



**Universitatea Națională de Știință și
Tehnologie Politehnica București**
Școala Doctorală De Inginerie Electrică



**STUDII PRIVIND OPTIMIZAREA SISTEMELOR DE
AUTOMATIZARE PENTRU TURBOMAȘINI ȘI
ELECTROCOMPRESOARE CU ȘURUB**

REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT

Doctorand: Ing. Cristian Valentin NECHIFOR

Conducător de doctorat: Prof.univ.Dr.-Ing. Valentin Năvrăpescu
Universitatea Națională de Știință și Tehnologie Politehnica București
Academia Oamenilor de Știință din România

BUCUREȘTI 2023

CUPRINS

CUPRINS	1
Lista abrevierilor.....	2
1. Introducere.....	5
2. Analiza funcționării turbomasinilor și metodelor de control ale acestora.....	5
2.1 Instrumentație virtuală	6
2.1.1 Instrumentul Virtual	6
2.1.2 Componentele hardware	6
2.1.3 Instrumente virtuale unitare – plăci de intrare / ieșire (achiziție).....	7
2.1.4 Protocolul USB și plăcile multifuncționale de achiziție de date cu interfață USB	7
2.1.5 Limbajele de programare grafică.....	7
2.1.6 Software și Hardware-in-the-Loop; VeriStand și LabVIEW – date generale	7
2.2 Senzori inteligenți și tehnologii de monitorizare existente pentru turbomașini și unități de comprimare gaz.....	8
2.2.1 Prezentarea situației mondiale actuale privind instrumentarea pentru mașinile paletate și unitățile de comprimare.....	8
2.2.2 Monitorizarea temperaturii	8
2.2.3 Monitorizarea presiunii	9
2.2.4 Monitorizarea debitului	9
2.2.5. Monitorizarea vibrațiilor	9
3. Realizarea unui sistem de automatizare și utilizarea PLC-urilor pentru un ansamblu industrial de comprimare - decomprimare (expander) gaz.....	11
3.1 Dulapurile de forță ale expanderului și compresorului.....	15
3.1.1 Softstarterul pentru pornirea generatorului asincron trifazat al expanderului..	17
3.1.2 Etapele de execuție ale dulapului de forță al expanderului	18
3.1.3 Stabilirea și descrierea regimurilor de funcționare ale expanderului cu mașina asincronă trifazată ~132 kW	18
3.1.4 Programarea softstarterului.....	19
3.2 Dulapul de automatizare	19
3.2.1 Descrierea rolului și funcționării PLC-ului	19
3.2.2 Funcționarea expanderului condus de Sistemul de Reglare, Comandă și Control realizat cu PLC	20

3.2.3 Programare PLC-uri stație CAES.....	20
2.2.4 Programare PLC compresor	21
3.2.5 Stările de funcționare ale expanderului	22
3.3 Probe pe banc cu expanderul	22
4. Studiu de caz: Optimizarea controlului vanei de aspirație a unităților de comprimare gaz	23
4.1 Definierea configurației funcționale	23
4.2 Sistem mecanic de determinare și confirmare a poziției de lucru	24
4.3 Transmisia informației de poziție a vanei la distanță folosind un potențiomtru multitur.....	25
4.4 Citirea informației oferite de către potențiomtru	26
4.5 Soluția propusă din punct de vedere al automatizării	26
4.6 Realizare teste funcționale	29
4.7 Soluția personală pentru a reduce oscilațiile de poziție ale vanei.....	33
5. Pornire ECS În condiții de presiune ridicată, fără intervenții hardware.....	35
6. Concluzii Și contribuții proprii.....	39
6.1 Contributii proprii	39
6.2 Perspective de dezvoltări ulterioare	41
6.3 Lista lucrărilor originale	42
6.4 Lista lucrărilor din afara ariei de cercetare a tezei	43
7. Bibliografie Selectiva	43

LISTA ABREVIERILOR

ANN – Artificial Neural Networks

ATEX - ATmosphere EXplosible

AC - Alternating current

BDV – Blow Down Valve

CAD - Computer-Aided Design

CMOS - Complementary Metal-Oxide-Semiconductor

DA1 - Dulap de automatizare compresor

DA2 - Dulap de automatizare expander

DAQ - Data acquisition

DC - Direct Current
DF1 - Dulap de forță compresor
DF2 - Dulap de forță expander
ECS - Electrocompresor
EEC - Electronic Engine Controller
EMC - Electromagnetic Compatibility
ESD - Emergency ShutDown Systems
FADEC - Full Authority Digital Electronic Controller
FDI - Fault Detection and Isolation
G2P - Gas to Power
GE - General ELeCtric
GPIB - General Purpose Interface Bus
HMI - Human-Machine Interface
IBM - International Business Machines
IFCS - Intelligent Flight Control Systems
LCD - Liquid-crystal display
MOV - Motor Operated Valve
NASA - National Aeronautics and Space Administration
PCI - Peripheral Component Interconnect
PCMCIA - Personal Computer Memory Card International Association
PID - Proportional Integral Derivative
PLC - Programmable Logic Controller
PDA - Personal digital assistant
PNS - Prelucrarea Numerică a Semnalelor
PME - Proficy Machine Edition
PXI - PCI eXtensions for Instrumentation
RTD – Resistance Temperature Detector
SDV – Shut Down Valve
SRCC - Electromagnetic Compatibility
SCR - Selective Catalytic Reduction
USAF - United States Air Force

UNIX - Uniplexed Information and computing system

USB - Universal Serial Bus

VA - Vlot Amper

VCC - Volti curent continu

VI - Virtual Instrument

VME - VERSA-Module Euro card Bus

1. INTRODUCERE

Obiectivul principal al tezei, este cercetarea de metode prin care să se ridice nivelul tehnologic și performanța sistemelor de control pentru turbomașini și sistemelor de comprimare produse în România de către INCD Turbomotoare COMOTI, un accent important punându-se pe performanța unui sistem de reglare automat sau asistat de către operator.

În acest scop, s-a parcurs și s-a aprofundat trei direcții și anume aprofundarea strategiilor de control și cercetarea posibilităților de îmbunătățire, cercetarea de instrumentare inovativă, studiul avansului tehnologic al comunicațiilor de date în aplicațiile cu mașini rotative controlate de un PLC.

Fiecare direcție conține, la rândul ei, un număr de activități de cercetare care abordează etapizat aceste tematici, atât de sine stătător, cât și interconectate. Se pune un accent important pe performanța unui sistem de reglare automat folosit pentru comandă și control. Voi avea în vedere și voi încerca prefigurarea unor ansamble hardware-software îmbunătățite, care să se plezească pe rezultatele cercetărilor și simulărilor din cadrul proiectului.

Au fost identificate sistemele de automatizare existente pentru controlul turbomașinilor și a sistemelor de comprimare gaz. Se diferențiază diferitele strategii de control în funcție de tipul și destinația acestora. Turbomașinile trebuie să atingă nivele ridicate de randament. Se prezintă criteriile de eficientizare și optimizare în ciclul de control, din diferite puncte de vedere: turație, temperatură, presiuni, vibrații, etc.

S-a urmărit conturarea unui sistem fundamental de automatizare pentru control și comandă. Acesta va constitui un punct de plecare pentru elaborarea sistemelor finale de control și comandă inteligente alături de automatizarea instalațiilor.

2. ANALIZA FUNCȚIONĂRII TURBOMASINILOR ȘI METODELOR DE CONTROL ALE ACESTORA

Primele modele de turbomașini utilizate în industria aeronautică au avut la bază un concept de compresor centrifugal (Fig. 1. Model generalist al unui turbomotor ce utilizează compresor centrifugal. Cca. 1943 Germania [1]). Dispozitivul de admisie, turbina de forță și alte agregate ale acestor tipuri de turbomotoare au început să fie optimizate în jurul anilor 1942-1944 de către Luftwaffe, în Germania cu implementarea pe aeronave de vânătoare tip Messerschmitt ME 262, cu zbor inaugural la data de 18 Iulie 1942 în Germania.

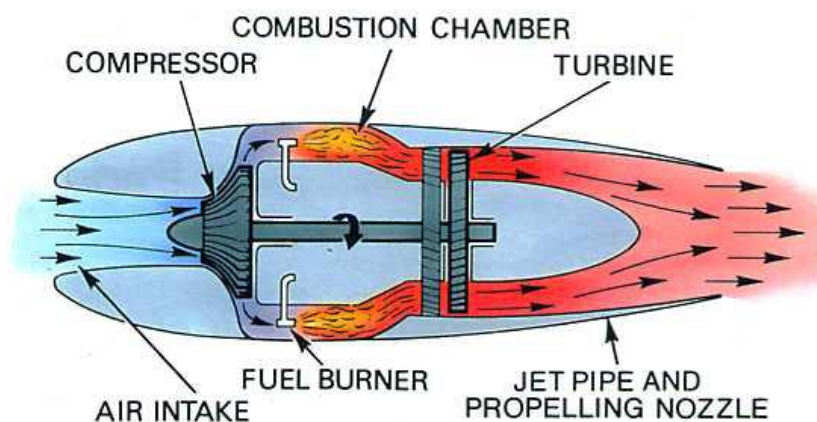


Fig. 1. Model generalist al unui turbomotor ce utilizează compresor centrifugal. Cca. 1943 Germania [1]

Turbomotoarele din ziua de astăzi sunt fiabile și de încredere, dar sunt scumpe de operat și de întreținut. Cu integrarea modelelor disponibile și a algoritmilor de control, precum și cu creșterea inteligenței în sistemele de control, există perspectiva ca motoarele să poată fi operate mai sigur și mai fiabil cu costuri reduse ale ciclului de viață [2], [3].

2.1 Instrumentație virtuală

2.1.1 Instrumentul Virtual

Conform definiției, termenul de instrument de măsură se referă la „sistem tehnic pentru cercetarea, observarea, măsurarea sau controlul unor mărimi”. Această definiție nu face o distincție între instrumentul real și cel virtual. Din acest motiv, am ales să prezint în această parte o definiție extinsă asupra a ceea ce este și a ceea ce nu este un instrument virtual. Este știut faptul că denumirea de „virtual” vine din faptul că acest tip de instrument este capabil să ofere mai multe informații decât cele disponibile direct de la echipamentele fizice pe care acesta le gestionează. Aceasta înseamnă că un instrument virtual nu are în alcătuire doar părți fizice, tehnice (echipamente, instrumente dispozitive de măsură și control etc.) dar și componente software. Totuși unele echipamente cum ar fi analizoarele de rețea, sau unele multimetre din gama celor de vârf au în componență atât elemente software cât și componente fizice, hardware, dar nu sunt categorisite ca fiind instrumente virtuale. Acest lucru se datorează faptului că, conceptul de instrument virtual mai sus menționat nu este îndeplinit: aceste instrumente pot face doar teste pentru care au fost concepute să fie utilizate. Așadar un instrument virtual este mai mult decât un sistem compus din componente fizice și programe care să le gestioneze pe acestea.

2.1.2 Componentele hardware

Instrumentele virtuale combină dezvoltarea rapidă a programelor cu elementele hardware modulare și flexibile pentru a crea un sistem de măsurare definit de utilizator. Principalul concept al instrumentelor virtuale este legat de utilizarea tehnicii de calcul pentru a efectua teste și măsurători incluzând elemente de hardware de uz general și programe specializate. Prin utilizarea de programe diferite se va permite efectuarea de teste și măsurători diferite cu același sistem.

2.1.3 Instrumente virtuale unitare – plăci de intrare / ieșire (achiziție)

Sistemele de achiziție de date, așa după cum spune și numele sunt în principal sisteme care se folosesc la colectarea informațiilor pentru a realiza o măsurătoare sau pentru a analiza un fenomen. Odată cu evoluția tehnologiei, achiziția de date a devenit din ce în ce mai precisă, accesibilă mai multor domenii și cu rezultate de încredere. Una din componentele cele mai reprezentative este placa multifuncțională de intrare / ieșire (multifunction I/O board MIOB) [5], [6] care a fost proiectată astfel încât să răspundă cerințelor sistemelor de instrumentație virtuală (SIV) oferind multiple modalități de măsurare.

2.1.4 Protocolul USB și plăcile multifuncționale de achiziție de date cu interfață USB

Standardul de comunicare USB (Universal Serial Bus) [7] a fost introdus în 1995 pentru a rezolva o serie de probleme de conectivitate asociate cu standardul de comunicare serială existent. Interfața USB acceptă multiple dispozitive, asigură o instalare mai ușoară a acestora, are viteză de transfer a datelor mai mare și cerințe de cablare mult mai simple față de cele pentru porturile seriale sau paralele. Portul USB a fost conceput astfel încât să poată asigura un minim necesar de energie pentru elementele cuplate astfel încât să nu mai fie necesare surse de alimentare externe pentru dispozitivele cuplate la calculator prin acest port de date.

2.1.5 Limbajele de programare grafică

Un limbaj de programare grafică este un limbaj vizual de programare prin care programatorii nu folosesc linii de cod pentru a descrie o procedură sau un program ci sunt concepute astfel încât aceștia să manipuleze elemente grafice într-o fereastră, elemente ce se conectează într-un mod intuitiv și logic pentru a realiza diferite aplicații.

2.1.6 Software și Hardware-in-the-Loop; VeriStand și LabVIEW – date generale

LabVIEW este un mediu de programare grafică dezvoltat de National Instruments [8], [9]. Acest limbaj permite ca rutine complexe să fie concepute și programate prin diagrame bloc. În prezent, LabView-ul este cel mai utilizat mediu de programare pentru dezvoltarea de instrumente virtuale cu aplicații pentru calculatoare, PDA-uri, dispozitive de timp real, etc. Limbajul LabVIEW folosește descrieri grafice ale elementelor componente care arată ca cele de pe instrumentele reale, iar pentru programarea intrărilor, ieșirilor și a elementelor de calcul și de legătură în program, se folosesc reprezentări grafice ale acestor elemente numite noduri, care conectate împreună realizează funcțiile programului. LabVIEW este compatibil cu mai multe sisteme de operare precum Windows, Linux și cu platformele Macintosh. Programele dezvoltate în LabVIEW mai sunt numite VI-uri (prescurtarea de la virtual instrument). SubVI-urile sunt subrutine care pot fi apelate din alte programe. Acest fapt face ca programarea ierarhică și modulară să fie foarte ușor de implementat în acest limbaj.

2.2 Senzori inteligenți și tehnologii de monitorizare existente pentru turbomașini și unități de comprimare gaz

În acest subcapitol, am evidențiat modul de funcționare și importanța, atât a senzorilor clasici cât și a celor inovativi, în exploatarea și creșterea duratei de viață a unui ansamblu ce conține o turbomașină sau o mașină paletată. S-au reliefat modurile de funcționare a senzorilor clasici folosiți în mod uzual pentru instrumentarea turbomașinilor sau mașinilor paletate, dar și tendințele existente în ceea ce privește introducerea unor tehnologii noi în măsurarea și transmiterea semnalelor aplicabile acestora. În raportul semestrial sunt subliniate avantajele abordării unei astfel de instrumentații. Astfel, traductoarele cu fibră optică prezintă interes datorită imperturbabilității electromagnetice a acestora. Traductoarele cu transmisie wireless au o viteză de transmisie a datelor mare și contribuie totodată la reducerea materialelor folosite și nu în ultimul rând senzorii cu performanță ridicată datorită preciziei de măsură.

2.2.1 Prezentarea situației mondiale actuale privind instrumentarea pentru mașinile paletate și unitățile de comprimare

Turbomașinile de astăzi sunt suficient de fiabile și de încredere, însă acestea au un cost ridicat și nu sunt foarte ușor de operat sau de întreținut. Prin implementarea unor modele disponibile și a anumitor algoritmi de control, dar totodată și cu creșterea inteligenței pentru sistemele de comandă și control, apare perspectiva ca motoarele să poată fi operate mai sigur și mai fiabil, fără costuri ridicate în ciclul acestora de viață [10],[11].

Achiziția de date sau înregistrarea informațiilor provenite de la elementele de monitorizare, reprezintă modul prin care fenomenele fizice sunt transformate în semnale electrice de către anumite instrumente speciale ulterior convertite în semnale digitale ce pot fi procesate și stocate de către un PLC sau computer. Sistemul pentru achiziții de date este proiectat pentru a achiziționa date și pentru a putea lua decizii asupra lor. Acest proces poate fi controlat cu ajutorul unor dispozitive de control, precum actuatori sau relee, care acționează pe baza semnalelor digitale în tensiune sau curent.

2.2.2 Monitorizarea temperaturii

Instrumentele utilizate pentru măsurarea temperaturii pot fi împărțite în mai multe categorii, în funcție de principiul de operare. Senzorii de temperatură utilizați de obicei pentru turbomașini se bazează în principal pe efectul termoelectric (termocupluri), sau pe modificarea rezistenței (termorezistențe).

Termocuplurile sunt cei mai populari senzori de temperatură, fiind eficiente în aplicații cu temperaturi ce variază în limite largi. Nu sunt costisitoare și au un timp de răspuns de câteva fracțiuni de secundă, însă datorită proprietăților materialelor și altor factori, este greu de obținut o precizie de măsurare mai mică de 1°C [12].

Termorezistențele - Termometrele rezistive, cunoscute și ca termorezistențe (eng. RTD – Resistance Temperature Detector) se bazează pe principiul că rezistența electrică a unui metal

crește odată cu creșterea temperaturii, fenomen cunoscut ca rezistivitate termică. Prin urmare, temperatura măsurată poate fi dedusă prin măsurarea rezistenței elementului RTD. Relația dintre modificarea rezistenței unei RTD în funcție de temperatură este numită coeficient de temperatură al rezistenței (eng. TCR – Temperature Coefficient of Resistance) [13].

2.2.3 Monitorizarea presiunii

Măsurarea presiunii este o cerință foarte comună pentru majoritatea sistemelor de control al proceselor și este de o importanță crucială pentru compresoare, unde în fiecare moment trebuie cunoscută valoarea presiunii procesului de comprimare și este necesară menținerea unei presiuni constante.

Senzori de presiune cu diafragmă constituie unul dintre cele trei tipuri de senzori cu element elastic, alături de senzorii cu burduf și senzorii cu tub Bourdon. În cazul celor dintâi, presiunea este măsurată la elementul senzorului prin deformarea unei diafragme. Prin alimentarea cu energie electrică, deformarea diafragmei este convertită într-un semnal electric de ieșire proporțional cu presiunea măsurată, care este amplificat și standardizat.

2.2.4 Monitorizarea debitului

Rata de curgere a unui fluid printr-o conductă închisă poate fi cuantificată fie prin măsurarea debitului masic, fie prin măsurarea debitului volumic. Dintre aceste două variante, măsurarea debitului masic este cea mai precisă, deoarece masa, spre deosebire de volum, este invariabilă. Totuși, debitul volumic reprezintă o metodă adecvată pentru cuantificarea substanțelor aflate în formă gazoasă, lichidă sau semi-lichidă cu particule în suspensie, chiar dacă precizia de măsurare este inferioară măsurării debitului masic [15].

2.2.5. Monitorizarea vibrațiilor

Vibrațiile sunt foarte des întâlnite în funcționarea instalațiilor, ca urmare măsurarea accelerațiilor asociate acestor vibrații este extrem de importantă în mediile industriale. Vibrațiile constau în mod normal într-o mișcare armonică liniară. Atât frecvența de oscilație, cât și deplasările față de punctul de echilibru au tendința de a varia foarte aleatoriu [14].

Utilizarea **accelerometrelor piezoelectrice** este o măsură de protecție, datorită faptului că cele mai comune defecțiuni ale turbomașinilor își au originea la nivelul rotorului, rezultând intensificări ale vibrațiilor rotorului. Măsurarea se face pe trei axe, în direcție orizontală, verticală și axială, iar pentru eficiență, mașina trebuie să transmită cu exactitate o cantitate semnificativă din vibrația rotorului în lagăre sau carcasă, sau mai precis în locul unde este montat senzorul.

În articolele „**Vibration Energy Harvesting Potential for Turbomachinery Applications**” [15] și „**Wireless Vibration Harvesting System For Turbine Engines**” [16] unde am fost unul dintre autori, am prezentat metode de recoltare a energiei provenită din vibrația echipamentelor. Recoltarea energiei este procesul prin care energia este captată din sursele de vibrații, cum ar fi mașinile rotative și transformată în energie electrică. Chiar dacă energia de vibrație a unei mașini care funcționează normal este scăzută, la momentul acela am luat în

considerare utilizarea acesteia la alimentarea anumitor dispozitive electronice cu consum redus. Puterea generată a depins de masa inerțială, factorul de amortizare, frecvența de rezonanță, amplitudinea și frecvența vibrației sursei.

Atât în industria aerospațială, cât și la turbomașinile industriale sau testate la sol, inovațiile sunt studiate cu scopul de a economisi și reutiliza energia produsă. Aspectele prezentate în articole se pot plia și pe alte elemente care produc vibrații în regimuri de funcționare normală cum ar fi unitățile de comprimare produse de INCD Turbomotoare COMOTI [16].

Pentru articolul „**Piezoelectric Harvester Performance Analysis For Vibrations Harnessing**” [17], am participat activ la testarea unei serii de echipamente piezoelectrice. Testele au fost efectuate cu o masă de vibrații, condusă de o funcție de baleiaj generată de analizorul de impedanță (SR785). Acest lucru a fost realizat prin conectarea ieșirii la un contor de vibrații proiectat pentru senzori piezoelectrice. Vibrațiile de intrare au fost monitorizate folosind un accelerometru de calibrare exact, montat pe masa de vibrații.

La setul de teste numărul unu, dispozitivul piezoelectric din Fig. 2, a fost montat cu șuruburi pe platforma mesei de vibrații. Rezultatele au arătat un vârf de tensiune de $428,7 \text{ mV}/(\text{m}/\text{s}^2)$, care a apărut la frecvența de rezonanță de $205,25 \text{ Hz}$ (corespunzător la $4,40 \text{ V}/\text{g}$). La acest set pe latura opusă a unității piezoelectrice, au fost adăugate contragreutăți, pentru a amplifica mișcarea de vibrație a unității.

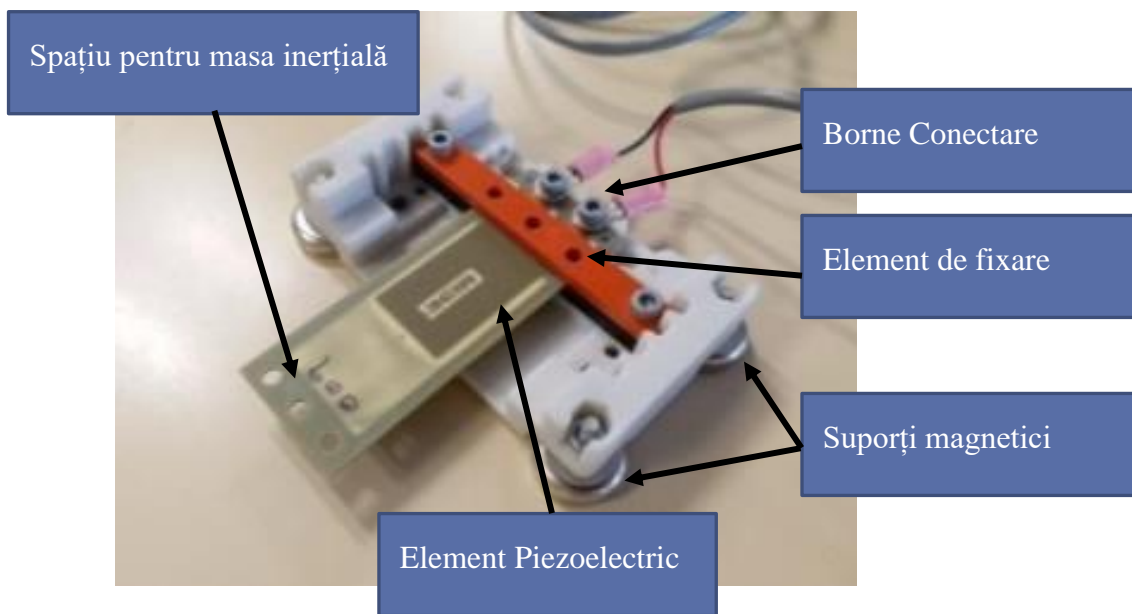


Fig. 2 - Unitate Piezoelectrică împreună cu suportul de prindere și fixare

Pentru un alt set de teste, am efectuat încercările fără rezistență suplimentară, prin conectarea ieșirii elementului piezoelectric direct la analizorul de semnal, fără a mai utiliza contorul de vibrații. Am constatat că avem în continuare căderi și pierderi de tensiune, iar ele păreau datorita impedanței mari de intrare a analizorului de $1 \text{ M}\Omega$, a rezistențelor cablurilor și a conectorilor, prin urmare traductorul nu funcționează bine în lipsa de sarcinii. O tensiune de vârf de $358,8 \text{ mV}/(\text{m}/\text{s}^2)$ a fost înregistrată la frecvența de rezonanță de $203,65 \text{ Hz}$ ($3,52 \text{ V}/\text{g}$ sau $\sim 3,17 \text{ V}$ la $0,9 \text{ g}$). Frecvența

măsurată este cu 2,4 Hz mai mică decât anterior, deoarece rezistența electrică are efect de amortizare. La acest set de testare, contragreutățile au fost eliminate.

Concluziile se regăsesc pe larg în articolele amintite. Dar este de punctat faptul că aceste dispozitive piezoelectrice, care pot recupera energie din vibrații, se pot adăuga în orice sistem modern de automatizare, pentru producere de energie suplimentară ce poate fi încărcată în acumulatori care alimentează traductori nevitale ai echipamentului.

3. REALIZAREA UNUI SISTEM DE AUTOMATIZARE ȘI UTILIZAREA PLC-URILOR PENTRU UN ANSAMBLU INDUSTRIAL DE COMPRIMARE - DECOMPRIMARE (EXPANDER) GAZ

În continuare, am urmărit etapele de realizare a unui sistem complex de automatizare a unui ansamblu de două compresoare și un spațiu de stocare a gazului, care, în urma decomprimării va genera energie electrică. **Am participat la acest proiect împreună cu echipa de cercetători ai secției de Instalații electrice și automatizări, din cadrul INCD Turbomotoare COMOTI, atât la alegerea echipamentelor, cât și la propunerea ecranelor grafice prezente în HMI.**

Instalațiile de stocare a energiei în aer comprimat (CAES) sunt utilizate pentru stocarea energiei electrice, sub formă de energie potențială din aer comprimat. Căldura generată în timpul compresiei poate fi stocată pentru a îmbunătăți eficiența ciclului de compresie-expansiune. Soluția prezentată constă într-un compresor cu șurub de 100 kW antrenat de un motor trifazat asincron de 110 kW. Compresorul furnizează aer în vasele care îl stochează până când apare o cerere mare de energie electrică. În acel moment, aerul comprimat este eliberat într-un „expansor” cu șurub de 110 kW al cărui arbore învârte un generator asincron de 132 kW, producând energie electrică și furnizând-o în rețeaua electrică. Înainte de expansiune, aerul trebuie preîncălzit pentru a evita înghețarea echipamentelor de expansiune. Dacă căldura generată în timpul compresiei este utilizată pentru preîncălzirea aerului înainte de expansiune, procesul este adiabatic. Puterea maximă de produs a fost calculată a fi în jur de 100 kW. În timpul testelor de punere în funcțiune a expanderelor cu alimentare cu aer de la un compresor de înaltă presiune (CHP – Compresor de Înaltă Presiune) de 250 kW, a fost atinsă o putere maximă generată de 49,7 kW, estimată a fi mai mare la eliberarea aerului din rezervoare. O parte a acestui proiect, a fost sintetizat în articolul „**Compressed Air Energy Storage Installation for Renewable Energy Generation**” [18], la care am participat ca autor.

În Fig. 3 avem elementele: 1 – Dulapul de automatizare a compresorului, 2 – Motorul electric de 110 kW al compresorului, 3 – Unitatea de comprimare aer, 4 – Dulapul de automatizare al expanderului, 5 – Motorul de 132 kW al expanderului, 6 – Unitatea Expander, 7 – Pompa de ulei, 8 – Pompa de ulei, 9 – Vana fluture, 10 – Vana Fluture, 11 – Unitatea de stocare aer comprimat.

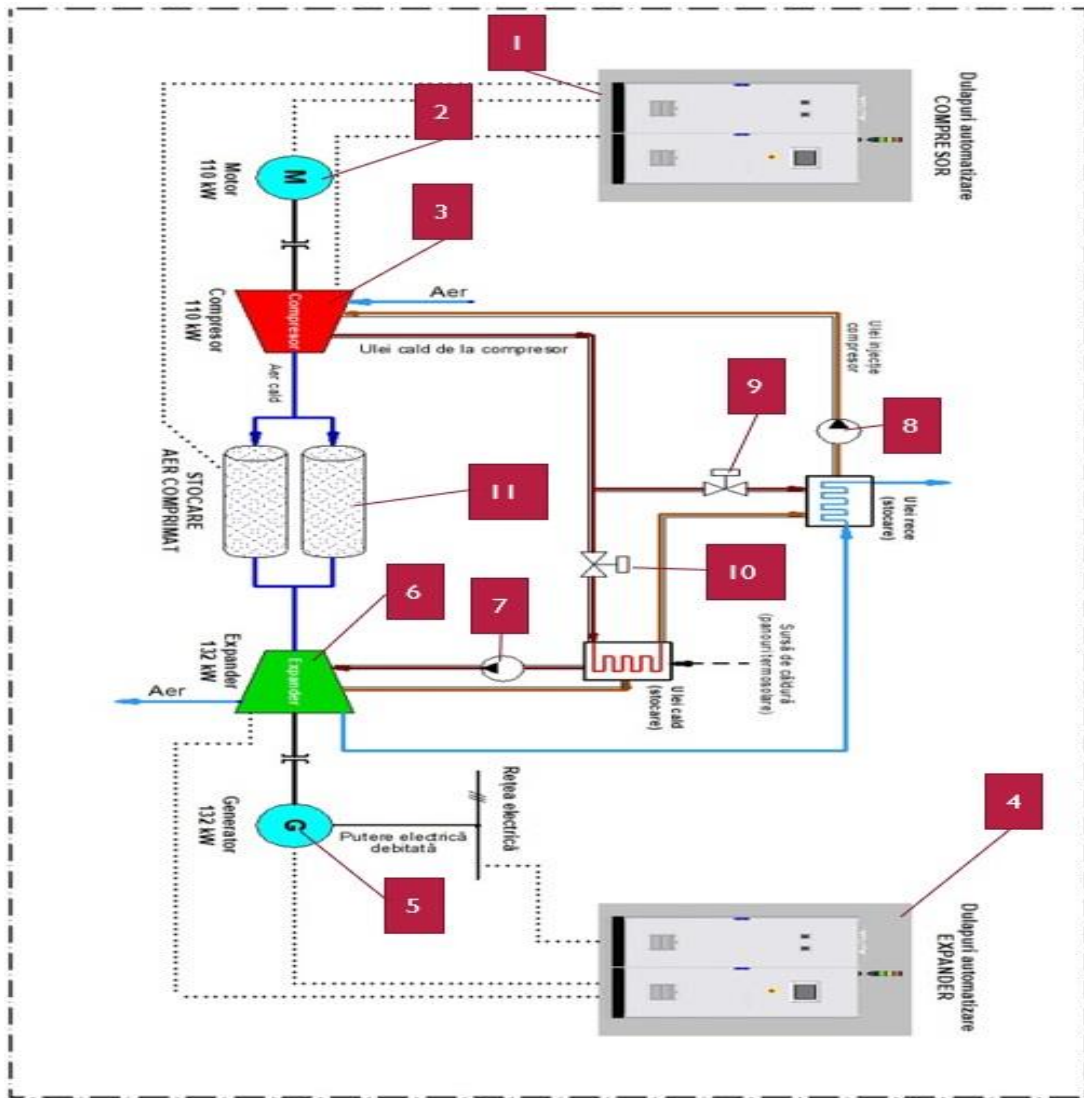


Fig. 3 - Schema bloc a instalației ROCAES cu automatizare proces

Instalația de stocare a energiei din aer comprimat ROCAES are ca elemente principale un compresor și un expander. Compresorul asigură pomparea aerului într-un rezervor de stocare, iar expanderul utilizează destinderea aerului și antrenează un generator pentru debitarea energiei electrice în rețea.

Sistemul de Reglare, Comandă și Control al instalației constă din 4 dulapuri, 2 dulapuri de automatizare și 2 dulapuri de forță: DA1, DF1 (compresor + stocare aer) și DA2, DF2 (expander). Dulapurile expanderului au fost deja executate și puse în funcțiune, fiind făcute și probe pe banc, în urma cărora s-a constatat buna funcționare a sistemului de automatizare [18]. În Fig. 3, este prezentată schema bloc a proiectului ROCAES. Atât asamblarea echipamentelor cât și realizarea testelor de funcționare prezentate în lucrare s-a făcut în hala de producție din cadrul INCD Turbomotoare COMOTI.

În cazul compresorului, mașina asincronă va avea rolul de antrenare, funcționând în regim de motor alimentat de la rețeaua de energie electrică. Cea de la expander va funcționa în regim de generator electric, care va fi antrenată de aerul comprimat și va debita putere electrică.

Rotorul accelerează, tinzând ideal spre turația de sincronism, la care cuplul ideal este 0. Totuși, în practică, rotorul atinge o viteză de rotație mai mică decât cea a câmpului magnetic statoric. Această diferență dintre viteza câmpului magnetic statoric și cel rotoric este numită alunecare. Alunecarea reprezintă o mărime caracteristică mașinii asincrone, fiind egală cu raportul dintre viteza relativă și viteza de sincronism.

Spre deosebire mașina sincronă, cea asincronă oferă pentru sistemul ROCAES avantaje.

S-a reglat valorile tensiunilor electromotoare induse în fazele statorului, pentru ca acestea să devină egale cu valoarea eficace a tensiunii rețelei. Acest lucru se realizează prin acționarea asupra mașinii de antrenare (expander) în sensul reglării turației prin varierea cantității de gaz introdus. Diferența foarte mică de frecvență ce există între tensiunile rețelei și tensiunile electromotoare create de generator se concretizează într-o variație lentă a defazajului între cele două sisteme de tensiuni.

S-a realizat conectarea în paralel în momentul în care cele două sisteme de tensiuni sunt în fază. Aceasta înseamnă să se închidă întreruptorul prin care generatorul se conectează la rețea, în momentul în care diferențele de potențial între bornele contactelor întreruptorului sunt nule. Închiderea acestuia nu va determina așadar apariția unui curent.

Atunci când s-au îndeplinit aceste condiții, se va acționa butonul „sincronizare” din PLC.

Singurul dezavantaj al mașinii asincrone este acela că pentru funcționarea ei este necesară o putere reactivă, pe care trebuie să o preia de la rețea sau de la o sursă de energie reactiv (baterii de condensatoare, compensatoare sincrone), în timpul funcționării existând un schimb continuu, oscilant, între mașină și rețea.

Generatorul asincron excitat de la rețea, are zona de funcționare în domeniul alunecărilor negative. Acest regim se obține dacă mașina asincronă cuplată la rețea, ce funcționează în regim de motor este antrenată printr-un mijloc oarecare peste viteza de sincronism. Semnul curenților este dat de semnul numărătorului pentru valori negative ale alunecării. Se constată că valoarea componentei reactive își menține semnul neschimbat iar componenta activă își schimbă semnul. Același efect se manifestă și în stator. Indiferent de mărimea vitezei, fluxul de magnetizare este creat de componenta reactivă absorbită din rețea sau de la capacitanța adăugată, generatorul asincron numindu-se și cu excitație independentă [19].

Pornirea mașinilor electrice asincrone trifazate

La pornirea motoarelor asincrone trifazate, trebuie asigurată o anumită valoare a cuplului de pornire care să învingă cuplul rezistent și în același timp valoarea curentului de pornire este limitată până la $4 \div 7$ ori valoarea curentului nominal pentru a nu produce variații mari de tensiune în rețea și a nu perturba funcționarea consumatorilor conectați la rețeaua respectivă.

Astfel, **am ales ca pornirea mașinilor asincrone să se facă cu ajutorul a două softstartere** tip S811+T18N3S de la firma Synergy, unul pentru compresor, celălalt pentru expander. Reducerea costurilor totale ale sistemului de alimentare prin utilizarea softstarterelor este posibilă datorită faptului că nu este necesară reglarea turației printr-un convertizor de frecvență, instalația generând la putere nominală (aer comprimat, sau energie electrică).

Ținând seama că instalația este amplasată în exterior, aceasta poate fi afectată de solicitări atmosferice de supratensiune (descărcări electrice). Astfel, pe lângă elementele vitale de împământare, se pot introduce și elemente de protecție la supratensiune (eng. surge protection). Acest fapt nu a fost prevăzut în proiectul inițial, **dar am sugerat ulterior să se țină seama de el.**

Puterea reactivă poate fi compensată prin reactanțe capacitive. În acest scop, a fost prevăzută o baterie de condensatoare (marcajul C200 din figura Fig. 4), ce va fi conectată la bornele mașinii asincrone, având rolul de a asigura puterea reactivă necesară. Astfel nu se mai încarcă rețeaua și în consecință nu mai este necesară mărirea secțiunii conductoarelor de conectare, dimensionarea lor făcându-se la nivelul curentului activ, debitat de generator.

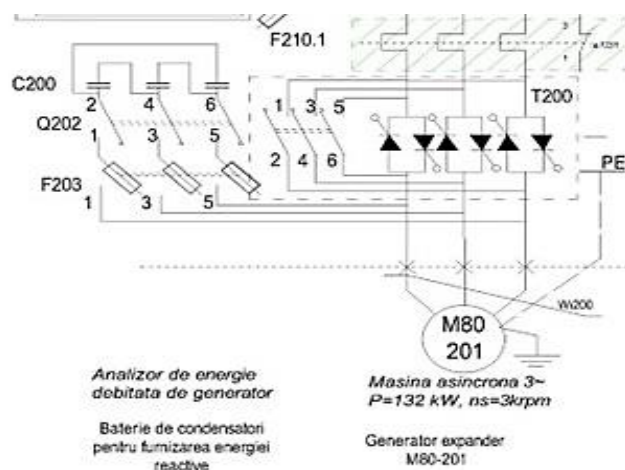


Fig. 4 – Schema electrică a alimentării mașinii electrice de 132 de kW (Expander)

Puterea aparentă reprezintă puterea totală cu care se poate încărca generatorul, fiind rădăcină pătrată din suma pătratelor puterii active, puterii reactive și puterii deformate. Puterea aparentă are ca unitate de măsură VA (Volt Amper), iar puterea activă este dată în W (Watt).

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (2)$$

Unde:

S – Puterea aparentă; P – Puterea activă; Q – Puterea reactivă; D – Puterea deformantă.

Puterea activă de fază pentru o rețea trifazată simetrică și echilibrată are formula:

$$P = U_f \cdot I_f \cdot \cos\varphi \quad (3)$$

Unde:

- φ – unghiul de defazaj dintre curenții de fază și tensiunile de fază.

În figura de mai jos (Fig. 5) este evidențiat unghiul de defazaj φ pe diagrama de fază a tensiunilor și curenților unei sarcini trifazate echilibrate, conectate în stea.

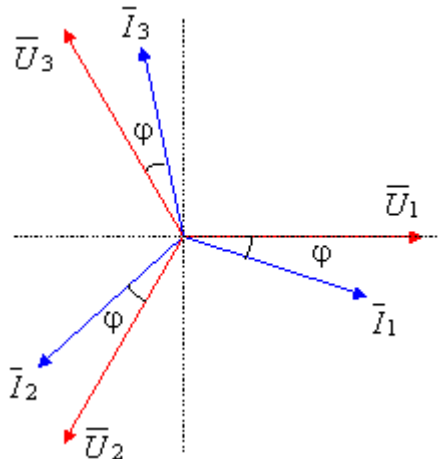


Fig. 5 - Unghiul de defazaj pe diagrama fazorială a tensiunilor și curenților [21]

Având în vedere că în practică nu se măsoară tensiunea de fază, ci tensiunea de linie $U_l = \sqrt{3} U_f$ și că la conexiunea stea $I_f = I_l$, rezultă [20] următoarea expresie pentru puterea activă P în regim trifazat:

$$P = \sqrt{3} \cdot U_l \cdot I_l \cdot \cos\varphi \quad (4)$$

Puterea reactivă, notată cu Q , are următoarea expresie pe linie:

$$Q = \sqrt{3} \cdot U_l \cdot I_l \cdot \sin\varphi \quad (5)$$

Puterea aparentă, notată cu S , este puterea totală a mașinii asincrone trifazate și are următoarea formulă pe linie:

$$S = \sqrt{3} \cdot U_l \cdot I_l \quad (6)$$

În cazul conexiunii în stea, curenții pe liniile de transmisie, I_l (curenții între generator și sarcină) sunt egali cu curenții din fazele sarcinii, I_f (curentul ce parcurge fiecare din impedanțele de sarcină) [21].

3.1 Dulapurile de forță ale expanderului și compresorului

Pentru acționarea electrică a expanderului, s-a ales de către departamentul de proiectare mecanică, o mașină asincronă trifazată, de putere 132 kW (Fig. 6). Aceasta este puterea mecanică nominală a motorului, care în aplicația noastră are rol de generator. Astfel, mașina electrică va funcționa ca generator electric, fiind antrenat de aerul destins în expander și debitând putere

electrică în rețea. Mașina electrică asincronă este de tip ASU 315M-4 și este produsă de UMEB. Specificațiile acestui motor se pot consulta în cele ce urmează [22].

Conform *Standardului EN60079-14, clauza 7*, pentru mașini rotative, la protecția suprasarcină se folosește controlul direct al temperaturii (termistori PTC sau termorezistențe PT100). Mașina electrică ASU 315M-4 are prevăzute în construcție 3 termistori PTC pentru protecție termică a înfășurărilor rotorice, nemaifiind necesară utilizarea unor elemente de protecție suplimentare (relee termice) [22].



Fig. 6 – (stanga) Mașina electrică asu 315 m 132 kw (firma UMEB) / (dreapta) Eticheta cu caracteristicile sale

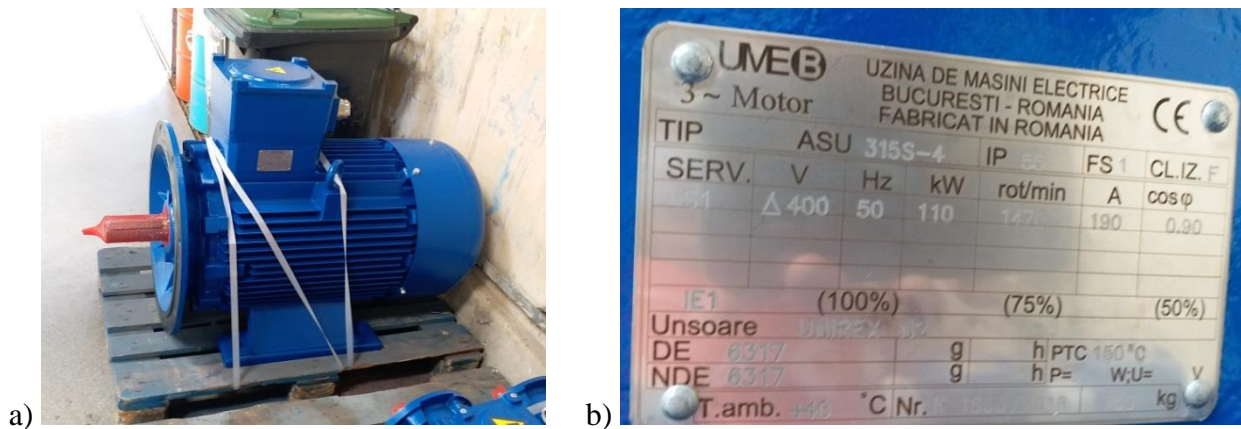


Fig. 7 – (stanga) Mașina electrică ASU 315 S 110 kW (UMEB) / (dreapta) Eticheta cu caracteristicile sale

Pentru acționarea electrică a compresorului, s-a ales un motor asincron trifazat, de putere 110 kW. Mașina electrică asincronă este de tip ASU 315S-4 și este produsă de UMEB. Specificațiile acestui motor se pot consulta în Fig. 7.

Motoarele îndeplinesc cerințele privind imunitatea la interferențe electromagnetice stipulate de documentele normative în vigoare. În cazul în care motoarele sunt echipate cu senzori integrați (termistori PTC), utilizatorul trebuie să asigure un nivel suficient de imunitate prin utilizarea unui cablu de comandă ecranat.

3.1.1 Softstarterul pentru pornirea generatorului asincron trifazat al expanderului

Mașina electrică a expanderului funcționează inițial ca motor asincron și este pornită prin intermediul unui softstarter, reducând astfel solicitările electromecanice. Pentru protecția softstarterului împotriva scurtcircuitelor și suprasarcinilor, se folosesc siguranțe fuzibile ultrarapide, oferind o protecție eficientă.

Softstarter-ul funcționează la performanțe nominale între 20°C și 50°C. Peste 50°C, performanțele electrice scad liniar cu 4% din regimul nominal per °C până la maxim 60°C. Motiv pentru care **am propus folosirea dulapurilor ventilate**. Vezi Fig. 9 și Fig. 10.

Softstarter-ul ales de la producătorul Fairford Synergy utilizează dispozitive semiconductoare în circuitul principal și nu este proiectat pentru a oferi izolație la bornele de conexiuni ale rețelei de forță. Din acest motiv, trebuie asigurate elemente de izolație în circuitul de alimentare, conform cablajului corespunzător și normelor de siguranță [23].



Fig. 8 – Softstarter expander Fairford SGY-305-4-01



Fig. 9 - Ventilator Eldon RFU5003R5 [24]



Fig. 10 - Grila de evacuare EFA250-300R5 [25]

Pentru răcirea dulapurilor a fost prevăzut un ventilator în partea superioară a dulapului de forță. Pentru circularea aerului și asigurarea fluxului necesar, au fost prevăzute două grile de

ventilație cu filtru inclus. Ventilatorul este de tip RFU5003R5, de capacitate 500 m³/h. Cele două grile de ventilație EFA250-300R5 au dimensiunile de 223 x 223 mm. Acestea sunt prevăzute cu filtru G3 ≥ 10 μm, de eficiență 88%.

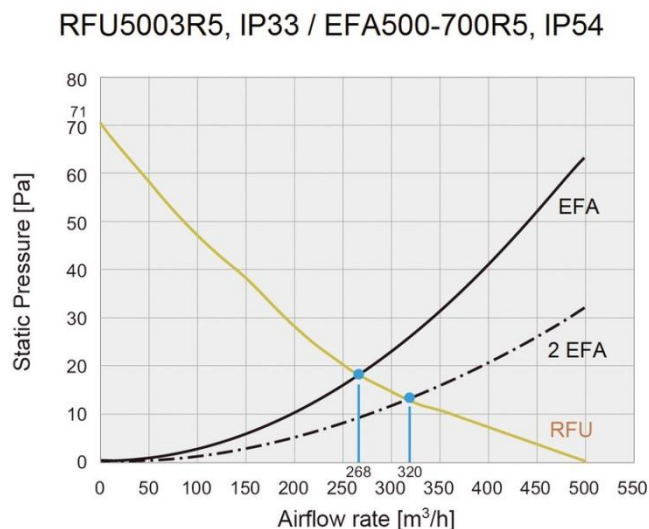


Fig. 11 – Performanțele ventilatorului cu una și cu două grile de evacuare EFA [24]

3.1.2 Etapele de execuție ale dulapului de forță al expanderului

Au fost făcute fotografiile pentru a evidenția fazele etapei de execuție, de la amplasarea echipamentelor, la fixarea, conectarea, instalarea echipamentelor conexe, etc.



Fig. 12 – Execuția dulapului de forță în derulare, din laboratorul de Inginerie Electrică și Automatizări COMOTI

3.1.3 Stabilirea și descrierea regimurilor de funcționare ale expanderului cu mașina asincronă trifazată ~132 kW

Regimurile de funcționare ale expanderului trebuie legate de întreaga instalație ROCAES. Expanderul va produce energie numai în cazul în care compresorul nu este activ, adică nu pompează aer în rezervoare. Altfel se eludează scopul instalației ROCAES de a produce energie

electrică în momentele în care este un deficit de energie disponibilă în rețea (*backup* pentru centrale eoliene, pentru sisteme fotovoltaice, suplimentări de putere pentru susținerea unor sarcini mari pe termene scurte, etc.).

Expanderul aflat în funcționare poate să fie într-una din stările:

- *staționare*;
- *pornire*;
- *încărcare* – intrare în regim de generare;
- *funcționare* – debitare după un anumit program de furnizare a energiei electrice;
- *oprire* – normală sau de urgență.

3.1.4 Programarea softstarterului

Pentru a utiliza corect softstarterul Fairford Sinergy SGY 305-4-01 în instalația ROCAES și a porni motorul expanderului în regim de motor asincron, trebuie să faceți setările corespunzătoare. Accesați meniul Auto-Setup al softstarterului și selectați opțiunea "Compressor - Screw" pentru acest tip de aplicație. Această alegere va configura automat parametrii pentru a reduce șocurile mecanice și a limita curentul de pornire.

3.2 Dulapul de automatizare

În acest subcapitol sunt prezentate imagini cu progresul fazelor de execuție a dulapului de automatizare DA2. În Fig. 13 se poate observa evoluția realizării dulapului de automatizare, care este configurat de sus în jos pe 5 nivele.



Fig. 13 – Execuția dulapului de automatizare în derulare, din laboratorul de Inginerie Electrică și Automatizări COMOTI

3.2.1 Descrierea rolului și funcționării PLC-ului

Automatele programabile, cunoscute sub denumirea de PLC-uri (Programmable Logic Controller), sunt dispozitive electronice utilizate pentru controlul mașinilor și proceselor. Ele

primesc semnale, le procesează conform programului și controlează elementele de execuție, cum ar fi relele. Caracteristicile principale includ numărul de intrări/ieșiri, capacitatea memoriei și viteza de calcul. PLC-urile înlocuiesc circuitele cu rele, fiind rezistente și pot fi utilizate în medii dificile [26].

3.2.2 Funcționarea expanderului condus de Sistemul de Reglare, Comandă și Control realizat cu PLC

Descriere generală

Funcția principală a Sistemului de Reglare Comandă și Control (SRCC) este aceea de urmărire a parametrilor proceselor termice, mecanice și electrice, în timpul regimurilor de lucru normale sau tranzitorii, reglarea și ținerea sub control al acestora, pentru realizarea unei funcționări în condiții de siguranță maximă.

Sistemul de Reglare Comandă și Control pentru ansamblul expander are la bază un automat programabil de supraveghere și conducere tip VersaMax, produs de către GE Fanuc. PLC-ul se conectează cu elementele de execuție din instalație prin rele, contactoare, traductoare, adaptoare de semnal.

Oprirea ansamblului expander-generator se face atât de pe dulapul de automatizare (comandată sau de avarie) cât și automat, ori de câte ori funcționarea este considerată anormală prin depășirea valorilor parametrilor de funcționare impuși.

3.2.3 Programare PLC-uri stație CAES

Datorită faptului că s-a optat pentru funcționarea independentă a compresorului și a expanderului, iar cele două nu vor funcționa simultan, au fost necesare două PLC-uri separate. Nu este necesară comunicarea între cele două PLC-uri. Traductoarele de presiune din vasul de stocare vor transmite informații către ambele PLC-uri. În momentul în care se atinge presiunea maximă a aerului comprimat din vasul de stocare (26 bar), compresorul se va opri automat. De asemenea, pornirea expanderului nu se va putea efectua decât în condițiile în care presiunea din rezervor este suficientă pentru antrenarea acestuia.

Programare PLC expander

Programul software realizat în software-ul Proficy Machine Edition (PME) a fost implementat în PLC-ul aferent expanderului și rulat. Funcționarea a fost fără probleme în timpul testelor de punere în funcțiune.

Ecranul teste

Pe ecranul TESTE **am abordat o soluție ingenioasă pentru prezentarea celor trei vane electropneumatice cu reglaj continuu**. Am ales să le afișăm într-un mod intuitiv și ușor de înțeles, oferind operatorului posibilitatea de a le controla cu precizie. Pe ecranul de TESTE, am inclus

butoane care permit deschiderea și închiderea vanelor, cu un increment de 5% afișat clar. Astfel, operatorul poate regla poziția vanelor în funcție de necesități, obținând controlul precis al acestora.

Am inclus un element vizual semnificativ pentru fiecare comandă a vanelor. În dreptul fiecărei comenzi, am adăugat un pătrat de culoare roșie, care indică starea actuală a echipamentului (acționat sau neacționat).

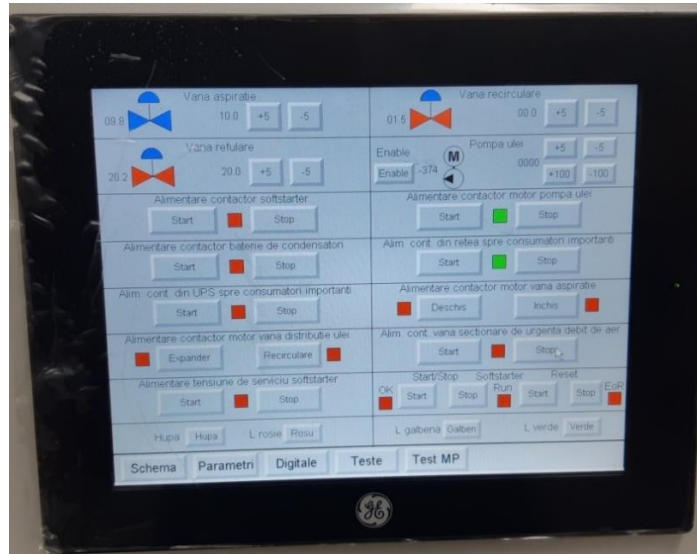


Fig. 14 – Ecran teste afișat pe panoul operator în timpul funcționării

2.2.4 Programare PLC compresor

Programul software pentru PLC-ul compresorului a fost realizat în software-ul Proficy Machine Edition. Acesta va fi implementat în PLC în etapa de execuție și punere în funcțiune a dulapurilor. Pe ecranul din Fig. 15 sunt afișați parametrii supravegheați de PLC. Pentru informația de stare (roșu – oprit, verde – pornit). De asemenea, sunt afișate valorile parametrilor monitorizați.



Fig. 15 – Ecran scada parametri funcționali compresor

Am încercat sa abordez creativ și atent la detalii ecranele pentru parametri. Am avut în vedere atât aspectele funcționale, cât și aspectele estetice pentru a oferi o experiență vizuală plăcută și intuitivă operatorului. Într-un efort de a asigura o experiență completă și informativă, am propus adăugarea unui ecran de legendă.

COD	Denumire parametri	Avert	Avarie
Wr	Putere absorbita din retea		
Ir	Curent absorbit din retea		
Ta1c	Temperatura aer la iesirea din compresor		
Tur	Temperatura ulei in rampa		
Tus	Temperatura ulei in separator		
Tar	Temperatura aer la refulare		
Purc	Presiunea uleiului in rampa		
Parc	Presiunea aerului la refulare din compresor		
Pars	Presiunea aerului in rezervorul de stocare aer		
Npu	Turatia pompei de injectie ulei		

Schema Parametri Digitale Teste Pregatire Legenda

Fig. 16 – Ecran legendă

3.2.5 Stările de funcționare ale expanderului

Stările de funcționare ale expanderului trebuie legate de întreaga instalație ROCAES. Expanderul va produce energie numai în cazul în care compresorul nu este activ, adică nu pompează aer în rezervoare. Altfel, producerea energiei electrice de către expander simultan cu consumul de energie electrică pentru comprimare nu se justifică.

3.3 Probe pe banc cu expanderul

În cadrul testelor, expander-generatorul a fost conectat la un compresor de înaltă presiune pentru a atinge presiuni mari. Pornirea mașinii a fost realizată cu ajutorul unui softstarter și cu aspirația deschisă. Este esențial să se pornească instalația expanderului numai atunci când aspirația este deschisă pentru a evita crearea unui vid care ar putea duce la vibrații și șocuri în echipament.

În timpul testelor s-a făcut achiziția de date. Parametrii de operare au fost înregistrați prin programul realizat în Proficy Machine Edition, conectând computerul pe care se rulează software-ul la modulul Ethernet ce face posibilă comunicarea cu PLC-ul prin cablu de date.

După cum se poate vedea pe graficul din Fig. 17, mașina electrică asincronă este pornită în regim de motor, fiind observat pe grafic, un maxim de putere consumată de 36,2 kW. Pe măsură ce vanele se deschid și este permisă intrarea aerului presurizat în expander, arborele acestuia va prelua sarcina de a învârti mașina electrică, care va intra în regim de generator. Puterea generată de către mașina electrică în regim de generator se observă pe grafic cu cifrele roșii, cu semn negativ.

Puterea debitată în rețea W_r este mai mică decât puterea generată W_g . Motivația este că puterea generată trebuie să asigure și puterea necesară pentru motorul de 4 kW de acționare a pompei de ulei, precum și consumatorii electrici din dulap.

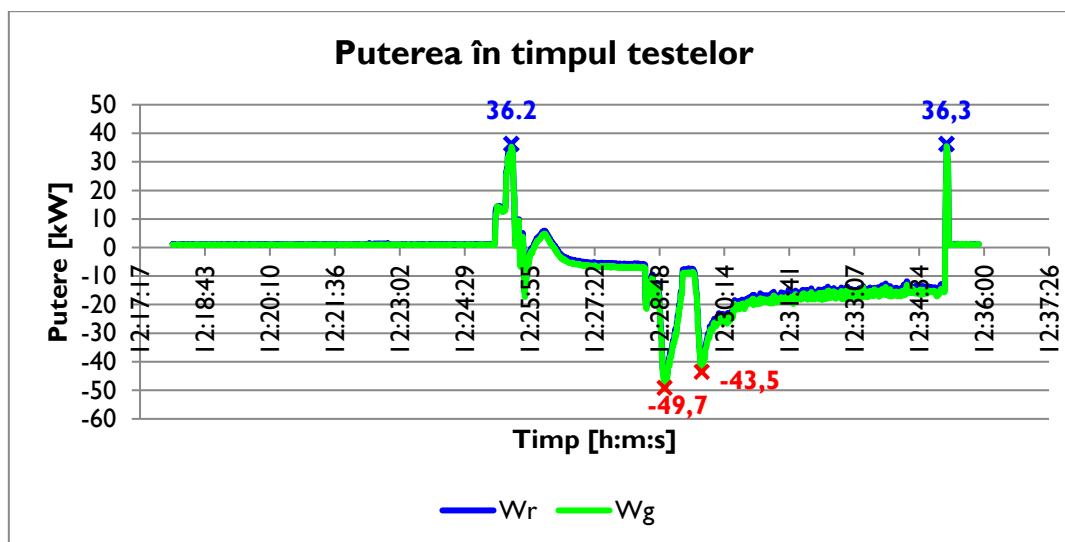


Fig. 17 – Puterea înregistrată în timpul probelor de funcționare

O parte din acest capitol a fost sintetizat în articolul „Compressed Air Energy Storage Installation for Renewable Energy Generation” [18], unde am prezentat pe larg instalația de stocare a aerului comprimat și modul în care acel aer comprimat se poate transforma în energie.

4. STUDIU DE CAZ: OPTIMIZAREA CONTROLULUI VANEI DE ASPIRAȚIE A UNITĂȚILOR DE COMPRIMARE GAZ

Aceasta etapă prezintă modul în care am venit în întâmpinarea unor probleme existente la unele stații de comprimare gaz, deținute de beneficiari ai INCD Turbomotoare COMOTI. Aceste probleme constau în acumularea de presiune în magistrala de aspirație, fapt care poate duce la porniri ratate. Ne-am pus de asemenea și problema reglării unui anumit debit pentru refularea unității de comprimare.

Am elaborat un sistem de transmitere a informației de poziție aplicabil la vanele uzuale pe care le folosim, **iar contribuția mea este proiectarea și realizarea unei soluții din punct de vedere software** pentru a porni în condiții de siguranță o unitate de comprimare gaz, având presiune ridicată în conducta de aspirație. Am prezentat modul în care informația referitoare la poziția de deschidere a vanei este tradusă din poziție mecanică în semnal analogic într-un mod simplificat.

4.1 Definierea configurației funcționale

În anumite stații de comprimare gaz metan, unde sunt instalate ansambluri de comprimare cu șurub realizate de către INCD Turbomotoare COMOTI, cu unitate de comprimare tip CF 128 sau 180 (Țintea, Pișcolt, Abram), au fost constatate anumite probleme de funcționare la pornirea ansamblului după o perioadă de oprire de durată mare, timp în care se acumulează gaze în aspirația compresorului. În general, valorile presiunii ajung în intervalul 1,5-3 bar, iar ansamblul compresor este oprit automat dacă presiunea în aspirația unității de comprimare este mai mare de 1,5 bar.

În acest moment, pentru a facilita pornirea unităților de comprimare, este necesar să se realizeze manevre manuale pentru a reduce valoarea presiunii la aspirație în unitatea de comprimare, cum ar fi deschiderea robinetului de coș al stației și purjarea continuă a unei cantități considerabile de gaze, sau întredeschiderea robinetului manual dispus pe conducta stației pentru a genera cădere de presiune, simultan cu acționarea comenzii de pornire compresor.

Am urmărit în continuare soluțiile identificate pentru posibila rezolvare a acestei probleme de funcționare și anume folosirea unui potențiomtru, sau utilizarea unei deschideri progresive comandate de către software-ul de comandă și control – **propuneri proprii**.

Pentru fixarea potențiometrului și a encoder-ului vor fi abordate în paralel două variante constructive suport din tablă ambutisată și tija suport. În interiorul acționării electrice care va fi adaptată se va acomoda doar potențiomtrul sau encoder-ul de poziție, restul de aparate de analiză și decizie vor fi montate într-un dulap de comandă și control care se va monta la distanță, ce poate fi dispus la sute de metri.

4.2 Sistem mecanic de determinare și confirmare a poziției de lucru

Traductoarele sunt o parte esențială din orice dispozitiv modern de control. Acestea convertesc mărimile fizice neelectrice într-un semnal electric care poate fi mai apoi interpretat de sistemul de control (PLC). Există diferite tipuri de senzori disponibili pe piață care funcționează pe diferite principii de detectare și sunt utilizați în diferite aplicații. Printre acestea, traductorul de poziție joacă un rol important în mai multe astfel de sisteme.

Traductoarele cu potențiomtru de poziție utilizează o pistă rezistivă cu un cursor care este atașat la obiectul a cărui poziție se dorește a fi determinată. Mișcarea obiectului face cursorul să modifice poziția de-a lungul pistei rezistive și, prin urmare, modifică valoarea măsurată a rezistenței între poziția cursorului și capătul pistei. În acest mod, rezistența măsurată poate fi utilizată ca un indicator al poziției obiectului. Acestea prezintă următoarele avantaje: simplitate, cost redus, compactitate, etc.

Acest tip de componentă electronică, asemănătoare cu rezistențele convenționale, dar cu valoare variabilă, poate fi utilizată pentru numeroase aplicații, dar în cazul de față, atât scopul cât și modalitatea utilizării sunt speciale.

Utilizarea unui potențiomtru multitur

Se poate folosi un potențiomtru de 0-5 k Ω pentru a monitoriza poziția vanei, acționat mecanic de o tijă conectată la un angrenaj, care se mișcă odată cu fluturele robinetului. Această soluție a dat rezultate bune. Pentru o precizie crescută, s-a adăugat un angrenaj cu roți dințate pentru a amplifica mișcarea (Fig. 18).

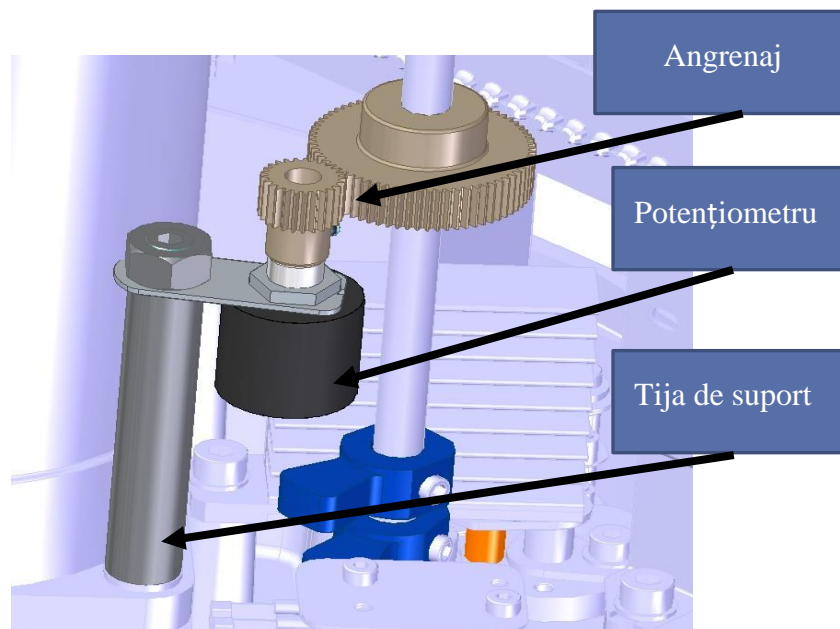


Fig. 18 — Variantă de montaj

Rotile dințate au fost dimensionate de către echipa de proiectare mecanică, **la îndrumarea mea**, astfel încât la o rotație a vanei de 90°, potențiomtrul să execute o rotație de 270°. Această soluție constructivă este relativ simplă și fiabilă. De asemenea, nu necesită o prelucrare de semnal în corpul acționării valoarea rezistenței putând fi citită la distanță în zona de control a acționării.

4.3 Transmisia informației de poziție a vanei la distanță folosind un potențiomtru multitur

În funcție de PLC-ul ales, se poate opta pentru un adaptor de semnal, care convertește informația primită de la potențiomtru, din rezistență, în curent 0..20 mA (miliamperi). În piață se pot găsi și PLC-uri care pot citi singure informația de rezistență, dar acestea au un cost mai ridicat și există riscul ca în cazul în care lungimea cablului care transmite informația de la potențiomtru la PLC este peste 50 de metri, să existe o eroare de citire a informației. Diferența de rezistență se explică prin creșterea acesteia o dată cu lungimea cablului și secțiunea conductorilor.

Am propus mai departe, ca în cazul în care vor fi distante mai mari de 50 de metri între cabinetul de comandă și elementele pe care le monitorizăm, să se folosească magistrale cu conductoare de cel puțin 1 mm², pentru a evita o cădere prea mare de tensiune.

Definirea configurației funcționale a sistemului propus

Roțile dințate sunt realizate dintr-un material plastic de tip poliamidă ranforsată cu fibră de sticlă. Principalele caracteristici ale acestui material sunt rezistența mecanică ridicată, duritate sau rezistența ridicată la fulaj. De asemenea, au o rezistență bună la stresul mecanic. Acestea au fost realizate de către departamentul de proiectare mecanică din cadrul INCD Turbomotoare COMOTI, **la recomandarea mea**.

4.4 Citirea informației oferite de către potențiometrul

Pentru citirea informației avem la dispoziție mai multe opțiuni. Am prezentat o variantă, care ar putea fi aplicată în cadrul acestei aplicații.

După cum s-a precizat, informația ce este oferită de către potențiometrul rotativ, ajunge la dulapul de comandă și control, numit cabinet de automatizare, ca o rezistență electrică (Ω). Aceasta rezistență electrică trebuie transformată într-o informație care să poată fi citită și afișată de către automatul programabil (PLC – Programmable Logic Controller).

Am folosit un convertor de semnal, iar acesta va ajunge la PLC în semnal 4..20 mA și va indica poziția de la închis spre deschis în grade, 0..90°.

4.5 Soluția propusă din punct de vedere al automatizării

În practică, am întâlnit de foarte multe ori probleme la pornirea echipamentelor de comprimare ECS COMOTI. Acestea au apărut în urma nivelului ridicat al presiunii în aspirația compresorului și anume, o presiune mai mare de 1,5 bar. În softurile din PLC-uri, create pentru funcționarea automată și protejată a unităților de comprimare, există implementată o alarma care va opri unitatea de comprimare în cazul în care presiunea de aspirație indică valori mai mari de 1,5 bar. S-au încercat doar metode sigure de a putea folosi unitățile de comprimare, în condiții de securitate cum ar fi întârzierea cu două sau trei secunde a erorii legate de presiunea de aspirație. Această metodă permite ca unitatea de comprimare să preia presiunea mare de pe aspirație în momentul pornirii.

Alte metode, la nivel de propuneri pe care le-am făcut:

- începerea procedurii automate de deschidere a vanei de aspirație o dată cu demararea în tură a motorului principal care antrenează unitatea de comprimare;
- deschiderea în trepte a vanei de pe conducta de aspirație.

Analizând cu atenție modul de funcționare a unității de comprimare și secvența de pornire, **am venit cu propunerea** de a instala un al doilea traductor de presiune. Acesta va fi foarte util în momentul în care are loc pornirea, iar rolul lui este de a monitoriza presiunea din magistrală în timpul staționării unității de comprimare. Totodată, va indica și poziția inițială de deschidere a vanei de aspirație, în cazul în care presiunea este mai mare de 1,2 bar. Dacă nu va fi instalată o vană reglabilă în segmentul de aspirație, al doilea traductor de presiune nu își mai are rostul. Denumirea celui de-al doilea traductor de presiune va fi **Pga1 (traductorul pre presiune - aspirație** din Fig. 19).

Definire soluție:

Cu ajutorul unei vane care deține un reglaj al poziției, care este comandată de către un PLC, se va putea controla, foarte ușor, nivelul presiunii din conducta de aspirație, în special în momentul pornirii unității de comprimare. PLC-ul poate interveni și în timpul funcționării unității de comprimare, dacă traductorul de presiune înregistrează o presiune care se apropie de limita maximă

admisă pe aspirație, va începe să închidă treptat vana fluture, astfel încât presiunea de la intrarea în compresor (Pga2 sau traductorul de presiune compresor din Fig. 19) să scadă.

După cum se poate observa în Fig. 19, la aspirația compresorului, **am propus** un traductor de presiune, care ne va indica presiunea din conducta principală ce furnizează gaz. Acel traductor va monitoriza tot timpul presiunea de pe aspirație, chiar și atunci când compresorul se afla în repaus.

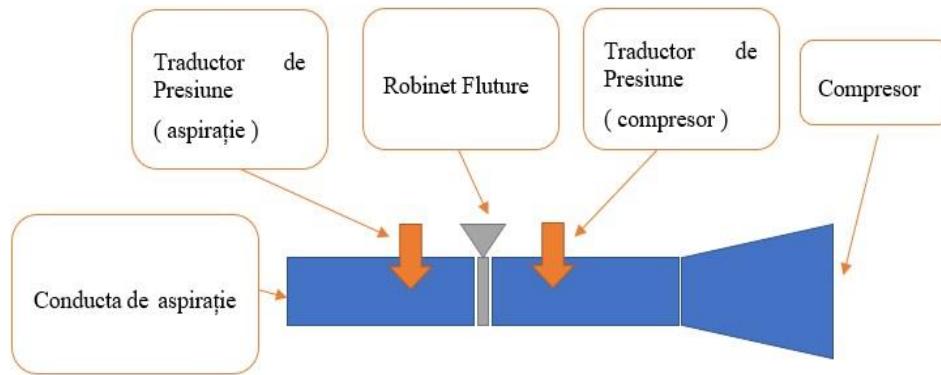


Fig. 19 — Poziția senzorilor pe conducta de aspirație

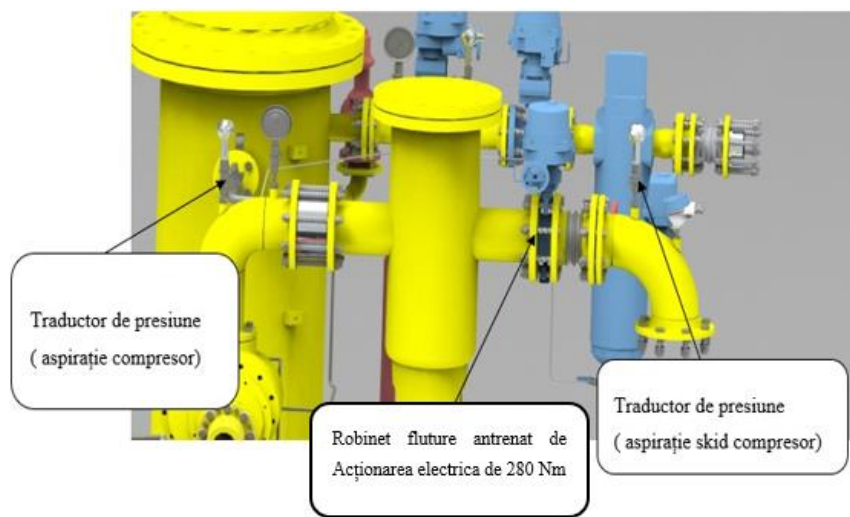


Fig. 20 — Poziția senzorilor pe conducta de aspirație

- Traductorul de presiune aspirație compresor = Pga2;
- Traductorul de presiune aspirație Skid compresor = Pga 1;
- Robinetul fluture acționat reprezintă vana pe care o controlăm.

Configurația Dulapului de Automatizare:

- utilizarea unui PLC programabil în limbaj Ladder Diagram în care se vor implementa algoritmi de reglare. În faza de realizare teste specifice inițiale, se vor putea modifica sau adapta acești algoritmi pentru a obține optimizarea răspunsului vanei;

- utilizarea unui Panou Operator pentru facilitarea interpretării datelor din PLC și pentru a oferi informații operatorului. Acest panou operator este programabil, se pot crea ecrane și interfețe diferite atât pentru faza de teste specifice și reglaje, cât și ulterior pentru faza de exploatare uzuală;
- circuite de protecție electrică a întregului dulap. În etapa de elaborare specificație tehnică se va face un calcul al puterilor consumatorilor;
- surse de alimentare electrică 24 VCC a căror putere va fi dimensionată în funcție de consumatori, cu rezervă de putere pentru adăugarea de consumatori suplimentari în faza de testare;
- sistemul de urgență asigură posibilitatea revenirii vanei într-o poziție de siguranță în cazul pierderii alimentării electrice. Se realizează printr-un sistem UPS, dimensionat să asigure energie pentru acționarea vanei;
- elemente de conectică, separare, marcarea circuitelor, identificare a traseelor electrice pentru ușurarea depanării sau a modificărilor în faza de testare și reglaje;
- tabloul electric propriu-zis va fi un dulap metalic dimensionat ca volum pentru elementele deja definite cât și cu spațiu de rezervă pentru adăugări ulterioare. Va fi prevăzut cu elemente de ventilare pasivă sau activă în funcție de puterile electrice consumate;
- conexiunile electrice între Dulapul de Comandă și Vana din instalația tehnologică. Se vor menține cablurile electrice de forță pentru alimentarea motorului electric al vanei. Se vor utiliza și semnalele electrice de capete de cursă pentru protecția finală, iar aceasta ajută la evitarea depășirii cursei maxim admise a vanei.

Buclo de reglaj a vanei pentru valori ale presiunii de aspirație Pga2 cuprinse între 0,5 și 1,2 bar.

Am prezentat în continuare, o metoda clasică folosită în general de către programatorii în limbaj ladder diagram și anume folosirea unui regulator PID, iar apoi soluția personală pentru această problemă.

În Fig. 21 este prezentat un PID pe care l-am implementat în softul unui PLC care utilizează un limbaj de tip Ladder Diagram. Acesta are nevoie de o valoare prescrisă a mărimii de interes, numită și „**SET POINT**”, care poate fi introdusă în soft sau poate fi setată manual de operator de pe ecranul HMI (Human-Machine Interface), de variabila de proces care este citită cu ajutorul unui traductor (Pga2) și de variabila controlată de către PID adică în cazul aplicației noastre poziția vanei.

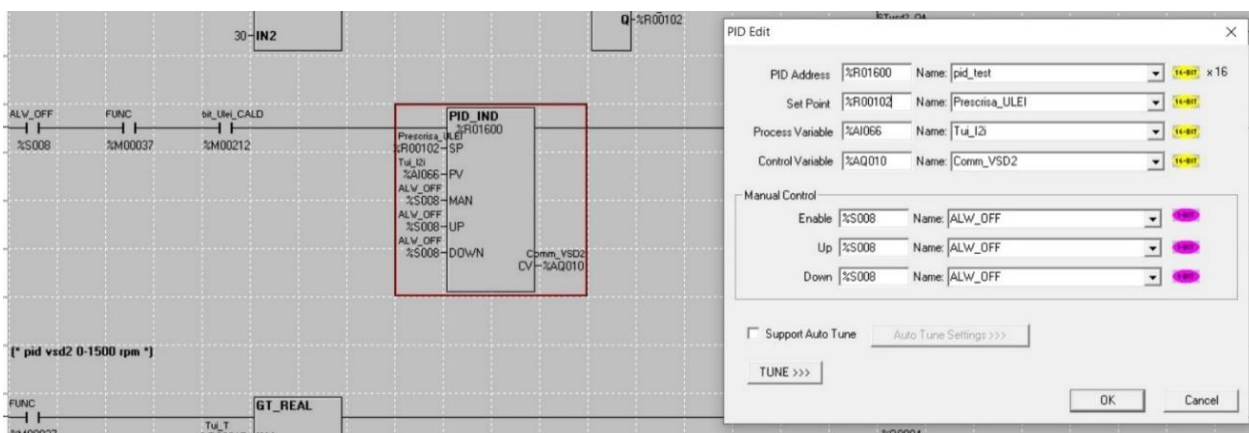


Fig. 21 — Exemplu de PID implementat în soft

4.6 Realizare teste funcționale

Sistemul automat de determinare și confirmare a poziției de lucru pentru o vană antrenată de o acționare electrică, denumită în continuare și „SDV”, a fost montată pe conducta de aspirație a unui ansamblu de comprimare gaz natural produs de INCDT COMOTI. Deși ansamblul este proiectat pentru a utiliza gaz natural drept fluid de lucru, toate testele s-au realizat utilizând drept fluid de lucru aerul comprimat. Testele care sunt propuse se pot împărți în două categorii în funcție de presiunea de aspirație. În prima parte, s-au realizat teste la presiune atmosferică, urmând mai apoi efectuarea de încercări la presiuni mai ridicate, până la 3 bar.

Acționarea electrică este amplasată pe conducta de aspirație a ansamblului de comprimare. Aceasta antrenează o vană fluture tip DN 150 amplasată precum în Fig. 22. S-a ales această abordare deoarece montajul vanei este relativ simplu și nu necesită modificări asupra echipării existente a conductei de aspirație sau a logicii de control a skidului.

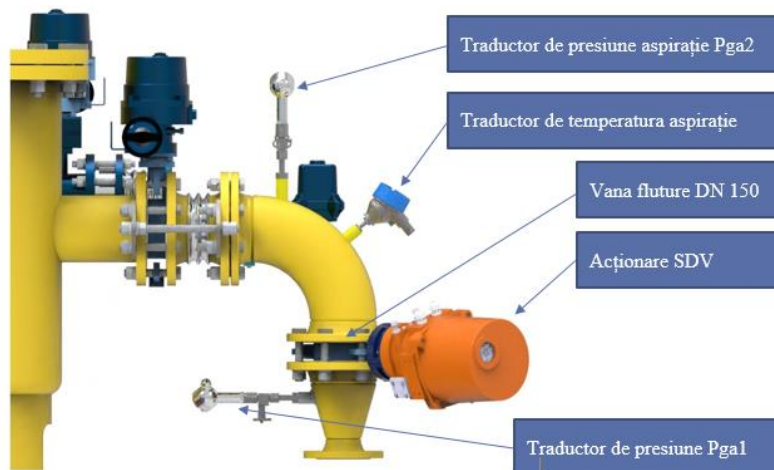


Fig. 22 - Montajul acționării pe conducta de aspirație

Principalele elemente ale instalației experimentale sunt: standul de testare compresoare, clapetă de sens, regulator de presiune, ansamblu skidului compresor.

Motorul electric care antrenează compresorul din componența skidului ECS 10/10 CMT93 are o putere nominală de 55kW. Compresorul este proiectat pentru a comprima gazul natural, iar acesta va consuma o putere electrică mai ridicată la funcționarea pe aer. Din acest motiv, s-a realizat un calcul estimativ pentru determinarea turației limită de funcționare în timpul testelor.

Verificarea funcționalității echipamentului la presiunea atmosferică

Prima categorie de teste funcționale s-au realizat la presiunea atmosferică și au avut drept scop urmărirea modului în care putea răspunde softul de control al vanei la diferite variații ale unor parametri de funcționare ai compresorului (turație, presiune de refulare etc.).

Înainte de începerea testelor propriu-zise și de trasarea curbelor caracteristice corespunzătoare parametrilor de interes (presiune de refulare, debit, putere electrică consumată în funcție de presiunea de aspirație) se realizează o probă pentru verificarea acționării.

Etape pregătitoare în vederea începerii probelor sunt prezentate în lucrare.

S-au făcut două seturi de determinări: un set în care se variază doar unghiul de deschidere al vanei fluture și un set în care simultan cu deschiderea vanei s-a acționat asupra robinetului manual montat pe traseul de refulare astfel încât presiunea să se mențină constantă la 3.5 bar.

În Fig. 24 este prezentată o secvență de pornire ratată cauzată de creșterea presiunii de aspirație peste pragul limită impus în timpul testelor de 0,5 bar. În acest caz, variația presiunii de aspirație nu a putut fi adusă și menținută de către PLC în jurul valorii de referință prestabilite, iar în Fig. 23, putem observa o secvență de pornire reușită, unde poziția calibrată a potențiometrului, care este similară cu poziția de deschidere a vanei, a reușit să mențină o presiune cu mici fluctuații de presiune.

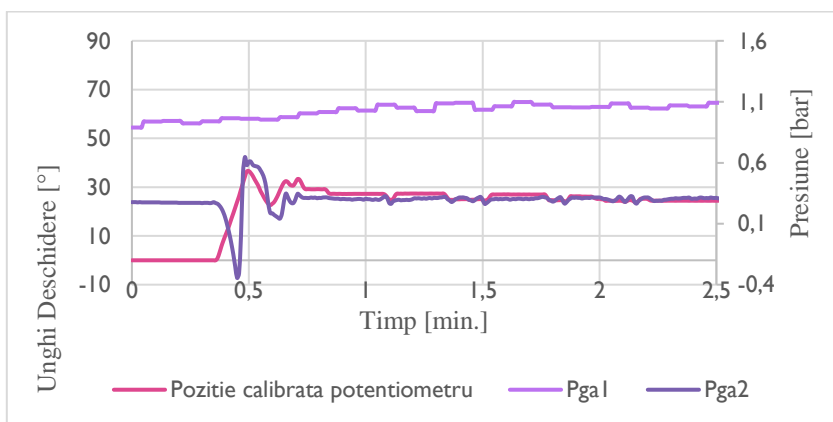


Fig. 23 — Secvență de pornire reușită

Se poate observa faptul că în primele momente de la pornire se produce o depresiune în aspirația compresorului. Ceea ce apare în mod regulat la orice pornire a compresoarelor produse de către INCD Turbomotoare COMOTI. Această zonă de vacuum se poate corecta prin implementarea în software-ul de comandă din PLC, a unei corelări între lansarea motorului principal al unității de comprimare și deschiderea vanei. Comandă pentru lansarea motorului și

deschiderea vanei încep în același timp, însă vana nu deschide efectiv imediat după acționarea releului. Ea mai are nevoie de o secundă, poate chiar două, în care acționarea ei să funcționeze, pentru a deschide minim 1°. **Am propus implementarea pe viitor a unei secvențe de pornire, în care motorul electric sa se lanseze după ce switchul vanei care semnalizează poziția de închis, să fie inactivat.**

Următoarea etapă în cadrul testelor a fost reprezentată de ridicarea unei curbe caracteristice presiune aspirație-ungchi deschidere. Aceasta va fi utilizată pentru determinarea unui unghi precalculat de deschidere la care trebuie să ajungă fluturile în momentul pornirii compresorului. Determinarea s-a realizat pentru o turație ($n=1000$ rpm), o presiune de refulare ($P_{grs}=2$ bar) și o presiune de aspirație ($P_{ga2}=0,3$ bar) constante.

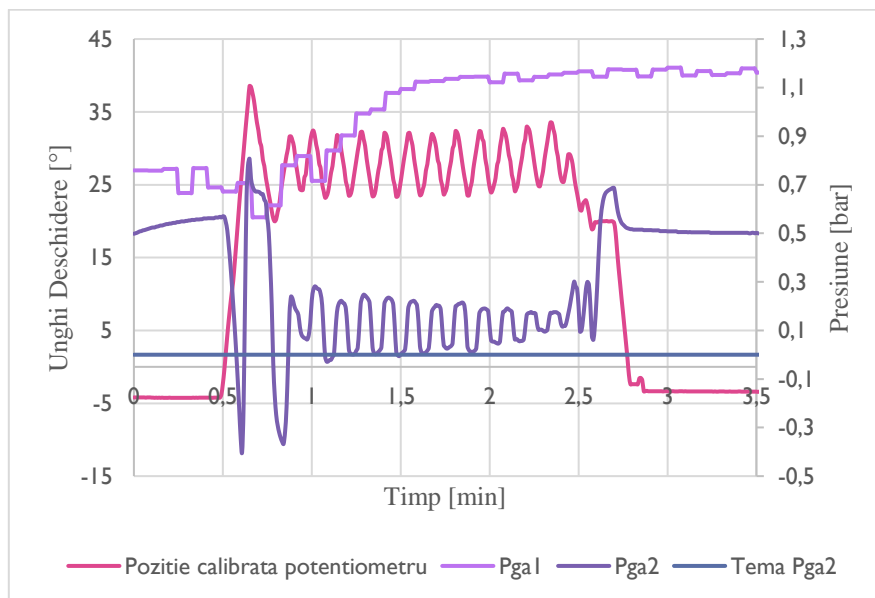


Fig. 24 — Secvență de pornire ratată

Pga1 – Măsura de presiune înregistrată la nivelul conductei de aspirație (vezi Fig. 22);

Pga2 - Măsura de presiune înregistrată între acționarea electrică (vană) și compresor (vezi Fig. 22).

În Fig. 24 se poate observa cum valoarea presiunii Pga2, nu a putut fi stabilizată la nivelul de 0 bar, iar acest lucru s-a datorat faptului că automatul programabil nu avea implementat un interval de toleranță de 2-3°, în care sa nu ia nicio decizie, penru a stabiliiza presiunea. Se observă și o creștere a presiunii de aspirație, aspect care nu este probabil în stațiile de comprimare gaz decât în cazuri excepționale.

Presiunea în amonte de vană se va crește până la 3 bar care reprezintă limita superioară a manometrului montat pe regulatorul de presiune.

Datele rezultate din această etapă au fost implementate în softul de control al acționării pentru o mai bună funcționare în perioada de pornire a compresorului până la atingerea turației nominale.

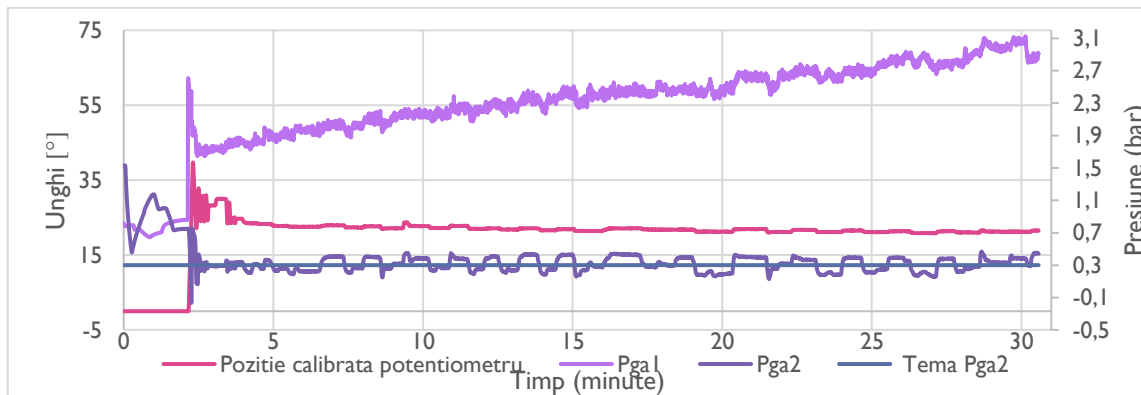


Fig. 25 — Datele pentru determinarea modului de funcționare a vanei

În Fig. 25, se poate observa foarte clar faptul că vana primește comenzi dese de închidere sau deschidere, pentru variații foarte mici ale presiunii Pga2, însă rezultatele sunt satisfăcătoare, iar acele mici variații voi încerca să le corectez, așa cum voi prezenta în capitolul următor.

Prezentarea funcționalității și utilității modelului funcțional în varianta cu poziționar, controlat prin intermediul unui dulap de comandă și control

În majoritatea skidurilor aflate în operare este implementată o funcționare automată într-o buclă de reglare a turației motorului electric în funcție de presiunea de aspirație înregistrată la intrarea în skidul de comprimare (Pga). Intervalul de variație a turației este cuprins între 1200-1500 rpm și intervalul de presiune de aspirație este configurabil în intervalul $[-0,15 \div 1]$ bar.

Testele funcționale care s-au realizat utilizând instalația experimentală descrisă mai sus, au folosit drept fluid de lucru aer comprimat, ceea ce a dus la necesitatea modificării intervalului de reglare a presiunii de aspirație între $[-0,5 \div 0,5]$ bar fiind limitat de puterea nominală a motorului electric.

Soluția a dat dovadă de o bună funcționare în menținerea constantă a presiunii de aspirație într-un interval de presiuni de gaz, furnizat cuprinse între 0.5 și 1.2 bar. Atunci când se depășește această valoare evoluția de desfășurare a procesului este mai rapidă decât posibilitatea acționării de a realiza corecția. Oscilațiile ilustrate în Fig. 26, sunt caracteristice unui mod de reglaj „on/off”. Se poate observa că durata de stabilizare crește proporțional cu presiunea reglată din regulator.

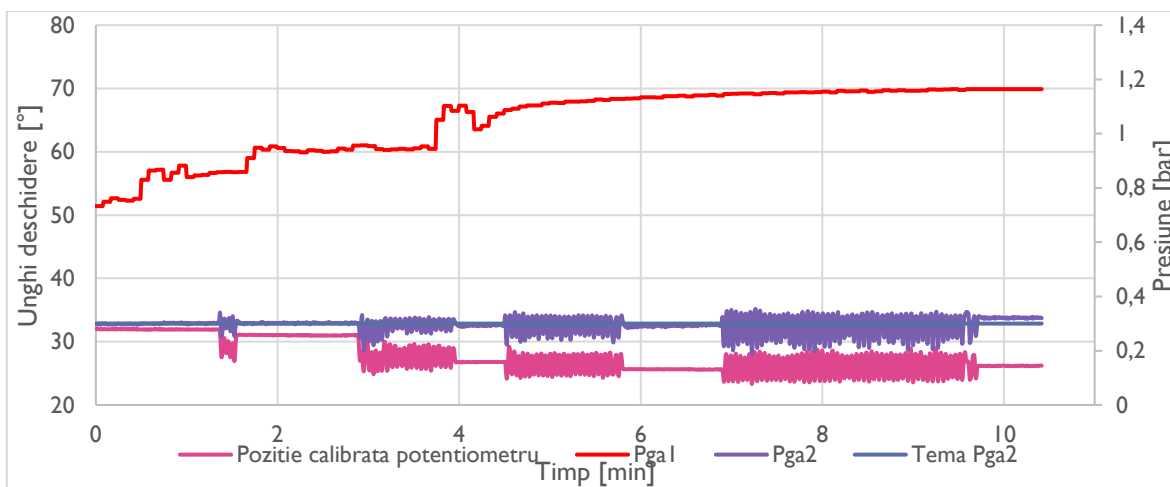


Fig. 26 — Reglajul presiunii de aspirație în buclă

A acționarea electrică controlată de către PLC și-a demonstrat utilitatea în timpul testelor efectuate atât la pornire, cât și în funcționare. Vana fluture se poate regla impunând tema de presiune pe care logica de control încercă să o mențină. În momentul pornirii unității de comprimare, folosind ca date de intrare nivelul presiunii din conducta de aspirație și unghiul de deschidere măsurat fie de un potențiomtru, fie de un encoder digital, softul de control alege un unghi limită de deschidere

Potențiomtrul rotativ oferă informația sub forma unei rezistențe variabile proporțională cu poziția unghiulară a vanei. Aceasta ajunge la dulapul de comandă unde trebuie transformată într-o mărime care să poată fi citită și afișată de către automatul programabil (PLC). În cazul în care informația necesită o convertire, în tensiune (0..10 V) sau în curent (0..20 mA), se va utiliza un convertor de semnal analogic.

Testele au avut și rolul de a verifica funcționalitatea implementării potențiometrului pentru a indica poziția vanei și acesta s-a constatat a fi o soluție foarte bună.

Una din observațiile personale pe care le-am făcut în urma testelor de funcționare, a fost că, va fi necesar ca relele normale cu bobină, să fie înlocuite cu rele solid state, deoarece frecvența de comutație foarte frecventă, poate duce la o uzură prematură a contactului cu bobina folosit în mod normal.

4.7 Soluția personală pentru a reduce oscilațiile de poziție ale vanei

Cu ajutorul ecuației unei drepte, implementate în soft-ul PLC, se poate cerea o buclă simplă de reglaj pentru un echipament care funcționează ca răspuns a unei valori înregistrate de un traductor, în cazul nostru, traductor de presiune.

Am implementat astfel un registru în softul Ladder Diagram, care poate fi comandat (**control_SDV**) și un parametru înregistrat de un traductor, în cazul de față Pga2. Pentru controlul vanei am considerat necesară o cursă între 20 de grade și 90 de grade, iar pentru valoarea de interes a presiunii Pga2, am considerat intervalul cuprins între 0,5 și 1,2 bar.

Aplicarea buclei de reglaj se va realiza astfel conform logicii prezentate mai jos dar și din liniile de soft din Fig. 28 și Fig. 29; Explicația fiecărei linii în parte este prezentată în lucrare.

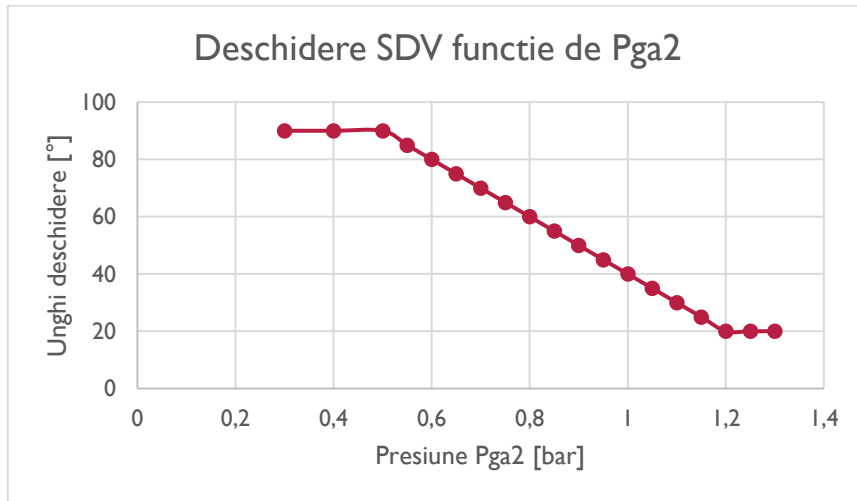


Fig. 27 - Dreapta care definește bucla de reglaj, a deschiderii vanei în funcție de Pga2

Aceasta metodă de reglaj, cu ajutorul ecuației drepte, am folosit-o cu succes și pentru comanda motorului care acționează ventilatorul de răcire a uleiului din compresor. În acest caz, referința este dată de un singur traductor care indică valoarea de temperatură a uleiului la ieșirea din radiator.

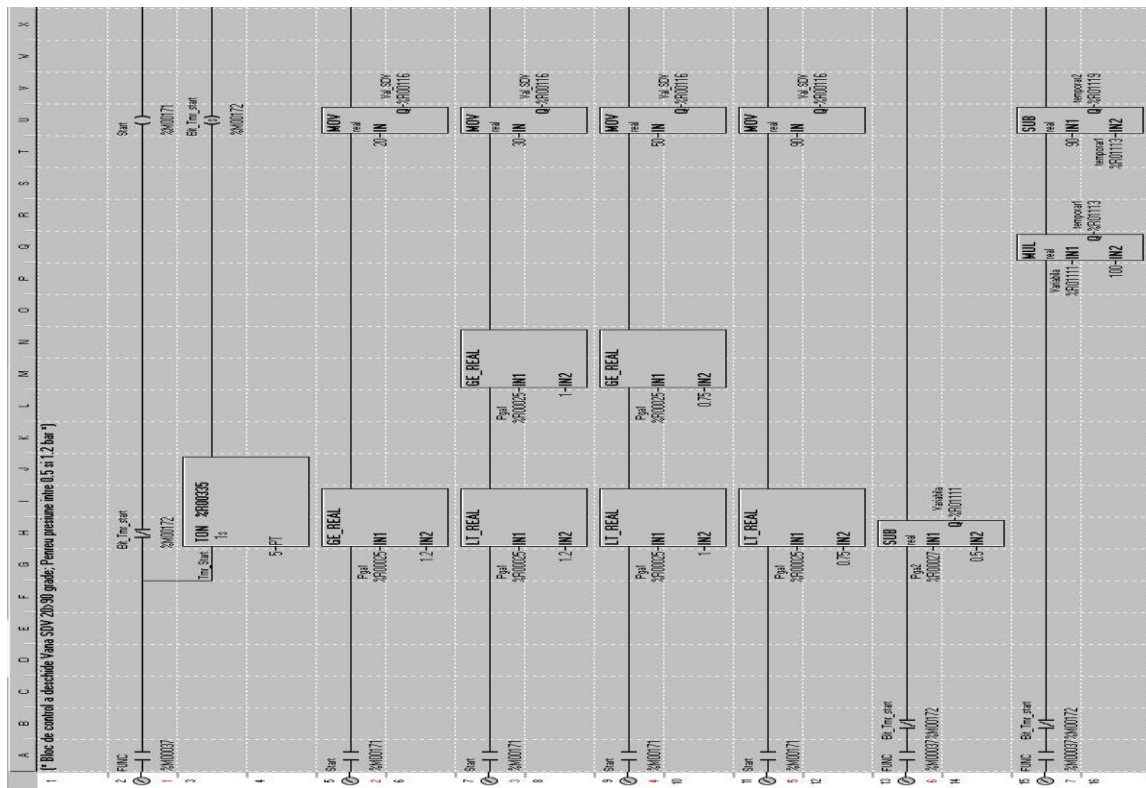


Fig. 28 – Introducerea în soft a ecuației drepte și comanda vanei cu ajutorul acesteia 1

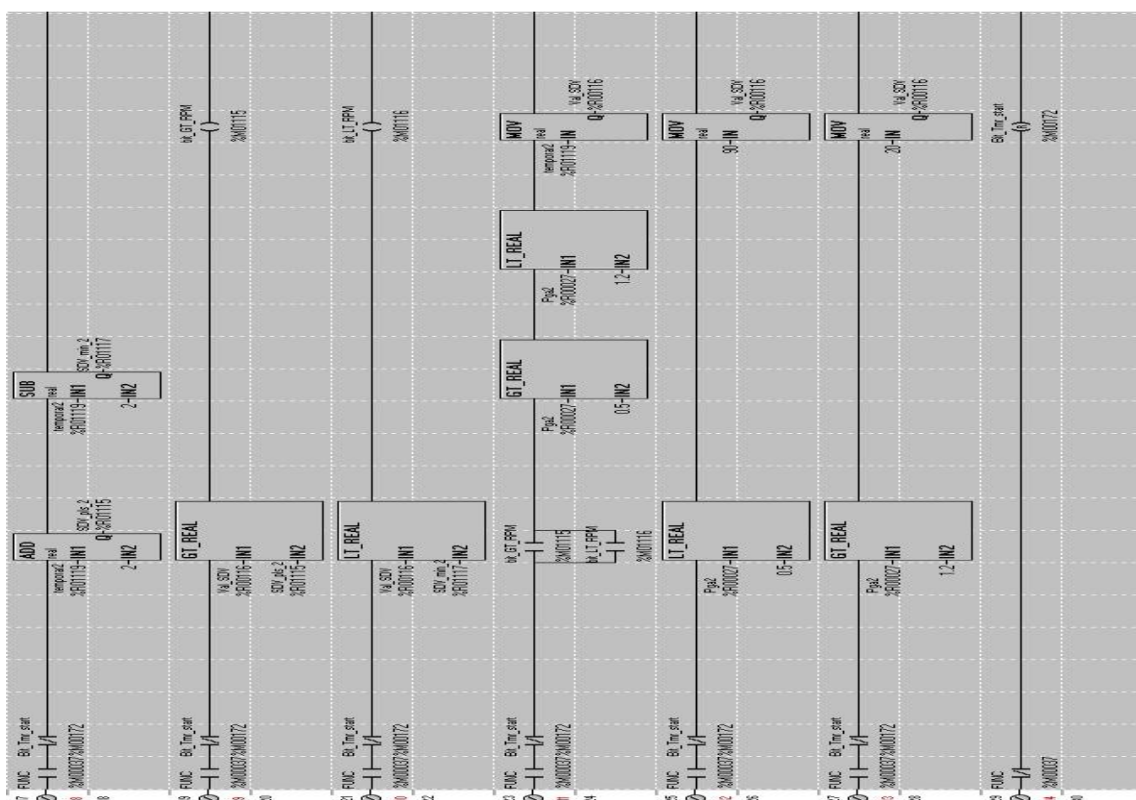


Fig. 29 – Introducerea în soft a ecuației drepte și comanda vanei cu ajutorul acesteia 2

O sinteza a acestui capitol a fost prezentată în articolul „**Optimizing the Electronic Control of Suction Valves for Gas Compression Units**” [27], unde am fost prim autor.

Un alt articol care a stat la baza cercetării în ceea ce privește vanele a fost „**Electronic improvements made for industrial valve**” [28]. Pentru acest articol am studiat aspectele construcției clasice a vanelor și utilizarea produselor standard pentru a îmbunătăți caracteristicile acesteia în ceea ce privește interfața cu utilizatorul, starea supapei în condiții de funcționare și interfața de control la protocoalele de comunicare standardizate clasice, precum EtherCAT®, ProfiBUS®.

Conceptul de implementare a acestei bucle de reglaj vine în întâmpinarea problemelor care apar datorită presiunii de aspirație mari, în momentul pornirii și funcționării unităților de comprimare. Se poate pune la dispoziție operatorului unității de comprimare prin intermediul HMI a setării anumitor bucle de reglaj, în funcție de preferințe.

Dacă se intenționează folosirea unei vane fără o indicație exactă a poziției, tot procesul poate fi simplificat așa cum voi prezenta în partea următoare.

5. PORNIRE ECS ÎN CONDIȚII DE PRESIUNE RIDICATĂ, FĂRĂ INTERVENȚII HARDWARE

Vanele folosite în general de către INCD Turbomotoare COMOTI, au grad de protecție de cel puțin IP 67, ceea ce înseamnă protecție împotriva particulelor de praf și protecție de

impermeabilitate pentru scufundare în lichid până la 1 metru adâncime, pentru un timp de 30 de minute. În interiorul acestora, regăsim componente electrice care sunt clasificate în Grupa ATEX IIB, cu clasa de temperatura T4 pentru încălzire (max. 135°C). Marcajul acționării electrice a vanei va fi: Ex II 2G d IIB T4, după cum am precizat și în articolul „Electrically actuated valves for gas compression installations located in potentially explosive atmospheres” [29].

În timpul studiilor doctorale, am cercetat dezvoltarea unui dulap de comandă și control certificat ATEX pentru utilizarea în zone periculoase. Aceste unități sunt esențiale pentru plasarea aproape de unitățile de comprimare sau în zone cu potențial exploziv. Ele trebuie să respecte standardele stricte de siguranță ATEX, care includ cerințe precise privind construcția, metodele de protecție, testarea și certificarea. Scopul principal este de a minimiza riscul de scântei sau supratensiuni care pot genera incendii. Astfel de dispozitive contribuie semnificativ la siguranța în medii periculoase..

Datorită normelor ATEX în vigoare, ne este interzisă adăugarea sau eliminarea de elemente din interiorul unui echipament care deține certificare „Ex”, acest fapt ducând la necesitatea recertificării echipamentului. Din acest motiv, **m-am gândit la o a doua soluție pentru pornirea unităților de comprimare** în momentul în care există o presiune ridicată la nivelul conductei de aspirație.

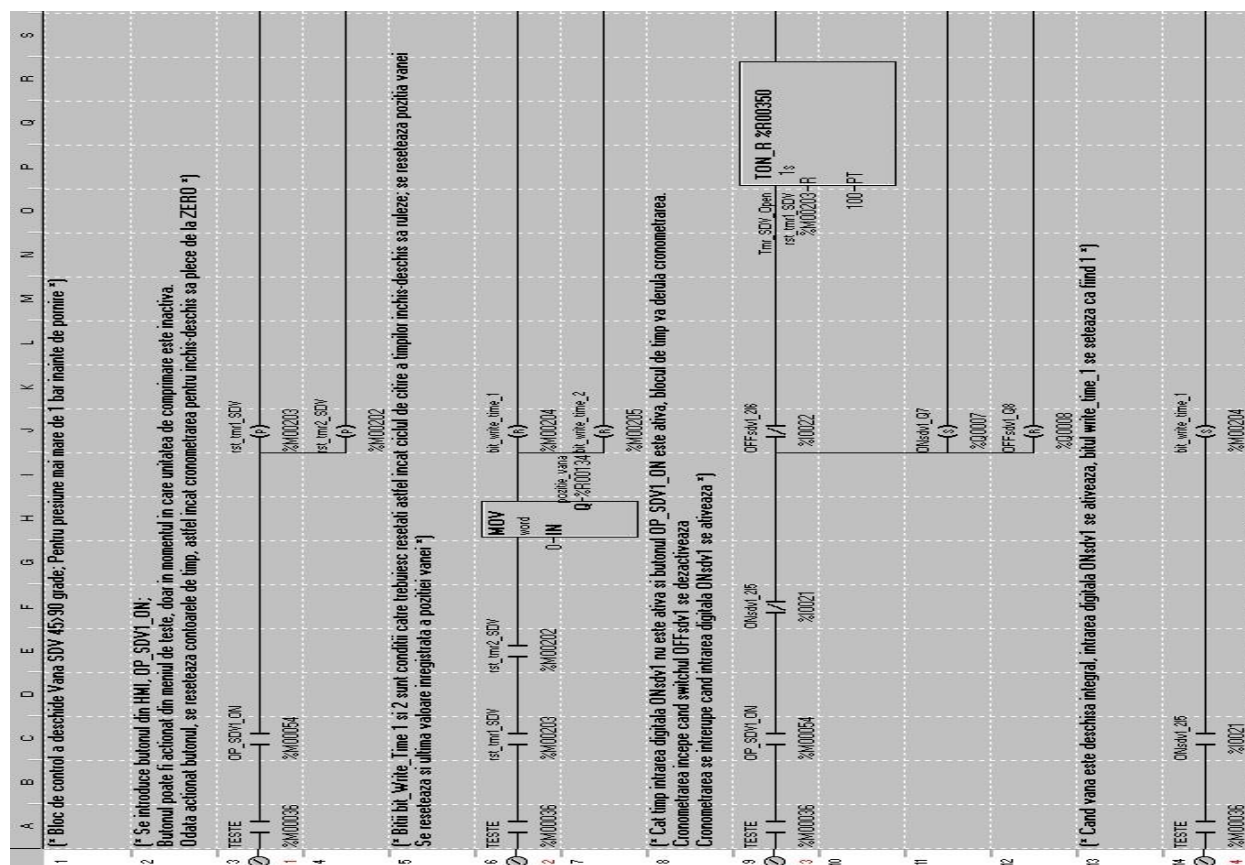


Fig. 30 – Pagina 1 soft pentru pornirea compresorului în condiții de presiune crescută

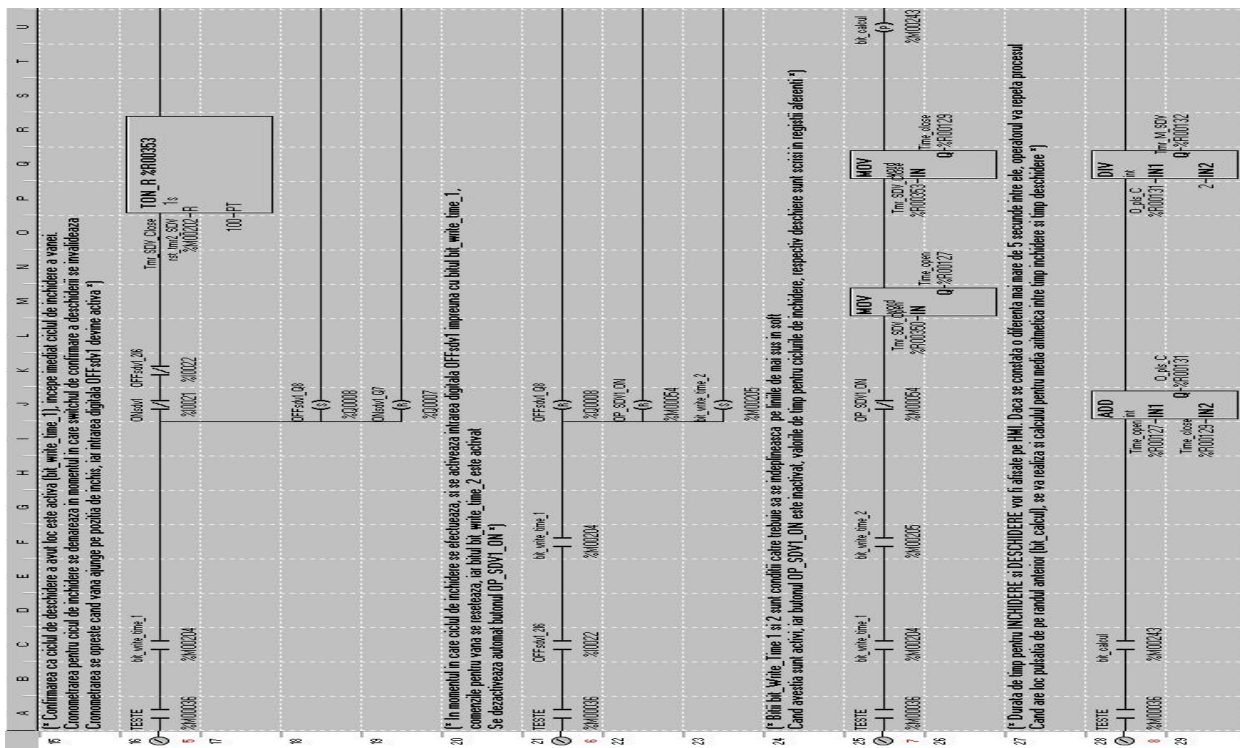


Fig. 31 – Pagina 2 soft pentru pornirea compresorului în condiții de presiune crescută

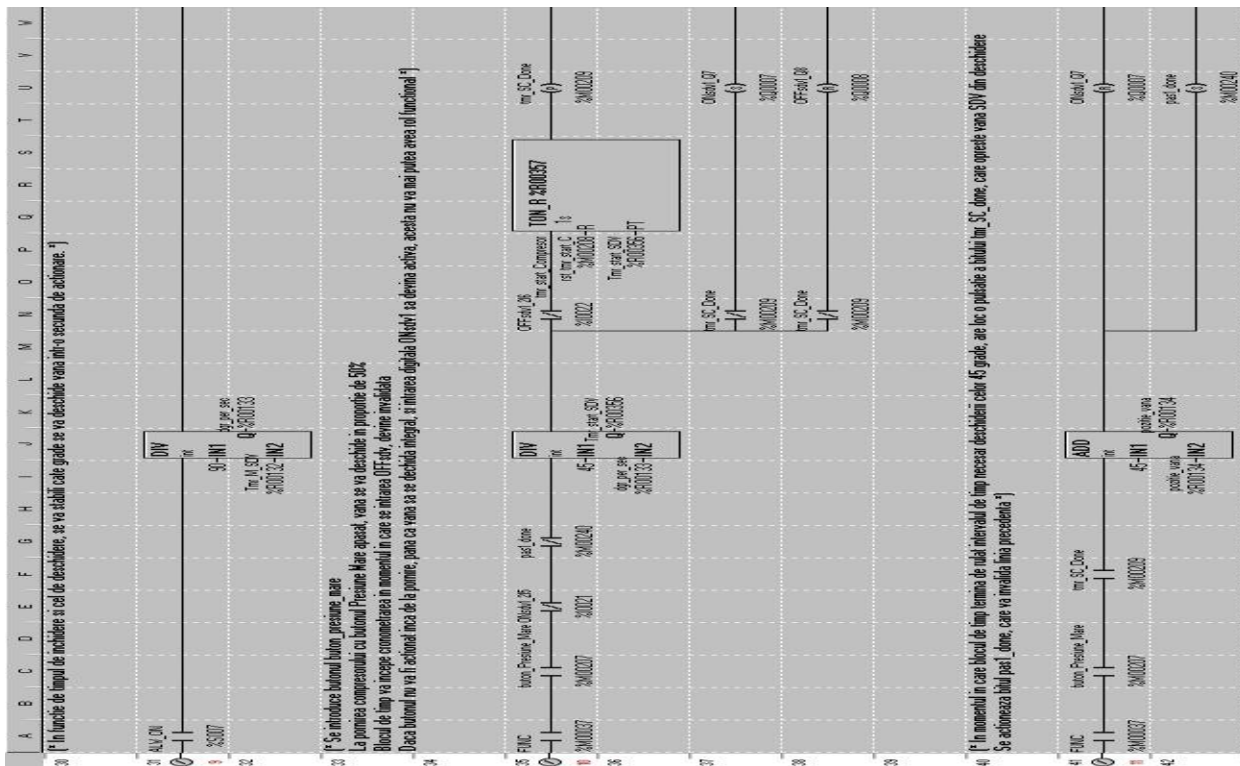


Fig. 32 – Pagina 3 soft pentru pornirea compresorului în condiții de presiune crescută

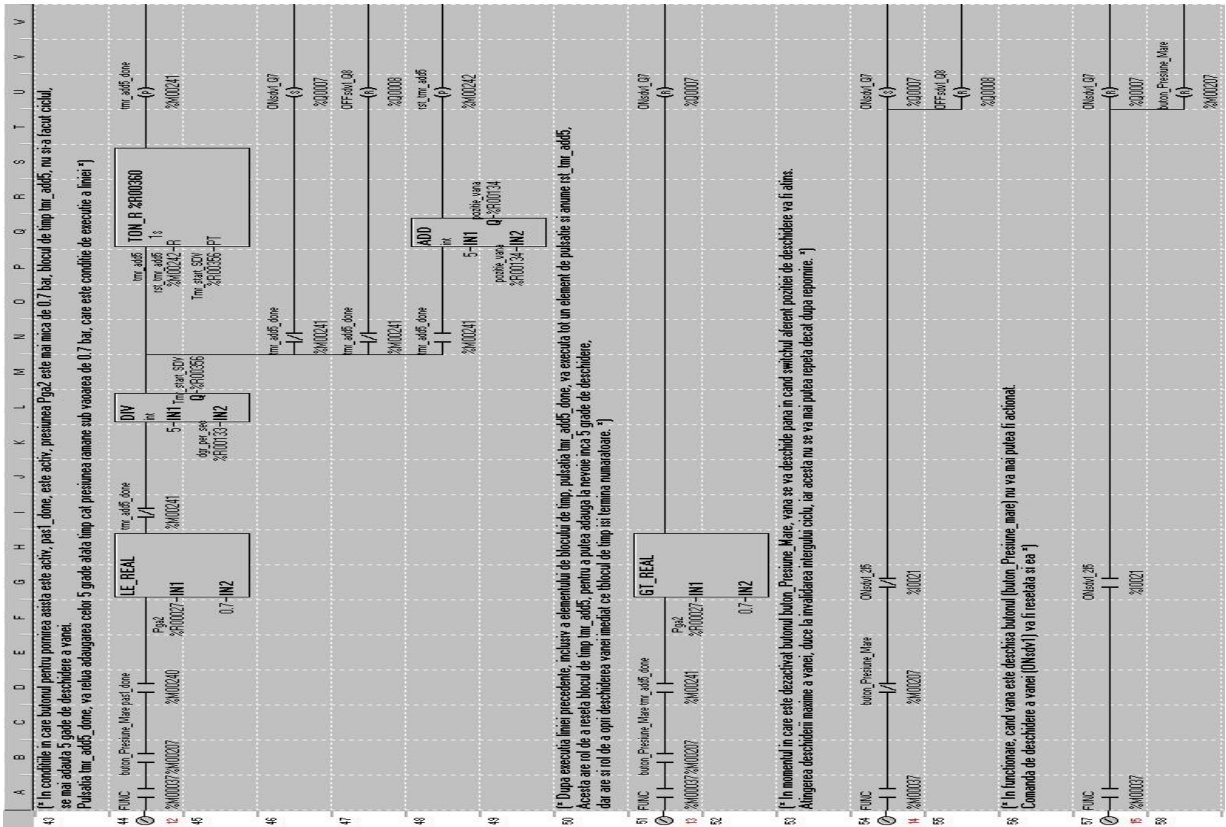


Fig. 33 – Pagina 4 soft pentru pornirea compresorului în condiții de presiune crescută

Am propus o deschidere inițială a valvei la 45 de grade, reprezentând jumătate din deschiderea totală, testată în probele funcționale PIF. Această valoare poate fi ajustată prin software sau pe ecranul HMI, cu o limitare la 20 de grade pentru a evita riscul de vid prelungit la aspirație și pentru a asigura siguranța compresorului.

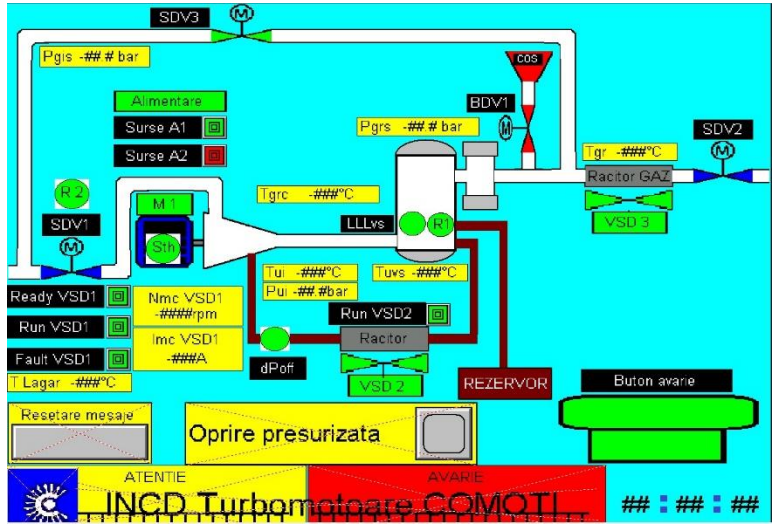


Fig. 34 – Ecranul HMI în modul de funcționare (FUNC) a unitatii de comprimare

Butonul pentru pornirea cu presiune ridicată apare doar pe ecranul stării inițiale “INIT”. După acționarea butonului pornire, pe HMI va apărea ecranul din Fig. 34, unde de aceasta dată observăm că va apărea butonul de opri cu butonul de oprire presurizată. Acest ecran aparține stării de funcționare (FUNC), a compresorului.

Cu ajutorul softului realizat de către mine și prezentat mai sus, se poate realiza o pornire în condiții de siguranță maximă a oricărei unități de comprimare produse de către INCD Turbomotoare COMOTI, fără a mai fi necesară vreo modificare în configurația dulapurilor de automatizare deja existente la beneficiari.

Pot exista desigur foarte multe idei adiacente celor prezentate de către mine în acest capitol. Eu m-am rezumat la realizarea unei configurații software care să se plieze pe anumite nevoi existente în acest moment și de care beneficiarii de electro compresoare din industria OIL & GAS se pot folosi pe viitor, fără a genera costuri foarte mari de intervenție asupra mașinilor aflate în lucru.

6. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII PROPRII

Lucrarea a avut ca scop dezvoltarea sistemelor de automatizare pentru electrocompresoare în România, cu un studiu de caz pe electrocompresoarele produse de INCDT COMOTI. Am pus accent pe construcția dulapurilor de forță și automatizare, controlul vanelor și posibilele aplicații în alte industrii.

Am evidențiat importanța sistemelor de automatizare pentru electrocompresoare, care optimizează performanța și eficiența acestor echipamente. Controlul vanelor contribuie la reglarea fluxului de gaz, îmbunătățind eficiența și reducând impactul asupra mediului.

Cercetarea subliniază necesitatea dezvoltării continue a sistemelor de automatizare pentru electrocompresoare și controlului vanelor în industria gazelor pentru eficiență și sustenabilitate.

6.1 Contributii proprii

Teza de doctorat și-a propus să aducă contribuții în ceea ce privește comanda și controlul ansamblurilor de comprimare cu șurub, produse în România de către INCDT COMOTI.

Voi prezenta în continuare pe scurt contribuțiile originale pe care le aduce teza:

- **Am realizat o analiză pentru a stabili modalitatea prin care semnalele sunt înregistrate de către traductoare și ulterior transmise către un PLC sau o unitate de comandă**, pentru a fi furnizate operatorilor și totodată pentru a putea crea sisteme de comandă și control eficiente și dinamice. Studiul privind stadiul actual și tendințele în tehnologia de instrumentare ale unităților de comprimare. (Cap. 2);
- **Am prezentat o metodă de recoltare a energiei provenită din vibrația echipamentelor**. Recoltarea energiei fiind procesul prin care energia este captată

din sursele de vibrații, cum ar fi mașinile rotative și transformată în energie electrică. (Cap. 2.4.5);

- **Am prezentat cum am participat la un proiect care a avut ca scop realizarea unui ansamblu de comprimare – decompresie gaz (expander)**, împreună cu echipa de cercetători ai secției de Instalații electrice și automatizări, din cadrul INCD Turbomotoare COMOTI, atât la alegerea echipamentelor, cât și la propunerea ecranelor grafice prezente în HMI, pentru o utilizare cât mai ușoară a echipamentelor de către operator, oferind o interfață foarte prietenoasă cu acesta. (Cap. 3);
- **Am prezentat care sunt etapele de realizare a dulapurilor de forță și comandă pentru unitățile de comprimare cu șurub**, produse de către INCDT COMOTI.
- **Am elaborat un sistem de transmitere a informației de poziție** aplicabil la vanele uzuale folosite la ansamblurile de comprimare gaz, proiectând și realizând soluții de comandă atât din punct de vedere hardware cât și software. (Cap. 4);
- **Am prezentat modul în care informația referitoare la poziția de deschidere a vanei este tradusă din poziție mecanică în semnal analogic într-un mod simplificat**, ce probleme pot apărea în timpul transmisiei informației și care sunt calculele care trebuie luate în considerare în momentul în care abordează un astfel de dispozitiv. (Cap. 4);
- **Am urmărit soluțiile identificate pentru posibilă rezolvare a problemelor de funcționare care apar în momentul în care la nivelul aspirației unui compresor este o presiune mai ridicată decât cea admisă de proiectantul mașinii** (Cap. 4.1);
- **Am reușit transformarea unei vane normale, cu acționare închis-deschis prin comenzi de releu, într-o vană cu indicație de poziție**, ceea ce reprezintă un upgrade semnificativ. (Cap. 4.2);
- **Am recomandat folosirea de roți dințate, pentru a citi rezistența transmisă de un potențiomtru, tradusă în informație de poziție**. (Cap. 4.3);
- **Am propus instalarea unui traductor de presiune, care ne va indica presiunea din conducta principală ce furnizează gaz pentru o unitate de comprimare**. Acest traductor va monitoriza tot timpul presiunea din conducta de aspirație, chiar și atunci când compresorul se afla în repaus, pentru a putea estima necesitatea pornirilor controlate ale unităților de comprimare. (Cap. 4.5);
- **Am realizat o serie de teste experimentale care au arătat faptul ca implementarea soluției de transmitere a informației de poziție a unei vane**, cu ajutorul unui potențiomtru și al unui angrenaj de roți dințate este un succes. Au apărut însă anumite probleme legate de reglajul exact al vanei. (Cap. 4.6);
- Cu ajutorul unui software Lader Diagram, utilizat pentru comanda și controlul unei unități de comprimare, **am realizat o buclă de reglaj a vanelor instalate pe unitățile de comprimare produse de către INCDT COMOTI prin implementarea unei ecuații a dreptei**. Aceasta metodă de reglaj, am folosit-o cu succes și pentru comanda motorului care acționează ventilatorul de răcire a uleiului din compresor. În acest caz, referința este dată de un singur traductor care indică

valoarea de temperatură a uleiului la ieșirea din radiator, iar comanda se exercita asupra turației ventilatorului. (Cap. 4.7);

- **Am propus o a doua soluție pentru pornirea unităților de comprimare** în momentul în care există o presiune ridicată la nivelul conductei de aspirație, datorită normelor ATEX în vigoare, ne este interzisă adăugarea sau eliminarea de elemente din interiorul unui echipament care deține certificare „Ex”, acest fapt ducând la necesitatea recertificării echipamentului. (Cap. 5);
- **Am propus diferite modalități de pornire ale unităților de comprimare având presiune ridicată la nivelul conductei de aspirație** (Cap. 5)
- **Cu ajutorul modalității de comandă realizată de către mine și prezentată în teză, se pot realiza porniri în condiții de siguranță maximă a oricărei unități de comprimare, fără a mai fi necesară vreo modificare în configurația dulapurilor de automatizare deja existente la beneficiari.** (Cap. 5)

6.2 Perspective de dezvoltări ulterioare

Rezultatele obținute deschid noi direcții de cercetare și dezvoltare, precum utilizarea în moduri și mai eficiente a compresoarelor cu șurub în regim de expander, sau modalitatea de control a vanelor, iar impactul lor se reflectă în eficiența energetică. Sunt încrezător că aceste concluzii vor fi valorificate în continuare în cercetarea și dezvoltarea viitoare a sistemelor de automatizare în industria oil & gas.

Recunosc că există încă provocări și oportunități de extindere a cercetării în această direcție, iar munca noastră se integrează într-un context mai larg de dezvoltare a soluțiilor tehnologice eficiente și durabile în industria gazelor.

Voi puncta cateva idei de dezvoltari ulterioare care pot fi luate in calcul:

- În continuare, s-ar putea explora metode avansate de colectare și transmitere a semnalelor care provin de la instrumentele de măsură către unitatea de comandă și control. Se poate avea în vedere utilizarea tehnologiilor de transmisie a datelor wireless, pentru o comunicare mai eficientă și rapidă, dar și implementarea sistemelor de monitorizare și control la nivel de IoT (Internet of Things).
- Se pot dezvolta noi funcționalități și caracteristici pentru ecranul grafic HMI, pentru a asigura o experiență de utilizare cât mai intuitivă și eficientă pentru operatori. Se pot adăuga opțiuni de personalizare a interfeței, alarme și notificări interactive, precum și instrumente de analiză și raportare a datelor colectate.
- În continuare, se poate explora utilizarea altor tehnologii și metode de transmitere a informației de poziție, cum ar fi senzori de poziție fără contact sau tehnologii de comunicare digitală. Se poate analiza performanța acestor soluții alternative și integrarea lor în contextul specific al aplicației de control al vanelor.
- Pe baza metodei de reglaj a vanelor și a sistemului de comandă dezvoltat, se pot investiga și implementa noi strategii de control pentru îmbunătățirea performanței

și eficienței unităților de comprimare. Se pot explora algoritmi de control avansați și tehnici de optimizare pentru a obține o funcționare mai precisă și mai fiabilă a sistemului.

- Pentru dezvoltarea ulterioară a tezei, se pot realiza teste și experimente pentru a valida soluțiile propuse și pentru a evalua performanța sistemului în condiții reale. Se pot colecta și analiza datele experimentale pentru a valida teoria și pentru a demonstra eficiența și beneficiile soluțiilor propuse.

6.3 Lista lucrărilor originale

Adrian Stoicescu, Marius Deaconu, Romeo Dorin Hritcu, **Cristian Valentin Nechifor**, Valeriu Alexandru Vilag; „Vibration Energy Harvesting Potential for Turbomachinery Applications” INCAS BULLETIN, Volume 10, Issue 1, pp. 135-148, pp. 2247-4528, ISSN 2066-8201. Jan-March 2018. DOI: 10.13111/2066-8201.2018.10.1.13

Cristian Valentin NECHIFOR, Adrian STOICESCU, Romeo Dorin HRIȚCU. „Wireless Vibration Harvesting System For Turbine Engines” Scientific Journal TURBO, pp. 34-39, ISSN: 2559-608X, June 2018. http://www.comoti.ro/docs/jurnal/TURBO%20Vol%20V_No%201_2018.pdf .

Claudia BORZEA, Daniel COMEAGĂ, Adrian STOICESCU, **Cristian NECHIFOR**. "Piezoelectric Harvester Performance Analysis For Vibrations Harnessing", U.P.B. Scientific Bulletin, Series C Electrical Engineering and Computer Science, vol. 81, iss. 3, pp. 237-248, 2019, ISSN 2286-3540. https://www.scientificbulletin.upb.ro/rev_docs_arhiva/full7e5_563283.pdf

Claudia Borzea, Iulian Vlăducă, Dan Ionescu, Valentin Petrescu, Filip Niculescu, **Cristian Nechifor**, Gabriel Vătășelu, Mihai Hanek. "Compressed Air Energy Storage Installation for Renewable Energy Generation", E3S Web of Conferences, Vol. 112 (2019): 02010. DOI:10.1051/e3sconf/201911202010.

Cristian Nechifor, Valentin Năvrăpescu, Sorin Tomescu, Claudia Săvescu, Mihaela Roman, Rareș Conțiu, Adrian Stoicescu, „Optimizing the Electronic Control of Suction Valves for Gas Compression Units”, Revue Roumaine des Sciences Techniques - Série Électrotechnique et Énergétique, vol. 68, no. 2, pp. 182-187, 2023. <https://journal.iem.pub.ro/rst-ee/article/view/508>. ISSN 0035-4066, IF 0.670.

C. Nicolescu, B. Vărățeanu, A. Stoicescu, **C. Nechifor**, "Electronic improvements made for industrial valve", EEA - Electrotehnica, Electronica, Automatica, Received: 30 June 2020, Vol. 68(3), iulie-septembrie 2020, pp. 5-12. DOI: <https://doi.org/10.46904/eea.20.68.3.1108001>

Cristian Nechifor, Claudia Borzea, Iulian Vlăducă, Ion Mălăel, Filip Niculescu. „Electrically actuated valves for gas compression installations located in potentially explosive atmospheres”, 2020

Cristian Nechifor, Claudia Borzea, Adrian Stoicescu, Daniel Lale, Mirela Vasile, "Modular automation cabinet for proactive monitoring in ATEX Zone 2"; MATEC Web of Conferences, vol. 354, p. 00044, 2022. DOI: 10.1051/mateconf/202235400044 (10th Edition of the International Symposium on Occupational Health and Safety – SESAM 2021, 18 October 2021)

Claudia Săvescu, Valentin Petrescu, Iulian Vlăducă, Daniel Comeagă, **Cristian Nechifor**, Filip Niculescu Theoretical and Experimental Analysis of a Twin-Screw Compressor as Potential Source for Vibration Energy Harvesting Revue Roumaine des Sciences Techniques - Série Électrotechnique et Énergétique, vol. 68, no. ??, pp. ???-???, 2023. Link. ISSN 0035-4066, IF 0.670. *Trimis spre recenzare.*

6.4 Lista lucrărilor din afara ariei de cercetare a tezei

- Valentin Petrescu, Claudia Săvescu, Teodor Stănescu, **Cristian Nechifor**, Mirela Vasile, Sorin Tomescu, Experimental analyses of twin-screw compressors' energetic efficiency depending on the volume ratio 11th International Conference on Thermal Equipment, Renewable Energy and Rural Development (TE-RE-RD 2023), Bucharest, 08-10 June 2023. DOI: ??????. *Trimis spre recenzare.*
- Daniel Lale, Claudia Borzea, Sorina Gogoneață, **Cristian Nechifor**, Mirela Vasile, Filip Niculescu, Monitoring System with Microcontroller for Passengers in Public Transportation Means Scientific Journal TURBO, vol. VIII, no. 2, pp. 4-11 (2021), ISSN 2559-608X. <http://www.comoti.ro/docs/jurnal/Journal%20TURBO%20Vol%20VIII%20No%202%202021.pdf>
- Iulian Vlăducă, Claudia Irina Borzea, Mirela Letiția Vasile, George Iulian Bălan, Adrian Săvescu, Andrei Mitru, Dragoș Filip Niculescu, **Cristian Valentin Nechifor**, Teodor Stănescu, Petre Gabriel Badea, Daniel Ușeriu, Răzvan Ciobanu, Automation Control System for Naval Propulsion Retrofitting 2021 International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE), Craiova, 27-29 May 2021. DOI: 10.1109/ICATE49685.2021.9465065
- Filip Niculescu, Mirela Vasile, Adrian Stoicescu, **Cristian Nechifor**, Comparative analysis between gas turbine and electric combined propulsion EV2019 - Electrical Vehicle International Conference & Show, Bucharest, October 3-4, 2019, DOI: <https://doi.org/10.1109/EV.2019.8893015>
- Adrian Stoicescu, Răzvan Ciobanu, Alexandra Taranu, **Cristian Nechifor**, Filip Niculescu, Hardware in the loop test platform concept for adaptive turbine engine controller Scientific Journal TURBO, vol. VI, no. 2, pp. 6-11, 2019, ISSN 2559-608X.
- Constantin Vilcu, Claudia Borzea, Andrei Mitru, Marian Draghici, Filip Niculescu, **Cristian Nechifor**, Mirela-Letitia Vasile „Power correlation of driving motor for turbo blower with industrial process requirements,, Scientific Journal TURBO, vol. V, no. 2, pp. 4-10, ISSN 2559-608X, Dec. 2018. <http://www.comoti.ro/docs/jurnal/Scientific%20Journal%20Turbo%20Vol%20V%20No%202.pdf>
- Razvan Ciobanu, Adrian Stoicescu, **Cristian Nechifor**, Alexandra Taranu, Self-Learning Control System Concept for APU Test Cells MATEC Web of Conferences, vol. 210 (22nd International Conference on Circuits, Systems, Communications and Computers (CSCC 2018)), Oct. 2018 <https://doi.org/10.1051/matecconf/201821002009>

7. BIBLIOGRAFIE SELECTIVA

- [1] Rolls-Royce plc, 1996 ; The Jet Engine ; Fifth Edition, ISBN 0902121 235 ;
- [2] A. Zilouchian, M. Juliano, T. Healy, J. Davis; 2000; Design of a fuzzy logic controller for a jet engine fuel system; Control Engineering Practice, Vol. 8, No. 8, pp. 873–883;

- [3] J. S. Litt, D. L. Simon, S. Garg; 2005; A Survey of Intelligent Control and Health Management Technologies for Aircraft Propulsion Systems; NASA Glenn Research Center, Cleveland, Ohio, USA;
- [4] "Intelligent Flight Control System"; 2002; NASA Facts, Dryden Flight Research Center;
- [5] Data Acquisition (DAQ) Hardware. National Instruments. Disponibil la: <http://www.ni.com/dataacquisition/>
- [6] Data Acquisition Modules/Cards. Keithley Instruments, Inc. Disponibil la: <http://www.keithley.com/products/dataacqmodules>
- [7] Universal Serial Bus Revision 2.0 Specifications. USB organization, 2006. Disponibil la: www.usb.org
- [8] LabVIEW: 20 Years of Innovation. National Instruments. Disponibil la: <http://www.ni.com/labview/>
- [9] G.W. Johnson, R. Jennings. LabVIEW Graphical Programming, 3rd edition. McGraw-Hill Professional, New York, 2001
- [10] A. Zilouchian, M. Juliano, T. Healy, J. Davis; 2000; Design of a fuzzy logic controller for a jet engine fuel system; Control Engineering Practice, Vol. 8, No. 8, pp. 873–883
- [11] J. S. Litt, D. L. Simon, S. Garg; 2005; A Survey of Intelligent Control and Health Management Technologies for Aircraft Propulsion Systems; NASA Glenn Research Center, Cleveland, Ohio, USA;
- [12] National Instruments, *Complete Guide to Building a Measurement System*, pdf, http://download.ni.com/evaluation/daq/Measurement_System_Build_Guide.pdf;
- [13] EMERSON, *Rosemount™ 214C Temperature Sensors*, pdf, 2017, <http://www.emerson.com/resource/blob/00813-0500-2654-data-80136.pdf>;
- [14] Alan S. Morris, *Measurement and Instrumentation Principles*, Third edition (Butterworth-Heinemann, 2001), pdf, <http://www.computerju.com/Materials/Measurement/Measurement%20and%20Instrumentation%20Principles.pdf>
- [15] Adrian Stoicescu, Marius Deaconu, Romeo Dorin Hritcu, **Cristian Valentin Nechifor**, Valeriu Alexandru Vilag; „Vibration Energy Harvesting Potential for Turbomachinery Applications” INCAS BULLETIN, Volume 10, Issue 1, pp. 135-148, pp. 2247-4528, ISSN 2066-8201. Jan-March 2018. DOI: 10.13111/2066-8201.2018.10.1.13
- [16] **Cristian Valentin NECHIFOR**, Adrian STOICESCU, Romeo Dorin HRIȚCU. „Wireless Vibration Harvesting System For Turbine Engines” Scientific Journal TURBO, pp. 34-39, ISSN: 2559-608X, June 2018. http://www.comoti.ro/docs/jurnal/TURBO%20Vol%20V_No%201_2018.pdf .
- [17] Claudia BORZEA, Daniel COMEAGĂ, Adrian STOICESCU, **Cristian NECHIFOR**. "Piezoelectric Harvester Performance Analysis For Vibrations Harnessing", U.P.B. Scientific Bulletin, Series C Electrical Engineering and Computer Science, vol. 81, iss. 3, pp. 237-248, 2019, ISSN 2286-3540. https://www.scientificbulletin.upb.ro/rev_docs_arhiva/full7e5_563283.pdf
- [18] Claudia Borzea, Iulian Vlăducă, Dan Ionescu, Valentin Petrescu, Filip Niculescu, **Cristian Nechifor**, Gabriel Vătășelu, Mihai Hanek. "Compressed Air Energy Storage Installation for Renewable Energy Generation", E3S Web of Conferences, Vol. 112 (2019): 02010. DOI:10.1051/e3sconf/201911202010.
- [19] Costel Emil Teodoru și Mircea Gogu, „Capitolul V – Mașina asincronă”, în Mașini Electrice (ROTAPRINT Universitatea Tehnică „Gh. Asachi, Iași”, 2010), accesat 21.08.2017, http://www.mircea-gogu.ro/pdf/Curs%20Masini%20electrice/capitolul_V.pdf;

- [20] Adrian A. Adăscăliței, PUTEREA ÎN REțeleLE TRIFAZATE, pdf (Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași), accesat 13.08.2018, http://iota.ee.tuiasi.ro/~aadascal/course1/Cir_3Fazate/a33_Puterea%20in%20rețelele%20trifazate.pdf;
- [21] Maria José Resende, "Sarcini în Sistemele Trifazate" (realizare: Sophie Labrique, traducere: Sergiu Ivanov), Ie.Ucv.Ro, accesat 14.08.2018, http://www.ie.ucv.ro/eLEE/RO/realisations/CircuitsElectriques/SistemasTrifasicos/LigacaoCargas/1_aula.htm;
- [22] Cristinel Hărăguță, Claudia Borzea, Costin Dumitru, Adrian Săvescu, „D1 – Cercetare industrială realizată în colaborare efectivă. Raport parțial 2 – D1-1.2-Documentație de execuție automatizare expander” (Faza 6), PROIECT: Tehnologie inovativă de stocare a energiei în sistem CAES prin utilizarea de compresoare și expandere cu șurub. ROCAES, POC 79, cod lucrare: ROCAES-79-1/PE2, 06.09.2018
- [23] "WM30 - Energy Management Unit by CARLO GAVAZZI | Directindustry", Directindustry.Com, accesat 09.08.2018, <http://www.directindustry.com/prod/carlo-gavazzi/product-6077-697759.html>;
- [24] RFU5003R5 m3/h, "Roof Fan Air Flow 500 M3/H", Eldon.Com, accesat 10.10.2018, <https://www.eldon.com/RFU5003R5-en-Roof fan Air flow 500 m3 h.aspx>;
- [25] EFA250-300R5 filter, "Exhaust Filter", Eldon.Com, accesat 10.10.2018, https://www.eldon.com/EFA250_300R5-en-Exhaust filter.aspx;
- [26] "Automate Programabile", GTS Automatizari, accesat 21.11.2018, <http://gts-automatizari.ro/ro/automatizari/61-automate-programabile.html>;
- [27] **Cristian Nechifor**, Valentin Năvrănescu, Sorin Tomescu, Claudia Săvescu, Mihaela Roman, Rareș Coțiu, Adrian Stoicescu, „Optimizing the Electronic Control of Suction Valves for Gas Compression Units”, Revue Roumaine des Sciences Techniques - Série Électrotechnique et Énergétique, vol. 68, no. 2, pp. 182-187, 2023. <https://journal.iem.pub.ro/rrst-ee/article/view/508>. ISSN 0035-4066, IF 0.670.
- [28] C. Nicolescu, B. Vărățeanu, A. Stoicescu, **C. Nechifor**, "Electronic improvements made for industrial valve", EEA - Electrotehnica, Electronica, Automatica, Received: 30 June 2020, Vol. 68(3), iulie-septembrie 2020, pp. 5-12. DOI: <https://doi.org/10.46904/eea.20.68.3.1108001>
- [29] **Cristian Nechifor**, Claudia Borzea, Iulian Vlăducă, Ion Mălăeș, Filip Niculescu. „Electrically actuated valves for gas compression installations located in potentially explosive atmospheres”, 2020