice care radiază din cablu vor fi în mare măsură eliminate, datorită faptului că singurul conductor alimentat ar fi cel interior. De asemenea, dielectricul dintre conductorul interior și cel exterior, face ca impedanța să fie relativ constantă de-a lungul cablului.

O bună ecranare a fost necesară pentru toate căile de comunicație, pentru a preveni transmisia puterii RF pe cablurile de semnal.

Interfața software-ului pe care l-am realizat în LabVIEW este în Fig. 8.

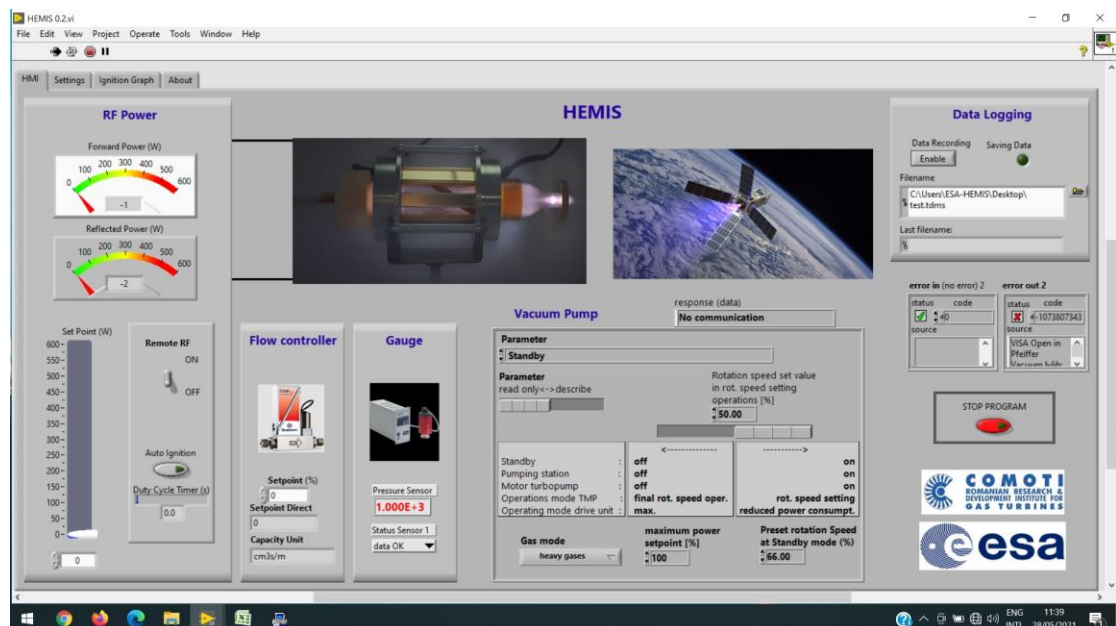


Fig. 8. Interfață principală software ministand de testare propulsor

Pentru a facilita funcționarea într-un regim pulsatoriu, am creat o rutină software care comandă automat puterea RF și debitul de gaz după un șablon de tip duty-cycle. Ciclul include un timer Off (**toff**), în timpul căruia atât puterea RF („*Power*”) cât și debitul gazului („*Flow*”) sunt oprite (sau setate la o valoare minimă), un Timer On (**ton**) în timpul căruia puterea RF și gazul sunt pornite (sau setate la o valoare maximă) simultan, și un delay (**tdelay**), o întârziere, între momentul aprinderii gazului și cel al aprinderii RF, după cum arată graficul.

În campania de testare (Fig. 9, 10) diverse valori au fost testate pentru maximizarea performanței propulsorului. În Fig. 9, se observă mini-propulsorul, în camera de vid, care este pornit din comandă software, fiind vizibil și jetul alb în partea dreaptă.

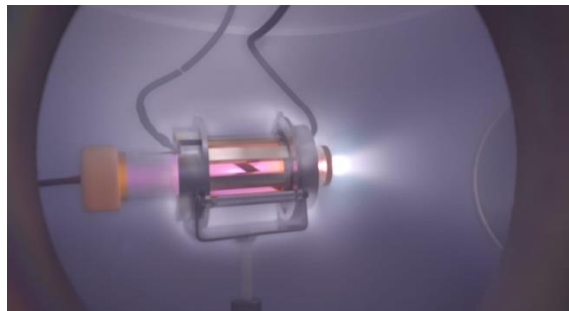


Fig. 9. Testare aprindere propulsor în camera de vid

Prin maximizarea performanței propulsorului s-a considerat o putere reflectată (*P_{ref}*) cât mai mică în raport cu puterea activă (*P_{fwd}*), cât și atingerea modului Helicon, indicat în graficul din Fig. 10 printr-o treaptă de putere superioară celei de aprindere inițială. Modul Helicon presupune încărcarea particulelor oscilate de un câmp electric, iar atingerea lui a fost unul dintre obiectivele proiectului. În acest test, puterea maximă comandată a fost crescută până la un nivel apropiat de 600 W.

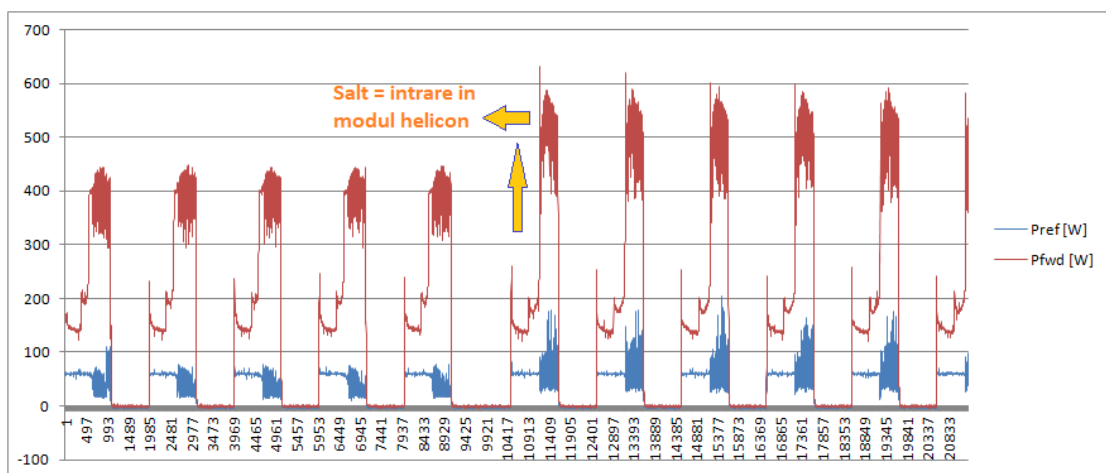


Fig. 10. Grafic cu performanța puterii propulsorului la unul dintre teste; *P_{fwd}* – puterea activă RF indusă în propulsor, *P_{ref}* – puterea reflectată de către propulsor; pe orizontală axa timpului (în ms), cu rata de eșantionare de 1 ms

Atingerea acestor obiective nu ar fi fost posibilă fără măsuri de optimizare a aprinderii, precum utilizarea dispozitivului „Matching Box” sau secvența de control în cicluri multiple de durată scurtă, prezentată anterior, pe care am programat-o și testat-o cu diferite valori, până la atingerea performanțelor dorite.

2.2.4 Stand de testare turbopompă moleculară pentru motor de rachetă

Principalul scop al standului denumit „TPO Test Rig” (Fig. 11) este dezvoltarea unei platforme experimentale pentru evaluarea performanțelor turbopompei VEGA-E, pe baza parametrilor de similitudine a condițiilor reale cu condițiile de stand. Am contribuit la realizare prin configurarea unui controller și dezvoltarea unui software pentru sistemul de control automat și înregistrare a datelor de stand, precum și cercetarea și realizarea unor moduri de testare care sunt descrise pe parcursul tezei.

Pentru a îndeplini obiectivele, s-a ales o instrumentare corespunzătoare pentru a determina parametrii standului.

Pentru validarea pompei de metan se vor efectua în prealabil o serie de teste prin similitudine cu apa, pentru toate regimurile de funcționare incluzând pornirea, oprirea la debit mic și debit mare. Pentru efectuarea lor se utilizează un motor electric deja instalat și cuplat la un multiplicator, ce furnizează puterea necesară pompei pentru funcționare.

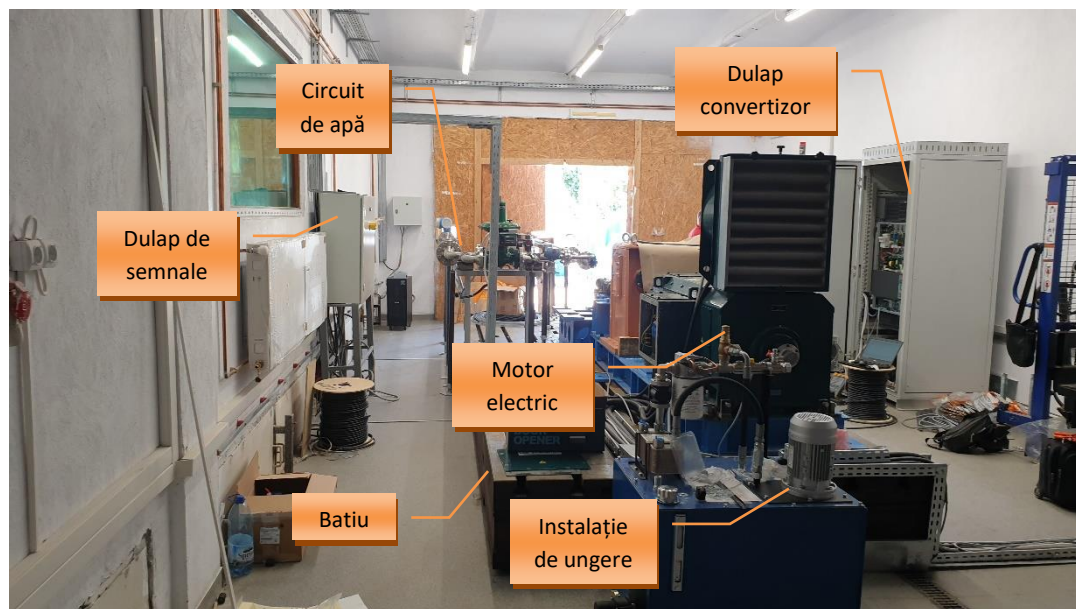


Fig. 11. Standul de testare turbopompe în curs de execuție, la COMOTI Măgurele

Sistemul de control automat este înțeles în cadrul acestui obiectiv ca acea parte a automatizării care include: sistemul de control și achiziție de date format din calculator industrial și modulele sale, software-ul care realizează logica de control automat, liniile de instrumentare și comandă, incluzând interfețele de pe traseul acestora. Deoarece acest sistem de control este, cel puțin din punct de vedere al numărului de linii măsurate și de echipamente controlate, cel mai complex dintre cele descrise în această lucrare și unul la care am adus o contribuție consistentă, el este tratat pe larg în următoarele capitole, 3 și 4.

Capitolul 3

Funcționarea aplicației

3.1 Cerințele specifice

Am identificat acele cerințe cu relevanță pentru conceperea, dimensionarea și dezvoltarea sistemului de control, inclusiv software:

- număr de parametri;
- tip de parametri (de intrare, de ieșire, analogici, digitali);
- tip de control.

În primul rând am studiat lista cu echipamentele care trebuie să existe în componența standului, în principal echipamente care comunică cu sistemul de automatizare.

Turbopompa care va fi deservită de acest stand s-a stabilit să fie acționată de un motor de curent continuu cu înfășurare de compensare, cu o putere maximă de 601 kW. Turația maximă a motorului este de 2600 rpm, iar turația nominală 1736 rpm. Motorul este conectat la ax printr-un cuplaj elastic care atenuează cuplul mare din timpul pornirii. Avantajul acționărilor în curent continuu este acela că turația este controlată rapid și precis prin convertizor. De asemenea, riscurile unor perturbații electromagnetice asupra semnalelor sunt mai mici la acționările cu convertizoare și motoare de curent continuu, spre deosebire de acționările în curent alternativ.

Motorul este de tip RP 280 KS de la firma Sicmemotori, iar convertizorul este de tip TPD-32 de la firma Gefran S.p.a., acesta având tensiunea de intrare 500 V, tensiunea de ieșire 520 V și curentul de ieșire 1400 A. Acesta dispune de intrări și ieșiri de semnal analogic, un aspect important fiind monitorizarea și controlul automat al turației de la distanță, din calculatorul central destinat pentru camera de comandă.

3.2 Parametrii de intrare

Pe baza tabelor de echipamente din cap. 3.1 al tezei, am analizat componența acestora și am structurat lista de parametri așa cum este prezentată în tabelele din teză.

În funcție de această listă am stabilit intrările și ieșirile de la și către controller („creierul” sistemului de control), iar împreună cu proiectantul electric am putut contura căile de semnale electrice (cabluri, trasee de cabluri), modulele periferice ale controllerului și canalele software alocate parametrilor utilizați în logica de comandă automată și în monitorizarea și înregistrarea datelor.

Aceste semnale se transmit, în funcție de tipul de semnal și amplitudinea parametrului măsurat, fie prin curent electric între 4 (0 la defect) și 20 mA, fie prin tensiune între 0 și 10 V, fie prin semnal complex IEPE (Integrated Electronics Piezo-

Optimizarea și controlul sistemelor electrice destinate automatizării unui stand de încercări pentru propulsie spațială

Electric). Semnalele digitale sunt semnale binare (0/24V) furnizate de contactele unor echipamente pentru a stabili fie poziția (închis/deschis), fie starea de funcționare (on/off), fie atingerea unor praguri în funcție de care contactul respectiv este declanșat.

3.3 Parametrii de ieșire

Parametrii de ieșire reprezintă comenzile generate de controller (de către software) către stand, mai exact către fiecare echipament din stand controlat de sistemul automat. Parametrii sunt comandați de software ca mărimi fizice virtuale (ex: turația în rpm, grad de deschidere în % sau stări binare), și generați electric de către modulele periferice ale controllerului, prin semnale electrice analogice proporționale (4...20 mA) sau digitale (0/24 V), în funcție de caz. În funcție de aceste semnale, echipamentul va executa acțiuni cum ar fi: modificare turație, deschidere/închidere, pornire/oprire, etc.

3.4 Tipul de control

În linii mari, logica software-ului a trebuit să permită două tipuri de control:

- *Control "manual"* – elementele de execuție ale standului (motor, valve, pompe, încălzitoare, etc.) sunt controlate prin comenzi directe, fără a urma o secvență complexă de funcționare, scopul principal fiind testarea lor;
- *Controlul automat*, prin care secvențe mai complexe de funcționare a elementelor de execuție se pot declanșa după o rutină software.

S-au putut contura 6 tipuri de teste, concepute pe a studia fiecare dintre subsistemele standului de încercări:

1. Testele de motor electric și multiplicator;
2. Testele pentru circuitul de ulei al (turbo)pompei;
3. Teste pentru circuitul de apă la presiune atmosferică;
4. Teste pentru circuitul de apă în condiții de vid;
5. Teste pentru circuitul de apă în condiții de suprapresiune;
6. Test de etanșeitate a bazinului de apă.

Capitolul 4

Dezvoltarea automatizării și aspectele cercetate

4.1 Identificarea soluțiilor de instrumentare

Soluțiile de instrumentare pentru standul de testare turbopompe s-au identificat în urma unei analize de către o echipă interdisciplinară din care am făcut parte, în vederea îndeplinirii următoarelor scopuri:

- Senzorii au fost aleși astfel încât să ofere o interfață comună, fiabilă, facilă, care permite module periferice cu un număr considerabil de intrări per modul. Dintre toate semnalele analogice posibile, standardul 4-20 mA aduce următoarele avantaje:
 - o alimentarea se poate face direct prin bucla de semnal;
 - o prin diferența dintre 0 și 4 mA, se poate detecta ușor întreruperea semnalului. Astfel valori de curent sub 3.5 mA sau peste 20.5 mA pot duce la condiții de avertizare sau de oprire automată;
 - o semnalul nu este afectat de căderea de tensiune pe lungimea traseului;
 - o are o imunitate la interferente electromagnetice relativ mare.

Modulele de achiziție cu acest standard dispun de câte 32 canale analogice de intrare;

- În cazul indisponibilității interfeței 4-20 mA, semnalul mai poate fi de tip 0-10 V;
- În cazul a 2 senzori de presiune dinamică, datorită cerințelor crescute pentru rata de achiziție a semnalului (16 kHz), s-au ales senzori cu semnale de tip IEPE, un standard pentru astfel de senzori care conțin electronică integrată de conversie a impedanței, prin cablu BNC;
- În cazul instrumentării unde se cere doar informație binară (ca de exemplu, închis/deschis, pornit/oprit sau depășit/nedepășit, sau în funcție și de compromisuri legate de disponibilitate, s-au ales interfețe cu semnal prin contacte de 24 V;
- Senzorii au fost aleși astfel încât domeniul lor de măsurare să acopere necesitățile intervalului în care pot evolua mărimile fizice;
- Toate comenzile de la controller se realizează fie prin semnal variabil în curent 4-20 mA, fie prin relee;
- Alte considerente: economice, experiența în utilizare, brand, etc.

Astfel, instrumentarea care face scopul studiului de caz este repartizată astfel:

- 25 de senzori cu semnal de ieșire 4-20 mA (7 temperaturi, 8 presiuni, 4 debite, 1 nivel, 2 presiuni diferențiale, 2 vibrații, 1 cuplu);
- 2 senzori de presiune dinamică cu semnal de ieșire IEPE;
- 1 senzor de turație turbopompă cu semnal de ieșire 0-10 V;
- 1 vană cu semnal de ieșire 4-20 mA și semnal de comandă 4-20 mA;
- 2 vane cu semnal de ieșire 0-10 V și semnal de comandă 4-20 mA;
- 3 vane cu semnale de ieșire digitale (2 contacte de capete) și comandă prin releu;
- 2 senzori de temperatură cu 2 contacte;
- 1 senzor de nivel cu 2 contacte;
- 3 încălzitoare de ulei cu contacte și comandă din contactoare, prin releu;
- 2 motoare electrice pentru pompe, cu contacte și comandă din contactoare prin releu;
- 2 pompe speciale (recirculare și vid), cu contacte și comandă din contactoare prin releu;
- 1 buton de oprire de urgență (ciupercă), cu contact normal închis;
- 1 convertizor motor electric principal, cu semnal de ieșire 4-20 mA, semnal de comandă 4-20 mA, 2 contacte și activare prin releu;
- 1 indicator colmatare ulei cu 2 contacte.

4.2 Studiul unor soluții de instrumentare inovativă

În cadrul acestui subcapitol, am integrat o cercetare privind tipuri inovative de instrumentare pe care le-am studiat și analizat pentru optimizarea diverselor tipuri de aplicații de standuri din domeniul testării propulsoarelor, turbomotoarelor, și nu numai. Studiul tipurilor de instrumentații utilizate în astfel de aplicații contribuie la dezvoltarea cunoștințelor în domeniul sistemelor de control inovative pentru standurile de propulsoare.

4.2.1 Senzori optici

Senzorii de tip "fibră optică" prezintă interes ca o posibilă alternativă la senzorii tradiționali, având avantaje care îi fac să se preteze la condiții de mediu dure, cum ar fi: temperaturi ridicate, medii explozive, perturbații electromagnetice, zgomot, umezeală și vibrații. Aceste avantaje includ [20]:

- imunitate la interferențe electromagnetice;
- pasivitate electrică, favorabilă utilizării în medii cu potențial exploziv;
- transmitere a datelor pe distanțe relativ mari;
- durată de viață mare în diferite medii.

Senzorul emite și recepționează o lumină, pe care o convertește în semnal electric. Prin cabluri cu fibră optică, lumina este transmisă înspre și dinspre spații cu acces îngreunat (dimensiuni restrânse) sau ostile sensorului. Cablul constă dintr-un miez de plastic sau de sticlă înconjurat de un strat de armătură [36], care reflectă lumina astfel încât ea să parcurgă întreaga distanță a cablului.

Unele tipuri de cablu pot suporta o flexibilitate mare fără a fi afectată structura lui, pretându-se la spații înghesuite, cum ar fi în domeniul sistemelor avionabile.

Dincolo de generalități, tipologiile exacte ale senzorilor cu fibră optică se disting prin numeroase variante caracteristice ale arhitecturii lor și ale modului de

operare. Numai în cazul temperaturii se disting cel puțin patru tehnici de măsurare, iar preciziile pot fi de ± 0.1 °C și uneori mult mai mari [40]. Dintre tehnici se pot enumera: pirometria la distanță, interferometria Fabry-Perot, emisia fluorescentă ș.a.

În vederea unei imagini fidele a procesului de combustie, un exemplu al utilizării senzorilor optici este introducerea lor în locațiile directe unde termocuplurile fac față mai greu, cum ar fi în camera de combustie sau la imediata ieșire. Astfel nu mai este necesară trasarea unor algoritmi suplimentari de determinare a condițiilor de acolo pe baza unor temperaturi din poziții mai îndepărtate, unde s-ar monta termocupluri.

Domeniul testării de zbor în aviație prezintă numeroase provocări pentru instrumentație, inclusiv cerințele de scală, mediu și reglementări [74, 75]. La aeronave precum Airbus A380, măsurătorile pot fi făcute din zone ale avionului care sunt până la 100 m distanță de cutiile de hardware și procesor [76]. Cerințele de compatibilitate electromagnetică (EMC) sunt specificate în standarde de certificare precum CS-23 sau CS-25, iar natura unora dintre aceste instrumente poate fi problematică în ceea ce privește înglobarea lor în aeronavă [75]. Imunitatea FBG-urilor la interferențe electromagnetice, masa mică a elementelor senzorialice, posibilitatea de a îngloba fibra optică în materiale compozite sau de a o monta pe suprafața metalelor, posibilitatea de a multiplexa o rețea de senzori într-o singură fibră optică și de a monitoriza mai multe rețele simultan utilizând un sistem de demodulare configurat corespunzător, sunt beneficii majore ale utilizării lor în aplicațiile cu turbomotoare aeronautice. Potențialul lor pentru aplicații aeronautice, inclusiv tunel aerodinamic sau monitorizare structurală a mai fost evidențiat și în [77-81].

Concluzia cercetării este că imunitatea senzorilor cu fibră optică FBG la interferențe electromagnetice, masa mică, posibilitatea de a îngloba fibra optică în materiale compozite sau de a o monta pe suprafața metalelor, posibilitatea de a multiplexa o rețea de senzori într-o singură fibră optică și de a monitoriza mai multe rețele simultan utilizând un sistem de demodulare configurat corespunzător, sunt beneficii majore ale utilizării lor în aplicațiile cu turbomotoare aeronautice. Pe de altă parte, aceste sisteme sunt costisitoare și necesită mai multă testare și standardizare înainte de a pătrunde cu adevărat în acest domeniu.

4.2.2 Senzori autonomi/wireless

Utilizarea tehnologiei wireless pentru sistemele de instrumentare ar aduce următoarele avantaje:

- creșterea substanțială a complexității datelor care pot fi trimise către ECU;
- permiterea unei monitorizări mai sofisticate a stării motorului;
- înlocuirea cablurilor cu transmisia wireless reduce masa sistemului, ducând la un consum de combustibil mai scăzut și emisii de carbon reduse;
- analiza statistică online a datelor de la un astfel de sistem poate permite o mai bună înțelegere a sănătății motorului și aeronavei.

Cu toate acestea, integrarea tehnologiei wireless în aplicațiile cu turbine aerospațiale sau industriale au de trecut provocări foarte importante, în mare măsură la motoarele aerospațiale, unde este necesar un nivel ridicat de siguranță și certificare. Temperaturile de pe carcasa unui motor pot depăși 250 °C, eliminând utilizarea sistemelor electronice convenționale bazate pe siliciu. În plus, menținerea integrității unei transmisii de semnal RF într-un mediu compus în mare măsură din metal, fără să se interfereze cu alte echipamente electronice, poate fi un obstacol major. Alimentarea

Optimizarea și controlul sistemelor electrice destinate automatizării unui stand de încercări pentru propulsie spațială

senzorial este de asemenea o provocare semnificativă, care poate necesita diverse mijloace de *harvesting* a energiei.

4.2.3 Soluții energetice din tehnologii nepoluante. Studiu de caz practic

Dintre tipurile de surse regenerabile, una mai puțin mediatizată, dar cu un interes crescând, este energia piezoelectrică. Aceasta tehnologie capătă interes datorită capacității sale de a genera energie din vibrații și șocuri mecanice, care sunt prezente în multe aplicații din domeniu, inclusiv standurile de testare pentru turbomotoare și alte propulsoare aerospațiale. Din acest motiv, am realizat o cercetare teoretică și experimentală privind potențialul utilizării acestei tehnologii în aceste tipuri de aplicații.

Pentru a beneficia de o dimensionare adecvată a unei rețele de *harvesting* a vibrațiilor, este nevoie de cunoașterea spectrului de vibrații al mașinii în funcționare normală. Puterea electrică generată de harvester va depinde de masa lui inerțială m , de factorul de atenuare al atenuatorului, frecvența de rezonanță (care trebuie să corespundă cât mai bine cu frecvența vibrațiilor), amplitudinea vibrațiilor și frecvența acestora. Așadar, o dimensionare corespunzătoare cu caracteristicile mașinii mărește considerabil energia produsă.

În scopul determinării caracteristicilor complexe de vibrație ale unui turbomotor, este necesară utilizarea unor echipamente special destinate. Cu ajutorul acestora, sub coordonarea mea, echipa Laboratorului de Acustică și Vibrații din cadrul COMOTI a efectuat analize de vibrații asupra turbomotoarelor TV3, Rolls-Royce Tyne, Cogenerare Suplacu de Barcău ș.a. Măsurătorile de vibrații s-au realizat cu traductoare de accelerație de tipul PCB 352C33 și cu un sistem de achiziție 01dB-Metravib Orchestra, iar asupra lor s-a aplicat o funcție FFT.

S-a extras spectrul de vibrații de pe compresorul turbomotorului TV2 testat în standul COMOTI. Din spectru se observă că frecvența predominantă a vibrațiilor este în jurul valorii de 240 Hz, unde are amplitudinea de 6500 mm/s^2 , dar există și componente spectrale ce depășesc 500 mm/s^2 în amplitudine la frecvențe de 450, 600, 900 Hz și mai mari.

Pentru un randament maxim, dispozitivul piezoelectric trebuie ales și configurat astfel încât frecvența lui de rezonanță să coincidă cu componenta fundamentală a vibrațiilor, unde amplitudinea lor este cea mai mare.

Două articole științifice surprind o campanie de cercetare cu testări practice ale unor sisteme piezoelectrice pe care am coordonat-o:

- "Piezoelectric Harvester Performance Analysis for Vibrations Harnessing", C. Borzea, D. Comeagă, Adrian Stoicescu, C. Nechifor, *UPB Scientific Bulletin, Series C (Electrical Engineering and Computer Science)*, Vol. 81, Issue 3, 2019 [99];
- "Vibration Energy Harvesting Potential for Turbomachinery Applications", Adrian Stoicescu, Marius Deaconu, Romeo Dorin Hrițcu, Cristian Valentin Nechifor, Valeriu Alexandru Vilag, *Aerospace Europe CEAS 2017 Conference, 16th-20th October 2017, Bucharest, Technical session Propulsion II*; publicat în *INCAS Bulletin Volume 10 Issue 1, March 2018*.

În cadrul campaniei, s-a realizat atașarea dispozitivului piezoelectric pe carcasa turbomotorului Klimov TV2 din standul de testare turbomotoare COMOTI, conectarea dispozitivului la o placă electronică de *harvesting* și măsurarea tensiunii

Optimizarea și controlul sistemelor electrice destinate automatizării unui stand de încercări pentru propulsie spațială

produse în timpul funcționării. Patru accelerometre au mai fost montate pe carcasa motorului, pentru studierea punctelor de rezonanță și pentru a face corelarea între ele și performanța generării puterii electrice (Fig. 12). Dispozitivul piezoelectric pe care l-am ales este de tip MIDE PPA-4011, cu o frecvență de rezonanță setată la 183 Hz.



Fig. 12. Poziția accelerometrelor pe turbomotorul TV2: (1) axial-orizontal lângă harvester, (2) axial-vertical lângă harvester, (3) la capătul compresorului, (4) pe demarorul motorului [100]

Motorul a funcționat între 10.500 și 12.000 rpm, la diferite regimuri și trepte de turație, în timp ce informațiile de tensiune generată, turație (frecvență) și vibrații ale motorului au fost permanent monitorizate.

O vibrație de aproximativ 0.9 g s-a măsurat la frecvența de 190 Hz (11.400 rpm). La frecvența de rezonanță, tensiunea înregistrată a fost între 3 și 3,5 V, peste nivelul unei baterii electrice mici. În regim tranzitoriu, s-au obținut 4 V la 190 Hz.

În vederea realizării unui sistem care să transmită wireless valorile mărimilor preluate de la senzori am coordonat un studiu de laborator în care s-a utilizat kitul de evaluare „Microchip” P2110-EVAL-01 (Fig. 13). Acesta conține un modul de achiziție de date, construit cu microcontrolerul PIC24F16KA102, care preia datele de la senzorii locali (care pot fi de temperatură, luminozitate, umiditate) și transmite wireless informația utilizând un al doilea modul construit cu MRF24J40 specializat în comunicații pe 2.4 GHz conform standardului IEEE Std 802.15.4™-2011 “Low-Rate Wireless Personal Area Networks” (LR-WPANs).



Fig. 13. Kitul de evaluare P2110

Pentru studiul posibilității folosirii energiei obținute din vibrațiile unui turbomotor, am achiziționat un circuit demonstrativ pentru harvestarea piezoelectrică a vibrațiilor și am coordonat echipa de electroniști în studierea utilizării sale. Circuitul “Demo circuit 1459B” de la “Linear Technology” utilizează chipul specializat LTC3588EMSE-1. Chipul PIC24F16KA102 este un microcontroler de 16 biți, de uz general, cu memorie flash creat în tehnologie “nanoWatt”.

Consumurile specifice pentru aceste moduri de economisire a energiei sunt:

- curentul consumat în modul de funcționare (*Run*) este tipic mai mic de $8 \mu\text{A}/\text{MIPS}$ (Mega Instrucțiuni/s);
- în modurile de funcționare în regim de așteptare (*Doze*, *Idle* sau *Sleep*) consumul este mai mic de $2 \mu\text{A}$;
- modul *Deep Sleep* coboară până la 20 nA tipic.

Consumurile care sunt fixe în orice regim sunt cele ale componentelor care funcționează continuu:

- Ceas și calendar de timp real (*RTCC*) consumă 490 nA la $f = 32 \text{ kHz}$ și $V_{cc} = 1.8 \text{ V}$;
- Ceas de supraveghere (*Watchdog Timer*) consumă 350 nA la $V_{cc} = 1.8 \text{ V}$.

În ultimul regim (*Deep Sleep*) consumul este cel mai mic dar “trezirea” este lentă, ceea ce poate afecta necesitatea transmiterii la timp a pachetelor de date. Din acest motiv am ales modul “*Sleep*” pentru relaxarea consumului în așteptare și pentru a permite o acumulare de energie suficientă pentru a fi folosită în regimul “*Run*”. Se observă o reducere a consumului invers proporțională cu tensiunea de alimentare (V_{cc}), care în catalog este în limitele $1.8\text{V} \dots 3.6\text{V}$. De asemenea, consumul se reduce proporțional cu reducerea frecvenței de ceas procesor.

Soluția a fost programarea plăcii de instrumentare și transmisie a datelor astfel încât să intre în *sleep* și să se activeze periodic pentru transmiterea datelor wireless.

Concluziile acestui subcapitol sunt că, prin orice metodă și oricât de mult am maximiza energia obținută prin harvestare, este foarte important să găsim modalități pentru raționalizarea și reducerea consumului pentru activitățile utile. În acest sens trebuie optimizat consumul sistemului de achiziție și de transmitere prin programarea modurilor de lucru și prin temporizarea activității în concordanță cu viteza și ritmicitatea extragerii energiei din sursă.

Studii viitoare în acest domeniu se pot realiza pentru a găsi metode de modelare a consumatorului, în vederea folosirii economice și eficiente a energiei obținute prin harvestare - control, comenzi, temporizări, optimizări.

Aceste obiective se pot atinge prin modificarea structurii și conținutului firmware-ului echipamentului, care reprezintă 80% din componența oricărui sistem actual construit cu rețea de microcontrolere, precum și prin stabilirea perioadelor de timp pentru consum util / pauză pentru acumulare de energie din mediu.

4.3 Controlul automat al aplicației

4.3.1 Soluția hardware

Soluția hardware se concentrează pe arhitectura controller-ului și a modulelor sale de intrare și ieșire pentru semnalele pe care le primește de la senzori și

Optimizarea și controlul sistemelor electrice destinate automatizării unui stand de încercări pentru propulsie spațială

echipamente, precum și cele pe care le generează pentru controlul elementelor de execuție ale standului.

Pentru a facilita și optimiza procesul de control și monitorizare a sistemului, am ales să centralizez senzorii și elementele de execuție în același controller. Această abordare presupune implementarea unui algoritm complex de control și monitorizare (vezi capitolul 4.3.2), care să permită interacțiunea eficientă între senzori și elementele de execuție. În plus, am ales să implementez un sistem de înregistrare a datelor (cap. 4.3.2), care să permită monitorizarea continuă a funcționării sistemului și identificarea eventualelor probleme.

Controller-ul este poziționat într-o cameră separată dar adiacentă standului, având în vedere că este un echipament sensibil la factori de mediu agresivi (vapori de apă, de ulei, interferențe electromagnetice de la convertizorul de frecvență, vibrații, hazard mecanic, ș.a.).

Din punct de vedere hardware, am configurat sistemul PXI (Fig. 14) pe baza resurselor necesare rulării fără probleme a software-ului și a înregistrării datelor la frecvențele impuse de cerințe. De asemenea, am dimensionat componentele sale încât să interfațeze cu toate tipurile de semnale de intrare și ieșire ale standului.

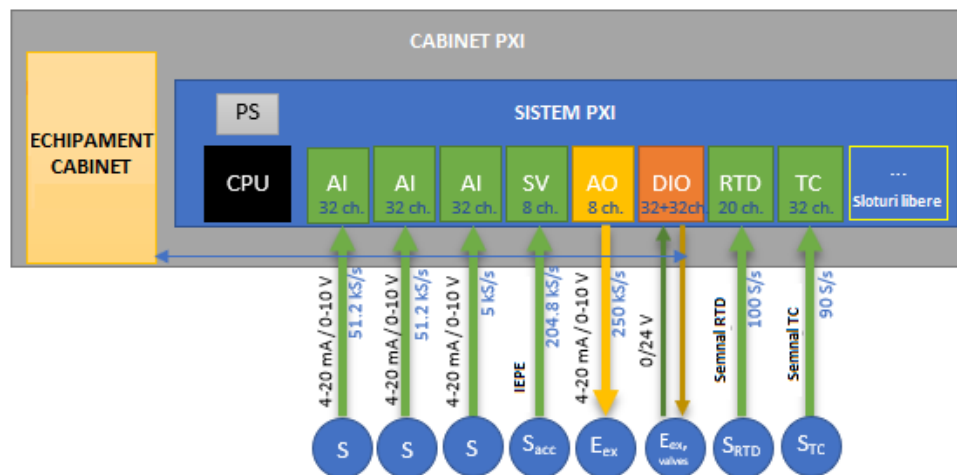


Fig. 14. Arhitectură sistem PXI, cu evidențierea modulelor de intrare/ieșire

LEGENDA:

PS – Power Supply – sursa de alimentare;

CPU – Controller cu CPU (procesor), memorie RAM, SSD, sistem de operare;

AI – modul intrări analogice (Analog Input);

SV – modul sunet/vibrații pentru semnale IEPE;

AO – modul ieșiri analogice (Analog Output);

DIO – modul intrări/ieșiri digitale (Digital Input/Output);

RTD – modul RTD (Resistance Temperature Detector) input;

TC – modul Termocuplu;

S – Senzori;

S_{acc} – Senzori de tip accelerometru sau alți senzori IEPE;

E_{ex} – Elemente de execuție – convertizor motor on/off, valve on/off, conectare/deconectare circuite electrice, etc.;

S_{RTD} – Senzori RTD;

S_{TC} – Senzori Termocuplu.

Modulele AI sunt în cea mai mare parte dedicate senzorilor de presiune, debit, temperatură și vibrații care au semnal de ieșire 4-20 mA sau 0-10 V, semnale de

Optimizarea și controlul sistemelor electrice destinate automatizării unui stand de încercări pentru propulsie spațială

feedback de același tip de la valve, semnalul de turație de la convertizorul motorului, semnal de la traductorul de cuplu.

Modulul SV este implicit dedicat accelerometrelor, datorită domeniului dinamic mare. Însă au intervenit două modificări: accelerometrele (cei doi senzori de vibrații) au fost ulterior echipați cu adaptoare 4-20 mA și au fost transferați către modulele AI. La modulele SV s-au conectat, în schimb, senzorii de presiune dinamică, deoarece standardul lor IEPE este compatibil cu modulul SV, iar cerințele de achiziție la frecvență ridicată fac conexiunea acestor senzori la acest modul (care permite 204.8 kHz) una potrivită.

Modulele AO sunt dedicate generării de semnal variabil pentru controlul motorului electric (prin intermediul convertizorului său) și valvelor cu poziție variabilă.

Modulele DIO sunt dedicate generării de semnal de control 24V (on/off) pentru conectarea/deconectarea circuitelor electrice, valvelor și altor circuite, precum și pentru citirea prezenței contactelor de feedback 24V.

Modulele RTD și TC sunt prevăzute pentru a acoperi senzori de temperatură (termorezistențe, respectiv termocupluri), fără o conversie la alt tip de semnal analogic. Aceasta este, în prezent, o soluție de rezervă, deoarece toți senzorii de temperatură instalați până acum generează semnal 4-20 mA.

În plus, există sloturi libere unde se pot introduce module suplimentare pentru a extinde gama de măsurători pentru nevoi ulterioare.

În Fig. 15 sunt prezentate monitoarele cu care interfațează operatorul în camera de comandă a standului.

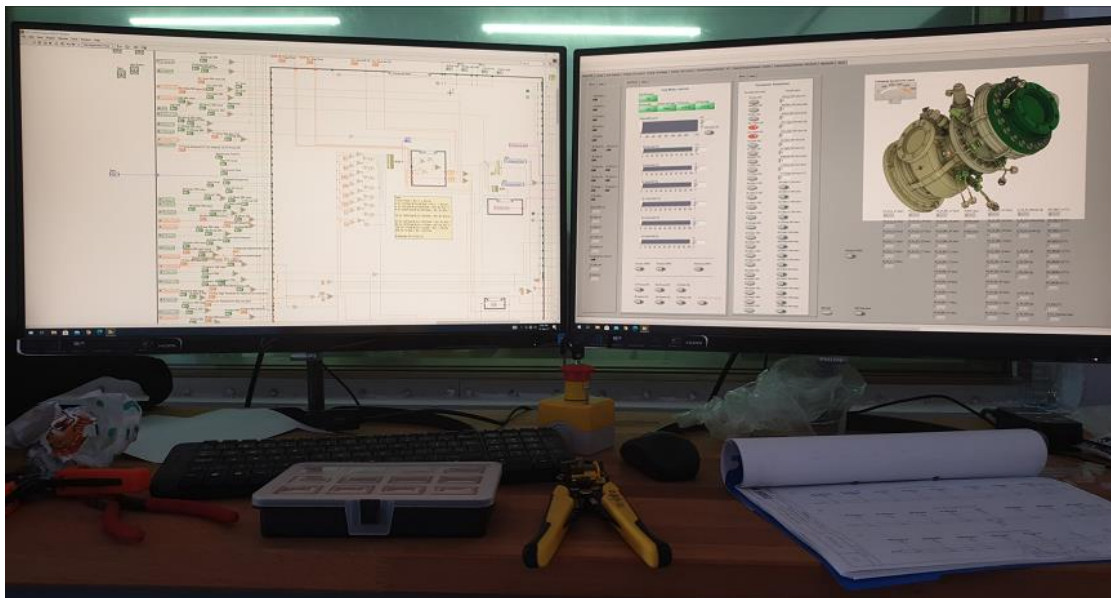


Fig. 15. Display-uri interfață software pentru sistemul de control al standului de testare turbopompe moleculare, COMOTI Măgurele

4.3.2 Dezvoltarea software

Am dezvoltat software-ul conform cerințelor și în vederea monitorizării și înregistrării tuturor datelor primite din stand. De asemenea, prin abordarea descrisă mai jos am realizat o optimizare considerabilă a utilizării algoritmilor și resurselor, astfel încât întregul sistem să funcționeze în mod sigur, eficient și intuitiv, ținând cont de complexitatea instrumentării și a cerințelor de funcționare a rutinelor.

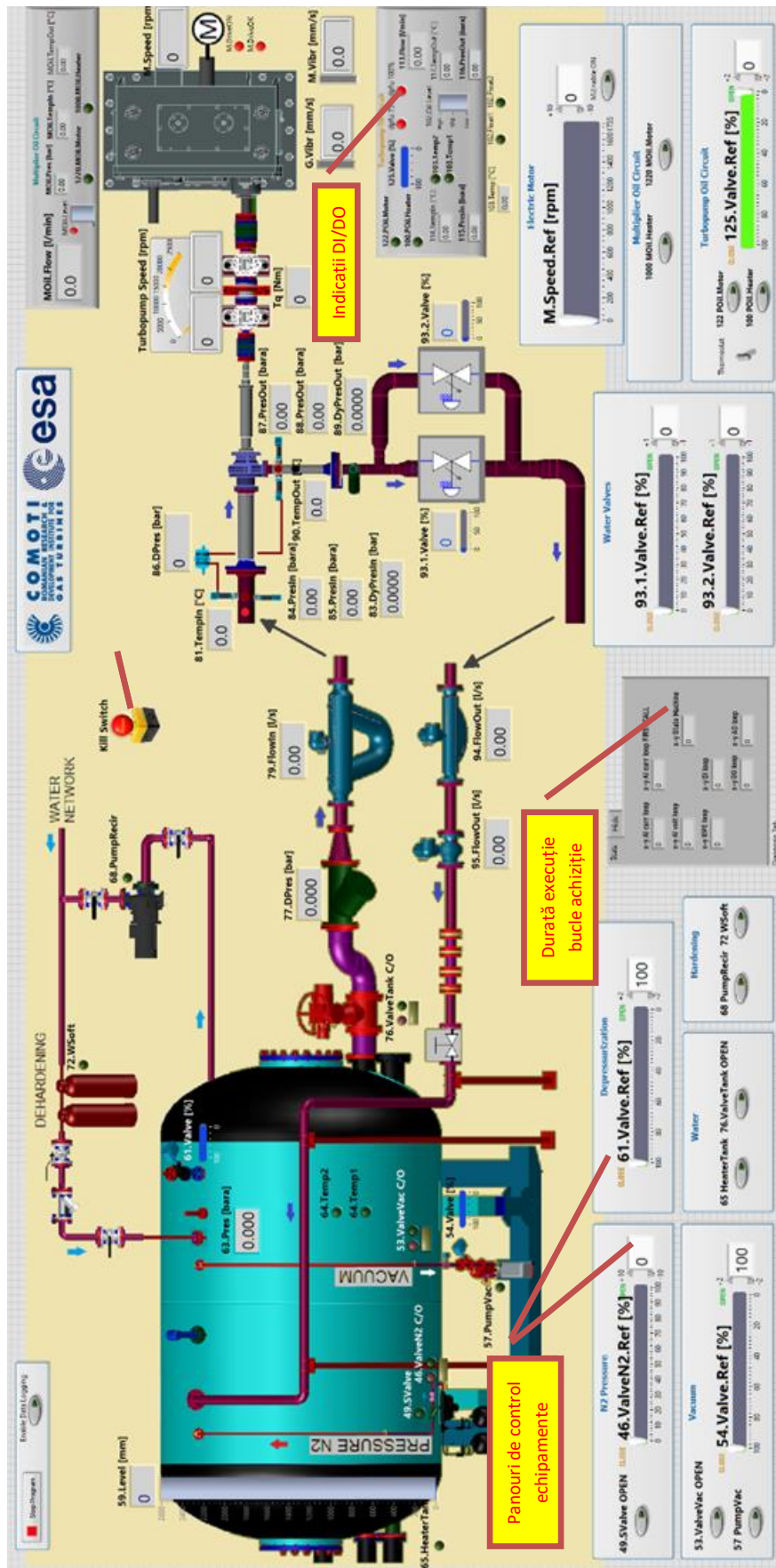


Fig. 16. Interfața principală software stand de testare turbopompe

Optimizarea și controlul sistemelor electrice destinate automatizării unui stand de încercări pentru propulsie spațială

În Fig. 16 este ilustrată interfața principală a sistemului de control, cu schema sinoptică a standului, indicațiile senzorilor și comenzile manuale ale elementelor de execuție controlate. Indicațiile de la senzori, și de la celelalte echipamente care transmit semnale către sistemul de control, sunt dispuse pe schema sinoptică conform cu locația echipamentului respectiv în cadrul standului.

Comenzile manuale sunt grupate în partea inferioară a ecranului.

Pe programarea canalelor analogice (curent, tensiune) în mediul de dezvoltare LabVIEW am realizat-o conform cu Fig. 17. Abordarea înlesnește setarea inițială cât și ulterioară a canalelor prin introducerea direct din interfață a: capetelor de scală pentru semnalul electric cât și pentru mărimea fizică reprezentată, adresei canalului și valorii de rezistenței de șunt. Astfel, am adus o optimizare mare a procesului de setare ulterioară a canalelor de către operatori, fără ca aceștia să fie nevoie să cunoască limbajul de programare.

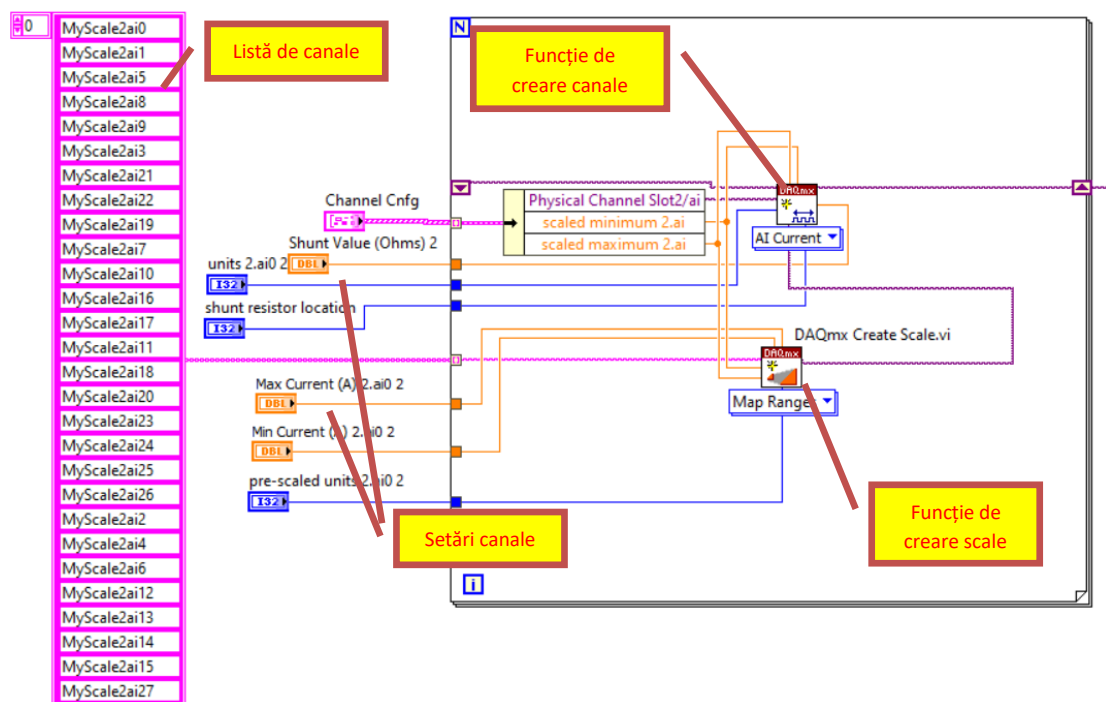


Fig. 17. Programarea canalelor de intrări în curent 4-20 mA

Pentru prelucrarea și înregistrarea datelor am ținut seama de două aspecte importante. Primul ține de optimizarea resurselor hardware și software, care este deosebit de importantă, având în vedere că o parte dintre parametrii sunt înregistrați la frecvențe relativ ridicate (kHz) și că trebuie menținută o fiabilitate și o siguranță a controlului în exploatare pentru toate buclele de comandă. Cel de-al doilea aspect ține de cerințe privind înregistrarea de parametri la frecvențe diferite în același fișier de date, la care se adaugă: crearea indicativului de timp la fiecare înregistrare și sincronizarea acestuia cu bucla de înregistrare cu temporizare hardware, precum și considerente de afișaj, ca de exemplu stabilirea unui număr de zecimale diferit.

Pentru a realiza acest lucru, am implementat un algoritm complex de înregistrare a datelor, care să permită înregistrarea datelor la frecvențe diferite și în același fișier de date.

Pentru luarea deciziilor logice și pentru comenzile generate către exterior în cadrul programului, am utilizat o mașină a stărilor, optimizând programarea

secvențelor de control față de metoda care utilizează doar condiționări binare (*If...Else*). Mașina stărilor este un algoritm care conține: un număr de stări definite, o relație cauzală de trecere dintr-o stare în alta, parametri de intrare, parametri de ieșire, precum și rutine care diferă în funcție de stare și care cauzează valoarea parametrilor de ieșire în funcție de parametri de intrare și de algoritmi predefiniți în cadrul rutinelor. În esență, mașina stărilor poate fi considerată ca un model matematic care descrie în mod predictibil un rezultat în funcție de factorii determinanți.

Stările corespunzătoare unei funcționări automate sunt următoarele:

- **Init** – starea implicită a sistemului;
- **Test Mode** – starea de testare individuală a echipamentelor;
- **Pre** (pregătire);
- **Work** (funcționare) – funcționarea efectivă a standului, care se învâрте în jurul comandării motorului electric principal și a vanelor 93.1 și 93.2, pentru a simula condițiile necesare testării obiectului central de studiu (turbopompa);
- **Stop** (oprire normală);
- **Emergency Stop** (oprire de urgență).

4.3.3 Testarea automatizării. Metoda HIL (Hardware-in-the-Loop)

Dincolo de etapele vitale standard, am mai studiat și pus în practică un nou tip de testare pentru sistemul de comandă, așa-zisa testare sau simulare de tip *Hardware-in-the-Loop*. Prin această testare, utilizând ca reper principii studiate în domenii similare, am verificat funcționalitatea secvențelor software înainte ca standul de testare (motorul, circuitele de gaz, echipamentele, senzorii, etc.) să fie pregătit de funcționare. Ulterior, am realizat testare finală, fizică.

În timpul testării HIL, sistemul fizic (ex: motorul, mașina, instalația controlată) care interfațează cu un sistem de control este simulat pe un sistem hardware, iar ieșirile (output-urile) simulatorului mimează ieșiri reale ale sistemului fizic. Astfel, sistemul de control (sau controllerul) consideră sistemul simulat drept un sistem real și se pot testa o mare varietate de scenarii posibile.

Pentru platforma fizică a HIL, am prevăzut un sistem de achiziție de date și control National Instruments (CompactRIO) pentru achiziția și generarea fizică a semnalelor analogice și digitale într-o buclă HIL, ce conține următoarele:

- un controller pentru rularea modelului de simulare;
- un modul cu 8 intrări analogice în curent 0-20 mA, ce preia semnale analogice de comandă 4-20 mA de la PXI;
- 3 module cu câte 8 ieșiri analogice în curent 0-20 mA, ce generează semnale către PXI pe baza parametrilor simulați;
- două module a câte 16 ieșiri digitale în curent 0-20 mA, ce transmit semnale simulate, în locul senzorilor fizici, către PXI;
- module de intrări și ieșiri digitale, care preiau semnalele digitale de comandă pe releu 24 V de la PXI, și transmit semnale (închideri de contact) simulate, în locul echipamentelor fizice, către PXI;
- un software realizat în LabVIEW, prezentat mai jos, care simulează reacția parametrilor fizici ai standului (presiuni, debite, vibrații, stare echipamente), în funcție de comenzile primite de la controllerul PXI;
- o interfață vizuală;
- interconexiuni fizice (cabluri) între PXI și CompactRIO.

Optimizarea și controlul sistemelor electrice destinate automatizării unui stand de încercări pentru propulsie spațială

Ca software, am folosit, pentru rularea modelului matematic, platforma LabVIEW (Fig. 18).

Testarea am făcut-o prin simularea intrărilor, analizarea ieșirilor, evaluarea reacției în timp, evaluarea funcționalității și siguranței, aplicarea diferitelor scenarii, așa cum detaliez ulterior. Înainte de a implementa această soluție, am studiat gradul și modul ei de implementare în aplicații similare. În acest demers, am coordonat și publicat lucrarea “*Hardware in the Loop Test Platform Concept for Adaptive Turbine Engine Controller*”, **A. Stoicescu**, R. Ciobanu, A. Țăranu, C. Nechifor, F. Niculescu, *TURBO Scientific Journal*, Vol. VI, 2019. Aici am descris conceptul unui sistem HIL pentru testarea unui controller inovativ (de tip ECU) pentru turbomotoare, bazat pe rețele neurale [122]. După cunoștința autorilor lucrării, este pentru prima dată când se propune un astfel de HIL pentru controller-e de acest tip.

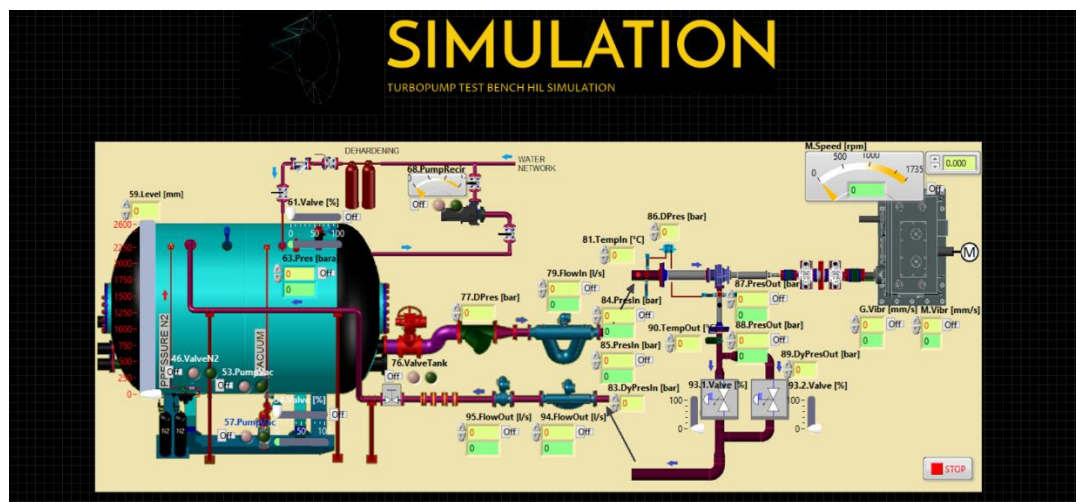


Fig. 18. Interfața simulării HIL pentru standul de testare turbopompe de la COMOTI Măgurele

Interfața simulării standului este în Fig. 18. Logica de funcționare se bazează pe modelul matematic al standului. Funcțiile de transfer sunt determinate sau estimate cu ajutorul echipei de proiectare a standului, în baza calculului și simulărilor gazodinamice ce iau în considerare fluidele și geometria tronsoanelor de țevi și elemente de trecere. Anumite funcții au putut fi în cele din urmă testate, îmbunătățite și reintegrate în simulare, cum ar fi variația presiunilor și debitelor de comenzi către pompe sau vane, sau variația vibrațiilor în funcție de turație, turația motorului în funcție de prescripția de turație.

Funcțiile de transfer utilizate se bazează pe calcule matematice, pe condiționări logice, cât și pe variații în timp a altor parametri, iar ca date de intrare am folosit: parametri măsuți de alți senzori, poziții ale vanelor, stare de funcționare a pompelor, turații ale motoarelor, cronometrări, etc.

Cu ajutorul simulării am putut realiza în special testări de bucle de control pe care le implementasem în diverse versiuni ale software-ului de control, cum ar fi regulatoare de menținere a presiunii 86 cu ajutorul celor două vane de reglaj, 93.1 și 93.2. Această secvență de reglaj a mai presupus atingerea și menținerea, consecutive, a 27 de niveluri de presiune, cu un timp de răspuns estimativ de maxim 2 secunde între niveluri, precum și ieșirea din reglaj și trecerea pe secvența de oprire, dacă alte condiții predeterminate duc la aceasta.

În acest sens, am putut simula cu ajutorul HIL, valori de presiune, temperatură, vibrații sau debite în limitele normale și mai ales în afara limitelor prestabilite. Dincolo de acestea, am putut simula efectele comandării unor echipamente, precum vanele, asupra presiunilor și debitelor din instalație. Cu ajutorul HIL, am putut simula reglajul brut și reglajul fin al fluidului de lucru, cu ajutorul vanelor 93.1 și 93.2, fără a utiliza instalațiile reale din stand. Acest lucru a permis echipei de proiect rafinarea principiilor de testare a standului și a logicii finale de software după care trebuie să se ghideze funcționarea acestuia, atât pentru etapele realizate pentru prezent, cât și pentru etapele de dezvoltare ulterioară.

Metoda HIL a contribuit, în final, la ridicarea gradului de finalizare a software-ului sistemului de control pentru standul de testare turbopompe, prin faptul ca s-au putut testa mai multe aspecte de funcționare înainte de pregătirea fizică a instalațiilor, dar și scenarii cu grad de risc ridicat pentru instalație, fără a o pune în pericol. În privința timpilor de implementare și testare, se estimează că aceștia s-au redus cu aproximativ două luni față de estimările inițiale, timp care a fost utilizat pentru implementarea altor proiecte.

Capitolul 5

Concluzii

Deși optimizarea sistemelor de automatizare pentru standurile de testare ale propulsoarelor aerospațiale este un subiect complex și depinde de multe variabile, se pot trage câteva concluzii generale:

1. Automatizarea completă a sistemelor de testare poate îmbunătăți semnificativ productivitatea și precizia procesului, reducând timpul și costurile necesare pentru testarea propulsoarelor aerospațiale.
2. Utilizarea senzorilor și a sistemelor de monitorizare continuă poate ajuta la detectarea rapidă a problemelor și la prevenirea defecțiunilor costisitoare.
3. Integrarea telemetriei și a comunicațiilor wireless poate îmbunătăți transferul datelor și comunicarea între diferitele componente ale sistemului de testare.
4. Diverse tehnologii precum dispozitivele piezoelectrice sau senzorii cu fibră optică pot aduce beneficii pentru anumite aplicații unde alimentarea sau transmisia convenționale necesită optimizări.
5. Utilizarea algoritmilor de control și a reglajului în buclă închisă poate îmbunătăți controlul și precizia sistemului de testare, reducând erorile umane și crescând eficiența.
6. Utilizarea unui software bine integrat și bine documentat poate îmbunătăți gestionarea și stocarea datelor de testare, permițând o analiză mai ușoară și mai precisă a performanței propulsoarelor aerospațiale.
7. Este important să se efectueze teste riguroase ale sistemelor de automatizare pentru a verifica și a valida performanța acestora și pentru a identifica eventuale probleme.
8. Testarea simulată și utilizarea modelelor matematice poate fi utilizată pentru a îmbunătăți procesul de testare și a reduce costurile asociate cu testarea logicii de control. Utilizarea unor modele matematice precise poate contribui la reducerea numărului de teste fizice necesare și poate asigura o îmbunătățire a calității procesului de testare.

În ceea ce privește realizarea unui sistem de control automat pentru standul de încercare turbopompe moleculare, aceasta s-a dovedit a fi un proces complex și important, care poate fi realizat cu succes prin urmarea unui set de pași bine definiți. Procesul de realizare a unui astfel de sistem de control automat trebuie să includă selectarea senzorilor adecvați, dezvoltarea unui software de control precis și fiabil, integrarea sistemului de control cu standul de încercare și testarea și validarea sistemului de control.

5.1 Rezultate obținute

În cadrul primului capitol, am realizat o introducere în domeniul standurilor de

automatizare pentru propulsoare aerospațiale. Am explicat principala diferență dintre propulsoarele abordate în această teză, precum și provocările pe care le aduce domeniul.

În cadrul capitolului 2, am explicat în detaliu particularitățile, componentele și funcționarea standurilor automatizate pentru propulsie aerospațială. Am realizat un review al conceptului de automatizare și al componentelor unei automatizări de stand, cu exemple și contribuții personale în studierea acestora. Am mai realizat, de asemenea, o analiză a patru tipuri de standuri de testare pentru elemente de propulsie aerospațială, unde am avut diverse contribuții teoretice sau practice în dezvoltarea lor (vezi capitolul 5.2).

În cadrul capitolului 3, am ales unul dintre aceste standuri pentru a explica mai în detaliu funcționarea aplicației și cerințele acesteia pentru dezvoltarea automatizării sale. Standul de testare turbopompă moleculară pentru motor de rachetă a fost ales, în cadrul acestei teze, datorită complexității sale ridicate și posibilității mele de a aduce contribuții semnificative în dezvoltarea și eficientizarea acestuia.

În cadrul capitolului 4, am prezentat dezvoltarea automatizării acestui stand, precum și aspecte pe care le-am cercetat privind diverse soluții de instrumentare inovative: senzori optici, senzori wireless, dispozitive piezoelectrice. În cele din urmă, s-a obținut un stand automatizat pentru testarea de turbopompe moleculare, cu controller central, software de monitorizare, înregistrare a datelor și control automat. Am mai dezvoltat o procedură de testare a controllerului, cu ajutorul unui software de simulare a standului.

În cadrul capitolului 5, am prezentat principalele concluzii rezultate în urma campaniei de studiu teoretic și practic, contribuțiile personale. Concluziile au adus contribuții domeniului care pot fi utilizate și în alte aplicații, fapt evidențiat și în subcapitolul dedicat perspectivelor de dezvoltare ulterioară.

5.2 Contribuții originale

În cadrul acestei teze de doctorat, am adus o serie de contribuții originale în domeniul studiului și dezvoltării sistemelor electrice destinate automatizării unor standuri de testare pentru propulsoare aerospațiale. Aceste contribuții includ:

1. Realizarea software-ului de achiziție, monitorizare și înregistrare a datelor preluate de la instalația de postardere, în cadrul standului de testare a unui turbomotor (cap. 2.2.1). Acest software a contribuit la mai multe campanii de testare a turbomotorului în standul de încercări.
2. Realizarea software-ului de control automat al standului de pompare aer pentru testare cameră de ardere (cap. 2.2.2). Prin acest control am realizat controlul și optimizarea furnizării de aer la presiuni ridicate, în condiții de siguranță.
3. Realizarea rețelei de automatizare și a software-ului de monitorizare și control automat al standului de testare pentru un propulsor spațial experimental care funcționează prin ionizarea plasmă (cap. 2.2.3). Prin acest control am realizat optimizarea aprinderii, cu ajutorul unor secvențe ciclice de control al gazului și puterii de radiofrecvență.
4. Realizarea sistemului de control pentru un stand de testare turbopompă moleculară pentru un motor de rachetă al Agenției Spațiale Europene

- (cap. 4.3.2). Cu acest sistem de control s-au monitorizat peste 50 de linii de semnal și controlat aproximativ 20 de echipamente din cadrul standului de testare. Secvențele software de control cuprind o mașină a stărilor cu 6 stări și înregistrarea datelor la frecvențe diferite.
5. Realizarea unui simulator al standului de testare turbopompă moleculară, compus dintr-un controller cu interfețe și software, care conectat la controllerul de stand permite realizarea de teste de tip hardware-in-the-loop pentru testarea și validarea performanțelor sistemului de control al standului (cap. 4.3.3). Am realizat astfel o optimizare importantă în dezvoltarea și testarea unor scenarii de control, fără ca disponibilitatea standului fizic să fie necesară.
 6. Realizarea unui studiu teoretic și practic privind sisteme de recoltare a energiei din vibrații (piezoelectrice) aplicate standurilor de turbomotoare (cap. 4.2.3). Am testat astfel de sisteme cu ajutorul vibrațiilor obținute de la turbomotorul de pe standul de testare a turbomotorului.

5.3 Lista lucrărilor originale

[3] F. Niculescu, M.L. Vasile, **A. Stoicescu**, C. Nechifor, “Comparative Analysis between Gas Turbine and Electric Combined Propulsion”, *EV 2019* (Electric Vehicles International Conference & Show), Bucharest, 3-4 Oct 2019 (conferinta); Added to IEEE Xplore: 11 Nov 2019; INSPEC Accession Number: 19136016;

[8] C. Nicolescu, B. Varaticeanu, **A. Stoicescu**, C. Nechifor, “Electronic Improvements Made for Industrial Valve”, *Electrotehnica Electronica Automatica (EEA) Journal*, Vol. 68 (2020), no. 3, pp. 05-12;

[12] C. Borzea, A. Savescu, I. Vladuca, **A. Stoicescu**, “Asynchronous Three-Phase Machine Driven as Generator by a Twin-Screw Expander”, *SME'20* (Electric Machines, Materials and Drives Present and Trends / Actualități Și Perspective În Domeniul Mașinilor Electrice), 2020, ISSN/ISSN-L 1843-5912, <https://www.doi.org/10.36801/apme.2020.1.5> ;

[19] R. Ciobanu, **A. Stoicescu**, C. Nechifor, A. Taranu, “Self-Learning Control System Concept for APU Test Cells”, *MATEC Web of Conferences* 210, 02009 (5 Oct 2018); eISSN: 2261-236X;

[26] **A. Stoicescu**, O. Dumitrescu, G. Fetea, “Automated Multi-Reference Control for Centrifugal Compressor”, 9th International Conference on Energy and Environment (CIEM 2019), 17-18 Oct 2019, Proceedings IEEE, Timisoara, Romania;

[99] C. Borzea, D. Comeagă, **Adrian Stoicescu**, C. Nechifor, “Piezoelectric Harvester Performance Analysis for Vibrations Harnessing”, *UPB Scientific Bulletin, Series C (Electrical Engineering and Computer Science)*, Vol. 81, Issue 3, 2019, ISSN (print): 2286-3540 / (online): 2286-3559;

[100] **A. Stoicescu**, M. Deaconu, R.D. Hritcu, C.V. Nechifor, V.A. Vilag, “Vibration Energy Harvesting Potential for Turbomachinery Applications”, Aerospace Europe *CEAS 2017 Conference*, 16th-20th October 2017, Bucharest, Technical session Propulsion II; publicat in INCAS Bulletin Volume 10 Issue 1, March 2018;

[122] **A. Stoicescu**, R. Ciobanu, A. Taranu, C. Nechifor, F. Niculescu, “Hardware in the Loop Test Platform Concept for Adaptive Turbine Engine Controller”, *TURBO Scientific Journal*, Vol. VI (2019) No. 2, ISSN 2559-608X;

C. Nechifor, V. Năvrănescu, S. Tomescu, C. Săvescu, M. Roman, R. Conțiu, **A. Stoicescu**, “Optimizing the Electronic Control of Suction Valves for Gas Compression Units”, *Revue Roumaine des Sciences Techniques – Série Électrotechnique et Énergétique*, Vol. 2, No. 2 (2023), pp. 182-187, ISSN 0035-4066.

C. Săvescu, D. Comeagă, **A. Stoicescu**, “Triangular Shape Optimization of Piezoelectric Harvester with Material Reduction Using Finite Element Analysis”, *Sensors (MDPI)*, Special Issue “Piezoelectric Energy Harvesting System”, 2023 (în curs de reevaluare după primul review).

5.4 Perspective de dezvoltare ulterioară

Domeniul automatizării pentru standurile de testare ale propulsoarelor aerospațiale continuă să cunoască o evoluție semnificativă, pe măsură ce modelele experimentale, prototipuri sau serii limitate de propulsoare apar în tot mai multe variante. Atât turbomotoarele, cât și propulsoarele pentru spațiu sunt constrânse de mediu și de limitele actuale să capete noi și noi tehnologii, iar testarea lor să surprindă toate scenariile care pot apărea în funcționarea lor. Astfel, standurile de testare își pot dezvolta capacități în următoarele direcții:

1. Îmbunătățirea software-ului de control.

Deși sună generic, măsurile de îmbunătățire a software-ului de control al sistemelor de testare variază de la sistem la sistem. Printr-o testare riguroasă a secvențelor de funcționare, prin măsuri de optimizare a resurselor utilizate, prin utilizarea înregistrării datelor de o manieră cât să servească nu doar cercetării propulsorului, cât și a identificării problemelor și metodelor de optimizare a logicii de control, putem obține o mai bună performanță și precizie a testelor efectuate, oferind astfel un control mai bun asupra procesului. De exemplu, în vederea dezvoltării ulterioare a standului de testare a turbopompelor cu circuitul de azot, am în vedere o soluție de gestionare a înregistrărilor de volum mare, prin generarea de fișiere distincte la intervale de timp, în locul unui singur fișier mare și dificil de stocat și gestionat. De asemenea, am în vedere utilizarea de reglatoare PID pentru atingerea și menținerea unor presiuni sau debite constante la intrarea în turbopompă, cu ajutorul vanelor.

2. Creșterea gradului de automatizare.

O creștere a gradului de automatizare implică mai multe costuri inițiale în canalele I/O, în timpul de programare, în infrastructura și în resursele hardware. Cu toate acestea, un grad ridicat de automatizare crește siguranța în exploatare și permite să se ia măsuri automate pentru prevenirea, corectarea și diagnosticarea unor probleme în exploatare. Se optimizează astfel funcționarea facilă, îndelungată și fiabilă a standului, crescând performanța acestuia de a livra rezultate rapide și precise ale testărilor efectuate. De exemplu, robinetii manuali rămași în standuri pot fi înlocuiți și ei cu vane acționate electric și comandate din software. De asemenea, pentru creșterea gradului de fiabilitate în cadrul unor operațiuni mai sensibile cu standul, se poate imagina o structură de sistem de control redundant, cu un automat CompactRIO la standard SIL 3, pentru gestionarea oricăror riscuri de defect în sistemul de control.

3. Utilizarea inteligenței artificiale și a învățării automate.

Prin implementarea sistemelor de învățare automată și a inteligenței artificiale, putem îmbunătăți capacitatea de a anticipa și a preveni problemele înainte ca acestea să apară, făcând astfel procesul de testare mai eficient și mai precis.

4. Testarea pe bază de simulare Hardware-in-the-Loop.

Simularea Hardware-in-the-Loop permite testarea sistemului de control utilizând un model matematic al mașinăriei, al standului sau al unor subansamble, astfel încât să se încerce scenarii variate, atunci când echipamentele simulate nu sunt disponibile sau pentru a se testa scenarii extreme. Aplicarea acestei simulări la orice tip de stand poate aduce optimizări importante în privința timpului de dezvoltare și al costurilor cu testarea. Am în vedere să continui cercetarea pentru dezvoltarea unui simulator Hardware-in-the-Loop care să poată fi adaptat și transferat ușor la mai multe aplicații, acolo unde există sau se pot crea modele matematice ale sistemelor controlate.

5. Creșterea intuitivității.

Un sistem de control oricât de complex trebuie să fie intuitiv de programat, utilizat și de operat. Cu cât este mai intuitiv, cu atât utilizarea și depanarea acestuia sunt mai optimizate și conduc la o durată mai lungă de utilizare și la timpi morți mai mici. Împreună cu creșterea gradului de automatizare, am în vedere căutarea permanentă de a face sistemele de control mai intuitive și mai robuste.

6. Recoltarea energiei din vibrații.

Metodele de a face utilă producția suplimentară, sau excesul de energie, pot reduce costurile energetice și îmbunătăți competitivitatea utilizatorilor ca entități economice din acest punct de vedere. Recoltarea energiei din vibrații nu numai că aduce o contribuție la minimizarea pierderilor instalației, dar aduce și o creștere a nivelului tehnologic, deschizând calea către tehnologii de vârf precum sisteme de control compacte sau autonome. Tehnologia convertirii energiei mecanice rezultată din vibrațiile unei mașini în energie electrică nu este încă una foarte matură. S-a arătat în lucrare că există perspective pentru dezvoltarea de sisteme de comandă și control care să integreze surse piezoelectrice. Adoptarea lor în domeniul propulsoarelor implică avantaje precum optimizarea sistemelor de automatizare prin eficientizarea energetică, care este unul dintre obiectivele importante ale acestor decenii. Această optimizare rezultă nu doar din adoptarea unei alimentări cu energie din surse neconvenționale, alternative, ci și din tendința de a minimiza, de a compacta (dimensional și energetic) elemente ale instalației, ca de exemplu instrumentarea și circuitele electronice.

Bibliografie

- [1] A. Zilouchian, M. Juliano, T. Healy, J. Davis, Design of a fuzzy logic controller for a jet engine fuel system, *Control Engineering Practice*, Vol. 8, No. 8, pp. 873–883, 2000;
- [2] J. S. Litt, D. L. Simon, S. Garg, A Survey of Intelligent Control and Health Management Technologies for Aircraft Propulsion Systems, NASA Glenn Research Center, Cleveland, Ohio, USA, 2005;
- [3] **F. Niculescu, M.L. Vasile, A. Stoicescu, C. Nechifor; 2019; Comparative Analysis between Gas Turbine and Electric Combined Propulsion, EV 2019 (Electric Vehicles International Conference & Show), Bucharest, 3-4 Oct 2019 (conferință); adăugat pe IEEE Xplore: 11 Nov 2019; INSPEC Accession Number: 19136016;**
- [4] Claudia Borzea, RAPORT DE CERCETARE 2 - Studiu asupra necesității implementării unui sistem de monitorizare a parametrilor instalațiilor de comprimare gaz metan”, Proiect de disertație – Sistem de monitorizare pentru instalațiile de comprimare gaz metan, cu recuperare de energie, Universitatea Politehnica din București, 2017;
- [5] „Measuring Temperature with Thermocouples, RTDs, and Thermistors”, ni.com, <https://www.ni.com/ro-ro/shop/data-acquisition/sensor-fundamentals/measuring-temperature-with-thermocouples-rtds-and-thermistors.html> ; accesat 2023;
- [6] „Motor monitoring”, ifm.com, <https://www.ifm.com/us/en/us/real-time-maintenance/applications/motor> ; accesat 2023;
- [7] D. Talley, Butterfly Valves: Torque, Head Loss, and Cavitation Analysis, AWWA 2001, ISBN 1-58321-041-5;
- [8] **C. Nicolescu, B. Varaticeanu, A. Stoicescu, C. Nechifor, Electronic Improvements Made for Industrial Valve”, *Electrotehnica Electronica Automatica (EEA) Journal*, Vol. 68, no. 3, pp. 05-12, 2020;**
- [9] S. Tomescu, V. Vilag, R. Hrițcu, **A. Stoicescu**, N. Macrișoiu, Documentație tehnică pentru realizare componente model funcțional micro-cogenerativ de 30 kW (Etapa 3), 2016;
- [10] K. Jalili, Investigation of Control Concepts for High-Speed Induction Machine Drives and Grid Side Pulse-Width Modulation Voltage Source Converters, PhD Thesis, Technische Universität Dresden, 2009;
- [11] J. Rubinic, V. Yaramasu, B. Wu, N.R. Zargari, Model Predictive Control of Neutral-Point Clamped Inverter with Harmonic Spectrum Shaping, 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), DOI: 10.1109/ECCE.2015.7309760, August 2015
- [12] **C. Borzea, A. Savescu, I. Vladuca, A. Stoicescu, “Asynchronous Three-Phase Machine Driven as Generator by a Twin-Screw Expander”, *SME’20 (Electric Machines, Materials and Drives Present and Trends / Actualități Și Perspective În Domeniul Mașinilor Electrice)*, 2020, ISSN/ISSN-L 1843-5912, <https://www.doi.org/10.36801/apme.2020.1.5> ;**
- [13] <https://www.dataacquisitionssystem.com/data-acquisition-software/> ; accesat 2023;
- [14] A. J. Chipperfield, B. Bica, P. J. Fleming, Fuzzy scheduling control of a gas turbine aero-engine: a multiobjective approach; *IEEE Transactions on Industrial Electronics*; Vol. 49; No. 3; pp. 536-548, 2002;
- [15] A. Zilouchian, M. Juliano, T. Healy, J. Davis, Design of a fuzzy logic controller for a jet engine fuel system, *Control Engineering Practice*, Vol. 8, No. 8, pp. 873–883, 2000;
- [16] H. Asgari, Modelling, Simulation and Control of Gas Turbines Using Artificial Neural Networks, PhD Thesis, University of Canterbury, New Zealand, 2014;

- [17] L. C. Jaw, S. Garg, Propulsion Control Technology Development in the United States (A Historical Perspective), NASA Glenn Research Center, Cleveland, Ohio, USA, 2005;
- [18] P. J. Antsaklis, K. M. Passino, An Introduction to Intelligent and Autonomous Control, Kluwer Academic, Boston, Mass, USA, 1993;
- [19] **R. Ciobanu, A. Stoicescu, C. Nechifor, A. Taranu, Self-Learning Control System Concept for APU Test Cells, MATEC Web of Conferences 210, 02009 (5 Oct 2018); eISSN: 2261-236X**
- [20] M. Pakmehr, B. Moslehi, J. Costa, R.J. Black, V. Sotoudeh, A.R. Behbahani, A Review of Fiber Optic Networks for Turbine Engine Instrumentation Channel: Control, PHM, and Test Cell Applications, 50th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, Cleveland, OH, USA, 2014;
- [21] G. Fetea, Cercetări energetice teoretice și experimentale asupra turbocompressoarelor centrifugale de aer, Teză de doctorat, 2017, Universitatea Politehnica din București;
- [22] J. R. Gaston, Turbocompressor Antisurge Control, New Solution for an Old Problem, International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition Cologne, Germany June 1-4, 1992;
- [23] R. Salamat, Gas path diagnostics for compressors, PhD thesis, Cranfield University, School of Engineering, May 2012;
- [24] F. Laouad, M. Bouguerra, A. Hafaiifa, A. Iratni, Nonlinear Sensitive Control of Centrifugal Compressor, World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering Vol. 1, No. 2, 2007;
- [25] G. L. Arnulfi, F. Blanchini, P. Giannattasio, D. Micheli, P. Pinamonti, Extensive study on the control of centrifugal compressor surge, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 220, 289–304, 2006;
- [26] **A. Stoicescu, O. Dumitrescu, G. Fetea, Automated Multi-Reference Control for Centrifugal Compressor, 9th International Conference on Energy and Environment (CIEM 2019), 17-18 Oct 2019, Proceedings IEEE, Timisoara, Romania;**
- [27] R.Z. Boushaki, B. Chetate, Y. Zamoum, Artificial Neural Network Control of the Recycle Compression System, Studies in Informatics and Control, Vol. 23, No. 1, March 2014;
- [28] S. Mazouffre, Electric propulsion for satellites and spacecraft: established technologies and novel approaches, Plasma Sources Science and Technology. **25** (3): 033002, 2016; [doi:10.1088/0963-0252/25/3/033002](https://doi.org/10.1088/0963-0252/25/3/033002). [ISSN 0963-0252](https://doi.org/10.1088/0963-0252);
- [29] "[Electric versus Chemical Propulsion](https://sci.esa.int/web/smart-1/-/34201-electric-spacecraft-propulsion?fbodylongid=1535)". *Electric Spacecraft Propulsion*. [ESA](https://sci.esa.int/web/smart-1/-/34201-electric-spacecraft-propulsion?fbodylongid=1535). <https://sci.esa.int/web/smart-1/-/34201-electric-spacecraft-propulsion?fbodylongid=1535>
Accesat 2022;
- [30] H. R. Koenig, L. I. Maissel, Application of RF Discharges to Sputtering, IBM Journal of Research and Development, Vol. 14, Issue 2, March 1970, pp. 168-171;
- [31] J. H. Keller, W. B. Pennebaker, Electrical Properties of RF Sputtering Systems, IBM Journal of Research and Development, Vol. 23, Issue 1, pp. 3-15, 1979;
- [32] A. J. van Roosmalen, W.G.M. van den Hoek, H. Kalter, Electrical properties of planar rf discharges for dry etching, Journal of Applied Physics, Vol. 58, p. 653, 1985;
- [33] P. Bletzinger, Experimental characteristics of rf parallel-plate discharges: Influence of attaching gases, Journal of Applied Physics, Vol. 67, p. 130, 1990;
- [34] L. Ge, Y. Zhang, A Simple Model for the Calculation of Plasma Impedance in Atmospheric Radio Frequency Discharges, Plasma Science and Technology, Vol. 16, No. 10, 2014;
- [35] V. Brouk, R. Heckman, Stabilizing RF Generator and Plasma Interactions, 47th Annual Technical Conference Proceedings, Dallas, TX, USA, April 24-29, 2004;
- [36] Nazario Biala, *Machine Vision. An Introduction to Fiber-Optic Sensors*, 2001, www.sensorsmag.com;
- [37] <https://industrial.omron.eu/en/products/e32-standard-cylindrical#features>;
- [38] <https://industrial.omron.eu/en/products/e32-longer-distance#features>;
- [39] https://industrial.omron.eu/en/products/e32-standard-cylindrical#technical_information;

- [40] "Optical Sensor Technologies – Measurands and Sensor Categories", WTEC Hyper-Librarian, http://www.wtec.org/loyola/opto/c6_s3.htm;
- [41] Ian James Grayston Sparrow, *Development and Applications of UV Written Waveguides*, PhD Thesis, Faculty of Engineering, Science & Mathematics, University of Southampton, 2005;
- [42] "Fundamentals of Fiber Bragg Grating (FBG) Optical Sensing", 2016, <http://www.ni.com/white-paper/11821/en/>;
- [43] P.C. Peng, J.H. Lin, H.Y. Tseng, S. Chi, Intensity and Wavelength-Division Multiplexing FBG Sensor System Using a Tunable Multiport Fiber Ring Laser, *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 16, No.1, January 2004;
- [44] HBM FiberSensing, <https://www.hbm.com/en/4596/what-is-a-fiber-bragg-grating/>;
- [45] M. Pakmehr, B. Moslehi, J. Costa, R.J. Black, V. Sotoudeh, A.R. Behbahani, A Review of Fiber Optic Networks for Turbine Engine Instrumentation Channel: Control, PHM, and Test Cell Applications, 50th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, Cleveland, OH, USA, 2014;
- [46] P. Ray, S. Saurabh, U. Srinivasan, B. Srinivasan, Fiber Bragg Grating-Based Vibration Sensing for Machine Prognostics, *E-Journal of Non Destructive Testing*, 2014;
- [47] Ibsen I-MON 256/512 High Speed Interrogation Monitor, <http://ibsen.com/products/interrogation-monitors/i-mon-high-speed/i-mon-256-512-high-speed/>;
- [48] Smart Fibres – Smart FBG Sensors, <https://www.smartfibres.com/FBG-sensors/>;
- [49] L. Wei, Z.D. Zhou, J. Huang, Y.G. Tan, FBG-based Non-contact Vibration Measurement and Experimental Study, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 14, No. 9, pp. 1577-1581, September 2013;
- [50] S.J. Mihailov, Fiber Bragg Grating Sensors for Harsh Environments, *Sensors*, Vol. 12, Issue 2, 2012, pp. 1898-1918;
- [51] D. Grobnic, S.J. Mihailov, C.W. Smelser, H. Ding, Sapphire fiber Bragg grating sensor made using femtosecond laser radiation for ultrahigh temperature applications, *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 16, Issue 11, pp. 2505-2507, 2004;
- [52] D. Grobnic, S.J. Mihailov, H. Ding, F. Bilodeau, C.W., Single and low order mode interrogation of a multimode sapphire fibre Bragg grating sensor with tapered fibres, *Measurement Science and Technology*, Vol. 17, No. 5, pp. 980-984, 2006;
- [53] M. Busch, W. Ecke, I. Latka, D. Fischer, R. Willsch, H. Bartelt, Inscription and characterization of Bragg gratings in single-crystal sapphire optical fibres for high-temperature sensor applications, *Measurement Science and Technology*, Vol. 20, No. 11, 115301, 2009;
- [54] I. Garcia, J. Zubia, G. Durana, G. Aldabaldetrek, M.A. Illarramendi, J. Villatoro, Optical Fiber Sensors for Aircraft Structural Health Monitoring, *Sensors*, Vol. 15, Issue 7, pp. 15494-15519, 2015;
- [55] M.G. Xu, J.L. Archmbault, L. Reekie, J.P. Dakin, Thermally-compensated bending gauge using surface-mounted fibre gratings, *International Journal of Optoelectronics*, Vol. 9, Issue 3, pp. 281–283, 1994;
- [56] F.M. Haran, J.K. Rew, P.D. Foote, A strain isolated fibre Bragg grating sensor for temperature compensation of fibre Bragg grating strain sensors, *Measurement Science and Technology*, Vol. 9, No. 8, pp. 1163–1166, 1998;
- [57] M. Song, S.B. Lee, S.S. Choi, B. Lee, Simultaneous measurement of temperature and strain using two fibre Bragg gratings embedded in a glass tube, *Optical Fibre Technology*, Vol. 3, Issue 2, pp. 194–196, 1997;
- [58] H.J. Patrick, G.M. Williams, A.D. Kersey, J.R. Pedrazini, Hybrid fibre Bragg grating/long period fibre grating sensor for strain/temperature discrimination, *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 8, Issue 9, pp. 1223–1225, 1996;
- [59] M.G. Xu, J.L. Archmbault, L. Reekie, J.P. Dakin, Discrimination between strain and temperature effects using dual-wavelength fibre grating sensors, *Electronics Letters*, Vol. 30, Issue 13, pp. 1085–1087, 1994;
- [60] S.W. James, M.L. Dockney, R.P. Tatam, Simultaneous independent temperature and strain measurement using in-fibre Bragg grating sensors, *Electronics Letters*, Vol. 32, Issue 12, pp. 1133–1134, 1996;

- [61] M. Song, B. Lee, S.B. Lee, S.S. Choi, Interferometric temperature-insensitive strain measurement with different diameter fibre Bragg gratings, *Optics Letters*, Vol. 22, Issue 11, pp. 790–792, 1997;
- [62] J. Jung, H. Nam, J.H. Lee, N. Park, B. Lee, Simultaneous measurement of strain and temperature by use of a single Bragg grating and an erbium-doped fibre amplifier, *Applied Optics*, Vol. 38, Issue 13, pp. 2749–2751, 1999;
- [63] J. Jung, N. Park, B. Lee, Simultaneous measurement of strain and temperature by use of a single fiber Bragg grating written in an erbium: ytterbium-doped fiber, *Applied Optics*, Vol. 39, Issue 7, pp. 1118–1120, 2000;
- [64] J.R. Dunphy, G. Meltz, M. Varasi, A. Vannucci, M. Signorazzi, P. Ferraro, C. Voto, Embedded Optical Sensor Capable of Strain and Temperature Measurement using A Single Diffraction Grating, U.S. Patent No. 5, 399,854, 21 March 1995;
- [65] L.A. Ferreira, F. Farahi, F.M. Arau, Simultaneous measurement of strain and temperature using interferometrically interrogated fiber Bragg grating sensors, *Optical Engineering*, 39(8), pp. 2226–2234, 2000;
- [66] Y.L. Lo, C.P. Kuo, Packaging a fiber Bragg grating with metal coating for an athermal design, *Journal Lightwave Technology*, Vol. 21, Issue 5, pp. 1377–1383, 2003;
- [67] K. Tian, Y. Liu, Q. Wang, Temperature-independent fiber Bragg grating strain sensor using bimetal cantilever, *Optical Fiber Technology*, Vol. 11, Issue 4, pp. 370–377, 2005;
- [68] I. Moir, A. Seabridge, *Aircraft Systems*, Wiley, Chichester, 2008;
- [69] Rolls Royce, *The Jet Engine: Fifth Edition*, The Technical Publication Department: Rolls Royce, Derby, 1986;
- [70] G. Wild, Optical Fiber Bragg Grating Sensors Applied to Gas Turbine Engine Instrumentation and Monitoring, *Sensors Applications Symposium (SAS)*, 2013 IEEE, Galveston, TX, USA, pp. 188-192;
- [71] A. Othonos, K. Kalli, *Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing*, Artech House Optoelectronics Library, 1999;
- [72] P.R.N. Childs, J.R. Greenwood, C.A. Long, Review of temperature measurement, *Review of Scientific Instruments*, Vol. 71, pp. 2959-2978, 2000;
- [73] M. Willsch, T. Bosselmann, P. Flohr, R. Kull, W. Ecke, I. Latka, D. Fischer, T. Thiel, Design of fiber optical high temperature sensors for gas turbine monitoring, *Proceedings Vol. 7503 of SPIE International Conference on Optical Fibre Sensors, 75037R*, Edinburgh, UK, 2009;
- [74] R. Borek, A. Pool, *Basic Principles of Flight Test Instrumentation Engineering*, AGARD and RTO Flight Test Instrumentation Series AGARDograph 160 (AG 160), Vol. 1, Paris: North Atlantic Treaty Organization (NATO), Science and Technology Organization (STO), 1994;
- [75] F. Boden, N. Lawson, H.W. Jentik, J. Kompenhams, *Advanced In-Flight Measurement Techniques*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013;
- [76] N.J. Lawson, R. Correia, S.W. James, M. Partridge, S.E. Staines, J.E. Gautrey, K.P. Garry, J.C. Holt, R.P. Tatam, Development and application of optical fibre strain and pressure sensors for in-flight measurements, *Measurement Science Technolgy*, Vol. 27, No. 10, pp. 1-17, 2016;
- [77] R.M. Measures, *Structural Monitoring with Fiber Optic Technology*, Academic Press, 1st edition, New York, 2001;
- [78] J.R. Lee, C.Y. Ryu, B.Y. Koo, S.G. Kang, C.S. Hong, C.G. Kim, In-flight health monitoring of a subscale wing using a fiber Bragg grating sensor system, *Smart Materials and Structures*, Vol. 12, No. 1, pp. 147-155, 2003;
- [79] D. Betz, L. Staudigel, M.N. Trutzel, Test of a fiber Bragg grating sensor network for commercial aircraft structures, *15th Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest (OFS)*, Portland, OR, USA, pp. 55-58, 2002;
- [80] M.N. Trutzel, K. Wauer, D. Betz, L. Staudigel, O. Krumpholz, H.C. Muehlmann, T. Muellert, W. Gleine, Smart sensing of aviation structures with fiber-optic Bragg gratin sensors, *Proceedings Vol. 3986, Smart Structures and Materials 2000: Sensory Phenomena and Measurement Instrumentation for Smart Structures and Materials*, SPIE's 7th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials, Newport Beach, CA, USA, 2000;

- [81] I.K. Read, P.D. Foote, Sea and flight trials of optical fibre Bragg grating strain sensing systems, *Smart Materials and Structures*, Vol. 10, No. 5, 2001;
- [82] Y.J. Rao, Recent progress in fiber-optic extrinsic Fabry-Perot interferometric sensors, *Optical Fiber Technology*, Vol. 12, Issue 3, pp. 227-237, 2006;
- [83] D. Tosi, E.G. Macchi, G. Braschi, A. Cigada, M. Gallati, S. Rossi, S. Poeggel, G. Leen, E. Lewis, Fiber-optic combined FPI/FBG sensors for monitoring of radiofrequency thermal ablation of liver tumors: ex vivo experiments, *Applied Optics*, Vol. 53, Issue 10, pp. 2136-2144, 2014;
- [84] S. Ahmad Sharifian, D.R. Buttsworth, Evaluation of glued-diaphragm fibre optic pressure sensors in a shock tube, *Shock Waves*, Vol. 16, Issue 3, pp. 189-197, 2006;
- [85] M.J. Gander, W.N. MacPherson, J.S. Barton, R.L. Reuben, J.D.C. Jones, R. Stevens, K.S. Chana, S.J. Anderson, T.V. Jones, Embedded Micromachined Fiber-Optic Fabry-Perot Pressure Sensors in Aerodynamics Applications, *IEEE Sensors Journal*, Vol. 3, Issue 1, pp. 102-107, 2003;
- [86] W.J. Pulliam, P.M. Russler, R.S. Fielder, High-temperature high-bandwidth fiber optic MEMS pressure-sensor technology for turbine engine component testing, *SPIE Proceedings Vol. 4578, Fiber Optic Sensor Technology and Applications 2001*, pp. 343-352, 2002;
- [87] J. Xu, High Temperature High Bandwidth Fiber Optic Pressure Sensors, PhD Dissertation, Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, USA, 2005;
- [88] Y. Liu, A. Lacher, G. Wang, A. Purekar, M. Yu, Wireless fiber optic sensor system for strain and pressure measurements on a rotor blade, *Proceedings Vol. 6770, Fiber Optic Sensors and Applications V, Optics East 2007*, Boston, MA, USA, 2007;
- [89] A. Cipullo, G.L. Gruca, K. Heeck, F. De Filippis, D. Iannuzzi, A. Minardo, L. Zeni, Numerical study of a ferrule-top cantilever optical fiber sensor for wind-tunnel applications and comparison with experimental results, *Biophotonics and Microscopy, Sensors and Actuators A-Physical*, Vol. 178, pp. 17-25, 2012;
- [90] D. Goldsmith, J. Brusey, J. Shuttleworth, E. Gaura, R. Hazelden, M. Langley, Wireless instrumentation for aerospace applications – thermal monitoring for a gas turbine engine, *WiSIG Showcase*, Teddington, UK, deposited in CURVE August 2013;
- [91] X. Dai, K. Saslogou, R. Atkinson, J. Strong, I. Panella, L.Y. Cai, H. Mingding, A.C. Wei, I. Glover, J.E. Mitchell, W. Schiffers, P.S. Dutta, Wireless communication networks for gas turbine engine testing, *International Journal of Distributed Sensor Networks*, Vol. 2012;
- [92] H.H. Khalili, P.R. Green, D. George, G. Watson, W. Schiffers, *Wireless Sensor Networks for Monitoring Gas Turbine Engines During Development*, 2017 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC), Heraklion, Greece;
- [93] L. Wang, *Vibration Energy Harvesting by Magnetostrictive Material for Powering Wireless Sensors*, PhD Thesis, North Carolina State University, 2007;
- [94] Dibin Zhu, *Vibration Energy Harvesting: Machinery Vibration, Human Movement and Flow Induced Vibration*, Sustainable Energy Harvesting Technologies – Past, Present and Future, 2011, ISBN 978-953-307-438-2;
- [95] D. Zhu, S. Beeby, J. Tudor, N. Harris, A credit card sized self powered smart sensor node, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 169, No. 2, pp 317-325, ISSN 0924-4247, 2011;
- [96] S.M. Shahruz, Design of mechanical band-pass filters with large frequency bands for energy scavenging, *ScienceDirect Mechatronics*, Vol. 16, Issue 9, pp. 523-531, 2006;
- [97] *Piezoelectric Energy Harvesters*, Mide Voltare Technical Documentation, Rev. No 002, 2013
- [98] H. Madinei, H. Haddad Khodaparast, S. Adhikari, M.I. Friswell, M. Fazeli, Adaptive tuned piezoelectric MEMS vibration energy harvester using an electrostatic device, *The European Physical Journal Special Topics*, Vol. 224, Issue 14, pp. 2703-2717, 2015, doi:10.1140/epjst/e2015-02584-6
- [99] **C. Borzea, D. Comeagă, Adrian Stoicescu, C. Nechifor, Piezoelectric Harvester Performance Analysis for Vibrations Harnessing, UPB Scientific Bulletin, Series C**

(Electrical Engineering and Computer Science), Vol. 81, Issue 3, 2019, ISSN (print): 2286-3540 / (online): 2286-3559

[100] A. Stoicescu, M. Deaconu, R. D. Hritcu, C. V. Nechifor, V. A. Vilag, **Vibration Energy Harvesting Potential for Turbomachinery Applications, Aerospace Europe CEAS 2017 Conference, 16th-20th October 2017, Bucharest, Technical session Propulsion II; publicat în INCAS Bulletin Volume 10 Issue 1, March 2018;**

[101] LTC3588-1 – Nanopower Energy Harvesting Power Supply, ©Linear Technology Corporation 2010;

[102] Extras din Part 19 – Commission Decision C(2014)4995, http://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/wp/2014_2015/annexes/h2020-wp1415-annex-g-tr1_en.pdf

[103] T. Hwang, J. Rohl, K. Park, J. Hwang, K. H. Lee, K. Lee, S.-J. Lee, Y.-J. Kim, Development of HIL Systems for active Brake Control Systems, SICE-ICASE International Joint Conference, Busan, Korea, 2006;

[104] A. Cebi, L. Guvenc, M. Demirci, C. Karadeniz, K. Kanar, E. Guraslan, A low cost, portable engine electronic control unit hardware-in-the-loop test system, Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Dubrovnik, Croatia, 2005;

[105] J. Du, Y. Wang, C. Yang, H. Wang, Hardware-in-the-loop simulation approach to testing controller of sequential turbocharging system, Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics, Jinan, China, 2007;

[106] S. Mane, TATA Motors Builds HIL Test System for Hybrid Vehicle Simulation Using NI Tools, <http://sine.ni.com/cs/app/doc/p/id/cs-15770#>;

[107] J.C. Zagal, J. Ruiz-del-Solar, P. Vallejos, Back to reality: Crossing the reality gap in evolutionary robotics, IFAC Proceedings Volumes, Vol. 37, Issue 8, pp. 834-839, Elsevier Science Publishers B.V, 2004;

[108] J.C. Bongard, H. Lipson, Once More Unto the Breach: Automated Tuning of Robot Simulation using an Inverse Evolutionary Algorithm, Proceedings of the Ninth International Conference on Artificial Life (ALIFE IX), 2004;

[109] A.T. Al-Hammouri, L. Nordstrom, M. Chenine, L. Vanfretti, N. Honeth, R. Leelaruji, Virtualization of synchronized phasor measurement units within real-time simulators for smart grid applications, Power and Energy Society General Meeting, 2012 IEEE: 1–7;

[110] T. A. Johansen, T. I. Fossen, B. Vik, Hardware-in-the-loop testing of DP systems, Dynamic Positioning Conference, Houston, USA, 2005;

[111] DNV. Rules for classification of Ships, Part 7 Ch 1 Sec 7 I. Enhanced System Verification - SiO, 2010;

[112] M. Iriarte, Hardware-in-the-loop simulation testing for defense and aerospace systems, Military Embedded Systems, 2016, <http://mil-embedded.com/articles/hardware-in-the-loop-simulation-testing-defense-aerospace-systems/>;

[113] EMBRAER Performs Full Airplane Simulation Using NI HIL Tools, <http://sine.ni.com/cs/app/doc/p/id/cs-13803>;

[114] EMBRAER Performs Full Airplane Simulation Using NI HIL Tools, <https://www.youtube.com/watch?v=m9aYsAyp5ns>;

[115] M. Montazeri-Gh, M. Nasiri, S. Jafari, Real-time multi-rate HIL simulation platform for evaluation of a jet engine fuel controller, Simulation Modelling Practice and Theory, 19, 996–1006, 2019;

[116] W. Bao, Y.F. Sui, Z.M. Liu, J.F. Liu, Design and realization of hardware-in-the-loop simulation for turbofan engine, Journal of System Simulation, 18(6), pp. 603–615, 2006;

[117] C. Duan, S. Xie, K. Cai, Hardware-in-the-loop simulation of a turbofan aeroengine control system, Journal of Propulsion Technology Beijing, 26(143), p. 434, 2005;

[118] https://www.mathworks.com/company/user_stories/cessna-enhances-antiskid-technology-with-hardware-in-the-loop-testing.html

[119] A. Watanabe, S.M. Olcmen, R.P. Leland, K.W. Whitaker, L.C. Trevino, C. Nott, Soft computing applications on a SR-30 turbojet engine, 1st AIAA Intelligent Systems Technical Conference Chicago, IN, USA, Sep 20-22 2004, Fuzzy Sets and Systems, 2006;

Optimizarea și controlul sistemelor electrice destinate automatizării unui stand de încercări pentru propulsie spațială

[120] J. Bals, G. Hofer, A. Pfeiffer, C. Schallert, Virtual Iron Bird – A Multidisciplinary Modelling and Simulation Platform for New Aircraft System Architectures, DGLR Jahrestagung, Friedrichshafen Germany, September 2005;

[121] L. F. Faleiro, Power Optimised Aircraft – The Future of Aircraft Systems, AIAA/ICAS International Air and Space Symposium and Exposition: The Next 100 years, Dayton, Ohio, USA, 2003;

[122] **A. Stoicescu, R. Ciobanu, A. Taranu, C. Nechifor, F. Niculescu, “Hardware in the Loop Test Platform Concept for Adaptive Turbine Engine Controller”, TURBO Scientific Journal, Vol. VI (2019) No. 2, ISSN 2559-608X**