Universitatea POLITEHNICA din București

ȘCOALA DOCTORALĂ INGINERIE ELECTRICĂ

CONTRIBUȚII LA COMANDA ȘI CONTROLUL UNUI TURBOMOTOR PENTRU APLICAȚII NAVALE

REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT

Autor: Ing. Drd. Dragoș Filip NICULESCU

Conducător științific: Prof. Dr.Ing. Valentin NĂVRĂPESCU

București, 2021

Cuprins

Pag.

Notații și simboluri **5**

INTRODUCERE

1. Obiectivele lucrării de doctorat 7

2. Utilizarea turbomotoarelor în domeniul naval 8

3. Stadiul actual în comanda și controlul turbomotoarelor 11

CAPITOLUL 1

CERCETAREA ȘI DEZVOLTAREA SOLUȚIEI UNUI SISTEM DE COMANDĂ ȘI CONTROL 13

1.1. Elemente privind structura și funcționarea turbomotorului 13

1.2. Ecuațiile turbomotoarelor și formulele de control ale acestora 14

1.3. Contribuții privind controlul vanei de dozare combustibil al turbomotorului ST40M 17

1.4. Elaborarea schemei logice de control a turbomotorului în stările staționare 22

1.5. Elaborarea formulelor de control a vanelor pentru evitarea stărilor de pompaj ale turbomotorului 24

1.6. Elaborare algoritmului de pornire și control al turbomotorului 27

1.7. Elaborarea interfeței operator 31

1.7.1. Ecranul "**Principal**" al sistemului de comandă şi control al turbomotorului **31**

1.7.2. Ecranul „**Parametri**" **32**

1.7.3. Ecranul „**Teste**" **33**

1.8. Contribuții la elaborarea aplicației pentru comanda și controlul turbomotorului 34

CAPITOLUL 2

CONTRIBUȚII LA TESTAREA SISTEMULUI DE COMANDĂ ȘI CONTROL PE STANDUL DE PROBĂ 38

2.1. Descrierea standului experimental pentru testarea turbomotorului 38

2.2. Execuția prototipului sistemului de comandă și control al turbomotorului 40

2.3. Testarea componentelor sistemului de comandă și control al turbomotorului 45

2.3.1. Testarea modulelor de adaptare semnal de poziție vană de dozare combustibil și vane antipompaj **45**

2.3.2. Testarea modulelor de comandă vane **48**

2.3.3. Testarea manetei de comandă putere **49**

2.4. Contribuții privind optimizarea sistemului de comandă și control 55

2.4.1. Optimizarea hardware **56**

2.4.1.1. Eliminarea unei surse de alimentare **56**

2.4.1.2. Eliminarea unui panou operator **58**

2.4.2. Optimizarea ecranelor aplicației **59**

2.5. Analiza rezultatelor experimentale obținute pe stand 60

2.5.1. Comparația algoritmilor de control utilizați **61**

2.5.2. Comparația rutinelor software de control **62**

2.5.3. Comparația rezultatelor experimentale **66**

2.6. Contribuții privind transmiterea la distanță a datelor folosind un OPC server 69

2.6.1. Introducere **69**

2.6.2. Prezentarea aplicațiilor software utilizate **70**

2.6.2.1. Aplicația OPC utilizată **70**

2.6.2.2. Aplicația de comunicare **71**

2.6.3. Configurarea transmisiei de date **72**

2.6.4. Date transmise în Data Center **74**

2.6.5. Concluzii privind transmiterea datelor la distanță folosind un OPC server **75**

CAPITOLUL 3

TESTAREA SISTEMULUI DE COMANDĂ ȘI CONTROL PE NAVĂ 76

3.1. Analiza automatizării controlului turbomotorului de marș de pe navă 76

3.2. Interconectarea sistemului de comandă și control al turbomotorului ST40M cu instalația de propulsie automată a navei 78

3.3. Testarea turbomotorului ST40M conectat la maneta de putere a navei 84

3.4. Reglajul parametrilor de control ai turbomotorului 92

3.5. Elaborarea pachetului de programe pentru panoul operator de control la distanță 94

3.6. Creșterea eficienței energetice prin folosirea turbomotorului propus 98

3.6.1. Comparația între turbomotoarele folosite la propulsia navei **99**

3.6.2. Testele privind funcționarea comparativă a turbomotoarelor ST40M și TYNE RM1C **100**

3.7. Contributii privind imbunătățirea fiabilității prin adăugarea unui modul redundant 103

3.7.1. Introducere **103**

3.7.2. Semnalele redundante oferite de turbomotor **103**

3.7.3. Semnalele redundante achiziționate în plus de modulul secundar **104**

3.7.4. Implementarea controlului redundant **104**

3.7.5. Schema sistemului de control redundant **105**

3.7.6. Conexiunile panoului local redundant cu celelalte echipamente ale sistemului **106**

3.7.7. Descrierea software-ului de panou local redundant **108**

3.7.8. Concluzii privind aplicarea redundanței **109**

3.8. Analiza rezultatelor experimentale obținute pe navă 109

3.8.1. Analiza rezultatelor experimentale obținute la mersul înapoi **110**

3.8.2. Analiza rezultatelor experimentale obținute la accelerații și decelerații **111**

3.8.3. Analiza rezultatelor experimentale obținute la testul de anduranță **112**

3.8.4. Concluzii la testele pe navă **113**

CONCLUZII

1. CONCLUZII GENERALE 113

2. CONTRIBUȚII ORIGINALE 113

3. PERSPECTIVE DE DEZVOLTARE ULTERIOARĂ 115

BIBLIOGRAFIE 116

ANEXE

1. DISEMINAREA REZULTATELOR CERCETĂRII 117

1.1 Lucrări în domeniul sistemelor de comandă și control ale turbomotoarelor 117

1.2 Alte lucrări publicate 117

2. PREMII OBȚINUTE 118

Cuvinte cheie turbomotor, propulsie eficientă, sistem de control automat, motor turboprop, combustibil diesel, echipament marin

Notații și simboluri

CPU:	**C**entral **P**rocessing **U**nit (Unitate de procesare centrală)
I/O:	**I**nput/**O**utput (Intrare/Ieșire)
LCD:	**L**iquid **C**rystal **D**isplay (Afișor cu cristale lichide)
LED:	**L**ight **E**mitting **D**iode (Diodă electroluminiscentă)
PC:	**P**ersonal **C**omputer (Calculator personal)
UPS:	**U**ninterruptible **P**ower **S**upply (Sursă de alimentare cu acumulator)
LCP:	**L**ocal **C**ontrol **P**anel (Panou de control local)
PLC	**P**rogammable **L**ogic **C**ontroller (Automat programabil)
DCS	**D**istributed **C**ontrol **S**ystem (Sistem distribuit de control)
SCADA	**S**upervisory **C**ontrol **a**nd **D**ata **A**cquisition (Sistem de control și achiziție de date)
HMI	**H**uman **M**achine **I**nterface (Interfață operator)
ITT	**I**nter **T**urbine **T**emperature (Temperatură gaze de evacuare între turbine)
FMU	**F**uel **M**etering **U**nit (Modul de dozare combustibil)
SCC	**S**istem de **C**omandă și **C**ontrol
JB	**J**unction **B**ox (Cutie de Joncțiune)
FADEC	**F**ull **A**uthority **D**igital **E**ngine **C**ontrol (Control digital al motorului)
LVDT	**L**inear **V**ariable **D**ifferential **T**ransformer (Transformator diferențial variabil liniar)
TPC	**T**ouch **P**anel **C**omputer (Calculator cu ecran senzitiv)
OP	**O**perator **P**anel (Panou operator)
OPC UA	**O**pen **P**latform **C**ommunication **U**nified **A**rchitecture (Platformă de comunicație deschisă cu arhitectură unificată)
XDC	Poziția vanei de dozare combustibil, în procente
PQC	Comanda motorului vanei de dozare combustibil
NH	Turația compresorului de înaltă presiune
NL	Turația compresorului de joasă presiune
NTP	Turația turbinei de putere
XV2.2	Poziția vanei antipompaj P2.2
PV2.2	Comanda motorului vanei antipompaj P2.2

INTRODUCERE

Teza de doctorat are ca obiectiv să cerceteze, proiecteze și să realizeze un sistem de comandă și control destinat unui turbomotor pentru aplicații navale. Autorul tezei de doctorat își propune să aducă o importantă contribuție în cadrul acestui proces de realizare a unei propulsii moderne care să înlocuiască o propulsie veche și scoasă din uz de la bordul unor nave. Aceste cercetări vor contribui la modernizarea comenzii și controlului propulsiei, la scăderea consumului de combustibil și la reducerea costurilor cu deplasarea navelor.

În cadrul acestei lucrări autorul analizează stadiul utilizării turbomotoarelor pentru aplicații navale pe plan mondial, precum și particularitățile sistemelor de comandă și control ale acestora. Analiza ecuațiilor funcționării turbomotorului va determina relațiile de control și execuția prototipului. Sistemul de comandă și control este particularizat pentru turbomotorul **ST40M**. Efectuarea de teste pe standul de probă va impune validarea funcționării turbomotorului în parametrii optimi.

În momentul obținerii unor rezultate bune pe standul de probă se va face transferul sistemului de comandă și control împreună cu turbomotorul pe navă. La finalul muncii de adaptare a sistemului de comandă și control la configurația de control automată a navei, vor fi efectuate un număr de probe reale cu nava în diferite moduri de funcționare. Rezultatele acestor probe vor valida funcționarea sigură și eficace a sistemului de comandă și control în configurația de propulsie a navei.

CAPITOLUL 1

CERCETAREA ȘI DEZVOLTAREA SOLUȚIEI UNUI SISTEM DE COMANDĂ ȘI CONTROL

Turbomotorul ST40M este un turbomotor cu turbină liberă derivat din motorul PW150A. Puterea dezvoltată prin arderea combustibilului lichid în camera de ardere este furrnizată la o turbină de putere, care poate fi cuplată printr-un reductor la elicea navei.

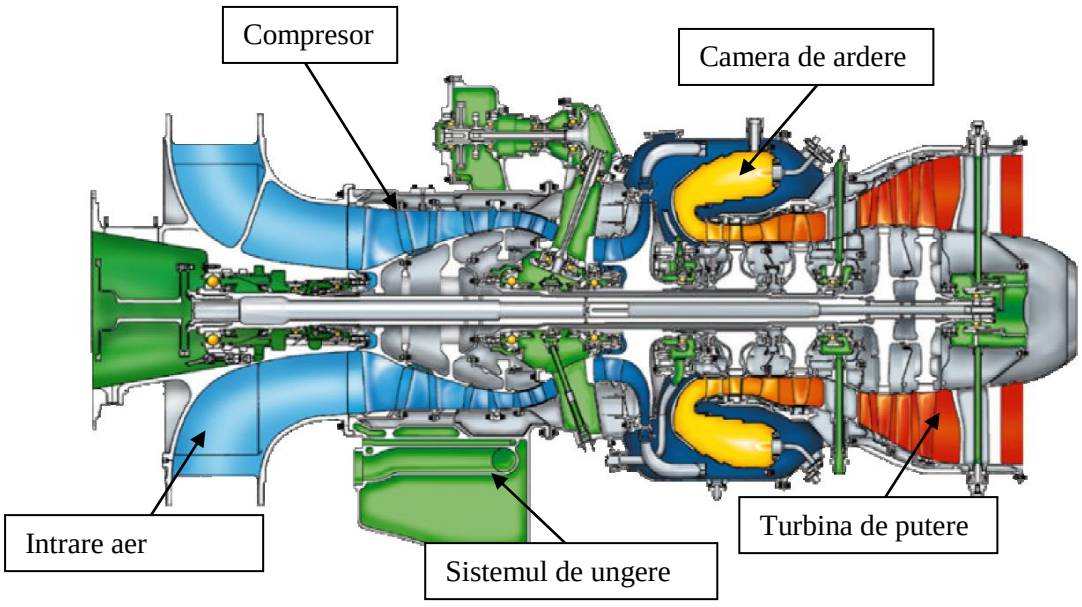


Fig.1.1 Secțiune prin turbomotorul ST40M [1]

Turbomotorul (Fig.1.1) se compune dintr-un compresor axial în trei trepte și unul centrifugal cu o treaptă, camera de ardere, turbina de putere cu două trepte, sistemul de combustibil, sistemul de aprindere, sistemul de ungere, cutia pentru accesorii, cablaj și traductoare.

1.1. Ecuațiile turbomotoarelor și formulele de control ale acestora

La motoarele birotoare parametrul reglat este turația grupului turbocompresor de înaltă presiune **NH**. Factorul de reglare este debitul de combustibil **Mc** din camera de ardere. Drept punct de plecare pentru elaborarea schemei de principiu a regulatoarelor și a elementelor sistemului de combustibil, sunt caracteristicile ce dau variația diferiților parametri în funcție de parametrul reglat.

În cazul legilor de reglare un interes deosebit îl reprezintă funcțiile de tip produs de parametri la puteri reale, un exemplu fiind cel de mai jos [2]:

$$M_{c0}=\mathrm{K}\times n_0 \times p_{20} \qquad (1.1)$$

1.2. Contribuții privind controlul vanei de dozare combustibil al turbomotorului ST40M

Turbomotorul ST40M nu are în această aplicație regulatorul electronic inclus. Semnalele de comandă și control pentru turbomotor vor fi generate de un panou de control local.

Algoritmul de pornire și control pe care l-am elaborat ține cont de particularitățile turbomotorului. Acționarea elementelor de execuție se face într-o anumită ordine, determinată de timpul necesar admisiei și aprinderii amestecului de carburant cu aer, precum și de dozarea combustibilului pentru asigurarea unor regimuri dorite de funcționare.

Figura 1.2 prezintă o secțiune prin dozatorul de combustibil de pe turbomotor, care controlează debitul de combustibil în camera de ardere.

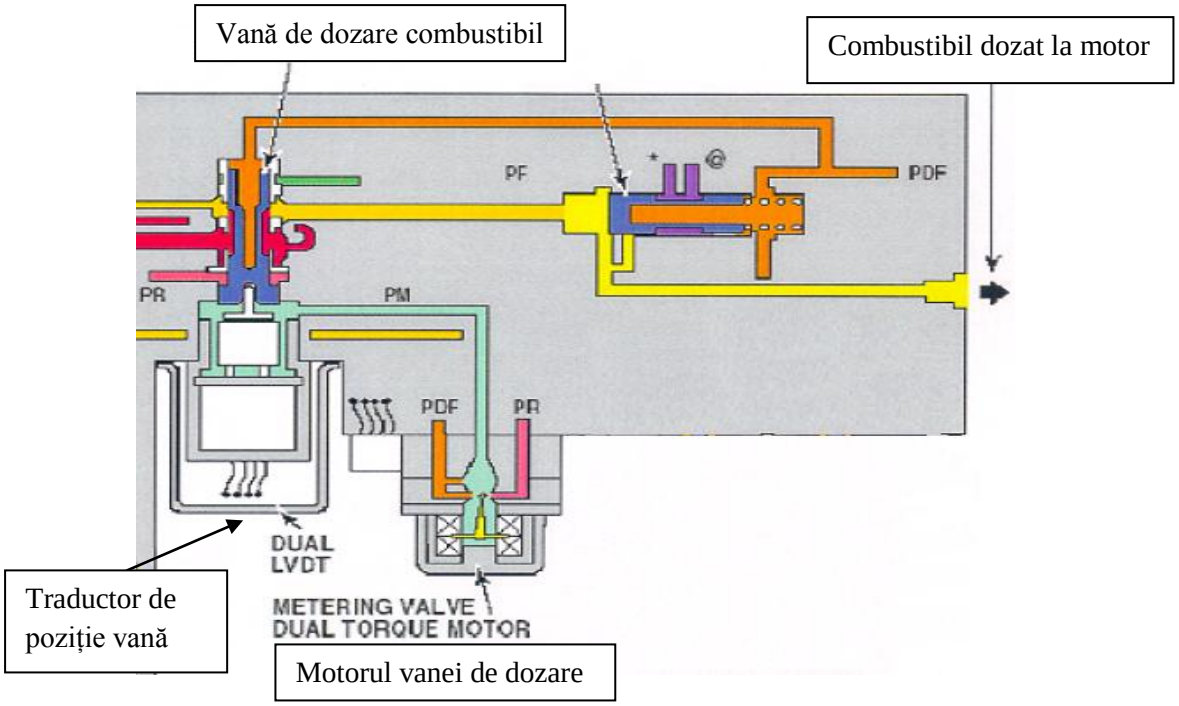


Fig. 1.2 Secțiune prin componenta Fuel Metering Unit – FMU (dozator combustibil turbomotor ST40M)

Reglarea debitului de carburant se realizează prin acționarea motorului vanei de dozare.

Poziția vanei de dozare combustibil, este citită de un traductor LVDT (Linear Variable Differential Transformer- Transformator diferențial variabil liniar) și este exprimată în procente.

Între vana de dozare și motorul vanei de dozare combustibil nu există decât o legatură prin intermediul presiunii de combustibil.După testarea mai multor variante am obținut ecuațiile:

$$\Delta XDC = XDC0 - XDCN\ [\%] \quad (1.2)$$

$$\Delta PQC = 0.08 \times \Delta XDC\ [\%] \quad (1.3)$$

$$PQC_n = 5.6 + \Delta PQC\ [\%] \quad (1.4)$$

Graficul în acest caz, arată ca în figura următoare:

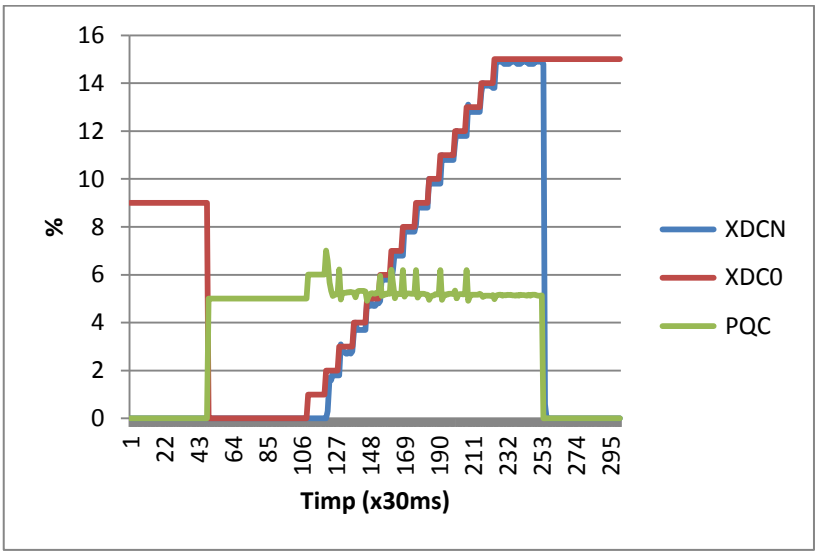


Fig.1.3 Graficul poziției vanei de dozare și comenzii motorului vanei de dozare combustibil

Prin adăugarea termenului constant +5.6 din ecuația 1.4, obținem o imbunătățire remarcabilă a reglajului vanei de dozare combustibil și anume:

- Nu mai există o zonă moartă între cerința de poziție, XDC0, și rezultatul obținut XDCN, acesta din urmă crescând odată cu semnalul XDC0;
- Între cele două semnale nu mai există decalaj;
- Reglajul de poziție este foarte precis, o poziție impusă este reprodusă fidel de poziția actuală a vanei de dozare combustibil.

În concluzie, am obținut un rezultat foarte important. Reglarea poziției vanei de combustibil a deschis posibilitatea **reglării precise a combustibilului și obținerea regimurilor dorite de funcționare ale turbomotorului**.

1.3. Elaborarea schemei logice de control a turbomotorului în stările staționare

Soluția propusă a fost implementarea unui regulator de tip proporțional, dar care are factorul de proporționalitate variabil cu mărimea abaterii staționare. Aceste formule sunt următoarele :

La fiecara $\Delta t = 0.2$ sec se calculează abaterea turației compresorului de înaltă presiune, NH, față de turația de referință, NHref:

$$\Delta NH = NHref - NH \quad (1.5)$$

Factorul de proporționalitate este variabil și depinde de abaterea față de turația NHref.

Se verifică:

- Dacă [ΔNH] < 30 rpm, atunci

$$KNH = 0.0002 \quad (1.6)$$

- Dacă 30< [ΔNH] > 70 rpm, atunci

$$KNH = 0.0005 \quad (1.7)$$

- Dacă [ΔNH]>70 rpm, atunci

$$KNH = 0.0008 \quad (1.8)$$

Se calculează:

$$\Delta XDCC = KNH \times \Delta NH \quad (1.9)$$

Pentru a evita accelerarea rapidă a turbomotorului, ceea ce poate duce la probleme mecanice, se limitează creșterea abaterii poziției vanei de dozare combustibil ΔXDCC prin fixarea valorii maxime.

-Dacă NH<25 500 rpm, atunci

$$KN = 0.4 \quad (1.10)$$

-Dacă NH> 25 500 rpm, atunci

$$KN = 0.2 \quad (1.11)$$

-Se verifică:

- dacă ΔXDCC > KN [%], atunci

$$\Delta XDCC = KN[\%] \quad (1.12)$$

- dacă ΔXDCC< - KN [%], atunci

$$\Delta XDCC = -KN[\%] \quad (1.13)$$

Se calculează poziția de referință a vanei de dozare combustibil, XDC0:

$$XDC0 = XDC_{n-1} + \Delta XDCC \quad (1.14)$$

Am elaborat schema logică a controlului combustibilului în stările staționare ale motorului, care se bazează pe ecuațiile propuse, 1.5...1.14, pentru controlul debitului de combustibil în funcție de turația compresorului de înaltă presiune NH impusă.

1.4. Elaborarea formulelor de control a vanelor pentru evitarea stărilor de pompaj ale turbomotorului

Pentru a evita anumite regimuri instabile de funcționare ale motorului, caracterizate prin inversarea sensului de curgere a aerului prin compresor, stare cunoscută sub denumirea de pompaj, se acționează cele două vane prevăzute în acest scop: P2.2 și P2.7.

Vana P2.2 la pornirea motorului este deschisă și pe masură ce crește turația compresorului de joasă presiune NL, aceasta se închide după o curbă dată de următoarea secvență de program.

La fiecara Δt = 0.4 secunde se calculeză turația compresorului de joasă presiune NL, corectată cu temperatura:

$$NLC = \frac{NL}{\sqrt{\frac{273+T1}{288}}} \quad (1.15)$$

Se calculează și se atribuie, în funcție de NLC, valoarea poziției de referință XV2.20 a vanei antipompaj P2.2 astfel:

Dacă NLC< 20 900 rpm, atunci:

$$XV2.20 = 105\ [\%] \tag{1.16}$$

Dacă 20900< NLC< 22000 rpm, atunci:

$$XV2.20 = 1696 - 0.076 \times NLC\ [\%] \tag{1.17}$$

Dacă 22000<NLC<23200 rpm, atunci:

$$XV2.20 = 552 - 0.024 \times NLC\ [\%] \tag{1.18}$$

Dacă NLC > 23200 rpm, atunci:

$$XV2.20 = -10\ [\%] \tag{1.19}$$

În timpul rulării programului de control al turbomotorului, după calculul valorii de referință, se generează semnalul de control al motorului vanei antipompaj P2.2, prin intermediul secvenței XV2.2, care constă în:

Calculul abaterii poziției vanei:

$$\Delta XV2.2 = XV2.20 - XV2.2N\ [\%] \tag{1.20}$$

Calculul abaterii semnalului motorului vanei:

$$\Delta PV2.2 = -0.09 \times \Delta XV2.2\ [\%] \tag{1.21}$$

Calculul coeficientului semnalului motorului vanei, CV22:

- dacă NLC <21000 rpm, atunci:

$$CV22 = 5.4 \tag{1.22}$$

- dacă NLC >21000 rpm, atunci:

$$CV22 = 0.001862 \times NLC - 32.77 \tag{1.23}$$

Calculul semnalului motorului vanei:

$$PV2.2 = CV22 \times \Delta XV2.2\ [\%] \tag{1.24}$$

1.5. Elaborarea algoritmului de pornire și control al turbomotorului

Algoritmul conceput de pornire și control l-am elaborat ținând cont de particularitățile turbomotorului. Acționarea elementelor de execuție se face într-o anumită ordine determinată de timpul necesar admisiei și aprinderii amestecului carburant, precum și dozarea acestuia pentru asigurarea unor regimuri dorite de funcționare. Graful de trecere dintr-o stare în alta este prezentat în Fig. 1.4.

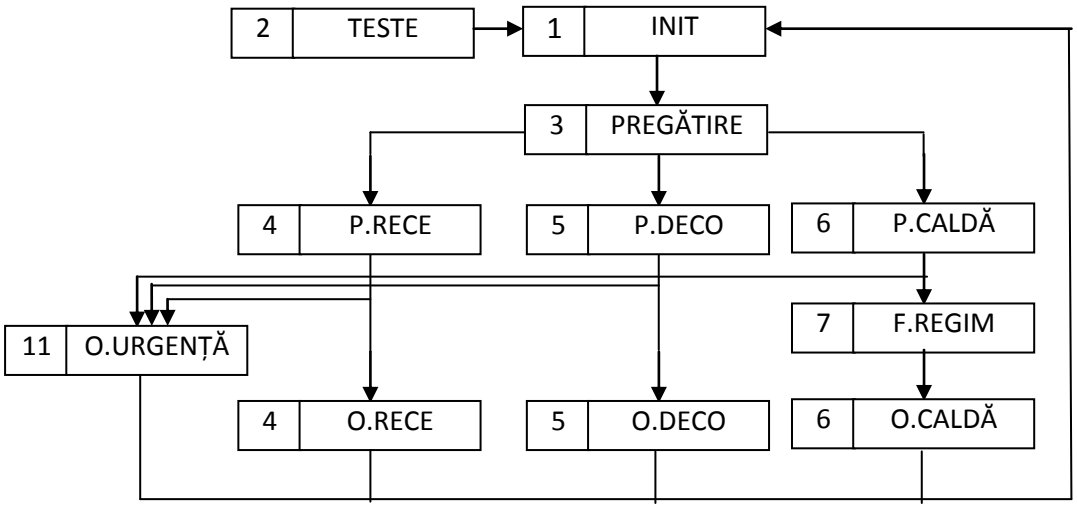


Fig.1.4 Graf stări turbomotor

În funcție de condițiile de pornire se distinge: Pornire Rece, Pornire Deco și Pornire Caldă.

1.6. Elaborarea interfeței operator

Elaborarea interfeței cu operatorul a sistemului de comandă și control al turbomotorului ține cont de parametrii afișați, butoanele de control, afișarea stării turbomotorului, afișarea mesajelor. În acest scop am gândit și creat 3 ecrane:

- Ecranul principal;
- Ecranul parametri;
- Ecranul teste.

Am proiectat arhitectura ecranului **„Principal”** (Fig.1.5) cu scopul oferirii tuturor informațiilor necesare operării turbomotorului.

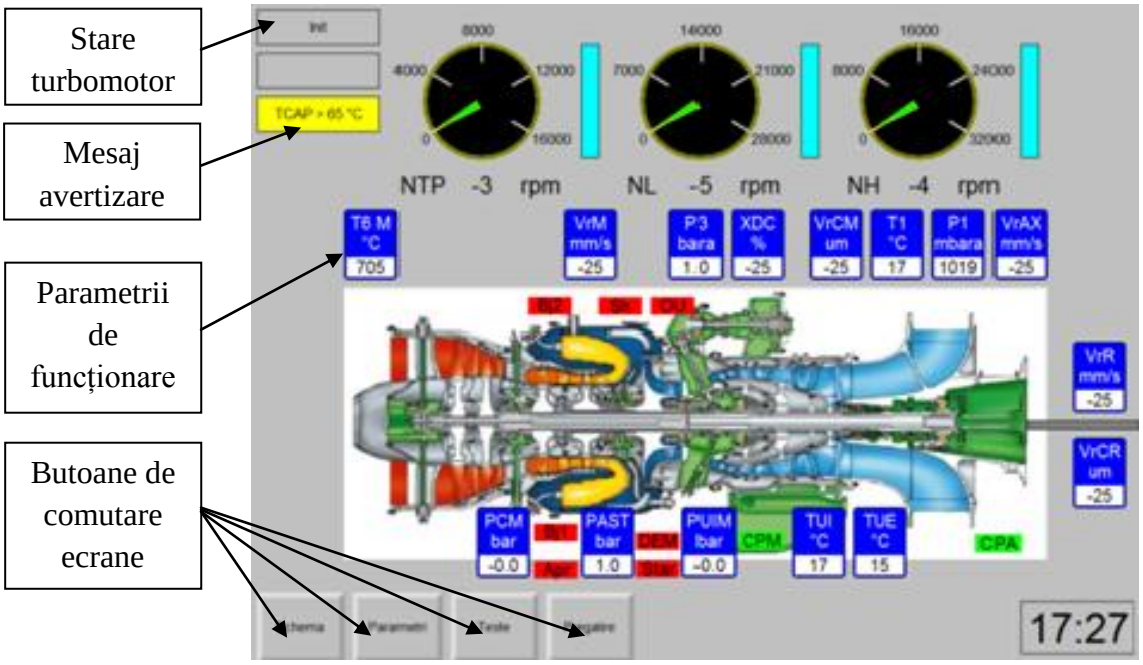


Fig.1.5 Ecranul principal al sistemului de comandă și control

Pe ecranul principal (Fig.1.5) se află indicatoare și butoane necesare controlului și supravegherii turbomotorului naval. În partea superioară sunt poziționate indicatoarele principale de turație ale motorului:

NTP – turația turbinei de putere,

NL – turația compresorului de joasă presiune,

NH – turația compresorului de înaltă presiune.

Parametrii sunt indicați atât analogic, prin ceas și bară, cât și digital.

1.6.1. Ecranul „Parametri”

L-am conceput în scopul prezentării grupat a informațiilor despre parametrii de funcționare ai turbomotorului.



Fig.1.6 Ecranul „Parametri”

Ecranul **„Parametri”** (Fig.1.6) prezintă grupați pe categorii (aer, turații, ulei, vibrații, combustibil) principalii parametri ai turbomotorului. Fiecare parametru este reprezentat prin simbol, mărime numerică și unitate de măsură.

În partea de jos sunt definite butoanele de comutare ecrane și ceasul sistemului.

În stânga sus este afișată starea turbomotorului.

1.6.2. Ecranul „Teste”

L-am conceput în scopul testării echipamentelor turbomotorului.

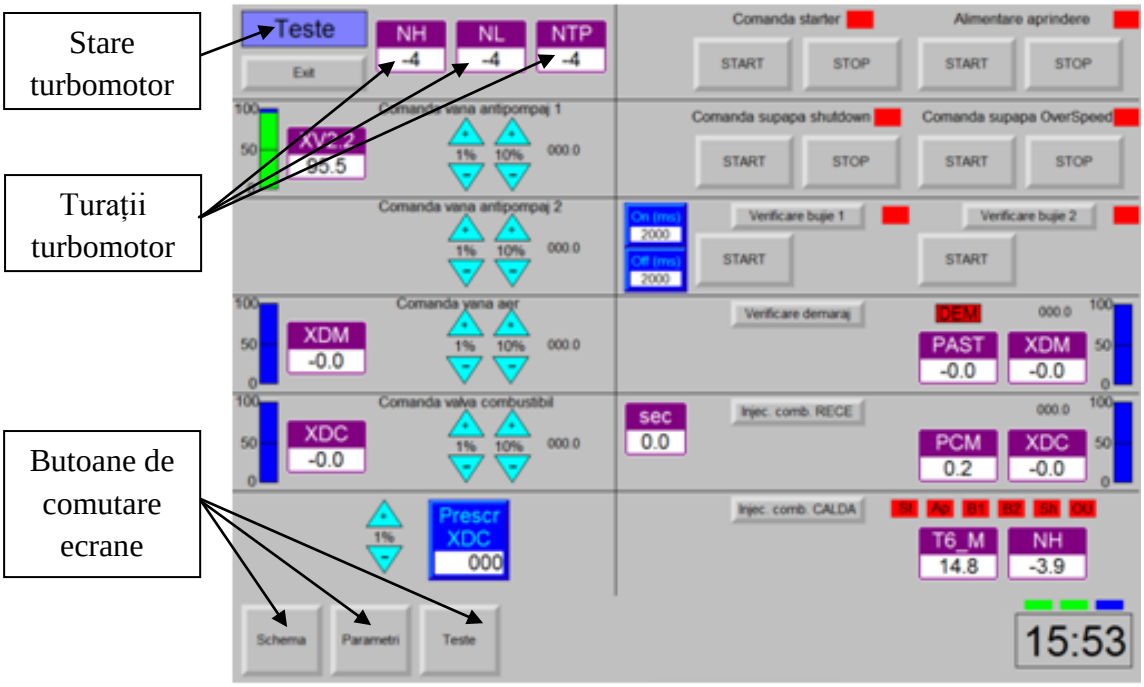


Fig.1.7 Ecranul „**Teste**”

Cu ajutorul acestui ecran (Fig.1.7) se pot testa diferite echipamente ale turbomotorului.

Crearea acestor ecrane a însemnat un câștig deosebit de important deoarece din aceste ecrane se poate monitoriza și controla turbomotorul.

1.7. Contribuții la elaborarea aplicației pentru comanda și controlul turbomotorului

Aplicația de comandă și control a turbomotorului reprezintă pachetul de programe încărcat în memoria PLC. Structura aplicației, figura 1.8, este formată dintr-o funcție principală – **_MAIN** – care cheamă rutinele care execută fiecare o funcție importantă a sistemului de comandă și control.

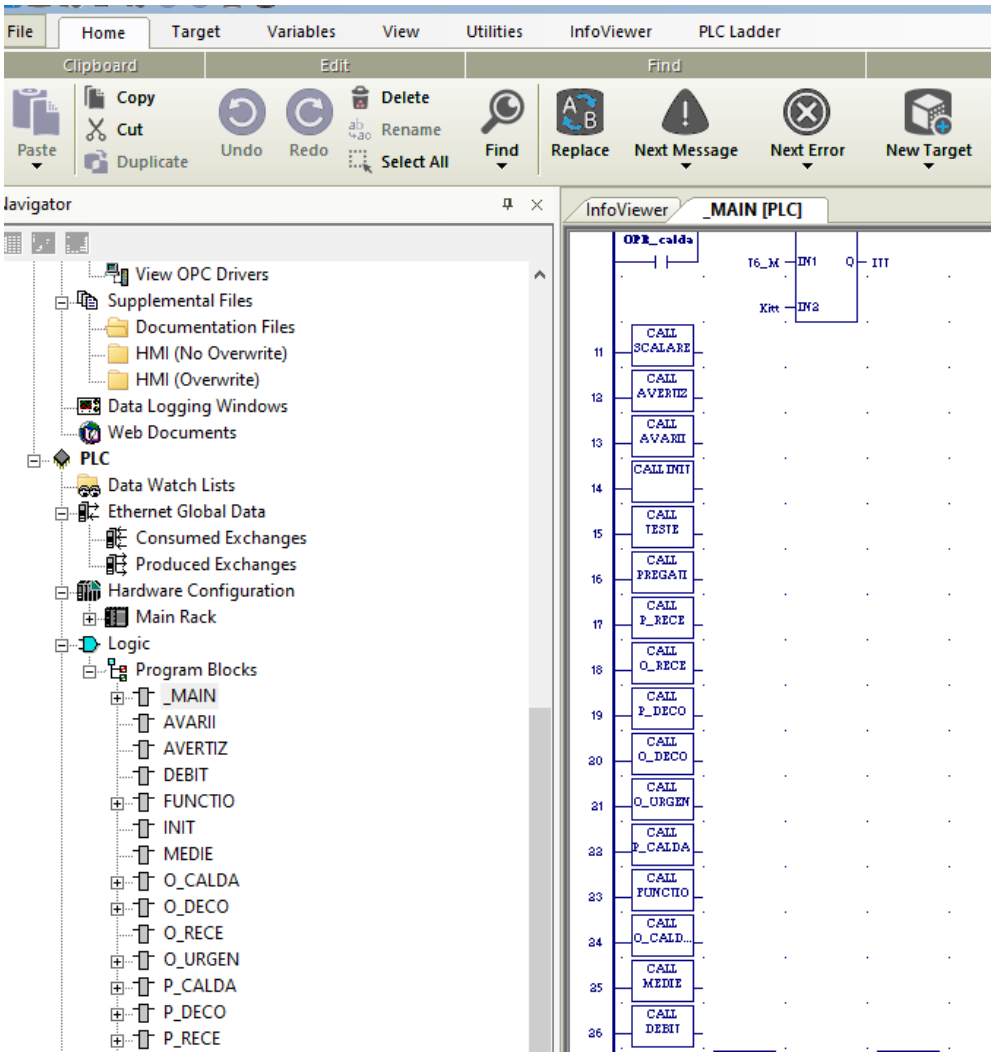


Fig.1.8 Structura funcției **_MAIN**

Rutinele execută:

- controlul turbomotorului: pornire P_CALDA, P_DECO, P_RECE, funcționare FUNCTIO, oprire O_CALDA, O_DECO, O_RECE, O_URGEN;
- operații în anumite stări ale motorului: INIT, PREGATIRE, TESTE;
- comparații: AVERTIZ, AVARII;
- calcule: SCALARE, MEDIE, DEBIT.

Prima rutină apelată de funcția principală **_MAIN** este **SCALARE**. Această rutină are rolul de a scala parametrii de intrare astfel încât să poată fi folosiți în memoria internă a CPU.

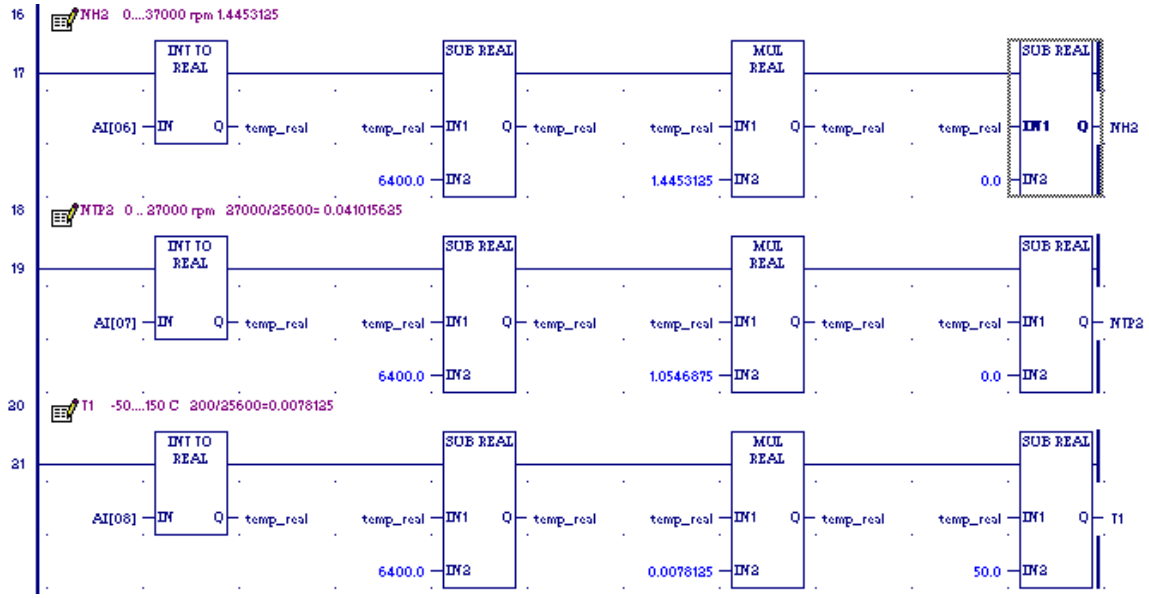


Fig.1.9 Structura funcției **SCALARE**

Pentru primul parametru aflat la rândul 17, primul modul **INT TO REAL** convertește valoarea citită pe intrarea analogică 6 – AI(06), dintr-un număr întreg într-un număr real, pentru a permite prelucrarea ulterioară. A doua operație care se efectuează de către modulul **SUB REAL** este scăderea din numărul obținut la pasul anterior a numărului real 6400. Acest lucru se face pentru că modulul hardware **IC200ALG264,** folosit pentru achiziția analogică, este programat pentru gama 0-20 mA, pentru a detecta valori de curent sub 4 mA, în cazul liniei de măsură întrerupte. Semnalul prelucrat ia valori în gama 4-20 mA, de aceea din valoarea achiziționată se scade 6400, cât corespunde valorii de 4 mA. Modulul următor, **MUL REAL,** multiplică valoarea obținută cu un factor rezultat ca raport, între mărimea reprezentată, **NH (rpm)** și numărul de biți pe care se reprezintă, 25600. Ultimul modul de scădere, **SUB REAL**, efectuează o deplasare a valorii obținute când mărimea scalată poate fi negativă ca în cazul temperaturii de la randul 21.

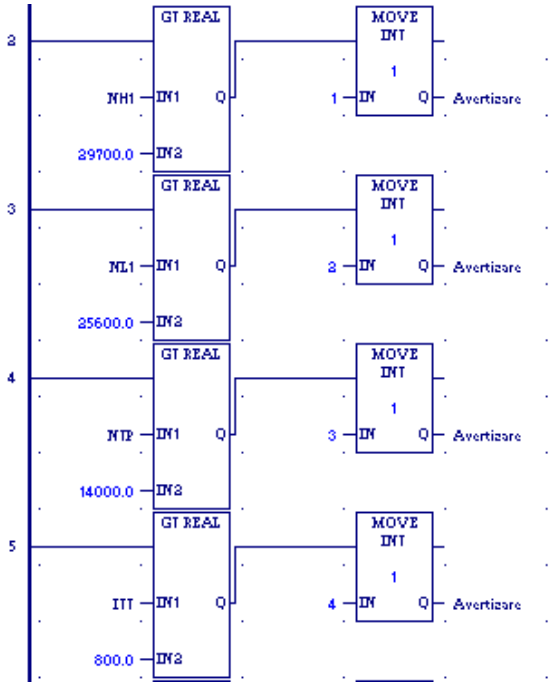


Fig.1.10 Structura funcției **AVERTIZ**

O altă funcție importantă pe care am creat-o este rutina **AVERTIZ**, figura 1.10, pentru a semnaliza o avertizare în cazul anumitor parametrii. În această rutină pentru fiecare parametru valoarea lui reală se compară la fiecare rulare a programului din PLC cu valoarea de referință, prin intermediul modulului software **GT REAL**, din biblioteca programului Proficy. Acest modul stabilește dacă NH1>29700, așa cum se poate observa în figura 1.10, rândul 2. Dacă comparația este adevarată starea ieșirii Q trece din 0 în 1, ceea ce determină modulul următor **MOVE INT** să copieze în celula de memorie *Avertizare* valoarea intreagă de pe intrarea **IN**. Astfel *Avertizare* poate lua valoarea 1, 2, 3,4 ș.a.m.d și în funcție de această valoare aplicația din panoul operator afișează un mesaj de avertizare.

Când se depășește pragul de protecție, pentru a proteja turbomotorul, el este oprit de urgență cu ajutorul funcției **AVARII**.

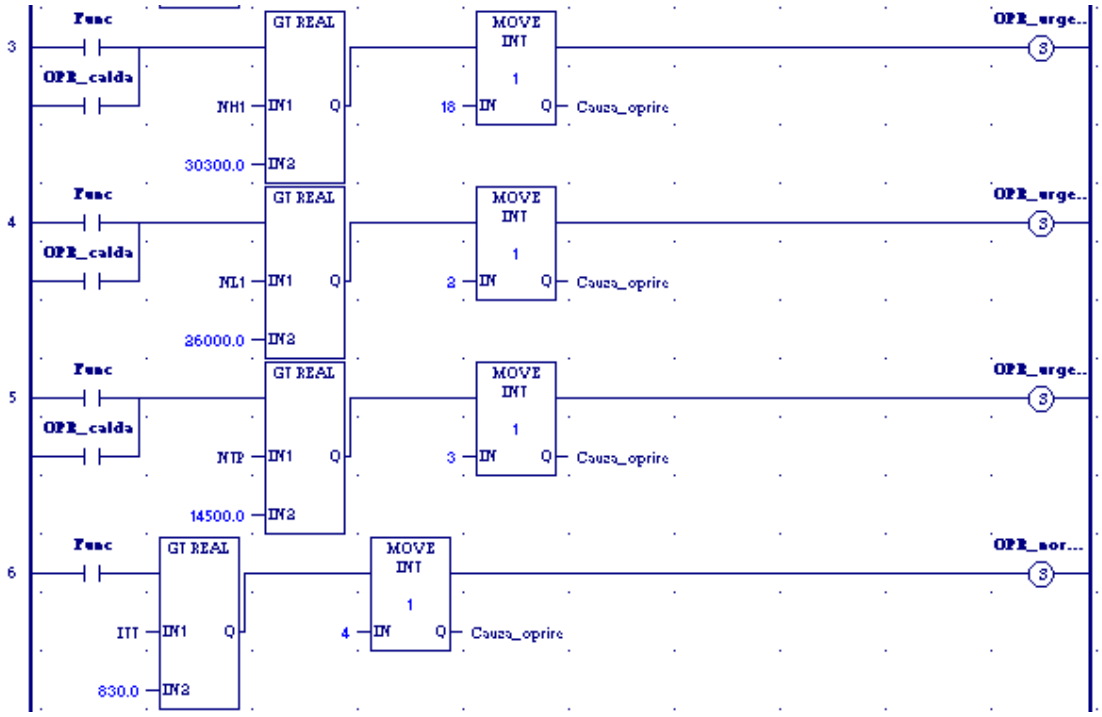


Fig.1.11 Structura funcției **AVARII**

Pentru turația **NH** rutina funcționează astfel:

- Dacă contactul normal deschis, **Func** sau contactul normal deschis, **OPR_caldă** sunt activate se face comparația;
- În modulul **GT REAL** se compară valoarea parametrului NH1 cu valoarea reală 30300;
- Dacă NH1>30300.0 ieșirea Q a comparatorului este transmisă de modulul **MOVE INT** către solenoidul S **OPR_urgență** care este activat, iar în paralel celula de memorie, **Cauza_oprire,** este setată la valoarea 18;
- Activarea solenoidului S **OPR_urgenta** determină execuția subrutinei **O_URGENTA** (vezi figura 1.11 randul 21);
- Aplicația din panoul operator afișează pe ecran mesajul corespunzător opririi de urgență cu codul 18.

CAPITOLUL 2

CONTRIBUȚII LA TESTAREA SISTEMULUI DE COMANDĂ ȘI CONTROL PE STANDUL DE PROBĂ

Turbomotorul ST40M, utilizat pentru aplicații navale, a fost testat într-un stand special pentru pornirea, controlul și urmărirea turbomotoarelor. Acest stand dispune de echipamentele necesare acestui scop: demaror, rezervor de combustibil, instalație de ulei, admisie aer, evacuare gaze de ardere, dinamometre pentru încărcarea turbomotorului, sistem de control și achiziție parametri.

2.1. Execuția prototipului sistemului de comandă și control al turbomotorului

Schema bloc a sistemului de comandă și control al turbomotorului, pe care l-am proiectat și executat, este prezentată în figura 2.1.

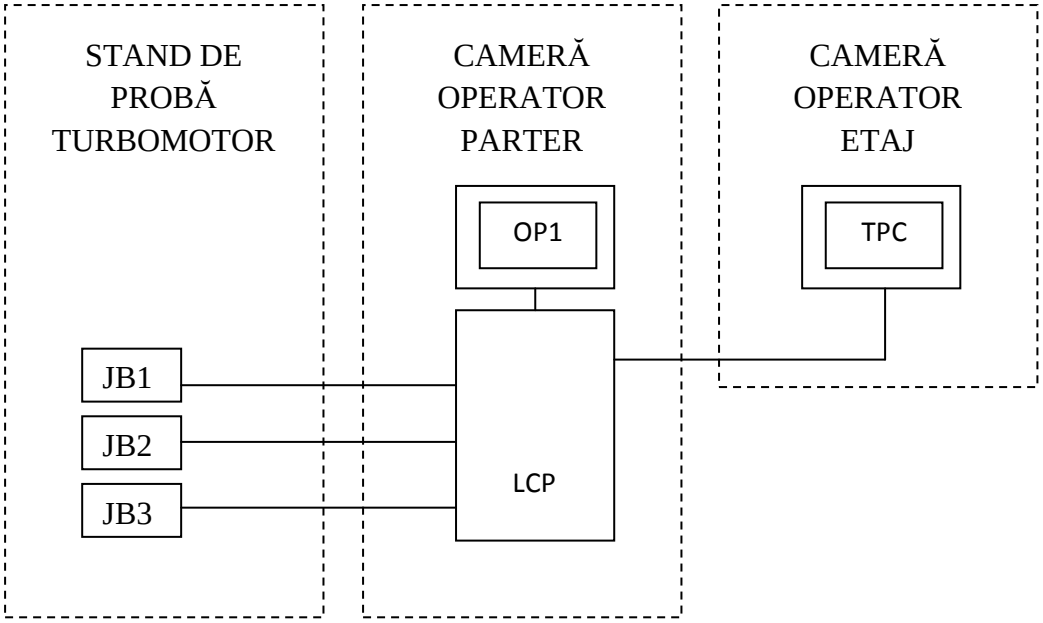


Fig. 2.1 Sistemul de comandă și control turbomotor ST40M în stand - schema bloc

Notă:

LCP – Panou de control local;

OP1, OP2 – Panou operator;

TPC – Calculator cu ecran senzitiv;

JB1...JB3 – Cutii de joncțiune.

Fiecare modul are un rol bine stabilit în configurația sistemului. Funcțiile principale ale componentelor sistemului sunt următoarele:

a) Cutia de joncțiune JB1

- preia și transformă semnalele de temperatură de la turbomotor și semnalul de turație de la turbina de putere;

b) Cutia de joncțiune JB2

- preia și transformă semnalele de turație de la compresorul turbomotorului prin intermediul adaptoarelor;

- furnizează semnalele de comandă pentru vana de combustibil și vana antipompaj;
- furnizează semnalele de comandă pentru demaror, aprindere, supape oprire;

c) Cutia de joncțiune JB3

- preia semnalele de presiune de la turbomotor ;

d) Panou operator local

- afișează parametrii turbomotorului și poate comanda local motorul;

e) Panou de control local - LCP

- panoul de control local , conține automatul programabil, monitorul de vibrații;
- achiziționează și prelucrează toate semnalele de la turbomotor sau instalațiile adiacente;
- comunică cu panoul local și cel din camera de comandă pentru comanda turbomotorului.

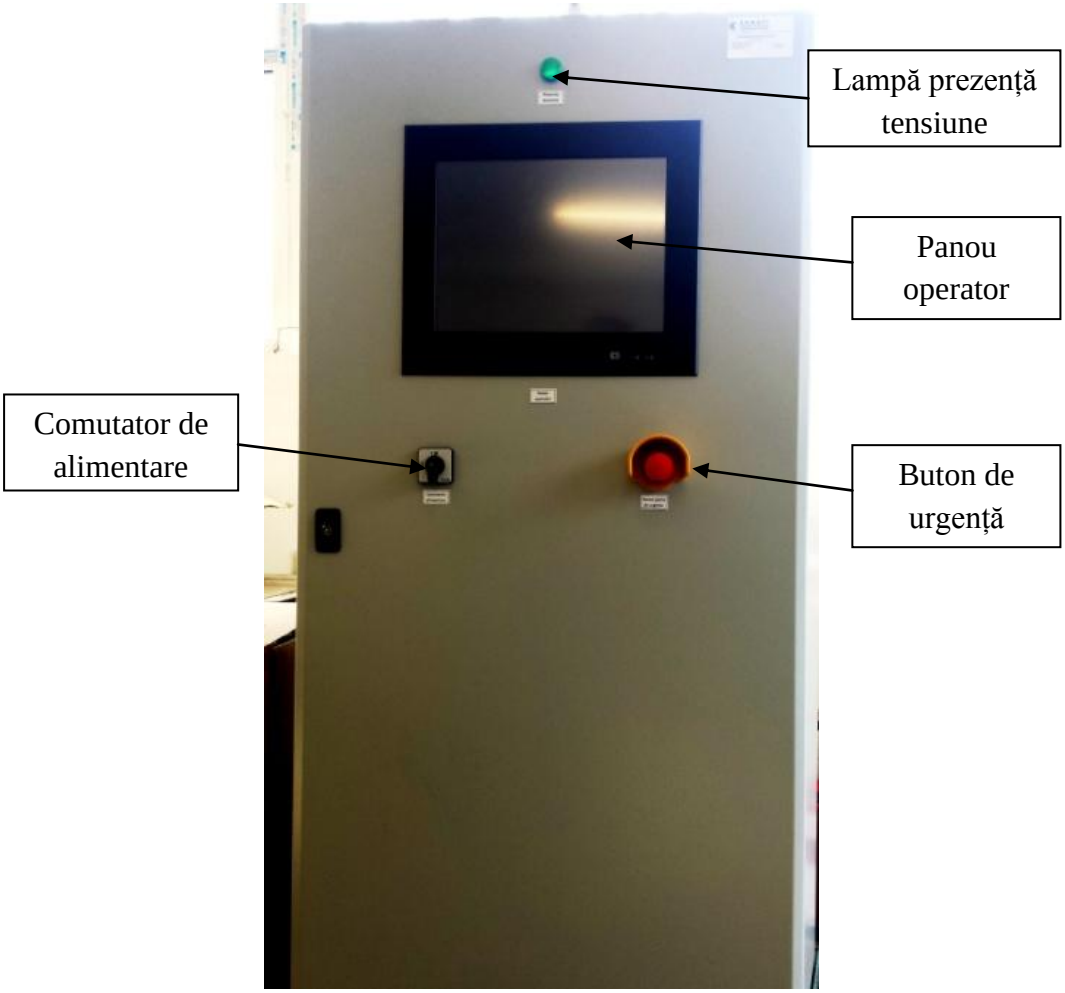


Fig.2.2 Panou de control local - LCP

Pe ușa frontală a panoului de control local sunt amplasate un comutator de alimentare, un buton de urgență, lampa de prezență tensiune și panoul operator. Afișarea parametrilor şi operarea se realizează prin intermediul panoului operator tip EL PPC 15 1000/M, produs de firma Phoenix Contact (Fig.2.3).

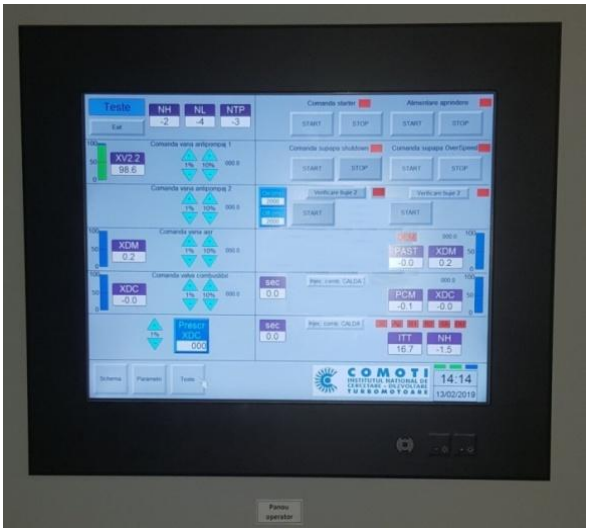


Fig. 2.3 – Panoul operator de pe panoul de control local

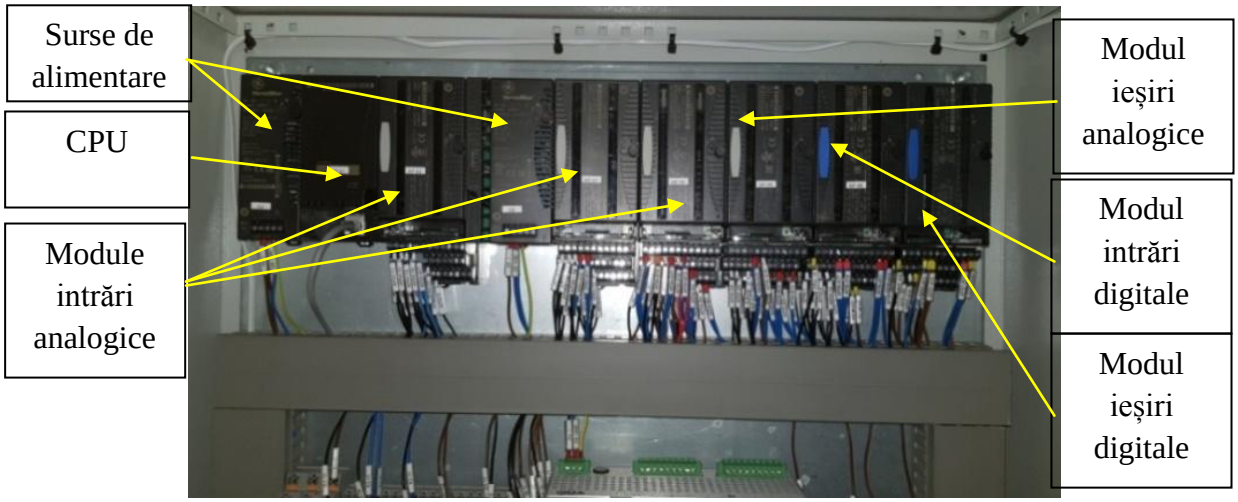


Fig.2.4 Automatul programabil din panoul de control local (LCP)

Panoul de control local (LCP) are la bază un automat programabil tip VersaMax (Fig.2.4), produs al firmei GE Fanuc Automation, care rulează un program conceput cu scopul realizării funcţiilor impuse..

f) Panou operator comandă de la distanță TPC (Touch Panel Computer)

- afișează parametrii turbomotorului și comandă de la distanță turbomotorul;
- salvează datele pe hardisk-ul intern și afișează grafice cu evoluția parametrilor turbomotorului.

Comanda și supravegherea turbomotorului se face de la panoul din camera de comandă a motoarelor, dar se face, în caz de necesitate și de la panoul de control local.

2.2. Testarea componentelor sistemului de comandă și control al turbomotorului

Pentru preluarea poziției vanei de dozare combustibil și a vanei antipompaj am folosit două module tip LVDT. Acestea folosesc un semnal în frecvență pentru excitarea unui sistem principal de bobine, preia semnalul de la bobinele din secundar, îl redresează și îl transformă în curent pentru intrarea PLC-ului. Modulele de adaptare de comandă pentru vana de dozare combustibil și vanele

antipompaj P2.2 și P2.7 sunt module electronice care transformă semnalul de ieșire unificat de tip 4-20mA în semnal în curent corespunzător comenzii vanei respective.

2.2.1. Testarea manetei de comandă putere

Turbomotorul trebuie să furnizeze o anumită putere în sarcină, care depinde de cantitatea de combustibil arsă în camera de ardere. Pentru a exista un echilibru între puterea furnizată de turbomotor și puterea cerută de sarcină, motorul trebuie să mențină o anumită turație la turbina de putere, la o anumită putere consumată de sarcină.Pentru a corela puterea cerută de sarcină, în cazul aplicațiilor navale de elicea navei, simulată pe stand prin încărcarea frânei hidraulice, în automatica frânei am implementat o curbă a cuplului astfel încât la o anumită turație a turbinei de putere puterea furnizată de turbomotor prin accelerarea lui să fie egală cu puterea cerută de elice (ecuația 2.1).

$$Tdem = Tdyno + A0 + A1 \times X + A2 \times X^2 + A3 \times X^n \quad (2.1)$$

Unde :

- $Tdem$ = cuplu cerut [Nm] ;
- $Tdyno$ = cuplu setat manual [Nm] ;
- X = turația [krpm] .

Pentru a putea accelera turbomotorul, valoarea prescrisă a referinței de turație NH, este introdusă cu ajutorul săgeților, de pe ecranul pornire caldă sau prin intermediul manetei de putere (Fig.2.5).



Fig.2.5 Maneta de putere, la standul de probă, pentru accelerarea turbomotorului

Maneta de putere este cuplată la sistemul de comandă și control al turbomotorului prin intermediul unui semnal furnizat de modulul electronic al manetei de putere. Schema bloc a sistemului este prezentată în figura 2.6.

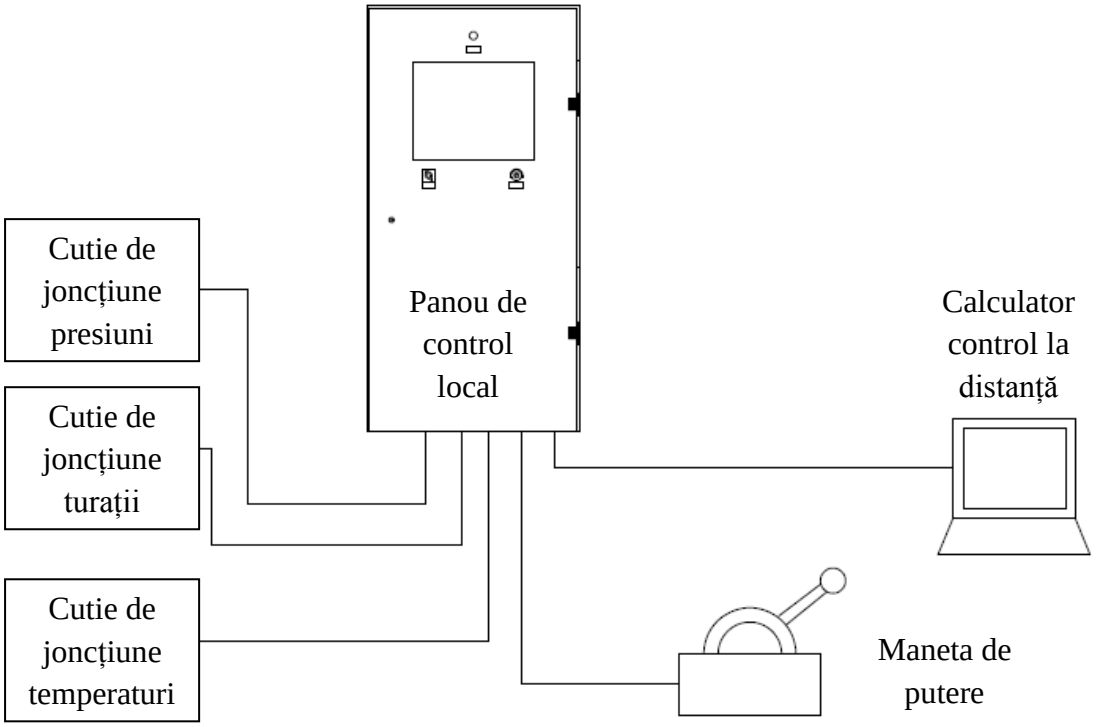


Fig.2.6 Schema bloc a sistemului de comandă și control al turbomotorului pe standul de probă

Cu ajutorul comenzii de la manetă am efectuat mai multe probe de accelerare și decelerare a motorului pe standul de probă. În figura 2.7 se prezintă graficul accelerării și decelerării turbomotorului între turația de relanti **NH=20000 rpm** și turația **NH=28530 rpm**, apropiată de turația maximă.

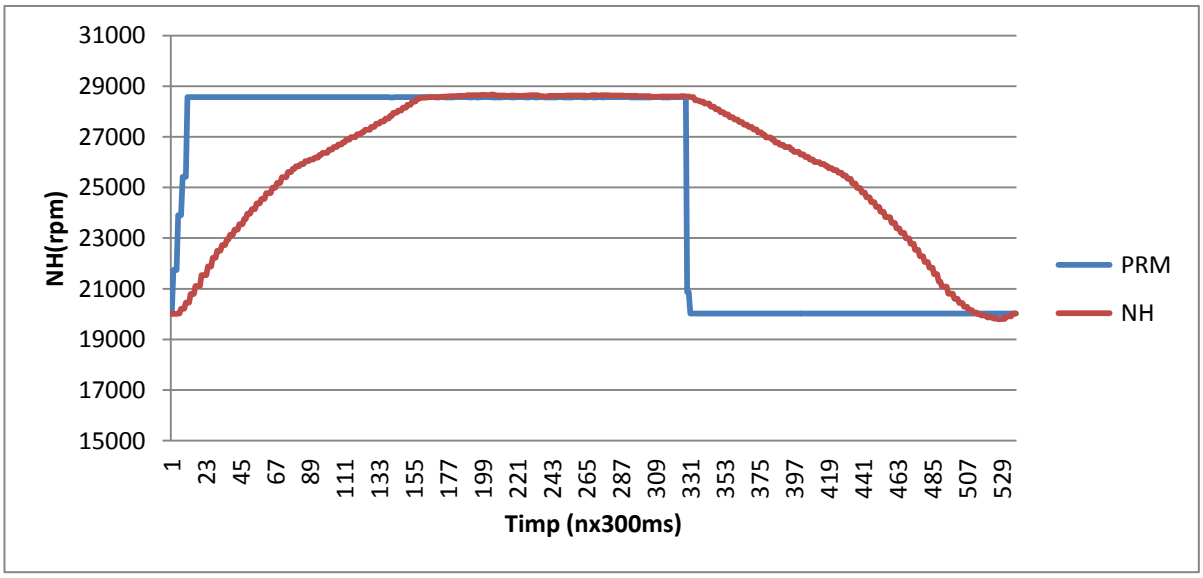


Fig.2.7 Accelerarea și decelerarea turbomotorului **ST40M** pe standul de probă

Note:

1. Semnalul PRM corespunde semnalului furnizat de maneta de putere și reprezintă cerința de putere impusă turbomotorului;
2. Semnalul NH reprezintă turația compresorului de înaltă presiune din turbomotor care este proporțional cu puterea dezvoltată de turbomotor.

Din grafic se pot observa următoarele :

- Semnalul NH urmarește semnalul PRM cu o anumită întârziere dată de pantele de creștere și descreștere implementate în aplicația de control a turbomotorului;
- Durata de accelerare, între NH=20000 rpm și NH=28530 rpm, este de 46 secunde;
- Durata de decelerare, între NH=28530 rpm și NH= 20000 rpm, este de 56 secunde;
- Aceste durate coincid cu duratele de accelerare și decelerare necesare turbomotorului pe navă;
- În punctul NH=26000 rpm panta graficului are o variație corespunzătoare formulelor implementate în program.

Rezultatele obținute, ilustrate cu ajutorul graficelor, sunt importante pentru că arată:

a) o funcționare stabilă, atât în cazul accelerării cât și în cazul decelerării;
b) o pantă corespunzătoare pentru comanda sigură și lină a navei.

2.3. Analiza rezultatelor experimentale obținute pe stand

Pentru analiza datelor experimentale obținute se compară două probe relevante din punct de vedere al transformărilor ecuațiilor și aplicației de control corespunzătoare.

Tabel 2.1 Probe analizate

	Proba 1	**Proba 2**
Data	07.03.2019	13.05.2019
Varianta de algoritm de control	E	E-NH-5
Varianta de program folosită	Naval Var 4_6_NH	Naval Var 4_7
Turația NH maxima obținută	28330	27021

Pe parcursul probelor efectuate, controlul turbomotorului a evoluat de la un control proporțional la un control proporțional cu factor de proporționalitate variabil. Pentru a analiza în ce măsură această schimbare a afectat comportarea regimurile motorului am comparat cele două probe efectuate cu turbomotorul (tabel 2.1). Prima probă a fost efectuată pe stand în data de 07.03.2019. În acel moment, legea de reglare a fost de tip proporțional. A doua probă a fost efectuată în data de 13.05.2019 pe standul de probă și a inclus modificări ale algoritmului de control prezentate în coloana a doua din tabelul 2.2.

2.3.1. Comparația algoritmilor de control utilizați

Aceasta comparație este prezentată în tabelul 2.2, unde în coloana din stânga sunt principalele elemente ale algoritmului de control folosit la proba 1, varianta E, iar în coloana din dreapta, algoritmul folosit la proba 2, varianta E-NH-5.

Tabel 2.2 Comparație algoritmi de funcționare turbomotor ST40M

Algoritm E	**Algoritm E-NH-5**
Ieșire turbomotor la relanti Dacă NH>19 000 rpm, turbomotorul a ajuns la relanti și intră în starea **Funcționare la REGIM** În starea **„Funcționare la Regim"** debitul de combustibil al motorului se controlează conform relațiilor: La fiecara $\Delta t = 0,5$ sec se calculează	**Ieșire turbomotor la relanti** Dacă NH>19 000 rpm, turbomotorul a ajuns la relanti și intră în starea **Funcționare la REGIM** În starea **„Funcționare la Regim"** debitul de combustibil al motorului se controlează conform relațiilor: La fiecara $\Delta t = 0,2$ sec se calculează

ΔNH = NHref. - NH [rpm] ΔXDCC = 0,002 ΔNH [%]	ΔNH = NHref. - NH [rpm]
Se verifică: -Dacă NH <25 500 rpm și ΔXDCC > 1,0%, atunci ΔXDCC = 1,0% -Dacă NH <25 500 rpm și ΔXDCC< - 1,0%, atunci ΔXDCC = -1,0% -Dacă NH >25 500 rpm și ΔXDCC >1,5%, atunci ΔXDCC = 1,5% -Dacă NH >25 500rpm și ΔXDCC< - 1,5%, atunci ΔXDCC = - 1,5%	Se verifică: - Dacă [ΔNH] < 30 rpm, atunci KNH=0.0002 - Dacă 30< [ΔNH] > 70 rpm, atunci KNH= 0.0005 - Dacă [ΔNH]>70 rpm, atunci KNH=0.0008 - Dacă NH<25 500 rpm, atunci KN = 0.6 - Dacă NH> 25 500 rpm, atunci KN = 0.4
	Se calculează: ΔXDCC = KNH x ΔNH [%] - Se calculează: Dacă ΔXDCC > KN [%], atunci ΔXDCC = KN [%] Dacă ΔXDCC<- KN [%], atunci ΔXDCC = - KN[%]
Altfel ΔXDCC ia valoarea rezultată din calcul Se calculează: $XDC0 = XDC^{-1}+\Delta XDCC$ La fiecare trecere a programului se execută Algoritm XDC	Altfel ΔXDCC ia valoarea rezultată din calcul Se calculează: $XDC0 = XDC^{-1} + \Delta XDCC$ La fiecare trecere a programului se execută Algoritm XDC
Algoritm XDC Se calculează: 1 ΔXDC =XDC0-XDC [%] 2. ΔPQC = 0,08 ΔXDC [mA] 3. $PQC = PQC^{-1}+ \Delta PQC$ [mA]	**Algoritm XDC** Se calculează: 1. ΔXDC =XDC0-XDCN [%] 2. Se verifică: - dacă ΔXDC < 0,75, atunci KS = 0,15 - dacă 0,75<ΔXDC< 2, atunci KS=0,3 - dacă ΔXDC>2, atunci KS = 0,6 3. ΔPQC = KS x ΔXDC [%] 4. PQC = 5.76 + ΔPQC [%]

Algoritmul din coloana din dreapta a tabelului 2.2, pe lângă limitări ale abaterii de poziție ΔXDCC a vanei de dozare combustibil, mai are și mărimi variabile ale coeficientului de multiplicare a abaterii de turație ΔNH, precum și a coeficientului KS al abaterii poziției actuatorului de combustibil PQC. De asemeni același algoritm se execută mai rapid decât algoritmul folosit inițial, prezentat în coloana din stânga tabelului 2.2.

2.3.2. Comparația rezultatelor experimentale

Astfel în prima probă, evoluția turației compresorului de înaltă presiune NH de la relanti, NH=20000 rpm, la turația de NH=27000 rpm este prezentată în figura 2.8. Pe grafice sunt reprezentate:

- NHref, turația compresorului de înaltă presiune impusă a turbomotorului;
- NH, turația compresorului de înaltă presiune obținută a turbomotorului.

Subliniez ca turația compresorului de înaltă presiune, NH, reprezinta mărimea care ilustrează regimul în care acesta funcționează și implicit puterea pe care acesta o furnizează. Ea este proporțională cu cantitatea de combustibil și de aer consumate de turbomotor.

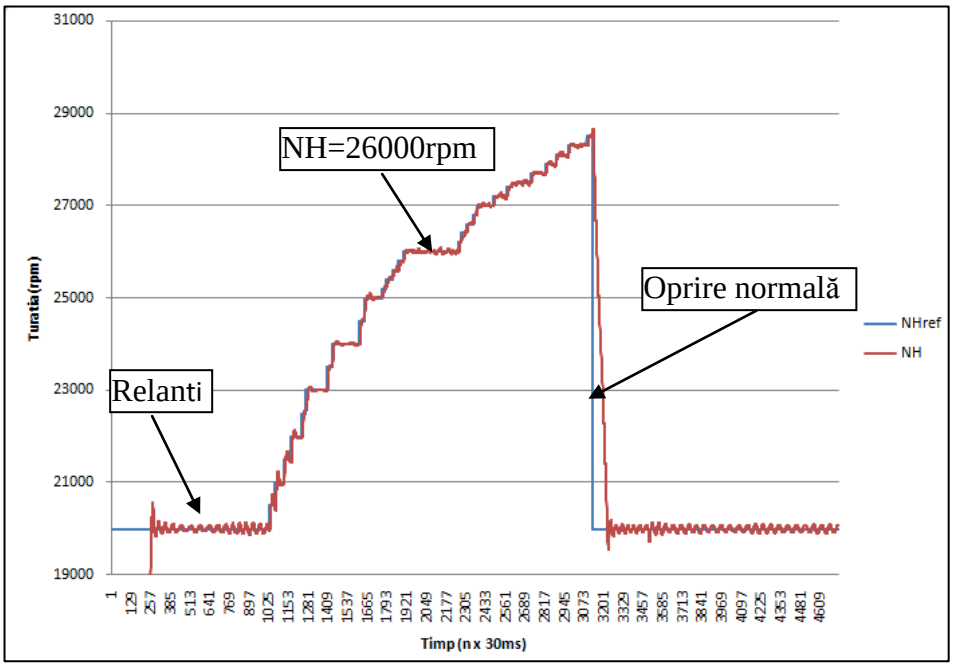


Fig. 2.8 Evoluția turației NH și NHref la proba 1

Evoluția turației NH la proba 2 este redată în figura 2.9.

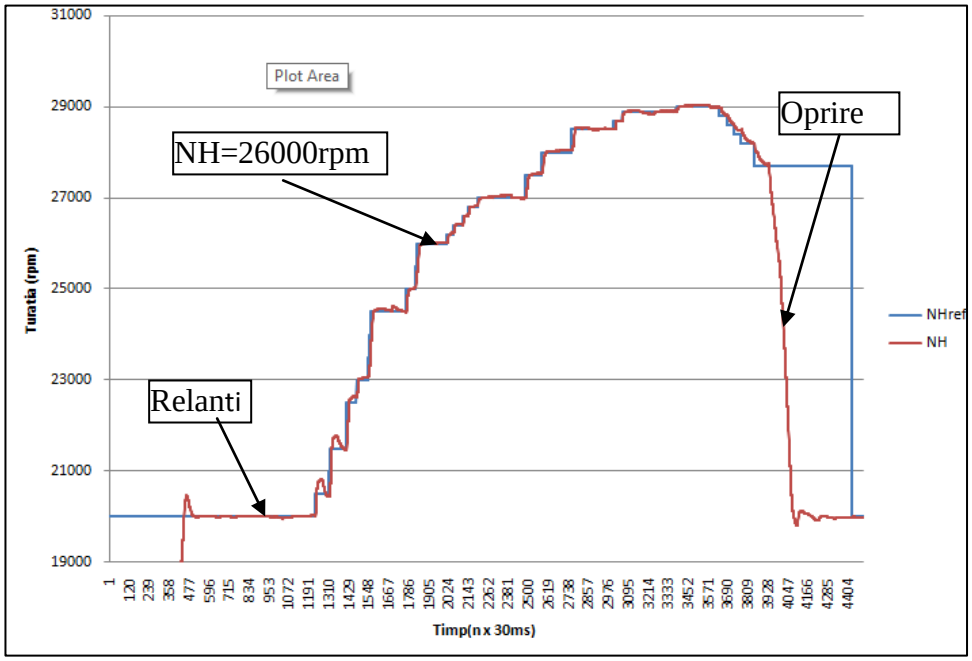


Fig. 2.9 Evoluția turației NH și NHref la proba 2

Pentru a pune în evidență efectul schimbării algoritmilor de control, am comparat evoluția turației NH la două regimuri staționare.

A. Regimul de relanti: NH=20000 rpm

Extragând datele din cele două grafice de mai sus și reprezentându-le pe același grafic pe cele corespunzătoare regimului de relanti, NH=20000 rpm, am obținut figura 2.10.

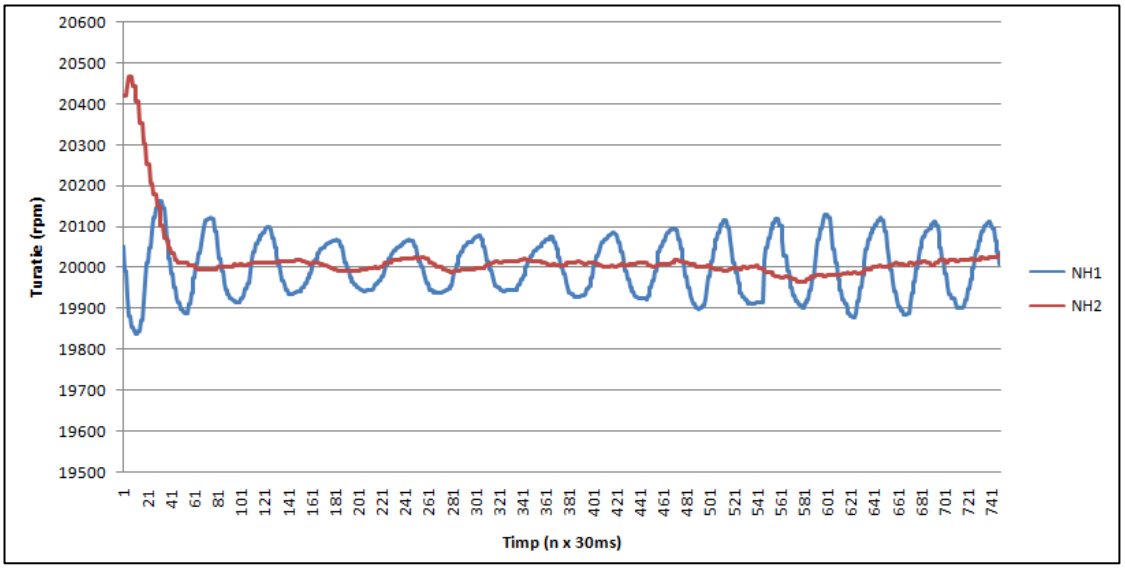


Fig. 2.10 Evoluția turației NH1 și NH2 la relanti

Observații din analiza figurii 2.10:

- Amplitudinea oscilațiilor în cazul probei 2 este de 20 rpm, mult mai mică decât în cazul probei 1, unde amplitudinea medie este de 100 rpm, descreșterea fiind de **500%**.
- Vârful de amplitudine inițial, mai mare în cazul probei 2 decât în cazul probei 1, este determinat de creșterea turației în perioada de pornire.

B. Regimul NH=26000 rpm

Reprezentând datele corespunzătoare regimului NH=26000 rpm, am obținut figura 2.11.

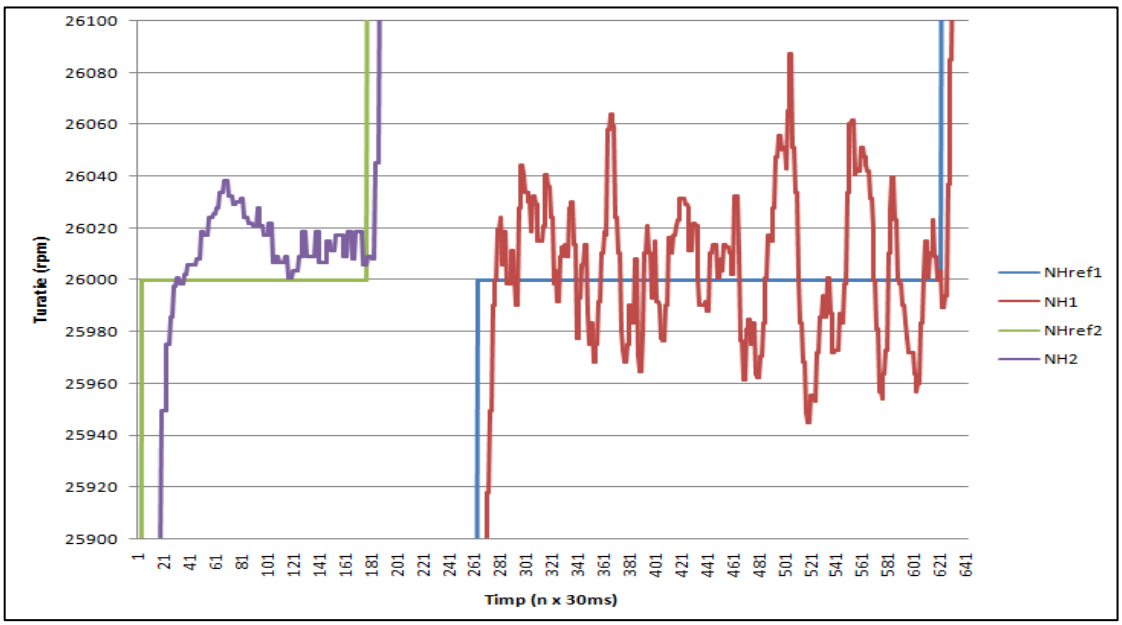


Fig. 2.11 Evoluția turației NH1 și NH2 la 26000 rpm

În această figură sunt prezentate atât valoarea impusă Nhref a turației, cât și valoarea instantanee NH, pentru cele două probe.

Observații din analiza figurii 2.11:

- Amplitudinea oscilațiilor în cazul probei 2 este 20 rpm, mult mai mică decât în cazul probei 1, la care amplitudinea medie este 40 rpm, descreșterea fiind de **100**%.

Concluzii: Modificarea algoritmului de la proba 1 la proba 2 a contribuit la creșterea stabilității turației NH la regimurile staționare de funcționare ale turbomotorului. În cadrul activității

am arătat acest lucru la turația de relanti și la turația de 26000 rpm. Scăderea amplitudinii perturbațiilor turației la regim constant, contribuie la funcționarea stabilă a acestuia, ceea ce duce la micșorarea stresului termic și mecanic asupra componentelor și prelungirea duratei de viață a turbomotorului.

2.4. Contribuții privind transmiterea la distanță a datelor folosind un OPC server

Acest capitol prezintă realizarea practică a transmiterii la distanță a datelor de la un complex de standuri de proba motoare la o distanță de sute de kilometri în centrul de date al companiei care deține complexul.

Ansamblul de testare motoare cuprinde 3 standuri:

- Stand de testare turbomotoare;
- Stand de testare micromotoare;
- Stand de testare motoare turbojet.

Cele 3 standuri au un panou de control local și achiziție de date (LCP – Local Control Panel), conduse de un panou central de stație (SCP – Station Control Panel), care centralizează datele și coordonează operarea fiecărui stand.Transmisia de date la distanță prin Internet la beneficiar este bazată pe o aplicație de comunicare. Pentru acest lucru a fost utilizată aplicația de comunicare Matrikon OPC UA Tunneller.

2.4.1. Configurarea transmisiei de date

Cele 3 standuri sunt conectate prin rețea Ethernet, figura 2.12. De la echipamentul switch al panoului de control standuri am creat o conexiune printr-un firewall pentru a proteja rețeaua internă de amenințările din afară. Din firewall conexiunea ajunge la un router GSM, care furnizează conexiunea la Internet și prin acesta se comunică cu rețeaua din sediul central al organizației. Aici aplicația SCADA preia și afișează parametrii obținuți la nivel de instalație.

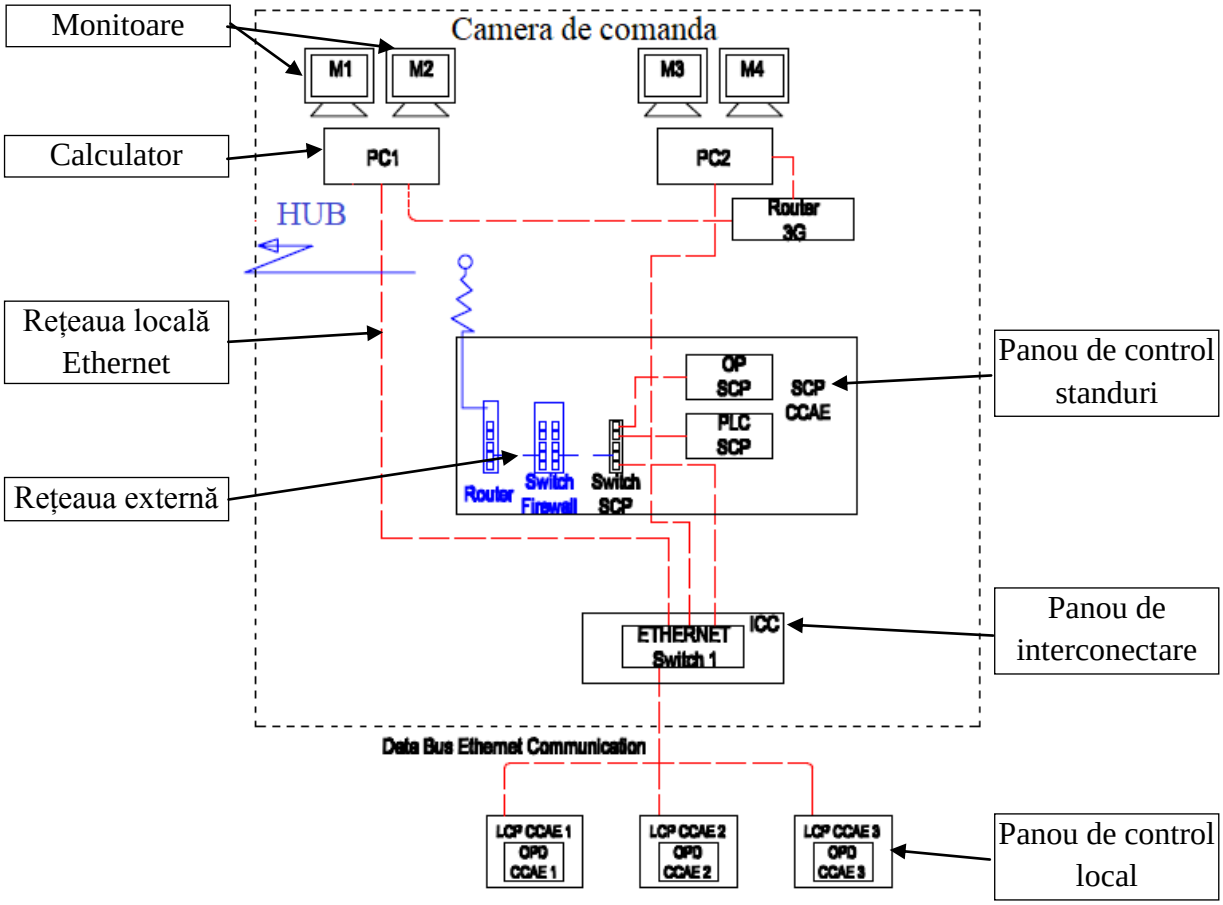


Fig. 2.12 Arhitectura informațională a complexului de standuri

Datele sunt citite din PLC-urile fiecărui stand de computerele din camera de comandă a complexului de standuri, prin rețeaua Ethernet. Programele de pe aceste computere furnizează datele prin intermediul unui OPC server. Aplicația SCADA, care rulează în centrul de control al companiei, accesează datele printr-o aplicație de comunicare. Mediul de programare pe care l-am utilizat pentru a dezvolta aplicațiile care rulează pe cele două calculatoare din camera de control este Proficy Machine Edition. Transmisia parametrilor de stand doriți am realizat-o prin configurarea a două servere OPC, câte unul pentru fiecare calculator de monitorizare din camera de comandă. Se vor transfera toți parametrii doriți din cele două servere.

CAPITOLUL 3

TESTAREA SISTEMULUI DE COMANDĂ ȘI CONTROL PE NAVĂ

Nava pe care este instalat turbomotorul are un sistem de control electronic care comandă în același timp pasul elicei și puterea motorului pentru a obține forța de propulsie. Turbomotorul ST40M a fost testat pe navă în locul motorului de marș al navei, puterea dezvoltată de cele două motoare fiind asemănătoare. Testele pe care le-am realizat pe navă au presupus o minimă intervenție în controlul automat a motoarelor și elicei. Semnalul de accelerație (throttle) al vechiului turbomotor a fost utilizat pentru comanda turbomotorului ST40M.

Turbomotorul ST40M testat pe stand împreună cu sistemul de comandă și control dezvoltat, a fost montat pe navă. În cadrul sistemului de propulsie al acesteia, turbomotorul funcționează ca turbomotor de marș menit să înlocuiască motorul scos din uz al navei, model Tyne dezvoltat în anii 50 de Rolls-Royce [3].

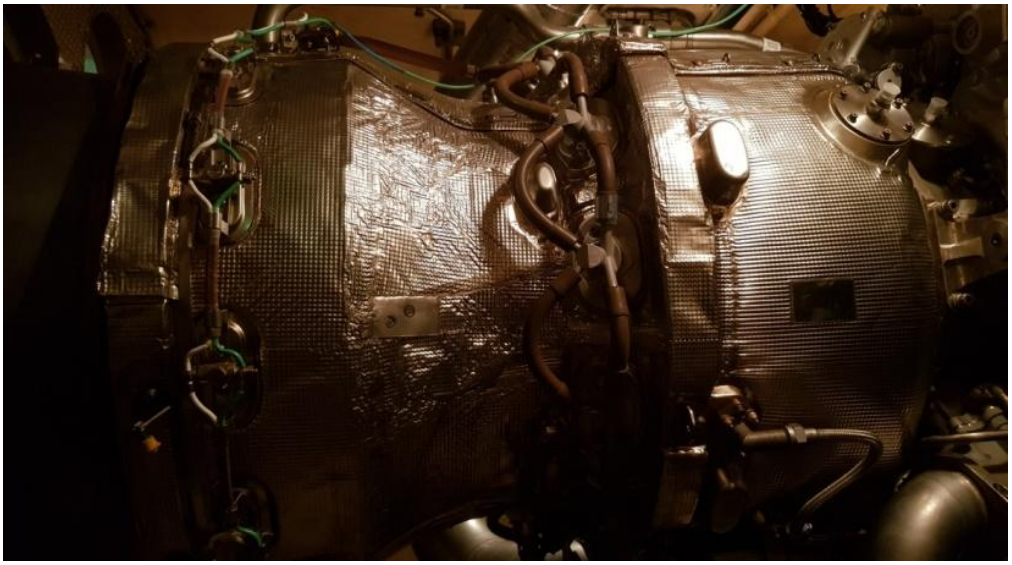


Fig. 3.1 Turbomotor ST40 M instalat pe navă

Controlul motorului poate fi făcut fie din camera motoarelor, prin intermediul panoului local de control, fie de la distanță, din camera de comandă motoare aflată pe puntea superioară a navei, prin intermediul unui panou de control de la distanță. Automatul programabil aflat în interiorul panoului de control local (LCP) este conectat la adaptoare de curent situate în cutiile de joncțiune din imediata apropiere a turbomotorului (fig.3.2).

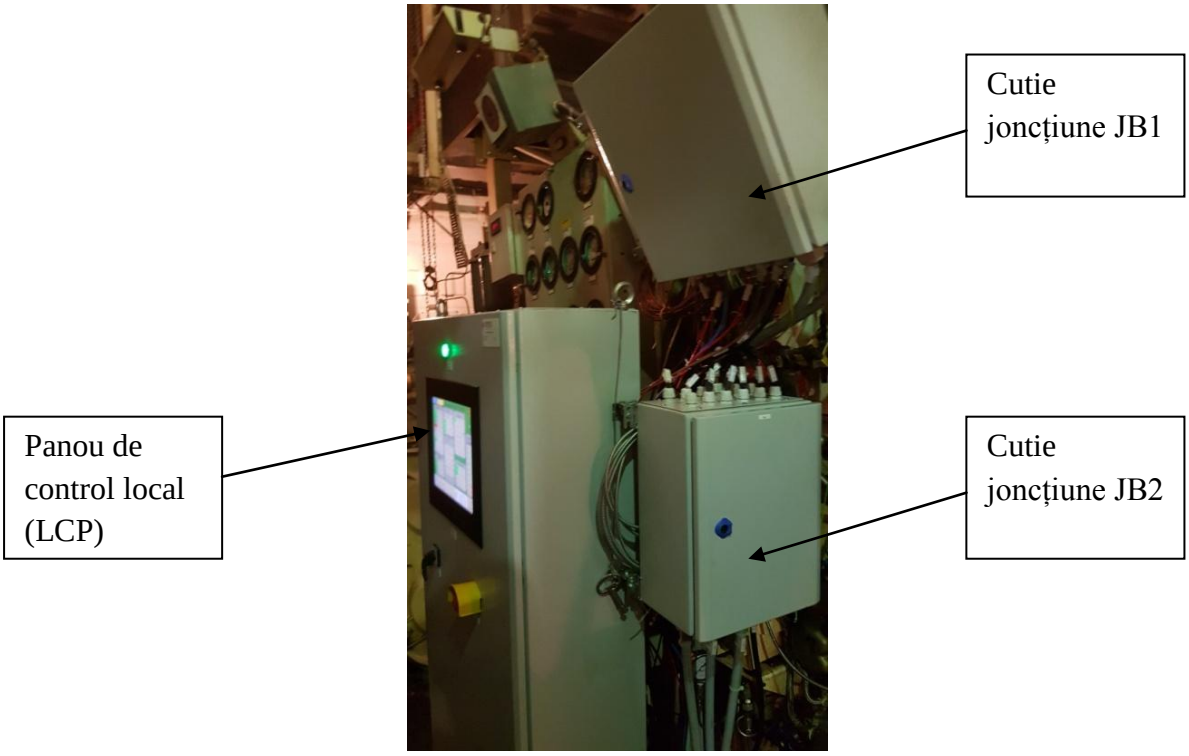


Fig. 3.2 Amplasarea panoului de control local și cutiilor de joncțiune pe navă

3.1. Testarea turbomotorului ST40M conectat la maneta de putere a navei

Poziția manetei de putere este preluată de sistemul de comandă și control al turbomotorului prin intermediul unui semnal furnizat de convertorul pneumatic al manetei de putere a navei (fig.3.3). Semnalul de presiune, furnizat de convertorul pneumatic, este transformat în semnal unificat de curent, 4-20 mA, de către un traductor de presiune, PRM. Acest semnal de curent este achiziționat de o intrare analogica a automatului programabil aflat în panoul de control local.

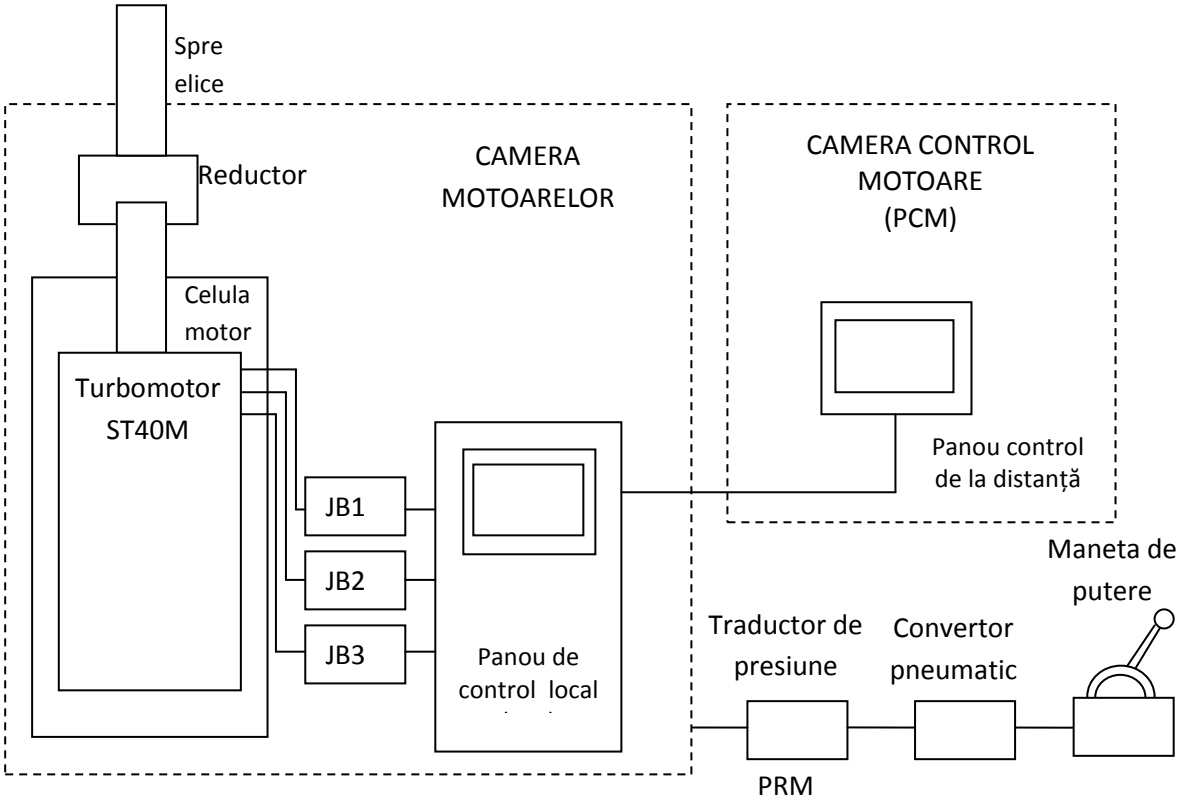


Fig.3.3 Schema bloc a sistemului de comandă și control a turbomotorului pe navă

Valoarea semnalului de poziție manetă este convertită, prin intermediul programului implementat în PLC în turația compresorului de înaltă presiune necesară pentru turbomotorul ST40M. Pe baza acestui semnal, este calculată ieșirea corespunzătoare a actuatorului vanei de combustibil de pe turbomotorul ST40M, obținându-se puterea cerută de la turbomotor.

Am efectuat mai multe probe de accelerare și decelerare a turbomotorului pe navă, nava fiind legata la cheu, utilizând maneta de putere (fig.3.4).

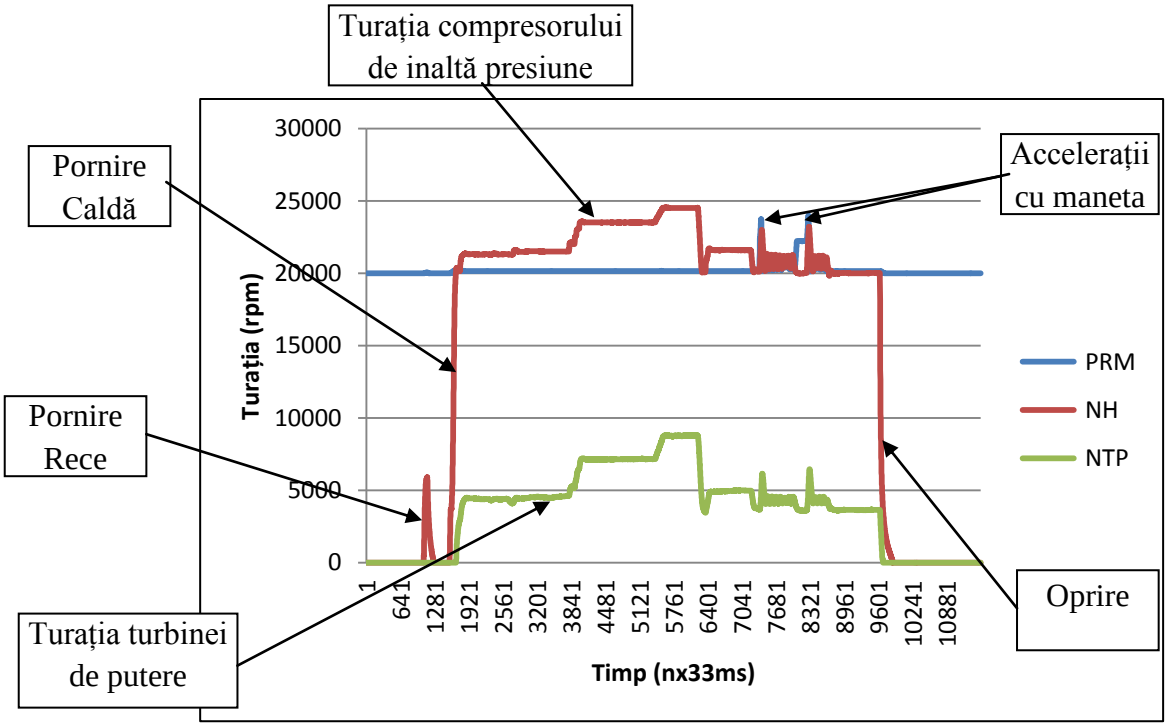


Fig. 3.4 Proba pornire-teste-oprire cu nava la cheu

Concluzii la probele cu nava la cheu:

- Curba de turație NTP – turbina de putere, reproduce forma curbei de turație NH – compresor de înaltă presiune, fig.3.4;Comanda și controlul acționează după curbele de reglaj stabilite pe stand, aplicația software de control nefiind modificată.
-

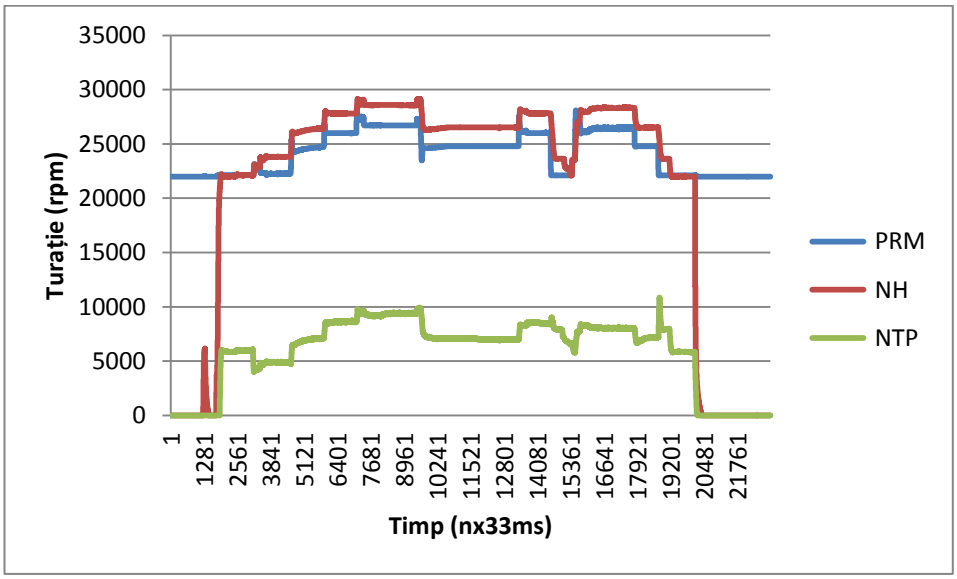


Fig. 3.5 Proba pornire-teste-oprire cu nava în larg

Am efectuat probe de accelerare și decelerare a turbomotorului pe navă, nava fiind în larg, utilizând maneta de putere (fig.3.5). Spre deosebire de cazul precedent, la probele în larg puterea turbomotorului a putut fi ridicată la maxim, turația compresorului de înaltă presiune depășind 25000 rpm.

Concluzii la probele cu nava în larg:

- Curba de turație NTP – turbina de putere, reproduce forma curbei de turație NH – compresor de înaltă presiune pe toată gama de turații a turbomotorului;
- Se remarcă apariția unei supraturări la proba 2 (fig.3.5) la reducerea bruscă a turației impuse.

3.2. Reglajul parametrilor de control ai turbomotorului

Față de stand, pe navă, secvența de pornire a turbomotorului a fost modificată pentru a folosi sistemul pneumatic de pornire a navei. Astfel, pe stand, aerul comprimat care acționează demarorul este eliberat de supapa CAD, iar apoi este variat cu ajutorul vanei DMM. Pe navă, aerul comprimat necesar demarorului este eliberat de supapa CAD și apoi reglat de supapa CAA, prin deschiderea acesteia obținându-se turația de aprindere a turbomotorului.

O altă ajustare am facut-o pentru turația de relanti la care ajunge turbomotorul după pornirea caldă. În cazul testelor pe stand, turația de relanti a turbomotorului a fost stabilită NH=20000 rpm, unde NH este turația compresorului de înaltă presiune. Pe navă însă există recomandarea ca elicea navei să se rotească cu minim 50 rpm când se pune în mișcare, pentru a se face ungerea corectă a lagărelor acesteia. De aceea, turația de relanti a fost ridicată la NH=22000 rpm.

3.3. Creșterea eficienței energetice prin folosirea turbomotorului propus

În urma analizei rezultatelor experimentale obținute la testele efectuate cu sistemul la bordul navei, am constatat o creștere a eficienței generale a soluției de propulsie cu turbomotorul ST40M în comparație cu vechea soluție de propulsie cu turbomotorul TYNE RM1C a navei.

Din rezultatele prezentate în tabelul 3.1, pentru aceleași poziții ale manetelor de putere, consumul pentru sistemul de propulsie cu ST40M a fost mai mic cu 12% față de sistemul de propulsie cu turbomotor Tyne.

Tabel 3.1 Caracteristica ST 40M corectată și caracteristica Tyne

Punct nr.	-	1		2		3		4	
Ora	-	14:19		14 : 25		14 : 31		14 : 41	
Turbomotor		ST 40M	Tyne	ST 40M	Tyne	ST 40M	Tyne	ST 40M	Tyne
Maneta de control putere	div	**24**	**24**	**40**	**40**	**50**	**50**	**54**	**54**
Throttle	%	6	15	42	38	64	58	76	72
Debit comb.	l/min	**5,7**	**7,6**	**10,4**	**11,0**	**14,8**	**17,3**	**17,5**	**19,9**
Viteza elice	rpm	56	54	77	76	97	101	105	108
Pas elice	div	32	32	34	34	34	34	34	34
Viteza navă	nod	6,0		9,0		11,6		14,1	

3.4. Contribuții privind îmbunătățirea fiabilității prin adăugarea unui modul redundant

Redundanța pe care am proiectat-o, prin adăugarea unui panou de control local redundant, se bazează pe capacitatea turbomotorului ST40M de a avea un rând suplimentar de comenzi și de a furniza informații despre turația turbomotorului. Adăugarea panoului redundant permite controlul și

pornirea turbomotorului în cazul critic, atunci când echipa de depanare nu poate ajunge la navă. De asemenea, dublarea controlului permite acționarea turbomotorului în cazul în care panoul de control local principal este defect.

Analiza rezultatelor experimentale obținute la accelerații și decelerații

Testele pentru verificarea accelerației grupului de propulsie ST40M au fost efectuate prin împingerea rapidă a manetei de control de la zero la o anumită valoare și după stabilizarea regimului selectat, maneta a fost împinsă înapoi la zero.

Patru teste au fost efectuate după cum urmează:

- accelerarea prin împingerea manetei de la 0 la 24 diviziuni și înapoi la 0;
- accelerarea prin împingerea manetei de la 0 la 36 diviziuni și înapoi la 0;
- accelerarea prin împingerea manetei de la 0 la 46 diviziuni și înapoi la 0;
- accelerarea prin impingerea manetei de la 0 la 50 diviziuni și înapoi la 0.

Rezultatele obținute sunt prezentate în tabelul 3.2.

Tabel 3.2 Timpii de accelerație ai turbomotorului ST 40M

Test / Parametru		UM	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4
Timp test		h:m:s	15:21: 30	15:22: 39	15:24: 36	15:26: 47
Acceleratie	**PCL**	div	0 ÷ 24	0 ÷ 36	0 ÷ 46	0 ÷ 50
	Timp start	h:m:s	15:21: 50	15:22: 39	15:24: 40	15:26: 47
	NH start	rpm	21150	21097	21100	21120
	Timp regim	h:m:s	15:22: 05	15:23: 02	15:25: 16	15:27: 30
	NH regim	rpm	23850	25340	26950	27570
	Timp accelerare	**s**	**15**	**23**	**36**	**43**
Deceleratie	**PCL**	div	24 ÷ 0	36 ÷ 0	46 ÷ 0	50 ÷ 0
	Timp start	h:m:s	15:22: 06	15:23: 22	15:25: 42	15:28: 01
	NH start	rpm	23990	25740	26570	27560
	Timp regim	h:m:s	15:22: 22	15:23: 43	15:26: 16	15:28: 45
	NH regim	rpm	22025	22015	22025	22100
	Timp decelerare	**s**	**16**	**21**	**34**	**44**

După cum se poate observa, timpii de accelerare și decelerare sunt aproximativ egali și sunt apropiați de timpii de accelerație ai liniei de propulsie a turbomotorului Tyne, măsurați în testele anterioare. Turația de relanti la care turbomotorul coboară este aceeași, ceea ce arată stabilitate în funcționarea liniei de propulsie.

1.1.1. Concluzii la testele pe navă

Testele au relevat:

- compatibilitate 100% între sistemele automate de comandă, control și achiziție de date ale grupului de propulsie navală cu sistemele automate ale navei;
- din punctul de vedere al propulsiei navei, asemănarea este perfectă între grupul de propulsie cu turbomotor TYNE și grupul de propulsie cu turbomotor ST40M.

CONCLUZII

1. CONCLUZII GENERALE

Lucrarea a avut ca obiectiv cercetarea, proiectarea și testarea unui nou sistem de comandă și control pentru un turbomotor utilizat în cadrul unei aplicații de propulsie navală.

Domeniul studiat are o importanță majoră în dezvoltarea unor sisteme de propulsie navală moderne și eficiente care să înlocuiască propulsiile vechi și scoase din uz. Găsirea celor mai adecvate și potrivite mijloace de propulsie navală care să fie în rand cu cele mai noi cuceriri ale stiinței vor rămâne în centrul atenției cercetătorilor din lumea întreagă.

Autorul tezei de doctorat și-a adus o importantă contribuție în cadrul efortului pentru realizarea unei propulsii moderne care să înlocuiască o propulsie veche și mai puțin eficientă.

Procesul de cercetare a început de la ecuațiile de bază ale turbomotorului. Studiul acestora a relevat aspecte privind găsirea celei mai adecvate formule de regulator automat. Ținând cont și de teoria regulatoarelor electronice, s-au obținut relațiile de bază ale algoritmului implementat în PLC-ul panoului de control local.

Pe lângă aceste relații s-au pus la punct, cu contribuția importantă a autorului, relațiile de control ale vanelor de dozare combustibil și antipompaj, vezi Capitolul 1, paragraful 1.5. Pentru interacțiunea operatorului cu sistemul de control a fost creată interfața HMI necesară.

În paralel cu elaborarea algoritmului de control au fost efectuate numeroase teste pe standul de probă în vederea validării funcționării turbomotorului în parametrii optimi, dar și a sistemului de comandă și control, a algoritmului de comandă și a pachetelor de programe realizate.

Rezultatele bune obținute au permis transferul sistemului de comandă și control împreună cu turbomotorul pe navă. După o muncă intensă de adaptare a sistemelor la configurația navei s-au efectuat un număr de probe reale cu nava în diferite moduri de funcționare. Dupa mici ajustări ale software-ului de control, nava cu grupul propulsor având în componență sistemul de comandă și control creat, a funcționat în condiții excelente ai parametrilor de viteză și consum. Aceste rezultate vor fi folosite pentru transferul tehnologiei către posibilii beneficiari.

2. CONTRIBUȚII ORIGINALE

Teza de doctorat și-a propus să aducă contribuții în domeniul propulsiei navale prin cercetarea, proiectarea și realizarea unui sistem de comandă și control destinat controlului și monitorizarii parametrilor unui turbomotor. Aceste cercetări contribuie, prin schimbarea unor propulsii navale ce utilizeaza turbomotoare de generație veche cu sisteme de propulsie bazate pe turbomotorul ST40M, la reducerea consumului de combustibil și respectiv a costurilor cu deplasarea navelor marine.

În continuare sunt prezentate pe scurt contribuțiile originale pe care le aduce teza în domeniul studiat:

a) **Studiul privind stadiul actual și tendințele în tehnologia propulsiei marine cu turbomotoare** pentru nave rapide. Aceasta analiză a trebuit să fie făcută pentru stabilirea necesității și direcțiilor de cercetare și dezvoltare pentru aceste domenii (vezi Cap. Introducere);
b) **Determinarea unui algoritm pentru controlul consumului de combustibil.** Algoritmul determinat pentru comanda vanei de combustibil este esențial în comanda și controlul turbomotorului. De dozarea combustibilului depinde evoluția turbomotorului în fiecare stare de funcționare. De aceea, determinarea ecuațiilor după care funcționează vana de combustibil constituie o contribuție majoră la comanda și controlul turbomotorului (vezi Cap.1 paragraf 1.3);
c) **Determinarea unui algoritm pentru controlul vanelor antipompaj.** Algoritmul de control stabilit pornind de la ecuațiile fundamentale ale turbomotorului birotor a fost implementat în sistemul de comandă și control al turbomotorului. Evitarea stării de pompaj

presupune determinarea controlului optim al vanelor antipompaj și obținerea puterii maxime a turbomotorului în domeniul stabil de functionare (vezi Cap. 1 paragraf 1.5);

d) **Elaborarea interfeței operator.** Prin intermediul acesteia, se dau comenzile și se urmăresc parametrii turbomotorului. De aceea este foarte important să fie clară și ușor de folosit. Autorul a avut o contribuție importantă în proiectarea acestei interfețe astfel încât să răspundă provocărilor cerute. (vezi Cap.1 paragraf 1.7);
e) **Elaborare unui program pentru implementarea algoritmului.** Algoritmul odată stabilit a fost implementat într-un program de tip Ladder Diagram (diagrama ladder/scară) dezvoltat cu ajutorul mediului de programare oferit de firma producătoare a automatului programabil. Autorul și-a adus o contribuție importantă la dezvoltarea rutinelor de comandă și control. Ideile autorului despre programarea structurată și folosirea coeficienților variabili, au fost transpuse în logica implementată în pachetul de programe de control (vezi. Cap.1 paragraf 1.8);
f) **Propunerea unei soluții constructive noi pentru sistemul de comandă și control al turbomotorului.** Acest lucru a fost necesar pentru realizarea sistemului de comandă și control al turbomotorului pentru aplicații navale (vezi Cap.2 paragraf 2.2);
g) **Elaborarea unui program de transmitere la distanță a datelor.** Autorul a contribuit la crearea unui program de transmitere la distanță a datelor din PLC-ul standurilor componente la sediul central al organizației. Acest program a fost elaborat cu ajutorul unui OPC server implementat în calculatoarele care comunică cu panourile de control local din fiecare stand și prin folosirea unei aplicații de specifice (vezi Cap.2 paragraf 2.6);
h) **Analiza interconectării cu sistemul de control al motoarelor propriu navei.** În vederea testării sistemului de comandă și control a turbomotorului pe navă, autorul lucrării de doctorat a cercetat sistemul de control al motoarelor navei pentru a integra în funcțiile de comandă ale acesteia sistemul cu turbomotor (vezi Cap.3 paragraf 3.1);
i) **Testarea sistemului de comandă și control pe navă.** Autorul a contribuit efectiv la ajustarea și testarea sistemului de comandă și control pe navă, urmărind rezultatele în comparație cu sistemul de propulsie înlocuit (vezi Cap.3 paragraf 3.3);
j) **Propunerea unei soluții redundante pentru sistemul de comandă și control al turbomotorului.** Deși fiabilitatea sistemului în probele desfășurate nu a lăsat de dorit, autorul a propus și publicat la o conferință de specialitate o soluție tehnică redundantă pentru sistemul de comandă și control al turbomotorului (vezi Cap.3 paragraf 3.7);
k) **Analiza rezultatelor obținute la testele pe navă.** În urma analizei efectuate de autor s-a relevat compatibilitatea bună a sistemului de comandă și control turbomotor ST40M în aplicația navală studiată (vezi Cap.3 paragraf 3.8).

3. PERSPECTIVE DE DEZVOLTARE ULTERIOARĂ

Rezultatele foarte bune obținute la testarea sistemului de comandă și control împreună cu turbomotorul ST40M pe navă au determinat omologarea produsului. În urma omologării un număr de beneficiari s-au arătat interesați de instalarea efectivă a produsului pe anumite nave. Sunt perspective mari pentru a fi semnate contracte în acest sens.

BIBLIOGRAFIE SELECTIVA

[1] *** - ST40M Marine Gas Turbine – Installation Manual

[2] V.Silivestru, Cercetări privind regimurile tranzitorii din motoarele cu reacție, PhD Thesis, Aerospace Faculty, UPB, Bucharest, România, 2001

[3] *** "Rolls-Royce Engines: Tyne - Graces Guide", Gracesguide.Co.Uk, 2019, https://www.gracesguide.co.uk/Rolls-Royce_Engines:_Tyne

ANEXE

1. DISEMINAREA REZULTATELOR CERCETĂRII

Contribuțiile la comanda și controlul unui turbomotor pentru aplicații navale au fost diseminate prin prezentarea lor la conferințe și prin publicarea lor în jurnale naționale și internaționale cunoscute.

1.1 Lucrări în domeniul sistemelor de comandă și control al turbomotoarelor

1. ***F. Niculescu****, C.Vâlcu, C.Borzea*, " Diagnosing of Rotary Blade Machines with the "HolderPPS" system ", în Turbo Journal Vol.IV Nr.2, Bucharest, Romania, December, 2017
2. ***F. Niculescu****, A.Mitru, A. Săvescu*, " Transmitting data over the network using an OPC server", în Proceedings of the 22nd International Conference on Circuits, Systems, Communications and Computers (CSCC 2018) Majorca, Spain, July 14-17, 2018
3. ***F. Niculescu****, C.Vâlcu, M.L.Vasile*, " Calculating the power of the electric motor for a single stage turbo blower ", în Proceedings of the International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering (ISFEE 2018), Bucharest, Romania, November1-3, 2018
4. ***F. Niculescu****, A. Săvescu*, "Aspects Regarding the Control and Regulation of an Industrial Turbine", în Proceedings of the 11Th International Symposium on Advanced Topics în Electrical Engineering (ATEE2019), Bucharest, Romania, March 28-30, 2019
5. ***F.Niculescu****, M.L.Vasile, C.Nechifor, A.Stoicescu* – "Comparative Analysis between Gas Turbine and Electric Combined Propulsion", în Proceedings of the Electrical Vehicle International Conference & Show (EV2019)", Bucharest, Romania, Octombrie 3-4, 2019
6. *A.Stoicescu, R.Ciobanu, Al.Țăranu, C.Nechifor,* ***F.Niculescu****,* – "Hardware în the loop test platform concept for adaptive turbine engine controller", în Turbo Journal Vol.VI Nr.2, Bucharest, Romania, December, 2019
7. ***F. Niculescu****, A.Săvescu, M.L.Vasile* – „Adaptive Control for Marine Gas Turbine", în Proceedings of The 15th International Conference on Development and Application Systems (DAS2020), Suceava, Romania, May 21-23, 2020
8. ***F. Niculescu****, A.Săvescu, M.L.Vasile* – „Redundancy in the control of a gas turbine for naval applications" în Proceedings of The 9th international conference on advanced concepts in mechanical engineering (ACME 2020), Iunie 04 - 05, 2020, IASI, Romania
9. ***F. Niculescu****, A.Săvescu, M.L.Vasile* – *„*Automation and Electronic Control of a Marine Gas Turbine Engine" publicat în Technium Journal 2020
10. ***F. Niculescu****, A.Săvescu, M.L.Vasile, R.Codoban* – *„*Optimization of the electronic control system for the ST40M gas turbine" publicat în Turbo Scientific Journal, Vol.VII(2020), no.1
11. ***F.Niculescu*** *, C.Borzea, I.Vlăduca, A.Mitru, A.Țăranu, G.Dediu* – *„*Automation Control System for Revamping the Propulsion System of a Navy Frigate" trimis spre publicare la Jurnalul UPB 2020
12. ***F.Niculescu*** *, C.Borzea, M.L.Vasile - „Marine gas turbine for efficient ship propulsion"* publicat în Proceedings of FOREN 2020, 7-10 September,2020, Costinești, Romania

1.2 Alte lucrări publicate

13. ***F. Niculescu****, A.Mitru, C.Vâlcu, C.Sandu* – "External Wireless System for Ultimate Flight Control in Contingency Situations", în Proceedings of the Aerospace Europe CEAS 2017 Conference, Bucharest, Romania, October 16-20, 2017
14. *H. Șerbescu, C. Sandu., S. Vintilă, A. Radu,* ***F. Niculescu****-*" Development of a Parabolic Mirror Using Advanced Materials Used for an Environment Friendly Propulsion System", în Proceedings of

the 2nd International Conference on Environment, Chemical Engineering & Materials (ECEM 2018) Sliema, Malta, June 22-24, 2018

15. ***F. Niculescu****, A.Săvescu, C.Borzea,* "Analogue flow control of a network of centrifugal air compressors ", în Proceedings of the 14th International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE 2018) Craiova, Romania, October 4-6, 2018
16. ***F. Niculescu****, A.Săvescu, M.L.Vasile* " Digital control of centrifugal air compressors ", în Analele Universitatii "Eftimie Murgu" Resita, Romania, November 9-10, 2018
17. *C.Vâlcu,* ***F. Niculescu****, A.Mitru, M.Drăghici, C.Nechifor, M.L.Vasile* " Power Correlation of Driving Motor for Turbo Blower with Industrial Process Requirements", în Turbo Journal Vol.V Nr.2, Bucharest, Romania, December, 2018
18. ***F. Niculescu****, A.Săvescu, M.L.Vasile* " Application for testing DC motors in four quadrants ", în Proceedings of the 11Th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE2019), Bucharest, Romania, March 28-30, 2019
19. ***F. Niculescu****, T.Tipa, C.Vâlcu, A.Săvescu, M.L.Vasile, C.Sandu* " Measurement system for the parameters of satellite propulsion", în INCAS BULLETIN, Volume 11, Issue 3, Bucharest, Romania, 2019
20. *C.Borzea, I.Vlăduca, D.Ionescu, V.Petrescu,* ***F.Niculescu****, C.Nechifor, G.Vătășelu, M.Hanek* - " Compressed Air Energy Storage Installation for Renewable Energy Generation ", în Proceedings of the The 8th International Conference on Thermal Equipment, Renewable Energy and Rural Development, Targoviste, Romania, June 6-8, 2019
21. *C.Nechifor, C.Borzea, I.Vlăduca, I.Mălăel,* ***F.Niculescu****,* – "Electrically actuated valves for gas compression installations located in potentially explosive atmospheres în Proceedings of the The 9th International Symposium on Occupational Health and Safety (SESAM 2019), Petroșani, 3 October, 2019
22. ***F. Niculescu****, T.Tipa, H.Şerbescu, M.L.Vasile* – "Thrust measurement system for propulsion of the satellite", în Proceedings of the 1st edition of the AEROSPACE EUROPE CONFERENCE – AEC2020, Bordeaux, France, 25 – 28 February, 2020

2. PREMII OBȚINUTE

Grupul de Propulsie Naval T22-ST40M, care are în componență sistemul de comandă și control proiectat și realizat de către autorul lucrării de doctorat, împreună cu un grup de specialiști ai INCDT Comoti, a obținut recunoașterea **Asociației Inginerilor din Romania – AGIR**, la secțiunea **Ingineria construcțiilor de mașini**, pe anul **2019**. Diploma înmânată cu această ocazie este anexată la lucrare.



ASOCIAŢIA GENERALĂ A INGINERILOR DIN ROMÂNIA

PREMIUL AGIR 2019

Secţiunea ***Ingineria construcţiilor de maşini***

Se acordă: ***INCD Turbomotoare – COMOTI***

Pentru lucrarea ***Grup de Propulsie Naval T22-ST40M***

Autori:

Dr. Ing. SILIVESTRU Valentin
Ing. MACRIŞOIU Nicolae
Ing. CODOBAN Radu
Ing. NICULESCU Dragoş Filip
Ing. MITRU Andrei
Sing. IONICĂ Constantin
Dr. Ing. GHERMAN Bogdan
Dr. Ing. DRĂGAN Valeriu
Dr. Ing. DRĂGHICI Marian
Ing. OLARU Daniel
Ing. DOROBĂŢ M. Cristian
Ing. TIPA Traian
Sing. ROŞCA Eugen

Teh. SĂVESCU Adrian
Dr. Ing. VILAG Valeriu
Ing. UNGUREANU Adrian
Dr. Ing. GABROVEANU Sorin
Ing. CREANGĂ Camelia
Ing. DUMITRESCU Oana
Ing. ŞERBESCU Horaţiu Mihai
Ing. BORCEA Răzvan
Dr. Ing. ADAM Liviu
Ing. GICĂ Nicolae
Ing. SPINEAN Liviu
Dr. Ing. CATANĂ Răzvan
Ing. DEDIU Gabriel

Ing. PĂTRAŞCU Cristinel
Dr. Ing. ROŞU Paul
Dr. Ing. MIHĂILĂ-ANDRES Mihai
Dr. Ing. PÎSLARU Lucian
Ing. DĂNILĂ Dragoş
Ing. NEGULESCU Alexandra
Dr. Ing. MĂRĂŞESCU Daniel

Preşedinte,
Mihai MIHĂIŢĂ

18 septembrie 2020