



UNIVERSITATEA POLITEHNICA DIN BUCUREȘTI

Facultatea de Inginerie Aerospațială  
Departamentul de Științe Aerospațiale „ELIE CARAFOLI”

Nr. .... Decizie Senat din .....

# TEZĂ DE DOCTORAT

## REZUMAT

*Studii și cercetări experimentale privind adaptarea sistemelor de reglare automată a turbomotoarelor, în scopul optimizării testării în bancul de probe.*

*Experimental studies and research regarding the adaptation of control systems for gas turbines, with the purpose of optimizing the bench tests.*

**Autor:** Ing. DEDIU GABRIEL

### COMISIA DE DOCTORAT

Președinte	Prof. Dr. Ing. Teodor Lucian GRIGORIE	de la	Facultatea de Inginerie Aerospațială
Conducător de doctorat	Prof. Dr. Ing. Crunțeanu Daniel-Eugeniu	de la	Facultatea de Inginerie Aerospațială
Referent	CSI Dr. Ing. Valentin SILIVESTRU	de la	INCD Turbomotoare COMOTI
Referent	Comandor Conf. Dr. Ing. Mihai MIHĂILĂ-ANDRES	de la	Academia Tehnică Militară “Ferdinand I”, București
Referent	Conf. Dr. Ing. Grigore CICAN	de la	Facultatea de Inginerie Aerospațială

București, 2022

## Cuprins

INTRODUCERE .....	5
CAPITOLUL 1 .....	7
STUDIUL, EVOLUȚIA ȘI STADIUL ACTUAL AL SISTEMELOR DE REGLARE AUTOMATĂ PENTRU TESTAREA TURBOMOTOARELOR DE AVIAȚIE.....	7
1.1. INTRODUCERE ȘI NOȚIUNI GENERALE ASUPRA MTR ȘI SRA .....	7
1.2. EVOLUȚIA MTR ȘI SRA PRIN PRISMA AGREGATELOR ȘI ELEMENTELOR DE REGLARE .....	8
1.3. CONFIGURAȚIA SRA PRIN PRISMA LEGILOR DE REGLARE ALE UNOR TIPURI DE MTR CUNOSCUTE.....	9
1.4. STADIUL ACTUAL AL SRA PENTRU TURBOMOTOARE DE AVIAȚIE .....	15
1.5. STADIUL ACTUAL AL SRA PENTRU TESTAREA MTR DE AVIAȚIE ÎN STANDUL DE PROBE.....	15
CAPITOLUL 2 .....	16
PROCESE TRANZITORII ȘI LEGILE DE REGLARE ALE TURBOMOTOARELOR DE AVIAȚIE .....	16
2.1. TEORIA SISTEMELOR DE REGLARE AUTOMATĂ.....	16
2.2. CERINȚELE DE PROIECTARE A SISTEMELOR DE REGLARE ȘI CONTROL AUTOMAT.....	16
2.3. PROCESE TRANZITORII ȘI LEGILE DE REGLARE ALE TURBOMOTOARELOR DE AVIAȚIE .....	17
2.4. NIVELUL DE PERFORMANȚĂ ȘI LIMITĂRILE SISTEMELOR DE REGLARE AUTOMATĂ.....	19
CAPITOLUL 3 .....	20
ARHITECTURA ȘI PERFORMANȚELE SISTEMULUI DE REGLARE AUTOMATĂ CLASIC, CU O SINGURĂ UNITATE ELECTRONICĂ PLC.....	20
3.1. SCHEMA BLOC A SISTEMULUI DE REGLARE CLASIC CU UN PLC ȘI CU INSTALAȚIILE AUXILIARE.....	20
3.2. PREZENTAREA ECHIPAMENTELOR DIN SISTEMUL DE REGLARE AUTOMATĂ AL STANDULUI .....	21

3.3. SCHEMA ELECTRICĂ A SISTEMULUI DE INSTRUMENTARE ȘI ACHIZIȚII DATE22	
3.4. PREZENTAREA NIVELULUI DE CAPABILITATE AL SISTEMULUI DE REGLARE AL STANDULUI.....	22
3.5. EXPERIMENTĂRI ÎN CELULA DE TESTARE CU SISTEMUL DE REGLARE AUTOMATĂ CLASIC .....	23
3.6. ANALIZA ȘI PREZENTAREA DATELOR OBȚINUTE LA DIFERITE REGIMURI DE TESTARE.....	23
CAPITOLUL 4 .....	25
SOFTWARE-URI DE ULTIMĂ GENERAȚIE FOLOSITE ÎN PROGRAMAREA SISTEMELOR DE REGLARE AUTOMATĂ ÎN STANDUL DE TESTARE ȘI EXPERIMENTARE .....	25
4.1. MEDIU DE PROGRAMARE LABVIEW ȘI INTEGRAREA LUI ÎN SISTEMUL DE REGLARE AUTOMATĂ .....	25
4.2. ALGORITMI ÎN TIMP REAL ȘI MEDII DE PROGRAMARE PENTRU SISTEME DE REGLARE AUTOMATĂ.....	26
4.3. REGLAREA AUTOMATĂ ȘI CONTROLUL OPTIM AL TURBOMOTOARELOR DE AVIAȚIE, UTILIZÂND PROGRAME SOFTWARE DEDICATE CYRES.....	26
4.4. ELECTRONICA MODERNĂ ÎN SISTEMELE DE REGLARE AUTOMATĂ ACTUALE.....	27
4.5. PROBLEME DE PROIECTARE ALE SISTEMELOR DE REGLARE AUTOMATĂ, ELECTRONICE .....	28
CAPITOLUL 5 .....	29
CERCETĂRI PRIVIND DEZVOLTAREA ȘI REALIZAREA UNUI SISTEM DE REGLARE AUTOMATĂ CARE SĂ RĂSPUNDĂ CERINȚELOR ACTUALE DE TESTARE A MOTOARELOR DE AVIAȚIE .....	29
5.1. STABILIREA CERINȚELOR ȘI DEZVOLTAREA NOII ARHITECTURI A SISTEMULUI DE REGLARE AUTOMATĂ RAPORTAT LA NOILE CERINȚE PENTRU TESTAREA TURBOMOTOARELOR DE AVIAȚIE .....	29
5.2. ANALIZA ECHIPAMENTELOR UTILIZATE ÎN SISTEMUL DE REGLARE AUTOMATĂ DIN PUNCT DE VEDERE AL CARACTERISTICILOR DE FUNCȚIONARE	
35	
5.3. SCHEMA BLOC DE INSTRUMENTARE A TURBOMOTORULUI ȘI A SISTEMULUI AUXILIAR DE ACHIZIȚII DE DATE .....	37
5.4. ANALIZA NIVELULUI DE CAPABILITATE AL SISTEMULUI DE REGLARE AL STANDULUI PROPUȘ.....	38
5.5. EXPERIMENTĂRI ȘI ANALIZA DATELOR OBȚINUTE CU SISTEMUL DE REGLARE PROPUȘ .....	39

Studii și cercetări experimentale privind adaptarea sistemelor de reglare automată a turbomotoarelor, în scopul optimizării testării în bancul de probe

5.6. ANALIZA COMPARATIVĂ A DATELOR ÎNTRE SISTEMUL VECHI ȘI SISTEMUL PROPUȘ.....	40
CONCLUZII.....	41
CONTRIBUȚII ORIGINALE .....	44
PERSPECTIVE DE DEZVOLTARE ULTERIOARĂ .....	45
BIBLIOGRAFIE.....	46
BIBLIOGRAFIE PERSONALĂ .....	50

## INTRODUCERE

Această teza de doctorat își propune să realizeze cercetări teoretice și experimentale privind realizarea și adaptarea unui sistem de reglare automată pentru testarea turbomotoarelor, care să cuprindă următoarele elemente: sistemul de pornire și demarare, sistemul de dozare combustibil, sistemul de reglare a supapelor anti-pompaj, sistemul de comandă și control, cât și sistemul de instrumentare și achiziții de date, care poate să comunice și pe protocolul ARINC 429 care să includă și un element de noutate și anume, linia de Oprerire Urgență STOP, alcătuită cu un alt PLC de siguranță, cu ajutorul cărora se pot obține: creșterea performanțelor și siguranței în testarea pe bancul de probe, creșterea vitezei de achiziție a datelor și minimizarea timpului de răspuns în cazul opririi de urgență, astfel protejând turbomotorul de eventualele situații neprevăzute.

Structura acestei lucrări se bazează pe: o scurtă introducere unde se prezintă obiectivele principale, urmată de cinci capitole, iar în finalul lucrării se concretizează concluziile, contribuțiile originale și documentația utilizată prin bibliografie.

Capitolul 1 își propune să realizeze un studiu asupra sistemelor de reglare automată pentru turbomotoarele de aviație realizate până în prezent, expunând ca o evoluție atât din punct de vedere al turbomotoarelor dar și din punct de vedere al tehnologiilor de realizare a sistemelor de reglare automată, prin compararea schemelor bloc a unor sisteme de reglare automată, totodată prezentând și o evoluție a unor dintre cele mai cunoscute și utilizate turbomotoare de aviație din istorie pentru diferite tipuri de aeronave, civile sau militare, reprezentate prin figuri, unde se disting elementele componente, agregatele și regulatoarele de la vremea respectivă, ajung până în stadiul actual al sistemelor de reglare automată pentru turbomotoarele de aviație, tipicul de pe aeronavă dar și stadiul actual al sistemelor de reglare automată realizate pentru testarea acestor tipuri de motoare în bancul de probe, acestea fiind puțin diferite și cu câteva particularități față de sistemele care vin montate direct pe turbomotor când acesta este montat pe aeronavă.

Capitolul 2 prezintă, în prima parte, teoria sistemelor de reglare automată, prin exemplificare și explicarea unor termeni prin definiții, care să facă o legătură și o înțelegere mai ușoară asupra modului de expunere a schemelor bloc ale sistemelor de reglare automată și a logicii acestora de gestionare a semnalelor și mărimilor alături de procesele tranzitorii care au loc în turbomotoarele de aviație dar și legile de reglare ale acestora, evidențiind prin grafice principalele curbe de funcționare și linii de pompaj. Capitolul prezintă și nivelul de performanță atins de sistemele actuale de reglare automată, limitările tehnice ale acestora dar și aportul electronicii moderne în sistemele de reglare automată și cum a influențat dezvoltarea lor și creșterea performanței cât și problemele de proiectare ale sistemelor de reglare automată, căror elemente vor primi o atenție deosebită și cum se vor conecta anumite elemente fără a influența buna funcționare a întregului sistem.

Capitolul 3 își propune să prezinte arhitectura clasică și echipamentele din sistemul de reglare automată din standul de probe, sistem realizat într-o configurație de bază doar cu o unitate PLC de control și o serie de experimentări, prin care se utilizează sistemul de achiziții de date și

control studiat. Sunt prezentate schemele bloc pentru sistemul de reglare clasic, având în echipare sistemul pentru pornire cu demaror electric. Sunt detaliate elementele componente din instalațiile auxiliare și comunicarea între sistemul de achiziții, instalații auxiliare și turbomotorul de referință cu prezentarea schemelor electrice și echipamentele care alcătuiesc acest sistem împreună cu caracteristicile lor de bază pentru a înțelege funcționalitatea și legătura dintre elementele de măsurare parametrii și elementele de realizare comenzi și implicit dozarea combustibilului. În partea finală a capitolului sunt prezentate experimentările realizate în celula de testare cu acest sistem de comandă și control și cu motorul de referință Klimov TV2-117A, împreună cu procedurile de pregătire personal și procedura de experimentare.

Capitolul 4 prezintă un studiu comparativ asupra sistemelor de reglare combustibil de la diferite tipuri de turbomotoare de generație mai veche dar și mai actuale, pentru a prezenta modul și tipurile de parametrii care intră, ca factori de reglare, în blocul pompă-regulator și unitățile electronice dar și cerințele sistemelor de reglare moderne și programele software folosite pentru sistemele de testare pe standul de probe. Capitolul analizează în mod comparativ diversele sisteme ce echipează turbomotoarele cu sistemele de ultimă generație, ce operează atât în bancurile de testări, cât și ce ar echipa turbomotoarele și prezintă cerințele de proiectare a sistemelor de reglare și control automat pe baza unui grup de turbomotoare studiate, incluzând și sistemul FADEC. Aceste noțiuni pun baza creării unui sistem de ultimă generație pentru testarea pe banc de probă pentru a îndeplini cerințele necesare.

Capitolul 5 își propune să realizeze un studiu comparativ asupra sistemelor de reglare automată prin prisma caracteristicilor și determinarea punctelor slabe pentru a putea stabili cerințele pentru noul sistem de reglare automată și de asemenea noua arhitectură realizată cu echipamente de ultima generație care au precizii și viteze ridicate în concordanță cu cerințele actuale pentru testarea turboventilatoarelor și turbomotoarelor cu putere la ax, analizarea echipamentelor electronice din punct de vedere al caracteristicilor de funcționare de ultimă generație corespunzătoare noului sistem de reglare automată. Analizarea schemelor bloc de instrumentare folosite pentru turbomotor dar și pentru instalațiile auxiliare prezintă nivelul de capacitate al sistemului de reglare automată care a rezultat în urma configurării și conectării tuturor blocurilor din schemele bloc prezentate anterior.

În ultima parte a capitolului se prezintă experimentările din celula de testare realizate cu acest sistem de reglare automată și de asemenea prelucrarea datelor obținute și se analizează prin comparație datele din experimentarea cu sistemul vechi, cel realizat doar cu o unitate electronică de control PLC la care linia de comandă oprire urgență este integrată în softul principal și datele obținute cu sistemul nou de reglare automată, sistem care are două PLC-uri și mai multe calculatoare de procesare a informației, punând în oglindă graficele rezultate și determinând diferențele apărute.

În finalul tezei de doctorat se vor prezenta concluziile autorului, contribuțiile personale și direcțiile viitoare de dezvoltare împreună cu bibliografia tezei și bibliografia personală folosite la realizarea acestei lucrări.

## CAPITOLUL 1

### STUDIUL, EVOLUȚIA ȘI STADIUL ACTUAL AL SISTEMELOR DE REGLARE AUTOMATĂ PENTRU TESTAREA TURBOMOTOARELOR DE AVIAȚIE

#### 1.1. INTRODUCERE ȘI NOȚIUNI GENERALE ASUPRA MTR ȘI SRA

Este cunoscut faptul că motoarele turboreactoare de aviație, folosite pentru echiparea aeronavelor moderne, civile sau militare, reprezintă sisteme tehnice complexe, în care au loc o serie de fenomene fizice tranzitorii și staționare dar și chimice, care se găsesc în strânsă interdependență și în urma cărora energia conținută în combustibilul injectat în camera de ardere a motorului, este transformată, în ultimă instanță, în lucru mecanic pentru motoarele cu putere la ax, utilizate în special pentru elicoptere sau în forța de tracțiune, pentru motoarele turboreactoare, utilizate la aeronavele civile sau militare [1-4]. Fenomenele fizice și chimice care au loc în turbomotoarele de aviație în procesul transformării energiei sunt caracterizate printr-o serie întregă de mărimi.

Un anumit raport cantitativ între valorile acestor mărimi definește un anumit regim de funcționare. Prin urmare, stabilirea unui regim de funcționare al turbomotoarelor de aviație, implică stabilirea unor valori bine definite pentru mărimile ce caracterizează fenomenele fizice și chimice care au loc în procesul transformării energiei [1-4]. Este evident de asemenea că menținerea constantă sau modificarea, în funcție de necesități, a regimului de funcționare al turbomotorului de aviație, implică menținerea constantă sau modificarea în mod corespunzător a valorilor mărimilor care caracterizează fenomenele fizice și chimice care au loc în procesul de transformare a energiei [3].

Funcționarea turbomotoarelor de aviație, folosite pentru echiparea aeronavelor moderne civile sau militare, se realizează într-o gamă largă de regimuri de funcționare, regimuri de zbor, într-o gamă largă de altitudini și viteze de zbor [1-4].

Variația regimului de zbor atrage după sine modificarea condițiilor exterioare în care are loc funcționarea turbomotorului, aceste modificări sunt percepute ca perturbații și ca urmare a acestui fapt, atrag după sine și modificarea raporturilor cantitative dintre mărimile ce caracterizează fenomenele fizice și chimice care au loc în procesul de transformare a energiei și deci, atrage după sine modificarea necomandată a regimului de funcționare a turbomotorului.

Modificarea necomandată a regimului impus de funcționare a turbomotorului de aviație, în procesul exploatarei, reprezintă un fenomen negativ, pentru a cărui excludere trebuie luate măsuri imediate, de către pilot sau de către sistemul de reglare automată [1-4].

## 1.2.EVOLUȚIA MTR ȘI SRA PRIN PRISMA AGREGATELOR ȘI ELEMENTELOR DE REGLARE

În perioada 1920-1940, viteza a crescut de la aproximativ 150 la 350 km/h prin îmbunătățiri evolutive ale aerodinamicii vehiculului și a tehnologiei motoarelor, după cum s-a discutat anterior. La sfârșitul celui de-al doilea război mondial, viteza de zbor a avioanelor cu elice a ajuns la aproximativ 400-450 km/h, iar puterea motorului celor mai mari motoare cu piston a fost de aproximativ 5000 CP. Aceasta a reprezentat aproape limita de performanță a sistemului de propulsie al motorului elicoidal. Astăzi, motorul elice / piston se folosește numai în aeronavele mai mici, cu viteză redusă, utilizate în aviația generală.

La sfârșitul anilor 1930, a început să se dezvolte mai mult propulsia cu jet, care a promis viteze de zbor mult mai mari decât cele atinse cu motorul cu elice sau cu piston. Aeronava experimentală cu jet a zburat în vara lui 1939 (He-178), iar la începutul anului 1941 primul prototip jet-on a început teste de zbor (He-280). În 1944, avioanele erau uzual cu jet și au ajuns la o viteză de aproximativ 550 km/h (Me-262). La începutul anilor 1950, avioanele cu jet au depășit viteza sunetului. La mijlocul anilor 1950, a apărut primul avion bombardier supersonic (B-58 Hustler), iar ulterior XB-70 a ajuns la viteza Mach 3.



Figura 1.5. Motorul turboreactor RD45, cu forța de tracțiune maximă de 12 TF [8] Turbofanul GE9X, cu forța de tracțiune maximă de 50 TF [30]

De asemenea, în anii 1950, după mai bine de 15 ani de dezvoltare militară, tehnologia turbinelor cu gaz a ajuns la maturitate și au început să se dezvolte aplicații foarte diverse, atât pentru aeronavele de pasageri cât și pentru aeronavele militare.

După cum se observă în această prezentare, sistemele și agregatele de pe turbomotoarele prezentate, sunt tot mai restrânse și cu mai puține părți mecanice la modelele noi față de primele modele, locul lor fiind luat de sistemele electromecanice, la gamă de mijloc, ajungând să fie înlocuite complet de sisteme electronice, de tip FADEC, partea mecanică rămânând doar elementul fin de dozare, dar și acesta are în componența sa, bobine și părți electronice de control.



### 1.3.CONFIGURAȚIA SRA PRIN PRISMA LEGILOR DE REGLARE ALE UNOR TIPURI DE MTR CUNOSCUTE

Acest capitol studiază comparativ sisteme de control de diferite tipuri prin exemplificarea cu turbomotoarele respective. Prin aceste exemple, se află sisteme de tip D.E.E.C. sau F.A.D.E.C care sunt de actualitate.

#### Sistem de control al combustibilului pentru turbomotoarele cu putere la ax TV2-117A și TV3-117MT.

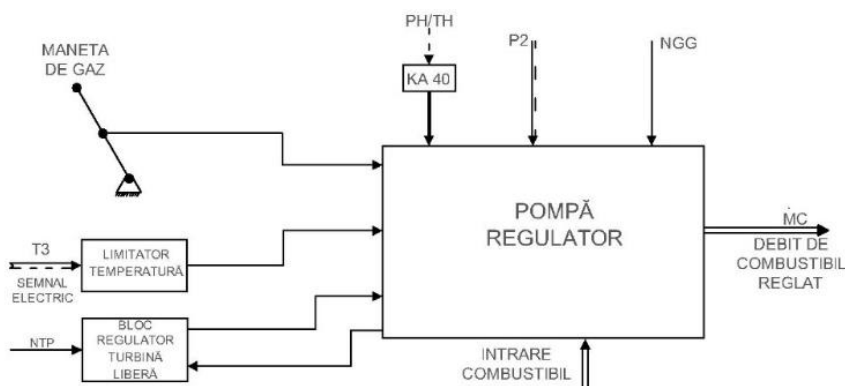


Figura 1.1. Sistem hidromecanic de reglare combustibil fără asistență electronică [31]

Schema bloc prezintă sistemul de reglare a debitului de combustibil la turbomotoarele cu putere la ax TV2-117A și TV3-117MT, având legea de reglare turație turbină liberă constantă. Parametrii mășurați sunt convertiți în semnale hidraulice sau mecanice și apoi intra direct în pompa regulator, iar aceasta împreună cu elementele interne mecanice, realizează dozarea combustibilului în funcție de semnalele de intrare.

#### Legendă:

- $P_H/T_H$  – presiune și temperatura la înălțimea  $H$ ;
- $KA40$  – pompă convertor semnal;
- M.G. – comanda manetei de gaz;
- $M_c$  – debit de combustibil reglat;
- $T_3$  – temperatură gaze la intrarea în turbina gazo-generator;
- $P_2$  – presiunea de după compresor;
- $N_{GG}$  – turația gazo-generatorului;
- $N_{TP}$  – turația turbinei de putere;
- Legea de reglare – Turația  $N_{TP}$  constantă;

### Sistem de control al combustibilului pentru turboventilatorul CFM 56-3

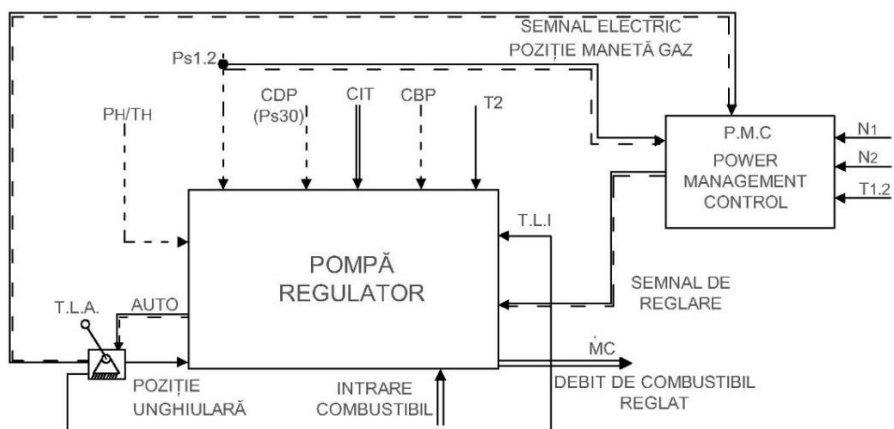


Figura 1.2. Sistem hidromecanic de reglare combustibil cu asistența electronică [33]

Schema bloc prezintă sistemul de reglare a debitului de combustibil la turboventilatorul CFM-56-3, având legea de reglare turație ventilatorului, prin turația rotorului de joasă  $N_1$ . O parte din parametrii mășurați intra direct în pompa regulator sub forma de semnale mecanice și hidraulice iar alți parametrii mășurați, sunt sub forma de semnale electrice, intra în unitatea electronică de control P.M.C. care calculează și furnizează semnalul de reglare debit de combustibil către pompa regulator în funcție de  $P.L.A.$ ,  $P_H/T_H$  și de  $P_{s1.2}$ .

#### Legendă:

- $T.L.A.$  – „Throttle lever angle” unghiul manetei de gaz;
- $P_H/T_H$  – presiunea și temperatura la înălțimea  $H$ ;
- $P_{s1.2}$  – presiunea statică la intrare în ventilatorul F.S.;
- $T_2$  – temperatura la intrare în compresor F.P.;
- $T_{1.2}$  – temperatura de intrare în ventilator F.S.;
- $P_2$  – presiunea la intrare în compresor F.P.;
- $CDP$  – presiunea la ieșire din compresor;
- $CIT$  – temperatura la intrare în compresor;
- $CBP$  – presiunea prelevare aer compresor;
- $T.L.I.$  – semnal intrare manetă de gaz;
- $N_1$  – turație rotor joasă;
- $N_2$  – turația rotorului de înaltă;
- $M_C$  – debit de combustibil reglat;

### Sistem de control al combustibilului pentru turboventilatorul CFM 56-7

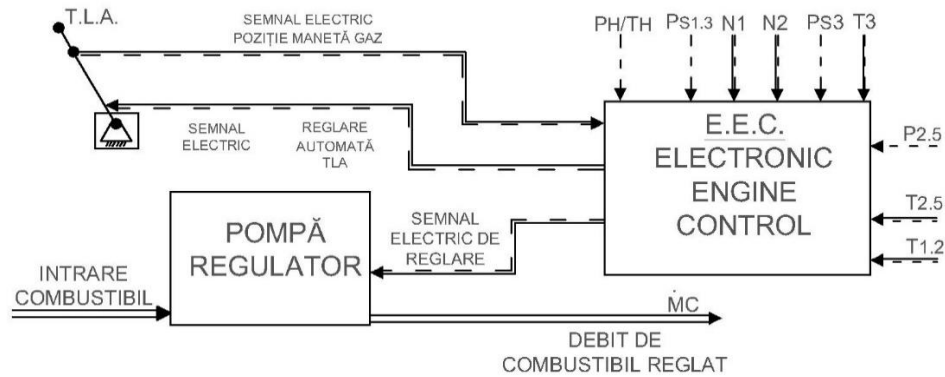


Figura 1.3. Sistem electro-hidromecanic de reglare combustibil cu asistența electronică E.E.C. [35]

Schema bloc prezintă sistemul de reglare a debitului de combustibil la turboventilatorul CFM-56-7, având legea de reglare turație ventilatorului, prin turația rotorului de joasă  $N_1$ . O parte din parametrii mășurați intra direct în pompa regulator sub forma de semnale mecanice și hidraulice iar alți parametrii mășurați, sunt sub forma de semnale electrice, intra în unitatea electronică de control E.E.C. care calculează și furnizează semnalul de reglare debit de combustibil către pompa regulator în funcție de  $T.L.A.$ ,  $P_H/T_H$ , nr. Mach și de  $P_{s1.3}$ .

#### Legendă:

- $P_H/T_H$  - presiunea și temperatura la înălțimea  $H$ ;
- $P_{s3}$  - presiunea statică după compresorul de înaltă
- $N_1$  - turație rotor joasă
- $N_2$  - turația rotorului de înaltă
- $P_{s1.3}$  - presiunea statică la ieșire din ventilator
- $P_{2.5}$  - presiunea la intrare în compresorul de înaltă
- $T_{1.2}$  - temperatura totală intrare motor
- $T_3$  - temperatura la ieșire compresor
- $T_{49.5}$  - temperatura gazelor la ieșire din turbina de înaltă (EGT)
- $T_{2.5}$  - temperatura la intrare în compresorul de înaltă
- $T.L.A.$  - „Throttle lever angle”.

### Sistem de control al combustibilului pentru turbomotorul cu putere la ax ST40M

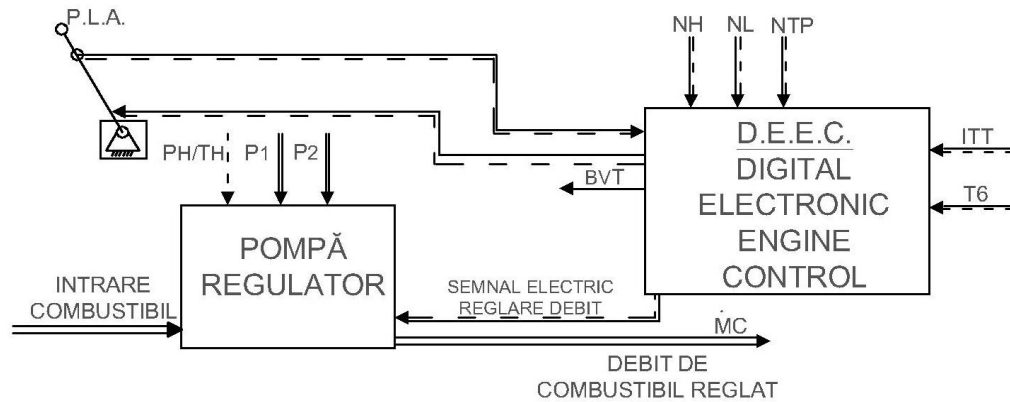


Figura 1.4. Sistem electro-hidromecanic de reglare combustibil cu asistența electronică D.E.E.C. [37]

Schema bloc prezintă sistemul de reglare a debitului de combustibil la turbomotoarele cu putere la ax tip ST40M, având legea de reglare turație turbină liberă variabilă. O parte din parametrii măsurați intra direct în pompa regulator sub forma de semnale hidraulice și pneumatice, iar o parte intra în unitatea electronică D.E.E.C sub forma de semnale electrice. Unitatea D.E.E.C calculează și furnizează semnalul de reglare, electric, pompei regulator, pentru dozarea optimă a combustibilului.

#### Legendă:

- $P_H/T_H$  - presiunea și temperatura la înălțimea  $H$ ;
- $N_H$  - turația rotorului de înaltă
- $N_L$  - turația rotorului de joasă
- $N_{TP}$  - turația turbinei de putere
- $I_{TT}$  - temperatura între turbina de joasă și turbina de putere
- $P_1$  - presiunea de alimentare combustibil
- $P_2$  - presiunea de ieșire de combustibil
- $T_6$  - temperatura la ieșire din turbina de putere
- $P. L. A.$  - poziția manetei de putere
- $BVT$  - semnal supape anti pompaj

### Sistem de control al combustibilului pentru turboventilatorul TFE-731

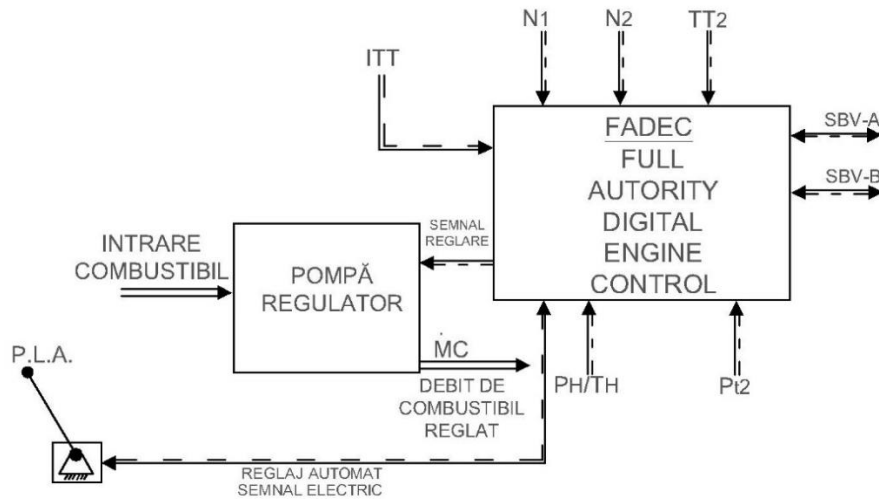


Figura 1.5. Sistem electro-hidromecanic de reglare combustibil cu asistența electronică FADEC [39]

Schema bloc prezintă sistemul de reglare a debitului de combustibil la turboventilatorul TFE-731, având legea de reglare turație ventilatorului, prin turația rotorului de joasă  $N_1$ . Parametrii măsoarați intra direct în FADEC sub forma de semnale electrice. Unitatea electronică FADEC calculează și furnizează semnalul de reglare debit de combustibil către pompa regulator în funcție de  $P.L.A.$ ,  $P_H/T_H$ , nr. Mach,  $T_{T2}$  și de  $P_{t2}$ .

#### Legendă:

- $P.L.A.$  – poziția manetei de gaz
- $P_H/T_H$  - presiunea și temperatura la înălțimea  $H$ ;
- $T_{T2}$  – temperatură totală la intrare motor
- $P_{t2}$  – presiunea totală la intrare motor
- $N_1$  – turația rotorului de joasă
- $N_2$  – turația rotorului de înaltă
- $I_{TT}$  – temperatura intrare trepte de turbină
- $SBV - A$  – semnal supape anti pompaj 1
- $SBV - B$  – semnal supape anti pompaj 2

### Sistem de control al combustibilului pentru turboventilatorul CFM-LEAP

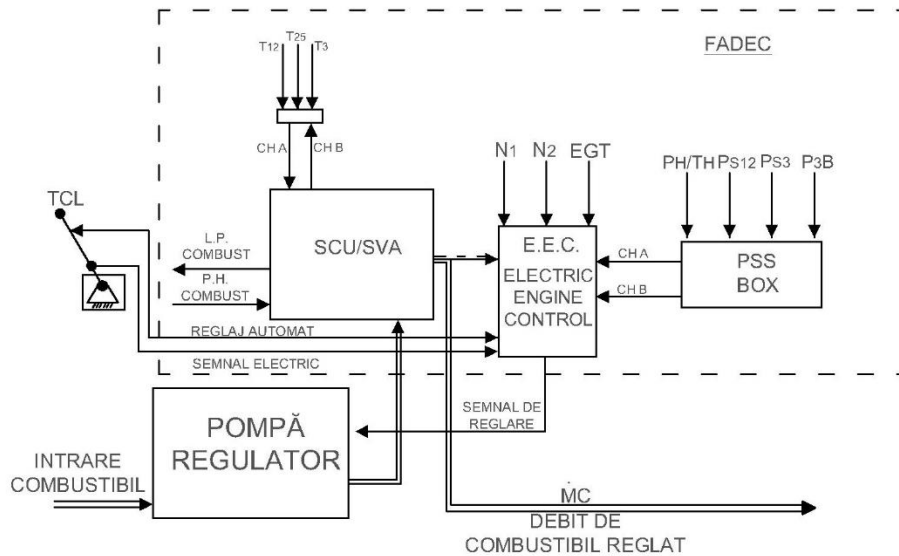


Figura 1.6. Sistem electro-hidromecanic de reglare combustibil cu asistență electronică FADEC [41]

Schema bloc prezintă sistemul de reglare a debitului de combustibil la turboventilatorul CFM-LEAP având legea de reglare turație ventilatorului, prin turația rotorului de joasă  $N_1$ . Parametrii măsuțați intra direct în FADEC sub forma de semnale electrice. Unitatea electronică FADEC este împărțită în mai multe subsisteme, care preiau separat parametrii măsuțați din diferite secțiuni ale motorului și îi transmit către unitatea electronică E.E.C. care calculează și furnizează semnalul de reglare debit de combustibil către pompa regulator în funcție de  $T.C.L.$ ,  $P_H/T_H$ , nr. Mach,  $T_{2.5}$  și de  $P_{s12}$ .

#### Legendă:

- $P_H/T_H$  - presiunea și temperatura la înălțimea  $H$ ;
- $P_{s12}$  - presiunea de intrare în ventilator
- $P_{s3}$  - presiunea după compresorul de înaltă
- $P_{3b}$  - presiunea de prelevare aer
- $N_1$  - turația rotorului de joasă
- $N_2$  - turația rotorului de înaltă
- $EGT$  - temperatura gazelor turbinei
- $T_{12}$  - temperatura totală intrare motor
- $T_{2.5}$  - temperatura intrare compresorul de înaltă
- $T_3$  - temperatura ieșire compresor de înaltă
- $T.C.L.$  - „Thrust control lever”
- $E.E.C.$  - electronic engine control
- $PSS BOX$  - subsistem de presiune
- $SCU - SVA$  - Split Control Unit / Servo Valve Assembly

Din această comparație, a sistemelor de reglare combustibil pentru diferite tipuri și clase de turbomotoare, proiectate și fabricate în ani diferiți, se observa trecerea de la sisteme hidromecanice pentru reglarea debitului de combustibil la sisteme electronice de măsurare și dozare a debitului de combustibil, pe măsură ce electronica a avansat și mai ales electronica circuitelor integrate de tip procesoare și microprocesoare care pot fi programate cu funcții matematice pentru a furniza la ieșire semnalul de reglare a debitului, calculat în funcție de parametrii electrici măsurați.

#### **1.4. STADIUL ACTUAL AL SRA PENTRU TURBOMOTOARE DE AVIAȚIE**

Evoluția motoarelor cu turbine cu gaz a dus la creșterea cerințelor în ceea ce privește sistemele de control al motorului pentru a spori turația și pentru a îmbunătăți consumul de combustibil. Aceste solicitări au generat o utilizare pe scară largă a sistemelor de control electronic. Generațiile anterioare ale unor astfel de sisteme, care au folosit conceptul de supraveghere, au fost introduse în anii 1970 și pot fi găsite într-un număr mare de aeronave care funcționează astăzi, este vorba despre ECU ( electronic control unit ).

După cum arată aceste exemple, FADEC sprijină eforturile de creștere a performanței și fiabilității și reducerea costurilor totale prin realizarea unui sistem ce conține EEC (sau ECU), unde se adaugă și extensii care monitorizează caracteristicile motorului de aviație.

Sistemele FADEC se află în prezent în funcțiune într-un număr mare de aeronave, câteva exemple fiind: noile aeronave militare F-18E / F35 și Eurofighter și aeronavele civile Airbus A320, A321, A380, Boeing 737, Boeing 747 și Boeing 777.

#### **1.5. STADIUL ACTUAL AL SRA PENTRU TESTAREA MTR DE AVIAȚIE ÎN STANDUL DE PROBE**

Sistemele actuale pentru testarea turbomotoarelor de aviație, sunt compuse în principal dintr-un Server și unul sau mai multe calculatoare în regim industrial, server care trebuie să fie destul de puternic pentru a gestiona toate informațiile de la celelalte sisteme pc din rețea. Este cunoscut faptul că se pot atinge viteze foarte mari de achiziții de date și atunci sistemul server trebuie să fie capabil să răspundă cerințelor.

Pe lângă tehnica de calcul, sistemele pentru testarea turbomotoarelor de aviație, în standul de probe trebuie să existe unul sau mai multe programe software, pentru gestionarea echipamentelor de măsură și control dar și pentru programarea testului pentru fiecare turbomotor dedicat.

Fiecare bloc de comandă se poate programa separat după o logica programata în funcție de fiecare motor în parte și de cernitele acestuia de funcționare.

## CAPITOLUL 2

### PROCESE TRANZITORII ȘI LEGILE DE REGLARE ALE TURBOMOTOARELOR DE AVIAȚIE

#### 2.1. TEORIA SISTEMELOR DE REGLARE AUTOMATĂ

Proiectarea unui sistem de control pentru un motor începe logic cu selectarea conceptelor de bază de operare (denumite în mod obișnuit moduri de control) pentru fiecare element de comandă necesar. Ea continuă într-o secvență, aproximativ, după cum urmează:

- a) Cerințele motorului și semnalele sau parametrii disponibili sunt evaluați pentru a selecta modul de control care va oferi cea mai bună funcționare;
- b) Sunt selectate tipurile de regulatoare de control și computere care urmează să fie utilizate;
- c) Se evaluează probleme speciale ale sistemului, cum ar fi pomparea, măsurarea sau injecția combustibilului (în arzătoare) și sunt proiectate componentele corespunzătoare;
- d) Sunt evaluate cerințele de stabilitate și cerințele de performanță de bază ale sistemului;
- e) Se stabilește capacitatea componentelor de comandă de a îndeplini cerințele fizice ale rezistenței, mediului și vibrațiilor;
- f) Sistemul final este evaluat prin analiză sau testare pentru a-și stabili capacitatea de a efectua așa cum este necesar în condiții de funcționare reale.

Fiecare pas în această secvență de proiectare este strâns legat de cerințele de proiectare și de performanță ale motorului pe care vor fi utilizate comenzile [6,48].

#### 2.2. CERINȚELE DE PROIECTARE A SISTEMELOR DE REGLARE ȘI CONTROL AUTOMAT

Capacitatea de a regla performanța tranzitorie și performanța staționară reprezintă un avantaj distinct al sistemelor de control cu feedback. Pentru a analiza și proiecta sisteme de control, trebuie să definim și să măsurăm performanța unui sistem. Apoi, pe baza performanței dorite a unui sistem de control, parametrii sistemului pot fi ajustați pentru a oferi răspunsul dorit. Deoarece sistemele de control sunt în mod inerent sisteme dinamice, performanța este de obicei specificată atât în termeni de răspuns în timp pentru un anumit semnal de intrare, cât și în ceea ce privește eroarea staționară rezultată.

Specificațiile de proiectare pentru sistemele de control includ în mod normal mai mulți indici de răspuns în timp pentru o comandă de intrare specificată, precum și o precizie dorită la stare staționară. Cu toate acestea, adesea în cursul oricărei faze de proiectare, specificațiile sunt revizuite pentru a afecta un compromis. Prin urmare, specificațiile nu sunt rareori un set rigid de cerințe, ci mai degrabă o primă încercare de a enumera o performanță dorită.

Problemele de proiectare întâlnite în sistemele de control al datelor discrete sunt în esență similare cu cele întâlnite în proiectarea sistemelor de control al datelor continue. Practic, un proces



trebuie controlat astfel încât rezultatul său să se comporte conform unor specificații de performanță prescrise.

Selectarea unor moduri specifice de control, care vor satisface cerințele de performanță ale motorului, este necesară înainte de a putea stabili un concept de control de bază pentru proiectarea componentei fizice necesare. Următorii pași vor fi necesari:

1. Definierea cerințelor de control;
2. Selectarea modului de control;
3. Determinarea tipului de combustibil și a sistemului de alimentare cu combustibil;
4. Selectarea tipului de acționarea servo de putere pentru controlul elementelor cu geometrie variabilă;
5. Selectarea metodelor de măsurare a parametrilor necesari;
6. Selectarea tipurilor de calculatoare de control (FADEC);
7. Selectarea acurateței cu care va fi folosită pentru fiecare variabilă controlată.

### 2.3. PROCESE TRANZITORII ȘI LEGILE DE REGLARE ALE TURBOMOTOARELOR DE AVIAȚIE

#### Regimul de antrenare la rece

Pentru realizarea regimurilor de antrenare la rece este necesară alimentarea cu putere a rotorului turbomotorului de la o sursă exterioară. Pentru aceasta se utilizează un dispozitiv de pornire special, și anume un starter (demaror). Puterea produsă de acest dispozitiv de pornire, asigură în principal învingerea frecărilor și accelerarea rotorului astfel că în camera de ardere să se atingă condițiile necesare aprinderii amestecului de combustibil – aer [3,56].

În această fază puterea consumată de compresor pentru comprimarea aerului este neglijabilă în comparație cu puterea consumată pentru învingerea frecărilor.

Pe caracteristica compresorului, liniile regimurilor de antrenare la rece se învecinează cu regimurile de auto rotație, care reprezintă cazuri limită pentru regimurile de antrenare la rece.

Ecuțiile liniilor regimurilor de antrenare la rece poate fi scrisă sub forma:

$$\frac{\dot{M}_a \cdot \sqrt{T_1^*}}{P_1^*} = A_3 \cdot \sin \alpha_3 \frac{\sigma_{ca}^*}{\sqrt{\tau_c}} \cdot \sqrt{\frac{K}{R} \left( \frac{2}{K+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \cdot \pi_c \quad (2.13)$$

unde:

$$\tau_c = \frac{T_2^*}{T_1^*} \quad (2.14)$$

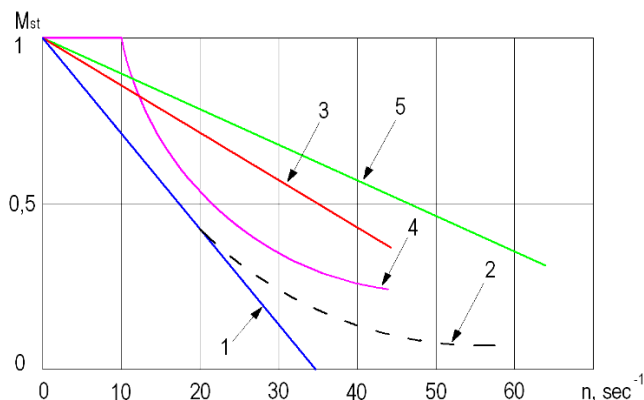


Figura 2.33. Caracteristicile mecanice ale dispozitivelor de pornire de diferite tipuri [3,58] - dreapta

- 1- Electrostarter cu excitație în paralel;
- 2- Electrostarter cu excitație în serie;
- 3- Starter cu turbocompresor;
- 4- Starter hidraulic;
- 5- Turbostarter cu aer de joasă presiune.

#### Puterea dispozitivului de antrenare la rece

Cea mai mare răspândire, în aviație, o au dispozitivele electrice și cele cu aer de joasă presiune. Dispozitivele de pornire electrice se folosesc la motoare de puteri mici, iar cele cu aer de joasă presiune pentru motoarele de puteri medii și mari.

Fiecare tip de dispozitiv de pornire îi este aparțină o caracteristică mecanică, prezentată de obicei sub forma variației cuplului motor de pe arborele de ieșire al starterului (demarorului), în funcție de turația sa, aceasta fiind o funcție liniară, hiperbolică, parabolică sau din combinații ale acestora. [3,53]

$$M_{st} = M_0 - b \cdot n \quad (2.15)$$

unde:

$M_0$ - cuplu motor inițial pe arborele motorului;

$b$  - coeficientul constant pentru tipul de starter dat și pentru raportul de transmisie de la arborele starterului la arborele motorului;

$n$  - turația arborelui motorului.

Variația reală a cuplului motor în funcție de turație este mult mai complicată, ea fiind într-o mare măsură o reprezentare convențională.

Cunoscând caracteristica de cuplu (Figura 2.34) se poate determina caracteristica de putere:

$$P_{st} = M_{st}n = (M_0 - b \cdot n) \cdot n = M_0 \cdot n - b \cdot n^2 \quad (2.16)$$

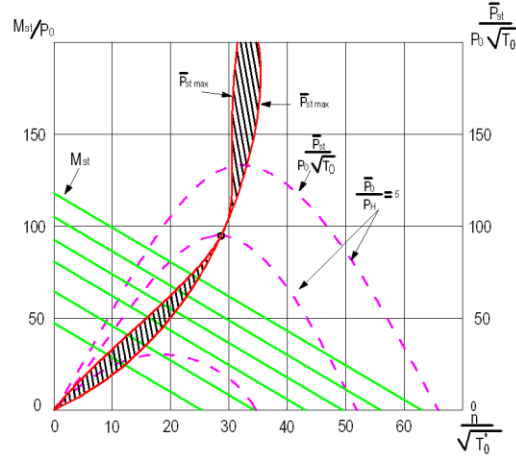


Figura 2.34. Caracteristica mecanică a turbostarterului cu aer de joasă presiune [3,58]

Din condiția  $\frac{dP_{st}}{dn} = 0$  se află expresia pentru turația la care puterea atinge valoarea maximă.

$$n \frac{M_0}{2 \cdot b_{Pmax}} \quad (2.17)$$

Înlocuind se obțin expresiile pentru  $M_{Pmax}$  și  $P_{stmax}$ :

$$M_0 \frac{M_0}{2 \cdot b} \frac{M_0}{2 Pmax} \quad (2.18)$$

$$P \frac{M_0}{2} \frac{M_0}{2 \cdot b} \frac{M_0^2}{4 \cdot b_{stmax}} \quad (2.19)$$

sau:

$$n \frac{M_0}{b} Pmax_{stmax} \quad (2.20)$$

$$P \frac{M_0 \cdot n_{stmax}}{4} \quad (2.21)$$

Unde:  $n_{stmax}$  este turația maximă a starterului pentru care  $P_{st}=0$ .

## 2.4. NIVELUL DE PERFORMANȚĂ ȘI LIMITĂRILE SISTEMELOR DE REGLARE AUTOMATĂ

Digitalizarea sistemului de automatizare al unui turbomotor necesită integrarea software-ului de automatizare și extinderea tehnicilor de comunicație, precum și de securitate. Beneficiile potențiale pentru digitizare includ reducerea consumului de energie și a perioadelor de nefuncționare a turbomotorului, îmbunătățirea calității, eliminarea erorilor umane, îmbunătățirea planificării și prognozării. Tehnologia cloud și wireless sunt elemente cruciale ale tranziției către digitalizare.

## CAPITOLUL 3

### ARHITECTURA ȘI PERFORMANȚELE SISTEMULUI DE REGLARE AUTOMATĂ CLASIC, CU O SINGURĂ UNITATE ELECTRONICĂ PLC

#### 3.1. SCHEMA BLOC A SISTEMULUI DE REGLARE CLASIC CU UN PLC ȘI CU INSTALAȚIILE AUXILIARE

Pentru a realiza experimentări cu turbomotorul de referință, sunt necesare o serie de sisteme auxiliare. Acestea asigură condițiile optime de funcționare (combustibil, aer, ulei etc) care sunt monitorizate și controlate printr-un PLC („Programmable logic controller”). De asemenea, turbomotorul este controlat prin sistemul propriu de dozare al combustibilului la care i s-a adaptat o manetă de gaz, pentru a regla poziția clapetei de pe pompa regulator, care de asemenea comunică direct cu PLC. Afișarea datelor, prelucrarea acestora dar și comenzile și controlul turbomotorului, se realizează printr-un sistem de tip PC, alcătuit dintr-un calculator desktop și monitor pentru afișarea parametrilor în timp real.

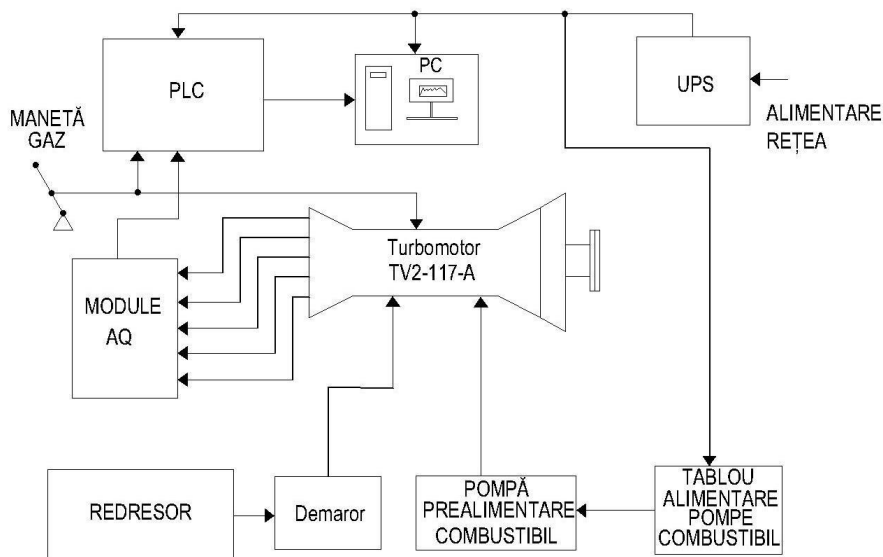


Figura 3.1. Schema bloc a sistemului de reglare automată clasic a turbomotorului împreună cu instalațiile auxiliare

În caz de avarie cu energie electrică, sistemul UPS asigură pentru o perioadă scurtă de timp funcționarea sistemului de combustibil, PLC-ului dar și a sistemului PC pentru a putea opri turbomotorul în condiții de siguranță. Demarorul are un rol important în procesul de pornire și are nevoie de o sursă de energie de putere mare, printr-un redresor care să poată asigura și panta de pornire în conformitate cu manualul tehnic al turbomotorului de referință.

### 3.2. PREZENTAREA ECHIPAMENTELOR DIN SISTEMUL DE REGLARE AUTOMATĂ AL STANDULUI

#### Automatul programabil GE 90-30

Sistemul automat de reglare, control și achiziții date are la baza utilizarea unui PLC, Automat Programabil, fiind un calculator industrial de proces care poate fi programat în funcție de bucla de reglare dorită și care comunică cu ușurință cu celelalte echipamente care intră în alcătuirea sistemului de reglare automată (traductori de presiune, dozator combustibil, senzori de temperatura, adaptoare de temperatură, diferite elemente de control și acționare, actuatori liniari, traductori de nivel și debitmetre).



Figura 3.3. Sistemul de automatizare control și achiziții date, PLC GE 90-30 [60]

Automatul Programabil folosit pentru această aplicație, în sistem de reglare automată, este din seria 90-30 [60] fabricat de firma GE-FANUC. Acesta se programează folosind limbajul de tip „LAD”, care este un limbaj grafic de programare prin existența unor elemente predefinite. Prin urmare, este de fapt o reprezentare grafică a ecuațiilor booleene, realizând o combinație între contacte (variabile de intrare) și bobine (variabile de ieșire). Simbolurile grafice ale limbajului sunt plasate în diagramă, în mod asemănător cu plasarea contactelor și releelor într-o schemă electrică.

Limbajul LAD este alcătuit din rețele care utilizează simboluri grafice. Execuția unui program se face de sus în jos, iar o rețea este executată de la stânga la dreapta.

Acesta are o serie de funcții pe care le poate realiza, în funcție de cerințele proiectului și programarea acestuia:

- Afișarea și prelucrarea parametrilor;
- Realizarea secvențelor de funcționare: pornire, funcționare la ralanti, încărcare, conectare la rețea, oprire normală sau de urgență;
- Afișarea orei curente;
- Realarmarea operatorului prin colorarea parametrilor afișați la apropierea de limitele de avertizare și de protecție a parametrilor;
- Ecrane pentru diferite secvențe de funcționare;
- Scheme tehnologice în componenta ecranelor;
- Grafice cu parametri;
- Afișarea alarmelor;
- Salvarea automată a parametrilor importanți în secvențele de pornire și de oprire;

Studii și cercetări experimentale privind adaptarea sistemelor de reglare automată a turbomotoarelor, în scopul optimizării testării în bancul de probe

- Salvarea automată a parametrilor importanți în secvențele oprire pe o perioadă de 5-10 minute înainte de declanșare cu o frecvență de minimum un set de parametri pe secundă;
- Salvarea „evenimentelor” solicitată de către operator;
- Salvarea de date și realizarea listelor de parametri necesare pentru diferite raportări cerute operatorului;
- Achiziționarea parametrilor curenți, la intervale de timp dorite;
- Posibilitatea apelării fișierelor salvate pentru pornire, oprire și evenimente în vederea analizării datelor;
- Legende explicative aferente simbolurilor folosite pentru parametrii afișați și pentru componentele schemelor tehnologice;
- Transmiterea datelor la PC pentru afișare și stocare.

### 3.3. SCHEMA ELECTRICĂ A SISTEMULUI DE INSTRUMENTARE ȘI ACHIZIȚII DATE

În Figura 3.23 este prezentată schema conexiunilor electrice a parametrilor principali achiziționați de la turbomotor cu sistemul de achiziție PLC GE 90-30. Fiecare parametru necesită conexiune individuală cu PLC-ul dar și alimentare separată cu tensiune electrică.

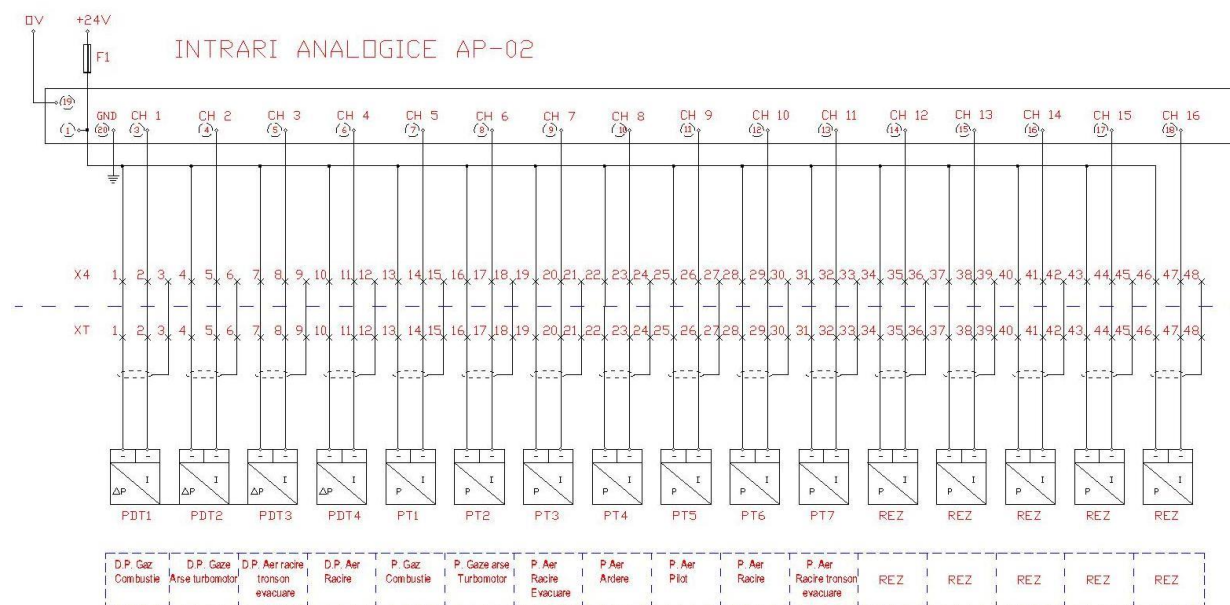


Figura 3.23. Schema instrumentării turbomotorului pentru parametrii de bază

### 3.4. PREZENTAREA NIVELULUI DE CAPABILITATE AL SISTEMULUI DE REGLARE AL STANDULUI

Prin capabilitatea standului definim numărul maxim de canale de tip analogic sau digital, de intrare sau ieșire cu specificațiile aferente, viteza maximă de achiziție, stabilitatea operării

programului de testare, complexitatea software-ului de testare și partea de salvare și post-procesare a datelor.

- Elemente de comanda de tip ieșire digitală în tensiune, cu 32 canale pe 12/ 24 VDC și un curent de 0.5 A;
- Elemente de comanda de tip intrare digitală în tensiune, cu 64 canale pe 24 VDC și un curent de 7 A;
- Parametri analogici de intrare în curent în configurație de 48 canale de lucru, domeniul de lucru fiind de 4 – 20 mA;
- Elemente de control de tip ieșire analogică pentru echipamente care operează în tensiune, 16 canale 0 ÷ 10 VDC;
- Rata de achiziție impusă pentru toate canalele este de 1 Hz, adică salvarea datelor 1 / sec;
- Salvarea datelor se realizează pe unitatea PC;

Software-ul se programează în limbaj Ladder Diagram, având o posibilitate redusă de dezvoltare logică de complexitate ridicată, neputând comunica cu alte echipamente.

### **3.5. EXPERIMENTĂRI ÎN CELULA DE TESTARE CU SISTEMUL DE REGLARE AUTOMATĂ CLASIC**

Pentru experimentarea în celula de testare, turbomotorul de referință a fost montat cu ajutorul unor ansamble mecanice de susținere și tubulaturi pentru zona de admisie aer și evacuare gaze arse. De asemenea, s-a realizat o instrumentare de bază, conform cu manualul tehnic al motorului [31] cu un număr suficient de parametri termogazodinamici și s-au creat legături cu elementele de comandă și control.

Se poate observa cum după stabilizarea motorului la un regim constant, apar fluctuații în parametrii motorului datorită controlului imprecis dar și a erorilor de măsurare. Cel mai relevant factor din aceste tipuri de testări este rata de achiziție care s-a realizat la  $r_a = 1$  s, fiind insuficient pentru controlul precis al unui turbomotor. Uzual se recomandă ca rata de achiziție să fie  $r_a = 0,1$  s sau mai mică, pentru a putea face corecții asupra elementelor de comandă dar și pentru a surprinde orice modificare în timp real al parametrilor.

### **3.6. ANALIZA ȘI PREZENTAREA DATELOR OBTINUTE LA DIFERITE REGIMURI DE TESTARE**

Experimentul a constatat în pornirea turbomotorului de referință, aducerea la un regim stabilizat de ralanti și în final, oprirea.

În regimul de pornire, turația gazogenerator crește la o limită aproximativ de  $NGG = 85\%$  din maximul admis de motor iar curba de pornire se bazează pe demarorul electric care este comandat de cele două redresoare electrice pentru a asigura toate condițiile necesare de consum. Astfel că, după atingerea în limita maximă admisă de pornire, turbomotorul scade în regimul de  $NGG = 65\%$  care reprezintă regimul de ralanti și se stabilizează în acea plajă de valori.

Studii și cercetări experimentale privind adaptarea sistemelor de reglare automată a turbomotoarelor, în scopul optimizării testării în bancul de probe

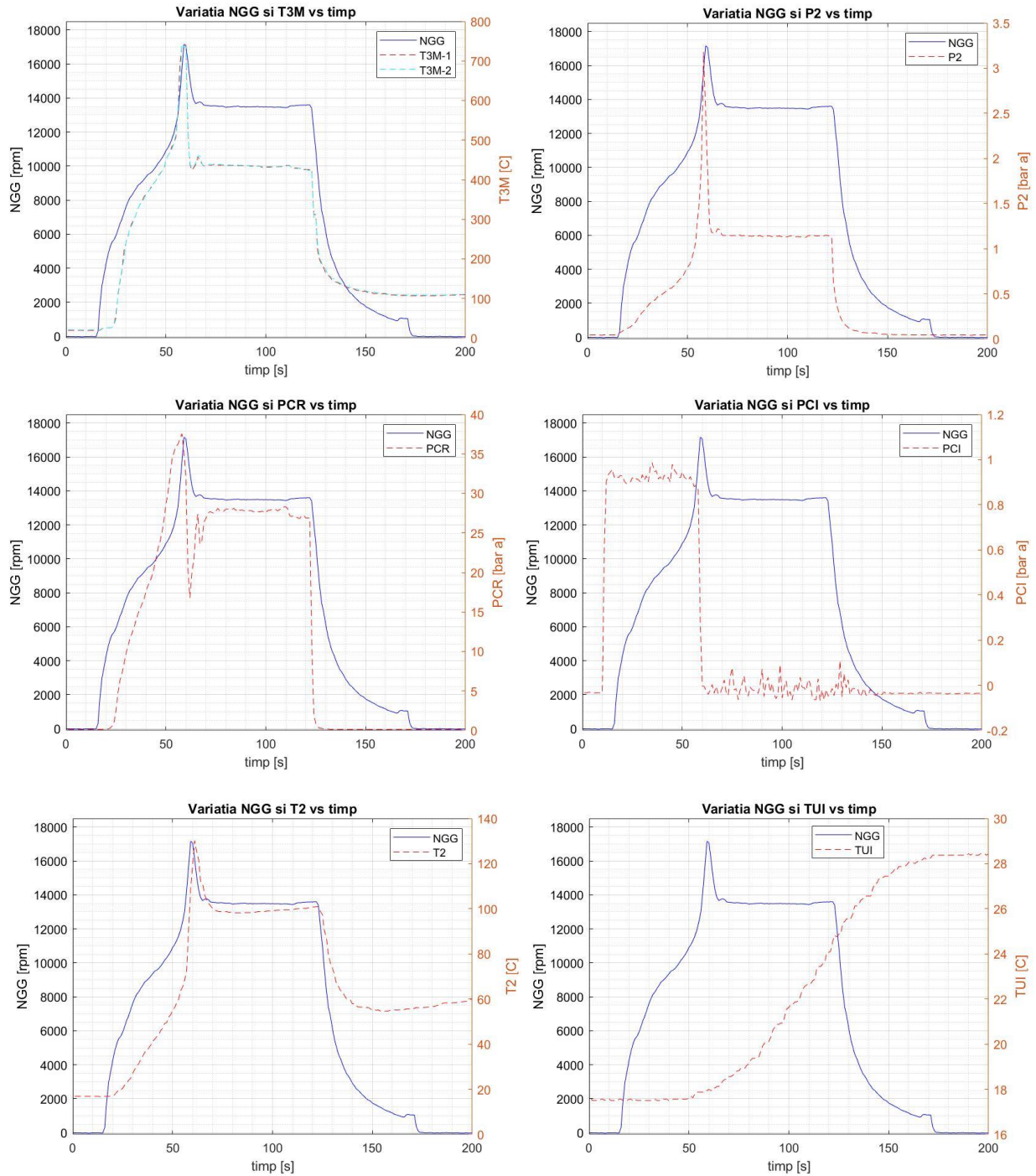


Figura 3.37. Temperatura medie din camera de ardere ( $T3M$ ), Presiunea de după compresor ( $P2$ ), presiune combustibil rampă ( $PCR$ ), presiune combustibil ( $PCI$ ), Temperatura după compresor ( $T2$ ), Temperatura uleiului la intrare motor ( $TUI$ ) în raport cu turația gazo-generatorului ( $NGG$ ) din Experimentul Nr. 2



## CAPITOLUL 4

### SOFTWARE-URI DE ULTIMĂ GENERAȚIE FOLOSITE ÎN PROGRAMAREA SISTEMELOR DE REGLARE AUTOMATĂ ÎN STANDUL DE TESTARE ȘI EXPERIMENTARE

#### 4.1. MEDIU DE PROGRAMARE LABVIEW ȘI INTEGRAREA LUI ÎN SISTEMUL DE REGLARE AUTOMATĂ

Programul software LabView [73] reprezintă un mediu de programare de tip grafic, realizat de National Instruments, ce oferă o gamă variată și ridicată de diversificare a modului de achiziționare, prelucrare, salvare și manipulare date de la senzor până la post-procesare. Este folosit pentru a dezvolta sisteme automate de cercetare, validare și testare a producției. Reprezintă unul dintre cele mai utilizate medii de programare pentru testare turbomotoare [74], motoare de rachetă [75] și alte aplicații specifice datorită complexității de care dispune din punct de vedere al monitorizării și salvării de parametri, a sistemului de control [76], a sistemului de măsurare a vibrațiilor [77] dar și de creării a unui sistem interactiv dintre operator și interfața operator [78]. Acesta utilizează o serie de module adiționale ce sunt utilizate pentru programare mai specifică, spre exemplu utilizarea modulului „Vision Module” pentru aplicații ce au în componența lor, dispozitive de imagistică, modulul „NI-Scope” pentru aplicații ce au în componența lor, dispozitive de tip osciloscop etc.

Acest mediu de programare permite realizarea unor programe, denumite VI (fișier instrumental virtual) prin diverse metode, atingând același scop. Spre exemplu, achiziționarea de parametri de tip temperatură se poate realiza prin utilizarea unui VI predefinit, denumit „DAQ Assistant”, prin realizarea corectă a definiției cu ajutorul elementelor „DAQmx” sau prin alte metode.

Pentru afișarea temperaturii, este nevoie de definirea canalului din PLC și alegerea setărilor aferente, selectarea timpului de achiziție și de achiziționarea datelor brute sub formă de undă.

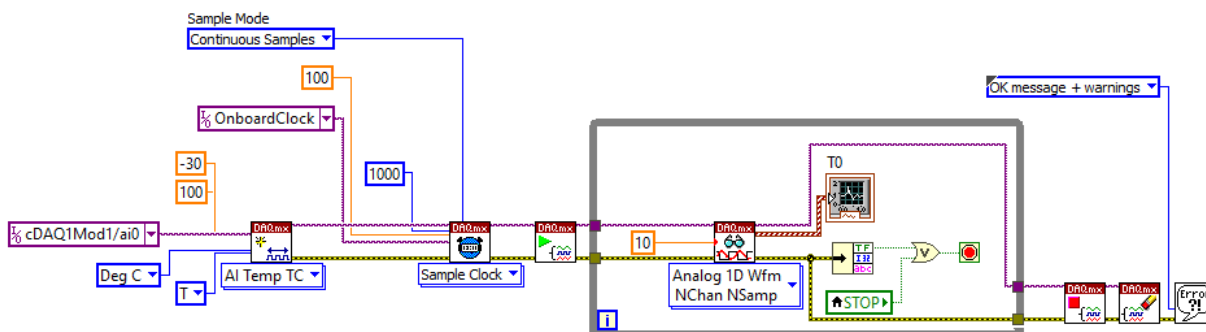


Figura 4.3. Definirea canalului de citire a temperaturii și afișarea semnalului brut prin DAQmx

Studii și cercetări experimentale privind adaptarea sistemelor de reglare automată a turbomotoarelor, în scopul optimizării testării în bancul de probe

## 4.2. ALGORITMI ÎN TIMP REAL ȘI MEDII DE PROGRAMARE PENTRU SISTEME DE REGLARE AUTOMATĂ

Algoritmi real-time fac referire la programarea în mediul Labview pentru realizarea unor experimente sau testări în mediu continuu care achiziționează anumiți parametri ca intrare, iar pe baza lor se pot realiza calcule pentru parametri indirecti, ce nu pot fi mășurați cu senzori, traductoare sau echipamente speciale. În baza parametrilor de intrare se pot realiza legături cu parametrii de ieșire, sub formă de comandă și control și se stochează orice informație pentru a se realiza procesul de post-procesare și unde este cazul, compararea cu partea teoretică.

## 4.3. REGLAREA AUTOMATĂ ȘI CONTROLUL OPTIM AL TURBOMOTOARELOR DE AVIAȚIE, UTILIZÂND PROGRAME SOFTWARE DEDICATE CYRES

Programul CYRES [45], realizat de Safran Group, reprezintă un program software dedicat celulelor de testare turbomotoare prin care se pot achiziționa parametrii, realiza programe cu parte de automatizare de comandă și control, poate realiza o comunicație nativă cu alte tipuri de PLC predefinite, comunica cu sisteme video oferite de Pelco [81] prin intermediul unui sistem complex. DACS („Data acquisition and control system”) deține o arhitectură alcătuită din mai multe subsisteme prin care se divid sarcinile într-un mod eficient, putând astfel atingând o performanță și o fiabilitate crescută.

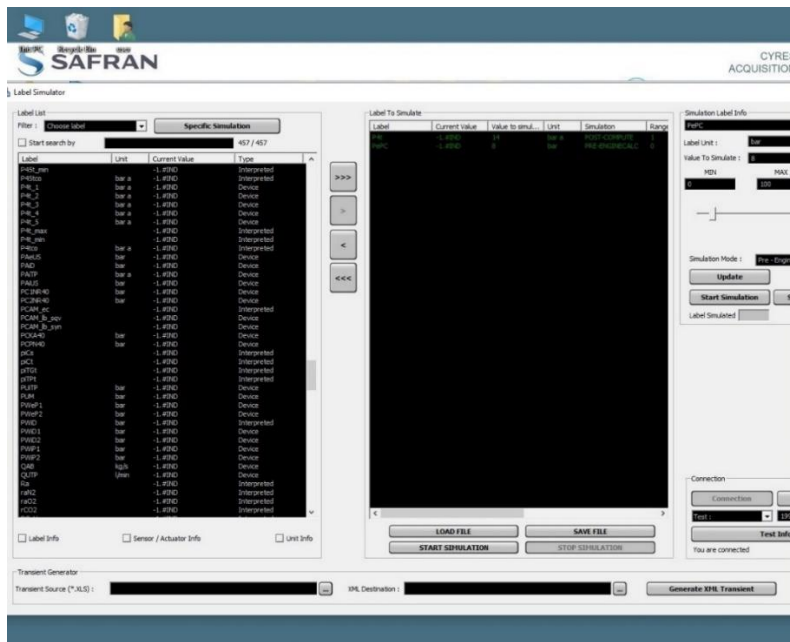


Figura 4.12. Algoritmul realizat prin „Engine Calculations” pentru determinarea limitărilor în situația de oprire urgență; Simularea și verificarea parametrilor în calculatorul de achiziție

Sistemul de achiziție poate avea o rată predefinită de  $r_a = 250 \text{ Hz}$  și ajungând maxim la  $r_a = 100 \text{ kHz}$  cu un sistem hardware compatibil. Utilizează de asemenea o parte predefinită pentru utilizarea în testare dar deține o complexitate avansată pentru realizarea unui control automatizat.

Studii și cercetări experimentale privind adaptarea sistemelor de reglare automată a turbomotoarelor, în scopul optimizării testării în bancul de probe

Programarea se face prin mai multe etape, având atribuirea unor modele și teste în funcție de tipul motor ce este specifică pentru o testare în serie. În Figura 4.13. se prezintă un exemplu de program realizat în Cyres, ce funcționează în timp real pentru testarea unui turbomotor, cuprinzând partea de instrumentare, comandă, control, automatizare și salvare a datelor.

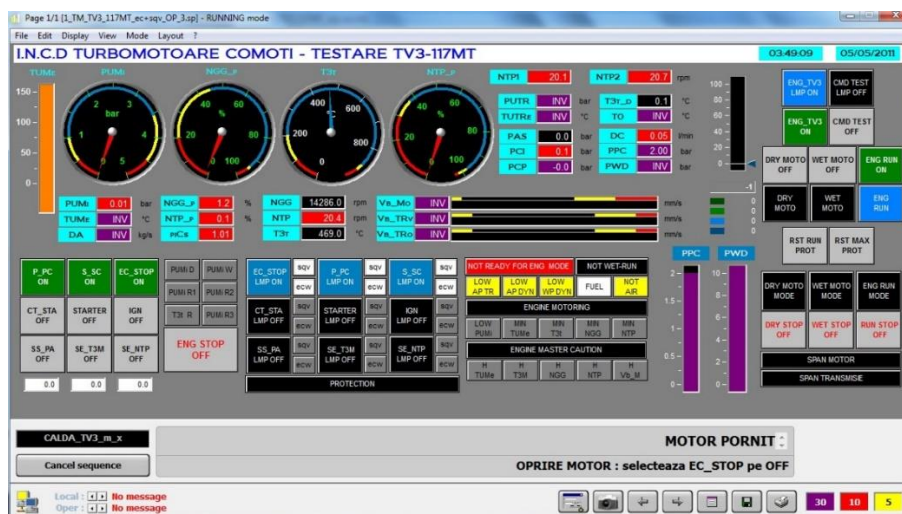


Figura 4.13. Panoul operator pentru testarea turbomotorului

Pentru partea de post-procesare, se utilizează un program separat și se exportă în format de tabel cu ajutorul unui format predefinit.

#### 4.4. ELECTRONICA MODERNĂ ÎN SISTEMELE DE REGLARE AUTOMATĂ ACTUALE

În Figura 4.14 se prezintă un prototip de instrumentare al unui ajutor de reacție, cu senzorii dispuși radial pe interior. Ei sunt conectați în seturi la cinci unități de microprocesare și comunicație (plăci Gumstix Connex 400xm-bt cu comunicație Bluetooth), montate pe exteriorul ajutorului. Valorile de la senzori sunt transmise wireless către o stație laptop, pe care se face vizualizarea hărții de temperatură a zonei monitorizate, profilurile ratei de variație a temperaturii și, la cerere, istoricul valorilor individuale. Asemănător senzorilor termici, s-a conectat un număr mai mic de microfoane pentru a demonstra posibilitatea adăugării unei întregi varietăți de senzori, precum și posibilitatea de a funcționa cu senzori cu lățime de bandă mare. Cu totul, sistemul de monitorizare wireless conține: 20 de senzori temperatură tip IC cu interfață I<sup>2</sup>C, 4 microfoane, 5 noduri de procesoare bazate pe Gumstix, cu plăci de expansiune personalizate pentru a furniza conectivitate audio și I<sup>2</sup>C, precum și stația laptop de vizualizare.

Studii și cercetări experimentale privind adaptarea sistemelor de reglare automată a turbomotoarelor, în scopul optimizării testării în bancul de probe



Figura 4.14. Ajutaj de reacție cu sistem-prototip de instrumentare wireless [82]

#### 4.5. PROBLEME DE PROIECTARE ALE SISTEMELOR DE REGLARE AUTOMATĂ, ELECTRONICE

##### Conectorii cu contact fizic (PC)

Sunt cei mai folosiți și au cele mai mici pierderi la interfață deoarece capetele fibrelor se ating și sunt proiectate să nu piardă contactul odată conectate [84]. Dintre conectorii PC se pot exemplifica MIL-DTL-38999, care sunt standardul recunoscut pentru toate aplicațiile aerospațiale militare și comerciale ce depind de performanțe și fiabilități ridicate. Sistemul de conexiune 38999 a fost utilizat cu succes în aplicații precum F-35 Joint Strike Fighter și F-22 [85].

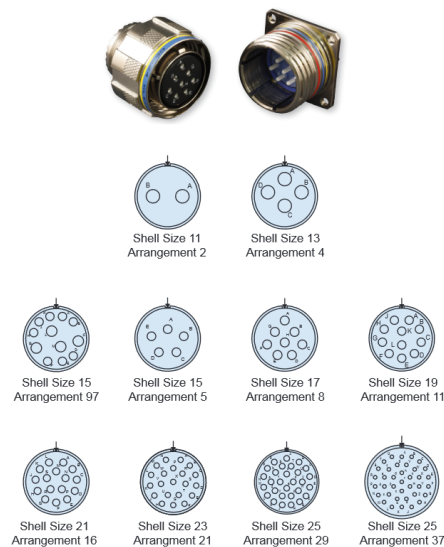


Figura 4.17. Conectori MIL-DTL-38999 [86]

De regulă, o conexiune PC se realizează prin utilizarea la capătul fibrei optice a unei ferule ceramice, fixată de fibră prin rășină epoxy, și polișată cu precizie pentru ca lumina să intre și să iasă cu o traiectorie cunoscută și pierderi minime [87].

## CAPITOLUL 5

### CERCETĂRI PRIVIND DEZVOLTAREA ȘI REALIZAREA UNUI SISTEM DE REGLARE AUTOMATĂ CARE SĂ RĂSPUNDĂ CERINȚELOR ACTUALE DE TESTARE A MOTOARELOR DE AVIAȚIE

#### 5.1. STABILIREA CERINȚELOR ȘI DEZVOLTAREA NOII ARHITECTURI A SISTEMULUI DE REGLARE AUTOMATĂ RAPORTAT LA NOILE CERINȚE PENTRU TESTAREA TURBOMOTOARELOR DE AVIAȚIE

##### Studiul comparativ

- Sistemul de reglare automata pentru turbomotorul Solar-Centaur Onești
  - Număr linii de instrumentare AI: 40
  - Număr linii comenzi digitale DO: 33
  - Precizia de măsurare temperatura: 1 %
  - Precizia de măsurare presiune: 0,25 %
  - Timpul de răspuns al senzorilor de presiune: 100 Hz
  - Viteza de rulare program logic: 50 ms
  - Timpul de răspuns al buclei de oprire de urgenta: 66 ms
- Sistemul de reglare automata pentru turbomotorul ST40 Naval
  - Număr linii de instrumentare AI: 44
  - Număr linii comenzi digitale DO: 16
  - Precizia de măsurare temperatura: 1 %
  - Precizia de măsurare presiune: 0,25 %
  - Timpul de răspuns al senzorilor de presiune: 500 Hz
  - Viteza de rulare program logic: 50 ms
  - Timpul de răspuns al buclei de oprire de urgenta: 66 ms
- Sistemul de reglare automata pentru turbomotorul ST18 Suplacu de Barcău
  - Număr linii de instrumentare AI: 58
  - Număr linii comenzi digitale DO: 33
  - Precizia de măsurare temperatura: 1 %
  - Precizia de măsurare presiune: 0,25 %
  - Timpul de răspuns al senzorilor de presiune: 200 Hz
  - Viteza de rulare program logic: 35 ms
  - Timpul de răspuns al buclei de oprire de urgenta: 51 ms
- Sistemul de reglare automata Comoti
  - Număr linii de instrumentare AI: 64
  - Număr linii comenzi digitale DO: 11
  - Precizia de măsurare temperatura: 1 %
  - Precizia de măsurare presiune: 0,25 %
  - Timpul de răspuns al senzorilor de presiune: 100 Hz

Studii și cercetări experimentale privind adaptarea sistemelor de reglare automată a turbomotoarelor, în scopul optimizării testării în bancul de probe

- Viteza de rulare program logic: 20 ms
- Timpul de răspuns al buclei de oprire de urgență: 36 ms

În urma analizelor și cercetărilor efectuate pe mai multe sisteme de reglare automată atât în instalațiile industriale care folosesc turbomotoare de aviație cât și în standurile special amenajate pentru testarea acestor tipuri de motoare, am stabilit cerințele pentru noul sistem de reglare automată ținând cont și de cerințele actuale de testare a turbomotoarelor dar și de complexitatea acestora:

- Numărul liniilor de instrumentare = AI 112 / AO 16
- Numărul liniilor de comenzi digitale = DI 32 / DO 32
- Precizia senzorilor de măsurare presiune = 0.04 % din domeniul maxim de măsurare
- Timpul de răspuns al senzorilor de măsurare presiune = 3500 Hz
- Precizia modulelor de achiziții date = 0.01 % din domeniul maxim
- Viteza de răspuns al modulelor de achiziții date = 100 kHz per canal
- Informația să fie prelucrată pe mai multe calculatoare;
- Să permită conexiunea pe Ethernet cu Scanivalva MPS4264 și cu placa ANET - ARINC429;
- Să aibă un al doilea PLC de siguranță folosit strict pentru protecția și oprirea în siguranța a turbomotorului testat în configurație de tip „Master – Slave”;
- Timpul de răspuns al buclei liniei de siguranță oprire stop să fie mai mic de 20 ms;
- Viteza de executare a buclei de achiziții date și control să fie mai mică de 50 ms;
- Viteza de achiziție pentru toți parametrii să poată atinge maxim 10 kHz;
- Sistem compact, mobil cu unitate de alimentare UPS care să alimenteze sistemul minim 15 minute de la apariția unei avarii pe linia de alimentare cu energie electrică.
- Determinarea funcțiilor de transfer pentru linia de oprire de urgență și realizarea noii arhitecturi a sistemului de reglare automată propus.

Determinarea funcțiilor de transfer se realizează pe baza literaturii de specialitate [92-94] și urmărește determinarea funcțiilor de reglare pentru sistemul de oprire de urgență.

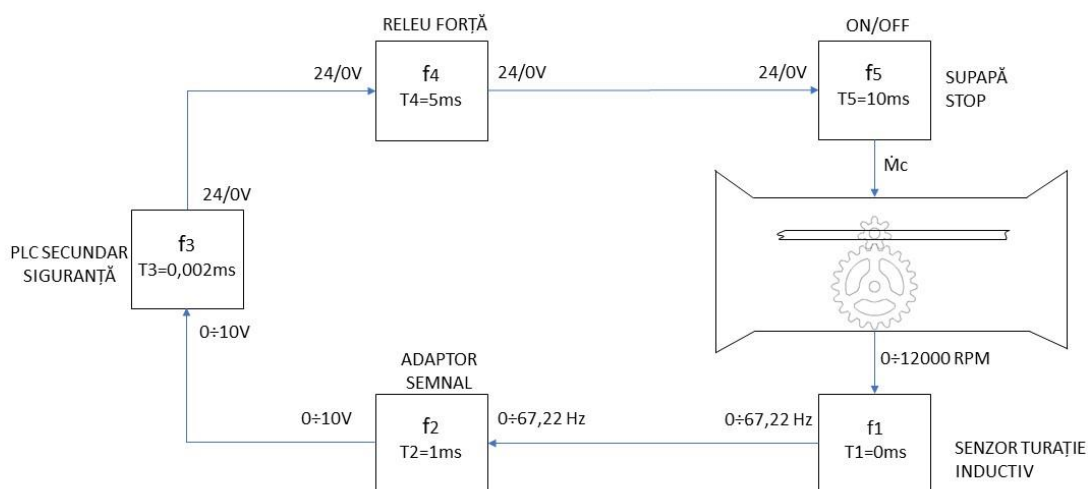


Figura 5.2. Schema bloc a liniei de oprire de urgență prin parametrul turației NTP

Studii și cercetări experimentale privind adaptarea sistemelor de reglare automată a turbomotoarelor, în scopul optimizării testării în bancul de probe

- Determinarea funcției de transfer pentru senzorul de turație inductiv

Raportul de transmisie  $Z = 0.3361$

Frecvența de ieșire este  $F_i$

$$F_i = f(N) \quad (5.1)$$

$$F_i = \frac{N}{60} \cdot z \quad (5.2)$$

Dacă  $N = 12000 \text{ rpm}$

$$F_i = \frac{N}{60} \cdot 0.3361 = 67.22 \text{ Hz} \quad (5.3)$$

Se consideră o funcție liniară

$$f(x_1) = a_1 x_1 + b_1 = f_1 \quad (5.4)$$

Unde

$$a_1 = \frac{Z}{60} = \frac{0.3361}{60} \text{ și } x_1 = N \quad (5.5)$$

$$f_1 = \frac{Z}{60} \cdot N + b_1 \quad (5.6)$$

$$f_1 = 67.22 + b_1 \quad (5.7)$$

Atunci

$$f_1 = F_i \rightarrow b_1 = 0 \quad (5.8)$$

- Determinarea funcției de transfer pentru convertorul de semnal analogic

Convertorul de semnal are o variație liniară prin condiții la limită și s-au calculat coeficienții  $a_2$  și  $b_2$ .

Valorile se bazează pe următoarea schemă: semnal de intrare ( $x$ ) – semnal de ieșire ( $y$ )

$$0 \text{ Hz} \rightarrow 0 \text{ V} \quad (5.9)$$

$$67.22 \text{ Hz} \rightarrow 10 \text{ V} \quad (5.10)$$

Se definește o funcție liniară:

$$f(x_2) = a_2 x_2 + b_2 = f_2 \quad (5.11)$$

De unde rezultă

Pentru  $x = 0$  și  $y = 0$

Studii și cercetări experimentale privind adaptarea sistemelor de reglare automată a turbomotoarelor, în scopul optimizării testării în bancul de probe

$$a_2 \cdot 0 + b_2 = 0 \rightarrow b_2 = 0 \quad (5.12)$$

Pentru  $x = 67.22$ ,  $y = 10$  și  $b_2 = 0$

$$a_2 \cdot 67.22 + b_2 = 10 \rightarrow a_2 = \frac{10}{67.22} = 0.148765 \quad (5.13)$$

- Determinarea funcției de transfer pentru PLC siguranță

Semnalul de ieșire din PLC siguranță este de tip treaptă. Pentru determinarea funcției de transfer se folosește funcția „Heaviside”. Funcția pas Heaviside, sau funcția pas unitară, de obicei notată cu H sau, este o funcție pas, a cărei valoare este zero pentru negativ argumente și unul pentru argumente pozitive. Este un exemplu de clasa generală de funcții pas, toate putând fi reprezentate ca combinații liniare de translații ale acesteia. Funcția a fost dezvoltată inițial în calculul operațional pentru soluționarea ecuațiilor diferențiale, unde reprezintă un semnal care se pornește la o oră specificată și rămâne pornit la nesfârșit.

$$H(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ 1, & x \geq 0 \end{cases} \quad (5.14)$$

Valorile se bazează pe următoarea schemă: semnal de intrare ( $x$ ) – semnal de ieșire ( $y$ )

$$0 V \rightarrow 24 V \quad (5.15)$$

$$10 V \rightarrow 0 V \quad (5.16)$$

De unde rezultă

$$f(x_3) = a_3 H(b_3 x_3 + C_3) = f_3 \quad (5.17)$$

$$f_3 = H(10 - V) \cdot 24 \quad (5.18)$$

$$C_3 = 10 \quad (5.19)$$

Pentru  $x = 0$  și  $y = 24$

$$a_3 H(b_3 \cdot 0 + C_3) = 24 \quad (5.20)$$

$$a_3 H(C_3) = 24 \quad (5.21)$$

$$a_3 = 24 \quad (5.22)$$

Pentru  $x = 10$ ,  $y = 0$ ,  $a_3 = 24$ ,  $C_3 = 10$

$$24 \cdot H(10 \cdot b_3 + 10) = 0 \rightarrow H(10 \cdot b_3 + 10) = 0 \rightarrow (10 \cdot b_3 + 10) = 0 \quad (5.23)$$

$$b_3 = -1 \quad (5.24)$$

- Determinarea funcției de transfer pentru Releul de forță

Releul este un echipament de tip On/ Off pentru a determina funcția de transfer, s-a folosit o funcție identitate I.



Studii și cercetări experimentale privind adaptarea sistemelor de reglare automată a turbomotoarelor, în scopul optimizării testării în bancul de probe

$$f(x) = x = I(x) \quad (5.25)$$

Valorile se bazează pe următoarea schemă: semnal de intrare ( $x$ ) – semnal de ieșire ( $y$ )

$$0 V \rightarrow 0 V \quad (5.26)$$

$$24 V \rightarrow 24 V \quad (5.27)$$

Se poate utiliza forma echivalentă de forma:

$$f(x_4) = a_4 x_4 + b_4 = f_4 \quad (5.28)$$

Pentru  $x = 0$  și  $y = 0$

$$a_4 \cdot 0 + b_4 = 0 \rightarrow b_4 = 0 \quad (5.29)$$

Pentru  $x = 24$ ,  $y = 24$  și  $b_4 = 0$

$$a_4 \cdot 24 + b_4 = 24 \rightarrow a_4 = 1 \quad (5.30)$$

- Determinarea funcției de transfer pentru Supapa Stop

Supapa stop este un echipament de executarea cu 2 stări de tip închis/ deschis (Off/ On).

Valorile se bazează pe următoarea schemă: semnal de intrare ( $x$ ) – semnal de ieșire ( $y$ ):

$$0 V \rightarrow 0 \quad (5.31)$$

$$24 V \rightarrow 1 \quad (5.32)$$

Se poate considera forma funcției de transfer ca fiind:

$$f(x_5) = a_5 x_5 + b_5 = f_5 \quad (5.33)$$

Pentru  $x = 0$  și  $y = 0$

$$a_5 \cdot 0 + b_5 = 0 \rightarrow b_5 = 0 \quad (5.34)$$

Pentru  $x = 24$ ,  $y = 1$  și  $b_5 = 0$

$$a_5 \cdot 24 + b_5 = 1 \rightarrow a_5 = \frac{1}{24} = 0,041(6) \quad (5.35)$$

- Compunerea funcției generale de transfer

Forma generală se definește:

$$F = f_5 \left( f_4 \left( f_3 \left( f_2 \left( f_1 \right) \right) \right) \right) \quad (5.36)$$

Explicitarea funcției generale de transfer:

$$F = f_5 \left( f_4 \left( f_3 \left( f_2 \left( a_1 x_1 + b_1 \right) \right) \right) \right) \quad (5.37)$$

Studii și cercetări experimentale privind adaptarea sistemelor de reglare automată a turbomotoarelor, în scopul optimizării testării în bancul de probe

$$F = f_5 \left( f_4 \left( f_3 \left( a_2 \left( a_1 x_1 + b_1 \right) + b_2 \right) \right) \right) \quad (5.38)$$

$$F = f_5 \left( f_4 \left( H \left( a_2 \left( a_1 x_1 + b_1 \right) + b_2 \right) + b_3 \right) \right) \quad (5.39)$$

$$F = f_5 \left( a_4 \left( H \left( 10 - \left( a_2 \left( a_1 x_1 + b_1 \right) + b_2 \right) \cdot 24 \right) + b_3 \right) \right) \quad (5.40)$$

$$F = f_5 \left( I \left( H \left( a_3 \left( a_2 \left( a_1 x_1 + b_1 \right) + b_2 \right) + b_3 \right) \right) \right) \quad (5.41)$$

$$F = a_5 \left( I \left( H \left( a_3 \left( a_2 \left( a_1 x_1 + b_1 \right) + b_2 \right) + b_3 \right) \right) + b_5 \right) \quad (5.42)$$

$$F = a_5 \left( a_4 \left( a_3 \cdot H \left( a_2 \left( a_1 x_1 + b_1 \right) + b_2 \right) + b_3 \right) + b_4 \right) + b_5 \quad (5.43)$$

$$F = a_5 \left( a_4 \left( a_3 \cdot H \left( b_3 \left( a_2 \left( a_1 x_1 + b_1 \right) + b_2 \right) + C_3 \right) \right) + b_4 \right) + b_5 \quad (5.44)$$

- Determinarea timpului de întârziere a buclei de oprire urgență  
Timpul de întârziere se notează cu  $T_i$

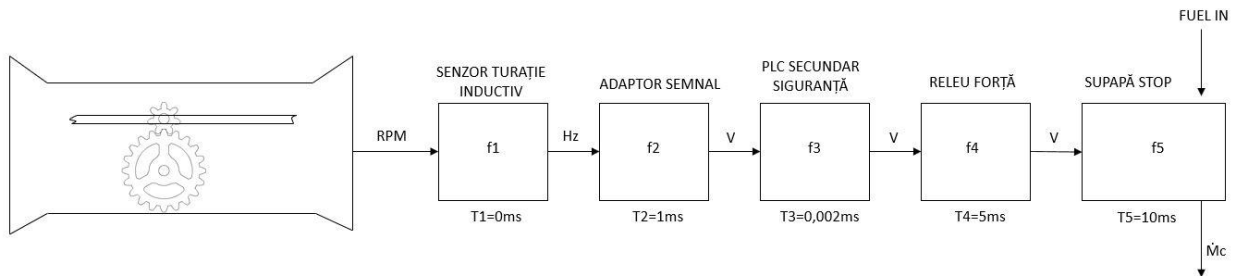


Figura 5.5. Schema logică privind timpii de întârziere

$$T_i = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 \quad (5.67)$$

Unde:

- $t_1 = 0 \text{ ms}$  și reprezintă timpul de întârziere al senzorului de turație,
- $t_2 = 1 \text{ ms}$  și reprezintă timpul de întârziere al convertorului de semnal,
- $t_3 = 0.003 \text{ ms}$  și reprezintă timpul de întârziere al PLC de siguranță,
- $t_4 = 5 \text{ ms}$  și reprezintă timpul de întârziere al releului electronic de forță,
- $t_5 = 10 \text{ ms}$  și reprezintă timpul de întârziere al supapei stop.

Rezultă:  $T_i = 16.003 \text{ ms}$  (5.68)

Studii și cercetări experimentale privind adaptarea sistemelor de reglare automată a turbomotoarelor, în scopul optimizării testării în bancul de probe

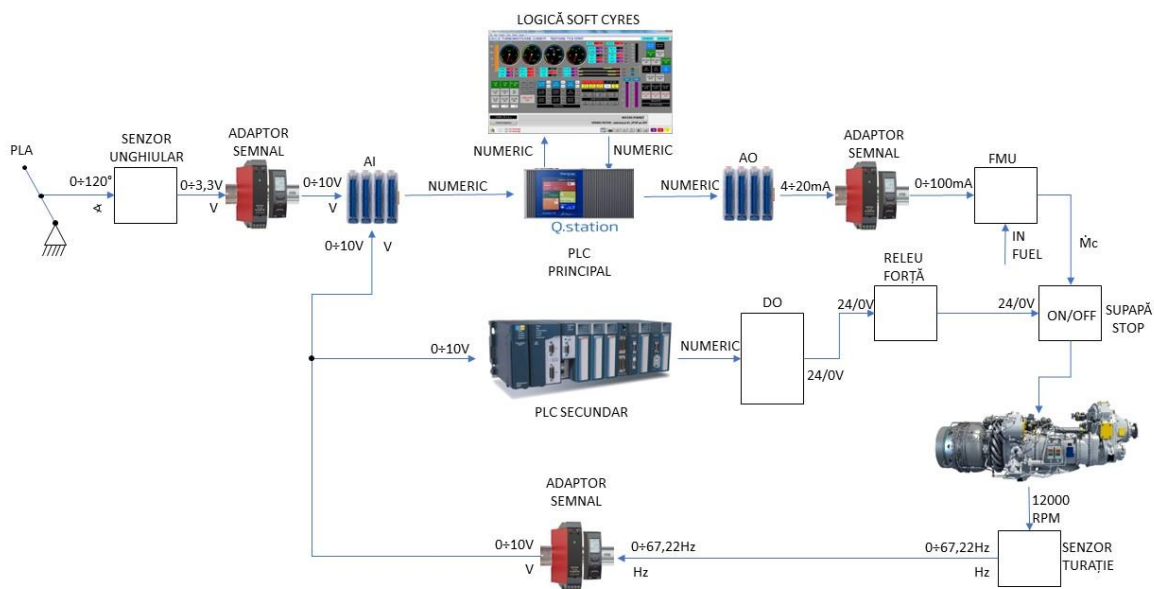


Figura 5.6. Schema bloc pentru linia de reglare regim împreună cu feedback-ul și cu linia de oprire de urgență NTP separată printr-un PLC secundar de siguranță

## 5.2. ANALIZA ECHIPAMENTELOR UTILIZATE ÎN SISTEMUL DE REGLARE AUTOMATĂ DIN PUNCT DE VEDERE AL CARACTERISTICILOR DE FUNCȚIONARE

### Automatul programabil Qstation Gatner

Controlerul programabil Qstation [95] este interfața dintre modulele Qseries și gazda/sistemul de automatizare conectat (PC sau PLC) și astfel se transformă într-un sistem de achiziție și control date. Principalele funcții ale controlerului sunt de a asigura sincronizarea datelor de măsurare de la mai multe module Q.series, tamponarea și condiționarea datelor respective și transmiterea datelor către sistemul gazdă/ de automatizare prin comunicare de tip Ethernet, Profibus, CANopen, EtherCAT sau alte protocoale acceptate. Sunt disponibile mai multe opțiuni de controler pentru a suporta sisteme de toate dimensiunile și nivelul de complexitate. Prin separarea controlerului de modulele de măsurare, comunicarea este semnificativ optimizată (doar un „slave” pentru unitatea PC sau PLC). Gama și flexibilitatea modulelor permite o soluție optimizată pentru fiecare sarcină unică: achiziție de semnal dinamic de până la 100 kHz, intrări/ieșiri pentru toate tipurile de semnale, izolarea galvanică a intrărilor/ieșirilor, soluții multicanal, ambalare de înaltă densitate și inteligentă condiționarea semnalului.



Figura 5.11. Sistem de achiziție și control date format din Q.station și Q.series

Printre cele mai importante specificații tehnice, se număra:

- Controlerul suportă până la 64 de module conectate de tip Q.bloxx din orice tip;
- Permite o rată ridicată de achiziție în funcție de numărul de canale definite, pentru 16 canale rata maximă este de 100 kHz, pentru 128 canale rata maximă este de 10 kHz;
- Sincronizarea datelor în timp și parametrul de timp pentru măsurători este de tip IRIG 2, bazat pe un „master” principal, conectat cu RS485 printr-un sistem standard de sincronizare cu precizie de  $\pm 1 \mu s$  dar cu posibilitatea și de a integra prin alt tip, precum GPS cu tip NMEA prin RS-232/Usb, Server de timp cu tip SNTP prin ethernet sau ceas distribuit cu tip DC prin EtherCAT;
- Deține o bandă largă de memorie, în mediu dinamic de 500 MByte și în mediu static de 4 GByte, cu posibilitatea extinderii prin USB (până la 1.000.000 măsurători/s);
- Controlerul deține un număr de 8 canale de intrări digitale, utilizate pentru contor configurabil, frecvență, PWM și codificatoare digitale cu semnale de stare care se concentrează cu măsurare sincronă a unghiului dar și un număr de 4 canale de ieșiri digitale, funcție configurabilă de tip „watchdog” dar și pentru utilizări de urgență în caz de avarie;
- Funcționalitate PAC cu bibliotecă extinsă (doar pentru anumite variante de controler) printre care: controlere PID („Proportional-Integrat-Derivat”) rapide, control de proces, înregistrare de date, funcții de transfer, relații matematice, combinații de tip „Boolean”, generatoare de funcții;
- Se programează prin software-ul dedicat „test.commander” dar și utilizarea altor tipuri de software-uri, precum test.viewer, test.node, test.con Studio, sau programe specializate de achiziții date: LabVIEW, DIAdem, Matlab și Symulink, DASyLab, MSCPP60,

Studii și cercetări experimentale privind adaptarea sistemelor de reglare automată a turbomotoarelor, în scopul optimizării testării în bancul de probe

MSVBasic60, DELPHI2006. Programul test.viewer realizează procesul de vizualizare și stocare a datelor în format numeric sau grafic și de convertire a datelor în formate de tipul: GreenEye (\*.ged), DASyLab (\*.ddf), Famos (\*.dat), MATLAB (\*.mat), Bernard (\*.bbl), WAVE (\*.wav) și Excel (\*.csv). Programul test.node realizează partea de stocare a datelor pe unități desktop locale, pe rețea sau în baze de date și de configurare a setărilor pentru procesul de salvare.

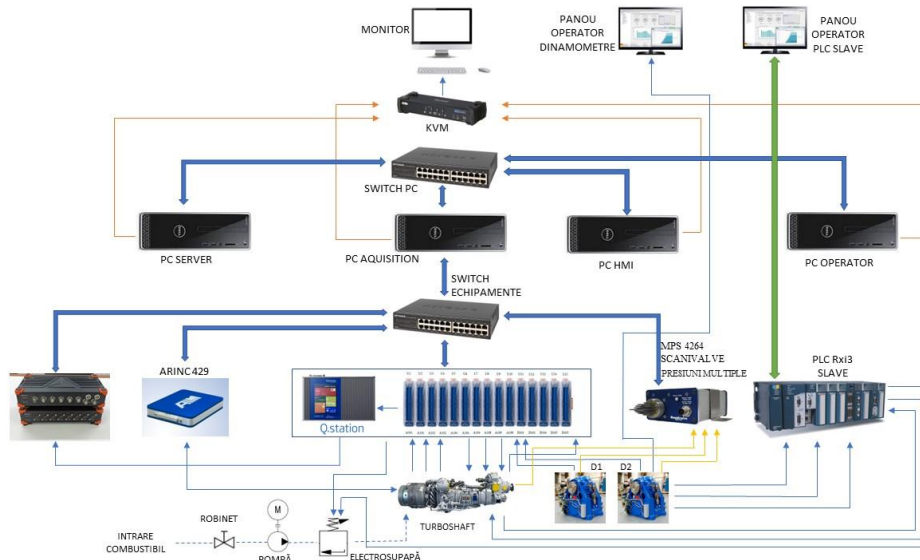


Figura 5.9. Schema bloc a sistemului folosit in configurația pentru motoare cu putere la ax

### 5.3. SCHEMA BLOC DE INSTRUMENTARE A TURBOMOTORULUI ȘI A SISTEMULUI AUXILIAR DE ACHIZIȚII DE DATE

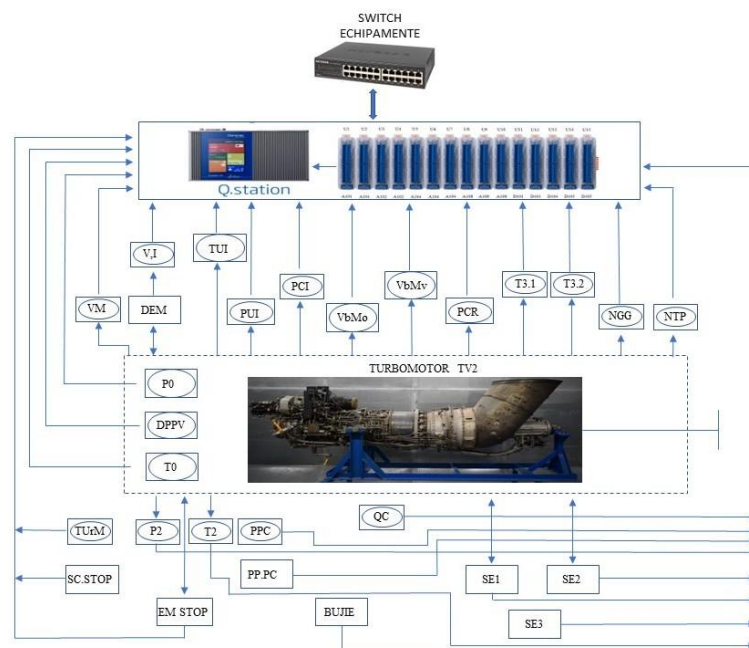


Figura 5.35. Schema de instrumentare, comandă și control pentru turbomotorul TV2-117A

Studii și cercetări experimentale privind adaptarea sistemelor de reglare automată a turbomotoarelor, în scopul optimizării testării în bancul de probe

#### 5.4.ANALIZA NIVELULUI DE CAPABILITATE AL SISTEMULUI DE REGLARE AL STANDULUI PROPOS

În baza schemelor bloc s-a realizat sistemul de reglare automată,



Figura 5.1. Sistemul de reglare automată complet

Monitorizarea și controlul turbomotorului se realizează din camera de comandă, prezentată în Figura 5.33 împreună cu monitorizarea și controlul sistemelor auxiliare necesare. Se poate observa cum maneta este un agregat separat, ce realizează comanda directă a reglajului turbomotorului.



Figura 5.38. Camera de comandă pentru sistemul de reglare propus



Studii și cercetări experimentale privind adaptarea sistemelor de reglare automată a turbomotoarelor, în scopul optimizării testării în bancul de probe

- Sistemul de încărcare și măsurare cuplu cu dinamometrele HS2600

Dinamometrul hidraulic Froude Hofmann HS2600 [114] este evaluat la 2 600 kW (3 490 CP) și are o turație maximă de funcționare de 24 000 rpm, cu o capacitate de depășire continuă până la 26 500 rpm. Gama de dinamometre HS este concepută pentru a testa turbinele industriale și marine cu gaz și abur și testarea modulelor turbinelor cu gaz aeronavelor în multe aplicații, inclusiv cercetare și dezvoltare, producție și revizie. Gama HS acoperă puteri de la 1.865 kW la 14.915 kW (1.210 BHP la 20.000 BHP) într-un singur sens de rotație. Pentru a satisface motoarele cu rotație opusă, dinamometrele sunt echipate cu două jumătăți de cuplare și pot fi rotite la 180°, fie cu macaraua, fie cu o plată rotativă pneumatică opțională.

- Testarea sistemului de reglare cu diferite tipuri de semnal de intrare și ieșire

Pentru stabilirea timpului de răspuns pentru PLC secundar de siguranță Rxi3, ne putând lua în considerare doar specificațiile echipamentelor pentru că mai intervin și alte constrângeri de comunicații Ethernet, s-a recurs la determinarea acestuia prin simularea mai multor semnale, rampă, sinusoidal și semnal treaptă. Măsurările au fost efectuate cu un osciloscop de ultimă generație care poate măsura semnale cu frecvența de până la 200 MHz. Timpii de întârziere rezultați au fost mai mici de 3 μs, asadar s-a luat în calcul un timp de întârziere pentru această linie de comunicație intrare PLC, procesare semnal PLC și ieșire PLC de 3 μs.



Figura 5.42. Simularea semnalului de tip treaptă

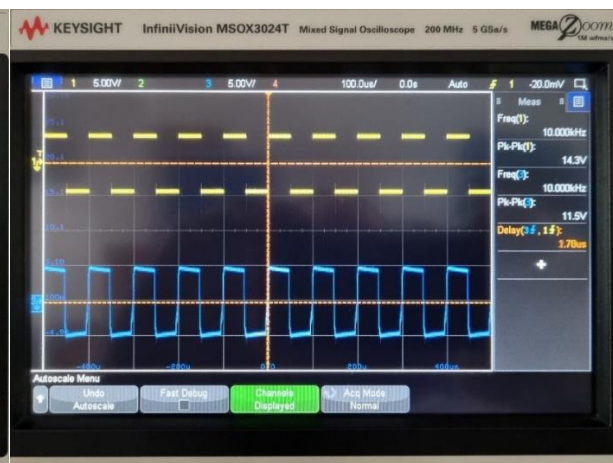


Figura 5.40. Simularea semnalului de tip rampă

## 5.5. EXPERIMENTĂRI ȘI ANALIZA DATELOR OBTINUTE CU SISTEMUL DE REGLARE PROPUȘ

Turbomotorul de referință TV2-117A

Pentru experimentarea în celula de testare, turbomotorul de referință a fost montat cu ajutorul unor ansamble mecanice de susținere și tubulaturi pentru zona de admisie aer și evacuare gaze arse. De asemenea, s-a realizat o instrumentare de bază, conform cu manualul tehnic al motorului [20] cu un număr suficient de parametri termogazodinamici și s-au creat legături cu elementele de comandă și control.

## 5.6. ANALIZA COMPARATIVĂ A DATELOR ÎNTRE SISTEMUL VECHI ȘI SISTEMUL PROPUS

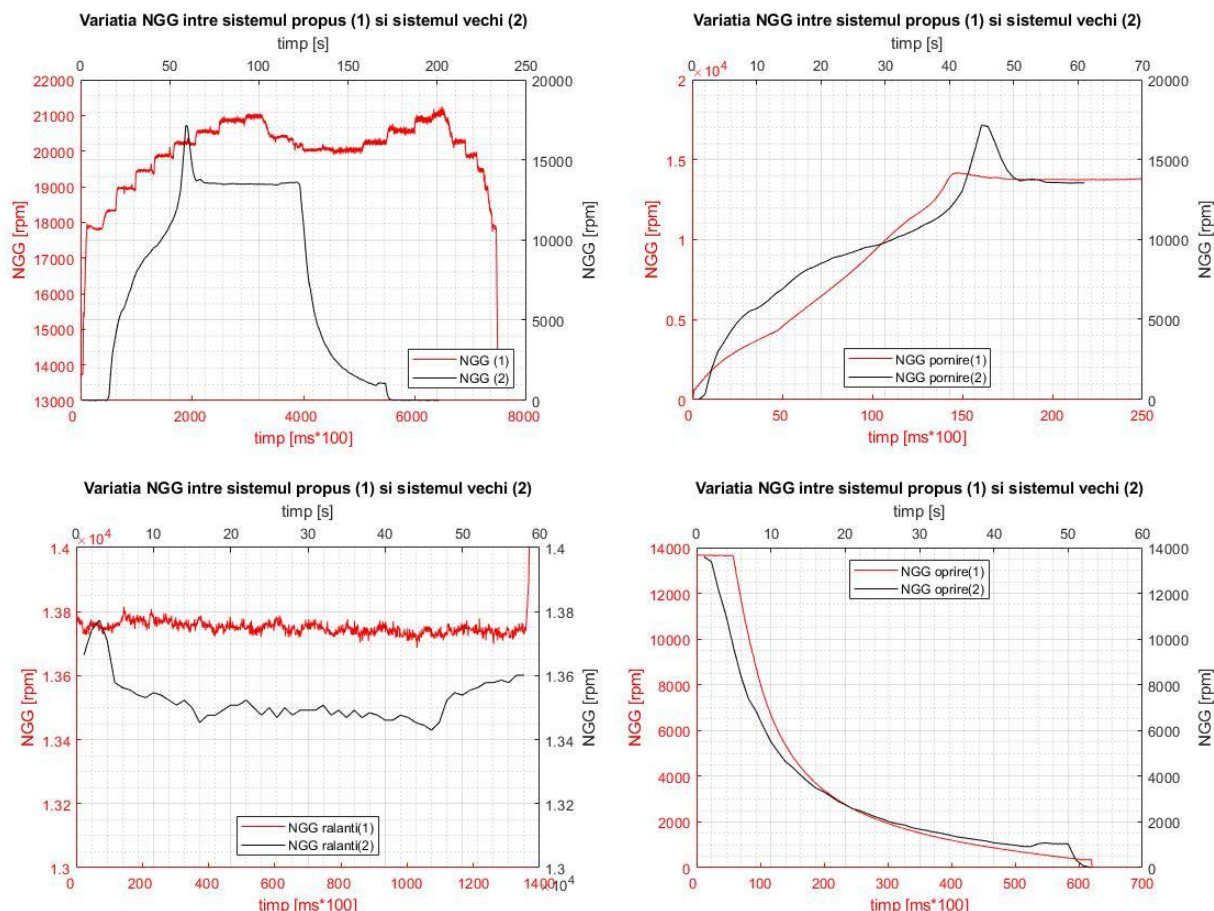


Figura 5.51. Compararea datelor între sistemul propus (1) și sistemul vechi (2)

Din analiza graficelor celor 2 experimentări, pentru parametru NGG la mai multe regimuri de funcționare, se observa stabilitatea ridicată în controlul de ieșire la ralanti, acuratețea prin multitudinea de puncte achiziționate, viteza fiind mult mai mare ca în testul precedent. Stabilitatea menținerii reglajului la ralanti, variațiile fiind mult mai mici și curba de oprire care este mult mai lină și nu mai prezintă salturi sau variații în citirea turației.



## CONCLUZII

În lucrarea de față a fost prezentat un studiu comparativ a mai multor sisteme de reglare automată ce se regăsesc la mai multe tipuri de turbomotoare, de generație mai veche ajungând până la cele de ultimă generație, având ca scop determinarea punctelor slabe și analizarea unor componente cheie pentru a putea găsi metode de îmbunătățire și adaptare a acestor sisteme de reglare automată în vederea micșorării timpului de răspuns pentru mai multe linii de instrumentare de siguranță, a creșterii frecvențelor de achiziții date pentru mai mulți parametri importanți ai turbomotorului cum ar fi: presiunea și vibrațiile și de a integra un nou echipament care să monitorizeze evoluția anumitor parametri esențiali, cum ar fi turația turbinei, putând să oprească foarte rapid, în condiții de maximă siguranță turbomotorul supus testării.

Pe baza studiului efectuat pe mai multe sisteme de reglare automată a dozajului de combustibil, s-a determinat schemele bloc ale acestora pentru a înțelege mai bine evoluția pas cu pas și modificările pe care le-au suferit în de-a lungul timpului și s-a prezentat modul de funcționare a fiecărui sistem, punctând avantajele și dezavantajele, analizând diverse metode de îmbunătățire ale acestora. Se observă, prin prezentarea schemelor bloc ale diferitelor turbomotoare de aviație, din perioade diferite, o creștere a numărului de agregate, o creștere a numărului de echipamente necesare controlului cât mai bun al întregului turbomotor și o creștere a numărului de parametri care sunt considerați în calcul pentru reglarea regimului.

S-a urmărit prezentarea cât mai clară a laturii teoretice a sistemelor de reglare automată și a reglării turbomotoarelor prin prezentarea noțiunilor de baza, noțiunilor introductive, atingând toate punctele de la pornirea unui turbomotor de aviație, la accelerare și până la atingerea regimului maxim și regimul de postcombustie, dar și definițiile elementelor principale care intră în alcătuirea sistemelor de reglare automată, pentru a înțelege foarte bine cum se interconectează blocurile împreună și cum funcționează turbomotoarele și care sunt regimurile de lucru, astfel încât, la ieșirea din blocul regulator, să se obțină semnalul de debit de combustibil dorit pentru regimul ales.

Sistemele moderne, de astăzi, folosesc semnale electrice digitale convertite din semnale analogice pe mai multe canale de emisie recepție  $Tx/Rx$ , această metodă nu numai că este redundantă și asigură un o rezervă de tip „backup” pentru liniile de comunicații dar asigură și o viteză foarte mare, aproape instantanee, de transmitere a datelor față de sistemele mecanice sau hidraulice din trecut, unde apăreau întâzieri în transmiterea informațiilor iar de la mișcarea manetei de gaz până la creșterea efectivă a regimului motorului testat există o întâziere de aproximativ 1 – 2 secunde.

De-a lungul timpului, evoluția motoarelor de aviație în funcție de configurația constructivă (motor turboreactor dublu-flux, motor turboreactor simplu-flux, monorotor, birotor, trirotor, cu pas variabil) a determinat ca, cerințele de reglare automată să devină tot mai complexe și să ia în calcul mai mulți factori de reglare, crescând și timpul de procesare a situațiilor în timp real.

Software-urile de specialitate prezintă trăsături specifice pentru natura aplicației. Programul CYRES este dedicat strict pentru testarea turbomotoarelor și turboventilatoarelor și este printre cele mai potrivite pentru acest lucru. Permite comunicarea cu o serie vastă de PLC-uri și echipamente, pentru a realiza procesul de testare conform standardelor.

Programul LabVIEW prezintă o complexitate mai ridicată, în principal datorită metodei de programare care pornește de la definirea PLC și până la procesarea în timp real a datelor și este recomandat pentru diverse aplicații specifice dar și pentru testarea microturbomotoarelor.

Pentru sisteme auxiliare, se utilizează Proficy Machine Edition, prin programare de tip scară („LAD”), datorită complexității reduse de programare și a fiabilității crescute. Există și programe dedicate pentru măsurarea vibrațiilor, așa cum este Dewesoft care permite citirea parametrilor de tip accelerometre, vitezometre și proximitate la o rată de achiziție foarte ridicată și în spectru de frecvență, pentru a depista orice neconformitate.

Sistemul FADEC este, la ora actuală cel mai evoluat sistem de reglare automată pentru turbomotoarele ce echipază aeronavele, pentru testarea pe stand a turbomotoarelor de aviație se folosește tot un sistem de reglare automată, inteligent, capabil să guverneze în totalitate programul de testare dar care mai poate fi îmbunătățit prin utilizarea unor echipamente electronice de ultimă generație și prin integrarea lor, în puncte cheie, pentru a lua anumite decizii de siguranță, mai rapid în comparație cu timpul de reacție din partea factorului uman.

Aceste echipamente au evoluat de la echipamente mecanice la echipamente hidromecanice apoi la echipamente pneumatice, la echipamente electromecanice și în ultimul rând la echipamente electronice.

Echipamentele electronice, aducând un număr însemnat de avantaje cum ar fi: reducerea greutateii întregului turbomotor, simplitate în acționarea elementelor de dozare, măsurarea mai multor parametrii importanți cu viteză mare de achiziție, gestionarea mult mai rapidă a echipamentelor care primesc comenzi, luarea deciziilor mult mai rapid decât factorul uman, datorita implementării programului software dar și a caracteristicilor de răspuns ale echipamentului.

Noile arhitecturi ale sistemelor de reglare automata vor trebui să țină cont de complexitatea cerințelor impuse de producătorii de turbomotoare și turboventilatoare, atât pe partea hardware cât și pe partea software și vor trebui să se alinieze la tendințele actuale de programare logică care au devenit din ce în ce mai complexe și totodată mai intuitive, folosind software-uri dedicate unde se folosește programarea grafica de tip G.

Se evidențiază arhitectura sistemului de achiziție date ce are în componență un singur PLC, care are rolul de a prelua informațiile de la senzori, traductoare, echipamente, de a prelucra informațiile urmat de procesul de a converti în unitățile propriu-zise de măsură și de a da comenzi atunci când este cazul în același timp și astfel, devine solicitat în timpul unei testări.

Totodată, PLC GE 90-30 prezintă și câteva limitări particulare, printre care se află limitarea la numărul de module suportate, numărul de canale din modulele respective care dețin și o precizie de măsurare relativ scăzută. Pentru sistemul realizat doar cu o unitate PLC, echipamentele, senzorii și traductoarele utilizate fac parte din generație anterioară, au o comunicare strict analogică și nu dețin posibilitatea de a comunica digital. Precizia și sensibilitatea sunt la un nivel mai scăzut, având erori ridicate pentru un proces de măsurare precisă.

Sistemul de achiziție a fost realizat pe baza schemelor electrice și pe baza manualelor tehnice cu echipamente, senzori și traductoare și s-a ținut cont și de ecranarea semnalelor pentru a elimina pe cât posibil toate perturbațiile exterioare dar și de a proteja modulele prin siguranțe electrice.

Capabilitatea standului a constat în instrumentarea motorului, asigurarea condițiilor de funcționare optimă prin sisteme auxiliare dar testarea motorului s-a realizat doar la regimul de ralanti datorită lipsei sistemului de frânare hidraulică printr-un sistem de dinamometru și a fost necesară blocarea turbinei libere.

Sistemul de reglare automată, adaptat, realizat în configurația cu mai multe calculatoare pentru procesarea informațiilor, cu un PLC principal de ultima generație care să achiziționeze toate semnalele de la toți senzorii foarte rapid, trimițând aceste informații calculatorului de achiziții denumit „ACQ” care se ocupă de gestionarea legăturilor dintre senzori și parametrii și mai apoi calculatorului pentru gestionarea software-ului logic, împreună cu un PLC secundar folosit strict pentru monitorizarea turației și oprirea de urgență, această variantă fiind cea mai rapidă la ora actuală, alături de module de achiziții foarte precise și cu viteză mare de răspuns, a reușit să atingă nivelul cerințelor impuse în urma analizei altor sisteme de reglare automată, eliminând pe cât posibil perturbațiile, erorile de program, crescând precizia, viteza de achiziție și scăzând timpii de răspuns la cât mai mici posibil, a reușit să controleze mult mai stabil turbomotorul TV2-117A la toate regimurile de funcționare.

Concluziile oferă o imagine completă asupra lucrării și asupra sistemelor de reglare realizată până în prezent cu evidențierea dezavantajelor și punctelor slabe pe care acestea le dețin, stabilirea cerințelor și echipamentele pentru noul sistem, determinarea performanțelor obținute de noul sistem de reglare mai ales pe linia de oprire de urgență care prezintă un element de noutate. Compararea datelor obținute din experimentări cu un sistem dar cu o alta configurație și determinarea avantajelor noului sistem de reglare automata prin evidențierea contribuțiilor originale aduse acestui sistem dar și previziuni de dezvoltare viitoare.

Concluzia finală a acestei teze de doctorat se conturează în jurul implementării tehnologiilor noi apărute și adaptarea unui sistem de reglare automată, pe standul de probe, capabil să răspundă cerințelor actuale ce se impun în testarea turbomotoarelor, care să gestioneze cât mai mulți parametri ai turbomotorului, putând intervenii asupra unor constante în timp real, fără a perturba funcționalitatea.

## CONTRIBUȚII ORIGINALE

- ✚ Arhitectura sistemului de reglare automată care utilizează echipamente de achiziție pentru semnalele electrice dar și unități desktop dedicate pentru fiecare subsistem, diminuând astfel fluxul de date procesate pe un singur procesor;
- ✚ Logica de programare și procesarea informației pe mai multe calculatoare care permite programarea independentă a subsistemelor, mai detaliat, se pot programa independent achiziția de date, liniile de măsurare parametrii, liniile de cod pentru logica de reglare și de testare dar și salvarea și procesarea datelor, simplificând și utilizând astfel cât mai eficient fluxul de date;
- ✚ Introducerea unui al doilea PLC de monitorizare pentru creșterea siguranței în testarea turbomotoarelor, acesta va achiziționa separat unul mai mulți parametrii importanți, analizând în mod continuu și realizând singur decizia când să oprească turbomotorul testat în bancul de probe;
- ✚ Folosirea celor mai bune echipamente în domeniu cu rata foarte mare de achiziție 10kHz și potrivite cu cerințele necesare testării;
- ✚ Folosirea magistralei de comunicație Ethernet în arhitectura actuală pentru conectarea și altor echipamente la sistemul de achiziții date rapide, cum ar fi: ANET 429 și Scanivalva MPS4264;
- ✚ Folosirea modului ANET care poate comunica cu unitățile FADEC de pe anumite motoare, facilitând astfel înglobarea în sistemul de reglare automată al standului de testări a motoarelor de ultima generație care folosesc astfel de sisteme.
- ✚ Creșterea vitezei de achiziție de date prin folosirea comunicației digitale de până la 10KHz.

## PERSPECTIVE DE DEZVOLTARE ULTERIOARĂ

- ✚ Creșterea ratei de achiziționare parametrilor peste 10KHz utilizând un al 2-lea PLC Qstation împărțind astfel semnalele lente provenite de la anumiți senzori, de semnalele rapide provenite de la senzorii de mare viteză folosiți în zone cheie pentru parametri importanți care se vor achiziționa foarte rapid arătând cât se poate de fidel, evoluția fenomenului fizic;
- ✚ Folosirea elementelor de execuție electronice, fără părți mecanice, eliminarea releelor clasice de comutare;
- ✚ Utilizarea modulelor de achiziție cu comunicație Wi-Fi pentru testarea de la distanță;
- ✚ Folosirea ca elemente de execuție de pe motor a reglatoarelor de combustibil electronice și independente pentru reglarea debitului de combustibil;
- ✚ Eliminarea acționărilor mecanice sau hidraulice de pe motor și folosirea actuatorilor electronici pentru a realiza un studiu la mai multe regimuri de funcționare a turbomotorului.

## BIBLIOGRAFIE

- [1] Stanciu V., Rotaru E. - *Teoria sistemelor de propulsie aeriene*, Editura BREN, București 2003, ISBN 973-648-127-1,
- [2] Pimsner V., *Motoare aeroreactoare, Vol.I. - Procese și caracteristici*, Editura Didactica și Pedagogica, Bucuresti 1984,
- [3] Colonel dr. ing. Dumitru Stoenciu - *Automatica motoarelor de aviație, reglarea automată a turației rotoarelor motoarelor turboreactoare*, Editura Academia Militara, București - 1979,
- [4] Stanciu V., Carmen Mohnoghitei & Evelina Rotare, *Caracteristicile Turbomotoarelor*, Editura BREN, București - 2004, ISBN: 973-648-230-8
- [5] <https://www.airforcemag.com/general-electric-a-reliable-partner-from-the-very-beginning/>
- [6] Gennady G. Kulikov, Haydn A. Thompson, - *Dynamic modelling of gas turbines*, Editura Springer, 2004, ISBN 978-1-84996-914-7
- [7] <https://historia.ro/sectiune/general/avionul-cu-reactie-al-lui-coanda-face-senzatie-583616.html>
- [8] <http://www.leteckemotory.cz/motory/vk-1/>
- [9] <http://motorsich.com.ua/AI-20>
- [10] <http://www.all-aero.com/index.php/contactus/64-engines-power/13530-mikulin-am-5-tumansky-rd-9-wopen-wp-6>
- [11] <https://www.rolls-royce.com/products-and-services/defence/aerospace/transport-tanker-patrol-and-tactical/t56.aspx#section-programme-updates>
- [12] [https://en.wikipedia.org/wiki/Rolls-Royce\\_Tyne](https://en.wikipedia.org/wiki/Rolls-Royce_Tyne)
- [13] <http://motorsich.com.ua/AI-24>
- [14] <http://www.leteckemotory.cz/motory/r-11/>
- [15] <https://web.archive.org/web/20130307012729/http://en.klimov.ru/production/helicopter/TV2-117/>
- [16] [https://en.wikipedia.org/wiki/Rolls-Royce\\_Spey](https://en.wikipedia.org/wiki/Rolls-Royce_Spey)
- [17] <https://web.archive.org/web/20071021031830/http://www.thevulcancollection.co.uk/xa903oly593.htm>
- [18] [https://www.incas.ro/index.php?option=com\\_content&view=article&id=135&Itemid=118](https://www.incas.ro/index.php?option=com_content&view=article&id=135&Itemid=118)
- [19] [https://web.archive.org/web/20061122214952/http://www.turbomeca.com/public/turbomeca\\_v2/html/en/produits/sous\\_famille\\_home.php?sfid=512&mid=615](https://web.archive.org/web/20061122214952/http://www.turbomeca.com/public/turbomeca_v2/html/en/produits/sous_famille_home.php?sfid=512&mid=615)
- [20] <https://www.klimov.ru/en/production/helicopter/TV3-117/>
- [21] <https://www.klimov.ru/en/production/aircraft/RD-33-family/>
- [22] <https://www.cfmaeroengines.com/press-articles/cfm-news-release-30000th-cfm56-engine-comes-production-line/>
- [23] [https://www.forecastinternational.com/samples/F641\\_CompleteSample.pdf](https://www.forecastinternational.com/samples/F641_CompleteSample.pdf)
- [24] <https://prattwhitney.com/products-and-services/products/commercial-engines/v2500>
- [25] <https://www.safran-group.com/products-services/cfm56-best-selling-engine-commercial-aviation-history>
- [26] <https://rostec.ru/en/news/second-il-114-300-will-take-off-in-2021-with-an-updated-airframe/>
- [27] <https://www.pwc.ca/en/products-and-services/products/regional-aviation-engines/pw100-150>

- [28] <https://aerospace.honeywell.com/us/en/products-and-services/product/hardware-and-systems/engines/tfe731>
- [29] <https://www.cfmaeroengines.com/engines/leap/>
- [30] <https://www.aex.ru/news/2016/4/19/152229/>
- [31] Motorul de aviație, turbomotorul TV2-117A, Instrucțiuni de exploatare și deservire tehnică, București 1973
- [32] <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/10/4492/htm>
- [33] CFM56-3 Training manual ATA70-80, 1992
- [34] <https://www.cfmaeroengines.com/engines/cfm56/>
- [35] CFM56-7 Training manual ATA70-80, 1999
- [36] <https://www.cfmaeroengines.com/engines/cfm56/>
- [37] Installation manual ST40M marine gas turbine, Engineering Report No. 5847, Pratt & Whitney Cana Corp, 2005.
- [38] [https://www.scientificbulletin.upb.ro/rev\\_docs\\_arhiva/full064\\_604818.pdf](https://www.scientificbulletin.upb.ro/rev_docs_arhiva/full064_604818.pdf)
- [39] TFE731-40-2N Turbofan engine basic installation manual, Honeywell, 2012
- [40] <https://airandspace.si.edu/collection-media/NASM-A19970501000cp04>
- [41] Airbus A319/A320/A321 (CFM LEAP-1A) - "NEO" TECHNICAL TRAINING MANUAL, Mechanical & Avionics course – T1 + T2, 2017
- [42] <https://www.aviationbusinessme.com/aviation-services/22428-sanad-ge-aviation-engine-mro-deal-reaches-milestone>
- [43] Training manual, CFM-56-5B, FADEC system maintenance, Published by CFMI, COPYRIGHT 1998 CFM INTERNATIONAL;
- [44] Airbus A319/A320/A321 (CFM56), *Maintenance Course T1+T2*, Editura Airbus S.A.S., 2006;
- [45] <https://www.safran-group.com/products-services/data-acquisition-and-control-system-test-cells>
- [46] <https://www.cgtrader.com/free-3d-models/aircraft/aircraft-part/jet-engine>
- [47] <https://www.safran-aero-boosters.com/test-cells/world-leader-aero-engine-test-facilities>
- [48] Buruiana M – *Jet engine control Systems*, Editura Universitatea Politehnica Bucuresti – 1997,
- [49] Colonel Ing. Matei Aurel, „Automatizarea și reglarea motoarelor de aviație Volumul II”, Academia Militară, București, 1972
- [50] Colonel Dr. Ing. Dumitru Stoenciu, „Automatica motoarelor de aviație”, Academia Militară, București, 1979
- [51] General Maior Dr. Ing. Ștefan Ispas, „Motorul Turboreactor”, Editura Tehnică, București
- [52] V. Păun, I. Aron, „Echipamentul electric al aeronavelor”, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1980
- [53] Buruiană Mircea, „Jet engine control systems, part one”, Universitatea Politehnică București, 1997
- [54] Prof. Dr. Doc. Ing. Victor Pimsner, Laureat al Premiului de Stat, „Motoare aeroreactoare Volumul I”, Editura Didactică și Pedagogică, București 1983
- [55] Prof. Dr. Doc. Ing. Victor Pimsner, Laureat al Premiului de Stat, „Mașini paletate”, Editura Tehnică, București, 1988
- [56] Stanciu V., Silivestru V., Leventiu C., Dinu C., *Gazodinamica tranzitorie a turbomotoarelor*, Editura Printech, Bucuresti - 2005, ISBN 973-718-185-9,
- [57] Rolls-Royce – *The jet engine*, Copyright © Rolls-Royce plc 1986, ISBN 0902121 235,
- [58] Silivestru V., Teza de Doctorat – Reglajul motoarelor aeroreactoare cu aplicatii la regimurile dinamice in vederea definirii regimurilor tranzitorii, Bucuresti 1987,

- [59] <https://www.defensenews.com/air/2017/05/31/pratt-whitney-pitches-souped-up-version-of-the-f-35-engine/>
- [60] Series 90-30 Programmable Controller, GE Fanuc Automation, GFK-2296 Ianuarie 2004
- [61] <https://www.inor.com/download/documentation/>
- [62] DM422C User's manual, Leadshine Technology, 2009
- [63] <https://www.prelectronics.com/products/multifunctional-devices/4100/universal-transmitter-4114/>
- [64] Measurement, Control, Regulation and Automation, Catalogue 4083-2/UK, Parker
- [65] ST 3000 Smart Pressure Transmitter datasheet, Honeywell, 2004
- [66] <http://www.caom-automatizari.ro/produse/termocupluri-tehnice.html>
- [67] <http://www.caom-automatizari.ro/produse/termorezistente.html>
- [68] TachPak 3 Instruction Manual, Airpax Instruments, USA
- [69] ZOC 17 Temperature Compensated Electronic Pressure Scanning Module INSTRUCTION and SERVICE MANUAL, Scanivalve Corp
- [70] 990 Vibration Transmitter Datasheet, Bently Nevada
- [71] 3300 XL NSv\* Proximity Transducer System Manual, Bently Nevada
- [72] <https://www.quicktimeonline.com/330901-00-90-05-02-00>
- [73] <https://www.ni.com/ro-ro/shop/labview.html>
- [74] <https://www.ni.com/ro-ro/innovations/case-studies/19/using-labview-pxi-and-compactrio-to-develop-a-testbed.html>
- [75] <https://www.ni.com/ro-ro/innovations/case-studies/19/nasa-data-acquisition-system-software-for-rocket-propulsion-testing.html>
- [76] Saddaqt Ali, Jahangir Badar, Faheem Akhter, Syed Sabir Hussain Bukhari and Jong-Suk Ro, „Real-Time Controller Design Test Bench for High-Voltage Direct Current Modular Multilevel Converters”, Applied Sciences, 2020
- [77] Karol Listewnik, Grzegorz Grzeczka, Maciej Kłaczyński, Witold Cioch, „Real-time LabVIEW application for diagnostics and evaluation of machine vibration”, Vibroengineering PROCEDIA, Vol. 6, 2015, p. 104-108 - <https://www.extrica.com/article/16388>
- [78] Changduk Kong\*, Semyeong Lim\*, Keonwoo Kim\*, A STUDY ON GENERATION OF GAS TURBINE COMPONENT MAPS USING PERFORMANCE TEST DATA, \* Department of Aerospace Engineering, Chosun University, Gwangju, Korea, 27 TH INTERNATIONAL CONGRESS OF THE AERONAUTICAL SCIENCES
- [79] Introducere în LabVIEW, ISBN:978-973-0-26418-0, Bistrița 2018 <https://eprof.ro/docs/labview/tutorial-labview-profesori.pdf>
- [80] <https://dewesoft.com/products/daq-systems/sirius>
- [81] <https://www.pelco.com/>
- [82] D. Goldsmith, J. Brusey, J. Shuttleworth, E. Gaura, R. Hazelden, M. Langley, *Wireless instrumentation for aerospace applications – thermal monitoring for a gas turbine engine*, WiSIG Showcase, Teddington, UK, deposited in CURVE August 2013;
- [83] H.H. Khalili, P.R. Green, D. George, G. Watson, W. Schiffers, *Wireless Sensor Networks for Monitoring Gas Turbine Engines During Development*, 2017 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC), Heraklion, Greece;
- [84] B.W. Harris, *Fiber Optics for Flight Control Systems*, M.Sc. Thesis, University of Dayton, Dayton OH, December 2014;
- [85] <https://www.glenair.com/fiberoptics/mil-dtl-38999-type-fiber-optic-connectors-termini-cables.htm>;



- [86] <https://cdn.glenair.com/fiberoptics/pdf/b/180-091.pdf>
- [87] <http://www.fibersystems.com/products-by-category/physical-contact-connectors/>
- [88] <https://www.ppc-online.com/blog/picking-the-right-fiber-connector-pc-upc-or-apc>
- [89] <https://www.cablinginstall.com/articles/2012/05/non-contact-fiber-optic.html>
- [90] [http://www.arrayedfiberoptics.com/documents/NC\\_MPO\\_Press\\_Release\\_V1\\_English\\_Internal\\_Use.pdf](http://www.arrayedfiberoptics.com/documents/NC_MPO_Press_Release_V1_English_Internal_Use.pdf)
- [91] J.G. Zhang, *Design Issues for MIL-STD-1773 Optical Fiber Avionics Data Buses*, IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, Vol. 13, Issue 13, pp. 25-32, 1998;
- [92] D. Mihoc, M. Ceapăru, S. ST. Iliescu, T. Borangiu, “Teoria și elementele sistemelor de reglare automată”, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1980
- [93] Sever Șerban, „Sisteme de reglare automată, teorie și aplicații”, Editura Printech, ISBN 978-606-521-445-3, București 2009
- [94] Sever Șerban, „Proiectarea sistemelor de reglare automată”, Bren Prod, ISBN 973-9493-77-7, București 2000
- [95] <https://www.gantner-instruments.com/products/controller/q-station-x/>
- [96] <https://www.gantner-instruments.com/blog/q-station-new-hardware-synchronization-feature/>
- [97] <https://www.gantner-instruments.com/product-group/q-bloxx-xe/>
- [98] Manual Test.commander, e. series, Gantner Instruments
- [99] User’s manual Anet429, 4/8/16 Channel ARINC429 Test & Simulation Module for standard ethernet, AIM Right on Target, V01.30 Rev. A, Aprilie 2017
- [100] <https://www.prelectronics.com/products/multifunctional-devices/4100/universal-transmitter-4114/>
- [101] <https://www.prelectronics.com/products/multifunctional-devices/4100/universal-uni-bipolar-signal-transmitter-4184/>
- [102] <https://www.prelectronics.com/products/special-devices/5200/programmable-f-i-f-f-converter-5225a/>
- [103] <https://www.prelectronics.com/products/communication-interfaces/4500/display-programming-front-4510/>
- [104] <https://www.pololu.com/product/2305>
- [105] <https://www.pololu.com/product/3142>
- [106] [https://www.kemueppers.com/fileadmin/Products/ENG/01\\_ZHM/01\\_Documents/02\\_ZHM\\_ST/03\\_Data\\_Sheet/ZHM\\_ST\\_D\\_EN\\_220101\\_E001.pdf](https://www.kemueppers.com/fileadmin/Products/ENG/01_ZHM/01_Documents/02_ZHM_ST/03_Data_Sheet/ZHM_ST_D_EN_220101_E001.pdf)
- [107] <https://www.gefran.com/en/products/250-adv200-field-oriented-vector-inverter>
- [108] <https://www.bakerhughes.com/druck/industrial-pressure-sensors/configurable-modular-pressure-sensors>
- [109] <https://www.prelectronics.com/products/accessories/5900/loop-link-communications-interface-5909/>
- [110] <https://scanivalve.com/products/pressure-measurement/miniature-ethernet-pressure-scanners/mps4264/>
- [111] 1900/65A General Purpose Equipment Monitor, Field Wiring Diagrams, Bently Nevada, 2005
- [112] <https://dewesoft.com/products/daq-systems/sirius>
- [113] TV2–117A; Free Turbine Turboshaft, Base Maintenance and Engine Installation Manual. Ministry of Transport and Telecommunications, Documentation and Technical Publications Center: Bucharest, Romania, 1973.
- [114] Specification - HS2600 High Speed Hydraulic Dynamometer, Froude Hofmann, Issue 5a, August 2008
- [115] Catană, R.; Dediu, G.; Tărăbîc, C.; Serbescu, H. Performance Calculations of Gas Turbine Engine Components Based on Particular Instrumentation Methods. *Appl. Sci.* 2021, 11, 4492.
- [116] Catană, R.M.; Dediu, G.; Tărăbîc, C.M. Studies and Experimental Research in the Evaluation of TV2-117A Turboshaft Engine Working Regimes. *Appl. Sci.* 2022, 12, 3703.  
<https://doi.org/10.3390/app12073703>

## BIBLIOGRAFIE PERSONALĂ

### Articole

- [1] **G. Dediu**, D. Crunteanu, "Automatic Control System for Gas Turbines Test Rig", *Applied Mechanics and Materials*, vol. 436, pp. 398-405, 2013. DOI: [10.4028/www.scientific.net/AMM.436.398](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.436.398), WOS:000332261000053.
- [2] **G. Dediu**, V. Vilag, J. Popescu, K. Tujarov, I. Zheleva, G. Popov, "System instrumentation and data acquisition for TurboRiver-RB7", *TEACH LABOR AT RUSE UNIVERSITY - 2012*, vol. 51, series 1.2, 2012.
- [3] **G. Dediu**, J. Popescu, C. Cuciumita, V. Vilag, R. Petcu, V. Stanciu, "Pilot Automation System for Gas Turbines Testing", *Annals of DAAAM for 2009 & Proceedings of the 20th International DAAAM Symposium Book, Series: Annals of DAAAM and Proceedings*, vol. 20, pp. 1563-1614, 2009.
- [4] R. Catană, **G. Dediu**, C. Tărăbîc, "Studies and Experimental Research in the Evaluation of TV2-117A Turboshift Engine Working Regimes", *Applied Sciences*, vol. 12, no. 7, p. 3703, 2022. DOI: [10.3390/app12073703](https://doi.org/10.3390/app12073703). WOS:000781403100001 (**IF 2.838**).
- [5] R. Catană, **G. Dediu**, C. Tărăbîc, H. Șerbescu, "Performance Calculations of Gas Turbine Engine Components Based on Particular Instrumentation Methods", *Applied Sciences*, vol. 11, no. 10, p. 4492, 2021. DOI: [10.3390/app11104492](https://doi.org/10.3390/app11104492). WOS:000662496600001 (**IF 2.838**).
- [6] R. Catană, **G. Dediu**, C. Tărăbîc, "Experimental Research of a Particular Free Power Turbine Application", *Tehnici vjesnik - Technical Gazette*, vol. 28, no. 4, 2021. DOI: [10.17559/TV-20200408110156](https://doi.org/10.17559/TV-20200408110156). WOS:000675891000005 (**IF 0.864**).
- [7] F. Niculescu, C. Borzea, I. Vlăducă, A. Mitru, M. Vasile, A. Țăranu, **G. Dediu**, "Automation Control for Revamping the Propulsion System of a Navy Frigate", *U.P.B. Scientific Bulletin, Series D Mechanical Engineering*, vol. 83, iss. 1, pp. 257-268, 2021, ISSN 1454-2358. [https://www.scientificbulletin.upb.ro/rev\\_docs\\_arhiva/full064\\_604818.pdf](https://www.scientificbulletin.upb.ro/rev_docs_arhiva/full064_604818.pdf).
- [8] R. Catana, G. Cican and **G. Dediu**, "Gas Turbine Engine Starting Applied on TV2-117 Turboshift", *Engineering, Technology & Applied Science Research*, vol. 7, no. 5, pp. 2005-2009, 2017. DOI: [10.48084/etasr.1315](https://doi.org/10.48084/etasr.1315). WOS:000416761100019.
- [9] M. Vasile, **G. Dediu**, F. Niculescu, C. Borzea, G. Bălan, "Propeller load simulation on gas turbine test stand", *The 2nd International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET 2022)*, 20-22 July 2022, Prague, Czech Republic. DOI: [10.1109/ICECET55527.2022.9872833](https://doi.org/10.1109/ICECET55527.2022.9872833).
- [10] F. Florean, A. Petcu, I. Porumbel, **G. Dediu**, "PIV Measurements in Low Noise Optimized Air Jet Pump Demonstrators", *International Journal of Energy*, vol. 10, pp. 33-43, 2016, ISSN 1998-4316. DOI: [10.13140/RG.2.1.2391.7681](https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2391.7681).

### Brevete și cereri de brevete

1. Cerere de brevet, „**STAND MOBIL DE TESTARE ROTORI DE VENTILATOR CONTRAROTATIVI**” [https://osim.ro/wp-content/uploads/Publicatii-OSIM/BOPI-Inventii/2021/bopi\\_inv\\_07\\_2021.pdf](https://osim.ro/wp-content/uploads/Publicatii-OSIM/BOPI-Inventii/2021/bopi_inv_07_2021.pdf)
2. Brevet nr. 133517, „**STAND MOBIL DE TESTARE A VENTILATOARELOR PENTRU MOTOARE TURBOFAN**”, 2021 <http://pub.osim.ro/publication-server/pdf-document?PN=RO133517%20RO%20133517&iDocId=12198&iepoch=.pdf>