

**CONTRIBUȚII LA TESTAREA  
ȘI ÎMBUNĂTĂȚIREA  
FUNCȚIONĂRII  
HIDROGENERATOARELOR  
SINCRONE VERTICALE DE PUTERE  
MARE FOLOSIND  
INSTRUMENTAȚIA VIRTUALĂ**

Teză destinată obținerii  
titlului științific de doctor inginer  
la  
Universitatea Politehnica Timișoara  
în domeniul INGINERIE ELECTRICĂ  
de către

**Ing. Laurențiu Constantin PĂDEANU**

Conducător științific:  
Referenți științifici:

Prof.univ.dr.ing. Marius BIRIESCU  
Prof.univ.dr.ing. Radu MUNTEANU  
Prof.univ.dr.ing. Adrian-Ioan VIOREL  
Prof.univ.dr.ing. Traian JURCA

Ziua susținerii tezei: 14.01.2016

Seriile Teze de doctorat ale UPT sunt:

- |                        |   |
|------------------------|---|
| 1. Automatică          | 7. Inginerie Electronică și Telecomunicații |
| 2. Chimie              | 8. Inginerie Industrială                    |
| 3. Energetică          | 9. Inginerie Mecanică                       |
| 4. Ingineria Chimică   | 10. Știința Calculatoarelor                 |
| 5. Inginerie Civilă    | 11. Știința și Ingineria Materialelor       |
| 6. Inginerie Electrică |   |

Universitatea „Politehnica” din Timișoara a inițiat seriile de mai sus în scopul diseminării expertizei, cunoștințelor și rezultatelor cercetărilor întreprinse în cadrul școlii doctorale a universității. Seriile conțin, potrivit H.B.Ex.S Nr. 14 / 14.07.2006, tezele de doctorat susținute în universitate începând cu 1 octombrie 2006.

Copyright © Editura Politehnica – Timișoara, 2015

Această publicație este supusă prevederilor legii dreptului de autor. Multiplicarea acestei publicații, în mod integral sau în parte, traducerea, tipărirea, reutilizarea ilustrațiilor, expunerea, radiodifuzarea, reproducerea pe microfilme sau în orice altă formă este permisă numai cu respectarea prevederilor Legii române a dreptului de autor în vigoare și permisiunea pentru utilizare obținută în scris din partea Universității „Politehnica” din Timișoara. Toate încălcările acestor drepturi vor fi penalizate potrivit Legii române a drepturilor de autor.

România, 300159 Timișoara, Bd. Republicii 9,  
tel. 0256 403823, fax. 0256 403221  
e-mail: editura@edipol.upt.ro

## Cuvânt înainte

Teza de doctorat a fost elaborată sub îndrumarea domnului prof. univ. dr. ing. Marius Biriescu, căruia îi mulțumesc pentru sugestiile și observațiile de înalt profesionalism, cât și pentru sprijinul și îndrumarea deosebită acordată pe tot parcursul stagiului de doctorat.

Doresc în același timp să îmi exprim profunda recunoștință față de domnul prof. univ. dr. ing. Gheorghe Liuba, director tehnic al Centrului de Cercetare în Hidraulică Automatizări și Procese Termice (CCHAPT) al Universității "Eftimie Murgu" din Reșița, a cărui exemplu de dăruire profesională și didactică a constituit un model profesional pentru mine. Mulțumesc domului prof. univ. dr. ing. Gheorghe Liuba pentru posibilitatea de a face parte din CCHAPT începând cu anul 2010, până în prezent, unde am dobândit o experiență profesională în domeniul testării și monitorizării mașinilor electrice rotative, dar și pentru sprijinul, sugestiile și îndrumarea dânsului pentru măsurătorile și rezultatele experimentale obținute în cadrul tezei.

Mă simt îndatorat să mulțumesc domnului prof. dr. ing. Traian Jurca pentru sprijinul competent și sugestiile acordate pentru rezolvarea unor probleme de natură hardware, întâmpinate în dezvoltarea sistemului de achiziție și prelucrare a datelor dedicat testării mașinilor electrice, elaborat în cadrul tezei. De asemenea doresc să mulțumesc doamnei conf. dr. ing. Mihaela Lascu pentru articolele de specialitate puse la dispoziție în domeniul instrumentației virtuale și procesării digitale a semnalelor folosind mediul LabVIEW.

Doresc să aduc sincere mulțumiri domnului dr. ing. Marțian Moț și domnului dr. ing. Gheorghe Madescu pentru timpul acordat, observațiile și sugestiile în tematica abordată în cadrul tezei.

De asemenea doresc să aduc mulțumiri cadrelor didactice și conducerii departamentului de Inginerie Electrică al Facultății de Electrotehnică și Electroenergetică a Universității Politehnica Timișoara, pentru înțelegerea și sprijinul din punct de vedere administrativ acordat pe durata doctoratului.

Nu în ultimul rând, doresc să îmi exprim profunda recunoștință familiei mele dar și față de toți care m-au susținut din punct de vedere moral de-a lungul anilor, chiar dacă numele acestora nu este amintit explicit.

Timișoara, Decembrie 2015

Cu deosebită considerație,  
Ing. Laurențiu Constantin Pădeanu

Pădeanu, Laurențiu Constantin

**Contribuții la testarea și îmbunătățirea funcționării hidrogeneratoarelor sincrone verticale de putere mare folosind instrumentația virtuală**

Teze de doctorat ale UPT, Seria 6, Nr. 40, Editura Politehnica, 2015, 190 pagini, 117 figuri, 16 tabele.

ISSN: 1842-7022

ISBN: 978-606-35-0038-1

Cuvinte cheie: instrumentație virtuală, hidrogenerator sincron vertical, LabVIEW, achiziție de date, testarea mașinilor electrice, vibrație, cuplu electromangetic.

**Rezumat:**

În cadrul acestei lucrări sunt abordate metode și proceduri de testare, ale căror scop este îmbunătățirea performanțelor de funcționare a hidrogeneratoarelor sincrone verticale de putere mare din România. Utilizând instrumentația virtuală și implicit mediul de programare grafică National Instruments LabVIEW, se dezvoltă un sistem de achiziție și prelucrare a datelor dedicat testării mașinilor electrice, care din punct de vedere software este compus dintr-o serie de instrumente virtuale special dezvoltate pentru metodele și procedurile de testare abordate în prezenta lucrare. Aceste metode și proceduri au fost implementate în mediul industrial la un număr de 24 de generatoare sincrone de putere mare și un motor sincron din standul de probă pentru mașini electrice al Uzinei Constructoare de Mașini Reșița.

## CUPRINS

Notații, abrevieri.....	7
Lista de figuri.....	8
Lista de tabele.....	13
1. Introducere.....	14
1.1. Justificarea și prezentarea temei de cercetare.....	14
1.2. Obiectivele lucrării.....	15
1.3. Prezentarea conținutului tezei.....	16
2. Stadiul actual al condițiilor de exploatare a HG din România.....	17
2.1. Aspecte de mentenanță a hidrogenatoarelor.....	18
2.2. Concluzii.....	23
3. Instrumentație virtuală - aspecte de bază.....	24
3.1. Aspecte generale.....	24
3.2. Mediul de programare grafică LabVIEW.....	27
3.3. Avantajele mediului LabVIEW.....	29
4. Sistem de achiziție de date dedicat testării mașinilor electrice de putere mare.....	31
4.1. Sisteme de achiziție și prelucrare a datelor experimentale.....	31
4.1.1. Structura hardware a sistemelor de achiziție.....	34
4.1.2. Prelucrarea numerică a semnalelor.....	37
4.1.3. Reprezentarea numerelor în format digital.....	41
4.1.4. Erori de măsurare.....	43
4.2. Sistem de achiziție de date dedicat testării mașinilor electrice.....	44
4.2.1. Cerințe ale SAPDM.....	45
4.2.2. Structura hardware a SAPDM.....	45
4.2.3. Structura software a SAPDM.....	50
4.2.4. Verificarea clasei de precizie a SAPDM.....	66
4.3. Concluzii.....	72
5. Programe specifice de achiziție și prelucrare a datelor pentru diagnoza hidrogenatoarelor.....	73
5.1. Centrarea în câmp magnetic a rotoarelor hidrogenatoarelor.....	75
5.1.1. Considerații generale privind UMP.....	75
5.1.2. Influența UMP asupra performanțelor de funcționare a HG.....	80
5.1.3. Evidențierea forțelor magnetice unilaterale de dezechilibru prin monitorizarea diagramei orbită a rotorului.....	85
5.1.4. Centrarea magnetică folosind traductoare de proximitate inductive.....	92
5.1.5. Centrarea magnetică folosind bobine sondă montate în stator.....	99
5.2. Determinarea cuplului electromagnetic asincron pentru HG reversibile.....	107
5.2.1. Regimul de pornire lentă în gol la tensiune scăzută.....	107
5.2.2. Regimul de alimentare cu frecvență variabilă și rotor în repaus.....	111
5.2.3. Descrierea tehnicii de testare și a instrumentelor virtuale dezvoltate pentru determinarea cuplului electromagnetic asincron.....	115
5.3. Concluzii.....	124
6. Aplicații în mediul industrial.....	126
6.1. Centrarea magnetică - Rezultate experimentale.....	126
6.1.1. Centrarea magnetică folosind traductoare de proximitate.....	126

## 6 CUPRINS

---

6.1.2. Centrea magnetică folosind bobine sondă.....	139
6.1.3. Sinteză a rezultatelor experimentale obținute la toate mașinile electrice de putere centrate magnetic .....	146
6.2. Cuplul electromagnetic asincron - Rezultate experimentale .....	149
6.3. Concluzii .....	155
7. Concluzii generale, contribuții și direcții de dezvoltare.....	156
7.1. Concluzii generale.....	156
7.2. Contribuții .....	157
7.3. Direcții de dezvoltare ulterioară a cercetării abordate în teză.....	159
Bibliografie .....	161
Anexa A1 .....	186

## NOTAȚII, ABREVIERI

AC	–	curent alternativ
ASCII	–	American Standard Code for Information Interchange
BS	–	bobine sondă
CAN	–	convertor analog-numeric
CCHAPT	–	Centrul de Cercetări în Hidraulică Automatizări și Procese Termice al Universității "Eftimie Murgu" din Reșița
CCW	–	sensul trigonometric
CHE	–	centrală hidroelectrică
CW	–	sensul acelor de ceasornic
DC	–	curent continuu
DSA	–	convertor analog-numeric delta sigma
FEM	–	metoda elementului finit – <i>finite element method</i>
FPGA	–	Field Programmable Gate Array
GPIB	–	General Purpose Interface Bus
GS	–	generator sincron
HG	–	hidrogenerator
LabVIEW	–	Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench
LabVIEW RT	–	LabVIEW Real Time
LRAS	–	lagăr radial axial superior hidrogenerator
LRI	–	lagăr radial inferior hidrogenerator
MA	–	mașina asincronă
MAC	–	Macintosh
MAD	–	modul achiziție de date
MAP	–	modul adaptor de proces
Mcc	–	motor de curent continuu
MS	–	motor sincron
NI	–	National Instruments
PRAM	–	protecții prin relee și aparate de măsură
RD	–	punte redresoare
SAPD	–	sistem de achiziție și prelucrarea datelor
SAPDM	–	sistem de achiziție și prelucrarea datelor dedicat testării mașinilor electrice de putere mare
SAR	–	convertor analog-numeric cu aproximații succesive
SH	–	sucursala de hidrocentrale
SSFR	–	regimul de alimentare cu frecvență variabilă și rotor în repaus – <i>Stand Still Frequency Response</i>
subVI	–	subinstrument virtual
TC	–	transformator de curent
TD	–	traductor de proximitate (deplasare)
TU	–	transformator de tensiune
UCMR	–	Uzina Constructoare de Mașini Reșița
UMP	–	forță magnetică unilaterală de dezechilibru – <i>unbalanced magnetic pull</i>
VI	–	instrument virtual – <i>virtual instrument</i>
VME	–	Versa Module Europa
VXI	–	VME eXtensions for Instrumentation

## LISTA DE FIGURI

Fig. 1. 1. Consumul global de energie și cel specific României în anul 2013 conform BP Statistical Review of World Energy 2014 .....	14
Fig. 2. 1. Tipuri de hidrogenatoare sincrone verticale în funcție de poziția lagărului axial de susținere.....	17
Fig. 2. 2. Cele mai frecvente defecte ce conduc la indisponibilizarea HG .....	20
Fig. 3. 1. Prezentarea arhitecturii unui instrument tradițional (detaliul A) și a unui sistem de achiziție dezvoltat folosind instrumente virtuale (detaliul B) .....	25
Fig. 3. 2. Principiul abordat în cazul dezvoltării unui VI pentru achiziția de date folosind mediul LabVIEW.....	28
Fig. 3. 3. Cele mai des folosite medii de programare pentru dezvoltarea aplicațiilor de achiziție de date conform sondajului realizat de US Platform Awareness Survey .....	30
Fig. 4. 1. Clasificarea semnalelor electrice în funcție de variația în timp a acestora .....	32
Fig. 4. 2. Principalele tipuri de semnale analogice folosite în domeniul tehnic .....	33
Fig. 4. 3. Forma de undă a semnalului analogic periodic $a(t)$ considerat .....	33
Fig. 4. 4. Schema bloc a unui sistem de achiziție și prelucrare de date computerizat .....	34
Fig. 4. 5. Exemplu de filtru Butterworth și caracteristica de frecvență a acestuia realizat în NI Multisim .....	35
Fig. 4. 6. Exemplu de filtru Cebîșev și răspunsul în frecvență al acestuia realizat în NI Multisim .....	36
Fig. 4. 7. Modul de eșantionare al unui semnal analogic.....	38
Fig. 4. 8. Fenomenul de aliere în cazul unei eșantionări necorespunzătoare .....	38
Fig. 4. 9. Reconstituirea unui semnal prin interpolarea de ordinul 0 .....	39
Fig. 4. 10. Reconstituirea unui semnal prin interpolarea de ordinul 1 .....	40
Fig. 4. 11. Reprezentarea numerelor în virgulă mobilă .....	42
Fig. 4. 12. Formatele de reprezentare a numerelor în virgulă mobilă conform IEEE 754.....	43
Fig. 4. 13. Schema bloc a structurii hardware SAPDM.....	46
Fig. 4. 14. Divizorul rezistiv trifazat simulat în mediul NI Multisim.....	47
Fig. 4. 15. Traductoare de curent LEM în buclă închisă din cadrul MAP .....	48
Fig. 4. 16. Amplificatoare cu separare galvanică din cadrul MAP.....	48
Fig. 4. 17. Principalele componente hardware din incinta SAPDM realizat în cadrul tezei .....	49
Fig. 4. 18. Panoul frontal de conexiuni al SAPDM realizat în cadrul tezei .....	50
Fig. 4. 19. Directorul aplicației de tip Windows Installer generat de mediul LabVIEW .....	51
Fig. 4. 20. Fereastra proiectului creat în LabVIEW pentru nivelul primar software al SAPDM.....	52
Fig. 4. 21. Fereastra principală a aplicației dezvoltate pentru nivelul primar software al SAPDM.....	53
Fig. 4. 22. Fereastra de configurare a SAPDM utilizată ca exemplu pentru încercarea motorului asincron de 4 KW.....	54



Fig. 4. 23. Diagramele bloc ale subVI-urilor dezvoltate pentru salvarea și citirea contextelor .....	54
Fig. 4. 24. Mesaje afișate privind starea tehnică a SAPDM .....	55
Fig. 4. 25. Secvența diagramei bloc prin care se verifică starea hardware a SAPDM .....	55
Fig. 4. 26. Secvențe din diagrama bloc a VI-ului dezvoltat pentru achiziția și prelucrarea primară a datelor .....	56
Fig. 4. 27. Diagrama bloc a subinstrumentului "SubVI Constante" .....	57
Fig. 4. 28. Fereastra VI-ului de vizualizare și salvare on-line a măsurătorilor .....	59
Fig. 4. 29. Fereastra de configurare a modului de calcul a valorilor mărimilor achiziționate .....	60
Fig. 4. 30. Forma de undă a tensiunii și curentului la mersul în gol a motorului de 4 KW .....	61
Fig. 4. 31. Diagrama bloc a subVI-ului dezvoltat pentru analiza FFT a formelor de undă achiziționate .....	61
Fig. 4. 32. Secvență din diagrama bloc a instrumentului virtual dezvoltat pentru a vizualiza variația în timp, sub formă grafică, a valorilor calculate specifice mărimilor achiziționate .....	61
Fig. 4. 33. Fereastra VI-ului cu ajutorul căruia se urmărește evoluția în timp a valorilor efective ale mărimilor achiziționate sub formă grafică .....	62
Fig. 4. 34. Diagrama bloc a VI-ului dezvoltat pentru a reprezenta diagrama fazorială a tensiunilor și curenților satorici .....	63
Fig. 4. 35. Diagrama fazorială la funcționarea în gol a mașinii asincrone de 4 KW .....	63
Fig. 4. 36. Fereastra VI-ului de vizualizare și prelucrare off-line a rezultatelor .....	64
Fig. 4. 37. Fereastra de analiză off-line a semnalelor în domeniul frecvență .....	65
Fig. 4. 38. Caracteristica de magnetizare a motorului asincron de 4 KW .....	65
Fig. 4. 39. Reprezentare tabelară a măsurătorilor efectuate pentru a determina caracteristica de magnetizare a motorului asincron de 4 KW .....	66
Fig. 4. 40. Sistem de achiziție DIGITLINE VPA 323 .....	67
Fig. 4. 41. Forma de undă a tensiunii și curentului pe faza A pentru sarcina rezistivă folosită, înainte de eliminarea defazajului .....	69
Fig. 4. 42. Diagrama bloc a subVI-ului dezvoltat pentru calculul defazajului .....	70
Fig. 4. 43. Diagrama bloc a subVI-ului dezvoltat pentru compensarea defazajului .....	70
Fig. 4. 44. Forma de undă a tensiunii și curentului pe faza A pentru sarcina rezistivă folosită, după eliminarea defazajului .....	71
Fig. 5. 1. Fereastra principală a aplicației dezvoltate pentru nivelul secundar al SAPDM .....	73
Fig. 5. 2. Fereastra proiectului creat în LabVIEW pentru al doilea nivel software al SAPDM .....	74
Fig. 5. 3. Repartiția forțelor în întrefier în cazul în care densitatea de energie este constantă .....	77
Fig. 5. 4 Repartiția forțelor în întrefier în cazul în care densitatea de energie nu este constantă .....	77
Fig. 5. 5. Reprezentare celor două cazuri de abateri de la formă circulară a rotorului (A) sau a statorului (B) .....	78
Fig. 5. 6. Reprezentare excentricității rotorului față de stator .....	78
Fig. 5. 7. Variația forțelor suplimentare induse în lagărele HG de 30 de MW la diferite valori de excentricitate .....	81
Fig. 5. 8. Variația pierderilor suplimentare raportate la pierderile totale ale mașinii pentru diferite valori ale excentricității .....	81

## 10 LISTA DE FIGURI

Fig. 5. 9. Amplitudinea maximă și vârf-vârf a vibrației relative a rotorului unui HG conform ISO 7919-5.....	84
Fig. 5. 10. Principiul de determinare al diagramei orbită .....	87
Fig. 5. 11. Forme ale diagramei orbită.....	88
Fig. 5. 12. Fereastra principală a aplicației dezvoltate pentru determinarea diagramei orbită .....	89
Fig. 5. 13. Fereastra de configurarea a achiziție de date din cadrul aplicației dezvoltate pentru determinarea diagramei orbită.....	90
Fig. 5. 14. Diagrame bloc ale instrumentelor virtuale dezvoltate pentru determinarea (detaliul A) și afișarea (detaliul B) diagramei orbită.....	91
Fig. 5. 15. Puncte măsură ale întrefierului cu mașina în stare de repaus.....	92
Fig. 5. 16. Principiul de măsurare al tendinței de deplasare a rotorului în cadrul procedurii de centrare magnetică .....	93
Fig. 5. 17. Fereastra principală a aplicației dezvoltate pentru centrarea magnetică folosind traductoare de proximitate inductive .....	94
Fig. 5. 18. Fereastra aplicației dezvoltate în care se interpretează tendințele de deplasare ale rotorului în cazul celor 4 poziții distincte.....	95
Fig. 5. 19. Fereastra aplicației dezvoltate în care se interpretează deplasarea rezultantă corespunzătoare unei rotații complete a rotorului HG.....	97
Fig. 5. 20. Diagrame bloc esențiale aferente aplicației dezvoltate pentru centrarea magnetică folosind traductoare de proximitate inductive.....	98
Fig. 5. 21. Modul de montare a bobinelor sondă pe miezul statoric al hidrogenatorului .....	99
Fig. 5. 22. Fereastra principală a aplicației dezvoltate pentru centrarea magnetică folosind bobine sondă .....	101
Fig. 5. 23. Fereastra de reprezentarea fazorială a celor 12 tensiuni electromotoare induse în BS și rezultanta lor .....	102
Fig. 5. 24. Diagrama bloc aferentă VI-ului dezvoltat pentru afișarea celor 12 tensiuni electromotoare induse în BS sub formă fazorială.....	103
Fig. 5. 25. Diagrama bloc a instrumentului virtual dezvoltat pentru determinarea formei rotorului și statorului în timpul funcționării HG.....	105
Fig. 5. 26. Secvență din diagrama bloc a VI-ului dezvoltat pentru monitorizarea întrefierului, în care se determină corelației [V]-[mm] .....	106
Fig. 5. 27. Bilanțul energetic al mașinii sincrone .....	108
Fig. 5. 28. Schema echivalentă a mașinii sincrone la funcționarea în regim asincron corespunzătoare axei longitudinale .....	113
Fig. 5. 29. Schema echivalentă a mașinii sincrone cu rotorul în repaus și statorul alimentat cu o tensiune de frecvență variabilă.....	113
Fig. 5. 30. Principiul de conectare bifazată a înfășurării statorice în cazul metodei SSFR.....	114
Fig. 5. 31. Interfața cu utilizatorul a aplicației dezvoltate pentru determinarea cuplului electromagnetic prin metoda SSFR.....	117
Fig. 5. 32. Fereastra de dialog în care se definesc constantele impuse de metodă SSFR.....	118
Fig. 5. 33. Secvența din diagrama bloc a instrumentului virtual principal din cadrul aplicației dezvoltate pentru determinarea cuplului electromagnetic asincron .....	119
Fig. 5. 34. Diagrama bloc a subVI-ului (detaliul B Fig. 33) dezvoltat pentru reprezentarea curbei cuplului.....	119
Fig. 5. 35. Diagrama bloc a subVI-ului (detaliul A Fig. 33) dezvoltat pentru calculul cuplului electromagnetic asincron folosind metoda propusă .....	120

Fig. 5. 36. Interfața cu utilizatorul a aplicației dezvoltate pentru determinarea cuplului de pornire asincron folosind regimul de pornire lentă în gol și metoda bilanțului energetic .....	122
Fig. 5. 37. Diagrama bloc a instrumentului virtual principal din cadrul aplicației dezvoltate pentru determinarea cuplului de pornire asincron prin metoda bilanțului energetic .....	123
Fig. 6. 1. Formele de undă ale vibrațiilor relative înregistrate pentru un ciclu de 10 rotații ale rotorului în regim de mers în gol neexcitat, înainte de centrarea magnetică HG2 9330 kVA CHE Hațeg .....	127
Fig. 6. 2. Diagrama orbită înregistrată în regim de mers în gol neexcitat corespunzătoare a 10 rotații complete a rotorului HG2 9330 kVA din CHE Hațeg, înainte de centrarea magnetică .....	128
Fig. 6. 3. Formele de undă ale vibrațiilor relative corespunzătoare a 10 rotații ale rotorului în regim de mers în gol excitat, înainte de centrarea magnetică HG2 9330 kVA CHE Hațeg .....	128
Fig. 6. 4. Deplasarea arborelui rotorului în timpul procesului tranzitoriu de excitare HG2 9330 kVA CHE Hațeg .....	129
Fig. 6. 5. Diagrama orbită înregistrată în regim de mers în gol excitat, corespunzătoare a 10 rotații complete a rotorului HG2 9330 kVA din CHE Hațeg, înainte de centrarea magnetică .....	129
Fig. 6. 6. Diagrama orbită înregistrată în regim de mers în gol excitat, corespunzătoare unei rotații complete a rotorului HG2 9330 kVA din CHE Hațeg, înainte de centrarea magnetică .....	130
Fig. 6. 7. Poziția traductoarelor de proximitate la nivelul LRAS și LRI în cazul HG2 din CHE Hațeg .....	131
Fig. 6. 8. Tendințele de deplasare ale rotorului (A1, A2, A3, A4) în momentul aplicării impusului de curent continuu, pentru cele patru poziții ale rotorului și rezultanta acestora (R1), înainte de centrarea magnetică HG2 9330 kVA CHE Hațeg .....	131
Fig. 6. 9. Tendințele de deplasare ale rotorului (A1, A2, A3, A4) în momentul aplicării impusului de curent continuu, pentru cele patru poziții ale rotorului și rezultanta acestora (R1), după centrarea magnetică HG2 9330 kVA CHE Hațeg .....	132
Fig. 6. 10. Formele de undă ale vibrațiilor relative corespunzătoare a 10 rotații ale rotorului în regim de mers în gol excitat, după centrarea magnetică HG2 9330 kVA CHE Hațeg .....	133
Fig. 6. 11. Diagrama orbită înregistrată în regim de mers în gol excitat corespunzătoare a 10 rotații complete a rotorului HG2 9330 kVA din CHE Hațeg, după centrarea magnetică .....	133
Fig. 6. 12. Tendințele de deplasare ale rotorului (A1, A2, A3, A4) în momentul aplicării impusului de curent continuu pentru cele patru poziții ale rotorului și rezultanta acestora (R1), înainte de centrarea magnetică HG1 6400 kVA CHE Mănicești .....	135
Fig. 6. 13. Tendințele de deplasare ale rotorului (A1, A2, A3, A4) în momentul aplicării impusului de curent continuu, pentru cele patru poziții ale rotorului și rezultanta acestora (R1), după centrarea magnetică HG1 6400 kVA CHE Mănicești .....	136
Fig. 6. 14. Spectrul vibrației absolute în regim de mers în gol neexcitat la nivelul LRAS, înainte de centrarea magnetică HG1 6400 kVA CHE Mănicești .....	137
Fig. 6. 15. Spectrul vibrației absolute în regim de mers în gol excitat la nivelul LRAS, înainte de centrarea magnetică HG1 6400 kVA CHE Mănicești .....	138

## 12 LISTA DE FIGURI

---

Fig. 6. 16. Spectrul vibrației absolute în regim de mers în gol neexcitat la nivelul LRAS, după centrarea magnetică HG1 6400 kVA CHE Mănicești .....	138
Fig. 6. 17. Spectrul vibrației absolute în regim de mers în gol excitat la nivelul LRAS, după centrarea magnetică HG1 6400 kVA CHE Mănicești .....	138
Fig. 6. 18. Reprezentări fazoriale ale tensiunilor electromotoare induse în bobinele sondă, înainte de centrarea magnetică, corespunzătoare celor patru poziții distincte ale rotorului .....	139
Fig. 6. 19. Reprezentări fazoriale ale tensiunilor electromotoare induse în bobinele sondă, după centrarea magnetică, corespunzătoare celor patru poziții distincte ale rotorului .....	140
Fig. 6. 20. Formele de undă ale tensiunilor electromotoare induse în bobine sondă în timpul funcționării HG1 186 MVA din CHE Râul Mare Retezat în regim de mers în gol excitat.....	142
Fig. 6. 21. Reprezentare fazorială a tensiunilor electromotoare induse în bobinele sondă după centrarea magnetică în timpul funcționării în regim excitat $U=15$ KV HG1 186 MVA CHE Râul Mare Retezat .....	142
Fig. 6. 22. Analiza FFT a tensiunii electromotoare induse în prima bobină sondă HG1 186 MVA CHE Râul Mare Retezat .....	143
Fig. 6. 23. Forma rotorului și cea a statorului pentru HG1 186 MVA din CHE Râul Mare Retezat la funcționarea în regim excitat la $U=15$ KV .....	144
Fig. 6. 24. Monitorizarea variației întrefierului în timpul funcționării în regim excitat la $U=15$ KV HG 1 186 MVA din CHE Retezat .....	145
Fig. 6. 25. Diagrama comparativă a nivelului vibrațiilor absolute măsurate doar după aplicarea metodei de centrare magnetică.....	147
Fig. 6. 26. Diagrama comparativă a nivelului vibrațiilor absolute măsurate înainte și după aplicarea metodei de centrare magnetică.....	148
Fig. 6. 27. Schema de conectare a mașinilor electrice folosite pentru alimentarea cu frecvență variabilă a MS 3,6 MW .....	149
Fig. 6. 28. Caracteristica cuplului la pornirea în asincron a MS 3,6 MW reprezentată folosind aplicația dedicată din cadrul nivelului secundar de prelucrare al SAPDM..	151
Fig. 6. 29. Schema de conectare a mașinilor electrice folosite pentru regimul de mers în scurtcircuit al MS 3,6 MW.....	153
Fig. 6. 30. Caracteristica de funcționare în regim de scurtcircuit asincron a motorului sincron de 3,6 MW, extrapolată la tensiunea nominală.....	154

## LISTA DE TABELE

Tabelul 3. 1. Elemente comparative ale mediilor de programare clasice și cele bazate pe programarea grafică .....	26
Tabelul 4. 1. Constantele de calibrare ale intrărilor analogice specifice SAPDM ....	58
Tabelul 4. 2. Eroarea de măsurare pentru domeniul de 70 V <sub>rms</sub> .....	67
Tabelul 4. 3. Eroarea de măsurare pentru domeniul de 250 V <sub>rms</sub> .....	68
Tabelul 4. 4. Eroarea de măsurare pentru domeniul de 420 V <sub>rms</sub> .....	68
Tabelul 4. 5. Eroarea de măsurare pentru domeniul de 17 A <sub>rms</sub> .....	68
Tabelul 4. 6. Eroarea de măsurare pentru domeniul de 75 mV <sub>cc</sub> .....	68
Tabelul 4. 7. Eroarea de măsurare pentru tensiunea și curentul de fază a motorului de 2,2 KW .....	71
Tabelul 4. 8. Eroarea de măsurare pentru puterea activă a motorului de 2,2 KW .	71
Tabelul 5. 1. Nivel de vibrație recomandat de ISO 10816-5 pentru mașinile verticale cu LRAS fixat pe carcasă și LRI fixat în fundația hidrocentralei .....	82
Tabelul 5. 2. Pierderile suplimentare conform standard IEEE 112-2005 .....	108
Tabelul 6. 1. Valorile RMS ale vibrațiilor absolute la nivelul LRAS înainte și după centrarea magnetică HG2 9330 kVA CHE Hațeg .....	134
Tabelul 6. 2. Valorile RMS ale vibrațiilor absolute la nivelul LRAS înainte și după centrarea magnetică HG1 6400 kVA CHE Mănicești .....	137
Tabelul 6. 3. Valorile RMS ale vibrațiilor absolute la nivelul LRAS înainte și după centrarea magnetică HG1 186 MVA CHE Râul Mare Retezat .....	141
Tabelul 6. 4. Mărimile calculate de SAPDM pentru determinarea curbei cuplului la pornirea în asincron a MS 3,6 MW pentru poziționarea rotorului în axa d .....	152
Tabelul 6. 5. Mărimile calculate de SAPDM pentru determinarea curbei cuplului la pornirea în asincron a MS 3,6 MW pentru poziționarea rotorului în axa q .....	152

# 1. INTRODUCERE

## 1.1. Justificarea și prezentarea temei de cercetare

Datorită **creșterii consumului energetic** la nivel global și reducerii permanente a resurselor energetice convenționale, în special a combustibililor fosili (cărbune, petrol și gaze naturale), este necesară extinderea și îmbunătățirea sistemelor de producere a energiei bazate pe resurse neconvenționale (energia solară, eoliană și hidroenergetică) care sunt practic inepuizabile [H1], [P1]. În comparație cu anul 1965, în 2013 s-a constatat un consum de energie global de 3,4 ori mai mare [B1]. Conform literaturii de specialitate se estimează că resursele fosile vor dispărea în următorii 50-60 de ani [S1], [T1].

**Energia hidroenergetică** reprezintă cea mai ieftină metodă de stocare a unor cantități mari de energie, care poate fi ușor adaptată la necesarul de consum al utilizatorilor [A1]. Conform [B1] în anul 2013 energia hidroenergetică global generată a contribuit cu 7% (3782 ThW) la consumul global de energiei, iar pentru România s-a obținut un procent de 10% (15,1 ThW) pentru consumul intern de energie.

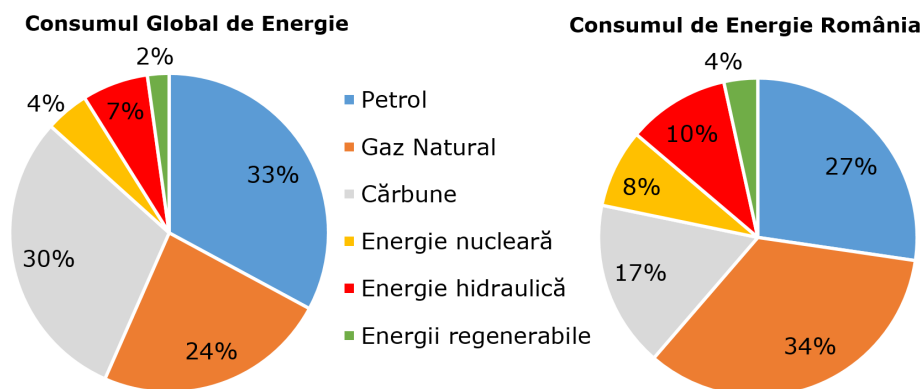


Fig. 1. 1. Consumul global de energie și cel specific României în anul 2013 conform BP Statistical Review of World Energy 2014

Așa cum se prezintă în [R1], [R2] față de anul 2012, în 2013 s-a înregistrat o creștere a energiei produse de hidrocentralele din România cu 23 % și o scădere a energiei pe bază de combustibili fosili.

În cadrul dezvoltării în ritm alert a producției de energie electrică, actualmente se pune accentul pe asigurarea condițiilor optime de funcționare a hidrogeneratoarelor sincrone, care sunt echipamente complexe de conversie a energiei hidroenergetice în energie electrică [B2], [G1].

Având în vedere cheltuielile foarte mari, necesare pentru realizarea unei amenajări hidroenergetice, este important ca fiabilitatea echipamentelor ce intră în componență acestora să fie ridicată pentru a se preveni eventualele performanțe diminuate ale hidrogeneratoarelor [B3].

Dacă până nu demult, proiectarea echipamentelor electrice, respectiv a hidrogeneratoarelor (HG), avea la bază programe de calcul întocmite în funcție de algoritmi teoretici propuși de diferiți autori, actualmente însă situația s-a schimbat radical. În prezent specialiștii dispun de programe complexe atât pentru proiectare cât și pentru simularea performanțelor pe care le oferă soluțiile constructive adoptate [B4].

Majoritatea hidrogeneratoarelor existente astăzi în România sunt de producție indigenă, proiectate și realizate cu mijloacele tehnice, respectiv sistemele de calcul și mașinile unelte de care dispuneau uzinele constructoare la sfârșitul secolului XX, fiind ușor de înțeles apariția unor neconcordanțe între valorile proiectate, impuse în documentația tehnică a mașinii și cele obținute pe cale experimentală [S2], [S3].

Încercările experimentale efectuate au pus în evidență abateri considerabile de la performanțele impuse. De exemplu hidrogeneratoarele din centrala hidroelectrică (CHE) Râul Mare Retezat, au fost proiectate la o putere activă de 167,5 MW, dar funcționează de 26 de ani la o putere de 100 MW, fapt ce a condus la pierderi mari de energie, odată cu scăderea randamentului față de valoarea prescrisă în documentația de execuție a mașinii [\*1]. Aceași situație s-a constatat și în cazul celor două grupuri de 50 MW din hidrocentrala Remeți, care au funcționat până în anul 2013 la o putere de 42 MW [\*2].

Majoritatea hidrogeneratoarelor sincrone din România se aproprie de limita duratei de viață, cu un număr foarte mare de ore de funcționare și ca urmare vor intra în etapa de reabilitare sau modernizare. Reabilitarea și modernizarea lor implică probe specifice de prototip pentru evaluarea parametrilor funcționali și a caracteristicilor acestor tipuri de generatoare sincrone. Ca urmare este necesară conceperea unor noi proceduri de testare folosind sisteme de achiziție și prelucrare a datelor dedicate mașinilor electrice de putere mare. Asociate cu dezvoltarea echipamentelor de achiziție, aceste proceduri trebuie să ofere posibilitatea aplicării lor în condițiile tehnice reale din centralele hidroelectrice, în vederea determinării parametrilor electrici și mecanici ce definesc performanțele hidrogeneratoarelor în toate condițiile de exploatare, atât în regim staționat cât și în regim tranzitoriu.

În acest context **problematica abordată** în cadrul tezei se referă la folosirea avantajelor **instrumentației virtuale pentru perfecționarea metodelor și procedurilor de testare, evaluare a parametrilor și caracteristicilor hidrogeneratoarelor de putere mare**, pentru a obține o diagnoză eficientă și pentru a crește performanțele de funcționare în condiții de siguranță a acestora.

Cunoașterea cu precizie a stării tehnice și a parametrilor de funcționare a hidrogeneratoarelor din centralele hidroelectrice reprezintă o preocupare atât pentru uzinele constructoare de mașini care pot interveni pe fluxul de fabricație pentru îmbunătățirea performanțelor cât și pentru beneficiari, cărora le oferă posibilitatea intervenției în timp real în scopul exploatării HG în condiții de siguranță și randament optim [D1]. Astfel este **necesară, oportună și actuală** abordarea unor cercetări având tematica menționată.

## 1.2. Obiectivele lucrării

Având în vedere problematica enunțată anterior, în teză s-au propus următoarele obiective:

- realizarea unui sistem de achiziție și prelucrare a datelor dedicat pentru testarea mașinilor electrice de putere mare, în special a hidrogeneratoarelor

- sincrone, folosind instrumentația virtuală și implicit mediul National Instruments LabVIEW;
- conceperea unei arhitecturi flexibile și modulare hardware și software a sistemului de achiziție și prelucrare a datelor, astfel încât acesta să poată fi îmbunătățit continuu, prin atribuirea a noi seturi de programe dezvoltate în funcție de diverse metode și proceduri specifice de testare;
  - elaborarea de instrumente virtuale de achiziție și prelucrare primară a datelor pentru regimuri periodice și aperiodice de funcționare a mașinilor electrice;
  - elaborarea de programe de prelucrare a datelor pentru evaluarea comportamentului dinamic al hidrogenatoarelor;
  - dezvoltarea unor programe de prelucrare a datelor pentru evaluarea cuplului electromagnetic al hidrogenatoarelor sincrone reversibile ce funcționează în regim de motor sincron cu turbina hidraulică în regim de pompaj;
  - aplicarea metodelor și programelor dezvoltate în mediul industrial, care să confirme corectitudinea acestora și în același timp să pună în evidență utilitatea sistemului de achiziție și prelucrare a datelor dezvoltat.

### 1.3. Prezentarea conținutului tezei

Conținutul tezei de doctorat este dezvoltat pe parcursul a 7 capitole, dintre care, în *primul capitol* se justifică tematica abordată, se prezintă principalele obiective ale lucrării și structura tezei.

În *capitolul 2* se realizează o sinteză a aspectelor de mentenanță a hidrogenatoarelor sincrone de putere mare din România, cu specificarea principalelor probleme de natură mecanică, electrică, termică și chimică ce apar în timpul funcționării HG.

În prima parte a *capitolului 3* se prezintă noțiuni generale despre instrumentația virtuală, cu specificarea celor mai cunoscute medii de programare grafică, iar în cea de-a doua parte sunt prezentate aspecte de bază privind mediul National Instruments LabVIEW pe care se bazează aplicațiile software dezvoltate în cadrul tezei.

În *capitolul 4* se realizează o sinteză a principalelor aspecte teoretice și practice necesare pentru a dezvolta un sistem de achiziție și prelucrare de date, iar apoi se descrie în detaliu, atât din punct de vedere hardware cât și software sistemul propus în cadrul tezei.

Folosind instrumentația virtuală, în *capitolul 5* se dezvoltă în detaliu metodele și procedurile propuse pentru îmbunătățirea performanțelor de funcționare a hidrogenatoarelor, prin abordarea unor probleme de mentenanță prezentate în capitolul 2.

În *capitolul 6* se prezintă cele mai semnificative rezultate experimentale obținute în urma aplicării în mediul industrial a metodelor și procedurilor de testare propuse în cadrul capitolului 5.

*Capitolul 7* cuprinde concluziile generale ale lucrării de față, precum și principalele contribuții personale și direcții de dezvoltare în viitorul apropiat.



## 2. STADIUL ACTUAL AL CONDIȚIILOR DE EXPLOATARE A HG DIN ROMÂNIA

Hidrogenatoarele sunt generatoare sincrone cu poli aparenti antrenate de o turbină hidraulică, care se pot clasifica după următoarele criterii [R3]:

- în funcție de putere pot fi de mică putere (până la 1 MVA), de putere mijlocie (1÷20 MVA), de putere mare (20÷100 MVA) și putere foarte mare (peste 100 MVA);
- în funcție de turație se împart în hidrogenatoarele lente (până la 150 RPM) și hidrogenatoarele rapide (peste 150 RPM);
- după poziția arborelui rotorului, pot fi HG verticale sau orizontale;
- în funcție de poziția lagărului axial de susținere (vezi Fig. 2.1), HG poate fi de tip suspendat la care lagărul axial este dispus deasupra rotorului în steaua superioară de susținere (cazul HG cu turația rotorului mai mare de 150 RPM), sau tip umbrelă atunci când lagărul axial este dispus sub rotorul montat în steaua inferioară sau pe un suport special montat direct pe capacul turbinei hidraulice (cazul HG cu turația rotorului sub 150 RPM);
- după tipul de protecție HG se realizează în construcție deschisă, închisă sau capsulată (hidrogenatoarele bulb);
- după modul de răcire HG pot fi cu răcire indirectă, în care agentul de răcire este aerul, sau cu răcire directă în care agentul folosit este apa distilată.

În cadrul acestei lucrări se tratează diferite aspecte funcționale ale hidrogenatoarelor sincrone verticale de putere foarte mare și putere mijlocie, de tip suspendat.

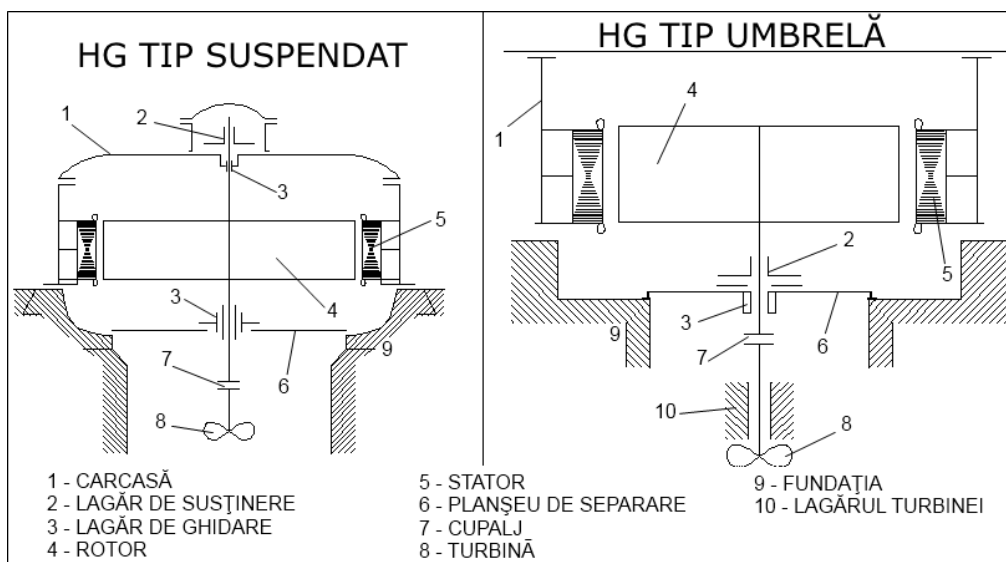


Fig. 2. 1. Tipuri de hidrogenatoarele sincrone verticale în funcție de poziția lagărului axial de susținere

## 2.1. Aspecte de mentenanță a hidrogenatoarelor

Majoritatea țărilor care dispun de un oarecare potențial hidroenergetic și-au pus problema valorificării acestei rezerve naturale de energie, care este practic inepuizabilă.

În continuare se prezintă un scurt istoric despre evoluția amenajărilor energetice din România conform [H2], [R3].

Valorificarea potențialului hidroenergetic din România a început în perioada anilor 1961-1963, când s-a dat startul pentru "salba" de centrale de pe râul Bistrița, odată cu punerea în funcțiune a CHE Dimitrie Leonida (Stejaru) echipată cu 4 grupuri de 30,5 MVA și 2 de 55,5 MVA;

Între anii 1965-1971 s-a pus în valoare potențialul hidroenergetic al Dunării prin construcția CHE Porțile de Fier I cu 6 hidroagregate fiecare având 190 MVA, deci cu o putere instalată de 1140 MVA care asigură 10% din producția de energie la nivel național (5241 GWh).

Amenajarea râului Argeș a început în jurul anilor 1963-1964 și a fost finalizată în perioada 1975-1976, principalele centrale hidroelectrice fiind:

- CHE Vidraru având 4 grupuri de 61 MVA care asigură o producție de 400 GWh într-un an hidrologic;
- CHE Clăbucet echipată cu 2 hidrogenatoare de 35,5 MVA;
- CHE Lerești cu un sigur grup de 21,1 MVA.

În perioada 1968-1980 s-au construit centralele hidroelectrice din bazinul hidroenergetic Lotru-Olt, dintre care cea mai mare este CHE Lotru-Ciunget având 3 grupuri de 188,8 MVA.

Între anii 1985-1990 s-au finalizat următoarele centrale hidroelectrice și amenajări hidroenergetice aferente:

- CHE Porțile de Fier II echipată cu 4 HG de 30 MVA și 4 grupuri de 34,8 MVA;
- CHE Râul Mare Retezat având 2 grupuri de 186 MVA.

O problemă majoră cu care s-a confruntat hidroenergetica românească în perioada 1960-1990 a fost lipsa de interes pentru performanță, fiind luată în considerare doar cantitatea de energie ce trebuia produsă, fără a se avea în vedere și eficiența echipamentelor din cadrul centralelor hidroelectrice. Acest fapt a condus la avarii soldate cu importante pierderi materiale și energie. Aceste avarii au fost posibile întrucât punerea în funcție a hidrogenatoarelor nu a fost însoțită de măsurători care să certifice performanțele acestor echipamente, fapt ce a condus la exploatarea în condiții de nesiguranță, cu riscuri majore de scoatere din funcționarea a acestora. În acest context se poate aminti incidentul major din anul 1986, când hidrogenatorul nr.1 din CHE Râul Mare Retezat a fost avariat complet în timpul probelor de punere în funcție, fiind catalogat drept cel mai grav eveniment din hidroenergetica românească.

Dintre defectele cu care s-a confruntat hidroenergetica românească în ultimii 20 de ani cele mai frecvente sunt [A2], [S4], [E1]:

- străpungeri ale izolației statorice și rotorice;
- încălzirea sau uneori griparea lagărelor;
- deteriorarea miezului magnetic statoric prin degradarea tolelor;
- încălzirea pachetului de tole statoric;
- încălzirea bobinajului statoric;
- vibrații excesive la nivelul lagărelor.

## 2.1. Aspecte de mentenanță a hidrogenatoarelor 19

În literatura de specialitate se propun diverse proceduri complexe de diagnoză și monitorizare a parametrilor reali de performanță a HG, în scopul eliminării riscului de avarie. Multe din aceste proceduri utilizează instrumentația virtuală pentru achiziția și prelucrarea automată a datelor. Aceste echipamente se împart în două categorii:

- sisteme dedicate pentru diagnoza unor probleme specifice ale HG:
  - monitorizarea temperaturilor bobinajelor [H3], [H4], [J1], [M1], [S5], [S6], [V1];
  - monitorizarea vibrațiilor absolute și relative ale părților rotitoare și staționare ale hidrogenatoarelor [S7], [S8], [Y1];
  - monitorizarea descărcărilor parțiale în izolația înfășurării statorice [G2], [N1], [S9], [Y2], [Y3];
  - monitorizarea variației întrefierului [M2], [S10], [T1], [T2].
- sisteme complete de monitorizare, capabile să măsoare toți parametrii care influențează funcționarea în condiții de siguranță a HG. În cadrul acestor sisteme se implementează diverse proceduri de transmitere wireless a valorilor achiziționate pentru a se evita montarea unor cabluri de conexiune suplimentare. De asemenea transmiterea wireless a datelor se impune pentru monitorizarea mărimilor caracteristice ale părților rotitoare a HG: temperatura înfășurării rotorice, vibrația absolută arborelui rotorului, curentul rotoric [B5], [T3], [V2], [V3].

În cazul unui HG prevăzut cu un sistem de excitație rotativă, prin monitorizarea curentului rotoric se oferă posibilitatea de intervenției preventive în cazul unor defecțiuni ale diodelor din cadrul punților redresoare ale sistemului de excitație [S11].

Un avantaj major al sistemelor complete de monitorizare bazate pe instrumentație virtuală, constă în efectuarea unor măsurători precise în vederea aprecierii randamentului hidrogenatoarelor, folosind cele două metode cunoscute în literatura de specialitate: metoda calorimetrică [B6], [B7], [J2], [P2] și metoda frânării [Z1], [Z2].

Actualmente în unele centrale hidroelectrice din România nu există o strategie care să permită evaluare stării tehnice reale, ceea ce determină o funcționare sub performanțele impuse în caietele de sarcini și astfel fără a se cunoaște starea tehnică a hidrogenatoarelor.

Exploatarea unui HG în aceste condiții implică următoarele consecințe [E1], [C1], [T2], [T4]:

- imposibilitatea planificării lucrărilor de mentenanță;
- apariția unor deranjamente în timpul exploatării, care conduc de cele mai multe ori la scoaterea neplanificată din funcțiune a HG, cu pierderi importante de energie;
- exploatarea în condiții de incertitudine din punct de vedere funcțional și în același timp în condiții reduse de eficiență economică;

În urma unui studiu statistic referitor la cele mai frecvente defecte ce apar la funcționarea HG, au rezultat patru cauze prezentate în Fig. 2.2 [A2], unde se observa că 43% din defectele ce au condus la indisponibilizarea HG sunt cauzate de străpungerea izolației, 32% de diverse probleme mecanice, 18% probleme de natură termică și 7% au provenit din degradarea lagărelor.

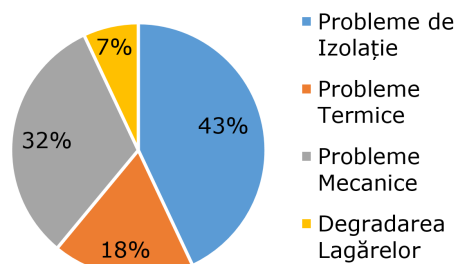


Fig. 2. 2. Cele mai frecvente defecte ce conduc la indisponibilizarea HG

În urma evaluării evenimentelor ce au avut loc de-a lungul timpului în centralele hidroelectrice, s-a concluzionat că majoritatea incidentelor puteau fi evitate dacă ar fi existat preocupări intense privind determinarea parametrilor de performanță a HG și aducerea lor în limitele impuse în documentația tehnică de execuție. Costurile economice necesare pentru aceste investigații sunt neglijabile în comparațiile cu cele aferente unor reparații majore neplanificate [T2], [M2].

În cadrul colaborării dintre laboratorul de electromecanică al filialei Academiei din Timișoara, Centrul de Cercetări în Hidraulică Automatizări și Procese Termice (CCHAPT) al Universității "Eftimie Murgu" Reșița și laboratorul D109 de testare a mașinilor electrice al Facultății de Electrotehnică și Electroenergetică din Universitatea "Politehnica" Timișoara, s-a inițiat o acțiune de cercetare, extinsă pe o perioadă mai mare de timp, privind stabilirea unor metode și proceduri prin care să se pună în evidență performanțele tehnice reale ale generatoarelor sincrone din centralele hidroelectrice. **Autorul acestei lucrări este membru al CCHAPT din anul 2010.**

Strategia elaborată în cadrul colectivului reunit din cele trei unități amintite anterior, a fost conceperea și implementarea unui program de probe și verificări complexe în scopul evaluării parametrilor funcționali, ce definesc starea tehnică a hidrogeneratoarelor din principalele centrale hidroelectrice din România, în diferite faze:

- încercări experimentale privind determinarea stării tehnice înainte de demontarea unui hidrogenerator, în vederea stabilirii scopului lucrărilor de reparație;
- încercări în timpul procesului de reparație în centrala hidroelectrică pentru hidrogeneratoarele mari sau în cadrul Uzinei Constructoare de Mașini Reșița (UCMR) pentru HG care se pot transporta;
- încercări experimentale după punerea în funcție a HG, în scopul verificării corectitudinii lucrărilor de reparație.

În urma mai multor cercetări efectuate în acest sens, s-a ajuns la concluzia că starea tehnică a unui hidrogenerator se poate aprecia având în vedere următoarele:

#### A. Stabilitatea întrefierului generatorului în timpul funcționării HG

Deoarece acest aspect este tratat în detaliu în cadrul capitolului 5, în continuare se prezintă doar câteva noțiuni generale asupra stabilității întrefierului în timpul funcționării hidrogeneratoarelor.

Hidrogeneratoarele executate la UCMR nu sunt prevăzute cu instalații de măsură a întrefierului, astfel că nu există nici o informație privitoare la starea acestuia în timpul funcționării hidroagregatului. Funcționarea în condiții de siguranță

## 2.1. Aspecte de mentenanță a hidrogenatoarelor 21

a generatorului este condiționată, de o stabilitate corespunzătoare a întrefierului în toate regimurile de funcționare.

Întrucât întrefierul este mediul prin care se transmite întreaga energie mecanică din rotor spre stator sub forma de energie electromagnetică, este foarte important ca densitatea de energie electromagnetică din întrefier să fie constantă, ceea ce presupune un întrefier constant în toate regimurile de funcționare. În condițiile în care întrefierul nu este constant, în special în timpul regimurilor tranzitorii de aruncare sau descărcare de sarcină, acest fapt conduce la variații mari ale densității de energie electromagnetică în interiorul întrefierului care determină apariția unor forțe perturbatoare de valori foarte mari, ce acționează asupra ansamblului rotor-stator [T2], [V2].

De remarcat este faptul că în România nu există preocupări în domeniul monitorizării stabilității întrefierului, cu toate că acest aspect este important în aprecierea stării tehnice a hidrogenatoarelor.

Pe plan mondial, pentru verificarea și monitorizarea stabilității întrefierului se utilizează traductoare de întrefier montate pe pachetele elementare ale statorului, care însă în timpul funcționării se pot desprinde și compromite bobinajul statorului, respectiv cel al rotorului [M2], [T2], [T4].

### **B. Stabilitatea statorului hidrogenatorului**

O stare tehnică corespunzătoare din punct de vedere al stabilității statorului, presupune ca miezul magnetic să fie stabil atât din punct de vedere mecanic și magnetic. Stabilitatea mecanică presupune o rigiditate corespunzătoare fără vibrații ale tolelor, ce formează pachetele elementare. În practică au existat un număr destul de mare de hidrogenatoare care au suferit avarii importante datorită vibrației continue a tolelor, care a condus în final la avarierea izolației bobinelor. De asemenea la multe HG s-a constatat o saturație exagerată a miezului magnetic. În același timp stabilitatea statorului este condiționată și de stabilitatea dinamică a carcasi HG. Această problemă trebuie luată în considerare în special la hidrogenatoarele de putere mare și foarte mare, întrucât înălțimea carcasi este foarte mare.

O stabilitate corespunzătoare din punct de vedere mecanic se poate obține:

- printr-un sistem constructiv adecvat de consolidare a capetelor de bobinaj, care să împiedice eventualele deplasări ale bobinelor în timpul funcționării hidrogenatorului;
- prin rigidizarea carcasi față de pereții fosei la nivelul brațelor stelei superioare, prin intermediul unor buloane reglabile. În cazul celor două HG de 186 MVA din CHE Râul Mare Retezat nivelul de vibrație absolută din lagăre a fost micșorat semnificativ prin consolidarea carcaselor hidrogenatoarelor prin intermediul unor tiranți ce se sprijină pe pereții fosei [\*3], [\*4].

### **C. Stabilitatea dinamică a părților rotitoare ale HG**

Întrucât părțile rotitoare ale HG sunt caracterizate prin mase mari cât și prin viteze de rotații ridicate, rotorul în mișcare va prezenta o energie cinetică mecanică și o energie potențială magnetică foarte mare. Starea tehnică a unui HG este corespunzătoare atunci când nivelul energetic al ansamblului rotorului în mișcare este stabil.

Stabilitatea energetică a rotorului în mișcare este condiționată de stabilitatea cuplului motor al turbinei, dat doar de forțele tangențiale de antrenare. În condițiile în care pe lângă forțele tangențiale utile apar și forțe perturbatoare pe direcție radială, acestea influențează în sens negativ dinamica rotorului și conduc la o instabilitate a axei de rotație, cu consecințe care uneori pot produce avarii majore. O prezentare detaliată a efectelor acestor forțe perturbatoare este prezentată în capitolul 5.

În România problema stabilității dinamice a rotorului nu este întotdeauna luată în considerare, chiar dacă ea este de natură să conducă la o funcționare necorespunzătoare a HG, în unele cazuri chiar la apariția unor avarii majore. S-au constatat mai mulți factori care sunt de natură să introducă perturbații în dinamica rotorului cu consecințe imprevizibile, în special în timpul regimurilor tranzitorii. În acest sens s-a întocmit un program de probe ce se impune atât înainte de intrarea, cât și la terminarea reparațiilor:

- verificare dezechilibrului mecanic remanent în vederea diminuării unor eventuale forțe perturbatoare de natură mecanică;
- echilibrarea dinamică a rotoarelor;
- verificarea online a vibrațiilor relative a rotorului care oferă informații utile privitoare la stabilitatea axei de rotație (diagrama orbită a rotorului prezentată în subcapitolul 5.1.3);
- centrarea magnetică a rotoarelor în vederea eliminării unor eventuale forțe de dezechilibru magnetic (procedură propusă în cadrul lucrării de față și prezentată în subcapitolul 5.1.4 și 5.1.5);

În practică, prin implementarea verificărilor prezentate anterior s-a asigurat o funcționare a hidrogenatoarelor în condiții de siguranță, cu un nivel redus de vibrații în lagăre și temperaturi corespunzătoare la nivelul înfășurării rotorice și rotorice.

#### **D. Performanțe de izolație**

Deoarece cele mai frecvente defecte sunt cele de izolație, starea tehnică a hidrogenatoarelor este condiționată de starea izolației bobinajului statoric. Măsurătorile clasice ce se impun prin normele PRAM (protecții prin relee și aparate de măsură) - rezistența de izolație și tangenta de delta - nu asigură întotdeauna o garanție a siguranței în exploatare a hidrogenatoarelor [Y2], [Y3], [Z3].

Conform literaturii de specialitate cel mai eficient mod de apreciere a calității izolației presupune măsurarea nivelului de descărcări parțiale. În acest sens se recomandă măsurarea nivelului de descărcări parțiale atât înainte de reparație cât și după reparație, obținându-se astfel informații cu privire la calitatea izolației [\*5], [\*6]. De asemenea monitorizarea în timp a nivelului de descărcări parțiale oferă posibilitatea punerii în evidență a unor eventuale modificări ale nivelului de izolație, cu posibilitate unor intervenții preventive [S12], [Z3].

Descărcarea parțială poate fi considerată ca un impuls electric, sau o descărcare electrică într-o alveolă umplută cu un gaz, sau pe suprafața unui sistem izolant solid sau lichid. Aceste impulsuri șuntează parțial golurile din izolația dintre fază și pământ sau dintre faze și pot fi localizate între conductorul de cupru și suprafața izolației, în interiorul izolației însăși, sau între suprafața izolației și masa metalică a echipamentului legată la pământ [Y3], [Z3].

Teoria descărcărilor parțiale implică analiza materialelor, câmpurilor electrice, caracteristicilor arcului electric, propagării și atenuării undelor, sensibilității senzorilor spațiali, răspunsului în frecvență și interpretării datelor în condiții de

semnale perturbatoare (zgomote) puternice. O sinteză a principalelor probleme ce intervin în diagnoza izolației înfășurărilor statorice este prezentată în [R4], [S12].

Toate zgomotele tipice care se suprapun peste semnalele de interes pot fi eliminate cu ușurință prin folosirea a diferite proceduri de filtrare numerică, dintre care cel mai des folosit este filtrul digital pe baza transformării Wavelet [G2], [N1]. Datorită modulului dedicat procesării digitale a semnalelor din biblioteca proprie, mediul LabVIEW este implementat pentru prelucrarea datelor achiziționate în majoritatea sistemelor moderne de monitorizare și diagnoză a calității izolației [N1], [Y3].

Majoritatea sistemelor de monitorizare a nivelului de descărcări parțiale presupun montarea unor senzori de temperatură de tip RTD (senzori rezistivi), senzori inductivi sau cupluri dedicați [S9].

### **E. Precizia instalației de măsură a debitului de apă turbinat**

În procesele tehnologice, măsurarea debitelor de fluide este de cea mai mare importanță, atât pentru alcătuirea bilanșurilor de materiale cât și pentru conducerea propriu-zisă a acestor procese. La efectuarea unei măsurări de debit trebuie aleasă întotdeauna metoda adecvată care să asigure o precizie ridicată de măsurare.

Majoritatea hidrogeneratoarelor din România sunt prevăzute, conform documentației tehnice întocmite de proiectanți, cu instalații Winter-Kennedy pentru verificarea debitului de apă turbinat [H2], [R3]. Această metoda de măsurare indirectă a debitului presupune măsurarea presiunii diferențiale din camera spirală a turbinei și este afectată de anumite erori specifice, care conduc la creșterea costurilor din punct de vedere economic.

În acest scop s-au demarat o serie de cercetări privind soluționarea acestei probleme. Spre exemplu în cadrul amenajării hidroenergetice a râului Strei pe sectorul Subcetate-Simeria, s-au realizat verificări experimentale în scopul măsurării debitului de apă turbinat în CHE Plopi și CHE Subcetate, folosind o instalație specializată tip Channel Master H-ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) care permite măsurarea directă a debitului de apă. În urma măsurătorilor efectuate s-a constatat o diferență între valorilor înregistrate de instalații Winter-Kennedy și H-ADCP și ca urmare s-a procedat la recalibrarea instalațiilor de măsură existente în cele două centrale hidroelectrice [\*7].

## **2.2. Concluzii**

Încercările experimentale efectuate în diverse hidrocentrale din România, de colectivul reunit format din membrii laboratorului de electromecanică al filialei Academiei din Timișoara, membrii CCHAPT a Universității "Eftimie Murgu" Reșița și laboratorului D109 de testare a mașinilor electrice al Facultății de Electrotehnică și Electroenergetică din Universitatea "Politehnica" Timișoara, au permis constituirea unei baze de date prin care să se pună în evidență starea tehnică a HG din România. Astfel s-au elaborat trei etape de verificări complexe în scopul evaluării parametrilor funcționali: înainte de intrarea în reparație a HG, în timpul și după terminarea reparației. Pentru fiecare etapă se impun diferite probe care asigură aprecierea corectă a stării tehnice a hidrogeneratoarelor.

## 3. INSTRUMENTAȚIE VIRTUALĂ - ASPECTE DE BAZĂ

### 3.1. Aspecte generale

Conceptul de instrumentație virtuală a fost introdus de James Trouchard în anul 1976, odată cu înființarea companiei National Instruments (NI). Trouchard a avut ideea de a realiza instrumente pe care utilizatorii să le poată asambla în propriul calculator, folosind o placă de achiziție de date și un mediu de programare [S13], [Y4].

Instrumentele virtuale (VI) pot fi definite ca un ansamblu de componente hardware și software care împreună cu un PC sau o stație de lucru au funcționalități similare cu instrumente tradiționale de sine stătătoare [E3], [J3].

Prin folosirea VI toate funcțiile de prelucrare și analiză a datelor, de stocare a informațiilor și de vizualizare a acestora de către utilizator sunt realizate de un PC și nu de aparatura dedicată, cum este cazul instrumentelor tradiționale. Aplicațiile software înlocuiesc aproximativ 80% din circuitele unui instrument tradițional de testare sau măsurare [L1].

Prin folosirea instrumentației virtuale ca alternativă a unui sistem tradițional, se obțin următoarele avantaje [B8], [C2], [L2]:

- VI-urile ocupă un spațiu fizic relativ mic, fiind stocate în memoria fizică a PC-ului;
- flexibilitate ridicată în reconfigurarea instrumentelor (se pot adăuga și/sau șterge oricând funcții, elemente de comandă, indicatoare, canale de achiziție și generare de semnal, etc.);
- costurile privind achiziția și întreținerea aparaturii se reduc semnificativ, prin folosirea unei singure plăci multifuncționale de achiziție de date, care împreună cu un soft dedicat, poate înlocui o mulțime de instrumente tradiționale;
- accesul direct la biblioteci de instrumente virtuale, special dezvoltate pentru achiziția, prelucrarea și transmiterea datelor, cu ajutorul cărora utilizatorul poate construi un sistem complex de achiziție, monitorizare și control, într-un timp relativ scurt;
- capacitatea de a folosi resursele fizice ale unui PC, cu ajutorul cărora se obține o precizie mare de prelucrare a informației, dar și posibilitatea de a efectua operații complexe într-un timp foarte scurt;
- pentru reprezentarea datelor, VI-ul poate avea același aspect ca și un instrument tradițional, însă interfața cu utilizatorul va fi mai intuitivă și mai ușor de operat, oferindu-se posibilități multiple de analiză, interpretare și vizualizare.

Pentru dezvoltarea instrumentelor virtuale se utilizează atât platforma Windows cât și alte platforme precum Macintosh și sisteme UNIX și VME (Versa Module Europa).

În Fig. 3.1 se observă că instrumentele tradiționale și cele virtuale au în general aceeași arhitectură, singurele diferențe fiind componentele și circuitele specializate din cadrul subsistemului de măsură [J3].



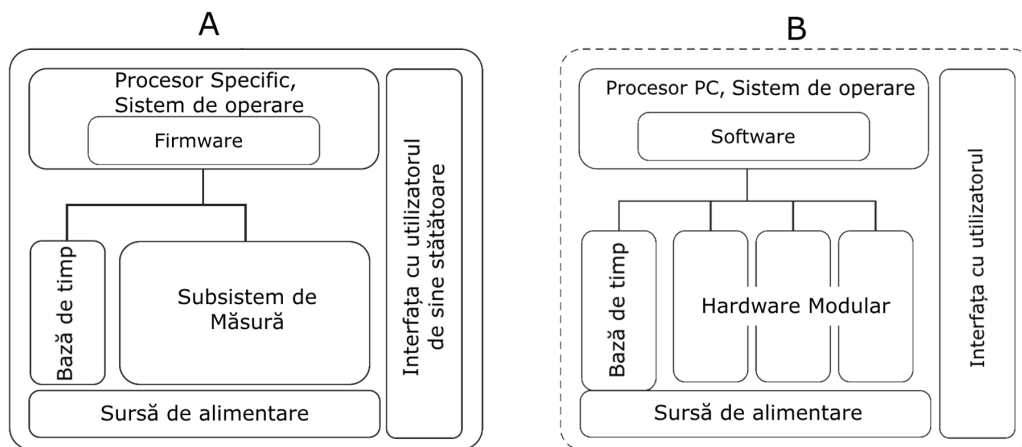


Fig. 3. 1. Prezentarea arhitecturii unui instrument tradițional (detaliul A) și a unui sistem de achiziție dezvoltat folosind instrumente virtuale (detaliul B)

La fel ca și un instrument tradițional, un VI include trei componente principale: achiziția, analiza și reprezentarea datelor.

Pentru achiziția de date un instrument virtual poate folosi atât plăci de achiziție dedicate cât și instrumente tradiționale prin diferite protocoale de comunicare ASCII (American Standard Code for Information Interchange), după cum urmează [B8], [R5], [Z4]:

- GPIB (General Purpose Interface Bus) este cel mai cunoscut protocol bidirecțional de comunicație și control pe 8 biți al instrumentelor și sistemelor de măsurare programabile, care oferă o rată de transfer de 1 MB/s și o posibilitate de interconectare a maximum 14 echipamente la o distanță de 20m.
- RS-232, RS-422, RS-485 sunt protocoale de comunicație serială sincrone sau asincrone care oferă o izolare foarte bună față de zgomotul din mediul industrial, o distanță de interconectare a echipamentelor de 15m pentru RS-232 și 1200 m pentru RS-485, însă prezintă o rată de transfer relativ redusă (sute de KB/secundă).
- VXI (VME eXtensions for Instrumentation) este un standard care a condus la dezvoltarea unor echipamente modulare de dimensiuni și cost redus, prin implementarea instrumentelor de tip "card" care îndeplinesc diverse funcții de achiziție și adaptare de semnale.

Până la începutul anilor '90 instrumentele virtuale erau dezvoltate folosind limbaje „textuale” precum Pascal, C++, BASIC, Fortran, care presupun un nivel ridicat de cunoștințe în programare, dar și un timp destul de mare pentru realizarea acestora [K1].

În ultimii 20 de ani au apărut un număr semnificativ de programe comerciale care oferă un mod facil și intuitiv de dezvoltare a instrumentelor virtuale, prin folosirea mijloacelor de programare grafică [E3]. Utilizatorul plasează pe suprafața de lucru, prin operațiunea de „drag and drop”, pictograme care înglobează diferite funcții, iar apoi realizează conexiunile dintre acestea prin trasarea unor linii de legătură. Prin folosirea mediilor de programare grafică se înlătură necesitatea de a descrie un algoritm de calcul sub forma unor seturi de instrucțiuni de text. Algoritmii sunt reprezentați de scheme logice prin diverse organigrame sau diagrame, astfel programarea devenind mai intuitivă dar și mai ușor de înțeles.

În tabelul 3.1 se prezintă o comparație între limbajele de programare clasice ce presupun implementarea unui cod contextual și cele bazate pe programarea grafică [J3].

Tabelul 3. 1. Elemente comparative ale mediilor de programare clasice și cele bazate pe programarea grafică

LIMBAJE DE PROGRAMARE CLASICE	LIMBAJE DE PROGRAMARE GRAFICĂ
<ul style="list-style-type: none"> <li>respectarea riguroasă a regulilor de sintaxă;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>sintaxa nu are un rol important în dezvoltarea programelor;</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>modul de execuție al programului este de jos în sus;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>modul de execuție al programului este de la stânga la dreapta;</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>pentru a identifica o eroare programul trebuie să fie compilat sau executat.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>erorile sunt indicate în momentul conectării a două elemente componente;</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>pentru a dezvolta panouri frontale este necesară scrierea unui cod complex suplimentar;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>dezvoltarea unui panou frontal face parte din principiul de programare grafică;</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>programarea contextuală nu este interactivă;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>unul dintre beneficiile programării grafice este nivelul înalt de interacțiune oferit;</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>transferarea datelor, prin intermediul variabilelor globale, în cadrul subrutinelor este dificilă.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>definirea și apelarea facilă a variabilelor globale.</li> </ul>

Actualmente cele mai cunoscute medii de programare grafică a instrumentelor virtuale sunt:

- *NI LabVIEW* (Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench)
- *NI LabWindows/CVI* are facilități similare mediului LabVIEW, însă programarea se realizează folosind limbajul C;
- *DASYLab* este compatibil cu majoritatea echipamentelor de achiziție de date NI [B8];
- *GNU Radio* este o alternativă gratuită a mediului LabVIEW pentru dezvoltarea de aplicații în domeniul radio frecvență bazat pe C++ și Python [A3];
- *PyLab\_Works* este o platformă gratuită dezvoltată în Python pentru diferite aplicații de achiziție și prelucrări de date și automatizări [B10];
- *Visogram* este un mediu de programare grafică gratuit, în care interfața cu utilizatorul se realizează folosind o fereastră web [W1];
- *myOpenLab* este program gratuit dezvoltat pe platforma Java care oferă opțiuni de instrumentație analogică și digitală [W2];
- *Crocodile Clips* sunt medii gratuite dezvoltate special pentru învățământ, care au în componență următoarele module: Crocodile Physics, Crocodile Chemistry, Crocodile Technology 3D, Crocodile ITC, Crocodile Mathematics [W3].

Datorită flexibilității și versatilității sale, instrumentația virtuală este folosită atât în mediul academic cât și cel al științei. Prin folosirea instrumentației virtuale se obține un avantaj semnificativ în fiecare stadiu al proceselor ingineresti, de la stadiul de cercetare, până la cel de testare.

### 3.2. Mediul de programare grafică LabVIEW

Un instrument virtual dezvoltat în mediul LabVIEW este format din două componente distincte (ferestre) conectate între ele:

- o diagramă bloc în care se introduce codul propriu-zis ce controlează instrumentul virtual. Programarea unei aplicații în mediul LabVIEW se realizează pe principiul fluxului de date folosind limbajul grafic „G”;
- panoul frontal, care este o interfață interactivă, ce cuprinde reprezentări grafice asemănătoare cu instrumentele tradiționale, care pot fi controale sau indicatoare. Fiecare element din cadrul acestei ferestre are un terminal corespunzător în diagrama bloc.

Fluxul de date în cadrul mediului LabVIEW se realizează prin intermediul unor *“fire”* de legătură între două sau mai multe elemente de execuție din cadrul diagramei bloc numite *“noduri”*. În funcție de funcționalitatea lor se disting patru tipuri de noduri:

- funcții;
- subinstrumente virtuale, care sunt instrumente virtuale create anterior și folosite pentru a evita secvențe repetitive în cadrul diagramei bloc;
- interfața dintre diagrama bloc și codurile scrise în limbajul C;
- structuri care controlează transferul datelor în interiorul VI-ului (bucle while, for, case etc). Un aspect important în cadrul structurilor repetitive, sunt regiștri de transfer care memorează valorile de interes între două sau mai multe iterații succesive.

Pentru a realiza o aplicație pentru achiziția unor semnale analogice, instrumentele virtuale trebuie ordonate într-o anumită secvență logică. Principiul abordat în cazul dezvoltării unui VI pentru achiziția de date folosind mediul LabVIEW este prezentată în Fig. 3.2 [W4]. Acesta se poate realiza folosind trei tipuri de instrumente virtuale din biblioteca proprie, după cum urmează:

- prin folosirea VI-urilor de nivel înalt din cadrul paletelor de funcții „Express”, se oferă instrucțiuni pas cu pas necesare pentru a configura echipamentul de achiziție și a parametrilor necesari lansării achiziției de date;
- instrumentele virtuale de nivel intermediar, care sunt cel mai des folosite pentru dezvoltarea aplicațiilor;
- pentru controlul avansat a echipamentului de achiziție se folosesc VI-uri de nivel avansat care oferă flexibilitate, însă care necesită o bună cunoaștere a echipamentelor folosite.

Achiziția de date în cadrul mediului LabVIEW poate fi mono-punct în care se achiziționează un singur eșantion preluat direct de la placa de achiziție sau multi-punct. O funcție importantă pentru dezvoltarea aplicațiilor de achiziție de date multi-punct în mediul LabVIEW, este posibilitatea de a memora valorile achiziționate într-un buffer circular, din care utilizatorul poate citi la diferite intervale de timp valorile de interes, în cazul achiziției de date multi-punct. Pentru a asigura o flexibilitate sporită în cazul achiziției de date multi-punct se recomandă folosirea instrumentelor virtuale de nivel avansat și a celor de nivel înalt [C2], [K2].

Folosirea corespunzătoare a buffer-ului circular constă în evitarea următoarelor situații:

- intervalul cu care instrumentul virtual dezvoltat citește valorile din buffer, să fie mult mai mic decât intervalul de umplere al acestuia;

- instrumentul virtual nu poate prelua datele achiziționate mai repede decât buffer-ul este suprascris.

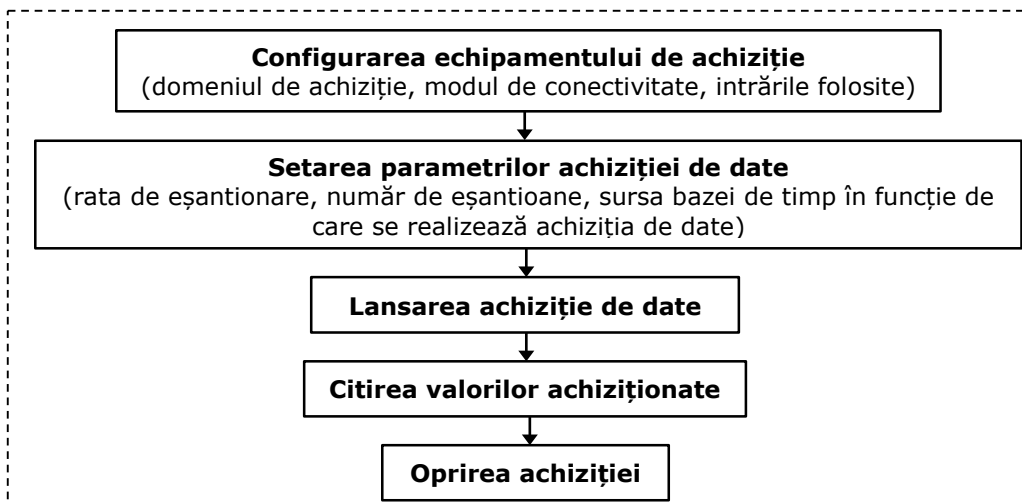


Fig. 3. 2. Principiul abordat în cazul dezvoltării unui VI pentru achiziția de date folosind mediul LabVIEW

În continuare se prezintă succint evoluția mediului LabVIEW de-a lungul anilor conform [T5] și [Y4]. Prima versiune a mediului LabVIEW a fost lansat de firma National Instruments în anul 1986, pe platforma Macintosh (MAC). Chiar dacă în acea perioadă platforma MAC nu era folosită în domeniul instrumentației virtuale, NI a optat pentru aceasta datorită interfeței grafice a sistemului de operare care corespundea cu cerințele mediului LabVIEW.

În anul 1990 odată cu obținerea brevetului pentru tehnologia inovativă de programare grafică a instrumentelor virtuale, a doua versiune a mediului LabVIEW a fost implementată pe platforma Windows și Sun.

Cea de-a treia versiune, lansată în anul 1993, oferea posibilitatea de a crea instrumente virtuale care pot rula pe multiple sisteme de operare (Windows NT, Power Macs, stații de lucru HP), indiferent de platforma pe care au fost dezvoltate.

Odată cu apariția în anul 1996 a celei de-a patra versiune a mediului LabVIEW, NI introduce elemente noi de personalizare a interfeței cu utilizatorul, dedicate pentru diverse aplicații în mediul industrial.

În anul 1999 NI lansează cea de-a cincea versiune a mediului LabVIEW, prin care se aduc îmbunătățiri majore în dezvoltarea instrumentelor virtuale, odată cu introducerea programării dinamice și prin posibilitatea de a integra elemente de tip ActiveX (tehnologie ce permite schimbul de informații între diferite aplicații Windows). De asemenea odată cu versiunea 5.1 LabVIEW oferă posibilitatea de a partaja rezultatele măsurătorilor pe internet prin modulul DataSocket.

O îmbunătățire semnificativă din punct de vedere al performanței și eficienței este introdusă în anul 2001, odată cu lansarea versiunii 6.1 a mediului LabVIEW și a modulului LabVIEW Real Time (RT).

Un alt eveniment important în evoluția mediului LabVIEW este lansarea celei de-a 7 versiuni în anul 2003, prin care se implementează tehnologia FPGA (*Field Programmable Gate Array*). Aceasta permite încărcarea în hardware-ul reconfigurabil a algoritmilor dezvoltați și apoi rularea aplicațiilor direct din circuitul

FPGA, obținându-se astfel o performanță înaltă atât din punct de vedere al vitezei de execuție dar și al calității sincronizării dintre diferite operații.

LabVIEW 2014 oferă capacități extinse de achiziție, analiză și vizualizare a datelor prin integrarea unor noi posibilități specifice pentru testarea automată, monitorizare, control, sisteme hardware-in-the-loop și aplicații Real-Time. De asemenea această versiune include 13 funcționalități recomandate pentru optimizarea producției, noi algoritmi pentru o implementare mai complexă a funcțiilor de analiză a semnalelor precum și funcții de inspecție vizuală pentru circuitele FPGA. Prin uniformizarea modului de programare pe diverse platforme hardware, LabVIEW 2014 standardizează modul în care utilizatorii dezvoltă aplicații.

Ultima versiune LabVIEW 2015 aduce optimizări ale compilatorului folosit pentru a executa codul scris în diagrama bloc dar și a modulului „*LabVIEW Application Builder*”, cu scopul a de minimiza timpul alocat pentru a dezvolta și genera o aplicație software de tip executabil.

### 3.3. Avantajele mediului LabVIEW

Față de alte medii de dezvoltare a instrumentelor virtuale, mediul de programare grafică LabVIEW, prezintă următoarele avantaje:

- cunoștințe minime de programare pentru a dezvolta aplicații. Mediul LabVIEW pune la dispoziție funcții „Express”, cu ajutorul cărora utilizatorii pot realiza instrumente virtuale, prin parcurgerea unor simpli pași;
- interfața grafică cu utilizatorul este intuitivă și permite înțelegerea rapidă a limbajului de programare;
- permite încorporarea a diferiți algoritmi dezvoltați în alte medii precum MATLAB, C++, C#, HDL [C3], [K2];
- proceduri avansate de depanare, care permit detectarea eficientă a erorilor dar și posibilități de optimizare a aplicațiilor prin folosirea modulului „*VI Analyzer*”, care oferă diferite teste cu ajutorul cărora se evidențiază secvențele din program care scad performanța și eficiența aplicației dezvoltate [C4];
- prin folosirea modulului „*LabVIEW Application Builder*” se pot construi aplicații de sine stătătoare ce pot fi distribuite pe orice PC;
- facilități de autoconfigurare și de recunoaștere automată a echipamentelor produse atât de NI, cât și de alți parteneri și furnizori. Actualmente, LabVIEW oferă o bibliotecă de peste 700 de drivere pentru componente, de la peste 100 de furnizori. Astfel este posibilă interfațarea cu orice instrument virtual sau echipament tradițional de achiziție de date [Y5];
- modularitate atât din punct de vedere software, prin folosirea subinstrumentelor virtuale (subVI), dar și hardware prin multitudinea de echipamente interschimbabile și diferite platforme de dezvoltare oferite de National Instruments [F1];
- datorită modului simplu și intuitiv de programare se reduce semnificativ, timpul necesar dezvoltării unei aplicații. Prin implementarea mediului LabVIEW în domeniul testării automate, se poate ajunge la o reducere de 50 % a timpului de încercare [K3];

În ultimii 10 ani LabVIEW a devenit cel mai complex și performant mediu de programare grafică în domeniul măsurătorilor, fiind util în domenii în care precizia și sincronizarea canalelor de achiziție la nivel de milisecundă joacă un rol foarte important, cum ar fi:

- medicina biomedicală - elaborarea sistemelor de diagnosticare a bolilor cardiace [K4]; monitorizarea și detecția nivelului de radiație [Q1].
- ingineria aerospațială - controlul cu precizie a vehiculelor pentru explorarea planetei Marte (Mars rover) [Z5]; achiziția simultană și interpretarea imaginilor captate de telescopul James Webb Space [W5];
- industria automotive - dezvoltarea unor sisteme de achiziție de date dedicate testării automobilelor, în scopul evaluării gradului de siguranță [L3];
- fizica cuantică - în cadrul acceleratorului de particule de la CERN, fiecare colimator este controlat prin intermediul modulelor LabVIEW FPGA din cadrul a 200 de sisteme de achiziție PXI National Instruments [M3].

Mediul LabVIEW este implementat în mediul academic ca un instrument prin care studenții pot simula și apoi studia anumite fenomene fizice. Din sondajului realizat în [U1] se observă o creștere de 89% a motivației și a interesului studenților pentru folosirea instrumentelor virtuale împreună cu mediul LabVIEW, față de alte medii precum C, Visual Basic sau Java. Prin introducerea în educație a mediului LabVIEW studenții pot simula diverse procese industriale ceea ce oferă un spor de cunoștințe și o bună pregătire pentru o viitoare profesie [A4]. În literatura de specialitate există un număr destul de mare de lucrări care prezintă diferite configurații hardware și pachete de programe destinate uzului studenților, precum procesare digitală de semnale [C5], [R6], comunicații de tip industrial [R5], analiza calității energiei electrice [P3], [S14], [V4] testarea mașinilor electrice [C6], [E2], [K5], [M4], [M5], electronica digitală [A5], telecomunicații [P4].

Conform sondajului realizat de US Platform Awareness Survey [W6], prezentat în Fig. 3.3, pentru dezvoltarea aplicațiilor de achiziție și prelucrare de date, mediul NI LabVIEW este cel mai des folosit, obținând un procent de 46%, urmat de Microsoft Visual Basic cu 20%, C++ cu 18% și MATLAB cu 14%.

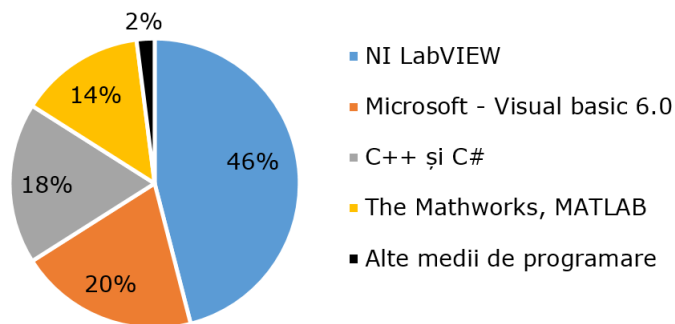


Fig. 3. 3. Cele mai des folosite medii de programare pentru dezvoltarea aplicațiilor de achiziție de date conform sondajului realizat de US Platform Awareness Survey

În problematica abordată în cadrul acestei lucrări mediul LabVIEW este implementat atât pentru achiziția și prelucrarea datelor cât și pentru simularea unor regimuri de funcționare, în scopul obținerii a noi modele matematice pe baza cărora se pot îmbunătăți metodele și procedurile de testare a generatoarelor sincrone [A6], [W7]. De asemenea LabVIEW este folosit în cadrul unor sisteme de complexe de automatizare și control a mașinilor electrice pentru a obține o flexibilitate și precizie mărită la monitorizarea în timp real a parametrilor și mărimilor de interes, sub o formă cât mai eficientă [M6], [W8], [W9].

## **4. SISTEM DE ACHIZIȚIE DE DATE DEDICAT TESTĂRII MAȘINILOR ELECTRICE DE PUTERE MARE**

Răspândirea calculatoarelor în toate domeniile de activitate a condus la schimbări fundamentale în achiziția, analiza și prelucrarea datelor. Prin utilizarea unui PC într-un proces de măsurare, instrumentul tradițional (de sine stătător) este înlocuit de o placă de achiziție de date, care conectată la calculator prin intermediul a diverse protocoale de comunicație, permite vizualizarea rezultatelor sub formă grafică sau numerică în funcție de preferințele utilizatorului, dar și salvarea rezultatelor pentru o prelucrare sau interpretare ulterioară.

Complexitatea și performanța sistemelor de achiziție și prelucrare de date a crescut semnificativ odată cu apariția instrumentației virtuale și a calculatoarelor personale care oferă putere mare de calcul, flexibilitate, spațiu de stocare și posibilități multiple de interfațare cu utilizatorul, la un preț accesibil. Actualmente sistemele de achiziție și prelucrare computerizată de date, sunt folosite atât pentru măsurarea unor mărimi fizice, cât și în componența unor sisteme de automatizare, monitorizare și control a proceselor industriale. Acest lucru a condus la perfecționarea mijloacelor de măsurare precum și la deschiderea unor noi perspective de dezvoltare în domeniul științei și tehnicii.

Folosind mediul National Instruments LabVIEW, în cadrul tezei s-a dezvoltat un sistem de achiziție și prelucrarea automată a datelor, dedicat testării mașinilor electrice de putere mare (*SAPDM*). Acesta poate fi utilizat atât în mediul academic pentru cercetare dar și în mediul industrial. O primă descriere a acestui sistemul a fost prezentată în cadrul Zilelor Academice Timișene Ediția A XII-A [P6].

Un prim pas în dezvoltarea *SAPDM* a fost documentarea asupra noțiunilor teoretice și practice necesare pentru realizarea unui astfel de sistem de achiziție și prelucrare a datelor (*SAPD*). Astfel în subcapitolul 4.1 se prezintă o sinteză a principalelor elemente și noțiuni teoretice studiate pentru dezvoltarea *SAPDM*. Funcționarea optimă a acestuia presupune corelarea corectă și eficientă a elementelor componente atât hardware cât și software.

### **4.1. Sisteme de achiziție și prelucrare a datelor experimentale**

Conceptul unui *SAPD* constă în achiziționarea, prelucrarea și interpretarea automată a informațiilor ce descriu un fenomen fizic dintr-un proces de măsurare. Așadar, un sistem de achiziție și prelucrare a datelor trebuie să îndeplinească 3 funcții fundamentale:

- convertirea fenomenului fizic într-un semnal electric (tensiune sau curent), care descrie evoluția în timp a fenomenului.
- prelucrarea semnalelor furnizate de transductoare sau senzori după un algoritm dat;
- analizarea rezultatelor și afișarea lor într-o formă cât mai sugestivă.

Semnalele electrice sunt cel mai simplu mod de reprezentare a unei mărimi fizice, deoarece sunt ușor de măsurat și interpretat. Așa cum se poate observa în Fig. 4.1, în funcție de variația lor în timp, semnalele electrice pot fi deterministe sau aleatoare [L4].

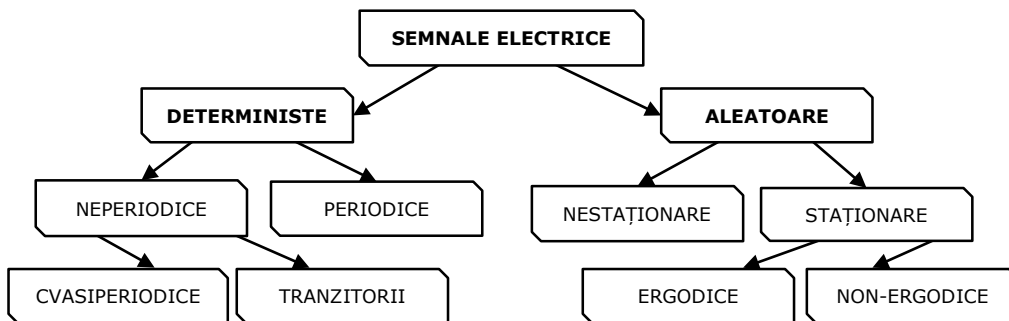


Fig. 4. 1. Clasificarea semnalelor electrice în funcție de variația în timp a acestora

Semnalele deterministe pot fi exprimate printr-o funcție matematică explicită cu un număr finit de parametri. La rândul lor acestea pot fi periodice și neperiodice. Semnalele periodice sunt acele semnale deterministe care au aceeași reprezentare în orice interval de timp  $T$  numit și perioadă. Dacă variațiile unui semnal periodic sunt de un singur semn atunci acesta se numește pulsatoriu iar dacă pe parcursul unei perioade acesta își schimbă semnul se numește alternativ. În cazul în care  $T$  tinde spre infinit atunci semnalul determinist este numit neperiodic. Semnalele neperiodice pot fi cvasiperiodice sau tranzitorii. Deși este compus dintr-o serie de funcții armonice, semnalul cvasiperiodic nu este periodic deoarece raportul dintre 2 componente spectrale ale acestuia nu reprezintă un număr rațional. Dacă un semnal nu îndeplinește condițiile de periodicitate și cvasiperiodicitate, este considerat ca fiind tranzitoriu.

Semnalele aleatoare pot fi clasificate în semnale nestaționare și staționare. Dacă proprietățile statistice ale unui semnal depind de timp, acesta se numește nestaționar. În contrast, dacă un semnal nu este afectat de un increment constant în timp, se numește semnal staționar. Un semnal este ergodic dacă mediile statistice și temporale ale acestuia sunt egale.

Semnalele electrice fac parte din categoria semnalelor analogice și sunt semnale continue în timp. În Fig. 4.2 sunt prezentate cele mai frecvent folosite tipuri de semnale analogice [E3], [K6], [P7]:

- semnal de tip treaptă -  $\gamma(t)$ ;
- semnal impuls -  $\delta(t)$ ;
- semnal rampă -  $x(t)$ ;
- semnal sinusoidal -  $s(t)$ ;
- sinus cardinal -  $\text{sinc}(x)$ .

În Fig. 4.2 se folosește notația  $k$  pentru amplitudinea semnalelor,  $t$  variabila timp iar pentru semnalul sinusoidal, în funcție de frecvența  $f$  se definește pulsația  $\omega$ :

$$\omega = 2\pi f \quad (4.1)$$



#### 4.1. Sisteme de achiziție și prelucrare a datelor experimentale 33

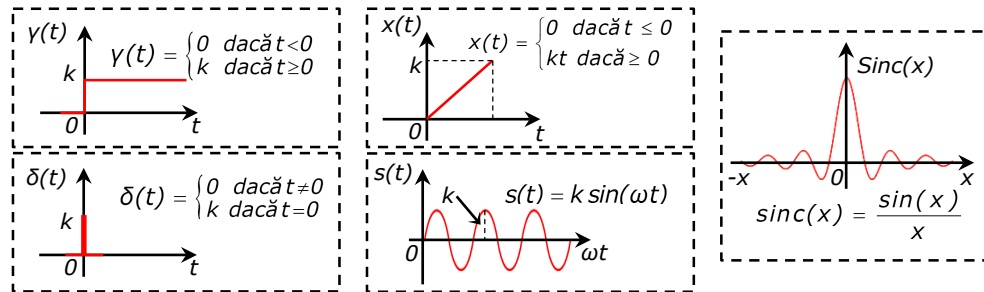


Fig. 4. 2. Principalele tipuri de semnale analogice folosite în domeniul tehnic

În continuare se consideră un semnal analogic  $a(t)$  având perioada  $T$  și forma de undă reprezentată în Fig. 4.3.

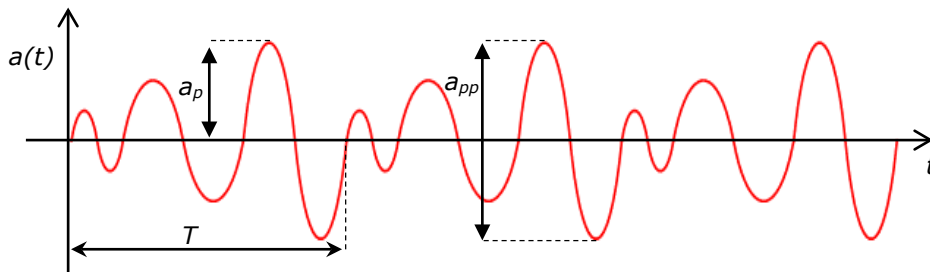


Fig. 4. 3. Forma de undă a semnalului analogic periodic  $a(t)$  considerat

Evaluarea acestui semnal se poate face prin următoarele mărimi [H5], [I1], [O1]:

- valoarea maximă  $a_p$ ;
- valoarea vârf la vârf  $a_{pp}$ ;
- valoarea medie  $\bar{a}$ :

$$\bar{a} = \frac{1}{nT} \int_0^{nT} a(t) dt \quad (4.2)$$

- valoarea efectivă (RMS)  $A$ :

$$A = \sqrt{\frac{1}{nT} \int_0^{nT} [a(t)]^2 dt} \quad (4.3)$$

- factorul de vârf  $k_v$ :

$$k_v = \frac{a_p}{A} \geq 1 \quad (4.4)$$

- factorul de formă  $k_f$ :

$$k_f = \frac{A}{|\bar{a}|} \geq 1 \quad (4.5)$$

#### 4.1.1. Structura hardware a sistemelor de achiziție

În general un sistem de achiziție date este format din următoarele componente (Fig. 4.4) [B11], [B12], [P5], [P6]:

- traductoare și/sau senzori;
- modulul adaptor de proces (MAP);
- modulul achiziție de date (MAD);
- interfață de comunicare;
- un calculator care conține un software de achiziție, prelucrare, stocare și vizualizare a datelor.

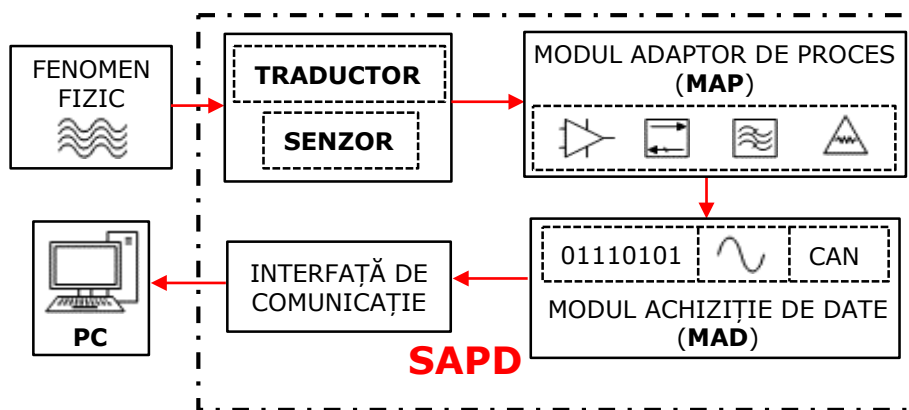


Fig. 4. 4. Schema bloc a unui sistem de achiziție și prelucrare de date computerizat

În cadrul SAPD, traductoarele sunt elementele ce sesizează modificările fizice ce definesc procesul analizat și transmit semnale electrice (analogice sau digitale), proporționale cu aceste variații, către MAP care adaptează semnalele conform domeniului de intrare a MAD. Există cazuri în care traductoarele și senzorii sunt încorporați în MAP, însă se recomandă folosirea externă a acestora pentru semnale electrice cu domenii mai mari de 50 A sau 1000 V, pentru a evita eventuale defecțiuni ale SAPD.

Adaptarea semnalelor analogice constă în operații precum modificarea componentei continue, filtrare, amplificare, atenuare, limitare, astfel încât semnalul analizat să corespundă cu domeniul semnalului de intrare al convertorului analog numeric (CAN) din MAD. Se necesită o atenție sporită în alegerea circuitelor de condiționare a semnalelor pentru ca acestea să nu perturbe semnalul analizat. Astfel, pentru alegerea modulului adaptor de proces trebuie avute în vedere următoarele cerințe [C7], [P8], [S13]:

- flexibilitate;
- modularitate;
- sensibilitate mică;
- zgomot redus;
- robustețe;

#### 4.1. Sisteme de achiziție și prelucrare a datelor experimentale 35

- raport cost/performanță.

Pentru a elimina semnalele parazite care pot distorsiona forma de undă a semnalului analizat se recomandă folosirea filtrelor în cadrul MAP. Acestea poartă numele de filtre analogice și pot fi de două tipuri [L4], [P7]:

- pasive – compuse din componente discrete pasive precum condensatoare, rezistoare, bobine. Prin folosirea condensatoarelor se elimină componentele de frecvență joasă a semnalului achiziționat iar prin folosirea bobinelor se blochează componenta de frecvență înaltă. Acestea sunt sisteme liniare în care valorile componentelor pasive sunt determinate de factorul de calitate și frecvența filtrată.
- active – ce au în componență atât componente pasive cât și amplificatoare operaționale și alte elemente semiconductoare. Acestea oferă o filtrare mai precisă în comparație cu cele pasive, însă necesită o sursă externă de alimentare și sunt limitate datorită bandei de frecvență a amplificatoarelor.

Cele mai des folosite și cunoscute filtre analogice sunt: Butterworth, Cebîșev și Bessel. Fiecare prezintă caracteristici unice și pot fi folosite în diverse moduri (filtru trece-jos, trece-sus, trece bandă, stop bandă) în funcție de cerințele impuse de mediul de lucru în care se va folosi sistemul de achiziție de date.

Filtru Butterworth are răspunsul în frecvență neted, fără ripluri în banda de trecere și descrescător spre 0 pentru banda de oprire. Acesta este cel mai des folosit filtru deoarece oferă un compromis bun între fază, amplitudine și întârziere. Un exemplu de filtru pasiv Butterworth cu frecvența de tăiere de 0,159 Hz (pulsatia de tăiere 1 rad/sec), împreună cu caracteristica Bode a acestuia, este prezentat în Fig. 4.5 [W10].

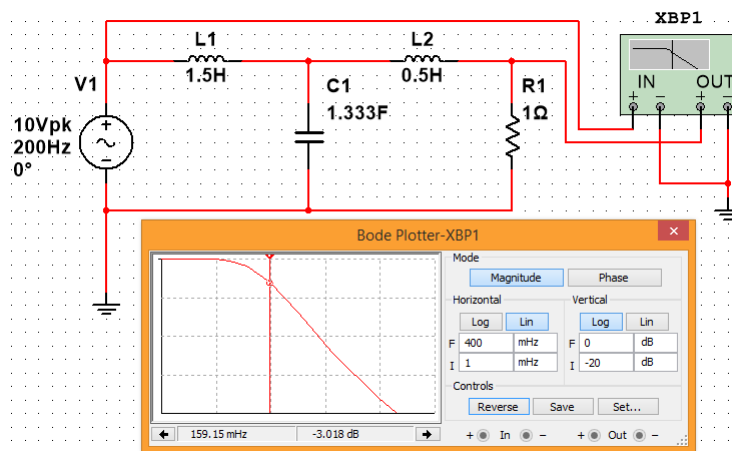


Fig. 4. 5. Exemplu de filtru Butterworth și caracteristica de frecvență a acestuia realizat în NI Multisim

Filtru Cebîșev este cel mai des folosit pentru a atenua spectrul de frecvențe nedorite în afara benzii de trecere. Chiar dacă acesta este o îmbunătățire a filtrului Butterworth din punct de vedere al pantei, răspunsul de fază este mai slab iar în banda de trecere sunt prezente oscilații (ripluri) egale în mărime și dependente de ordinul filtrului. În Fig. 4.6 este prezentat un exemplu de astfel de filtru pasiv, împreună cu caracteristica de frecvență a acestuia [W10].

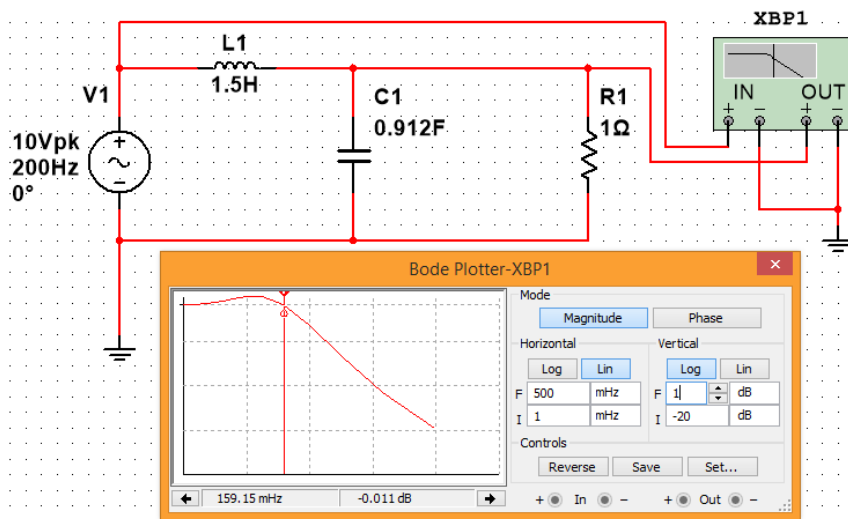


Fig. 4. 6. Exemplu de filtru Cebîșev și răspunsul în frecvență al acestuia realizat în NI Multisim

Filtrele Bessel oferă un răspuns plat în banda de trecere și sunt proiectate pentru a întârzia banda de trecere și păstra forma de undă a semnalului analizat.

Deoarece majoritatea plăcilor de achiziție au un domeniu de intrare de  $\pm 5V$  sau  $\pm 10 V$ , pentru achiziționa semnale analogice cu un domeniu mai mare, amplitudinea acestora trebuie atenuată folosind transformatoare, divizoare rezistive sau traductoare de tensiune [J2], [K2], [V3].

Unele semnale analogice pot avea diferențe mari de potențial față de pământ, de aceea se recomandă separarea galvanică față de bornele sursei de semnal analizat dar și față de sursa de alimentare a SAPD. Izolarea se poate realiza prin intermediul transformatoarelor de măsură, amplificatoarelor de izolare, optocuploare dar și a traductoarelor cu separare galvanică, precum cele de tip LEM [E3], [P8], [W11]. Astfel se rezolvă problemele cauzate de legarea la nul, împământare dar și probleme de conectare a circuitelor de putere. În plus se oferă o protecție suplimentară împotriva unei defectări în lanț a componentelor SAPD dar și protejarea utilizatorilor [E4].

Cea mai importantă și complexă componentă a unui SAPD este MAD. Din punct de vedere constructiv acesta poate fi format din una sau mai multe plăci de achiziție. În general plăcile de achiziție de date pot îndeplini mai multe funcții: achiziția/generarea de semnale analogice, comunicații digitale, numărătoare/cronometrare.

Plăcile de achiziție cu ieșiri analogice sunt folosite pentru generarea unor semnale de comandă din cadrul unui proces tehnologic. Funcția de comunicație digitală a plăcilor de achiziție este de asemenea folosită pentru controlul unor procese dar și pentru diferite conexiuni de comunicare între componente periferice și plăcile de achiziție. Performanța acestora este definită de numărul de linii digitale disponibile și de intensitatea cu care aceste linii pot transmite semnale [E3], [S13], [W11].

Funcția de numărare și cronometrare este folosită pentru punerea în evidență sau generarea unor evenimente digitale. Rezoluția plăcii de achiziție în acest caz reprezintă numărul maxim de evenimente care pot fi numărate sau generate [E3], [S13], [W11].

Performanța MAD este dependentă de rata maximă de achiziție/generare, domeniul de achiziție/generare și rezoluția convertorului analog-numeric. Astfel în

cazul plăcilor de achiziție cu intrări analogice se au în vedere următorii parametri [A7], [W12], [W4], [Y1]:

- domeniul de măsurare – reprezintă diferența dintre valoarea maximă și minimă a tensiunii măsurate pe care CAN poate să o cuantifice.
- numărul de canale – diferă în funcție de configurația de conectare a semnalului analizat (uni-polară sau diferențială). Configurația uni-polară este folosită pentru tensiuni electrice mai mari de 1V, măsurate în raport cu un potențial comun. Acest tip de conectare este cel mai des folosit în cazul în care distanța dintre proces și placa de achiziție este mai mică de 3m. În cazul configurației diferențiale tensiunea electrică este măsurată în raport cu potențialul de referință propriu. Această conexiune se folosește pentru a reduce influența perturbațiilor electromagnetice din mediul exterior asupra cablurilor de legătură. De asemenea se recomandă folosirea cablurilor ecranate între intrările plăcilor de achiziție și sursa care generează semnalul măsurat. Informații asupra modului de conectare și tipurilor de cabluri recomandate în funcție de spațiu de lucru și procesul tehnologic urmărit sunt prezentate în detaliu în standardul IEEE 1100-2005 [ST1].
- rata de eșantionare – reprezintă numărul maxim de conversii analog-digitale efectuate într-o secundă de CAN.
- rezoluția – reprezintă numărul de biți folosiți de convertorul analog-numeric pentru a reprezenta valoarea măsurată.

Dacă se consideră un CAN pe 12-biți cu un domeniu de  $10 V_{cc}$ , acesta poate sesiza o variație minimă a tensiunii intrare de  $10 V_{cc}/2^{12}=2,44$  mV. De aceea pentru o utilizare cât mai eficientă a unei plăci de achiziție cu intrări analogice se recomandă folosirea unui domeniu de intrare cât mai apropiat cu nivelul semnalului măsurat, astfel încât rezoluția convertorului să conducă la o precizie ridicată a SAPD.

#### 4.1.2. Prelucrarea numerică a semnalelor

După ce semnalele măsurate sunt adaptate pentru a corespunde domeniului de intrare a convertorului analog-numeric prin intermediul blocului MAP, sunt convertite în cod numeric pentru a putea fi interpretate de microprocesorul PC-ului gazdă. După ce semnalele au fost prelucrate numeric, acestea pot fi reprezentate într-o formă cât mai utilă pentru utilizator, dar și salvate pentru prelucrări ulterioare. În continuare se prezintă câteva noțiuni esențiale în prelucrare numerică a semnalelor conform [A7], [E4], [L4], [V5].

Pentru conversia unui semnal analogic în formă numerică, acesta trebuie mai întâi să fie discretizat în timp (eșantionat) și apoi în amplitudine (cuantizat).

Eșantionarea unui semnal presupune prelevarea valorilor la momente discrete echidistante în timp. Dacă considerăm un semnal analogic aperiodic  $a(t)$ , cu pasul de eșantionare constant  $T_s$ , la momente discrete de timp  $kT_s$ , acesta va avea forma:

$$a(k)=\{a(kT_s)\}, k \in \mathbb{Z} \quad (4.6)$$

unde  $T_s = \frac{1}{f_s}$ .

Frecvența de eșantionare  $f_s$ , denumită și rata de eșantionare, este precizată în specificațiile tehnice ale plăcilor de achiziție și diferă în funcție de numărul de canale folosite dar și de tipul CAN.

În Fig. 4.7 este prezentat modul de eșantionare a semnalului analogic aperiodic  $a(t)$ .

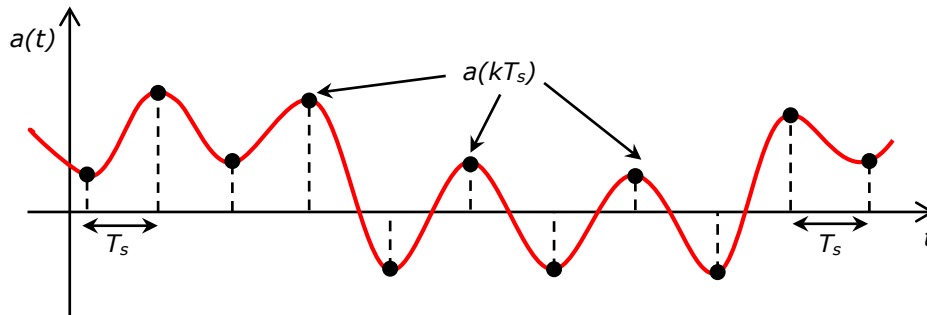


Fig. 4. 7. Modul de eșantionare al unui semnal analogic

Semnalul inițial  $a(t)$  se poate reconstitui pe baza eșantioanelor sale  $a(kT_s)$ , doar dacă frecvența de eșantionare  $f_s$  este mai mare sau egală cu dublul celei mai mari frecvențe  $f_{max}$  din spectrul acestuia.

$$f_s \geq 2f_{max} \quad (4.7)$$

Relația (4.7) este cunoscută sub numele de teorema eșantionării și a fost enunțată de Nyquist–Shannon–Kotelnikov. Nerespectarea acestei teoreme conduce la erori de aliere, prin care în spectrul semnalului reconstituit apar componente suplimentare, datorită suprapunerii semnalelor eșantionate. În Fig. 4.8 este prezentat un exemplu de semnal analogic eșantionat cu o frecvență care nu respectă teorema Nyquist, astfel semnalul reconstituit este diferit de cel real.

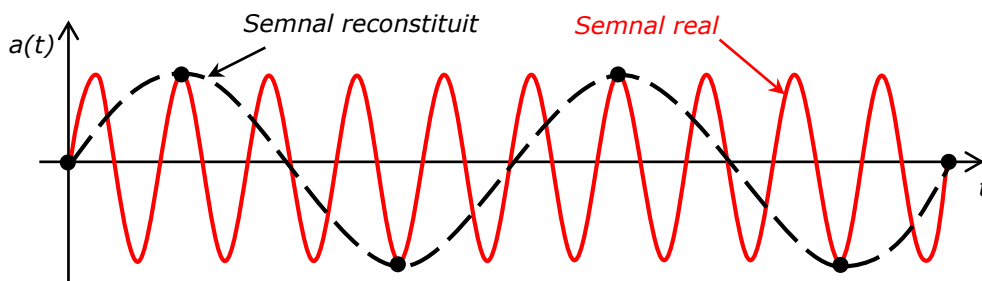


Fig. 4. 8. Fenomenul de aliere în cazul unei eșantionări necorespunzătoare

Reconstituirea semnalelor aperiodice care au funcții de bandă limitate și număr suficient de eșantioane, încât să fie evitat fenomenul de aliere, se poate realiza folosind relația:

$$a(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} a(kT_s) \frac{\sin 2\pi f_{max}(t - kT_s)}{2\pi f_{max}(t - kT_s)} \quad (4.8)$$

Pentru eșantionarea și reconstituirea semnalelor periodice se ține cont de faptul că spectrul acestora este discret, fiind format dintr-o componentă fundamentală și o serie de componente armonice. Dacă notăm cu  $n$  ordinul celei mai mari

#### 4.1. Sisteme de achiziție și prelucrare a datelor experimentale 39

componente armonice din spectrul discret, teorema eșantionării impune achiziționarea a cel puțin  $2n+1$  eșantioane într-o perioadă, pentru a evita fenomenul de aliere.

În domeniul timp reconstituirea unui semnal periodic sau aperiodic  $a(t)$  se realizează prin procesul de interpolare. Cele mai simple metode de interpolare au la bază dezvoltarea în serie Taylor a semnalului  $a(t)$ :

$$a(t) = a(kT_s) + \frac{1}{1!} a'(kT_s)(t - kT_s) + \frac{1}{2!} a''(kT_s)(t - kT_s)^2 + \dots \quad (4.9)$$

unde  $a(kT_s)$ ,  $a'(kT_s)$ ,  $a''(kT_s)$ , sunt valorile semnalului  $a(t)$ , respectiv derivatele de ordinul 1 și 2 în punctul  $kT_s$ .

Dacă din relația (4.9) se reține doar primul termen, rezultă interpolarea de ordinul 0, denumită și interpolare cu reținere:

$$a(t) = a(kT_s), \text{ pentru } kT_s < t < (k+1)T_s \quad (4.10)$$

Reconstituirea unui semnal analogic  $a(t)$  prin interpolare de ordinul 0 este prezentat în Fig. 4.9 Valoarea fiecărui eșantion este memorată până la următorul eșantion, semnalul reconstituit fiind format din trepte.

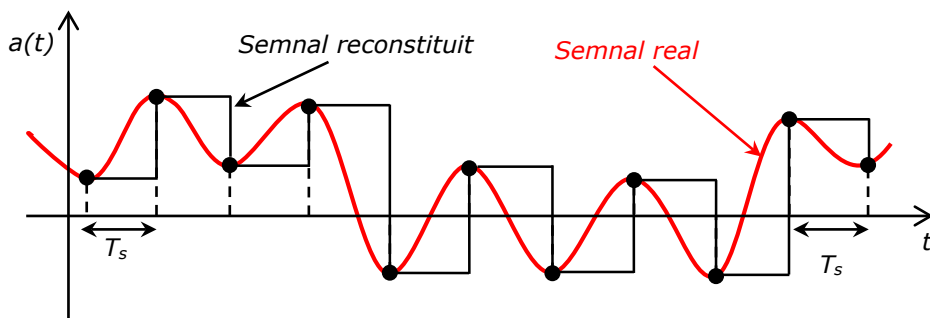


Fig. 4. 9. Reconstituirea unui semnal prin interpolarea de ordinul 0

Interpolarea de ordinul 1 rezultă prin reținerea a primilor doi termeni din relația (4.9):

$$a(t) = a(kT_s) + \frac{1}{1!} a'(kT_s)(t - kT_s) \quad (4.11)$$

Valoarea primei derivate se aproximează folosind eșantionul curent  $a(kT_s)$  și eșantionul următor  $a((k+1)T_s)$ . Rezultă astfel relația:

$$a'(kT_s) = \frac{a((k+1)T_s) - a(kT_s)}{T_s} \quad (4.12)$$

Deoarece prima derivată este exprimată în funcție de eșantionul curent și cel următor, reconstrucția semnalului în acest caz are o întârziere egală cu durata  $T_s$ . De aceea în cazul interpolării de gradul 1 se recomandă exprimarea primei derivate în funcție de eșantionul curent și cel următor, pentru a evita această întârziere.

În Fig. 4.10 este exemplificată reconstituirea semnalului  $a(t)$  prin interpolare de ordinul 2.

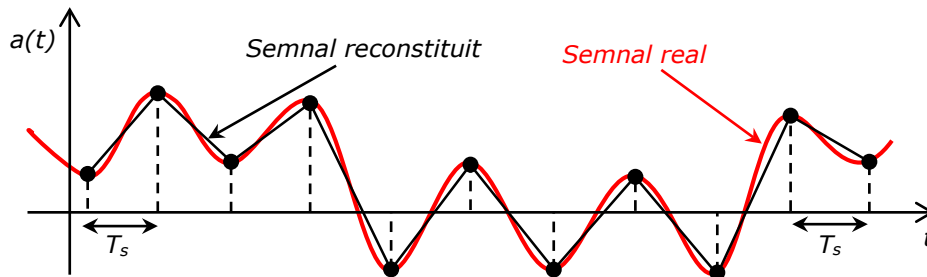


Fig. 4. 10. Reconstituirea unui semnal prin interpolarea de ordinul 1

În general pentru a obține o reconstituire cât mai corectă a semnalului se folosesc interpolări de ordin superior, precum interpolare Lagrange sau interpolare spline.

Chiar dacă în cadrul instrumentelor virtuale și a osciloscopelor numerice se folosesc tehnici speciale de interpolare pentru o reconstituire cât mai exactă a semnalelor, este necesar ca frecvența de eșantionare să fie mai mare decât frecvența Nyquist. De aceea în literatura de specialitate se propune o frecvența de 10 ori mai mare decât frecvența maximă din spectrul semnalului achiziționat. Astfel se pot obține erori de sub 5% chiar și în cazul unei interpolări liniare.

Cuantizarea unui semnal analogic presupune discretizarea amplitudinii acestuia prin reprezentarea într-un domeniu finit de valori discrete. Acest domeniu este împărțit în intervale echidistante denumite și clase. Valoarea mărimii semnalului  $a(t)$ , eșantionat la momentul  $kT_s$  se va încadra în limitele unei clase, conform relației:

$$iq - \frac{q}{2} < a \leq iq + \frac{q}{2}, \quad i = 0; \pm 1; \pm 2; \pm 3... \quad (4.13)$$

unde  $a$  reprezintă valoarea semnalului  $a(t)$ , iar  $q$  este mărimea cuantei care caracterizează clasa  $i$ .

Deoarece prin cuantizare valoarea semnalului eșantionat se înlocuiește cu cel mai apropiat centru al clasei de apartenență, apare o abatere de la valoarea reală a semnalului, numită eroare sau zgomot de cuantizare. Valoarea efectivă  $V_{qn}$  a zgomotului de cuantizare se definește prin relația:

$$V_{qn} = \sqrt{\frac{1}{q} \int_{-q/2}^{q/2} (V_{qn})^2 dV_{qn}} = \frac{q}{\sqrt{12}} \quad (4.14)$$

Raportul semnal zgomot  $SNR_{dB}$  al unui cuantizor pe  $N$  biți se determină folosind relația:

$$SNR_{dB} = 20 \lg(2^N \sqrt{12}) \cong 6N + 9,8 \text{ dB} \quad (4.15)$$



### 4.1.3. Reprezentarea numerelor în format digital

Un semnal analogic eșantionat poate fi reprezentat sub formă binară în virgulă fixă și virgulă mobilă. În continuare se prezintă cele mai cunoscute moduri de reprezentare a numerelor în format digital conform [A7], [F2], [Z6].

În cazul sistemelor de calcul este preferată reprezentarea numerelor în forma binară față de cea zecimală, chiar dacă sistemul zecimal este mai ușor înțeles având în componență doar 10 simboluri. Valoarea unui număr  $D$  reprezentat în forma zecimală este dată în relația:

$$D = \sum_{k=1}^n d_k \cdot 10^{n-k} \quad (4.16)$$

unde  $d_k$  este un simbol din cele 10 posibile ( $k=1, \dots, n$ ).

Sistemul binar este preferat deoarece este definit de mai puține reguli aritmetice și este mai ușor de implementat fizic.

Valoarea aceluiași număr  $D$  reprezentat sub forma binară este format din secvența de variabile binare  $b[k]=b_1, b_2, b_3, \dots, b_N$ , în care bitul scris în dreapta are ponderea cea mai mică (*LSB*) iar cel din stânga (*MSB*) cea mai mare. Pentru reprezentarea semnalelor cu o singură polaritate se folosesc coduri binare unipolare iar pentru ambele polarități se folosesc cele bipolare. În funcție de domeniul de utilizare, de precizia și de calculele aritmetice necesare, există o varietate de coduri binare.

Reprezentarea numerelor în virgulă fixă se folosește în cazul unui SAPD care are în componență circuite dedicate care funcționează în timp real sau un PC mai puțin performant. Cea mai cunoscută reprezentare unipolară este cea sub formă de cod binar natural (*CBN*), care presupune generalizarea reprezentării zecimale:

$$D_{CBN} = \sum_{k=1}^n b_k \cdot 2^{n-k} \quad (4.17)$$

Pentru reprezentarea valorilor sub formă fracționară se folosește codificarea fracționară (*CF*):

$$D_{CF} = \sum_{k=1}^n b_k \cdot 2^{-k} \quad (4.18)$$

Un alt mod de afișare a numerelor în sistemele de calcul este formatul BCD, ce presupune reprezentarea unei cifre zecimale în cod binar pe 4 biți:

$$D_{BCD} = \sum_{j=1}^m 10^{j-1} \cdot \sum_{k=1}^4 b_{j,k} \cdot 2^{4-k} \quad (4.19)$$

unde  $j=1, 2, \dots, m$ .

Pentru reprezentarea valorilor bipolare a semnalelor analogice este necesar un bit adițional care va purta informația de semn. În general MSB este folosit pentru reprezentarea semnului numărului, sub convenția ca 0 să reprezinte un număr pozitiv iar 1 un număr negativ.

Cea mai simplă reprezentare bipolară este reprezentarea Mărime și Semn (*MS*), care presupune atribuirea în poziția MSB a valorii 0 pentru un număr pozitiv și 1 pentru un număr negativ iar restul de  $b$  biți reprezintă modulul numărului. Pentru un număr pozitiv reprezentarea este de forma:

$$(a)_{MS} = 0b_1b_2b_3 \quad (4.20)$$

iar pentru un număr negativ este de forma:

$$(a)_{MS} = 1b_1b_2b_3 \quad (4.21)$$

În cazul reprezentării în complement de unu (*C1*), numerele pozitive se reprezintă la fel ca în cazul MS iar pentru numere negative se completează modulul numărului, adică bitul 1 devine 0 iar 0 devine 1.

Pentru reprezentarea unui număr pozitiv în complement față de doi (*C2*) se folosește modulul numărului și 0 pentru bitul de semn. Pentru un număr negativ se scrie modulul acestuia în MS și se adaugă valoarea 1 la reprezentarea numărului negativ în C1.

În cazul numerelor reale se folosește reprezentarea în virgulă mobilă care oferă o precizie ridicată. Un număr reprezentat în virgulă mobilă pe un număr  $b$  de biți, va avea forma din Fig. 4.11.

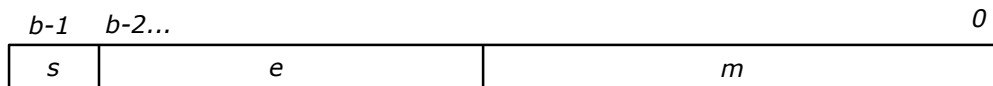


Fig. 4. 11. Reprezentarea numerelor în virgulă mobilă

Mantisa ( $m$ ) are domeniul  $1/2 \leq m \leq 1$  și reprezintă partea fracționară a numărului iar exponentul ( $e$ ) este un întreg pozitiv sau negativ. Astfel un număr  $a$  este reprezentat prin relația:

$$a = (-1)^s \times m \times 2^e \quad (4.22)$$

Deoarece  $m$  este un număr fracționar cu semn, pentru reprezentarea lui se poate folosi oricare reprezentare în virgulă fixă prezentată anterior.

Standardul IEEE 754 [ST2] definește mai multe tipuri de formate pentru reprezentarea numerelor în virgulă mobilă: precizie simplă, dublă și dublă extinsă. Caracteristicile acestora sunt prezentate în Fig. 4. 12.

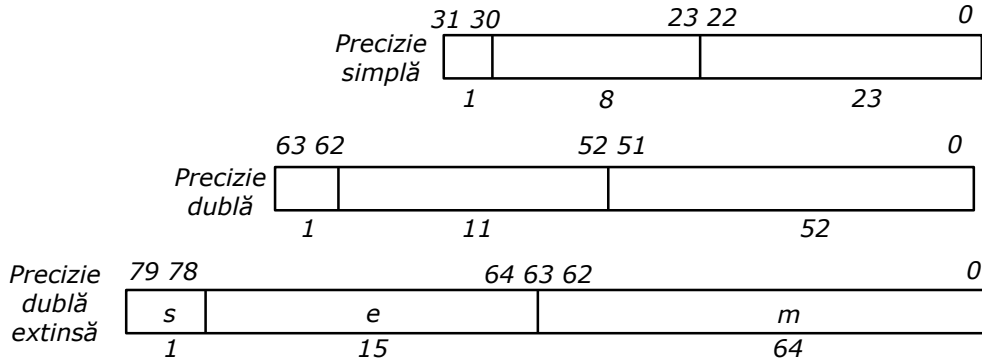


Fig. 4. 12. Formatele de reprezentare a numerelor în virgulă mobilă conform IEEE 754

Valoarea numărului  $a$  reprezentat în precizie simplă ( $P_{SP}$ ), precizie dublă ( $P_{DB}$ ) și dublă extinsă ( $P_{EX}$ ) este dată de relațiile următoare:

$$a_{P_{SP}} = (-1)^s \cdot m \cdot 2^{e-127} \tag{4.23}$$

$$a_{P_{DB}} = (-1)^s \cdot m \cdot 2^{e-1023} \tag{4.24}$$

$$a_{P_{EX}} = (-1)^s \cdot m \cdot 2^{e-16383} \tag{4.25}$$

În cazul reprezentării în virgulă fixă rezoluția  $\Delta$  pentru un domeniul dinamic  $a_{max}-a_{min}$  al unui număr  $a$  este fixă și este definită de relația:

$$\Delta = \frac{a_{max} - a_{min}}{m - 1} \tag{4.26}$$

unde  $m=2^{b+1}$  este numărul de niveluri, iar  $b$  numărul de biți.

Reprezentarea în virgulă mobilă oferă un domeniul dinamic mai larg deoarece oferă o rezoluție mai fină pentru numere mici iar reprezentarea în virgulă fixă oferă o rezoluție uniformă pentru numerele de valoare mare.

#### 4.1.4. Erori de măsurare

Chiar dacă procesul de măsurare se realizează corect și se folosesc cele mai performante metode și echipamente, rezultatul obținut diferă de valoarea reală a semnalului măsurat. Așadar rezultatul unei măsurători este însoțit tot timpul de o eroare a cărei valoare definește și precizia măsurării. Este foarte important ca un SAPD să aibă o precizie ridicată deci un număr cât mai mic de erori. Clasa de precizie a unui SAPD este un ansamblu de proprietăți metrologice care nu depinde doar de precizia echipamentului ci și de condițiile în care se fac măsurătorile. În funcție de modul de exprimare, erorile pot fi absolute ( $\Delta a$ ) sau relative ( $\epsilon$ ). Eroarea absolută reprezintă diferența dintre valoarea efectivă  $a$  și valoarea reală  $a_r$  a unei mărimi [Z6]:

$$\Delta a = a - a_r \quad (4.27)$$

Eroarea relativă se exprimă ca raportul dintre  $\Delta a$  și valoarea reală:

$$\varepsilon = \frac{\Delta a}{a_r} \cdot 100 \quad [\%] \quad (4.28)$$

Precizia unei măsurători se stabilește folosind eroarea relativă. Deoarece în practică  $a_r$  este necunoscută, aceasta se înlocuiește cu valoarea de referință  $a_0$  care se obține prin medierea mai multor măsurători realizate în aceleași condiții și la intervale egale de timp. Astfel eroarea relativă poate fi exprimată prin relația:

$$\varepsilon = \frac{a_0 - a}{a_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (4.29)$$

După modul în care se manifestă, erorile pot fi sistematice, aleatoare și grosolane [Z6]:

- Erorile sistematice au o valoare constantă sau variabilă după o lege cunoscută. Acestea apar datorită influenței factorilor fizici externi asupra procesului de măsurare dar și din cauza erorilor controlabile ale aparatelor de măsură. Pentru evitarea acestor erori trebuie luați în considerare toți factorii perturbatori ce intervin în procesul de măsurare. De asemenea este necesar ca toate echipamentele folosite în cadrul măsurătorii să fie calibrate cât mai recent.
- De cele mai multe ori erorile aleatoare nu pot fi sesizate deoarece au o valoare foarte mică. Acestea provin din influențe necontrolabile ale mediului de lucru (variații de temperatura, de tensiune, vibrații etc.) și nu pot fi eliminate complet. Însă folosind teoria probabilităților și statisticii matematice se poate determina efectul acestor erori asupra mărimii măsurate.
- Erorile grosolane provin dintr-o utilizare inadecvată a instrumentelor, sau din alegerea unei metode necorespunzătoare de măsurare. Este recomandată eliminarea acestor erori la începutul operației de analiză a rezultatelor deoarece acestea conduc la o precizie foarte scăzută a unei măsurători.

Diferite metode eficiente de eliminare a erorilor sistematice, aleatoare și grosolane sunt prezentate în [B13].

După cauzele pe care le produc erorile pot fi de bază și suplimentare:

- Erorile de bază sunt erorile totale ale aparatelor de măsură prescrise de standarde și norme, în funcție condițiile specifice de lucru.
- Erorile suplimentare sunt specificate în datele tehnice ale instrumentelor de măsură și apar datorită variației unui singur factor de influență.

## 4.2. Sistem de achiziție de date dedicat testării mașinilor electrice

Al doilea pas în realizarea SAPDM a fost stabilirea cerințelor specifice care se impun pentru testarea mașinilor electrice de mică și mare putere atât în mediul industrial cât și academic. În acest subcapitol se prezintă mai întâi aceste cerințe iar apoi SAPDM este descris atât din punct de vedere hardware cât și software, așa cum

## 4.2. Sistem de achiziție de date dedicat testării mașinilor electrice 45

a fost conceput ca prototip dedicat testării mașinilor electrice. De asemenea se prezintă rezultatele verificării clasei de precizie a acestuia prin teste comparative cu alt SAPD verificat metrologic cu clasa de preciziei 0,1% în anul 2013.

### 4.2.1. Cerințe ale SAPDM

Pentru realizarea unui SAPD dedicat achiziției de date la încercarea mașinilor electrice se au în vedere următoarele cerințe determinate de modul de variație în timp a mărimilor electrice ce caracterizează procesul analizat [B11], [B12], [P6]:

- achiziții mono și trifazate în regimuri periodice;
- achiziții mono și trifazate în regimuri aperiodice.

În cazul regimurilor periodice, achiziția și prelucrarea datelor se poate declanșa manual sau automat, cu condiția de a achiziționa cel puțin o perioadă de variație a semnalului.

Pentru regimurile aperiodice, achiziția și prelucrarea datelor este declanșată automat, softul implementat fiind acela care urmărește momentul în care apare regimul tranzitoriu și realizează achiziția și salvarea rezultatelor până la terminarea procesului urmărit.

Un sistem de achiziție de date dedicat testării mașinilor electrice de putere mare trebuie să îndeplinească următoarele funcții [B5], [B11], [B12], [S5], [S8], [V3], [W12]:

- achiziționarea valorilor momentane ale mărimilor de intrare, printr-o eșantionare corespunzătoare;
- stocarea valorilor momentane, pentru prelucrări ulterioare (off-line) după încheierea procesului de măsurare;
- prelucrarea valorilor momentane achiziționate, în timpul procesului de măsurare (on-line), după diferiți algoritmi impuși de operator (calculul valorilor efective pentru curenți, tensiuni, determinarea puterii active și reactive, factorului de putere, etc.);
- stocarea rezultatelor experimentale obținute în urma prelucrărilor on-line sau offline;
- prelucrări grafice în scopul obținerii unor dependențe între mărimile achiziționate sau prelucrate (calculate).

O cerință de bază referitoare la structura SAPDM se referă la **flexibilitatea și versatilitatea sa pentru testarea diverselor tipuri de mașini electrice într-o gamă largă de puteri și cu caracteristici diferite**. Pe baza acestei cerințe a fost adoptată structura prezentată în Fig. 4.13.

### 4.2.2. Structura hardware a SAPDM

Din punct de vedere hardware, schema bloc a sistemului de achiziție și prelucrare de date dedicat testării mașinilor electrice, propus și realizat practic în cadrul tezei este prezentată în Fig. 4.13, în care se disting următoarele componente:

- MAD care are la bază componente National Instruments din seria Compact DAQ, existente în laboratorul D109 al Facultății de Electrotehnică și Electroenergetică din Universitatea "Politehnica" din Timișoara;
- MAP dezvoltat pe parcursul programului de cercetare științifică în cadrul laboratorului D109;
- Traductoare dedicate, existente în laboratorul D109, pentru diferite metode de testare a mașinilor electrice.

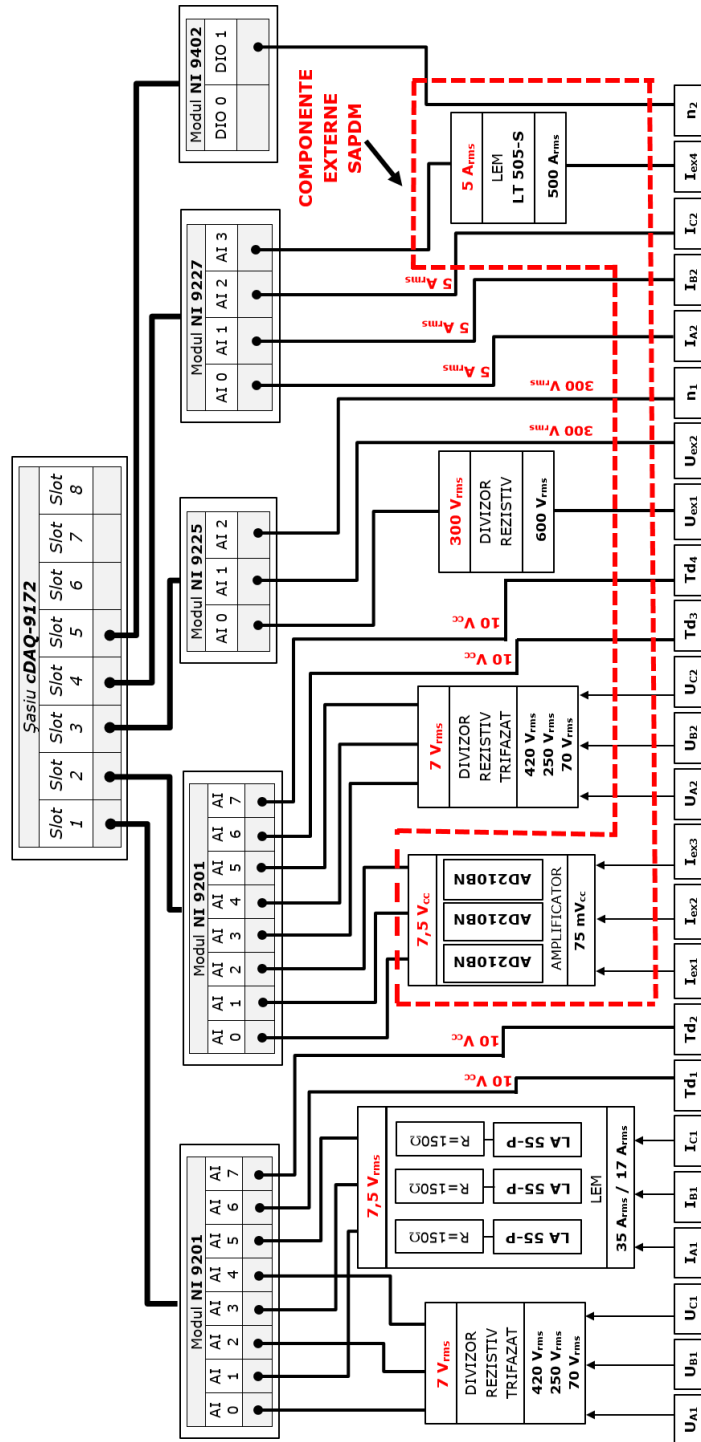


Fig. 4. 13. Schema bloc a structurii hardware SAPDM

## 4.2. Sistem de achiziție de date dedicat testării mașinilor electrice 47

S-a optat pentru platforma NI CompactDAQ datorită flexibilității și modularității oferite de un ansamblu de peste 50 de module intrări-ieșiri dedicate pentru diferite tipuri de măsurători (semnale electrice, fizice, mecanice sau acustice) [W8].

Așa cum se poate observa în Fig. 4.13 MAD din cadrul SAPDM este format din următoarele componente:

- NI cDAQ9172 – șasiu cu conectivitate USB 2.0, care suportă 8 module din seria CompactDAQ, rezoluție maximă 24 biți, rata de eșantionare 400 kS/s per modul;
- Două module NI 9201 – modul cu 8 intrări analogice de tensiune  $\pm 10$  V, rezoluție CAN 12 biți, rata de eșantionare 500 kS/s per număr de canale folosite;
- NI 9225 – modul cu 3 intrări analogice de tensiune  $300 V_{rms}$ , rezoluție CAN 24 biți, rata de eșantionare 50 kS/s per canal;
- NI 9227 – modul cu 4 intrări analogice de curent  $5 A_{rms}$ , rezoluție CAN 24 biți, rata de eșantionare 50 kS/s per canal;
- NI 9402 – modul cu 4 canale digitale bidireționale TTL.

Modulul de adaptare proces are rolul unui adaptor de domenii, care aduce nivelul mărimilor măsurate la valorile compatibile domeniului de intrare al plăcilor de achiziție. Astfel, modulul adaptor este format din două divizoare rezistive trifazate identice, traductoare de curent LEM și amplificatoare cu separare galvanică.

În funcție de valorile rezistențelor de precizie aflate în laboratorul D109 s-a simulat divizorul rezistiv folosind mediul NI Multisim (Fig. 4.14), grupându-se valorile acestora pentru a obține 3 niveluri de tensiune necesare testării mașinilor electrice:  $420 V_{rms}$  /  $250 V_{rms}$  /  $70 V_{rms}$ .

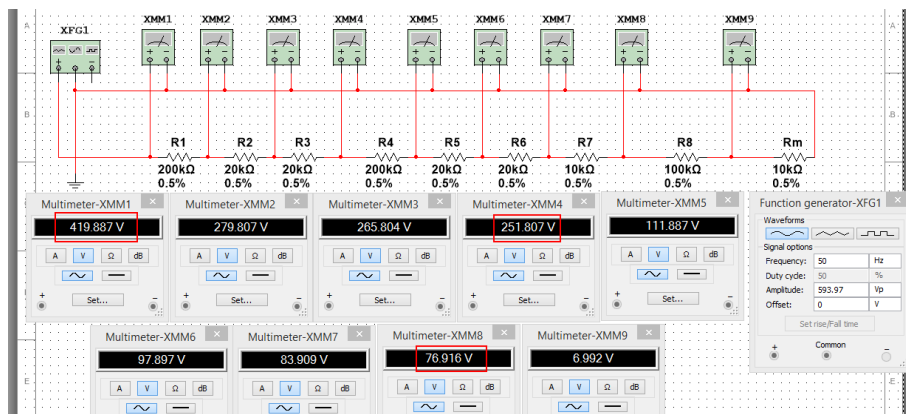


Fig. 4. 14. Divizorul rezistiv trifazat simulat în mediul NI Multisim

Pentru proiectarea divizorului s-a ținut cont de puterile disipate pe fiecare rezistor dar și de tensiunea de ieșire, a cărei valoare este condiționată de domeniul maxim și minim al plăcilor de achiziție NI 9201 ( $\pm 10,8$  V  $\approx 7,5 V_{rms}$ ) la care sunt conectate divizoarele rezistive. Suplimentar, pentru protecția acestora s-au folosit diode Zenner care limitează nivelul de tensiune a divizoarele rezistive la valoarea de  $11 V_{cc}$ .

Deoarece modulul NI 9227 oferă un domeniu maxim de  $5 A_{rms}$ , pentru curenți mari s-au folosit traductoare LEM tip LA 55-P (vezi Fig. 4.15) și LT 505-S. Acest tip

#### 48 SISTEM DE ACHIZIȚIE DE DATE DEDICAT TESTĂRII MAȘINILOR ELECTRICE - 4

de traductoare asigură o măsurare corectă a mărimilor chiar și în cazul regimurilor tranzitorii.

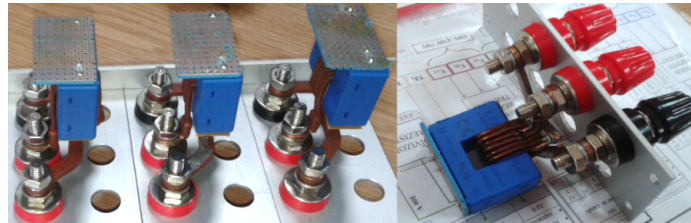


Fig. 4. 15. Traductoare de curent LEM în buclă închisă din cadrul MAP

Pentru achiziția semnalelor de joasă tensiune (mV) și pentru a izola galvanic SAPDM față de sursa de semnal, s-au folosit 3 amplificatoare de izolare Analog Devices tip AD210 NB. Acestea asigură protecția sistemului împotriva diferitelor defecțiuni cauzate de potențialul ridicat în raport cu masa sursei de semnal [A7]. De asemenea separarea galvanică este obligatorie în cazul testării mașinilor sincrone, datorită inductivității relative mari a circuitului de excitație [B5], [B12], [W7]. Amplificatoarele sunt special dezvoltate pentru a fi folosite împreună cu șunturi, în scopul măsurării atât a curentului circuitului de excitație al mașinilor sincrone cât și pentru curenții circuitului de forță. Domeniul de intrare este limitat la valoarea de  $100 \text{ mV}_{cc}$ , iar factorul de amplificare de x20 sau x100 (Fig. 4.16 detaliul A) poate fi selectat prin intermediul unui comutator aflat pe partea din față a incintei amplificatorului. Conform specificațiilor tehnice, AD210NB prezintă următoarele caracteristici:

- tensiunea de izolare galvanică de  $2500 \text{ V}_{rms}$  în curent alternativ și  $3500 \text{ V}$  în curent continuu;
- bandă utilă de frecvență de  $20 \text{ KHz}$ ;
- eroare de liniaritate de maxim  $0,012\%$ ;
- temperatură de funcționare între  $-40^{\circ}\text{C}$  și  $+85^{\circ}\text{C}$ ;

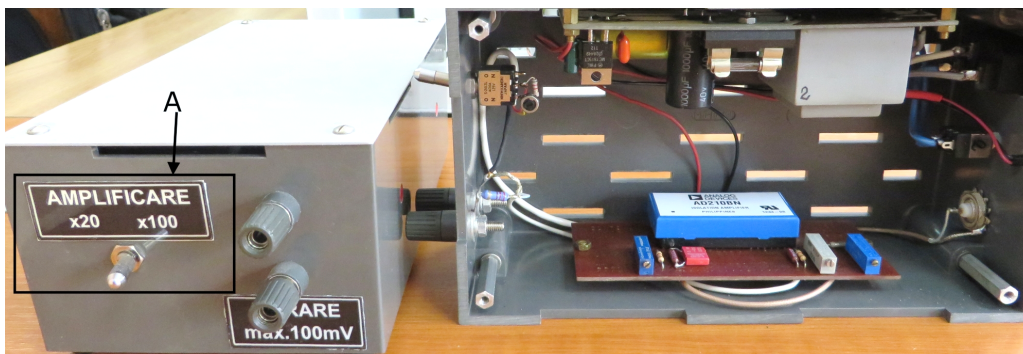


Fig. 4. 16. Amplificatoare cu separare galvanică din cadrul MAP

Pentru mașinile electrice care nu sunt prevăzute cu tahogeneratoare, SAPDM este echipat cu un senzor optic tip Monarch SPS-5. Prin montarea unui timbru reflectorizant pe axul mașinii și poziționarea fascicului luminos în dreptul acestuia, la o rotație completă senzorul optic va genera un impuls TTL [S15], [S16] care este prelucrat de intrarea de tip numărător a plăcii NI 9402.



#### 4.2. Sistem de achiziție de date dedicat testării mașinilor electrice 49

Pentru măsurarea vibrațiilor relative ale mașinilor electrice, sistemul are în componență 4 traductoare de proximitate inductive FESTO tip SIEA-M8B-PU-S certificate IP67, cu domeniul maxim de măsurare de 4mm și o frecvență de 1,6Khz.

În Fig. 4.17 este prezentată incinta SAPDM în care se pot identifica principalele elemente componente ale acestuia. Trebuie menționat faptul că amplificatoarele cu separare galvanică și traductoarele LEM 505-S nu sunt integrate în incinta principală a SAPDM, ele având incinte cu surse separate de alimentare.

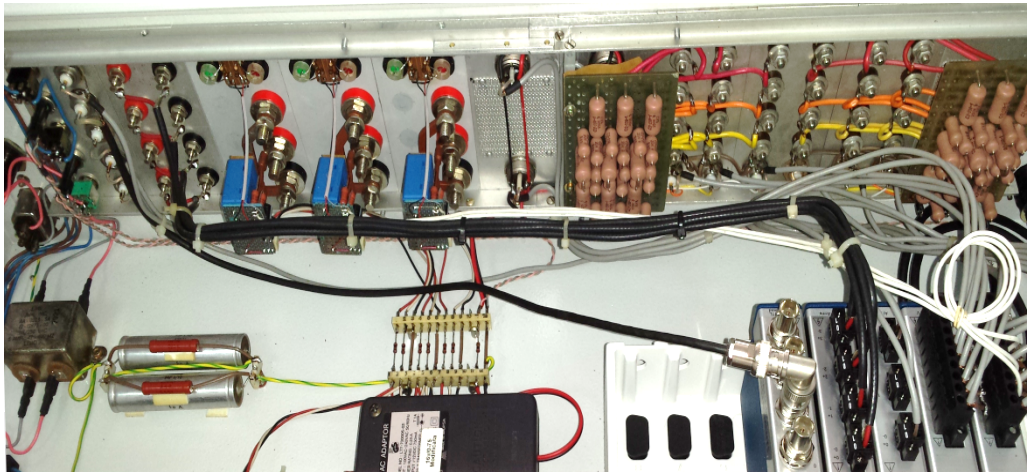


Fig. 4. 17. Principalele componente hardware din incinta SAPDM realizat în cadrul tezei

SAPDM a fost conceput astfel încât să ofere o gamă cât mai largă de domenii și mărimi ce pot fi întâlnite în mediul industrial, în special în cazul generatoarelor sincrone. Așa cum se poate observa în schema bloc din Fig. 4.13 și în panoul frontal de conexiuni din Fig. 4.18, SAPDM este prevăzut cu următoarele tipuri de intrări:

- 6 intrări de tensiune **420 V<sub>rms</sub> / 250 V<sub>rms</sub> / 70 V<sub>rms</sub>** cu masă comună analogică, fără separare galvanică (**UA1, UB1, UC1, UA2, UB2, UC2**);
- 3 intrări de curent **35 A<sub>rms</sub> / 17 A<sub>rms</sub>** cu separare galvanică cu diferență de potențial până la 2500 V<sub>rms</sub> (**IA1, IB1, IC1**);
- 3 intrări de curent **5 A<sub>rms</sub>** cu separare galvanică până la 2300 V<sub>rms</sub> (**IA2, IB2, IC2**);
- 1 intrare turație tip **5 V/TTL** pentru traductoare incrementale (**n2**);
- 1 intrare de tensiune **300 V<sub>rms</sub>** pentru traductoare de turație de tip TAHO, senzori și traductoare optice sau incrementale (**n1-TAHO sau n1-TTL**);
- 3 intrări de tensiune **75mV<sub>cc</sub>** utilizabile cu șunturi, pentru curentul de excitație al mașinii testate (**Iex1, Iex2, Iex3**); Aceste intrări se folosesc doar împreună cu amplificatoarele cu separare galvanică exterioare incintei SAPDM prezentate în Fig. 4.16.
- 1 intrare curent **500 A<sub>rms</sub>**, cu separare galvanică până la 2500 V<sub>rms</sub>, pentru curentul de excitație al mașinii măsurate (**Iex4**); Această intrare este utilizabilă doar împreună cu traductorul LEM exterior LT 505-S.
- 2 intrări de tensiune **300 V<sub>rms</sub>** pentru tensiunea de excitație a mașinii testate cu separare galvanică până la 2300 V<sub>rms</sub> (**Uex1, Uex2**);
- 4 intrări de tensiune **10 V<sub>cc</sub>** dedicate pentru traductoare de proximitate alimentate de la o sursă de alimentare internă de 24 V<sub>cc</sub> (**TD1, TD2, TD3, TD4**).

## 50 SISTEM DE ACHIZIȚIE DE DATE DEDICAT TESTĂRII MAȘINILOR ELECTRICE - 4

- 6 intrări de tensiune **10 V<sub>cc</sub>** fără separare galvanică pentru diverse traductoare sau senzori.

SAPDM a fost conceput astfel încât să fie capabil de a face măsurători pe două mașini electrice simultan, de exemplu două hidrogeneratoare ce echipează de obicei o centrală hidroelectrică.

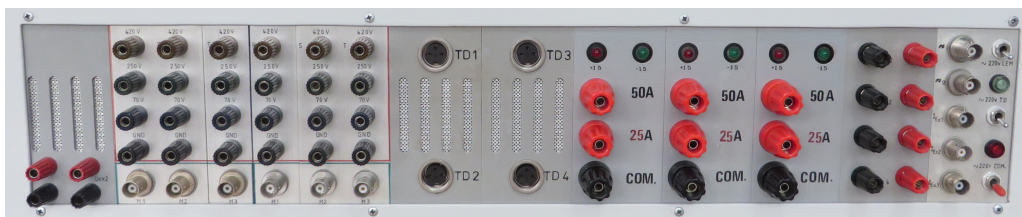


Fig. 4. 18. Panoul frontal de conexiuni al SAPDM realizat în cadrul tezei

### 4.2.3. Structura software a SAPDM

Din punct de vedere software, SAPDM este împărțit în două niveluri de prelucrare: unul primar și unul secundar. Majoritatea interacțiunilor cu utilizatorul în cadrul celor două niveluri se realizează prin intermediul unor ferestre de configurare, de selectare sau de dialog.

Datorită avantajelor prezentate în capitolul 3, cele două niveluri software au fost dezvoltate folosind mediul NI LabVIEW 2013 și actualizate apoi conform ultimei versiuni LabVIEW 2015.

Cu ajutorul mediului NI LabVIEW s-au creat instrumente virtuale dedicate achiziției și prelucrării de date pentru testarea mașinilor electrice.

Nivelul primar include VI-uri care realizează achiziții de date mono și trifazate în regimuri periodice de frecvență constantă, dar și în regimuri tranzitorii. În cadrul acestor VI-uri se achiziționează valori momentane ale tensiunilor și curenților pe fiecare fază din circuitului de forță al mașinii testate, iar apoi în funcție de frecvența semnalelor achiziționate se calculează: valorile efective, valorile medii, puterea activă, puterea reactivă și factorul de putere. Pentru mașini sincrone se achiziționează și se calculează valorile aferente tensiunii și curentului de excitație. Pe baza mărimilor determinate experimental, în primul nivel software se pot obține diverse corelații între parametrii mașinii electrice testate, cum ar fi caracteristica de mers în gol, scurtcircuit, sarcină etc. **Acest nivel are în componență peste 30 de instrumente virtuale** (programe cu extensia \*.vi) **dezvoltate în cadrul tezei** și 100 de subinstrumente (*subVI*) din biblioteca mediului LabVIEW.

Al doilea nivel de prelucrare se referă la determinarea unor parametri și caracteristici ale mașinilor sincrone de putere mare, pe bază unor seturi de teste și metode specifice de prelucrare, care vor fi prezentate în detaliu în capitolul 5.

În continuare se prezintă primul nivel software care este împărțit la rândul său în 3 subniveluri:

- configurarea sistemului de achiziție – este subnivelul în care se definesc parametri specifici achiziției de date (rata de eșantionare, numărul de eșantioane achiziționate) și se selectează intrările și domeniile SAPDM în funcție de specificul testului.
- vizualizarea și salvarea datelor on-line – oferă posibilitatea de a urmări evoluția în timp a mărimilor dar și salvarea formelor de undă, a valorilor efective și medii pentru prelucrări ulterioare.

## 4.2. Sistem de achiziție de date dedicat testării mașinilor electrice 51

- prelucrarea off-line a măsurătorilor – este subnivelul în care se pot vizualiza și interpreta rezultatele salvate on-line.

Pentru a putea fi folosite pe orice PC, pe care nu există mediul LabVIEW instalat, instrumentele și subinstrumentele virtuale ce compun nivelul primar au fost compilate într-o aplicație de tip executabil "SAPDM.exe". Apoi s-a generat o aplicație de tip "Setup" gestionată de "Windows Installer" ce conține driverele necesare pentru componentele hardware ale SAPDM și care este compatibilă doar cu sistemul de operare Windows.

Pentru eficiență și un consum cât mai mic de resurse ale PC-ului gazdă (memorie RAM, nivel de încărcare al microprocesorului), în dezvoltarea instrumentelor virtuale au fost implementate diverse soluții și metode optime de programare grafică, care presupun folosirea corespunzătoare și corelarea eficientă a funcțiilor predefinite în mediul LabVIEW [C4], [B14], [B15].

Cerințele minime ale unui PC sau notebook impuse pentru rularea în condiții optime a aplicației sunt:

- procesor Intel sau AMD dual-core 2 GHz;
- memorie RAM 2 GB pentru Windows XP și 3 GB pentru Windows Vista, 7, 8.1 și 10;
- rezoluție minimă a display-ului de 1366 x 768 de pixeli;
- port de comunicație USB 2.0.

Folosirea SAPDM împreună cu un port USB 3.0 a condus la deconectări aleatoare ale comunicației dintre PC-ul gazdă și sistem, de aceea se recomandă folosirea portului USB 2.0.

Pentru a instala aplicația dezvoltată pentru nivelul primar de prelucrare software, se rulează executabilul "Setup.exe" din directorul aplicației de tip Windows Installer (vezi Fig. 4.19).

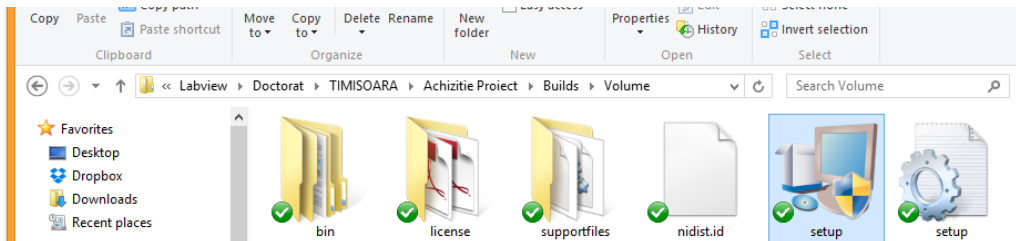


Fig. 4. 19 Directorul aplicației de tip Windows Installer generat de mediul LabVIEW

În Fig. 4.20 este prezentată fereastra proiectului din mediul LabVIEW, care conține toate elementele componente ale nivelului primar software al SAPDM, compilate în aplicația "SAPDM.exe".

În urma instalării, aplicația "SAPDM.exe" poate fi lansată de pe spațiul de lucru (desktop) al calculatorului gazdă, fie accesând meniul "Start > All Programs > SAPDM > SAPDM.exe". În Fig. 4.21 este prezentată fereastra principală a aplicației din care se accesează cele trei subniveluri prezentate anterior.

În momentul în care aplicația este rulată pentru prima dată, aceasta va crea 2 directoare în care se vor salva automat fișierele de configurare ale SAPDM ("Contexte") și valorile măsurătorilor ("Masuratori").

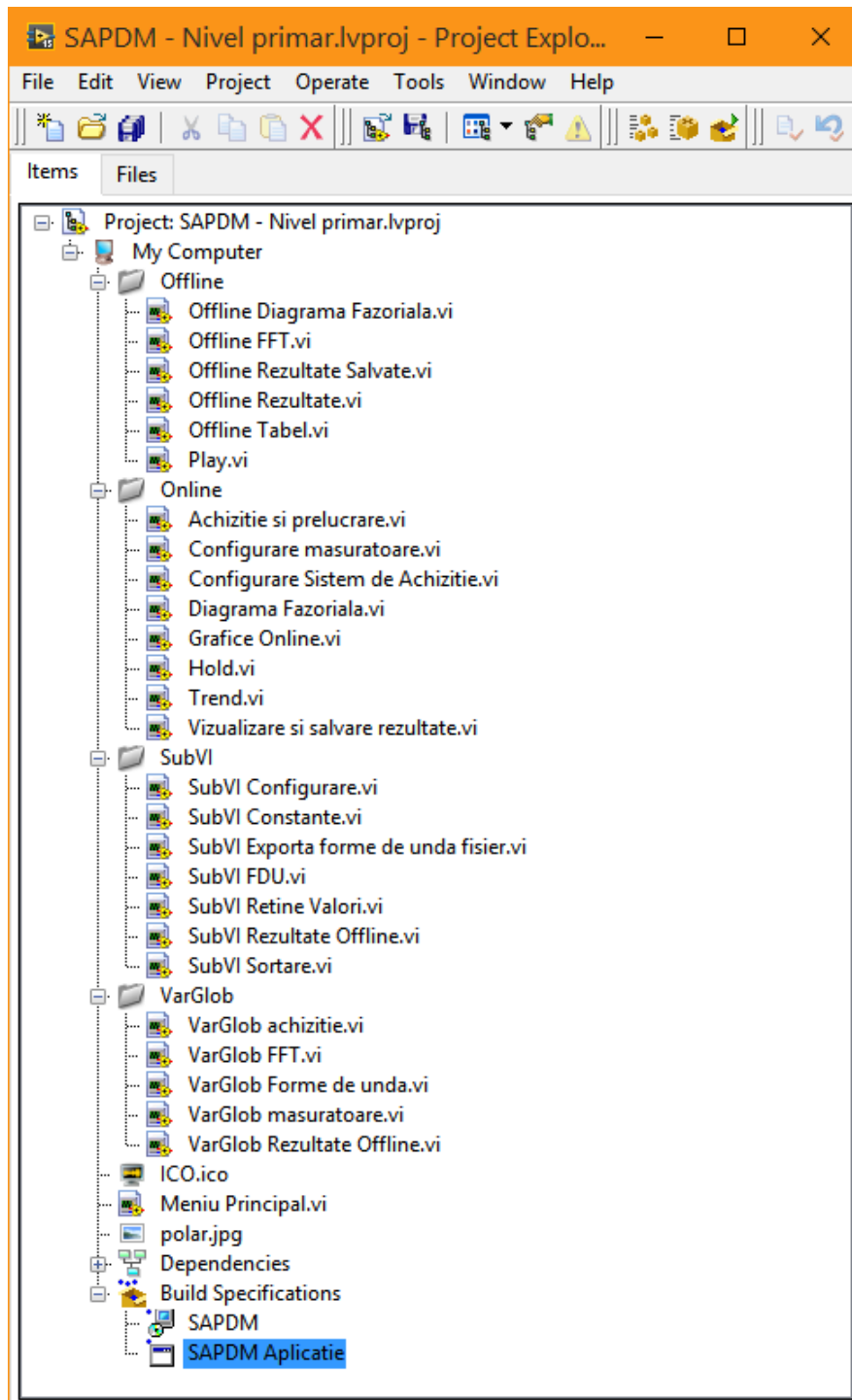


Fig. 4. 20. Fereastra proiectului creat în LabVIEW pentru nivelul primar software al SAPDM



Fig. 4. 21. Fereastra principală a aplicației dezvoltate pentru nivelul primar software al SAPDM

Pentru configurarea sistemului și definirea mărimilor achiziționate se apasă butonul "Configurare Sistem de Achiziție" din fereastra principală a aplicației. Acesta va lansa primul subnivel de prelucrare software, care are fereastra aferentă în Fig. 4.22. În cadrul acesteia se pot selecta intrările folosite pentru circuitul de forță al mașinii testate precum și cele pentru circuitul de excitație sau turație. În funcție de datele nominale ale mașinii testate se aleg domeniile corespunzătoare pentru fiecare intrare. În cazul mașinilor electrice la care în circuitul de măsură sunt folosite transformatoare, reductori sau șunturi, pentru interpretarea corectă a mărimilor achiziționate, în cadrul aplicației trebuie definit un raport de transformare. Astfel pentru fiecare mărime achiziționată se introduce în secțiunea aferentă "Raport de divizare" valoarea domeniului primar și secundar al echipamentelor din circuitul de măsură.

Numărul de eșantioane are valoarea prestabilită de 25.000 eșantioane ( $S$ ), dar poate fi modificat conform diferitelor condiții de testare. Valoarea ratei de eșantionare este prestabilită la 50 kS/s și nu poate fi modificată de utilizator. Valoarea acesteia este suficientă pentru a evita fenomenul de aliere dar și pentru a obține o reconstituire cât mai fidelă a semnalelor analizate în cazul testării mașinilor electrice.

Pentru a prezenta aplicația dezvoltată pentru nivelului primar de prelucrare software, SAPDM a fost folosit pentru testarea unui motor asincron de 4 KW alimentat printr-un autotransformator la tensiunea rețelei. În continuare se prezintă rezultatele pentru testul de mers în gol al motorului asincron.

În cazul în care se dorește eliminarea componentei continue a semnalelor achiziționate, în categoria "Tip Conectare" se selectează "Cuplare AC" iar în caz contrar "Cuplare DC".

Configurația hardware se poate salva sub forma unui context prin accesarea butonului "Salvează", care va lansa un subVI-ul dezvoltat cu diagrama bloc prezentată în Fig. 4.23 detaliul A.

54 SISTEM DE ACHIZIȚIE DE DATE DEDICAT TESTĂRII MAȘINILOR ELECTRICE - 4

Încărcarea unui context deja salvat se face prin apăsarea butonului "Deschide", care execută subVI-ul din detaliul B al Fig. 4.23. Pentru crearea unui context nou prin butonul "Nou".

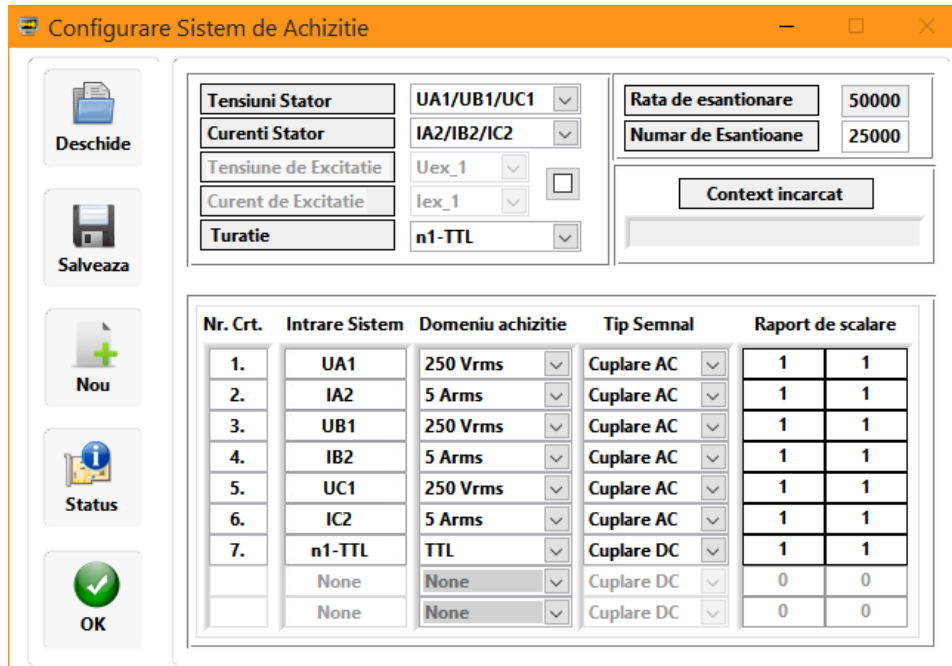


Fig. 4. 22. Fereastra de configurare a SAPDM utilizată ca exemplu pentru încercarea motorului asincron de 4 KW

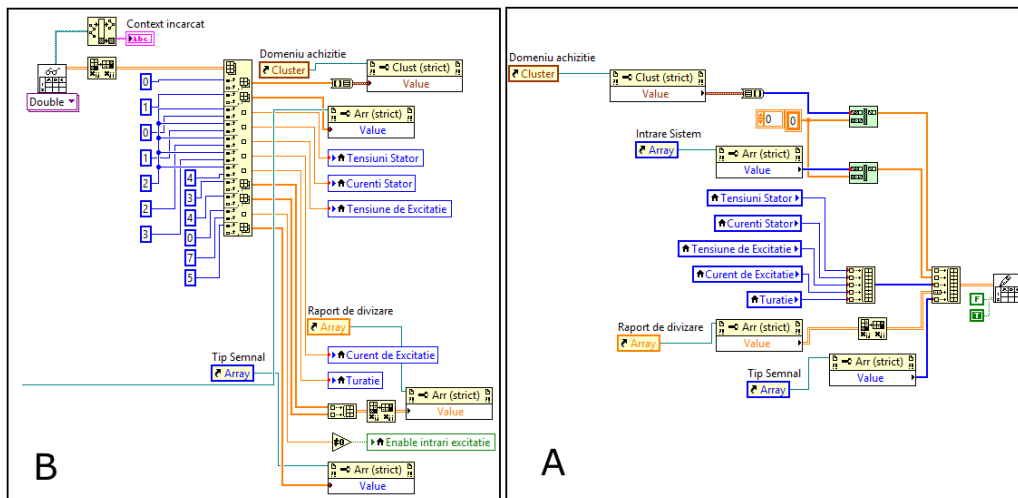


Fig. 4. 23. Diagramele bloc ale subVI-urilor dezvoltate pentru salvarea și citirea contextelor

Înainte de a reveni la meniul anterior, prin apăsarea butonului "Inapoi", se recomandă accesarea butonul "Status" care oferă informații asupra unor eventuale

## 4.2. Sistem de achiziție de date dedicat testării mașinilor electrice 55

erori de conectivitate USB dintre sistem și calculatorul gazdă (Fig. 4.24 c), dar și asupra unor eventuale defecțiuni ale șasiului cDAQ 9172 sau a modulelor aferente acestuia (Fig. 4.24 b). În cazul în care sistemul nu va avea nici o defecțiune hardware se va afișa mesajul din Fig. 4.24 a.

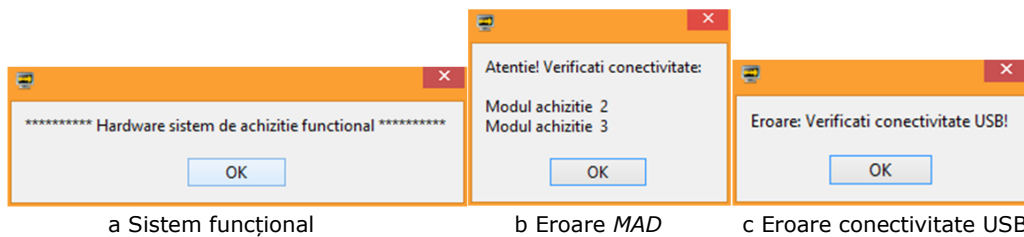


Fig. 4. 24. Mesaje afișate privind starea tehnică a SAPDM

Secvența din diagrama bloc a instrumentului virtual dezvoltat pentru configurarea sistemului de achiziție, cu ajutorul căreia se verifică și se afișează starea tehnică a SAPDM, este prezentată în Fig. 4.25.

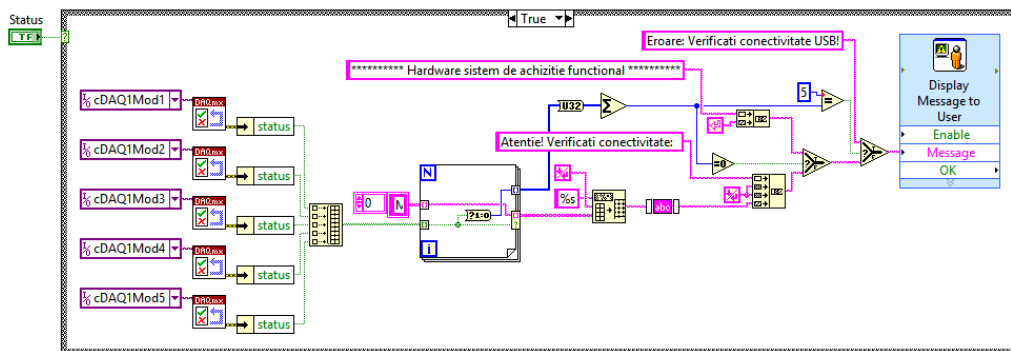


Fig. 4. 25. Secvența diagramei bloc prin care se verifică starea hardware a SAPDM

În Fig. 4.26 detaliul A se prezintă secvența din diagrama bloc a instrumentului virtual dezvoltat pentru achiziția și prelucrarea primară a datelor. Acesta are rolul de a parametriza modulele analogice de tensiune și curent din șasiul cDAQ 9172 în funcție de mărimile alese de utilizator din fereastra de configurare a SAPDM (Fig. 4.22). Astfel, prin această secvență se definesc următoarele:

- domeniul de achiziție;
- tipul de conexiune (uni-polar sau diferențial);
- denumirea mărimilor;
- scalarea primară a domeniilor de achiziție;
- definirea bazei de timp folosite pentru declanșarea achiziției;
- unitatea de măsură a mărimilor achiziționate.

Informațiile prelucrate în secvența din detaliul A al Fig. 4.26 sunt preluate de subVI-urile din detaliul B al Fig. 4.26, în care prin intermediul instrumentelor virtuale de nivel intermediar (detaliul B0) se lansează achiziția de date.

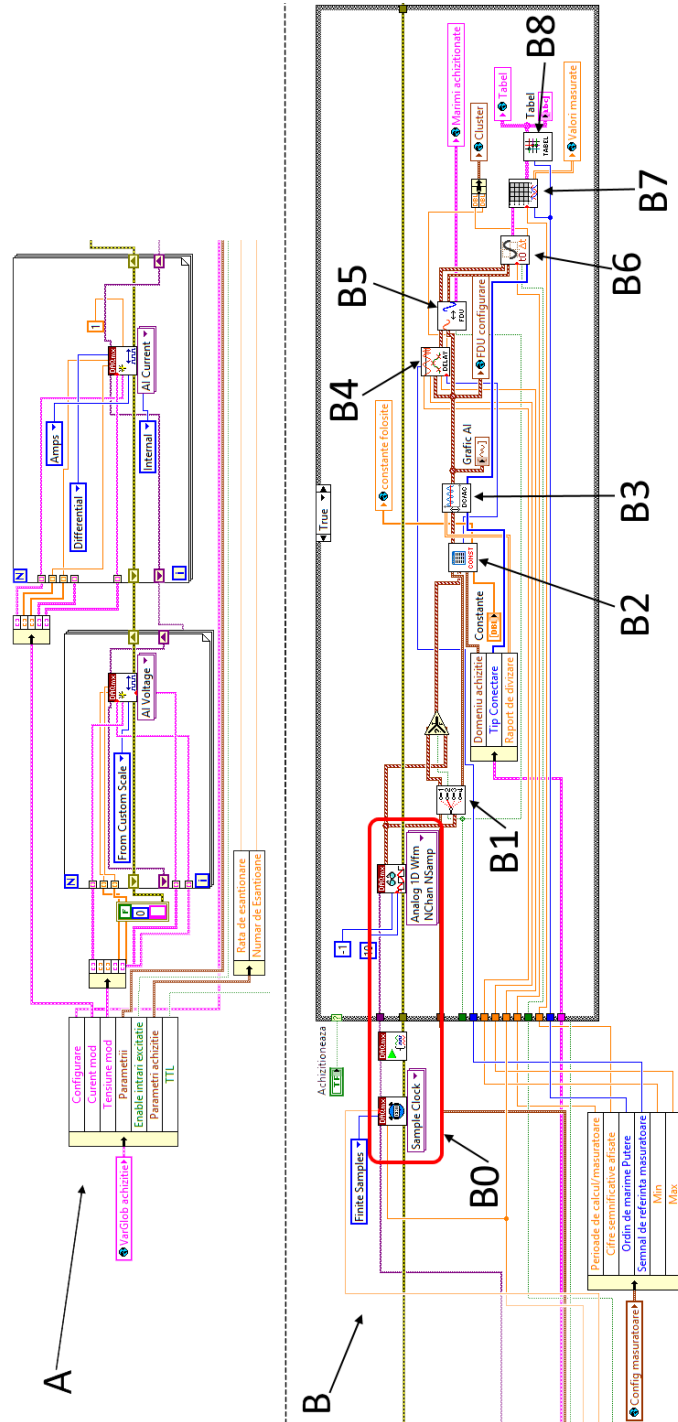


Fig. 4. 26. Secvențe din diagrama bloc a VI-ului dezvoltat pentru achiziția și prelucrarea primară a datelor



## 4.2. Sistem de achiziție de date dedicat testării mașinilor electrice 57

În secvența din detaliul B al Fig. 4.26 se citesc formele de undă ale mărimilor achiziționate și prin intermediul unor subVI-uri special dezvoltate (detaliul B1, B2, B3, B4, B5, B6, B7, B8) sunt aplicate prelucrări primare de semnal. Aceste prelucrări sunt condiționate de opțiunile selectate de utilizator în fereastra de configurare a SAPDM (Fig. 4.22).

În funcție de intrările SAPDM selectate, aplicația atribuie automat un set de constante de calibrare prin intermediul subVI-ului "SubVI Constante" (Fig. 4.26 detaliul B2) cu diagrama bloc prezentată în Fig. 4.27. Înainte de a fi preluate de acest subVI, formele de undă sunt ordonate corespunzător prin intermediul subinstrumentului virtual din detaliul B1 al Fig. 4.26.

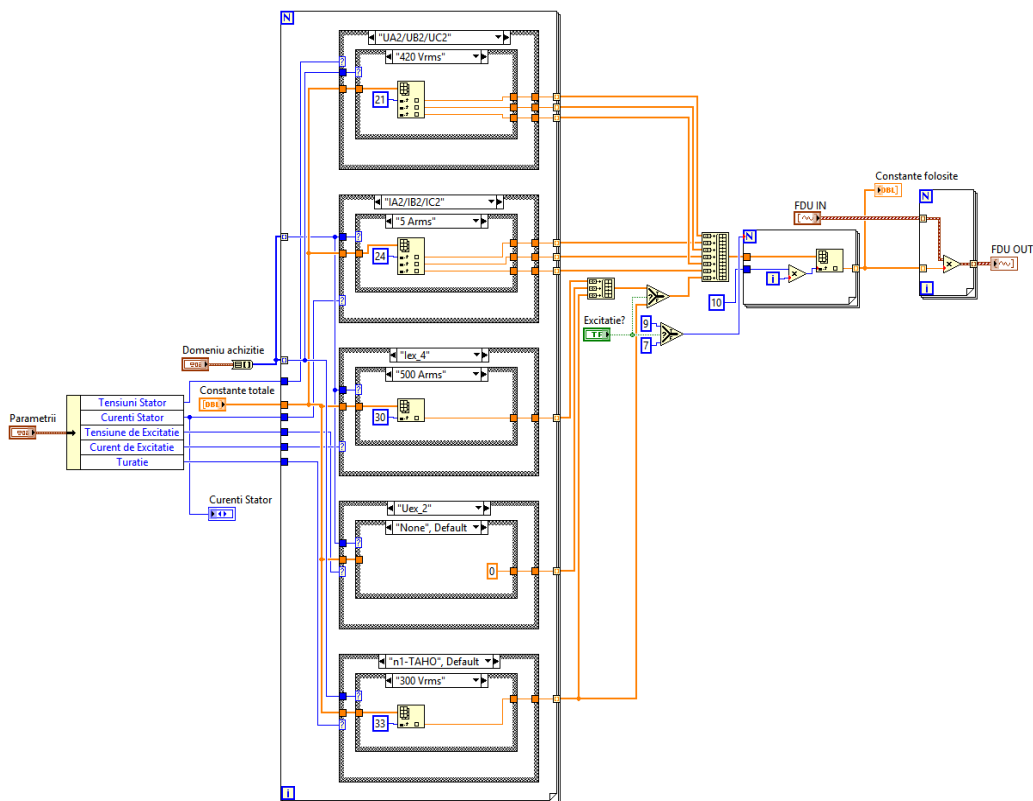


Fig. 4. 27. Diagrama bloc a subinstrumentului "SubVI Constante"

Constantele de calibrare au fost stabilite în urma etalonării SAPDM folosind un voltmetru digital cu precizie ridicată (0,01 %) tip HP 3455A, o sursă de tensiune continuă stabilizată de 1500 V tip Stratron TYP 4205 și rezistențe etalon. Aceste constante au fost determinate experimental în urma a 5 măsurători simultan înregistrate pe SAPDM și HP 3455A. Valorile obținute pentru fiecare din cele 34 de intrări analogice ale SAPDM sunt prezentate în tabelul 4.1.

Tabelul 4. 1. Constantele de calibrare ale intrărilor analogice specifice SAPDM

Nr. crt.	Intrare SAPDM	Domeniul de achiziție	Constantă
1	UA1	70 V <sub>rms</sub>	1,1186369
2		250 V <sub>rms</sub>	1,026736
3		420 V <sub>rms</sub>	1,019283
4	UB1	70 V <sub>rms</sub>	1,117127
5		250 V <sub>rms</sub>	1,025262
6		420 V <sub>rms</sub>	1,017944
7	UC1	70 V <sub>rms</sub>	1,117233
8		250 V <sub>rms</sub>	1,025381
9		420 V <sub>rms</sub>	1,018256
10	IA1	17 A <sub>rms</sub>	1,8736966
11	IB1	35 A <sub>rms</sub>	3,747393
12		17 A <sub>rms</sub>	1,8890856
13	IC1	35 A <sub>rms</sub>	3,778171
14		17 A <sub>rms</sub>	1,8868681
15	UA2	35 A <sub>rms</sub>	3,773736
16		70 V <sub>rms</sub>	1,11933
17		250 V <sub>rms</sub>	1,027384
18	UB2	420 V <sub>rms</sub>	1,019735
19		70 V <sub>rms</sub>	1,119728
20		250 V <sub>rms</sub>	1,027389
21	UC2	420 V <sub>rms</sub>	1,019653
22		70 V <sub>rms</sub>	1,120204
23		250 V <sub>rms</sub>	1,027603
24	IA2	420 V <sub>rms</sub>	1,01997
25		5 A <sub>rms</sub>	1
26		5 A <sub>rms</sub>	1
27	IB2	5 A <sub>rms</sub>	1
28	IC2	5 A <sub>rms</sub>	1
29	Iex1	70 mV <sub>cc</sub>	0,998456
30	Iex2	70 mV <sub>cc</sub>	1,001675
31	Iex3	70 mV <sub>cc</sub>	1,002076
32	Iex4	500 A <sub>rms</sub>	100
33	Uex1	300 V <sub>rms</sub>	1
34	Uex2	300 V <sub>rms</sub>	1
	n1	300 V <sub>rms</sub>	1

În funcție de opțiunile alese de utilizator în câmpul "Tip semnal" din fereastra de configurare hardware a SAPDM (Fig. 4.22), subinstrumentul virtual din detaliul B3 al Fig. 4.26 elimina sau nu componenta continuă a semnalelor achiziționate.

Subinstrumentelor virtuale din detaliile B5, B6, B7, B8 permit calcularea și afișarea, atât sub formă numerică cât și tabelară, a următoarelor valori specifice mărimilor achiziționate:

- valoarea efectivă a tensiunilor de fază  $U_A$ ,  $U_B$ ,  $U_C$ , a curenților  $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$  și media acestora  $U$ ,  $I$ ;
- valoarea efectivă a tensiunii de linie  $U_{linie}$ ;
- valoarea medie a tensiunilor  $U_{m_A}$ ,  $U_{m_B}$ ,  $U_{m_C}$ , a curenților  $I_{m_A}$ ,  $I_{m_B}$ ,  $I_{m_C}$  și media lor  $U_{med}$ ,  $I_{med}$ ;

#### 4.2. Sistem de achiziție de date dedicat testării mașinilor electrice 59

- frecvența pe fiecare fază  $f_A, f_B, f_C$  și media  $f$ ;
- puterea activă pe fiecare fază  $P1, P2, P3$  și puterea activă totală  $P$ ;
- puterea reactivă pe fiecare fază  $Q1, Q2, Q3$  și puterea reactivă totală  $Q$ ;
- factorul de putere pe fiecare fază  $\cos\phi A, \cos\phi B, \cos\phi C$  și media  $\cos\phi$ ;
- valoarea efectivă a tensiunii de excitație  $U_{ex}$  și a curentului de excitație  $I_{ex}$ ;
- turația rotorului  $n$  exprimată în rotații pe minut ( $rpm$ );

Valorile calculate anterior sunt preluate de cel de-al doilea subnivel de prelucrare și anume de instrumentul virtual "Vizualizarea și salvarea on-line a măsurătorilor" cu fereastra aferentă în Fig. 4.28. Aici utilizatorul poate urmări evoluția în timp și salva toate valorile specifice mărimilor achiziționate.

Toate rezultatele afișate în continuare corespund regimului de mers în gol al motorului asincron de 4 KW testat.

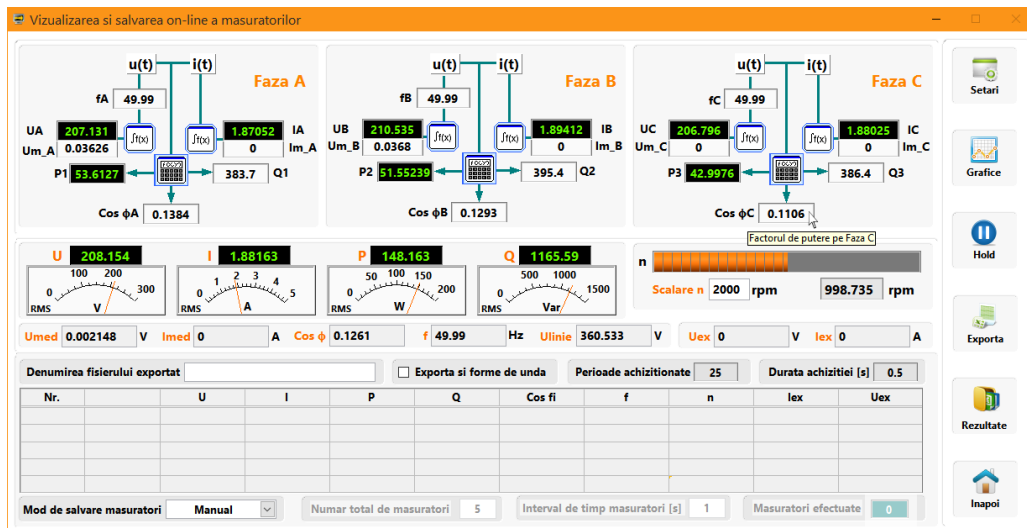


Fig. 4. 28. Fereastra VI-ului de vizualizare și salvare on-line a măsurătorilor

Pentru o interpretare cât mai corectă a rezultatelor, în momentul în care utilizatorul plasează cursorul mouse-ului în dreptul unui indicator numeric, aplicația oferă informații suplimentare despre mărimea respectivă.

Modul de salvare al rezultatelor poate fi:

- "Manual" - în care utilizatorul apasă butonul "Exporta" la fiecare moment de interes;
- "Secvențial" - când se selectează numărul total de măsurători și intervalul de timp dintre 2 măsurători consecutive;
- "Automat" - este asemănător cu modul "Secvențial", singura diferență fiind posibilitatea de a salva continuu, la un interval de timp definit de utilizator, valorile calculate de SAPDM.

Pentru a deschide directorul în care sunt salvate automat măsurătorile, se apasă butonul "Director".

Cu scopul de a obține caracteristica de magnetizare a mașinii asincrone testate de 4 KW, s-a folosit modul "Manual" pentru a exporta un număr de 15 măsurători la diferite trepte ale tensiunii de alimentare.

Numărul de perioade prelucrate la o măsurătoare are valoarea predefinită de 5 perioade, însă poate fi modificată de utilizator în fereastra "Configurare

"măsurătoare" din Fig. 4.29. Aceasta este vizibilă la apăsarea butonului "Setări" din fereastra VI-ului de vizualizare și salvare on-line a măsurătorilor (Fig. 4.28). Numărul maxim de perioade de calcul este definit în funcție de numărul de eșantioane achiziționate, rata de eșantionare și frecvența semnalului.

De asemenea în cadrul ferestrei de configurare se definesc următoarele:

- unitatea de măsură pentru putere (W, kW sau MW);
- numărul de cifre semnificative afișate;
- semnalul de referință în funcție de care este realizată sincronizarea canalelor de achiziție;
- domeniul estimat al frecvenței semnalelor alternative achiziționate.

Pentru fiecare intrare selectată din fereastra de configurare hardware a SAPDM, în câmpul "CONSTANTE FOLOSITE" din Fig. 4.29 se afișează constantele de calibrare atribuite pentru canalele de achiziție folosite.

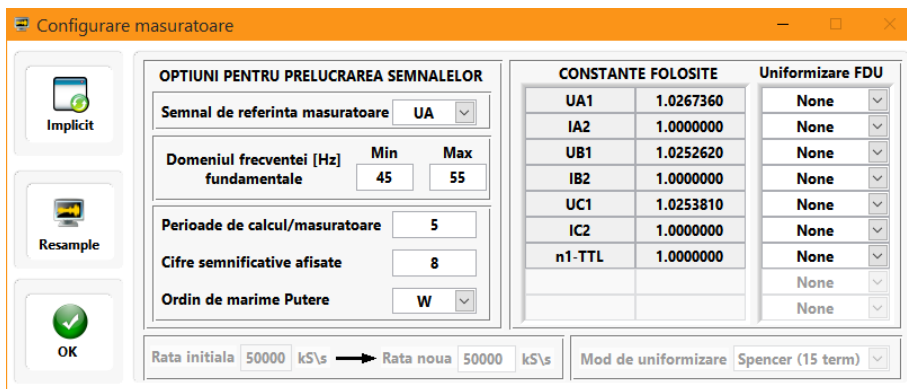


Fig. 4. 29. Fereastra de configurare a modului de calcul al valorilor specifice mărimilor achiziționate

În cazul în care semnalele achiziționate sunt influențate de diferiți factori externi perturbatori (paraziți) sau în cazul în care amplitudinea semnalelor este semnificativ mai mică decât domeniul maxim al intrărilor SAPDM, aplicația oferă posibilitatea atenuării fluctuațiilor aleatoare folosind metoda mediei mobile centrate Spencer sau Henderson. Pentru a activa această metodă de netezire a formelor de undă se selectează din rubrica "Uniformizare FDU" opțiunea "Uniformizare", moment în care va deveni activă și rubrica "Mod de uniformizare". În această rubrica sunt disponibile 5 tipuri de netezire a formelor de undă. Deoarece rata de eșantionare definită în fereastra de configurare hardware a SAPDM are valoarea fixă de 50 kS/s, aplicația oferă posibilitatea de a modifica frecvența de eșantionare a formelor achiziționate prin metoda de reeșantionare (resampling). Această opțiune devine activă în momentul în care se apasă butonul "Resample". Aplicația indică rata de eșantionare actuală ("Rata initiala") iar utilizatorul poate introduce valoarea nouă a ratei de eșantionare în rubrica "Rata noua".

Pentru vizualizarea on-line a formelor de undă a mărimilor achiziționate se accesează butonul "Grafice" (din Fig. 4.28), care va lansa fereastra din Fig. 4.30. Pentru o interpretare cât mai ușoară, se pot selecta o serie de moduri prestabilite de afișare a formelor de undă dar și un mod personalizat. În cazul de față se afișează forma de undă a tensiunii și curentului pe faza A.

## 4.2. Sistem de achiziție de date dedicat testării mașinilor electrice 61

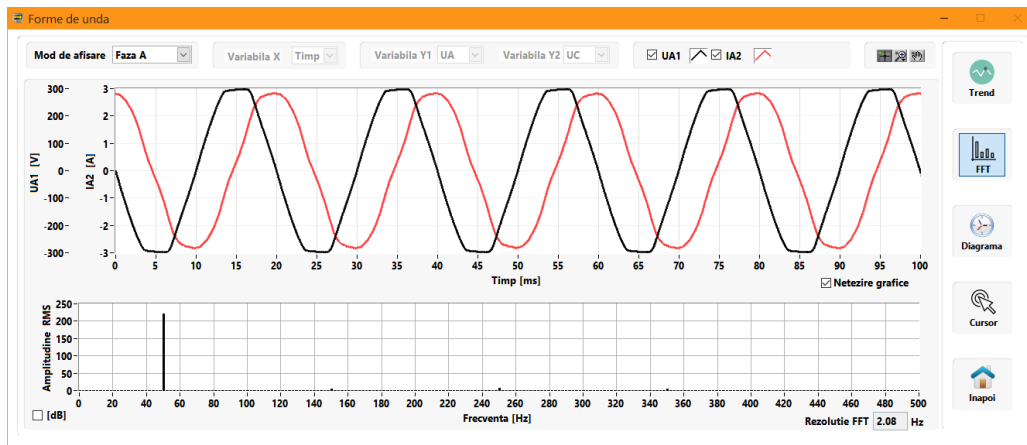


Fig. 4. 30. Forma de undă a tensiunii și curentului la mersul în gol a motorului de 4 kW

Pentru o analiză în domeniul frecvență a formelor de undă se apasă butonul "FFT", moment în care graficul din partea inferioară a ecranului va deveni activ și va afișa valorile RMS a fiecărei componente spectrale. Diagrama bloc prin care se realizează analiza FFT este prezentată în Fig. 4.31. Pentru citirea valorilor fiecărei componente spectrale se activează cursorul armonic prin apăsarea butonului aferent "Cursor" (Fig. 4.30).

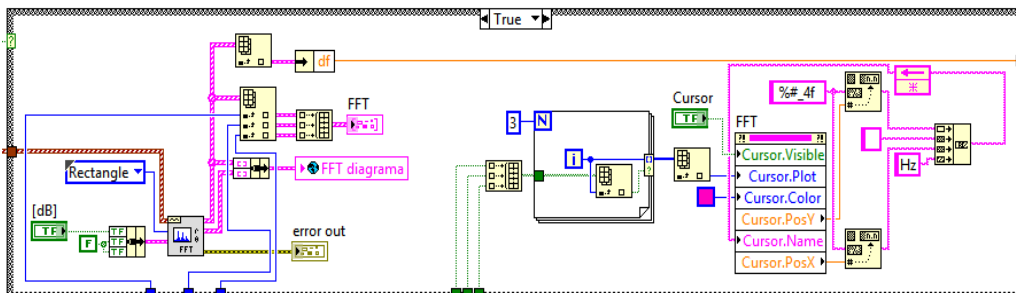


Fig. 4. 31. Diagrama bloc a subVI-ului dezvoltat pentru analiza FFT a formelor de undă achiziționate

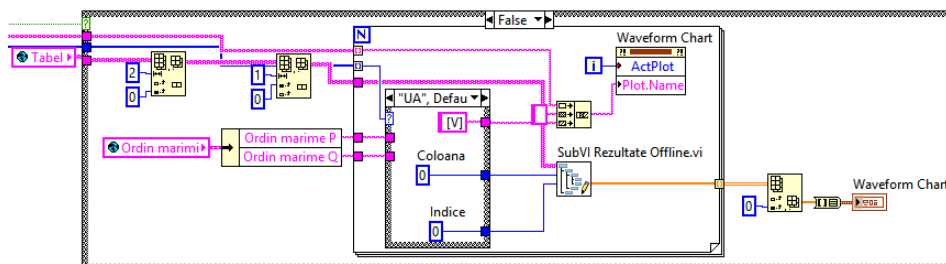


Fig. 4. 32. Secvență din diagrama bloc a instrumentului virtual dezvoltat pentru a vizualiza variația în timp, sub formă grafică, a valorilor calculate specifice mărimilor achiziționate

Prin apăsarea butonului "Trend" în fereastra din Fig. 4.32, se va lansa un VI cu ajutorul căruia se poate urmări simultan evoluția în timp, sub formă grafică (G1-

## 62 SISTEM DE ACHIZIȚIE DE DATE DEDICAT TESTĂRII MAȘINILOR ELECTRICE - 4

G4), a valorilor calculate pentru 4 mărimi achiziționate. Interfața cu utilizator a acestui VI este dată în Fig. 4.33 iar diagrama bloc în Fig. 4.32.

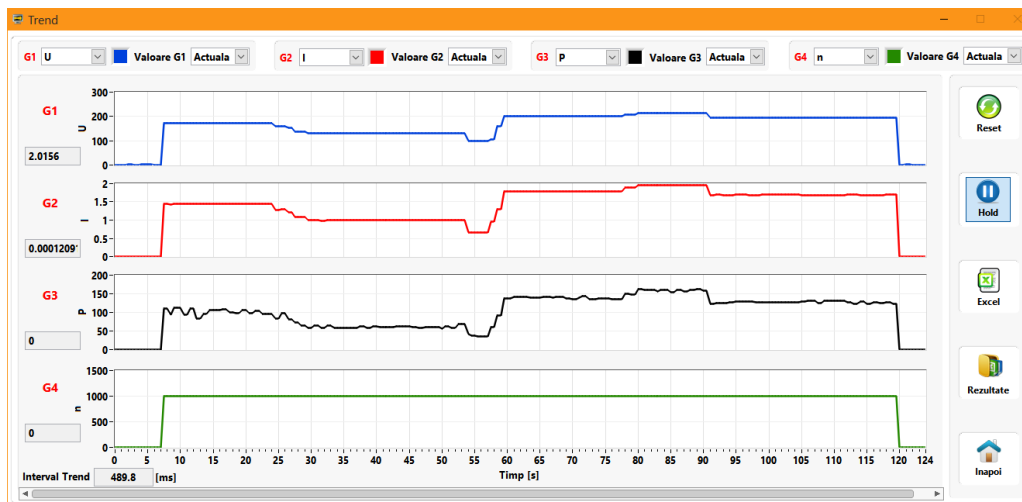


Fig. 4. 33. Fereastra VI-ului cu ajutorul căruia se urmărește evoluția în timp a valorilor efective ale mărimilor achiziționate sub formă grafică

Pentru fiecare grafic se poate selecta o culoare distinctă și patru moduri de prelucrare numerică al valorilor afișate. Cele patru moduri de prelucrare pentru fiecare din cele patru grafice ("G1", "G2", "G3", "G4" ) sunt:

- valoare "Actuala" – se afișează valoarea curentă;
- valoare "Max" – se calculează și afișează valoarea maximă;
- valoare "Min" – se calculează și afișează valoarea minimă;
- valoare "Media" – se calculează și afișează media aritmetică a valorilor afișate în cele patru grafice;

Reprezentarea fazorială a tensiunilor și curenților statorici este lansată odată cu apăsarea butonului "Diagrama" din fereastra din Fig. 4.30. Diagrama bloc aferentă acestui VI este prezentată în Fig. 4.34 iar interfața cu utilizator în Fig. 4.35.

În cadrul ferestrei specifice diagramei fazoriale (Fig. 4.35) se observă următoarele:

- modulul vectorilor este exprimat ca valoare RMS;
- defazajul în grade dintre tensiune și curent, pe fiecare fază ( $\varphi_A$ ,  $\varphi_B$ ,  $\varphi_C$ ), este afișat și sub formă numerică;
- utilizatorul poate personaliza modul de reprezentare grafică a fazorilor prin definirea grosimii liniei, tipului acesteia ("Dash" – linie punctată, "Solid" – linie continuă) dar și dimensiunea săgeții specifice celor 6 vectori afișați;
- instrumentul virtual oferă posibilitatea de a afișa cei 6 vectori reprezentativi pentru fiecare ordin din spectrul de frecvență al semnalelor (câmpul "Armonica").

Diagrama fazorială este activă doar în cazul în care subVI-ului dezvoltat pentru analiza FFT a formelor de undă este activ (butonul "FFT" din Fig. 4.30 este apăsat).

## 4.2. Sistem de achiziție de date dedicat testării mașinilor electrice 63

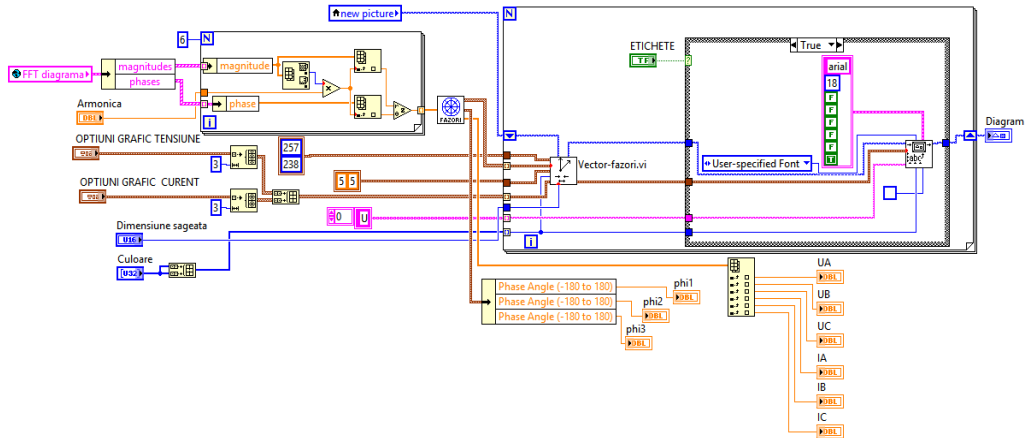


Fig. 4. 34. Diagrama bloc a VI-ului dezvoltat pentru a reprezenta diagrama fazorială a tensiunilor și curenților statorici

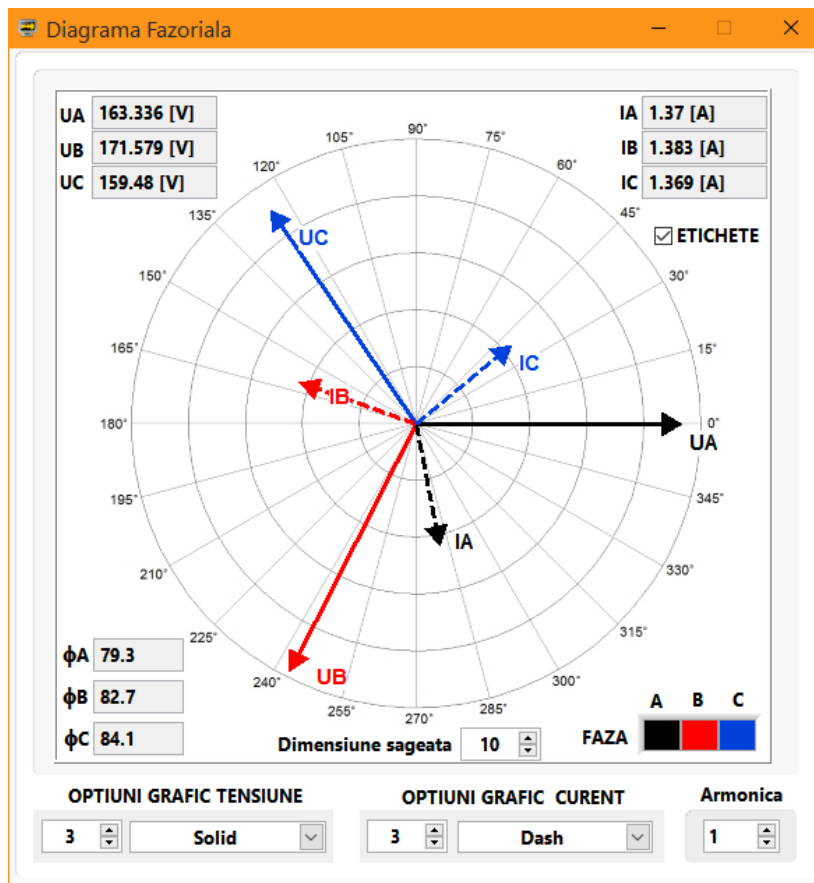


Fig. 4. 35. Diagrama fazorială la funcționarea în gol a mașinii asincrone de 4 KW

În diagrama din Fig. 4.35 se atribuie automat câte o scală pentru cei 3 vectori reprezentativi ai tensiunilor și curenților, iar diagrama se autoscalează în funcție de amplitudinea maximă a acestora.

Al treilea subnivel de prelucrare se accesează prin butonul "Prelucrare off-line a masuratorilor" din fereastra principală a aplicației (Fig. 4.21). Acest subnivel are fereastra aferentă din Fig. 4.36 detaliul A.

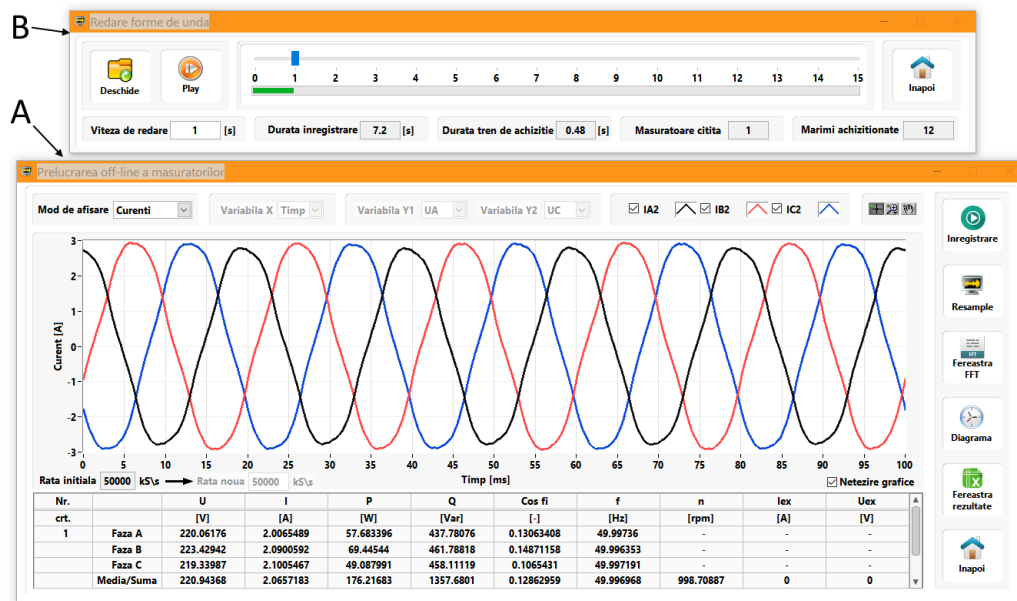


Fig. 4. 36. Fereastra VI-ului de vizualizare și prelucrare off-line a rezultatelor

Prin apăsarea butonului "Inregistrare" se lansează instrumentul virtual din detaliul B al Fig. 4.36 care are rolul de a reda secvențial, la un interval de timp ales de utilizator, formele de undă salvate on-line.

În exemplul prezentat în Fig. 4.36 se afișează formele undă ale curenților pe toate cele 3 faze, corespunzătoare primei măsurători din cele 15 salvate anterior pentru motorul asincron de 4 KW luat ca și exemplu.

Pentru analiza în domeniul frecvență a semnalelor, se apasă butonul "Fereastra FFT" care va lansa fereastra din Fig. 4.37. Aplicația afișează sub forma grafică și tabelară fiecare componentă spectrală până la armonica de ordinul 24 a semnalului analizat. În cazul de față sunt reprezentate componentele spectrale ale formei de undă a tensiunii pe faza A.

Pentru a vizualiza off-line diagrama fazorială a tensiunilor și curenților de fază specifice formelor de undă citite și afișate în fereastra din Fig. 4.36 se apasă butonul "Diagrama". Fereastra diagramei fazoriale off-line este identică cu cea on-line din Fig. 4.35 și nu va mai fi prezentată în continuare.

Pentru a reprezenta grafic diferite dependențe funcționale ale valorilor efective calculate și salvate on-line, se accesează butonul "Fereastra rezultate" din cadrul Fig. 4.36. Instrumentul virtual apelat are fereastra aferentă în Fig. 4.38 și oferă diverse posibilități de personalizare a modului de afișare al graficelor, precum diverse culori, tipuri de linii, cursoare etc.



## 4.2. Sistem de achiziție de date dedicat testării mașinilor electrice 65

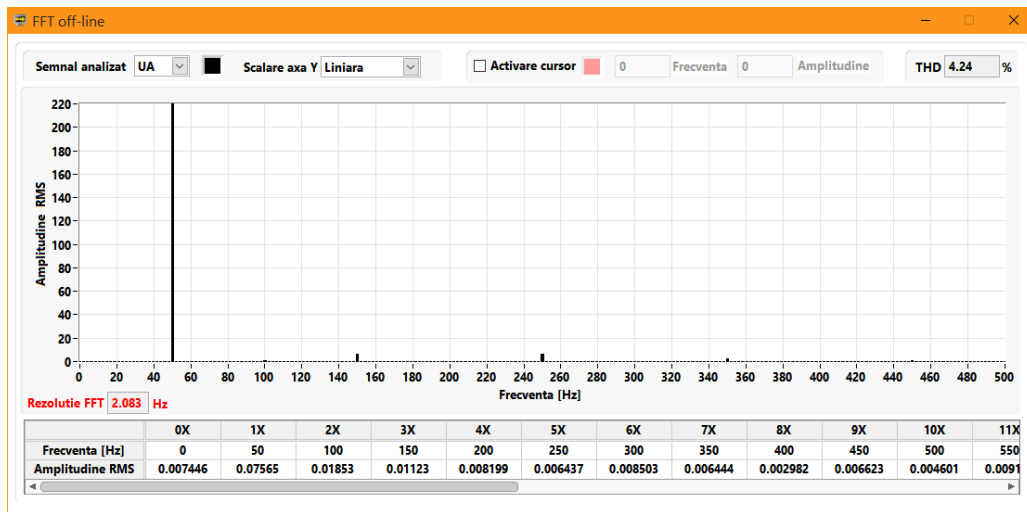


Fig. 4. 37. Fereastra de analiză off-line a semnalelor în domeniul frecvență

Fișierul ce conține cele 15 măsurători salvate anterior, folosind modul manual în cadrul ferestrei din Fig. 4.28, se deschide apăsând butonul "Rezultate Salvate". Utilizatorul poate selecta două variabile dependente Y1, Y2 și o variabilă independentă X.

În exemplul prezentat în Fig. 4.38 se alege ca variabilă dependentă valoarea efectivă a tensiunii de fază  $U$ , iar curentul statoric  $I$  ca și variabilă independentă, în scopul de a reprezenta caracteristica de magnetizare a mașinii asincrone de 4 KW.

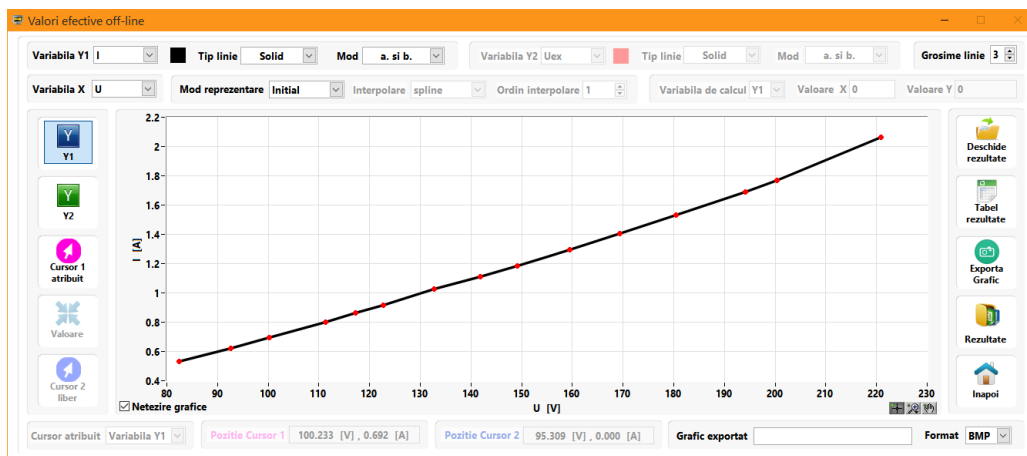


Fig. 4. 38. Caracteristica de magnetizare a motorului asincron de 4 KW

În mod predefinit se reprezintă grafic doar valorile citite din fișierul deschis, însă prin selectarea din câmpul "Mod de reprezentare" a modului "Interpolat", aplicația poate interpola valorile existente în scopul obținerii unui nou grafic, reprezentat printr-un număr mai mare de puncte.

Prin alegerea modului "Interpolat", în cadrul ferestrei din Fig. 4.38, devin active următoarele opțiuni:

## 66 SISTEM DE ACHIZIȚIE DE DATE DEDICAT TESTĂRII MAȘINILOR ELECTRICE - 4

- câmpul "Interpolare" în care se alege modul de interpolare al valorilor;
- câmpul "Ordin interpolare" unde se definește ordinul interpolării;
- butonul "Cursor 2 liber" și câmpurile aferente acestuia.
- butonul "Valoare" care odată apăsat oferă posibilitatea de a afișa sub formă numerică orice valoare dependentă (câmpul "Valoare Y"), pentru o valoare a variabilei independente introdusă de utilizator în câmpul "Valoare X".

Pentru a vedea conținutul fișierului deschis se apasă butonul "Tabel rezultate" care va lansa fereastra din Fig. 4.39.

Nr. crt.		U [V]	I [A]	P [W]	Q [Var]	Cos fi [-]	f [Hz]	n [rpm]	lex [A]	Uex [V]
1	Faza A	220.06176	2.0065489	57.683396	437.78076	0.13063408	49.99736	-	-	-
	Faza B	223.42942	2.0900592	69.44544	461.78818	0.14871158	49.996353	-	-	-
	Faza C	219.33987	2.1005467	49.087991	458.11119	0.1065431	49.997191	-	-	-
	Media/Suma	220.94368	2.0657183	176.21683	1357.6801	0.12862959	49.996968	998.70887	0	0
2	Faza A	199.82775	1.7405868	51.225762	344.02465	0.14727769	49.994361	-	-	-
	Faza B	204.00315	1.7819733	47.829151	360.368	0.13156931	49.994419	-	-	-
	Faza C	197.32361	1.7880443	37.299042	350.84627	0.10571591	49.994249	-	-	-
	Media/Suma	200.38484	1.7702014	136.35395	1055.2389	0.12818764	49.994343	998.49178	0	0
3	Faza A	194.09107	1.6669128	45.774414	320.27837	0.14148303	50.00035	-	-	-
	Faza B	197.61418	1.6950288	44.333364	332.01492	0.13235352	50.00006	-	-	-
	Faza C	190.67377	1.7070931	37.038761	323.38368	0.11379109	50.000424	-	-	-
	Media/Suma	194.12634	1.6896782	127.14654	975.67697	0.12920922	50.000278	998.54606	0	0
4	Faza A	179.6683	1.4976383	43.389661	265.55672	0.16125303	50.009944	-	-	-
	Faza B	185.65743	1.5409803	37.08742	283.68036	0.12963349	50.009983	-	-	-
	Faza C	176.06657	1.5562192	25.80287	272.78051	0.094171689	50.010156	-	-	-
	Media/Suma	180.4641	1.5316126	106.27995	822.01759	0.12835274	50.010028	998.59892	0	0
5	Faza A	167.63577	1.3731361	40.006502	226.68351	0.17380021	50.011028	-	-	-
	Faza B	177.02638	1.424567	35.866052	249.62247	0.14222066	50.011084	-	-	-
	Faza C	163.62243	1.4184634	22.208337	231.02746	0.095687469	50.010808	-	-	-
	Media/Suma	169.4282	1.4053888	98.08089	707.33343	0.13723611	50.010973	998.5483	0	0
6	Faza A	158.25163	1.279624	40.604282	198.39	0.20051241	50.004929	-	-	-
	Faza B	167.61634	1.3034926	26.171911	216.91347	0.11978722	50.004712	-	-	-
	Faza C	152.74387	1.2999852	15.709188	197.94238	0.079113674	50.004433	-	-	-
	Media/Suma	159.53728	1.2943673	82.485381	613.24586	0.13313777	50.004692	998.38244	0	0
7	Faza A	146.59034	1.161792	40.558637	165.4075	0.23814946	50.002608	-	-	-
	Faza B	159.70003	1.2068232	25.926252	190.97792	0.13452132	50.002684	-	-	-
	Faza C	141.2605	1.1858232	10.627922	167.17249	0.063446503	50.002686	-	-	-
	Media/Suma	149.18362	1.1848128	77.112812	523.5579	0.14537243	50.002659	998.19894	0	0
8	Faza A	138.29306	1.0882892	35.003611	146.37573	0.23257773	50.013357	-	-	-
	Faza B	152.13073	1.1155906	24.707435	167.9075	0.14558139	50.013281	-	-	-
	Faza C	134.9448	1.1215954	9.3964483	151.0615	0.062082811	50.013385	-	-	-
	Media/Suma	141.78953	1.1084917	69.107495	465.34474	0.14674731	50.013341	998.26022	0	0

Fig. 4. 39. Reprezentare tabelară a măsurătorilor efectuate pentru a determina caracteristica de magnetizare a motorului asincron de 4 KW

Înregistrările de curent și tensiune efectuate de SAPDM au pus în evidență o nesimetrie a rețelei la care este alimentat motorul asincron de 4 KW.

### 4.2.4. Verificarea clasei de precizie a SAPDM

Pentru verificarea clasei de precizie a SAPDM s-a utilizat un sistem de achiziție de date produs de firma DIGITLINE tip VPA-323 verificat metrologic în anul 2013 cu clasa de precizie 0,1% pentru puterea activă (Fig. 4.40).

#### 4.2. Sistem de achiziție de date dedicat testării mașinilor electrice 67



Fig. 4. 40. Sistem de achiziție DIGITLINE VPA 323

Primul pas în stabilirea clasei de precizie a SAPD a fost verificarea în curent continuu a celor 2 sisteme, folosind rezistențe etalon și sursa de tensiune continuă stabilizată tip Stratron TYP 4205 utilizată și în cazul calibrării intrărilor SAPDM. S-au comparat valorile efective măsurate de cele două sisteme, pentru toate intrările de tensiune și curent. Pentru fiecare intrare s-au efectuat 5 măsurători iar apoi s-a calculat media aritmetică a acestora. Eroarea de măsurare  $\varepsilon$  a fost calculată conform relației:

$$\varepsilon = \frac{(\text{valoare}_{VPA323} - \text{valoare}_{SAPDM})}{\text{valoare}_{VPA323}} \cdot 100\% \quad (4.30)$$

Deoarece intrările SAPDM de curent de 5  $A_{rms}$  ( $IA_2$ ,  $IB_2$ ,  $IC_2$ ,  $Iex_4$ ), cele dedicate tensiunii de excitație ( $Uex_1$ ,  $Uex_2$ ) și turație ( $n_1$ ), sunt conectate direct la modulele NI 9227, respectiv NI 9225, acestea nu au fost incluse în procesul de verificare comparativă cu VPA 323. Conform specificațiilor tehnice prezentate de National Instruments modulul NI 9227 oferă o acuratețe de 0,1% pentru un domeniu de 5  $A_{rms}$  și 0,38% pentru 10  $A_{rms}$ , iar modulul NI 9225 0,05 % pentru domeniul de 300  $V_{rms}$ .

Rezultatele obținute pentru domeniile celor două divizoare rezistive ale SAPDM sunt prezentate în tabelele 4.2-4.4. În cazul intrărilor de curent cu domeniul de 17  $A_{rms}$  ( $IA_1$ ,  $IB_1$ ,  $IC_1$ ) rezultatele sunt prezentate în Tabelul 4.5. Trebuie menționat faptul că VPA-323 oferă un domeniu maxim de 10  $A_{rms}$ , ceea ce nu a permis o verificare comparativă la domeniul maxim de 17  $A_{RMS}$ .

Tabelul 4. 2. Eroarea de măsurare pentru domeniul de 70  $V_{rms}$

Nr. crt.	INTRARE SAPDM	Domeniul 70 $V_{rms}$		
		SAPDM [V <sub>cc</sub> ]	VPA-323 [V <sub>cc</sub> ]	$\varepsilon$ [%]
1.	UA1	83,85754	83,8577	0,002
2.	UB1	83,85422	83,8577	0,004
3.	UC1	83,85477	83,8577	0,003
4.	UA2	84,03385	84,0351	0,002
5.	UB2	84,03202	84,0351	0,003
6.	UC2	84,03376	84,0351	0,002

Tabelul 4. 3. Eroarea de măsurare pentru domeniul de 250 V<sub>rms</sub>

Nr. crt.	INTRARE SAPDM	Domeniul 250 V <sub>rms</sub>		
		SAPDM [V <sub>cc</sub> ]	VPA-323 [V <sub>cc</sub> ]	ε [%]
1.	UA1	303,5710	303,56785	-0,001
2.	UB1	303,5690	303,56785	-0,001
3.	UC1	303,5680	303,56785	-0,001
4.	UA2	303,5432	303,54385	0,001
5.	UB2	303,5468	303,54385	-0,001
6.	UC2	303,5423	303,54385	0,001

Tabelul 4. 4. Eroarea de măsurare pentru domeniul de 420 V<sub>rms</sub>

Nr. crt.	INTRARE SAPDM	Domeniul 420 V <sub>rms</sub>		
		SAPDM [V <sub>cc</sub> ]	VPA-323 [V <sub>cc</sub> ]	ε [%]
1.	UA1	329,5783	329,58452	0,001
2.	UB1	329,5810	329,58452	0,001
3.	UC1	329,5794	329,58452	0,001
4.	UA2	329,5616	329,56078	-0,001
5.	UB2	329,5550	329,56078	0,001
6.	UC2	329,5584	329,56078	0,001

Tabelul 4. 5. Eroarea de măsurare pentru domeniul de 17 A<sub>rms</sub>

Nr. crt.	INTRARE SAPDM	Domeniul 17 A <sub>rms</sub>		
		SAPDM [A <sub>cc</sub> ]	VPA-323 [A <sub>cc</sub> ]	ε [%]
1.	IA1	8,017079	8,0260	0,111151
2.	IB1	8,015509	8,0260	0,130713
3.	IC1	8,017035	8,0260	0,111699

Pentru a verifica cele trei canale (*I<sub>ex1</sub>*, *I<sub>ex2</sub>*, *I<sub>ex3</sub>*) prevăzute pentru măsurarea curentului de excitație al mașinilor sincrone (domeniul de 75 mV<sub>cc</sub>), s-a folosit o rezistență etalon care a avut rolul unui șunt. Valorile obținute sunt prezentate în tabelul 4.6.

Tabelul 4. 6. Eroarea de măsurare pentru domeniul de 75 mV<sub>cc</sub>

Nr. crt.	INTRARE SAPDM	Domeniul 75 mV <sub>cc</sub>		
		SAPDM [V <sub>cc</sub> ]	VPA-323 [V <sub>cc</sub> ]	ε [%]
1.	I <sub>ex1</sub>	0,086083	0,086088	0,005
2.	I <sub>ex2</sub>	0,093376	0,093377	0,001
3.	I <sub>ex3</sub>	0,092378	0,092325	-0,057

Al doilea pas în verificarea clasei de precizie a SAPDM s-a realizat prin compararea valorilor efective calculate de cele două sisteme de achiziție pentru tensiunea, curentul și puterea activă, în regim de mers în gol al unui motor asincron de 2,2 KW din cadrul laboratorului D109. Intrările SAPDM folosite în acest caz au fost cele cu domeniul de 5 A<sub>rms</sub> IA2, IB2, IC2 și 240 V<sub>rms</sub> UA1, UB1, UC1.

#### 4.2. Sistem de achiziție de date dedicat testării mașinilor electrice 69

În urma primelor măsurători s-a constatat o eroare de aproximativ **4%** între valorile afișate de cele două sisteme pentru puterea activă, factorul de putere și implicit a puterii reactive. Deoarece **eroarea** nu a fost întâlnită și la calculul valorilor efective ale tensiunii și curentului s-a concluzionat că aceasta provine din **defazaj**.

Conform literaturii de specialitate [A8], [C8] această întârziere este datorată folosirii a două tipuri diferite de convertoare analog-numeric în cadrul MAD. Modulul NI 9201 are în componență un convertor analog-numeric cu aproximații succesive (SAR) iar modulele NI 9225 și NI 9227 un CAN delta sigma (DSA). Pentru asemenea situații se recomandă atribuirea a două baze de timp diferite pentru fiecare tip de modul. Deoarece sașii cDAQ 9172 este limitat hardware la o singură bază de timp, singura **modalitate de eliminare a acestei erori** a fost elaborarea unei **soluții software**.

Utilizând **instrumentația virtuală** s-a elaborat un **subVI de determinare și eliminare a valorii acestui defazaj**. În acest scop SAPDM a fost conectat la o sarcină rezistivă, în cazul căreia, teoretic defazajul dintre tensiune și curent este nul. Toate intrările de tensiune ale SAPDM au fost conectate în paralel iar cele de curent în serie. Forma de undă obținută în acest caz pentru tensiunea și curentul pe faza A sunt prezentate în Fig. 4.41. Defazajul dintre tensiune și curent conduce la erori substanțiale în calculul puterii active.

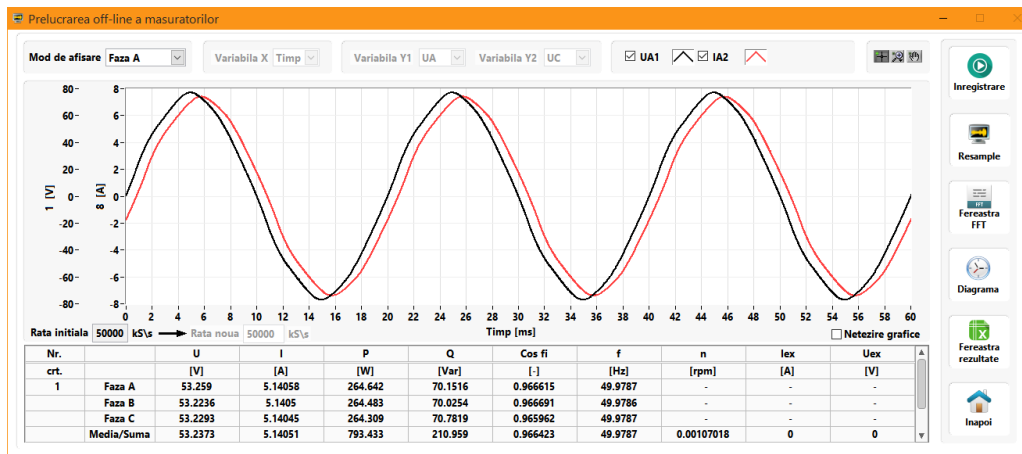


Fig. 4. 41. Forma de undă a tensiunii și curentului pe faza A pentru sarcina rezistivă folosită, înainte de eliminarea defazajului

În urma încercărilor experimentale a rezultat un defazaj  $\varphi$  între tensiune și curent de  $14,667^0$  (0.25598 radiani). Pentru o rată de eșantionare de 50 KS/s, la frecvența nominală  $f_n$  de 50 Hz a rețelei, s-a obținut o întârziere  $\varphi[\mu s]$  de 814.807  $\mu s$  corespunzătoare a 40 de eșantioane. Întârziere exprimată în funcție de timp a fost determinată folosind relația:

$$\varphi[\mu s] = \frac{\varphi[rad]}{f_n 2\pi} 10^6 \quad (4.31)$$

Diagrama bloc a subVI-ului dezvoltat pentru calcularea defazajului dintre tensiune și curent și afișarea valorii acestuia în radiani, grade și timp este prezentată în Fig. 4.42.

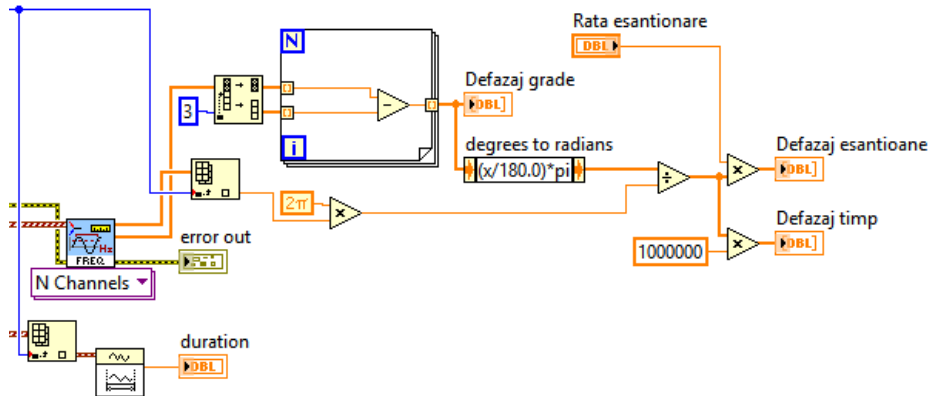


Fig. 4. 42. Diagrama bloc a subVI-ului dezvoltat pentru calculul defazajului

Pentru a elimina acest defazaj în cadrul primului nivel de prelucrare a datelor, s-a dezvoltat un subVI (Fig. 4.26 detaliul B4) care compensează această întârziere determinată anterior și realizează sincronizarea intrărilor de curent și tensiune ale SAPDM. Diagrama bloc aferentă acestui subinstrument virtual este prezentată în Fig. 4.43.

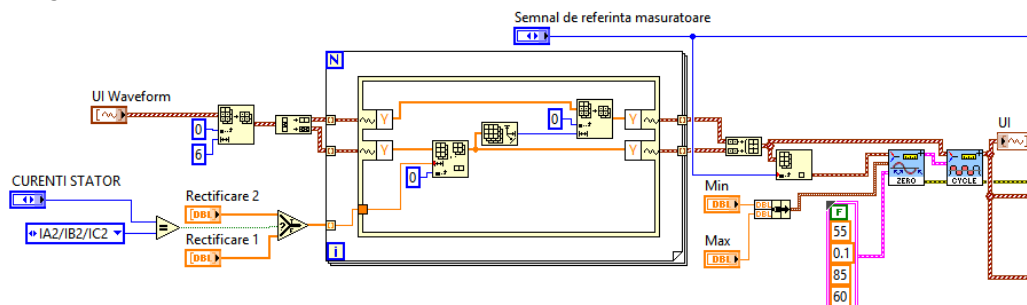


Fig. 4. 43. Diagrama bloc a subVI-ului dezvoltat pentru compensarea defazajului

În momentul în care utilizatorul selectează din fereastra de configurare a SAPDM (Fig. 4.22) intrări care sunt conectate la module de achiziție DSA, subVI-ul elimină primele 40 de eșantioane din valorile momentane ale mărimilor achiziționate de aceste module. Pentru ca numărul de eșantioane să fie egal pentru toate mărimile achiziționate, în cazul celorlalte forme de undă sunt eliminate ultimele 40 de eșantioane. De asemenea pentru a prelucra constant un număr întreg de perioade s-au folosit subVI-uri din biblioteca mediului LabVIEW care determină toate trecerile prin zero și apoi extrag un număr fix de perioade.

În aceleași condiții de testare, după aplicarea algoritmului prezentat anterior s-a obținut un defazaj de  $0,3^0$  (0,005 radiani), iar pentru o rată de eșantionare de 50 KS/s întârzierea a fost de 16  $\mu$ s. În acest caz forma de undă a tensiunii și curentului pe faza A corespunzătoare sarcinii rezistive folosite sunt prezentate în Fig. 4.44.

Deoarece algoritmul de compensare a defazajului prezentat anterior, este valabil doar pentru o rată de eșantionare de 50 ks/s, în cadrul variantei actuale a aplicației software a SAPDM utilizatorul nu poate modifica valoarea predefinită a ratei de eșantionare.

## 4.2. Sistem de achiziție de date dedicat testării mașinilor electrice 71

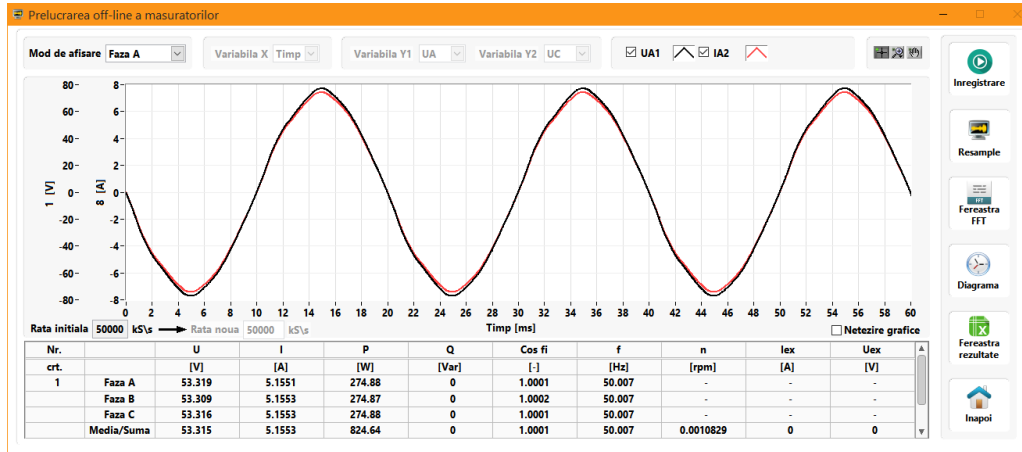


Fig. 4. 44. Forma de undă a tensiunii și curentului pe faza A pentru sarcina rezistivă folosită, după eliminarea defazajului

După eliminarea erorii cauzate de defazaj s-au reluat testele comparative dintre SAPDM și VPA323 în regimul de mers în gol a motorului asincron de 2,2 KW. Rezultatele obținute pentru tensiunea, curentul și puterea pe faza A sunt prezentate în tabelele 4.7 și 4.8. Rezultate asemănătoare s-au obținut și pentru faza B și C, motiv pentru care în continuare se prezintă doar cele pe FAZA A.

Tabelul 4. 7. Eroarea de măsurare pentru tensiunea și curentul de fază a motorului de 2,2 KW

Nr. Crt.	TENSIUNE DE FAZĂ			CURENT		
	VPA 323 [V <sub>rms</sub> ]	SAPDM [V <sub>rms</sub> ]	EROARE [%]	VPA 323 [A <sub>rms</sub> ]	SAPDM [A <sub>rms</sub> ]	EROARE [%]
1	70,93238	70,9673	0,049230	4,761950	4,76117	0,016380
2	71,05859	71,0857	0,038152	4,769710	4,76762	0,043818
3	71,03752	71,09	0,073876	4,767900	4,76973	0,038382
4	71,03184	71,0885	0,079767	4,767090	4,76791	0,017201
5	70,99932	71,0393	0,056310	4,764490	4,76421	0,005877
<b>MEDIE</b>	<b>71,01193</b>	<b>71,054160</b>	<b>0,059467</b>	<b>4,766228</b>	<b>4,766128</b>	<b>0,024331</b>

Tabelul 4. 8. Eroarea de măsurare pentru puterea activă a motorului de 2,2 KW

Nr. Crt.	PUTERE ACTIVĂ		
	VPA 323 [W]	SAPDM [W]	EROARE [%]
1	337,77593	338,068	0,086469
2	338,92818	339,495	0,167239
3	338,69898	339,118	0,123715
4	338,61491	339,306	0,204093
5	338,27520	338,943	0,197413
<b>MEDIE</b>	<b>338,45864</b>	<b>338,986</b>	<b>0,155786</b>

Din rezultatele obținute se observă faptul că eroarea determinată pentru tensiune este de 0,059467%, curent 0,024331% și 0,155786% pentru puterea activă. Deoarece VPA323 a fost verificat metrologic cu încadrarea în clasa de precizie 0,1 % pentru calculul puterii active, prin analogie se poate afirma faptul că **SAPDM** se

încadrează într-o clasă de precizie de **0,26%**. Această valoare corespunde limitelor impuse în standardele [ST3], [ST4] specifice pentru testarea mașinilor electrice de mică și mare putere. Rezultate asemănătoare s-au obținut la compararea metrologică a SAPDM cu un analizor de putere produs de LEM model NORMA D4000.

### 4.3. Concluzii

La începutul acestui capitol se prezintă o sinteză a principalelor elemente și noțiuni teoretice necesare pentru dezvoltarea unui sistem de achiziție și prelucrare a datelor. Pe baza acestei sinteze s-a dezvoltat apoi arhitectura hardware a SAPDM iar prin intermediul mediului NI LabVIEW s-au elaborat instrumente virtuale dedicate achiziției și prelucrării datelor pentru testarea mașinilor electrice.

Datorită corelării eficiente a componentelor hardware și a instrumentelor virtuale din cele două niveluri software de prelucrare, SAPDM prezintă următoarele avantaje:

- este un mijloc modern de testare a mașinilor electrice de putere mare, fiind constituit dintr-o structură modulară și flexibilă hardware și software;
- posibilitatea de a măsura cu precizie ridicată mărimile caracteristice mașinilor electrice de putere mare în regimuri periodice permanente, cvasiperiodice, regimuri cu amplitudine variabilă dar și regimuri tranzitorii;
- datorită gamei variate de domenii de achiziție, SAPDM permite testarea chiar a două generatoare sincrone simultan, situație care se întâlnește de cele mai multe ori în centralele hidroelectrice;
- posibilitatea perfecționării modelelor matematice și a schemelor echivalente cunoscute în literatura de specialitate, mai ales în cazul parametrilor variabili cu frecvența, sau a celor care depind de saturație; se oferă posibilitatea introducerii unor corecții în calculele de proiectare, prin efectuarea unor teste de finețe asupra prototipului la nivel industrial;
- ferestrele de interacțiune ale instrumentelor virtuale, dezvoltate pentru cele două niveluri de prelucrare software ale SAPDM sunt concepute în așa fel încât să asigure o acomodare rapidă și facilă a utilizatorului;
- SAPDM oferă aceeași precizie de măsurare ca un instrument tradițional de sine stătător, însă nu este condiționat de o singură configurație hardware.

Datorită construcției modulare hardware și software, este posibilă îmbunătățirea continuă, astfel încât SAPDM să fie înzestrat cu funcții noi ce permit seturi de proceduri îmbunătățite, pentru determinarea parametrilor și caracteristicilor mașinilor electrice.

Se poate afirma că **SAPDM** este o **contribuție personală** în cadrul lucrării de față datorită avantajelor și posibilităților multiple de implementare în mediul industrial pentru testarea mașinilor electrice de putere mare. De asemenea o altă **contribuție personală** ce poate fi luată în considerare, este **subVI-ul dezvoltat pentru eliminarea erorii de defazaj**, cauzată de folosirea unui șasiu cu o singură bază de timp și a modulelor de achiziție din seria NI CompactDAQ ce au în componență convertoare analogic numerice diferite (CAN Delta-Sigma și CAN cu aproximații succesive).



## 5. PROGRAME SPECIFICE DE ACHIZIȚIE ȘI PRELUCRARE A DATELOR PENTRU DIAGNOZA HIDROGENERATOARELOR

În cadrul acestui capitol se prezintă cel de-al doilea nivel de prelucrare software al SAPDM, prin intermediul căruia se determină mărimile caracteristice mașinilor electrice de putere mare, pe baza unor seturi de teste și proceduri specifice de prelucrare de date. Aceste proceduri au fost elaborate în scopul de a îmbunătăți performanțele de funcționare a hidrogenatoarelor sincrone verticale de putere mare și pentru a diminua, în unele cazuri a elimina, principalele cauze care conduc la scoaterea din funcțiune a acestora. Având în vedere cheltuielile ridicate necesare pentru realizarea unei amenajări hidroenergetice, este foarte important ca fiabilitatea echipamentelor ce intră în componența acestora să fie ridicată.

Instalarea și executarea aplicației dezvoltate pentru al doilea nivel de prelucrare software este identică cu cea prezentată în capitolul 4 pentru nivelul primar și nu va mai fi prezentată în continuare. Fereastra principală a aplicației este prezentată în Fig. 5.1. Fiecare buton din cadrul acesteia va lansa instrumente virtuale special dezvoltate pentru diferite metode și proceduri care se vor prezenta în detaliu în subcapitolele următoare.

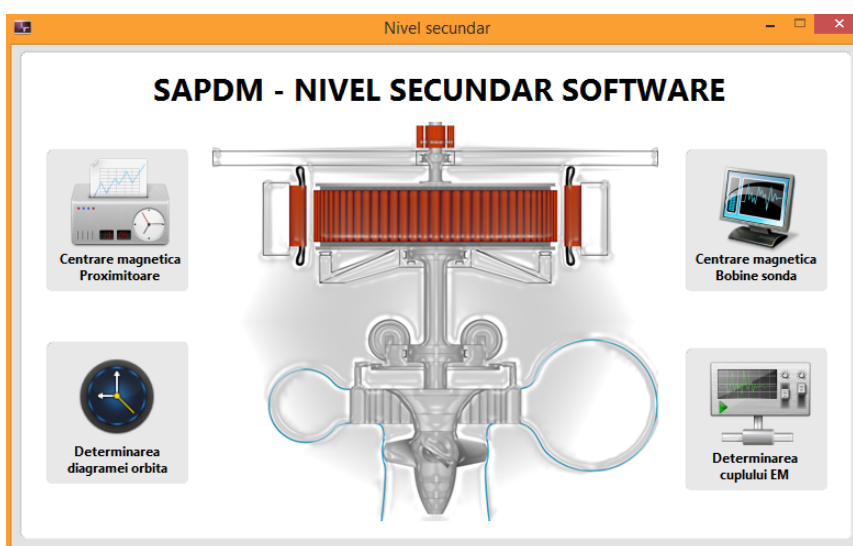


Fig. 5. 1. Fereastra principală a aplicației dezvoltate pentru nivelul secundar al SAPDM

În Fig. 5.2 se prezintă principalele instrumente virtuale dezvoltate în cadrul tezei pentru nivelul secundar al SAPDM.

Trebuie specificat faptul că în cadrul acestui capitol se prezintă doar aspectele teoretice, practice și aplicațiile software dezvoltate în mediul LabVIEW ale metodelor și procedurilor propuse. Aplicațiile în mediul industrial ale acestor metode și proceduri se vor prezenta în capitolul 6.

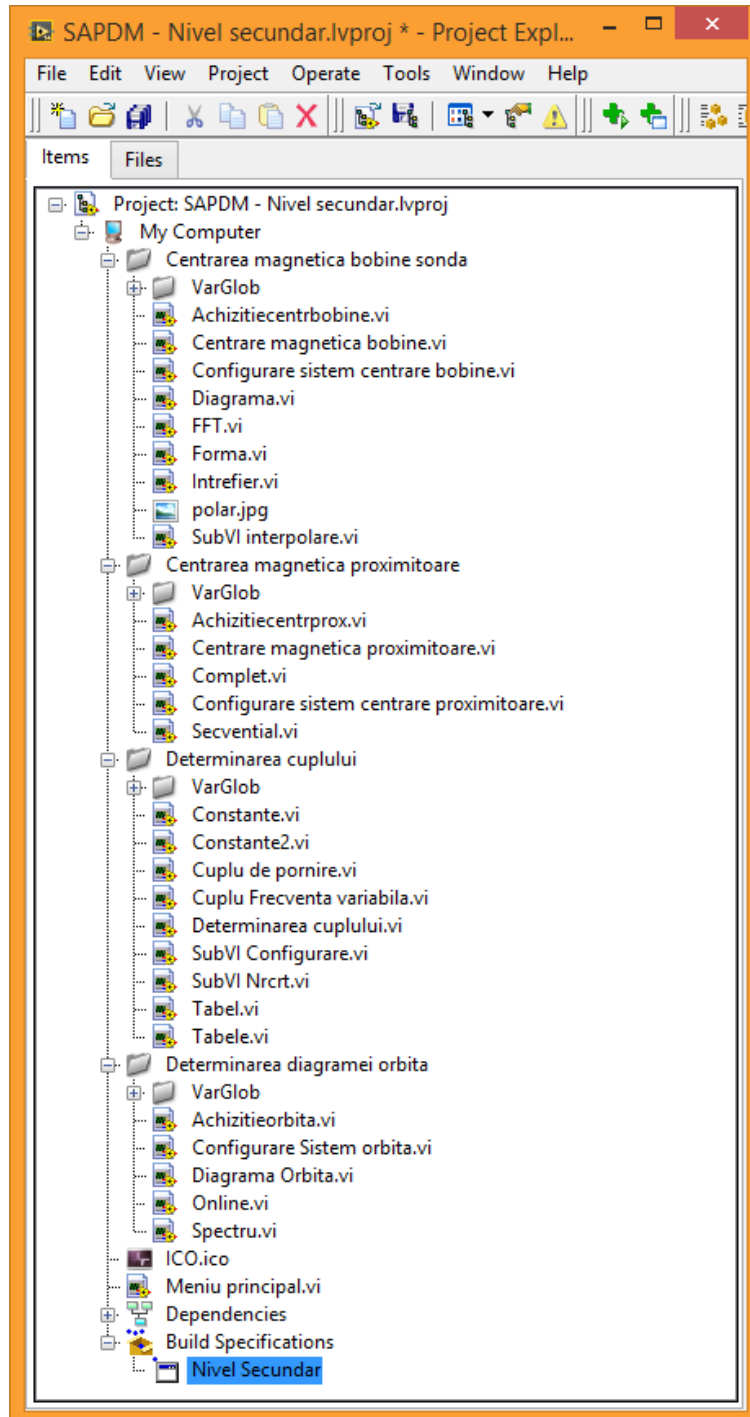


Fig. 5. 2. Fereastra proiectului creat în LabVIEW pentru al doilea nivel software al SAPDM

## 5.1. Centrarea în câmp magnetic a rotoarelor hidrogenatoarelor

În cadrul lucrărilor de montaj se pune accent pe respectarea procedurilor de asamblare, verificându-se în prealabil și calitatea execuției diferitelor subansamble, înainte de montarea lor. Principalele operații de montaj constau în așezarea statorului pe fundație, introducerea rotorului în stator, montarea lagărelor, realizarea liniei de arbori generator-turbină, centrarea mecanică a rotorului, măsurarea întrefierului și realizarea jocurilor în lagăre. Tehnologia clasică de centrare a rotorului în stator are în vedere obținerea unui întrefier uniform din punct de vedere geometric, al cărui valoare să se încadreze în limitele prevăzute în documentația tehnică a mașinii.

În practică s-au întâlnit multe cazuri în care HG a fost centrat corect din punct de vedere mecanic, însă la punerea în funcțiune s-a înregistrat un nivel ridicat de vibrații mai ales la funcționarea în regim excitat al mașinii. Acest fapt se datorează prezenței unor forțe magnetice unilaterale de dezechilibru ale căror mărime și sens depind de poziția rotorului în câmpul magnetic rezultat al mașinii.

Funcționarea hidrogenatoarelor sincrone verticale este condiționată de rezultanta forțelor tangențiale ce determină mișcarea ansamblului rotor turbină-rotor hidrogenerator, forțe ce sunt atât de natură hidraulică cât și de natură electromagnetică [P8], [P10]. Rezultanta acestora imprimă rotorului o anumită dinamică de care depind în foarte mare măsură performanțele de funcționare ale hidrogenatorului.

În același timp însă, asupra rotorului acționează forțe radiale de natură electromagnetică, care în cazul unui stator, respectiv rotor perfect rotund, se anulează reciproc. În cazul în care mașina prezintă un anumit grad de neuniformitate a întrefierului, rezultanta forțelor radiale este diferită de zero și ca urmare apare o forță rezultantă unilaterală care va avea tot timpul aceeași direcție și sens [P8], [P10]. Această forță poartă denumirea de **forță magnetică unilaterală de dezechilibru (UMP – unbalanced magnetic pull)** și influențează în sens negativ dinamica rotorului.

O funcționare corespunzătoare a hidrogenatoarelor presupune ca dinamica rotorului să nu fie perturbată de forțe de dezechilibru de natură magnetică sau mecanică. Cele din urmă se pot elimina ușor prin echilibrarea dinamică a rotorului, însă în cazul forțelor de natură magnetică este necesară aplicarea unor proceduri specifice complexe.

În cadrul acestui subcapitol se prezintă o **metodologie** de punere în evidență a acestei forțe magnetice unilaterale de dezechilibru [P9] și folosind instrumente virtuale special dezvoltate se propun două **proceduri** de compensare a acestei forțe prin centrarea magnetică a rotorului. Aceste VI-uri fac parte din nivelul secundar de prelucrare software al SAPDM.

### 5.1.1. Considerații generale privind UMP

În literatura de specialitate există numeroase lucrări care pun în evidență existența și efectul UMP prin diferite metode analitice sau metoda elementului finit (*FEM*) folosind principiul forțelor generalizate sau tensorul Maxwell. Majoritatea metodelor analitice folosesc rotorul Jeffcott-Laval care este un model de rotor cu un arbore elastic de masă neglijabilă, rezemat la capete în lagăre rigide [R7].

Hidrogenatoarele sunt echipamente electrice ce realizează conversia energiei hidraulice în energie electrică. Rotorul hidrogenatorului fiind antrenat din

exterior cu o putere mecanică dată de turbina hidraulică, transmite energia mecanică primită spre stator sub formă de energie electromagnetică prin intermediul câmpului electromagnetic din întrefier.

În general câmpul electromagnetic este caracterizat prin patru mărimi vectoriale [C11], [L5]:

- intensitatea câmpului electric ( $\vec{E}$ );
- inducția electrică ( $\vec{D}$ );
- intensitatea câmpului magnetic ( $\vec{H}$ );
- inducția magnetică ( $\vec{B}$ ).

Cele patru mărimi vectoriale definesc starea energetică a câmpului electromagnetic din întrefier prin intermediul densității de volum a energiei electromagnetice ( $W_e$ ):

$$w_e = \frac{\vec{E} \cdot \vec{D}}{2} + \frac{\vec{H} \cdot \vec{B}}{2} \quad (5.1)$$

Energia totală din întrefier ( $W_e$ ) va fi integrala densității de energie pe volumul  $v$ , corespunzător spațiului din întrefier [L3]:

$$W_e = \frac{1}{2} \int_v (\vec{E} \cdot \vec{D} + \vec{H} \cdot \vec{B}) dv \quad (5.2)$$

Întrucât în întrefier câmpul electric este neglijabil, energia echivalentă poate fi considerată în totalitate de natură magnetică ( $W_m$ ) [L5]:

$$W_m = \frac{1}{2} \int_v (\vec{H} \cdot \vec{B}) dv \quad (5.3)$$

În timpul funcționării HG, atât miezul magnetic al statorului cât și cel al polilor se magnetizează, astfel în întrefier apar forțe magnetice de interacțiune între cele două părți feromagnetice.

Conform teoremei forțelor generalizate, în condițiile în care fluxul magnetic  $\Phi$  este constant, forțele ce apar într-un câmp magnetic după o anumită direcție  $x$ , sunt definite prin relația [N2]:

$$f_x = -\left(\frac{\partial W_m}{\partial x}\right)_{\Phi=ct} \quad (5.4)$$

Astfel, forțele care apar după anumite direcții în întrefier depind de modul de variație a energiei în întrefier. Densitatea de volum a energiei magnetice poate fi, sau nu, constantă în întrefier după diferite direcții.

Dacă densitatea de energie este constantă după toate direcțiile (Fig. 5.3) atunci și inducția magnetică este constantă după diferite direcții ale întrefierului. În acest caz ideal, forța rezultantă pe direcție radială ce acționează asupra rotorului va fi nulă.

Spunem în acest caz că armătura magnetică a rotorului se rotește corespunzător față de armătura magnetică a statorului sau că **rotorul** este **centrat**

### 5.1. Centrarea în câmp magnetic a rotoarelor hidrogenatoarelor 77

**magnetic** față de stator. Se poate enunța astfel condiția necesară pentru o centrare magnetică corespunzătoare: densitatea de volum a energiei magnetice să fie constantă după toate direcțiile.

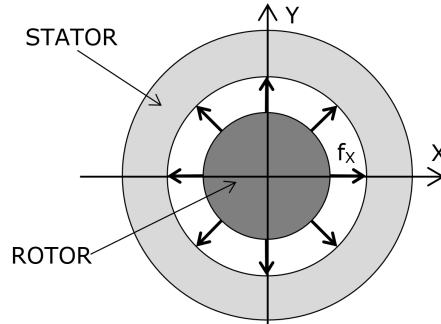


Fig. 5. 3. Repartiția forțelor în întrefier în cazul în care densitatea de energie este constantă

În al doilea caz (Fig. 5.4) când densitatea de volum a energiei magnetice nu este constantă după toate direcțiile, forțele ce apar după diferite direcții radiale nu vor fi egale.

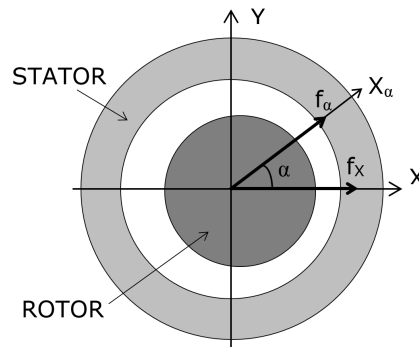


Fig. 5. 4 Repartiția forțelor în întrefier în cazul în care densitatea de energie nu este constantă

Dacă se consideră forța  $f_\alpha$  după o direcție radială  $X_\alpha$ , dependentă de unghiul  $\alpha$  (Fig. 5.4) aceasta se poate determina folosind relația [N3], [L6], [S17]:

$$f_\alpha = -\left(\frac{\partial W_m}{\partial X_\alpha}\right) \quad (5.5)$$

Forța magnetică unilaterală de dezechilibru va fi chiar rezultanta ( $R$ ) a celor 2 forțe  $f_\alpha$  și  $f_x$  definită de relația [N1, L1]:

$$f_e = R = \int_{\alpha=0}^{2\pi} f_\alpha dX_\alpha \quad (5.6)$$

Astfel, în timpul funcționării, asupra rotorului se va exercita o forță radială rezultantă diferită de zero, a cărei mărime este dependentă de neuniformitatea densității de volum a energiei magnetice din spațiul întrefierului.

În acest caz spunem că există o **descentrare magnetică** a rotorului față de stator determinată de prezența forței magnetice unilaterale de dezechilibru.

Datorită neuniformității întrefierului, descentrarea magnetică există chiar și în condițiile unei centrări geometrice (mecanice) controlate. Această neuniformitate este cauzată de abaterile de la forma circulară a rotorului (Fig. 5.5 A) respectiv a statorului (Fig. 5.5 B) sau excentricitatea  $\varepsilon$  rotorului față de stator (vezi Fig. 5.6).

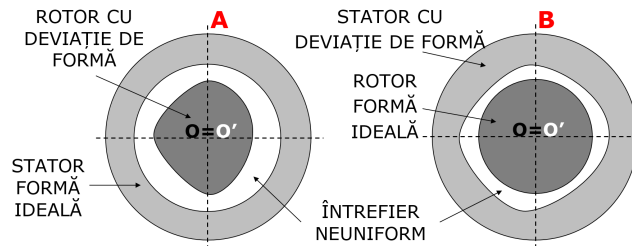


Fig. 5. 5. Reprezentare celor două cazuri de abateri de la forma circulară a rotorului (A) sau a statorului (B)

Dacă în timpul funcționării, centrul arborelui rotorului  $O'$  nu are o poziție constantă în timp, HG prezintă o excentricitate dinamică, iar dacă aceasta are o poziție constantă diferită de centrul statorului  $O$  se consideră o excentricitate statică.

În cazul în care nu există abateri de formă, excentricitatea statică a rotorului față de stator poate fi exprimată sub forma [N3]:

$$\varepsilon = \frac{\Delta r}{\bar{\delta}_n} \quad (5.7)$$

unde  $\Delta r$  - deplasarea pe direcția radială a centrului arborelui rotorului ( $O'$ ) în raport cu centrul statorului ( $O$ ) [mm];  
 $\bar{\delta}_n$  - valoare medie a întrefierului [mm] determinată conform relației:

$$\bar{\delta}_n = R_s - R_R \quad (5.8)$$

unde  $R_s$  - raza statorului;  
 $R_R$  - raza rotorului.

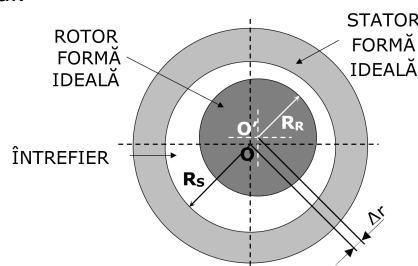


Fig. 5. 6. Reprezentare excentricității rotorului față de stator

Valoarea forței magnetice unilaterale de dezechilibru  $f_e$  în cazul unei mașini electrice rotative caracterizată de excentricitate statică, sau dinamică, se poate

### 5.1. Centrarea în câmp magnetic a rotoarelor hidrogenatoarelor 79

determina prin integrarea proiecțiilor pe orizontală și verticală a tensorului Maxwell [B17], [B18]:

$$f_e = \frac{\mu_0 S_s^2 R_s^3 h \pi}{2 \rho^2 \delta_n^2} \cdot \frac{\varepsilon}{\sqrt{(1 - \varepsilon^2)^3}} \quad (5.9)$$

unde  $S_s$  - densitatea de curent statoric [A/m];

$p$  - numărul de perechi de poli;

$h$  - lungimea rotorului [m];

$\mu_0$  - permeabilitatea mediului din întrefier;

Dezechilibrul maxim ( $U_{per}$ ) conform ISO 1940 [ST5] se calculează conform relației:

$$U_{per} = m \frac{G \cdot 1000 \cdot 30}{\pi n_n} \quad [mm \cdot g] \quad (5.10)$$

unde  $G$  - gradul de calitate definit pe baza valorilor dezechilibrului rezidual definit în [ST5]. Pentru HG gradul de calitate recomandat este  $G=6,3$  mm/s sau [M1];

$m$  - masa rotorului [Kg];

$n_n$  - turația de lucru a mașinii [rpm].

Există situații în care hidrogenatorul poate prezenta atât excentricitate statică sau dinamică precum și abateri de formă rotor și/sau stator. În acest caz neuniformitatea întrefierului conduce la fenomene complexe de instabilitate a rotoarelor ce pot cauza defecțiuni majore sau chiar scoaterea din funcțiune a HG. Clasificarea acestor tipuri de neuniformități sunt prezentate în detaliu în [N2], [N4]:

- excentricitate statică și rotor cu deviație de forma ovală sau triunghiulară;
- stator cu deviație ovală de formă și rotor cu deviație triunghiulară;
- stator cu deviație triunghiulară și rotor oval.

Tipul de excentricitate se poate aprecia prin analiza spectrului de frecvență a densității fluxului magnetic [B16]:

- excentricitatea statică determină creșterea amplitudinii armonicii de bază;
- excentricitățile dinamice induc pe lângă armonica fundamentală, armonici de 25 Hz și 75Hz cu amplitudine considerabilă;
- excentricitatea mixtă (statică și dinamică) este caracterizată prin suprapunerea celor 2 spectre de frecvență obținute în cazurile anterioare.

Rezultatele oferite de literatura de specialitate arată că prin analiza în domeniul frecvență a densității fluxului magnetic din întrefier se poate diferenția excentricitatea statică de cea dinamică, fiecare fiind caracterizată de un anumit ordin în spectrul de frecvență.

Folosind rotorul Jeffcott-Laval și metoda numerică Newmark pentru cazul unui generator trifazat care prezintă excentricitate dinamică și statică, în [D3] se determină două componente în domeniul frecvență a UMP. O componentă continuă și una oscilatorie care variază cu dublul frecvenței de alimentare.

În cazul unei mașini cu numărul de perechi de poli mai mare de trei este prezentă doar componentă continuă care are o variație neliniară și care conduce la vibrații cu componente spectrale de ordinul 2 sau 3. Hidrogenatoarele fiind mașini electrice rotative cu număr mare de poli, în cazul acestora se poate considera doar componenta continuă în calculul UMP.

Așa cum este prezentat în [D5], [R8], [T6], UMP are o variație liniară pentru o excentricitate de 10% iar pentru o excentricitate mai mare, aceasta va crește exponențial. În cazul studiat în [R8] pentru o mașina rotativă cu excentricitate 27% valoarea UMP crește cu 40% față de valoarea determinată în cazul excentricității inițiale de 10%.

Forța magnetică unilaterală de dezechilibru este determinată de două componente: o componentă radială  $f_{eR}$  care acționează în direcția întrefierului minim și o componentă perpendiculară pe aceasta denumită tangențială  $f_{eT}$ , care apare în cazul mașinilor sincrone prevăzute cu colivii de amortizare [Y6]. Pentru mașină rotativă cu numărul mai mare de 3 perechi poli și o excentricitate sub 10% aceste componente se pot determina conform relațiilor [L2]:

$$f_{eR} = k_R \Delta r \quad (5.11)$$

$$f_{eT} = k_T \Delta r \quad (5.12)$$

unde  $k_R$  și  $k_T$  reprezintă coeficienți de material după direcția radială, respectiv tangențială;

În studiul de caz prezentat în [L6] folosind FEM se modelează un hidrogenerator de 240 MW în scopul obținerii evoluției UMP în diferite regimuri de funcționare ale mașinii. În urma rezultatelor simulării se constată următoarele:

- variația UMP în regimul de mers în gol excitat are o creștere liniară în raport cu excentricitatea;
- valoarea UMP crește odată cu creșterea curentului de excitație al mașinii;
- valoarea forței magnetice unilaterale de dezechilibru rămâne aproximativ constantă la diferite încărcări ale HG.

### 5.1.2 Influența UMP asupra performanțelor de funcționare a HG

Forța magnetică unilaterală de dezechilibru ce acționează asupra rotorului unui HG ce prezintă neuniformități, conduce la solicitări suplimentare mecanice și termice în lagăre și implicit în steaua HG [C9]. Aproximativ 40 % din avariile din centralele hidroelectrice sunt cauzate de îmbătrânirea prematură a lagărelor [K7].

Pentru aprecierea solicitărilor mecanice și implicit a forțelor suplimentare din lagăre, se folosesc timbre tensometrice grupate în punte Wheatstone montate în fiecare braț al stelei HG [D5], [M7], [M8], [R9]. Pentru achiziția și prelucrarea semnalele furnizate de punțile Wheatstone se folosesc în general SAPD.

Pentru a elimina diverse zgomote parazite ce pot influența măsurătorile se recomandă amplificarea semnalelor și folosirea unui filtru trece jos de 200 Hz și trece sus de 8 Hz [R3]. Valorile componentelor pe două direcții perpendiculare a acestor forțe suplimentare în lagăre se determină conform relațiilor [M8]:

$$f_x = \sum_{i=1}^n f_i \sin(\varphi_i) \quad (5.13)$$

$$f_y = \sum_{i=1}^n f_i \cos(\varphi_i) \quad (5.14)$$



## 5.1. Centrarea în câmp magnetic a rotoarelor hidrogeneratoarelor 81

unde  $f_i$  - valoarea măsurată de timbrele tensometrice în poziția  $i$ ;  
 $f_x$  și  $f_y$  - componentele UMP pe direcția X și Y;  
 $\varphi_i$  - unghiul dintre axa Y și poziția în care este montată puntea Wheatstone;  
 $n$  - numărul de brațe ale stelei HG.

În cazul unui hidrogenerator de 30 MW variația forțelor suplimentare induse în lagăre, în funcție de excentricitate este prezentată în Fig. 5.7. Rezultatele prezentate sunt obținute prin simularea numerică a dinamicii rotorului HG folosind aplicația RAPPID-RDA™ pentru diferite valori ale excentricității dinamice [M7].

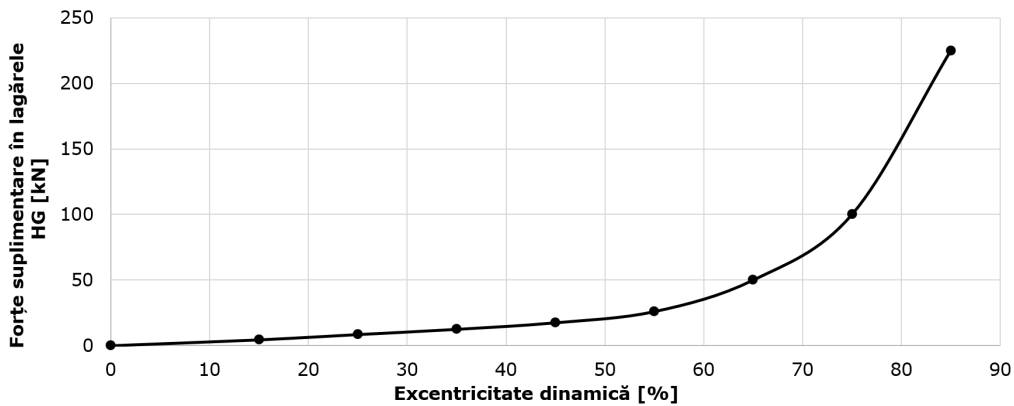


Fig. 5. 7. Variația forțelor suplimentare induse în lagărele HG de 30 de MW la diferite valori de excentricitate

Un alt efect al forței magnetice unilaterale de dezechilibru este scăderea randamentului odată cu creșterea pierderilor mașinii [A9], [A10], [A11]. În studiul de caz prezentat în [A9] pentru un HG de 122,6 MVA se constată o creștere a pierderilor în fier de 20%.

Pentru diferite valori și tipuri de excentricitate în [A10] se determină variația pierderilor suplimentare raportate la pierderile totale calculate pentru cazul ideal fără excentricitate. Rezultatele sunt prezentate în Fig. 5.8.

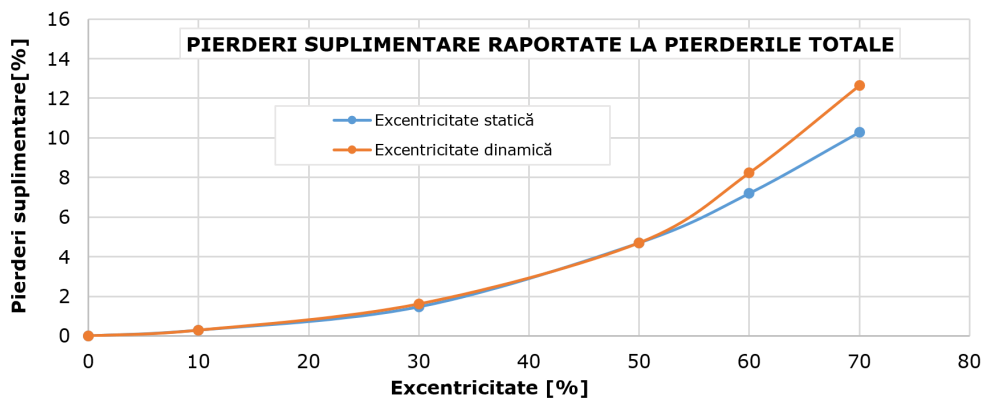


Fig. 5. 8. Variația pierderilor suplimentare raportate la pierderile totale ale mașinii pentru diferite valori ale excentricității

Din Fig. 5.7 și Fig. 5.8 se observă o variație liniară a forțelor suplimentare din lagăre și a pierderilor suplimentare, până la o excentricitate de 10% a mașinii. Deoarece forța magnetică unilaterală de dezechilibru are o variație liniară până la o valoare de 10% a excentricității, se obține astfel o corelație între UMP, pierderile suplimentare și forțelor suplimentare din lagăre. Se poate considera astfel că valorile obținute pentru o excentricitate de 10% sunt ne semnificative și nu pot influența considerabil performanțele mașinilor testate.

Este unanim recunoscut faptul că cel mai important efect al UMP este creșterea nivelului de vibrații induse în lagărele hidrogeneratoarelor. Acest aspect este foarte important deoarece nivelul de vibrație poate decide dacă mașina poate sau nu să funcționeze la parametrii impuși în caietul de sarcini de către producător.

O sinteză a tuturor standardelor necesare pentru a diagnostica mașinile electrice rotative din punct de vedere al vibrațiilor este prezentată în [D4]. Pentru hidrogeneratoarele cu putere activă mai mare de 1MW și turația cuprinsă între 120 și 1800 RPM, nivelul de vibrație admisibil pentru părțile rotitoare este prezentat în ISO 7919-5 [ST6] iar pentru părțile staționare în ISO 10816-5 [ST7]. Valorile recomandate sunt împărțite pe patru zone distincte (A, B, C, D) care definesc starea tehnică a mașinii electrice rotative după cum urmează:

- Zona A – hidrogeneratorul poate funcționa fără ca nivelul de vibrație să influențeze negativ performanțele de funcționare;
- Zona B – mașina poate funcționa pentru o lungă durată fără nici o restricție;
- Zona C – HG poate funcționa pentru o perioadă limitată de timp;
- Zona D – nivelul de vibrație este capabil să producă avarii majore ale mașinii conducând în final la scoaterea din funcțiune a acesteia.

În cazul hidrogeneratoarelor verticale la care lagărul radial axial superior (LRAS) este fixat pe carcasa statorului și lagărul radial inferior (LRI) este fixat în fundația centralei hidroelectrice, valorile vibrațiilor absolute și relative recomandate [ST7] sunt prezentate în Tabelul 5.1. Amplitudinea vibrațiilor absolute este exprimată ca valoarea RMS iar cele relative ca valoarea Vârf-Vârf iar banda de frecvențe este de 10-1000 Hz.

Tabelul 5. 1. Nivel de vibrație recomandat de ISO 10816-5 pentru mașinile verticale cu LRAS fixat pe carcasă și LRI fixat în fundația hidrocentralei

Zona limită	Valori LRAS		Valori LRI și lagăr turbină	
	Vibrație absolută [mm/s]	Vibrație relativă [ $\mu\text{m}$ ]	Vibrație absolută [mm/s]	Vibrație relativă [ $\mu\text{m}$ ]
A/B	2,5	65	1,6	30
B/C	4,0	100	2,5	50
C/D	6,4	160	4,0	80

Vibrația relativă este definită ca fiind mișcarea (deplasarea) unui corp solid față de un punct de referință fix în spațiu. În cazul hidrogeneratoarelor, vibrația relativă a rotorului se măsoară folosind traductoare de proximitate montate pe subansamble considerate rigide. În schimb vibrația absolută este definită ca fiind oscilația unui corp solid față o referință care nu este fixă, mișcarea corpului în acest caz se numește absolută. Pentru măsurarea vibrației absolute se folosesc accelerometre sau captori de viteză.

Cele trei tipuri de traductoare amintite anterior se diferențiază atât prin tipul de vibrație pe care îl măsoară cât și prin domeniul de frecvență specific [R10]:

- 0-1000 Hz pentru traductoare de proximitate;

### 5.1. Centrarea în câmp magnetic a rotoarelor hidrogenatoarelor 83

- 10-3000 Hz în cazul captorilor de viteză;
  - 20 Hz-20000 Hz pentru accelerometre.
- Fiecare tip de traductor prezintă de asemenea avantaje și dezavantaje în funcție de condițiile de lucru și caracteristicile tehnice ale acestora. Se prezintă aceste aspecte conform [R10], [W11].
- Traductoare de proximitate
    - o *Avantaje:*
      - oferă posibilitatea de a evalua atât mișcarea cât și poziția relativă a arborelui rotorului, fără a influența prin contact măsurătoarea;
      - nu au în componență părți în mișcare;
      - răspuns în frecvență foarte bun pentru diagnoza mașinilor electrice rotative;
      - pot funcționa în diferite medii ambiante, măsurătoarea nefiind influențată de ulei, majoritatea gazelor sau abur;
      - oferă informații asupra fazei și amplitudinii mișcării rotorului chiar și la frecvențe joase;
      - impedanță joasă de ieșire.
    - o *Dezavantaje:*
      - sunt sensibile la unele defecte mecanice ale arborelui deoarece sesizează orice neregularitate cum ar fi zgârieturi, incluziuni de carbon, variații de duritate;
      - necesită o sursă externă de alimentare.
  - Traductoare de viteză
    - o *Avantaje:*
      - semnalul generat în banda frecvențelor medii este puternic, nefiind necesară amplificarea acestuia;
      - ușor de montat deoarece se montează în exteriorul mașinii;
      - nu necesită condiționare de semnal;
      - pot funcționa la temperaturi înalte.
    - o *Dezavantaje:*
      - semnalul generat poate prezenta erori în amplitudine și fază pentru frecvențe joase;
      - au tendința de a accentua componentele de frecvență înaltă;
      - gabarit și greutate mare.
  - Accelerometre
    - o *Avantaje:*
      - răspuns în frecvență foarte bun la frecvențele înalte;
      - dimensiuni și greutate redusă;
      - pot funcționa la temperaturi relativ înalte.
    - o *Dezavantaje:*
      - datorită răspunsului foarte bun la frecvențe înalte pot amplifica zgomotul provenit de la diverse surse externe;
      - necesită amplificator de sarcină sau adaptare de impedanță;
      - sunt dificil de montat pe carcasa mașinii pentru o măsurare corectă deoarece sunt foarte sensibile la vibrații parazite;
      - necesită filtrarea semnalului generat.
- Conform [ST6] amplitudinea maximă și vârf-vârf a vibrației relative admisibile a arborelui rotorului unui hidrogenator vertical pentru cele patru zone distincte este prezentată în Fig. 5.9.

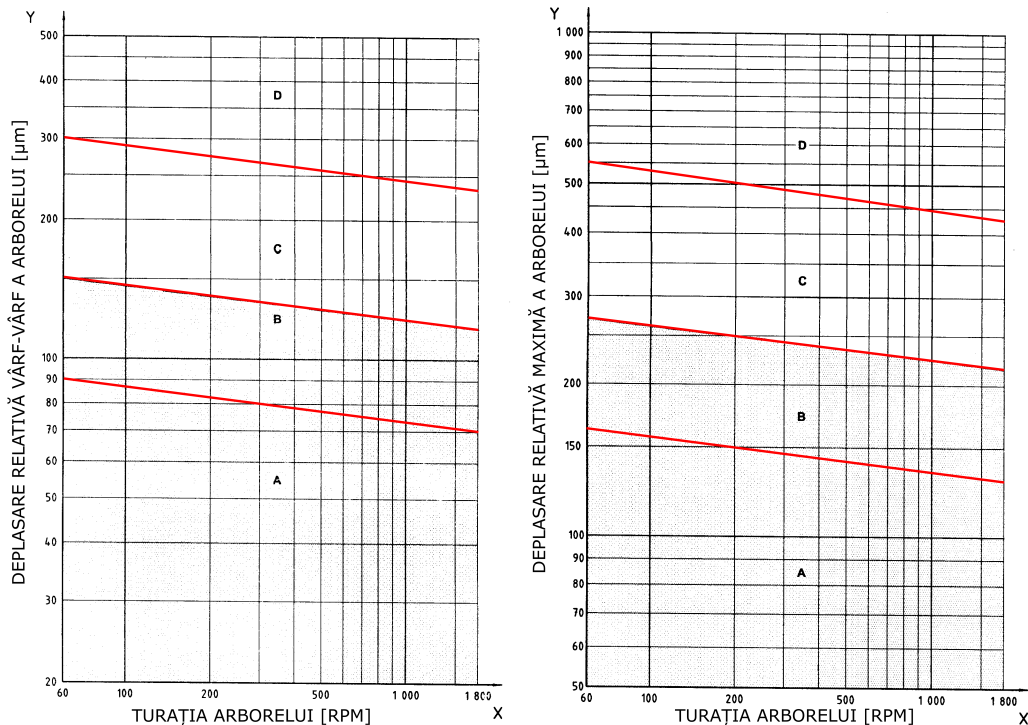


Fig. 5. 9. Amplitudinea maximă și vârf-vârf a vibrației relative a rotorului unui HG conform ISO 7919-5

Din analiza spectrului de vibrații absolute se obțin informații utile asupra fenomenului electromagnetic ce conduce la apariția UMP. Este important a se studia și remedia cauza acestor fenomene dăunătoare și nu efectul lor [C10]. În standardul ISO 13373-1 [ST8] se prezintă principalele caracteristici în domeniul frecvență al vibrațiilor absolute, cu specificarea fiecărui defect indus de componentele spectrale ale acestora. Deoarece aceste probleme sunt cunoscute din literatură de specialitate, în continuare se prezintă doar acele aspecte necesare pentru a înțelege rezultatele experimentale prezentate în capitolul 6.

Componentele din cadrul spectrului vibrațiilor absolute pot fi împărțite în patru zone distincte [B19]:

- linii spectrale amplasate sub turația de lucru;
- componenta fundamentală corespunzătoare turației arborelui mașinii notată de obicei cu X1;
- linii spectrale armonice în intervalul X1-X10 sau între X1 și armonica corespunzătoare paletelor rotorice;
- linii spectrale peste frecvența maximă prezentate anterior;

În cazul unui dezechilibru mecanic sau magnetic al rotorului, spectrul de frecvență al vibrațiilor va prezenta în plan radial o amplitudine ridicată a liniei spectrale X1, care variază cu pătratul turației.

Dacă în spectrul vibrațiilor, pe lângă X1 este prezentă și armonica X2 atunci hidrogenatorul prezintă o dezaliniere a arborilor (turbină, generator sau excitatoare). În cazul în care planul dominant al vibrațiilor este pe direcție radială atunci dezalinierea este paralelă iar pentru direcția axială, aceasta este unghiulară.

### 5.1. Centrarea în câmp magnetic a rotoarelor hidrogeneratoarelor 85

De asemenea dacă X1 și X2 prezintă amplitudini ridicate atât în direcție axială cât și radială iar diferența de fază dintre formele de undă achiziționate pentru cele două direcții este de  $180^{\circ}$  atunci arborele rotorului este îndoit.

Un alt aspect important poate fi observat prin analiza liniilor spectrale amplasate sub X1. Dacă spectrul de vibrații conține amplitudini ridicate pentru subarmonica 0,5X și 0,25X atunci HG prezintă jocuri excesive în lagăre.

Amplitudini ridicate până și peste X5, X6, X6 sunt datorate atingerii (frecării) arborelui în lagărele mașinii, un aspect foarte important care poate conduce la avarierea mașinii.

Influența forței magnetice unilaterale de dezechilibru se poate evidenția prin măsurarea nivelului de vibrație absolută și compararea liniilor spectrale obținute în regimul stabilizat de mers în gol neexcitat și excitat la turația nominală a mașinii [B20], [M8]. Deoarece excentricitatea dinamică este consecință a UMP, spectrul de vibrații oferă informații prin care se pot diferenția cele două tipuri de excentricitate, statică și dinamică [P11].

În studiul de caz prezentat în [M9] pentru un HG de 90 MW se obține o corelație între nivelul de vibrație absolută, UMP, variația întrefierului și calitatea energiei electrice debitate de mașina electrică. Această corelație scoate în evidență faptul că defectele mecanice ale unei mașini electrice rotative sunt dependente de defectele de natură electrică și invers. Astfel, prin diminuarea efectului forței magnetice unilaterale de dezechilibru se reduc solicitările mecanice suplimentare însă se pot elimina și unele defecte de natură electrică.

În literatura de specialitate se prezintă diverse soluții moderne pentru diminuarea forței magnetice unilaterale de dezechilibru, dezvoltate folosind metode FEM sau metode analitice.

În condițiile în care înfășurările de fază ale statorului sunt formate din două circuite conectate în paralel, curenții de egalizare ce apar în timpul funcționării, constituie o metodă prin care se poate diminua influența UMP a componentei pe direcție radială de 25% [M10], [O2]. De remarcat este faptul că această soluție constructivă poate fi adoptată doar în cazul generatoarelor sincrone cu o puterea activă mai mare de 25 MW, unde se necesită micșorarea densităților liniare de curent.

În general colivile de amortizare din tălpile polare sunt destinate să acționeze doar în condiții de ieșire din sincronism a generatoarelor însă conform [D6], [M11] acestea au efect de reducere a UMP.

Dacă o mașină este prevăzută cu colivie de amortizare și înfășurările statorului sunt formate din două circuite puse în paralel se obține o atenuarea UMP de 51 % în regim de funcționare în sarcină [D6], [W12].

Un alt factor care influențează amplitudinea UMP este saturația jugului magnetic [R11], [T7], [T8]. În cazul unui HG de 11 MVA ce prezintă excentricitate statică de 20% valoarea UMP este limitată de saturație în regim de mers în gol excitat. În regim de mers în sarcină aceasta scade odată cu creșterea puterii active [P12]. În general gradul de saturație nu este același pentru toate HG iar în proiectarea generatoarelor sincrone se recomandă o saturație cât mai redusă a circuitului magnetic.

#### **5.1.3. Evidențierea forțelor magnetice unilaterale de dezechilibru prin monitorizarea diagramei orbită a rotorului**

Forțele magnetice unilaterale de dezechilibru influențează dinamica hidrogeneratoarelor prin modificarea axei de rotație. Acest fapt conduce la apariția unor fenomene cu efect distructiv, care la început nu se manifestă prin vibrații cu

amplitudine ridicată [T9], [B20], însă în timp conduc la uzura și îmbătrânirea prematură a lagărelor. Ca urmare, în timpul funcționării, axa geometrică a rotorului HG nu rămâne fixă în spațiu, centrul axei urmând o traiectorie arbitrară în afara centrului statorului.

Monitorizarea poziției axei de rotație a unui hidrogenerator în regim static sau dinamic, se realizează prin intermediul a două traductoare de proximitate inductive montate ortogonal pe direcțiile X-Y la nivelul fiecărui lagăr al mașinii [D7], [M12], [K7]. În cazul HG se preferă folosirea traductoarelor inductive în locul celor capacitive deoarece acestea sunt standardizate IP67.

Prin analiza în domeniul timp a semnalelor furnizate de traductoare inductive, se observă prezența a două componente [K8], [J4], [J5]:

- o componentă continuă proporțională cu distanța dintre arborele rotorului și traductoare;
- o componentă alternativă care corespunde vibrației relative a arborelui de-a lungul direcțiilor pe care sunt montate traductoarele.

Componenta continuă oferă informații asupra poziției relative a axei de rotație a HG atât în regim static cât și dinamic. Se obțin astfel informații asupra unor eventuale fenomene ce pot influența negativ starea tehnică a mașinii [B21], [B22], [B23]:

- excentricitatea dinamică și/sau statică;
- depășirea jocurilor admisibile în lagăre;
- dezalinierea arborilor generator-turbină-excitatoare;
- dezalinierea lagărelor;
- discontinuitatea filmului de ulei;
- prezența solicitărilor mecanice radiale suplimentare în lagăre.

După eliminarea componentei continue a semnalului furnizat de traductoare se obține un semnal alternativ periodic. **Diagrama orbită** este definită ca fiind **reprezentarea Lissajous a celor două componente alternative ale semnalelor furnizate de cele două traductoare de proximitate montate ortogonal la nivelul unui lagăr** [ST9], [K8]. Astfel, diagrama orbită reprezintă traiectoria centrelor de greutate ale secțiunilor transversale ale rotorului față de poziția traductoarelor, adică față de lagărele mașinii [J4], [J5]. În teoria vibrațiilor forțate amortizate diagrama orbită mai poartă denumirea de diagrama deplasare-forță și este definită ca fiind o buclă histerezis închisă a cărei suprafață este o măsură a energiei disipate prin amortizare [R10].

Spre deosebire de ansamblele staționare ale unui hidrogenerator, rotorul nu are o vibrație propriu-zisă, ci o mișcare de precesie [R7]. Dacă diagrama orbită are aceeași formă la diferite turații ale mașinii atunci mișcarea de precesie se numește stabilă, iar în caz contrar instabilă.

Metodologia după care se obține diagrama orbită, prin intermediul a două traductoare montate ortogonal pe direcția X (*Traductor X*) și direcția Y (*Traductor Y*) este prezentată în principiu în Fig.5.10. Poziția unghiulară (referința de fază) a arborelui rotorului este citită cu ajutorul unui traductor de turație incremental care la o turație completă, va genera un impuls de tip TTL. Forma de undă a vibrației relative măsurată pe direcția Y are o amplitudine Vârf-Vârf de 2  $\mu\text{m}$  iar cea pe direcția X de 1  $\mu\text{m}$ . Prin compunerea celor două forme de undă se obține diagrama orbită care are o forma eliptică datorită amplitudinilor diferite a celor două semnale măsurate.

Un aspect important al diagramei orbită îl constituie sensul vitezei unghiulare al mișcării de precesie. Dacă acesta coincide cu sensul de rotație al rotorului atunci mișcarea de precesie se numește directă iar în caz contrar inversă. Diferențierea

## 5.1. Centrarea în câmp magnetic a rotoarelor hidrogeneratoarelor 87

dintre cele două cazuri se realizează prin intermediul traductorului de turație incremental folosit ca referință de fază, conform Fig. 5.10.

Deoarece traductoarele de proximitate sunt montate în lagăre, valoarea semiaxe mari a elipsei denumită și raza de precesie maximă poate fi comparată cu jocul în lagăre [R10].

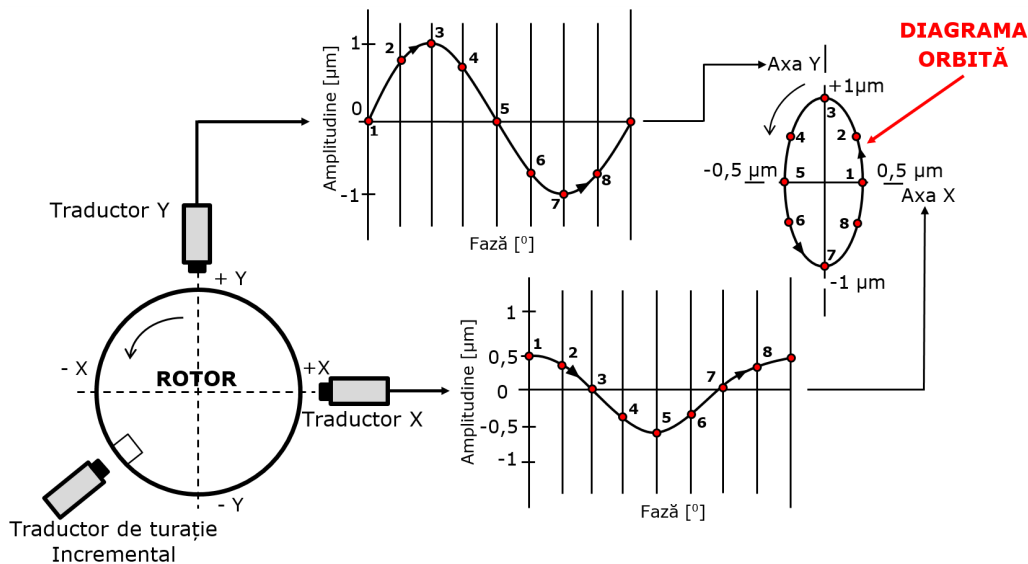


Fig. 5. 10. Principiul de determinare al diagramei orbită

Există două moduri de afișare a formei diagramei orbită [J5], [K8]:

- nefiltrată prin care se iau în considerare toate componentele spectrului vibrațiilor relative. În acest caz forma diagramei orbită este influențată și de eventuale zgomote sau alte semnale perturbatoare care pot conduce la o diagnosticare eronată a mașinii;
- filtrată la frecvența X1 specifică turației mașinii, caz în care se consideră doar vibrația relativă a arborelui rotorului, fără alți parametri externi.

Algoritmul matematic de filtrare al diagramei orbită este prezentat în detaliu în [S18], [W13] și nu va fi prezentat în cadrul acestei lucrări. Principiul acestuia constă în descompunerea în armonici a semnalelor furnizate de traductoarele de proximitate montate ortogonal și reconstituirea diagramei orbită sub formă filtrată prin compunerea celor două semnale folosind metoda spectrului de înaltă rezoluție.

În literatura de specialitate se specifică diferite forme ale diagramei orbită, definite în funcție de condițiile de funcționare a mașinii testate, dar și de unele eventuale defecte produse de solicitări suplimentare de natură electrică, termică sau mecanică. În Fig. 5.11 se prezintă forme tipice ale diagramei orbită [K8], [S18], [Z7].

În cazul în care dezechilibrul dinamic al rotorului este doar de natură mecanică, deci nu există forța magnetică unilaterală de dezechilibru, diagrama orbită are o formă circulară, considerată formă ideală (Fig. 5.11 A). Absența buclor în forma orbitei, indică o mișcare de precesie sincronă (directă) a cărei viteze unghiulare este egală cu turația rotorului.

Forma eliptică a diagramei orbită (Fig. 5.11 B) este cauzată de dezechilibrul dinamic de natură magnetică a rotorului, datorat neuniformității de întrefier. Deoarece

**UMP** este un efect al neuniformității de întrefier prezența acestor forțe magnetice unilaterale se pot **pune în evidență** prin forma specifică a **diagramei orbită** [P9]. În exemplul prezentat se poate observa acțiunea UMP asupra rotorului ce determină alungirea formei diagramei orbită.

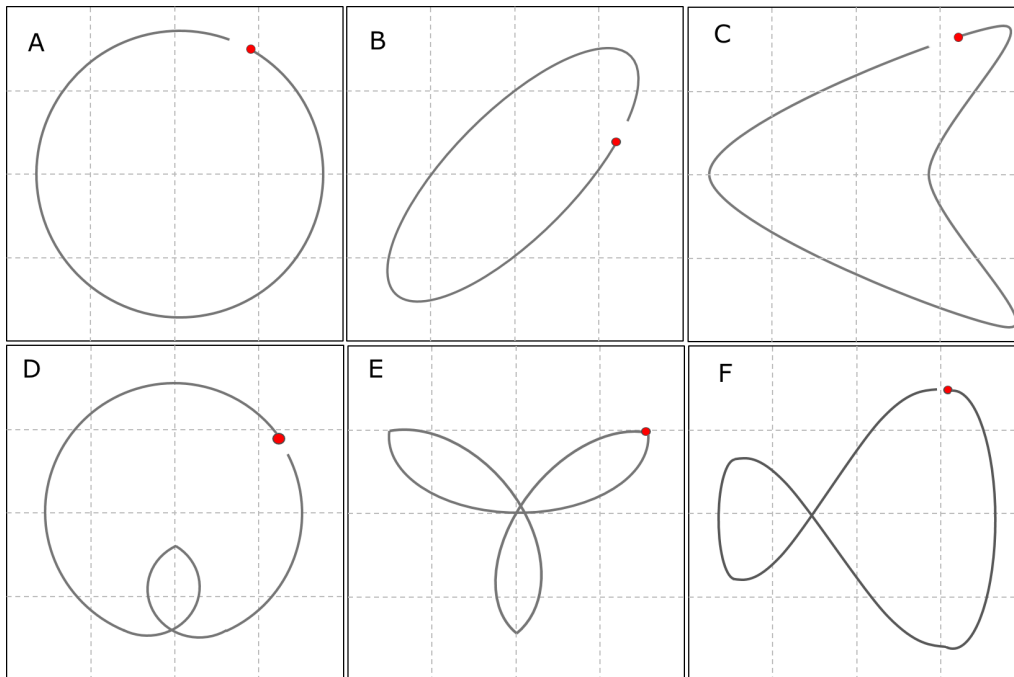


Fig. 5. 11. Forme ale diagramei orbită

În condițiile unui cuplaj mecanic necorespunzător al arborilor unei mașini electrice rotative diagrama orbită va avea forma din Fig. 5.11 C.

Dacă mișcarea de precesie este nesincronă (inversă) diagrama orbită prezintă bucle caracteristice precesiei de semi-frecvență. Această caracteristică se datorează instabilității mișcării rotorului în lagăre hidrodinamice. Dacă viteza unghiulară a mișcării de precesie este egală cu jumătate din turația rotorului fenomenul ce descrie instabilitatea lagărelor se numește "*oil whirl*"-precesie datorată peliculei de ulei (Fig. 5. 11 D). De asemenea dacă viteza unghiulară a mișcării de precesie este egală cu prima frecvență proprie a rotorului apare un fenomen foarte periculos ce poartă numele în literatura de specialitate de "*oil whip*"-precesia rezonantă (Fig. 5.11 E) [R12]. Denumirea celor doi termeni ce descriu fenomenele prezentate sunt adoptate din limba engleză și sunt consacrate.

Dacă se depășesc jocurile maxime admisibile în lagăre în timpul funcționării, rotorul mașinii poate intra în contact metalic cu pastilele suportilor de lagăr sau cu anumite părți staționare ale mașinii. Diagrama orbită definită de mișcarea de precesie inversă în aceste condiții este dată prezentată în Fig. 5.11 F.

În general pentru determinarea diagramei orbită se folosește un osciloscop cu două canale capabil să afișeze în coordonate XY cele două semnale furnizate de traductoarele de proximitate [R10]. **Metoda** de punere în evidență a forțelor magnetice unilaterale de dezechilibru, **propusă** în cadrul acestei lucrări constă în



## 5.1. Centrarea în câmp magnetic a rotoarelor hidrogeneratoarelor 89

determinarea și interpretarea formei diagramei orbită folosind instrumentația virtuală și SAPDM, ansamblu mult mai versatil, în locul unui osciloscop clasic [P9].

Forma diagramei orbită se poate determina folosind mediul LabVIEW, care oferă un modul dedicat analizei de vibrații, denumit "*Sound and Vibration Toolkit*" [H6], [H7], [S12]. Astfel, în cadrul celui de-al doilea nivel software al SAPDM s-au creat instrumente virtuale dedicate determinării și interpretării diagramei orbită în cazul hidrogeneratoarelor sincrone verticale de putere mare. Trebuie specificat faptul că modulul "*Sound and Vibration Toolkit*" oferă instrumente virtuale specifice analizei de vibrații cu domeniu larg de aplicare și nu dedicat doar hidrogeneratoarelor.

Pentru a lansa aplicația dezvoltată ce conține VI-urile amintite anterior, se apasă butonul "*Determinarea diagramei orbită*" din fereastra principală a aplicației dezvoltate pentru nivelul secundar software al SAPDM (Fig. 5.1).

În cadrul ferestrei din Fig. 5.12 utilizatorul poate vizualiza și salva formele de undă a semnalelor furnizate de cele două tipuri de traductoare. Primul grafic este aferent semnalului de tip impuls generat de senzorul optic folosit pentru măsurarea rotației, a cărui amplitudine (*Taho*) este exprimată în volți (V). Vibrațiile relative ale rotorului pe cele două direcții X și Y sunt reprezentate în cel de-al doilea grafic cu amplitudinea exprimată în microni ( $\mu\text{m}$ ).

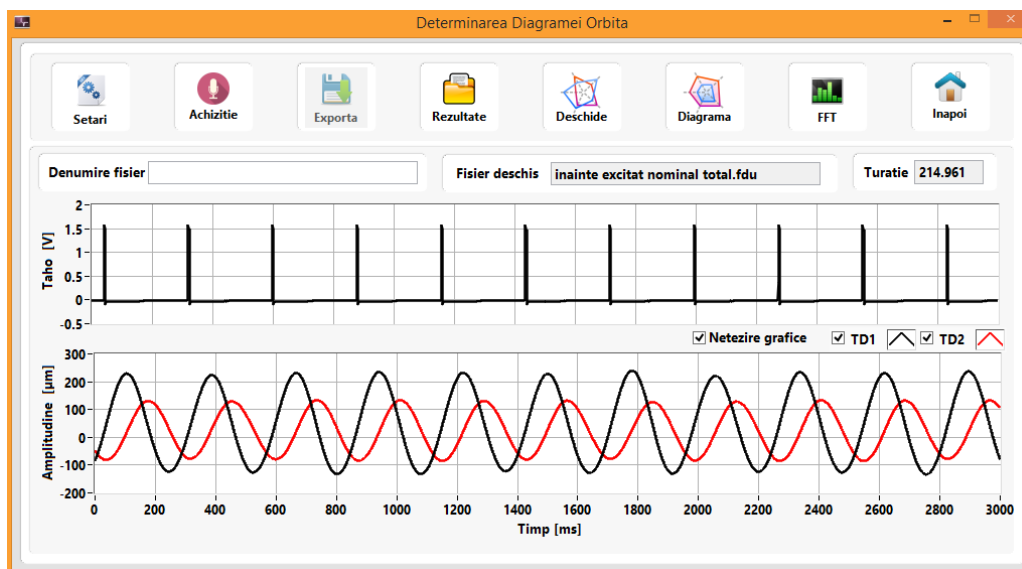


Fig. 5. 12. Fereastra principală a aplicației dezvoltate pentru determinarea diagramei orbită

Pentru analiza Fourier a vibrațiilor relative, se apasă butonul "*FFT*" ce va lansa un VI dezvoltat în cadrul nivelului secundar de prelucrare al SAPDM, care determină spectrul de frecvență bilateral al diagramei orbită. În cadrul acestei ferestre se reprezintă în jumătatea pozitivă componentele spectrale directe ale vibrațiilor iar în cea negativă cele indirecte.

Dacă în spectrul bilateral se găsesc doar componentele directe, atunci mișcarea de precesie va fi directă iar în caz contrar inversă. De asemenea dacă spectrul prezintă componente atât în partea pozitivă cât și în cea negativă atunci diagrama orbita va avea forma unei elipse, alungirea acesteia fiind definită de componenta cu amplitudine mai mare [R12].

Folosirea unui spectru bilateral este folositor pentru a diferenția două defecțiuni ce conduc la același tip de spectru unilateral, cum este cazul precesiei datorate peliculei de ulei-*oil whirl* și cazul în care rotorul intră în contact prin frecare cu părți staționare ale mașinii. Aceste două defecte conduc la apariția subarmonicilor 0,5X. Diferența dintre cele două constă în prezența subarmonicilor 0,5X în partea pozitivă a spectrului bilateral pentru cazul *oil whirl* iar pentru ce de-al doilea caz în partea negativă, corespunzătoare precesiei directe respectiv indirecte [R10]. Forma diagramei orbită este vizibilă prin accesarea butonului "*Diagrama*". Rezultatele salvate pot fi încărcate off-line pentru viitoare prelucrări prin apăsarea butonului "*Deschide*".

Pentru configurarea achiziției se apasă butonul "*Setari*" ce va lansa fereastra de dialog din Fig. 5.12. Aplicația poate fi folosită și separat de echipamentul hardware al SAPDM, activarea opțiunilor de configurare a altei plăci de achiziție sau SAPD se realizează prin opțiunea "*Echipament*" (detaliul A din Fig. 5. 13). În cazul folosirii SAPDM configurarea canalelor de achiziție se face automat iar utilizatorul poate defini doar următorii parametri:

- denumirea și poziția traductoarelor;
- sensul de rotație al mașinii (CW – sensul acelor de ceasornic iar CCW – sensul trigonometric);
- numărul de impulsuri generate de traductorul incremental/ senzorul optic la o rotație;
- rata și numărul de eșantioane.

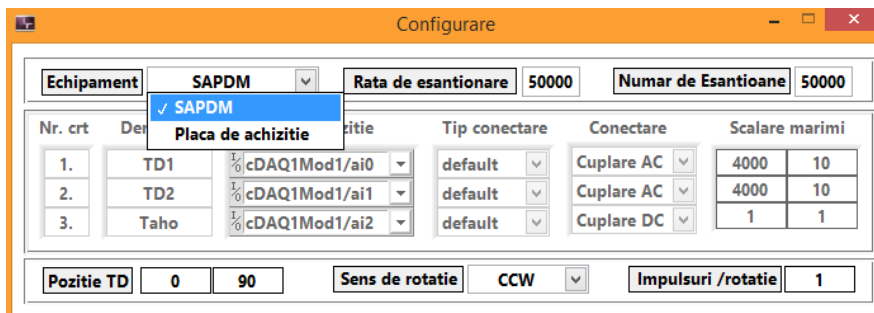


Fig. 5. 13. Fereastra de configurarea a achiziție de date din cadrul aplicației dezvoltate pentru determinarea diagramei orbită

În detaliul A al Fig. 5. 14 se prezintă secvența prin care formele de undă achiziționate sunt prelucrate de instrumentul virtual "*Orbit and Timebase*" (detaliul A1) din paleta "*Express*" a modului "*Sound and Vibrațion Toolkit*". Diagrama bloc a acestuia a fost modificată pentru a dezvolta un Sub VI dedicat pentru determinarea formei diagramei orbită în cazul hidrogenatoarelor.

Valorile prelucrate de instrumentul virtual din detaliul A1 al Fig. 5.14 sunt citite de alt VI care are diagrama bloc aferentă detaliului B din Fig. 5.14 și prin intermediul căruia se afișează următoarele informații:

- forma diagramei orbită;
- tipul mișcării de precesie, directă sau indirectă;
- excentricitatea dinamică a hidrogenatorului;
- valoarea vârf-vârf a vibrațiilor relative exprimată în  $\mu\text{m}$ .

5.1. Centrarea în câmp magnetic a rotoarelor hidrogeneratoarelor 91

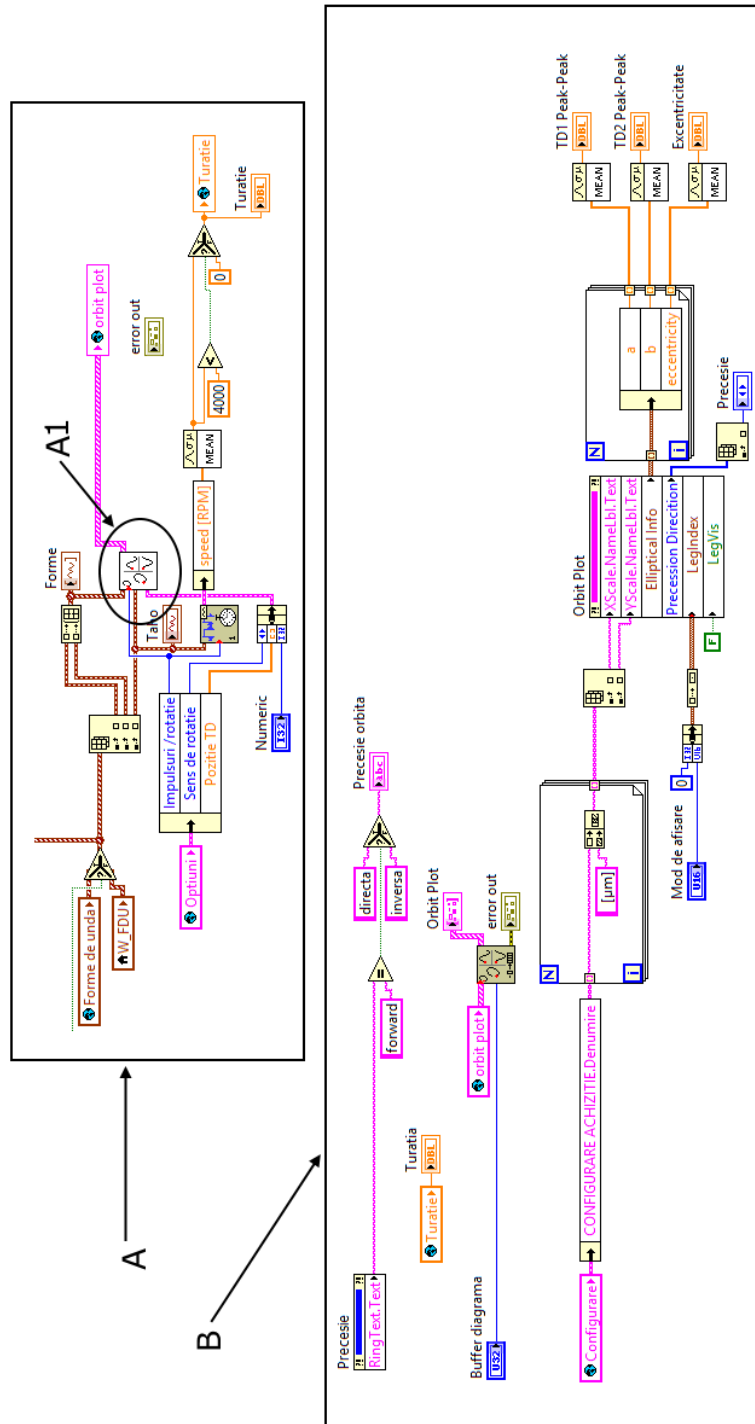


Fig. 5. 14. Diagrame bloc ale instrumentelor virtuale dezvoltate pentru determinarea (detaliul A) și afișarea (detaliul B) diagramei orbită

Nivelul de vibrație relativă a rotorului reprezintă un indicator de performanță ce caracterizează funcționarea mașinilor electrice în general și a hidrogenatoarelor în special. Orice modificare a nivelului de vibrație este un indiciu al unor schimbări în condițiile de funcționare a HG, care uneori pot conduce la avarii importante cu scoaterea din exploatare a mașinii [H8], [J6], [M13], [R13].

#### 5.1.4. Centrarea magnetică folosind traductoare de proximitate inductive

Așa cum s-a prezentat în subcapitolul 5.1.2, componenta alternativă a semnalelor furnizate de traductoarele de proximitate montate ortogonal la nivelul lagărelor hidrogenatoarelor oferă posibilitatea de a monitoriza mișcarea de precesie a rotorului în regim dinamic prin determinarea diagramei orbită. De asemenea componenta continuă oferă informații asupra poziției arborelui rotorului cu referință față de lagărele mașinii, atât în regim dinamic cât și static.

Pornind de la acest aspect s-a elaborat o **procedură de centrare în câmp magnetic** a rotoarelor hidrogenatoarelor folosind instrumente virtuale dezvoltate în mediul LabVIEW. Principiul procedurii constă în determinarea direcției forței magnetice unilaterale de dezechilibru pentru patru poziții distincte ale rotorului decalate între ele cu  $90^\circ$ , cu ajutorul a 2 perechi de traductoare de proximitate inductive montate la nivelul lagărului radial-axial superior și radial inferior. Trebuie precizat faptul că procedura se poate aplica numai în cazul în care HG a fost oprit din exploatare pentru reparație și nu este complet montat. Prin urmare procedura se aplică la finalul lucrărilor de reparație în regim static, după ce HG a fost centrat din punct de vedere geometric (mecanic) [P9].

Primul pas constă în măsurarea întrefierului în patru puncte ale statorului (1, 2, 3, 4) decalate între ele cu  $90^\circ$ , pentru patru poziții distincte ale rotorului decalate tot la  $90^\circ$  (când punctul A se află în dreptul fiecărui punct de măsură de pe stator), conform Fig. 5.15.

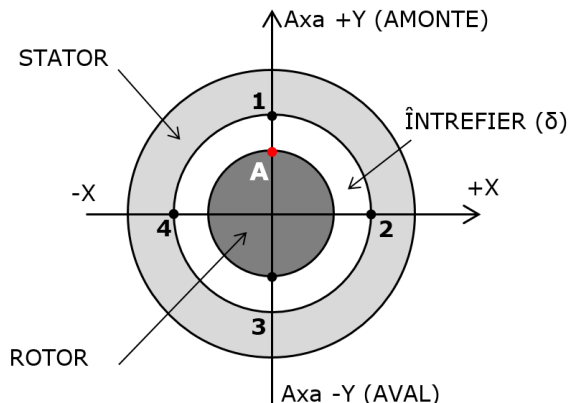


Fig. 5. 15. Puncte măsură ale întrefierului cu mașina în stare de repaus

Întrucât forța de atracție rotor-stator este dependentă de valoarea întrefierului, se poate considera că direcția UMP este spre întrefierul minim.

În urma măsurărilor rezultă un întrefier echivalent  $\delta_{ij}$  care depinde de poziția rotorului  $i$ , de punctul de măsură față de stator  $j$  și care se poate defini sub forma unei matrice a întrefierului:

### 5.1. Centrarea în câmp magnetic a rotoarelor hidrogeneratoarelor 93

$$\delta_{ij} = \begin{pmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} & \delta_{13} & \delta_{14} \\ \delta_{21} & \delta_{22} & \delta_{23} & \delta_{24} \\ \delta_{31} & \delta_{32} & \delta_{33} & \delta_{34} \\ \delta_{41} & \delta_{42} & \delta_{43} & \delta_{44} \end{pmatrix} \quad (5.15)$$

Se pune problema determinării acestei matrice astfel încât forța magnetică unilaterală de dezechilibru pentru o rotație completă a rotorului să fie minimă, practic nulă. În acest scop se conectează înfășurarea rotorică la un redresor complet comandat tip spre exemplu Santerno DCREG 2.500 și se verifică tendința de deplasarea a rotorului prin intermediul celor două perechi de traductoare de proximitate, în momentul aplicării unui impuls de curent continuu (vezi Fig. 5.16). Mărimea și durata impulsului de curent se stabilesc în funcție de datele nominale ale mașinii testate.

Traductoarele sunt montate ortogonal pe cele două axe X și Y la nivelul LRAS și LRI pe direcția radială.

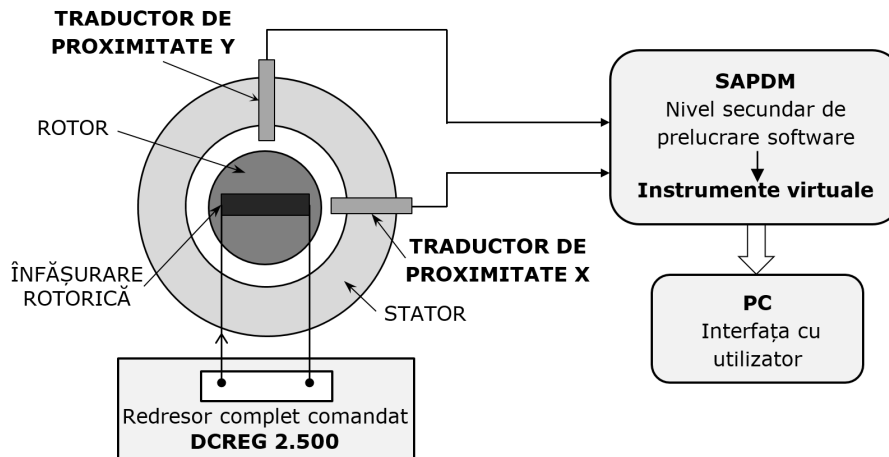


Fig. 5. 16. Principiul de măsurare al tendinței de deplasare a rotorului în cadrul procedurii de centrare magnetică

Pentru achiziția, prelucrarea și interpretarea semnalelor s-au dezvoltat instrumente virtuale dedicate, care apoi s-au compilat într-o aplicație de tip executabil ce face parte din al doilea nivel software al SAPDM.

Montarea celor patru traductoare de proximitate la distanțe egale față de arbore reprezintă o procedură dificilă, datorată rezoluției de 1 μm a acestora. Poziționarea la ordin de micron a traductoarelor este în majoritatea cazurilor imposibilă. Pentru a evita acest scenariu, în cadrul aplicației dezvoltate se necesită poziționarea la o distanță aproximativ egală cu jumătate din domeniul de măsură al traductorului. De asemenea distanțele la care se montează cele patru traductoare nu trebuie să fie egale ca ordin de mărime.

Aplicația dezvoltată pentru centrarea în câmp magnetic a rotoarelor hidrogeneratoarelor folosind traductoare de proximitate se lansează prin apăsarea butonului "Centrare magnetica Proximitoare" din fereastra principală aferentă celui de-al doilea nivel software de prelucrare la SAPDM (Fig. 5.1).

În fereastra din Fig. 5.17 utilizatorul poate vizualiza formele de undă și valorile efective ale semnalelor furnizate de cele patru traductoare de proximitate inductive ( $TD1$ ,  $TD2$ ,  $TD3$ ,  $TD4$ ) montate la nivelul LRAS și LRI.

Configurarea achiziției de date este similară aplicației prezentate în subcapitolul 5.1.2 pentru determinarea diagramei orbită și nu se va mai prezenta în continuare.

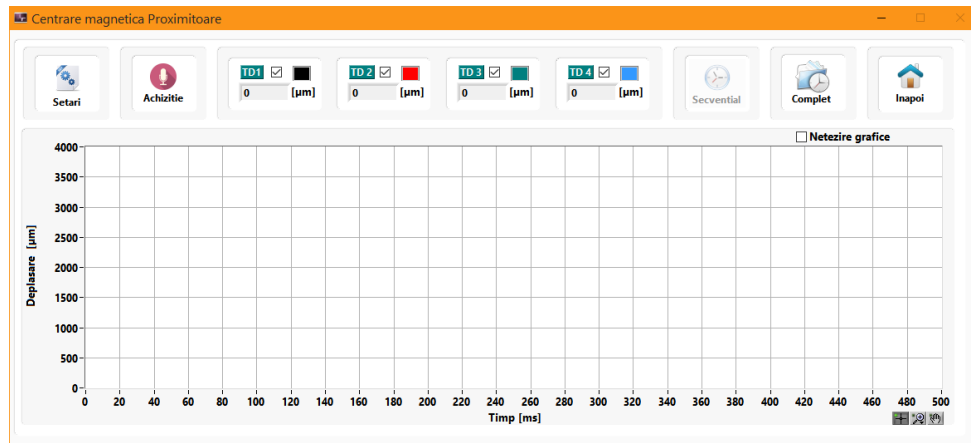


Fig. 5.17. Fereastra principală a aplicației dezvoltate pentru centrarea magnetică folosind traductoare de proximitate inductive

Pentru a aprecia tendința de deplasare a rotorului în momentul în care se aplică impulsul de curent în înfășurarea de excitație a HG se apasă butonul "Secvențial" care devine activ numai când achiziția de date este pornită (accesarea butonului "Achiziție"). Fereastra aferentă în acest caz este prezentată în Fig. 5.18. Aplicația reprezintă grafic (Fig. 5.18) tendința de deplasarea a rotorului pe direcție radială cu referința față de poziția la care sunt montate traductoarele (LRAS și LRI), poziție considerată de echilibru. Pentru a elimina *offsetul* determinat de distanța inițială a traductorului față de arbore, înainte de aplicarea impulsului de curent se apasă butonul "Offset" moment în care instrumentul virtual dezvoltat compensează această distanță și deplasează cursorul în centrul axelor de coordonate. Dezactivarea VI-ului de compensare și afișarea poziției inițiale a rotorului se face prin apăsarea butonului "Reset".

Pentru a evita afișarea eronată a rezultatelor, este necesară alegerea direcției (+X, +Y sau -X, -Y) pe care sunt montate perechile de traductoare de-a lungul celor două axe X și Y prin intermediul căsuței din detaliul A Fig. 5.18.

Valorile efective ale deplasărilor rotorului înregistrate de cele două perechi de traductoare în sensul axelor X și Y sunt afișate sub formă numerică și exprimate în  $\mu\text{m}$  (detaliul B Fig. 5.18).

Pentru a modifica scala celor două grafice, în care se reprezintă tendința de deplasare a rotorului în cazul LRAS și LRI, se folosește căsuța din detaliul C Fig. 5.18.

Rezultatele măsurătorilor pot fi salvate prin introducerea unei denumiri în căsuța din detaliul D Fig. 5.18 și apăsarea butonului "Salveaza".

## 5.1. Centrea în câmp magnetic a rotoarelor hidrogeneratoarelor 95

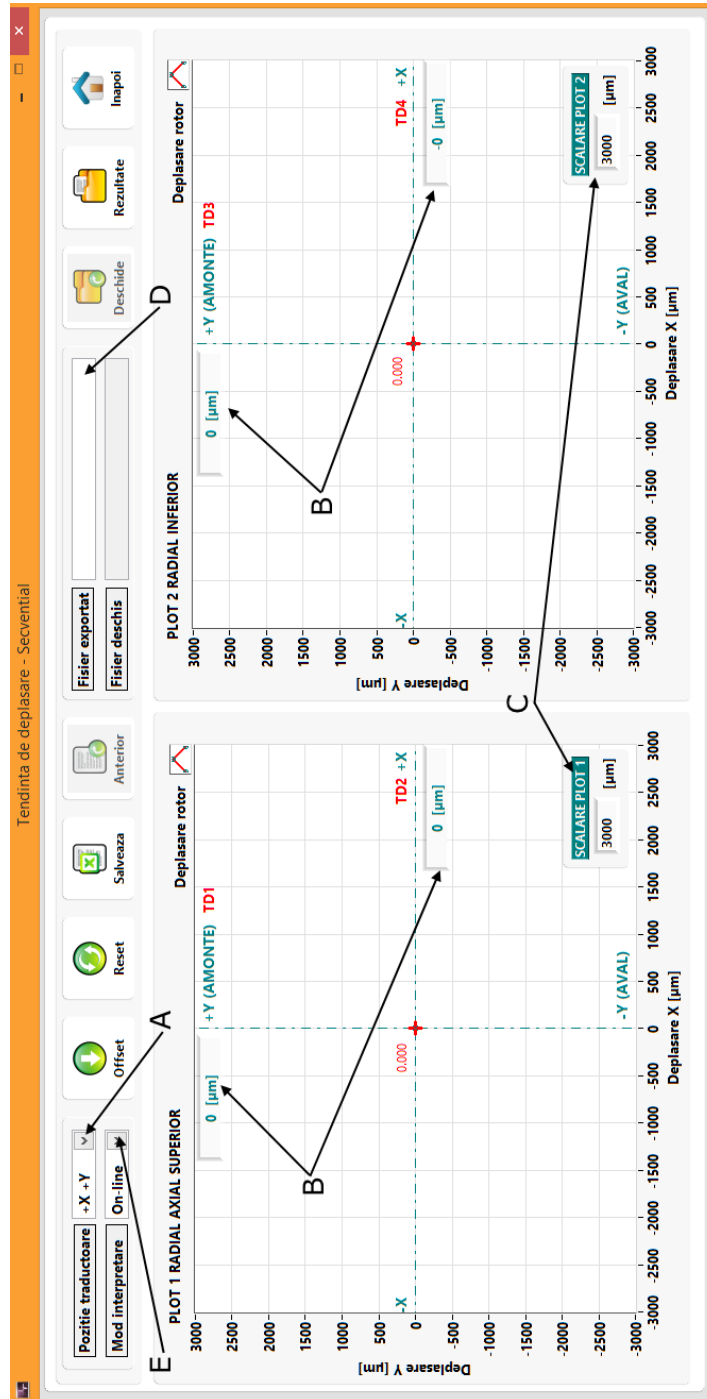


Fig. 5. 18. Fereastra aplicației dezvoltate în care se interpretează tendințele de deplasare ale rotorului în cazul celor 4 poziții distincte

Directorul în care aplicația salvează automat rezultatele este deschis în Windows Explorer odată cu apăsarea butonului "Rezultate". În cazul în care utilizatorul dorește vizualizarea ultimei înregistrări, se apasă butonul "Anterior", iar pentru alte rezultate butonul "Deschide", ce va lansa o fereastră de dialog în care utilizatorul selectează fișierul dorit. Aceste opțiuni devin active doar în momentul în care este selectat modul de interpretare Off-line (detaliul E Fig. 5.18).

Pentru fiecare din cele patru poziții ale rotorului, se repetă impulsurile de curent continuu și se salvează câte un fișier care va conține deplasarea arborelui față de poziția traductoarelor montate la nivelul LRAS și LRI. Fișierele se încarcă apoi în fereastra din Fig. 5.19 prin apăsarea butoanelor aferente fiecărei poziții (detaliul A). Această fereastră devine activă odată cu apăsarea butonului "Complet" din cadrul ferestrei principale a aplicației (Fig. 5.17).

Utilizatorul poate vizualiza valoarea poziției rezultante a celor 4 deplasări ( $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ ,  $A_4$ ) corespunzătoare unei rotații complete a rotorului HG atât sub formă grafică cât și numerică (detaliul B Fig. 5.19). Pentru lagărul radial axial superior, poziția rezultantă este notată cu R1 iar pentru cel radial inferior cu R2.

În condițiile în care câmpul magnetic din întrefier creat de impulsul de curent este caracterizat printr-o densitate de volum a energiei magnetice constantă în întrefier, forțele radiale de interacțiune dintre stator și rotor sunt egale de-a lungul periferiei rotorului și astfel forța magnetică unilaterală de dezechilibru are o valoare neglijabilă. Dacă densitatea de volum a energiei magnetice nu este uniformă, impulsurile de curent determină apariția UMP ce deplasează rotorul din poziția de echilibru determinată de centrarea geometrică (mecanică).

În condițiile în care la o rotație completă valoarea deplasării rotorului este diferită de zero, se procedează la modificarea corespunzătoare a întrefierului, în scopul diminuării sau chiar anulării UMP. Apoi se verifică din nou tendințele de deplasare ale rotorului  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ ,  $A_4$  cu scopul de a valida corectitudinea noului întrefier.

Pentru modificarea întrefierului se deplasează mecanic rotorul prin intermediul pastilelor radiale ale lagărului radial axial superior, în direcția inversă deplasării rezultante determinate la o rotație completă. În practică au existat cazuri în care această deplasare nu a fost posibilă datorită jocurilor foarte mici din camera rotorică a turbinei sau a celor din LRAS. Soluția în aceste cazuri a fost deplasarea statorului în scopul modificării întrefierului.

Diagramele bloc a celor două instrumente virtuale ce au ferestrele (panourile frontale) de interacțiune cu utilizatorul corespunzătoare Fig. 5.18 și Fig. 5.19, sunt prezentate în Fig. 5.20. Pentru a reprezenta grafic tendințele de deplasare ale rotorului pentru cele patru poziții distincte, se folosește VI-ul ce are diagrama aferentă prezentată în detaliul A Fig. 5.20. În cadrul acesteia se calculează valoarea medie a formelor de undă achiziționate din care se scade valoarea offsetului determinat de distanța inițială la care este montat traductorul față de arbore. Apoi prin intermediul subVI-ului din detaliul A1 al Fig. 5.20 se determină și se afișează sub formă grafică și numerică valoarea deplasării pe direcție radială a arborelui. În detaliul B al Fig. 5.20 valorile înregistrate pentru cele 4 poziții sunt citite și reprezentate off-line prin intermediul subVI-ului din detaliul B1. Astfel cu ajutorul acestui subVI se calculează și reprezintă sub formă grafică și numerică valorile deplasărilor în cele patru poziții distincte ale rotorului, dar și a rezultatelor R1 și R2. Cele două subinstrumente virtuale din detaliul A1 și B1 aferente Fig. 5.20 nu fac parte din biblioteca mediului LabVIEW și au fost dezvoltate special pentru nivelul secundar de prelucrare software al SAPDM.



## 5.1. Centrea în câmp magnetic a rotoarelor hidrogeneratoarelor 97

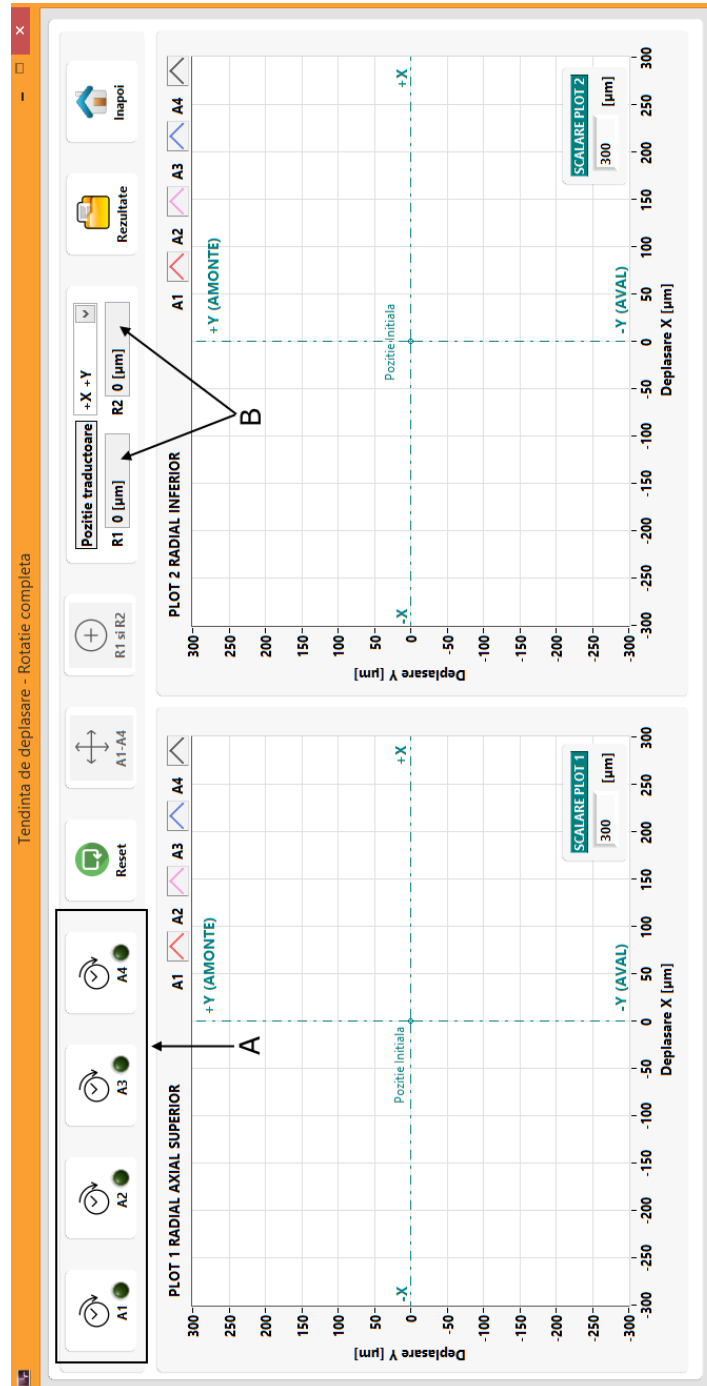


Fig. 5. 19. Fereastra aplicației dezvoltate în care se interpretează deplasarea rezultantă corespunzătoare unei rotații complete a rotorului HG

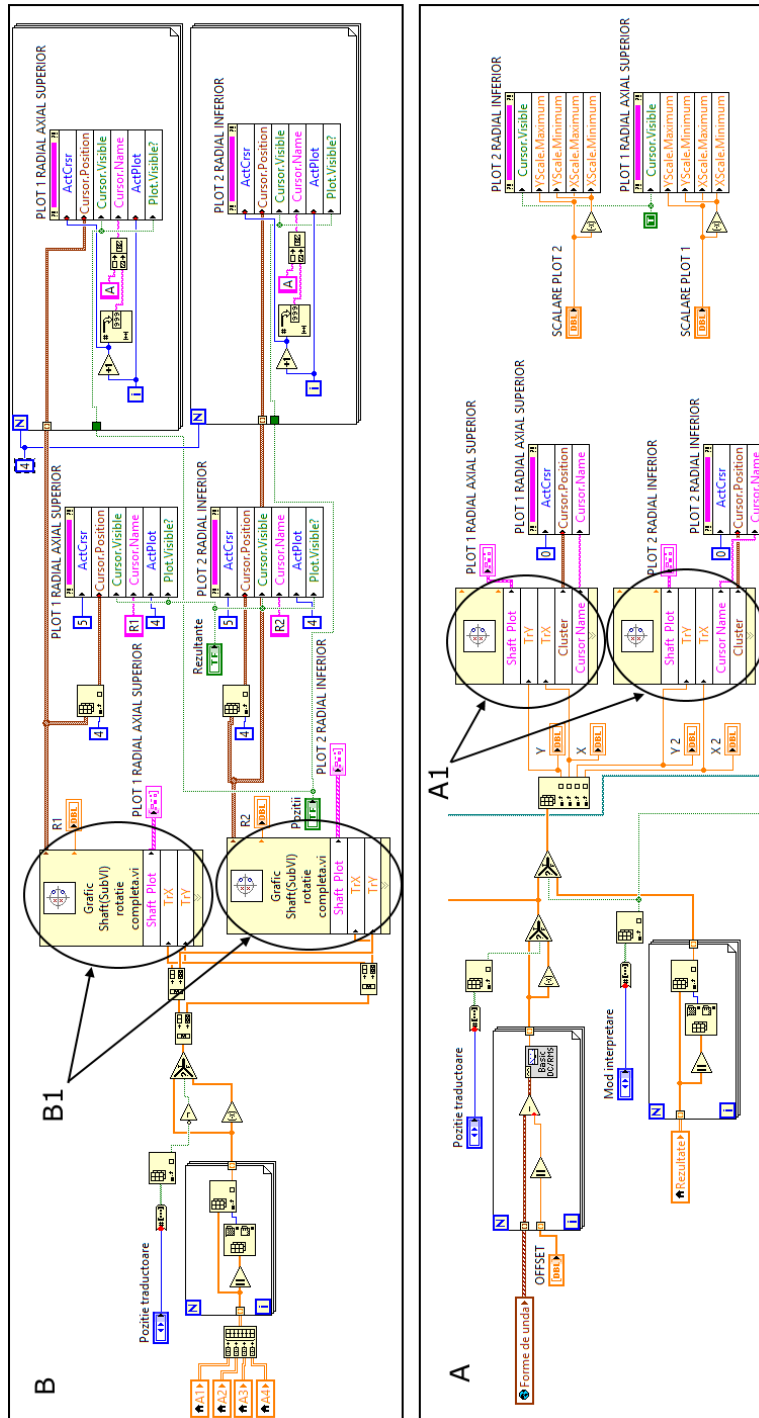


Fig. 5. 20. Diagrame bloc esențiale aferente aplicației dezvoltate pentru centrarea magnetică folosind traductoare de proximitate inductive

## 5.1. Centrarea în câmp magnetic a rotoarelor hidrogeneratoarelor 99

Precizia cu care se realizează centrarea magnetică depinde în mare măsură de precizia cu care se determină direcția de deplasare a rotorului. Traductoarele de proximitate inductive din componența SAPDM au o rezoluție de  $1\mu\text{m}$ , ceea ce oferă o precizie ridicată.

### 5.1.5. Centrarea magnetică folosind bobine sondă montate în stator

A doua procedură de centrare în câmp magnetic a rotoarelor hidrogeneratoarelor propusă în cadrul tezei este similară cu cea prezentată anterior, însă nu necesită folosirea traductoarelor de proximitate montate la nivelul lagărelor mașini. În locul traductoarelor se folosesc 12 bobine sondă (BS) montate simetric pe câte un pachet elementar în 12 secțiuni a miezului statoric (vezi Fig. 5. 21).

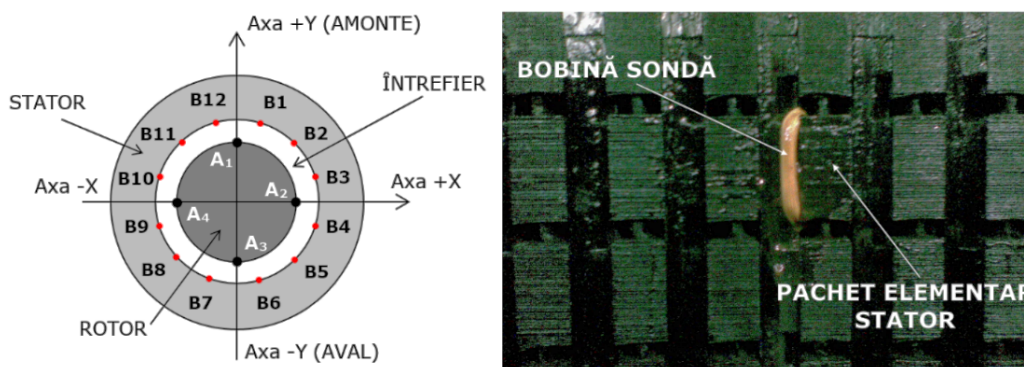


Fig. 5. 21. Modul de montare a bobinelor sondă pe miezul statoric al hidrogeneratorului

Bobinele sondă se montează în timpul lucrărilor de reparație a hidrogeneratorului iar procedura de centrare în câmp magnetic se aplică tot după ce mașina a fost centrată din punct de vedere mecanic. Pentru izolarea BS față de miezul magnetic se folosește o izolație pe bază de mică, iar pentru consolidarea lor se folosește rășină epoxidică. După montarea bobinelor sondă se verifică rezistența de izolație a acestora față de masă folosind un megohmmetru având tensiunea de 1000 V.

Utilizarea unor astfel de bobine sondă montate pe pachetele elementare ale statorului permite în același timp monitorizarea întrefierului și implicit a formei rotor-stator [S10], [S19]. Prin monitorizarea on-line a formei-rotor stator se poate pune în evidență excentricitatea dinamică a mașini dar și eventuale defecte precum contactul metalic dintre rotor și părți staționare [H9].

Se preferă folosirea unor astfel de bobine sondă pentru centrarea magnetică în schimbul unor traductoare de întrefier [P13] sau a senzorilor optici [T10] datorită raportului performanță/preț foarte bun dar și deoarece BS nu sunt sensibile la factori precum umiditate sau temperatură [S10].

De asemenea prin intermediul BS se pot pune în evidență eventuale scurtcircuite între spirele polilor rotorului prin compararea amplitudinii formelor de undă corespunzătoare tensiunilor electromotoare induse în bobinele sondă. Defectul este pus în evidență printr-o amplitudine mai mică atunci când polul ce prezintă scurtcircuit trece prin dreptul bobinei [T11], [E5].

În timpul funcționării HG, bobinele sondă sunt parcurse de un flux magnetic  $\Phi$  care induce în acestea o tensiune electromotoare  $U_e$  definită conform legii inducției electromagnetice [C11], [L5]:

$$U_e = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (5.16)$$

Fluxul magnetic depinde în același timp atât de reluctanța magnetică a circuitului  $R_m$  cât și de tensiunea magnetomotoare  $U_h$  care reprezintă o fracțiune  $k$  din tensiunea magnetomotoare totală produsă de înfășurarea polilor de excitație [C11], [L5]:

$$\phi = \frac{U_h}{R_m} = \frac{ki_{ex}N}{R_m} \quad (5.17)$$

unde  $i_{ex}$  – curentul de excitație;  
 $N$  – numărul de spire.

În timpul aplicării impulsului de curent tensiunea magnetomotoare  $U_h$  este constantă iar reluctanța magnetică are expresia [C11], [L5]:

$$R_m = \frac{l}{\mu_0\mu_r S} \quad (5.18)$$

unde  $l$  – lungimea circuitului magnetic;  
 $S$  – secțiunea parcursă de fluxul magnetic;  
 $\mu_0$  – permitivitatea vidului;  
 $\mu_r$  – permeabilitatea relativă a mediului.

Deoarece permeabilitatea întrefierului este apropiată de cea a vidului reluctanța magnetică a întrefierului este mult mai mare decât reluctanța circuitului feromagnetic. În consecință, valoarea fluxului magnetic este dependentă de valoarea întrefierului și ca urmare amplitudinea tensiunii electromotoare indusă în bobinele sondă este invers proporțională cu valoarea întrefierului [D8]. Astfel în momentul aplicării impulsului de curent continuu în înfășurarea de excitație a HG, tendința de deplasare a rotorului este spre întrefierul minim, unde amplitudinea  $U_e$  este maximă.

Prin intermediul SAPDM se achiziționează tensiunile electromotoare induse în BS și se reprezintă grafic atât aceste valori cât și valoarea rezultantei celor 12 vectori sub forma unei diagrame fazoriale. Direcția rezultantei coincide cu tendința de deplasare a rotorului în poziția considerată. Procedura se repetă pentru toate cele patru poziții distincte decalate la  $90^\circ$  ale rotorului, prezentate în Fig. 5.15.

Aplicația dezvoltată în mediul LabVIEW pentru cea de-a doua procedură de centrare magnetică a rotoarelor HG, are interfața cu utilizatorul prezentată în Fig. 5.22. Aceasta devine activă în momentul apăsării butonului "Centrare magnetică Bobine sondă" din fereastra principală a nivelului secundar de prelucrare software (Fig. 5.1).

Aplicația dezvoltată poate fi folosită atât pentru centrarea în câmp magnetic a rotoarelor HG cât și pentru a monitoriza on-line forma rotorului și statorului prin interpretarea celor 12 tensiuni electromotoare induse în bobinele sondă. Prin montarea unui timbru reflectorizant pe arborele mașinii în dreptul primului pol și poziționarea fasciculului luminos a senzorului optic în dreptul acestuia, în timpul

## 5.1. Centrarea în câmp magnetic a rotoarelor hidrogeneratoarelor 101

funcționării se obține o referință pentru reprezentarea în timp a tensiunilor electromotoare induse în BS, corespunzătoare unei rotații complete a rotorului HG.

În fereastra de interacțiune din Fig. 5.22 se vizualizează formele de undă ale tensiunilor electromotoare induse în cele 12 bobine sondă (B1 - B12) și forma semnalului furnizat de senzorul optic de turație (Taho). De asemenea se afișează turația mașinii exprimată în RPM iar în detaliul A se prezintă durata unei rotații complete a HG exprimat în milisecunde (ms). Formele de undă sunt salvate prin apăsarea butonului "Exporta" iar pentru analiza în domeniul frecvență se apasă butonul "FFT" ce va lansa fereastra VI-ului ce descompune în serii Fourier formele de undă ale semnalelor achiziționate.

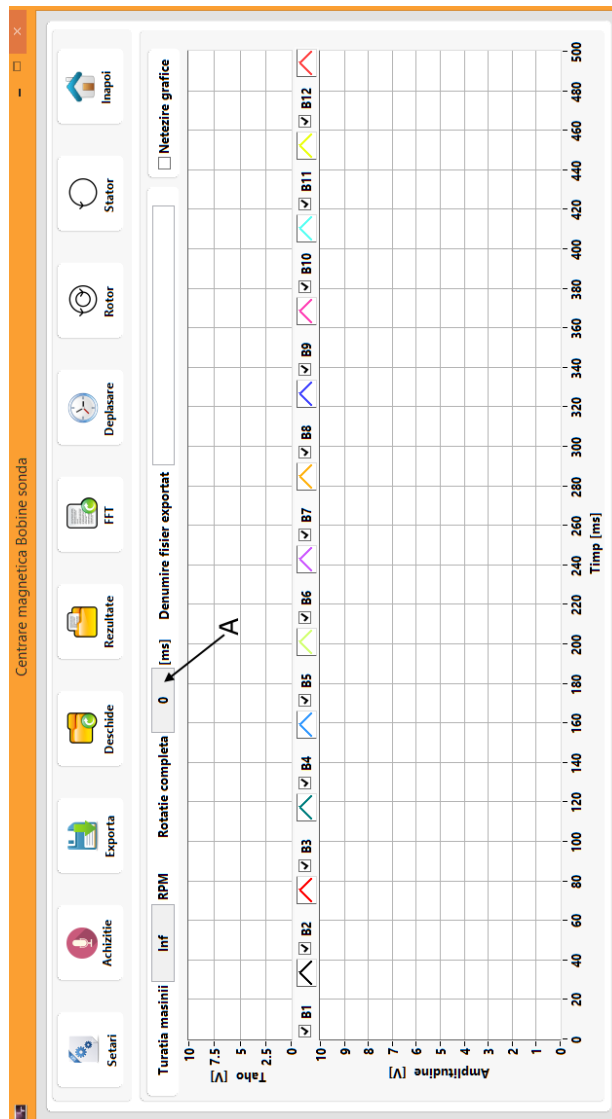


Fig. 5. 22. Fereastra principală a aplicației dezvoltate pentru centrarea magnetică folosind bobine sondă

Instrumentul virtual de reprezentare vectorială a rezultatelor din biblioteca mediului LabVIEW nu a satisfăcut cerințele aplicației dezvoltate și de aceea s-a construit o diagrama fazorială dedicată metodei de centrare magnetică. Astfel, interfața cu utilizatorul a VI-ului dezvoltat pentru reprezentarea celor 12 tensiuni electromotoare (B1-B12) și a rezultatelor acestora care corespunde tendinței de deplasare a rotorului, este prezentată în fereastra din Fig. 5.23. Instrumentul virtual devine activ odată cu apăsarea butonului "Deplasare" în fereastra din Fig. 5.22. Utilizatorul poate modifica modul de reprezentare grafică (detaliul A) prin definirea grosimii liniei dar și tipul acesteia ("Dash" – linie punctată, "Solid" – linie continuă). În detaliul B se prezintă amplitudinea maximă a celor 12 vectori iar în detaliul C se indică cadranul în care rotorul are tendința de deplasare precum și valoarea rezultantei exprimată în volți. Acest VI poate fi folosit atât în cazul centrării magnetice prin interpretarea rezultantei celor 12 vectori în momentul aplicării impulsului de curent cât și pentru monitorizarea on-line a poziției rotorului în timpul funcționării HG. Valorile afișate pot fi salvate prin apăsarea butonului "Salveaza" și pot fi încărcate pentru viitoare prelucrări și interpretări off-line prin butonul "Deschide" care devine activ odată cu selectarea modului de interpretare "Valori" (detaliul D). Modul "FDU" corespunde interpretării on-line a rezultatelor în care VI-ul determină valorile afișate prin prelucrarea formelor de undă.

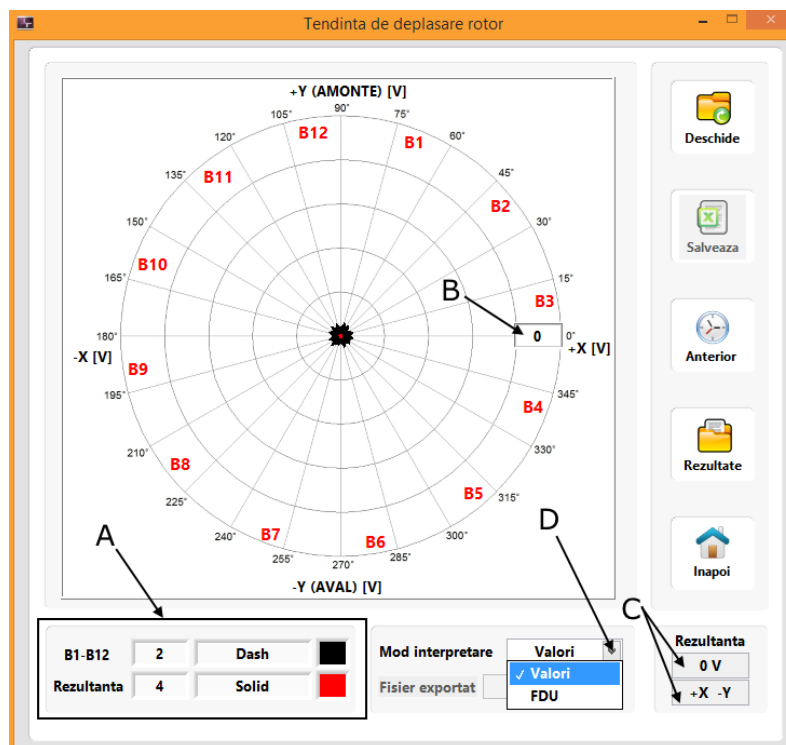


Fig. 5. 23. Fereastra de reprezentarea fazorială a celor 12 tensiuni electromotoare induse în BS și rezultanta lor

Diagrama bloc a instrumentului virtual din Fig. 5.23 este prezentată în Fig. 5.24. Amplitudinea maximă a tensiunilor electromotoare induse în B1-B12 este reprezentată grafic prin descompunerea vectorilor după direcțiile X și Y (detaliul A)

### 5.1. Centrarea în câmp magnetic a rotoarelor hidrogeneratoarelor 103

fiind cunoscute unghiurile la care sunt montate bobinele sondă. Valoarea rezultantei celor 12 vectori este calculată în detaliul C. Diagrama fazorială este construită prin intermediul algoritmului din detaliul B.

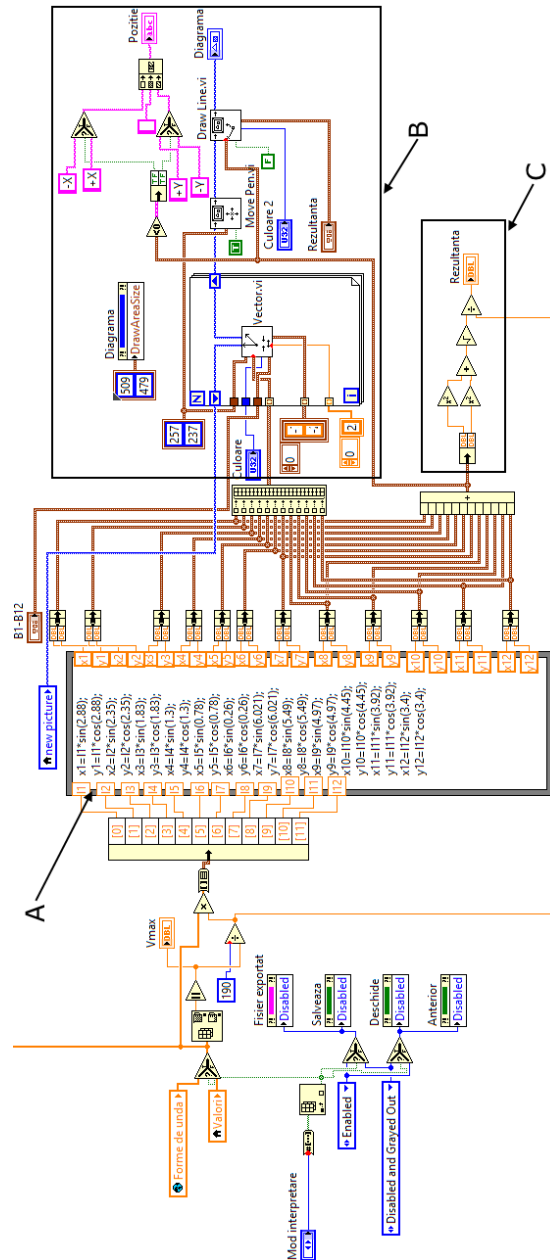


Fig. 5. 24. Diagrama bloc aferentă VI-ului dezvoltat pentru afișarea celor 12 tensiuni electromotoare induse în BS sub formă fazorială

În condițiile unui întrefier simetric și al unei excentricități relativ mici, densitatea de volum a energiei câmpului magnetic creat de impulsul de curent, este

constantă în întrefier. În acest caz rezultanta celor 12 tensiuni electromotoare este aproape nulă astfel valoarea UMP este neglijabilă, fapt ce denotă o centrare corespunzătoare a rotorului în câmp magnetic. Dacă această rezultantă la o rotație completă are o valoare diferită de zero se procedează la modificarea întrefierului și apoi se reverifică tendințele de deplasare a rotorului pentru cele 4 poziții ale rotorului.

Pentru a determina forma rotorului și a statorului în timpul funcționării HG s-a dezvoltat instrumentul virtual cu diagrama bloc aferentă Fig. 5.25, care este executat în momentul în care se apasă butonul "Forma" din fereastra principală a aplicației dezvoltate pentru centrarea magnetică a rotoarelor HG folosind bobine sondă (Fig. 5.22).

Principiul abordat [S10], [S19] în reprezentarea formei statorului, constă în folosirea ca referință a primului pol al rotorului și interpretarea formelor de undă ale tensiunilor electromotoare induse de acesta în fiecare din cele 12 bobine sondă la o rotație completă. Se ia în considerare această referință deoarece timbrul reflectorizant folosit pentru măsurarea turației este montat pe arborele rotorului în dreptul primului pol și astfel se cunoaște momentul și durata unei rotații complete. Astfel, în diagrama bloc din Fig. 5.25 se extrage un număr fix de perioade corespunzător unei rotații complete a mașinii pentru fiecare formă de undă. O rotație completă este definită ca durata dintre două impulsuri furnizate de senzorul optic. Apoi se calculează amplitudinile maxime și minime ale tensiunilor electromotoare induse în bobinele sondă de primul pol pentru numărul de perioade extrase. Pentru a determina forma rotorului se folosește ca referință prima bobină sondă B1 și se interpretează tensiunile electromotoare induse de fiecare pol al rotorului, în aceasta. În diagrama bloc aferentă Fig. 5.25 se reține prima formă de undă achiziționată, din care se extrage un număr de perioade egal cu numărul de poli ai mașinii. Fiecare perioadă a formei de undă va corespunde la trecerea unei perechi de poli prin dreptul bobinelor sondă. Se calculează apoi amplitudinea minimă și maximă pentru fiecare perioadă în parte.

Valorile obținute sunt apoi prelucrate de subVI-ul special dezvoltat pentru a reprezenta forma statorului, respectiv a rotorului, care are diagrama bloc prezentată în detaliul A al Fig. 5.25. **Indicatoarele grafice din mediul LabVIEW** oferă posibilitatea de a interpola valorile afișate, însă modurile oferite de acestea **nu au fost suficiente** pentru a reprezenta forma circulară a rotorului și statorului. Folosind elemente din biblioteca mediului LabVIEW, **s-a elaborat un subVI** prin care se interpolează și reprezintă cu finețe cele două forme sub forma unei diagrame XY.

Trebuie specificat faptul că unitatea de măsură a celor 2 axe, X și Y, este exprimată în volți și nu în mm, deoarece instrumentul virtual dezvoltat are rolul de a pune în evidență unele abateri constructive ale rotorului și statorului pe baza tensiunilor electromotoare induse în bobinele sondă și nu de a măsura cu precizie valoarea întrefierului.

Față de **procedura inițială** prezentată în [S10] și [S19], **aplicația dezvoltată** în cadrul nivelului secundar de prelucrare software a SAPDM, **oferă posibilitatea** de a monitoriza în timpul funcționării HG stabilitatea dinamică a rotorului, prin stabilirea unei limite admisibile a variației întrefierului.

Pentru monitorizarea întrefierului în timpul funcționării hidrogenatorului s-a dezvoltat un VI care folosește același principiul prezentat anterior pentru reprezentarea formei rotorului și a statorului, dar care reprezintă sub același grafic cele două forme. Această reprezentare grafică este vizibilă odată cu apăsarea butonului "Intrefier" din fereastra principală a aplicației (Fig. 5.22).



5.1. Centrarea în câmp magnetic a rotoarelor hidrogenatoarelor 105

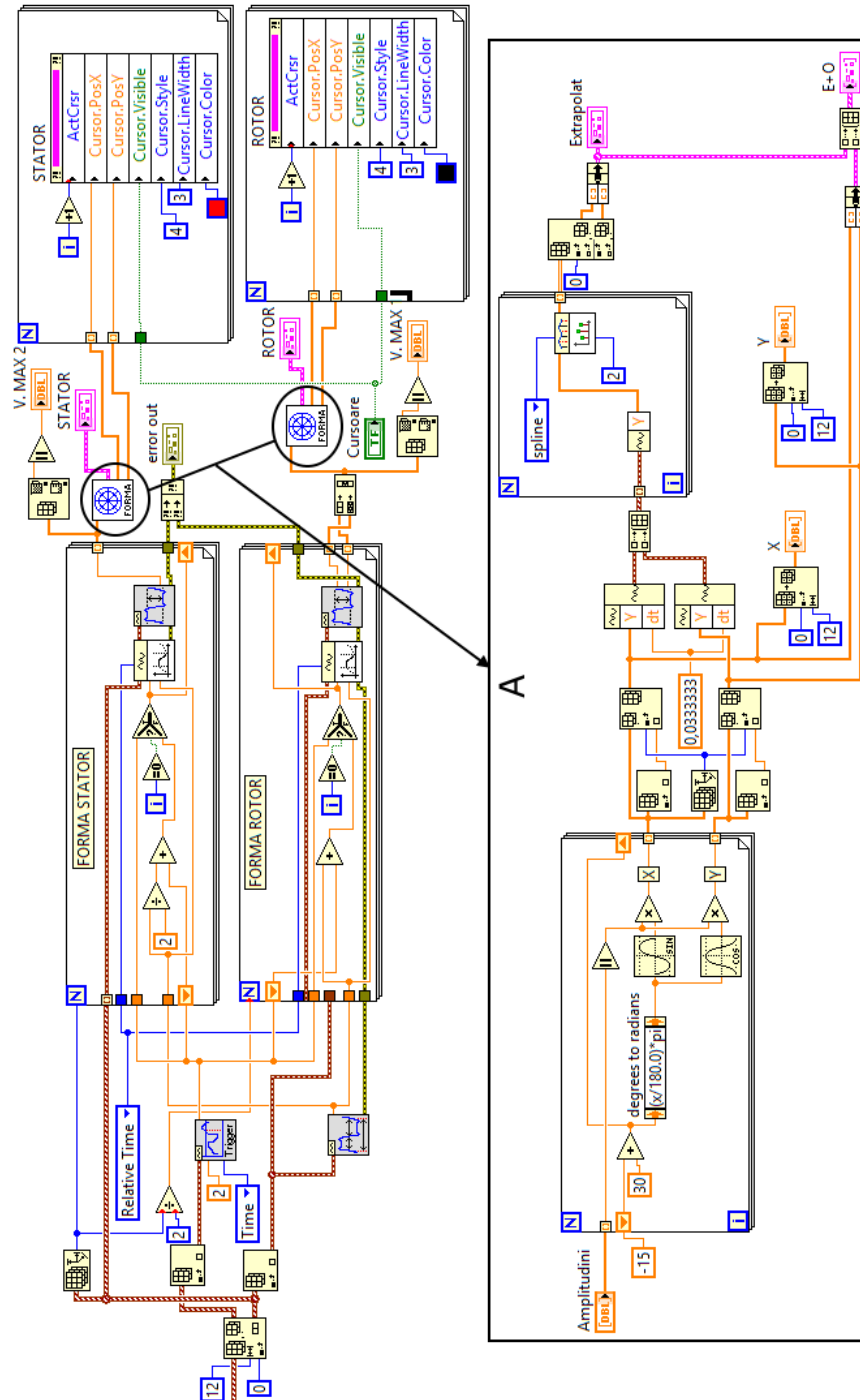


Fig. 5. 25. Diagrama bloc a instrumentului virtual dezvoltat pentru determinarea formei rotorului și statorului în timpul funcționării HG

Deoarece valoarea întrefierului este semnificativ mai mică decât diametrele celor două ansamble (rotor și stator), se folosește o reprezentare abstractă a celor două forme, prin micșorarea amplitudinilor tensiunilor electromotoare ce compun forma rotorului, față amplitudinile ce compun forma statorului. Se stabilește o deplasare limită a rotorului prin trasarea unui cerc cu diametrul ce corespunde cu 10% din valoarea întrefierului. O funcționare în condiții de stabilitate presupune ca forma rotorului să nu depășească această limită impusă în toate regimurile de funcționare staționare sau tranzitorii. În momentul în care rotorul depășește acest cerc, aplicația dezvoltată indică zona în care întrefierul scade sub limita impusă.

Corelația dintre tensiunile electromotoare induse în bobinele sondă (*t.e.m.*) și valoarea întrefierului exprimată în [mm], se obține prin intermediul secvenței din diagrama bloc a instrumentului virtual dezvoltat pentru monitorizarea întrefierului, prezentată în Fig. 5.26. Se măsoară întrefierul în patru puncte ale statorului decalate la  $90^\circ$ , în dreptul bobinelor B1, B4, B7, B10, cu rotorului în stare de repaus. Se introduc valorile obținute în interfața cu utilizatorul prin controlul "Întrefier static". În timpul funcționării HG, din formele de undă achiziționate se rețin valorile *t.e.m.* în bobinele sondă B1, B4, B7, B10 de către polii P1, P4, P7, P10 (detaliul A Fig. 5.26), în momentul în care P1 este în dreptul bobine B1. Așa cum se poate observa și în detaliul A al Fig. 5.26, momentul de interes este sesizat prin intermediul semnalului furnizat de senzorul de turație optic, care are rolul unui Trigger.

Ținând cont că aceste valori sunt invers proporționale cu valorile întrefierului, se determină o constantă de calibrare pentru corelația [V]-[mm]. În timpul funcționării HG, pe baza acestei constante se calculează și se afișează în mm, următoarele:

- valorile estimate ale întrefierului în pozițiile în care sunt montate cele 12 bobine sondă (mm în Fig. 5.26);
- valoarea medie a întrefierului estimat;
- valoarea abaterii admisibile, considerată ca fiind 10 % din valoarea medie a întrefierului estimat.

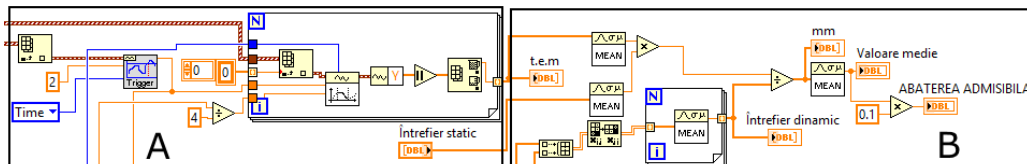


Fig. 5. 26. Secvență din diagrama bloc a VI-ului dezvoltat pentru monitorizarea întrefierului, în care se determină corelației [V]-[mm]

Cele două ferestre în care se afișează forma rotorului, a statorului și respectiv variația întrefierului, se prezintă în capitolul 6 odată cu rezultatele experimentale obținute în mediul industrial.

Metoda propusă în cadrul acestui subcapitol oferă aceeași acuratețe pentru centrarea rotoarelor în câmp magnetic ca prima metodă propusă, însă prezintă un dezavantaj tehnologic. Acesta este determinat de necesitatea implementării procedurii de montare a bobinelor sondă în caietul de sarcini prevăzut în timpul lucrărilor de reparație, lucru care nu este posibil în unele cazuri. În schimb această metodă prezintă un avantaj prin posibilitatea monitorizării formei stator-rotor și implicit a întrefierului în timpul funcționării mașinii.

## **5.2. Determinarea cuplului electromagnetic asincron pentru HG reversibile**

Determinarea cu precizie a curbei cuplului este impusă în cadrul procesului de omologare a mașinilor electrice rotative de mică și mare putere. De asemenea, cuplul de rotație are un rol important în determinarea performanțelor reale de funcționare a tuturor mașinilor rotative. Conform [ST3] și [ST4] cuplul electromagnetic dezvoltat de mașina sincronă poate fi determinat prin diverse metode directe sau indirecte.

Metodele directe clasice de măsurare a cuplului ce implică utilizarea unor traductoare (dinamometre) care se interpun între arborele mașinii testate și mașina sarcină, sunt dificile sau chiar imposibil de implementat în cazul hidrogenatoarelor. În literatura de specialitate se propun diverse metode în care se utilizează echipamente și instalații de măsurare directă a cuplului de rotație la mașini rotative de putere mare. Majoritatea metodelor se bazează pe deformarea elastică a unor timbre tensometrice montate pe arborele mașinii și transmiterea informațiilor wireless folosind diferite protocoale precum Bluetooth [B24], Zigbee [N5] sau alte benzi de frecvență radio dedicate [P14].

Cuplul electromagnetic al mașinilor sincrone se poate determina indirect prin diverse metode experimentale cât și prin simulări numerice folosind Tensorul lui Maxwell [T12] sau metoda lui Coulomb. O comparație și o descriere detaliată a metodelor indirect bazate pe simularea numerică este prezentată în [S20].

În continuare se prezintă câteva metode experimentale de determinare indirectă a cuplului electromagnetic asincron al mașinilor sincrone de putere mare.

### **5.2.1. Regimul de pornire lentă în gol la tensiune scăzută**

Ca metodă indirectă, în cazul mașinilor electrice de putere mare procesul de pornire lentă în gol este un regim din care se poate determina cu precizie caracteristica cuplului în funcție de alunecare. Pentru ca procesul de pornire să fie suficient de lent, astfel încât mașina sincronă să parcurgă toate punctele caracteristicii mecanice statice într-o succesiune cvasistaționară, pornirea are loc la tensiune redusă [B26], [D9], [D10], [O3]. De asemenea acest regim se poate aplica și pentru a determina cuplul electromagnetic asincron al hidrogenatoarelor reversibile ce funcționează în regim de pompaj [Z8]. Sunt cunoscute 3 proceduri bazate pe regimul tranzitoriu de pornire lentă în gol, care pot fi aplicate doar la mașini sincrone ce au colivii de pornire și moment mare de inerție [D10].

O analiză aprofundată a procesului de pornire lentă în gol se face în [K9], unde sunt date și comparații între caracteristica statică a cuplului și caracteristica obținută pentru cuplu la pornirea lentă în gol.

În continuare se prezintă câteva noțiuni teoretice privitoare la procedurile de determinare a curbei cuplului din regimul de pornire lentă în gol.

#### **A. Determinarea curbei cuplului pe baza bilanțului energetic**

Metoda bilanțului energetic presupune achiziționarea secvențială a valorilor momentane a curenților, tensiunilor și calcularea puterii active interioare ce se transferă prin întrefier din stator în rotor, pe toată durata procesului de pornire lentă

în gol la tensiune scăzută. Principiul acestei metode este descris în detaliu în [D9], [B13], [B25] și nu va fi prezentat în cadrul acestei lucrări.

În Fig. 5.27 se prezintă bilanțul energetic al mașinii sincrone, unde:

- $P_1$  – puterea activă absorbită determinată din regimul de pornire lentă;
- $p_{Fe}$  – pierderile în fier determinate dintr-o proba de funcționare în regim de mers în gol;
- $p_{Cu1}$  – pierderile în cupru datorate efectului termic din înfășurările statorice;
- $p_{sup}$  – pierderile suplimentare a căror valoare poate fi aproximată în funcție de puterea nominală a mașinii conform [ST3] (vezi Tabelul 5.2):
- $p_{Cu2}$  – pierderile în bobinajul rotorului;
- $p_m$  – pierderile mecanice în lagăre;
- $p_v$  – pierderile prin ventilație.

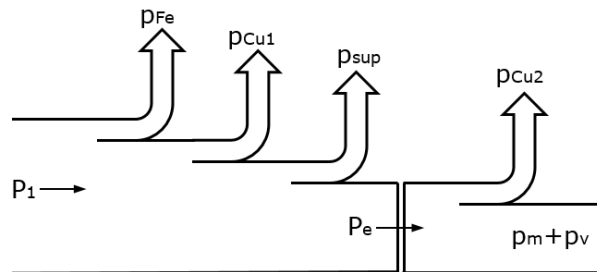


Fig. 5. 27. Bilanțul energetic al mașinii sincrone

Pentru diferite intervale de timp ale procesului de pornire lentă în gol la tensiune scăzută, se achiziționează formele de undă ale tensiunii și curentului pe cele 3 faze și se determină puterea activă  $P_1$ , iar apoi se determină cuplul electromagnetic asincron folosind relația [ST3], [ST4]:

$$M_a = \frac{P_e}{2\pi n_1} \quad (5.19)$$

unde  $n_1$  – turația sincronă a mașinii testate;  
 $P_e$  – puterea electromagnetică care se transferă prin întrefier din stator în rotor și care acoperă  $p_{Cu2}$ ,  $p_m$ ,  $p_v$ :

$$P_e = P_1 - p_{Cu1} - p_{Fe} - p_{sup} \quad (5.20)$$

Tabelul 5. 2. Pierderile suplimentare conform standard IEEE 112-2005

Puterea nominală [kW]	Pierderi suplimentare [%]
0,75-90	1,8
91-375	1,5
376-1800	1,2
>1800	0,9

Pierderile în cupru au cea mai mare pondere din totalul pierderilor și se determină conform relației [P15]:

$$P_{Cu1} = 3I^2R \quad (5.21)$$

unde  $I$  – valoarea efectivă a curentului statoric;  
 $R$  – rezistența ohmică a înfășurării.

Având variația cuplului electromagnetic asincron  $M_a$  și a turației sincrone  $n_1$  se obține în final caracteristica cuplului  $M_a=f(n_1)$ , în timpul procesului de pornire lentă în gol a mașinii sincrone.

Deoarece în cazul metodei bilanțului energetic se consideră cuplul electromagnetic asincron determinat doar de armonica fundamentală a câmpului învârtitor produs de stator care se rotește cu turația sincronă, la alunecări mari apar erori semnificative la estimarea curbei cuplului [D9]. Aceste erori se datorează cuplurilor parazite asincrone care determină variații ale puterii active absorbită de mașina. Folosind analiza elementului finit în mediul ANSYS și instrumente virtuale dezvoltate în mediul LabVIEW în [S21] se concepe o metodă de punere în evidență a componentelor în domeniul frecvență a cuplului electromagnetic pentru o estimare corectă a gradului de deformare a curbei cuplului.

### B. Determinarea curbei cuplului folosind metoda accelerației

O altă metodă de determinare a curbei cuplului electromagnetic în regimul de pornire lentă în gol la tensiune scăzută este metoda accelerației, ce presupune derivarea turației pentru diferite intervale de timp ale procesului tranzitoriu, neglijând frecările și folosind ecuația fundamentală a mișcării [A12], [D10], [D11], [L7]:

$$M_a = \frac{1}{9,549} J \frac{dn}{dt} \quad (5.22)$$

Momentul de inerție  $J$  se poate determina experimental printr-o probă standard de oprire în gol [ST3], [ST4]. Se știe că derivarea numerică amplifică efectul erorilor aleatoare de măsurare și de aceea derivarea directă a dependenței experimentale  $n(t)$  conduce la erori. Există mai multe variante de îmbunătățire a preciziei, majoritatea bazate pe metode numerice, printre care și exprimarea analitică a dependenței turației și apoi derivarea acesteia.

Folosind mediul LabVIEW și o placă de achiziție NI în [B27] se prezintă un pachet de instrumente virtuale care achiziționează și calculează mărimile de interes necesare pentru determinarea curbei cuplului folosind metoda accelerației. Aceste VI-uri oferă de asemenea posibilitatea de a vizualiza curba cuplului în funcție de turație prin interpolare polinomială folosind metoda celor mai mici pătrate.

Pentru o estimare corectă a curbei cuplului electromagnetic în funcție de turație sau alunecare, în regimul de pornire în gol cu tensiune scăzută, valorile obținute prin cele trei metode trebuie extrapolate la tensiunea nominală a mașinii, ținând cont de gradul de saturație al circuitului magnetic. Astfel, în cazul unui circuit magnetic nesaturat extrapolarea se face folosind relația:

$$M_{an} = M_a \left( \frac{U_n}{U} \right)^2 \quad (5.23)$$

unde  $M_{an}$  – cuplul electromagnetic asincron la tensiunea nominală  $U_n$ ;  
 $M_a$  – cuplul electromagnetic asincron la tensiunea scăzută  $U$ .

Dacă se consideră și efectul saturației atunci extrapolarea folosind pătratul tensiunii numai este corectă și se folosește relația [B26], [D9], [D10]:

$$M_{an} = M_a \left( \frac{U_n}{U} \right)^m \quad (5.24)$$

unde  $m$  – indice care se determină experimental dintr-o regresie liniară, prin logaritizarea relației (5.24), folosind mai multe măsurători.

Conform [D10] se recomandă determinarea experimentală a indicelui  $m$  folosind metoda celor mai mici pătrate pentru minim 3 porniri lente în gol la diverse tensiuni scăzute.

### C. Determinarea curbei cuplului prin măsurători de flux magnetic și curent

Folosind traductoare de flux cu efect Hall și traductoare de curent în [O3] se propune o metodă de determinarea directă a cuplului electromagnetic  $M_e$  prin măsurarea fluxului magnetic și a curenților statorici, conform relației:

$$M_e = r \int B_r H_\phi dA \quad (5.25)$$

unde  $r$  – raza suprafeței cilindrice a întrefierului;

$B_r$  – componenta pe direcție radială a densității fluxului magnetic;

$H_\phi$  – componenta pe direcție tangențială a intensității fluxului magnetic;

$A$  – aria suprafeței cilindrice a întrefierului;

Așa cum s-a prezentat în cazul metodologiei din subcapitolul 5.1.5. în locul traductoarelor de întrefier se pot folosi bobine sondă montate pe pachetele elementare ale statorului, care oferă aceeași acuratețe a procesului de măsurare la un preț relativ mic.

### D. Determinarea curbei cuplului pe baza parametrilor electrici din modelul $d$ și $q$ al mașinii sincrone

Pe baza parametrilor electrici ce definesc modelul matematic  $d$ - $q$  [P16] se poate determina cuplul electromagnetic prin măsurarea directă a tensiunilor și a curenților statorici folosind un sistem de achiziție și prelucrare a datelor dedicat ce are în componență traductoare de tensiune și traductoare de curent de precizie ridicată [D9], [T13].

Relația fundamentală a cuplului electromagnetic  $M_e$  este definită pe baza mărimilor fundamentale după axa transversală și longitudinală a mașinii [C12], [B28], [D12], [K9], [L7]:

$$M_e = \frac{3}{2} p (\psi_d i_q - \psi_q i_d) \quad (5.26)$$

unde  $p$  – este numărul de perechi de poli ai mașinii;

$\psi_{d,q}$  – fluxul total statoric după axele  $d$  și  $q$ ;

$i_{d,q}$  – curentului statoric după axele  $d$  și  $q$ ;

O metodă de determinare experimentală a cuplului electromagnetic se bazează pe relația fundamentală (5.26) scrisă în componente de fazori spațiali [V6]:

$$M_e = p(\underline{\psi}_S \times \underline{i}_S) \quad (5.27)$$

unde  $\underline{\psi}_S$  – vectorul spațial pentru fluxul magnetic;  
 $\underline{i}_S$  – vectorul corespunzător curentului statoric.

Scopul metodei propuse în [V6] constă în stabilirea unei relații de calcul a cuplului electromagnetic cu un număr cât mai mic de parametri, care pot fi măsuțați direct. Astfel dacă se ține cont de relația (5.27) și de relația de definiție a vectorului spațial, cuplul electromagnetic va fi:

$$M_e = \frac{p}{\sqrt{3}} [\psi_A(i_B - i_C) + \psi_B(i_C - i_A) + \psi_C(i_A - i_B)] \quad (5.28)$$

Prin integrare, fluxurile pe cele trei faze ale mașinii pot fi scrise în funcție de tensiunile pe fază  $U_j$ :

$$U_j = Ri_j + \frac{d\psi_j}{dt}, \quad j = A, B, C \quad (5.29)$$

Astfel, dacă se ține cont de relația (5.28) și (5.29) cuplul electromagnetic poate fi determinat folosind relația:

$$M_e = \frac{p}{\sqrt{3}} [i_B \int (U_{AB} + 2U_{BC} + kRi_C) dt - i_C \int (U_{AB} - U_{BC} + kRi_C) dt] \quad (5.30)$$

unde  $k$  – constată care pentru conexiunea stea are valoarea 3 și pentru conexiunea triunghi 1;  
 $U_{AB}, U_{BC}$  - tensiunile de linie ale mașinii;  
 $R$  - rezistența electrică a înfășurării statorice.

### 5.2.2. Regimul de alimentare cu frecvență variabilă și rotor în repaus

În cadrul acestui subcapitol se propune o metodă de determinare a cuplului electromagnetic asincron pentru hidrogeneratoarele sincrone reversibile ce funcționează în regim de pompaj, folosind **regimul de alimentare cu frecvență variabilă și rotor în repaus (SSFR)**. **Metoda propusă** are la bază aceleași aspecte teoretice ca metoda prezentată în [B26], [D13], [D9], [S23] însă pentru achiziția și prelucrarea de date se folosesc **instrumente virtuale** dedicate, dezvoltate în **LabVIEW**, care preiau automat valorile achiziționate și reprezintă mărimile de interes sub formă grafică și numerică. Principalul avantaj al acestei metode constă în eliminarea etapei intermediare dintre achiziția datelor, sortarea și afișarea rezultatelor, astfel reducându-se timpul necesar diagnosticării mașinii și eliminându-se erorile specifice măsurătorilor cu mai multe instrumente simultan, într-un stand industrial [B29].

Metodologia de testare a unei mașini sincrone trifazate în regimul de alimentare cu frecvență variabilă și rotor în repaus este folosită în general pentru determinarea parametrilor operaționali ai mașinii sincrone cu scopul de a obține

funcțiile de transfer sau schemele echivalente în axa longitudinală sau transversală pentru noi modele matematice [A13], [ST3], [ST4].

Majoritatea lucrărilor actuale ce tratează determinarea parametrilor mașinilor sincrone prin SSFR folosesc pentru achiziția și prelucrare datelor instrumentația virtuală și sisteme de achiziție de date în locul osciloscopelor și aparatelor clasice de măsurare [B9], [S22], [S24]. În cazul mașinilor asincrone SSFR este folosită și pentru determinarea cuplului electromagnetic.

Obținerea cuplului electromagnetic a mașinilor sincrone de putere mare prin această metodă este prezentată în principiu în [D9], [D13], [S23]. Se menționează la această metodă dificultatea poziționării cu exactitate a rotorului în axa longitudinală ( $d$ ) și transversală ( $q$ ) a mașinilor sincrone cu număr mare de poli, la care chiar și cea mai mică eroare de aliniere mecanică poate conduce la erori substanțiale în aprecierea parametrilor [D13], [D14]. Poziționarea rotorului după cele două axe nu este necesară pentru mașinile asincrone datorită simetriei rotorului în relație cu caracteristicile electrice ale acestuia [W14], [M14].

Folosind mediul de instrumentație virtuală DASYLab și un echipament de achiziție dedicat, în [B8] se propune o nouă metodă de determinare a reactanțelor tranzitorii și subtranzitorii a mașinilor sincrone cu poli aparenti folosind SSFR, în care rotorul este poziționat într-o poziție arbitrară și nu în axele  $d$  și  $q$ .

Metoda standard de testare folosind SSFR [ST3], [ST4] constă în alimentarea înfășurării statorului de la o sursă de tensiune alternativă monofazată de frecvență variabilă iar rotorul având înfășurarea de excitație scurtcircuitată este fixat pe rând în axa longitudinală, apoi în cea transversală în raport cu axa câmpului magnetic determinat de curentul ce trece prin armătura statorului.

În acest caz, fenomenele ce se produc în rotor sunt aceleași cu cele produse când mașina sincronă funcționează în regim asincron cu o turație căreia îi corespunde alunecarea  $s$ .

În continuare, se prezintă o sinteză a principalelor considerații teoretice privind determinarea cuplului electromagnetic asincron la mașinile sincrone de putere mare folosind SSFR [C12], [D13], [D14], [D15], [D16], [K9], [K10], [L7], [S23].

Se poate afirma că alunecarea rotorului la funcționarea în regim asincron a mașinii sincrone este egală frecvența relativă  $f_r$  a tensiunii de alimentare a mașinii cu rotorul în stare de repaus. Această frecvență relativă este definită ca raportul dintre frecvența variabilă a tensiunii de alimentare în regim cu rotorul blocat  $f_v$  și frecvența nominală  $f_n$ :

$$s = f_r = \frac{f_v}{f_n} \quad (5.31)$$

Dacă se consideră o singură colivie în rotor, impedanța echivalentă  $Z_R(s)$  corespunzătoare schemei echivalente a mașinii sincrone la funcționarea în asincron (Fig. 5.28) este definită conform relației:

$$Z_R(s) = r_1 + jx_{\sigma} + \frac{j \frac{x_{ad} \cdot r_f}{s} - x_{ad} \cdot x_{\sigma f}}{\frac{r_f}{s} + j(x_{\sigma f} + x_{ad})} \quad (5.32)$$

unde  $r_1$  – rezistența electrică a înfășurării statorului la 50 Hz;  
 $r_f$  – rezistența electrică a înfășurării de excitație a rotorului;



## 5.2. Determinarea cuplului electromagnetic asincron pentru HG reversibile 113

$X_{\sigma}$  – reactanța de dispersie a înfășurării statorului;  
 $X_{\sigma f}$  – reactanța de dispersie a înfășurării rotorice;  
 $X_{ad}$  – reactanța de reacție longitudinală.

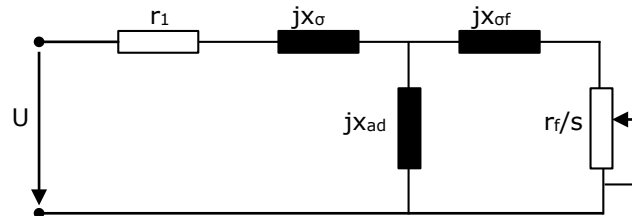


Fig. 5. 28. Schema echivalentă a mașinii sincrone la funcționarea în regim asincron corespunzătoare axei longitudinale

Pentru a determina schema echivalentă a mașinii sincrone cu rotorul în repaus se înmulțesc reactanțele schemei din Fig. 5.28 cu valoarea frecvenței relative  $f_r$ . Dacă se ține cont de relația (5.31) atunci schema echivalentă va fi cea din Fig. 5.29.

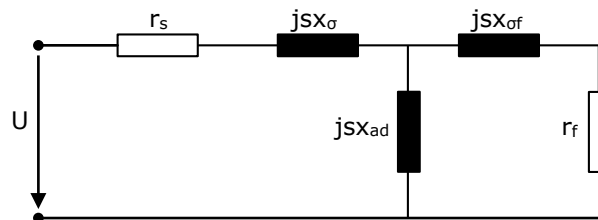


Fig. 5. 29. Schema echivalentă a mașinii sincrone cu rotorul în repaus și statorul alimentat cu o tensiune de frecvență variabilă

Impedanța echivalentă  $\underline{Z}_S(s)$  a mașinii sincrone în stare de repaus (Fig. 5.29) este definită conform relației:

$$\underline{Z}_S(s) = r_s + jsX_{\sigma} + s \frac{j \frac{X_{ad} \cdot r_f}{s} - X_{ad} \cdot X_{\sigma f}}{\frac{r_f}{s} + j(X_{\sigma f} + X_{ad})} \quad (5.33)$$

unde  $r_s$  – rezistența electrică a înfășurării statorului la  $f_r$ .

Din compararea expresiilor (5.32) și (5.33) se poate obține o relație între impedanța echivalentă  $\underline{Z}_R(s)$  a mașinii în stare de rotație la funcționarea în regim asincron cu alunecarea  $s$  și impedanța echivalentă  $\underline{Z}_S(s)$  a mașinii cu rotorul în stare de repaus, a cărei înfășurare statorică este alimentată cu o tensiune de alimentare având frecvența egală cu frecvența tensiunii din rotor în stare din rotație:

$$\underline{Z}_R(s) = \frac{\underline{Z}_S(s)}{s} - \frac{r_s}{s} + r_1 \quad (5.34)$$

Pentru a determina valoarea impedanței echivalente  $\underline{Z}_S(s)$  se folosește metoda componentelor simetrice în cazul celor trei moduri de conectare a înfășurării

statorului la sursa de tensiune monofazată de frecvență variabilă: monofazat, bifazat și trifazat.

Pentru fiecare mod de conectare se determină experimental impedanța echivalentă  $\underline{Z}_m(s)$  aferentă schemei utilizate, pentru poziționarea rotorului în axa  $d$  cât și  $q$ . Pentru metoda propusă în cadrul acestui subcapitol se folosește doar conectarea bifazată ce presupune înserierea și alimentarea cu o tensiune monofazată de frecvență variabilă a fazelor B și C, faza A rămânând liberă (Fig. 5.30).

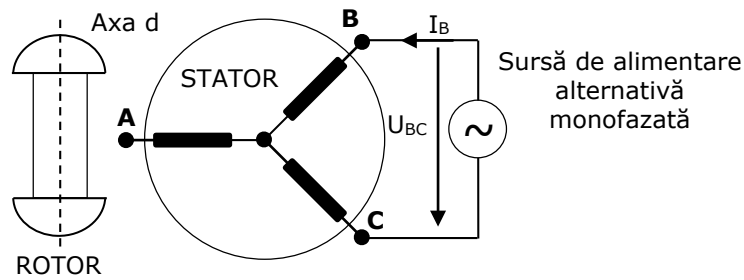


Fig. 5. 30. Principiul de conectare bifazată a înfășurării statorice în cazul metodei SSFR

Impedanța echivalentă a mașinii în stare de repaus corespunzătoare schemei de alimentare din Fig. 5.30 este definită de relația:

$$\underline{Z}_S(s) = \frac{\underline{Z}_m(s)}{2} = \frac{U_{BC}}{2I_B} \quad (5.35)$$

unde  $U_{BC}$  – tensiunea de alimentare alternativă monofazată de frecvență variabilă, exprimată în complex;

$I_B$  – curentul absorbit de înfășurarea statorului, exprimat în complex.

Odată determinată experimental impedanța echivalentă a mașinii cu rotorul în stare de repaus  $\underline{Z}_S(s)$  se poate calcula valoarea impedanței în stare de rotație a mașinii sincrone la funcționarea în regim asincron  $\underline{Z}_R(s)$ :

$$\underline{Z}_R(s) = r_e(s) + jX_e(s) \quad (5.36)$$

Dacă se consideră că valoarea rezistenței active a înfășurării statorice  $r_1$  rămâne constantă în funcție de frecvența tensiunii de alimentare  $r_s$ , atunci valorile rezistenței  $r_e(s)$  și reactanței  $X_e(s)$  echivalente sunt:

$$r_e(s) = \frac{|\underline{Z}_S(s)| \cdot \cos \varphi - r_1}{s} + r_1 \quad (5.37)$$

$$X_e(s) = \frac{|\underline{Z}_S(s)| \cdot \sin \varphi}{s} \quad (5.38)$$

Trebuie specificat faptul că  $r_e(s)$ ,  $X_e(s)$  sunt valori nesaturate. Pentru a obține impedanța echivalentă  $\underline{Z}_{R_s}(s)$  în condiții de saturație a circuitului magnetic se folosește relația:

$$\underline{Z}_{RS}(s) = k_r r_e(s) + jk_x X_e(s) \quad (5.39)$$

unde  $k_r$  și  $k_x$  sunt coeficienții de saturație corespunzători rezistenței  $r_{es}(s)$  și reactanței  $X_{es}(s)$  echivalente în condiții de saturație:

$$k_r = \frac{r_{es}(s)}{r_e(s)} \quad , \quad k_x = \frac{X_{es}(s)}{X_e(s)} \quad (5.40)$$

Deoarece  $k_r$  și  $k_x$  rămân aproape constante când alunecarea variază în domeniul 0-0,2, acestea se pot determina experimental dacă se cunosc valorile saturate și nesaturate ale reactanței și rezistențe echivalente pentru o singură alunecare. Valorile parametrilor  $r_{es}(s)$  și  $X_{es}(s)$  se determină prin metoda pornirii directe la rețea a mașinii de încercat.

### 5.2.3. Descrierea tehnicii de testare și a instrumentelor virtuale dezvoltate pentru determinarea cuplului electromagnetic asincron

Dacă se cunoaște impedanța echivalentă  $\underline{Z}_R(s)$  se pot calcula componentele asincrone ale cuplului electromagnetic după axa longitudinală ( $m_{ad}$ ) și transversală ( $m_{aq}$ ) conform [D13], [S23]:

$$m_{ad} = \frac{U_n^2}{P_n} \cdot \frac{r_e(s) - r_l}{|\underline{Z}_R(s)|^2} \quad , \quad m_{aq} = \frac{U_n^2}{P_n} \cdot \frac{r_e(s) - r_l}{|\underline{Z}_R(s)|^2} \quad (5.41)$$

unde  $P_n$  – puterea activă nominală a mașinii;  
 $U_n$  – tensiunea nominală a mașinii;

Caracteristica cuplului electromagnetic asincron a mașinii sincrone în funcție de alunecare, se obține prin determinarea  $\underline{Z}_R(s)$  pentru fiecare valoarea a frecvenței de alimentare alternative monofazate  $f_r$  în domeniul 0Hz-50 Hz deci pentru alunecări de la  $s=0$  până la  $s=1$ . Caracteristica rezultantă a cuplului electromagnetic asincron în unități relative ( $m_a$ ) corespunzător unei alunecări  $s$  dezvoltat de mașina sincronă ce funcționează în regim asincron se determină conform [D13], [S23]:

$$m_a = \frac{m_{ad} + m_{aq}}{2} \quad (5.42)$$

În continuare se prezintă câteva considerații practice necesare pentru a determina cuplul electromagnetic asincron, folosind metoda prezentată anterior.

Rotorul mașini sincrone se poziționează mecanic pe rând în axa d și q iar înfășurarea statorului se conectează la o sursă de tensiune monofazată cu frecvență variabilă. Pentru a verifica poziția rotorului, se măsoară prin intermediul unui voltmetru conectat la bornele înfășurării rotorice, valoarea tensiunii în momentul alimentării celor două faze B și C înseriate în curent alternativ la frecvență nominală. Valoarea acesteia va fi zero pentru axa q și maximă pentru axa d.

Când măsurătorile se efectuează după axa longitudinală, axa rotorului va fi paralelă cu axa câmpului magnetic rezultat al celor două faze alimentate (B și C) iar în cazul axei transversale cele două axe vor fi perpendiculare.

Se recomandă magnetizarea circuitului magnetic prin stabilirea unui curent de magnetizare egal cu cel de excitație la mers în gol al mașinii sincrone, corespunzător tensiunii nominale la borne.

Prin intermediul instrumentelor virtuale dezvoltate în cadrul primului nivel de prelucrare software al SAPDM, se achiziționează tensiunea de alimentare alternativă monofazată de frecvență variabilă  $U_{BC}(t)$  și curentul  $i_B(t)$ , iar pentru diferite valori ale alunecării se VI-ul calculează automat următoarele:

- valorile efective  $U_{BC}$  și  $I_B$ ;
- defazajul dintre  $U_{BC}$  și  $I_B$ ;
- frecvența variabilă de alimentare  $f_v$ ;

Pentru cele două poziții ale rotorului (axa  $d$  și  $q$ ) se exportă un set de valori corespunzătoare fiecărei valori a alunecării de la  $s=0$  până la  $s=1$ .

Așa cum se prezintă în capitolul 4, valorile pot fi exportate fie manual prin apăsarea unui buton aferent la momentul de interes sau automat prin stabilirea unui număr total de măsurători și definirea intervalului de timp dintre două măsurători consecutive.

Folosind mediul LabVIEW s-au dezvoltat instrumente virtuale dedicate care prelucrează valorile achiziționate și calculate de primul nivel software și afișează curba cuplului electromagnetic în funcție de alunecare, conform principiului teoretic prezentat anterior. Aplicația ce conține toate VI-uri dezvoltate face parte din cel de-al doilea nivel software al SAPDM și se lansează prin apăsarea butonului "Determinarea cuplului EM" din cadrul ferestrei din Fig. 5.1.

Fereastra principală a aplicației dezvoltate pentru determinarea cuplului electromagnetic al mașinilor sincrone la funcționarea în regim asincron, prin alimentarea înfășurării statorice de la o sursă monofazată alternativă de frecvență variabilă și rotor în repaus, este prezentată în Fig. 5.31.

Fișierele ce conțin rezultatele obținute în urma celor două măsurători corespunzătoare poziționării rotorului în axa  $d$  și  $q$  se încarcă în aplicația dezvoltată, folosind butoanele aferente din detaliul A al Fig. 5.31. Trebuie precizat faptul că aceste butoane devin active doar după ce utilizatorul definește mărimile de intrare impuse de metoda prezentată în subcapitolul anterior. Acest lucru este posibil prin apăsarea butonului "Constante" (Fig. 5.31 detaliul B) ce va lansa fereastra din Fig. 5.32.

Astfel, în fereastra din Fig. 5.32 utilizatorul precizează următoarele mărimi de intrare:

- puterea activă nominală  $P_n$ ;
- tensiunea nominală  $U_n$ ;
- rezistența electrică pe fază a înfășurării statorice  $r_1$ ;
- frecvența nominală a mașinii  $f$ .

În cadrul instrumentului virtual din Fig. 5.32 constantele definite de utilizator au următoarele unități și ordin de măsură:

- $P_n$  este exprimată în kW;
- $U_n$  este exprimată în V;
- $r_1$  este exprimată în  $\Omega$ ;
- $f$  este exprimată în Hz;

5.2. Determinarea cuplului electromagnetic asincron pentru HG reversibile 117

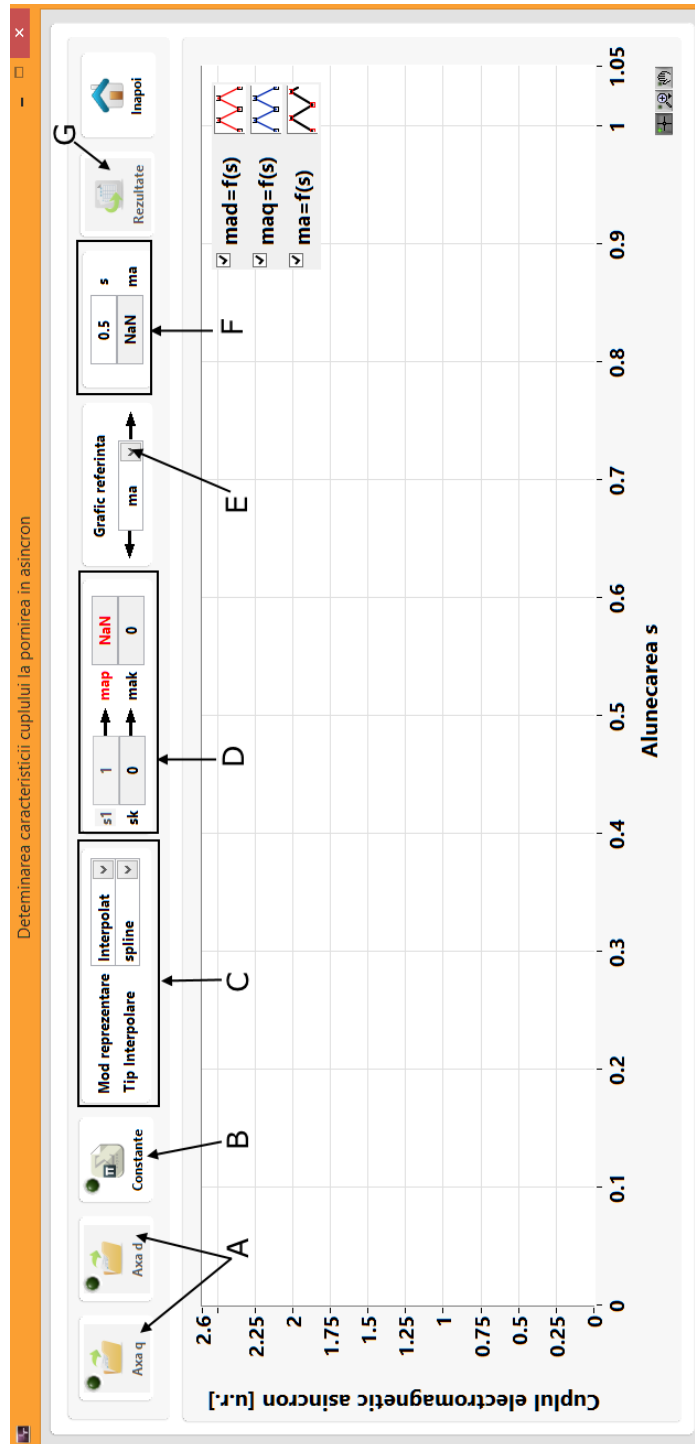


Fig. 5. 31. Interfața cu utilizatorul a aplicației dezvoltate pentru determinarea cuplului electromagnetic prin metoda SSFR

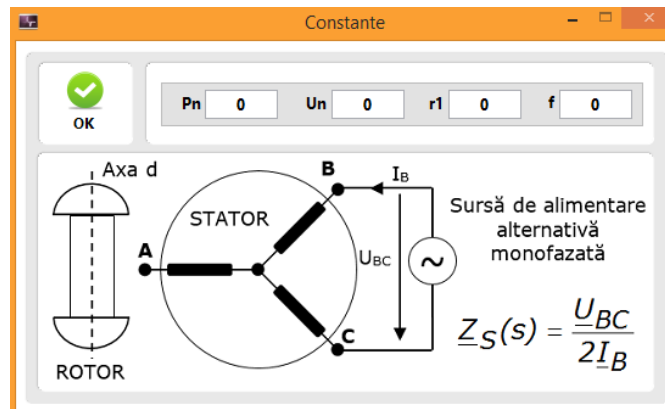


Fig. 5. 32. Fereastra de dialog în care se definesc constantele impuse de metodă SSFR

Aplicația oferă posibilitatea de a afișa direct curba cuplului funcție de alunecare folosind patru moduri de interpolare a rezultatelor obținute prin metoda prezentată anterior (Fig. 5.31 detaliul C): interpolare de ordinul 0, liniară, spline și interpolare Hermite cubică.

Valorile mărimilor de interes, ce caracterizează regimul de pornire în asincron al mașinii sincrone testate, se afișează sub formă numerică în detaliul D al Fig. 5.33:

- cuplul de pornire  $m_{ap}$  corespunzător alunecării  $s=1$ ;
- cuplul maxim  $m_{ak}$  corespunzător alunecării critice  $s_k$ ;

Mărimile de interes pot fi afișate corespunzător celor două componente ale cuplului asincron după axa longitudinală  $m_{ad}$ , transversală  $m_{aq}$  sau corespunzător valorii medii a acestora  $m_a$  (Fig. 5.31 detaliul E).

De asemenea pentru fiecare valoarea a alunecării introdusă în căsuța din detaliul F al Fig. 5.31, aplicația afișează sub formă numerică valoarea cuplului asincron mediu.

Pentru a vizualiza toate valorile prelucrate și afișate de instrumentele virtuale din cadrul aplicației, se apasă butonul "Rezultate" care va lansa o fereastră ce conține câte un tabel cu rezultatele corespunzătoare celor două poziții ale rotorului.

În diagrama bloc din Fig. 5.33 rezultatele salvate prin intermediul nivelului primar de prelucrare software al SAPDM sunt citite și memorate sub forma unor variabile locale. Constantele definite de utilizator în fereastra din Fig. 5.32 împreună cu valorile memorate în variabilele locale, sunt citite de subVI-ul dezvoltat pentru calculul cuplului electromagnetic folosind noțiunile teoretice prezentate în subcapitolul anterior, din Fig. 5.33 detaliul A. Diagrama bloc a acestui subVI este prezentată în Fig. 5.35.

Valorile calculate de subVI-ul prezentat anterior sunt prelucrate mai departe de subinstrumentul virtual din detaliul B al Fig. 5.33, cu ajutorul căruia se afișează curba cuplului electromagnetic asincron în funcție de alunecare.

În cadrul diagramei bloc a acestui subVI, prezentată în Fig. 5.34, se implementează algoritmul pentru cele patru moduri de interpolare a rezultatelor, dar și cel pentru modul de afișare directă a acestora.

## 5.2. Determinarea cuplului electromagnetic asincron pentru HG reversibile 119

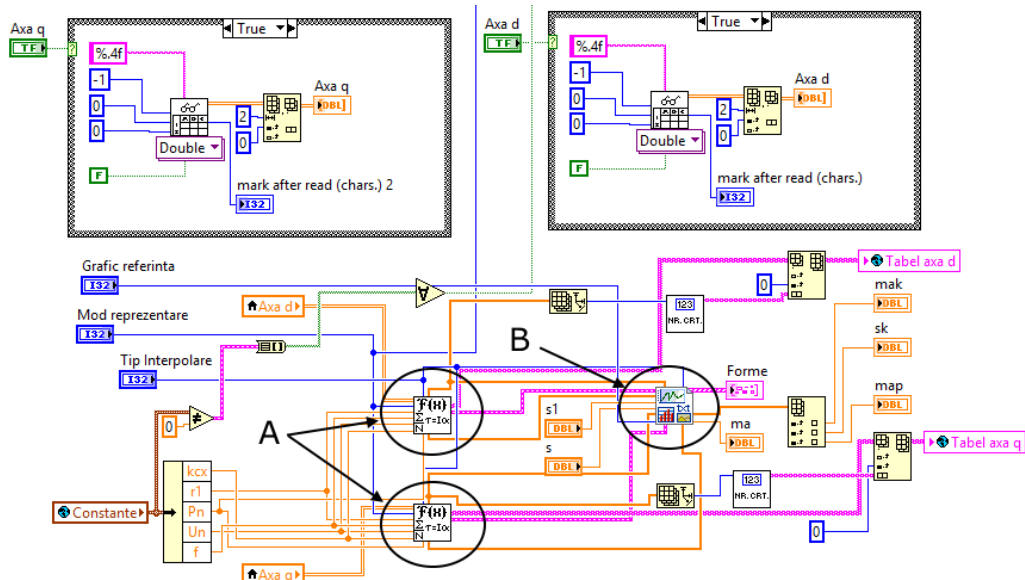


Fig. 5. 33. Secvența din diagrama bloc a instrumentului virtual principal din cadrul aplicației dezvoltate pentru determinarea cuplului electromagnetic asincron

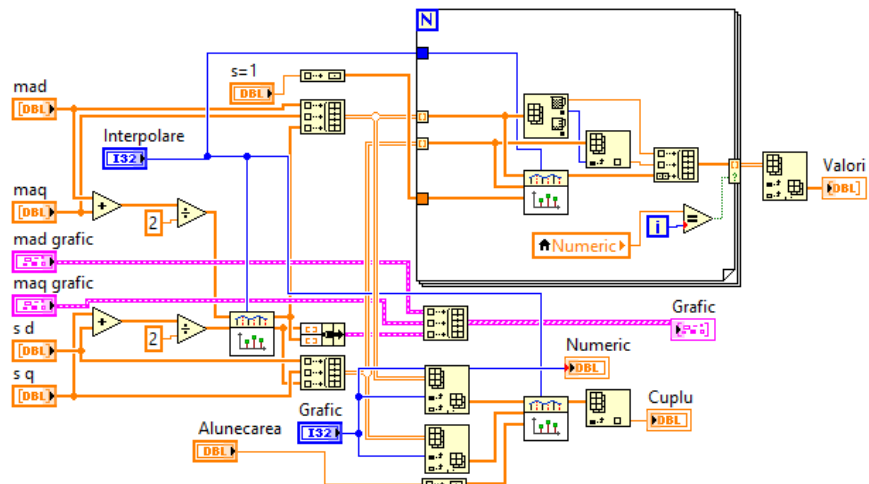


Fig. 5. 34. Diagrama bloc a subVI-ului (detaliul B Fig. 33) dezvoltat pentru reprezentarea curbei cuplului

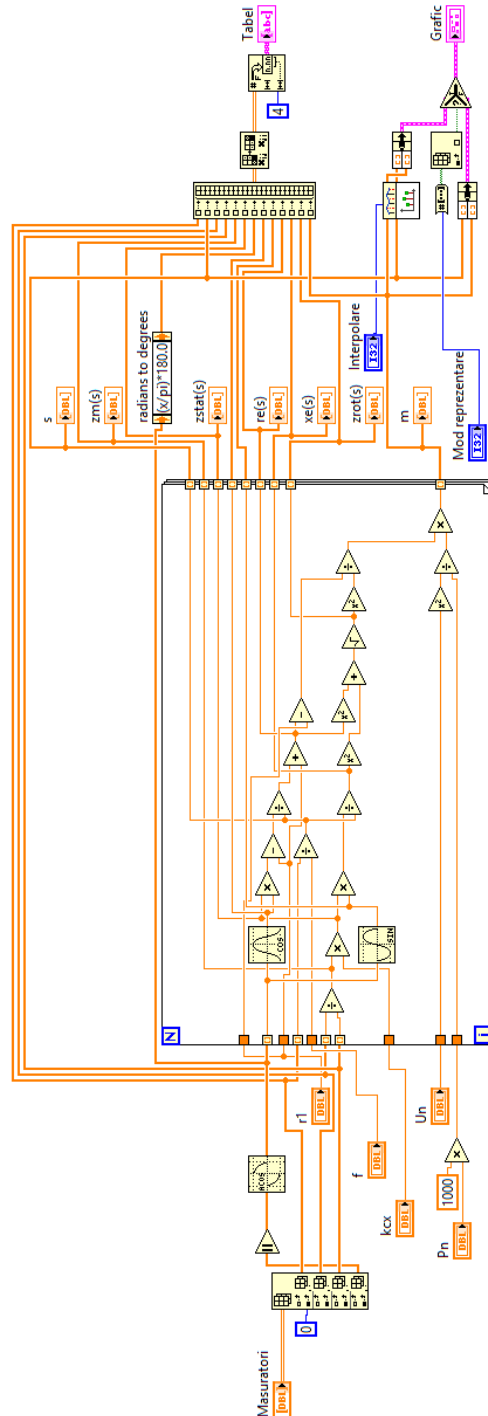


Fig. 5. 35. Diagrama bloc a subVI-ului (detaliu A Fig. 33) dezvoltat pentru calculul cuplului electromagnetic asincron folosind metoda propusă



## 5.2. Determinarea cuplului electromagnetic asincron pentru HG reversibile 121

Pentru aplicarea metodei în condiții de siguranță și pentru a obține rezultatele cât mai concludente, se recomandă următoarele:

- folosirea unei surse de alimentare monofazată de frecvență variabilă de putere mare, care poate asigura o valoare minimă a curentului egală cu jumătate din curentul nominal al mașinii sincrone testate;
- conectarea în scurtcircuit a înfășurării de excitație a mașinii sincrone de încercat;
- menținerea valorii curentului absorbit de înfășurarea statorică a mașinii de încercat la același nivel pentru mai multe valori ale frecvenței tensiunii de alimentare;
- pentru o valoare  $s=14\%$  se poate folosi ca sursă de frecvență variabilă un generator sincron antrenat de o mașină de curent continuu excitată de la o sursă separată.

**În concluzie, metoda de determinare a curbei cuplului electromagnetic la funcționarea în asincron a mașinii sincrone, bazată pe SSFR cu utilizarea instrumentației virtuale se poate aplica la încercarea tuturor mașinilor sincrone indiferent de putere sau tip constructiv.**

Pentru a valida experimental metoda propusă în cadrul acestui capitol, s-a dezvoltat o altă aplicație prin care se determină cuplul de pornire în regim asincron din regimul de pornire lentă în gol la tensiune scăzută, folosind metoda bilanțului energetic, prezentată în subcapitolul 5.2.1. Interfața cu utilizatorul a acestei aplicații se prezintă în Fig. 5.36. Deoarece această aplicație a fost dezvoltată doar în scop de validare și deoarece modul de operare este asemănător cu cel al aplicației prezentate anterior pentru cazul regimului de alimentare cu frecvență variabilă și rotor în repaus, în continuare se prezintă pe scurt facilitățile și modul de operare pentru metoda bilanțului energetic:

- se definesc datele nominale ale mașinii testate în fereastra de constante (Fig. 5.36 detaliul B);
- fișierele salvate online de nivelul primar SAPDM se încarcă folosind butonul "Descide" (Fig. 5.36 detaliul A);
- pentru a extrapola rezultatele obținute până la valoarea nominală a tensiunii de alimentare se apasă butonul aferent detaliului C al Fig. 5.36. Numărul de puncte de extrapolate a fost fixat la 10, însă se poate modifica în funcție de preferințele utilizatorului;
- pentru a vizualiza toate rezultatele obținute sub formă tabelară se apasă butonul aferent detaliului D al Fig. 5.36.

Fișierele ce conțin rezultatele experimentale salvate on-line, folosind nivelul primar SAPDM, sunt citite și memorate sub forma unor variabile locale în cadrul diagramei bloc din Fig. 5.37. Aceste valori sunt preluate de subVI-ul din detaliul A al Fig. 5.37, care extrapolează cele două curbe obținute  $I_k=f(U)$  și  $P_k=f(U)$  la tensiunea nominală. Se obțin astfel cele două dependențe de interes " $I_k=f(U)$  extrapolat" și " $P_k=f(U)$  extrapolat". Pe baza acestor dependențe și a relației (5.20) se obține puterea activă  $P_{ek}$ , care se transferă prin întrefier din stator în rotor, la funcționarea în regim de scurtcircuit. Folosind relația (5.19) se determină și se afișează sub formă numerică cuplul de pornire în regim asincron  $m_{ap}$  a mașinii sincrone. De asemenea aplicația dezvoltată afișează și următoarele valori de interes:

- pierderile în cupru din înfășurările statorului  $p_{Cu1}$  determinate folosind relația (5.21), pierderile suplimentare  $p_s$  și pierderile în fier  $p_{fe}$ ;
- puterea activă nominală  $P_n$  și puterea activă corespunzătoare mersului în scurtcircuit  $P_k$ ;
- puterea electromagnetică  $P_{ek}$ .

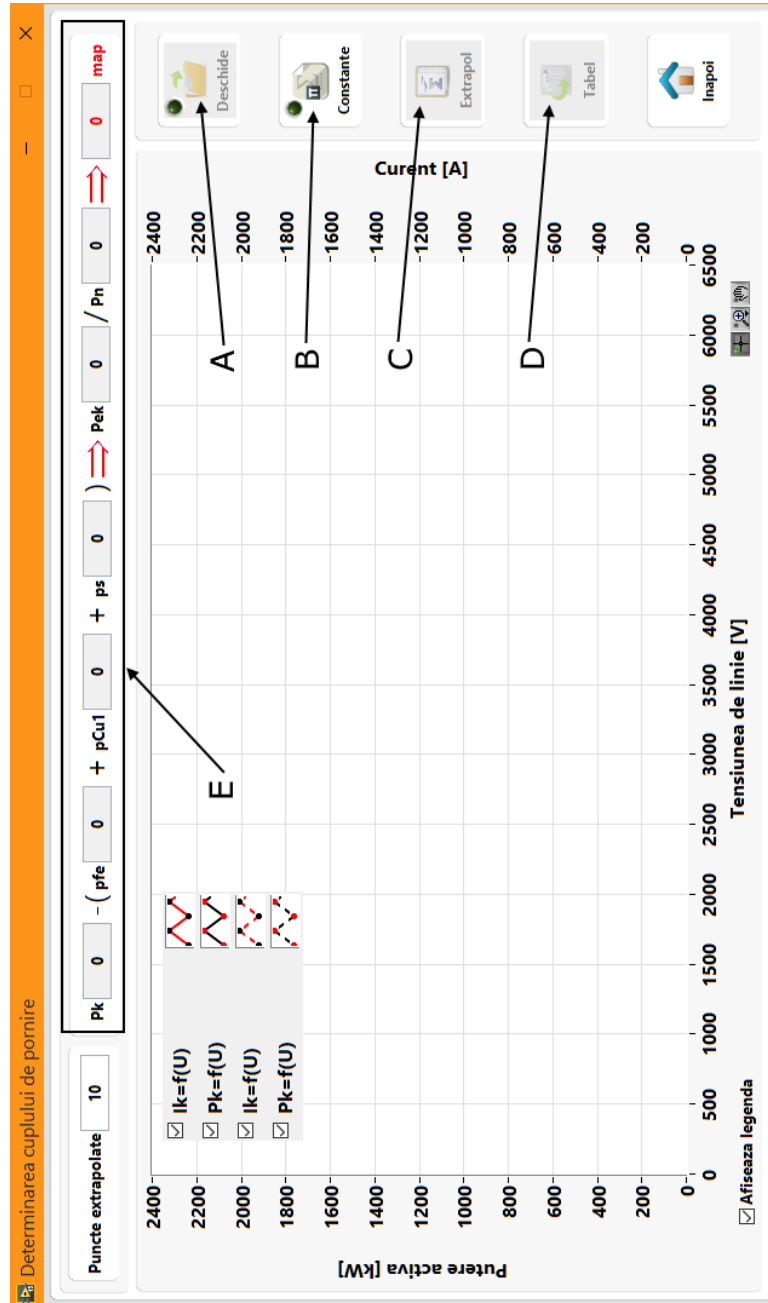


Fig. 5. 36. Interfața cu utilizatorul a aplicației dezvoltate pentru determinarea cuplului de pornire asincron folosind regimul de pornire lentă în gol și metoda bilanțului energetic

5.2. Determinarea cuplului electromagnetic asincron pentru HG reversibile 123

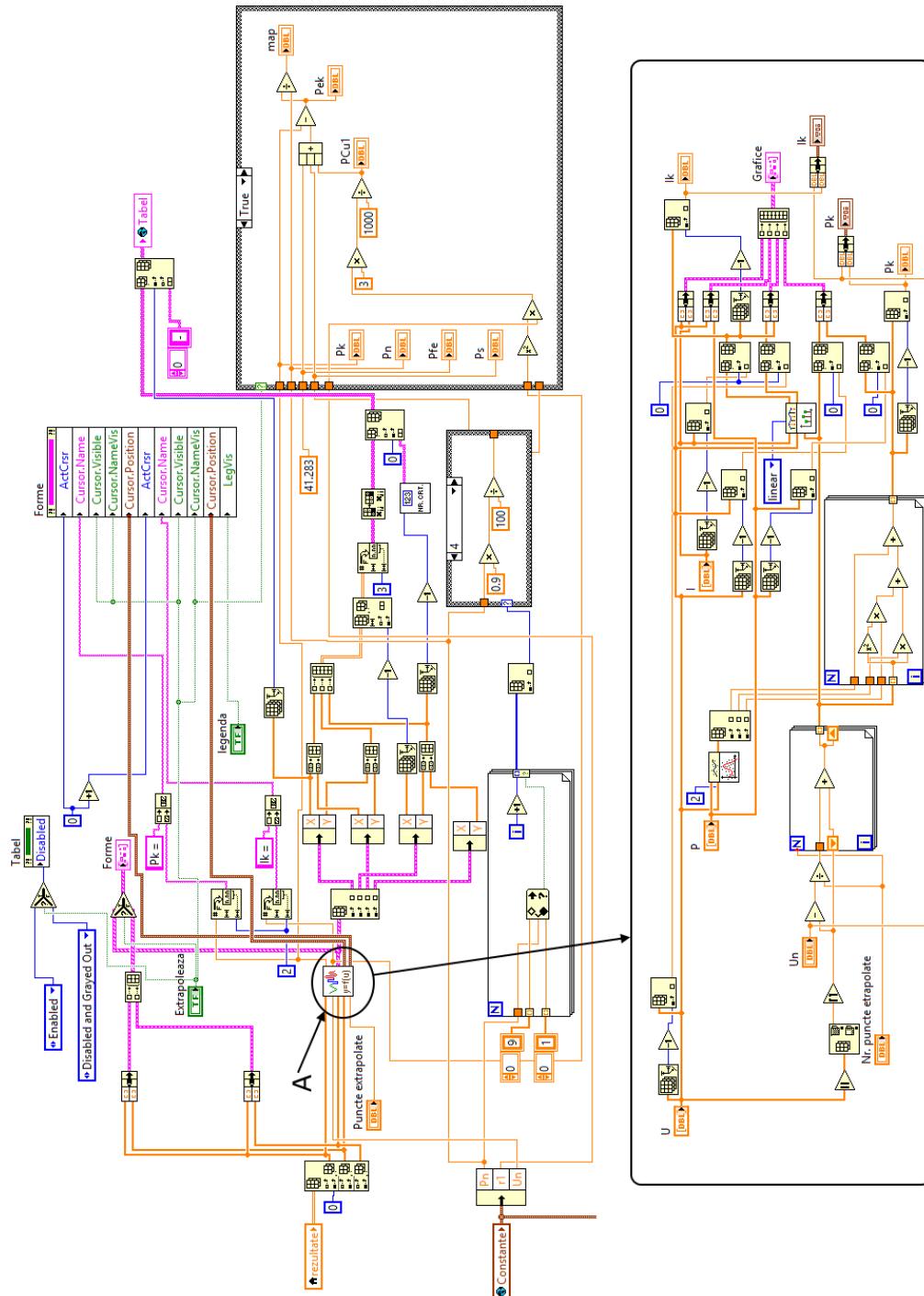


Fig. 5. 37. Diagrama bloc a instrumentului virtual principal din cadrul aplicației dezvoltate pentru determinarea cuplului de pornire asincron prin metoda bilanțului energetic

### 5.3. Concluzii

Capitolul prezintă în detaliu cel de-al doilea nivel de prelucrare software al SAPDM care conține aplicațiile concrete dezvoltate în mediul LabVIEW, pentru îmbunătățirea procedurilor de testare și evaluare a performanțelor reale de funcționare a mașinilor sincrone de putere mare, cu punerea în evidență a contribuțiilor personale.

Aplicațiile prezentate sunt intuitive și ușor de utilizat, deoarece fiecare operațiune este condiționată de o succesiune prestabilită, ce constă în alegerea corectă a unui buton sau opțiuni pentru a accesa anumite facilități. Astfel, se evită unele probleme de natură hardware a echipamentului de achiziție folosit, precum și unele rezultate eronate cauzate de utilizarea necorespunzătoare a aplicațiilor. Aplicațiile sunt destinate unui număr mare de utilizatori, deoarece nu necesită un grad ridicat de cunoștințe pentru operarea acestora.

S-au studiat o serie de referințe bibliografice recente, dar și articole în care s-au pus bazele procedurilor și metodelor de testare a hidrogenatoarelor, pentru cele două aplicații concrete abordate în acest capitol:

- punerea în evidență și diminuarea efectului forței magnetice unilaterale de dezechilibru-UMP, determinată de neuniformitatea întrefierului;
- determinarea cuplului electromagnetic asincron a hidrogenatoarelor sincrone reversibile ce funcționează în regim de pompaj, în cazul cărora metodele clasice sunt dificil de implementat.

Pentru fiecare problemă abordată s-a prezentat o sinteză a principalelor noțiuni teoretice necesare pentru a înțelege procedurile și rezultatele experimentale obținute în mediul industrial, rezultate ce urmează a fi prezentate în capitolul 6.

Metoda de punere în evidență a UMP prin interpretarea nivelului vibrațiilor relative ale rotorului la nivelul lagărelor HG, implicit a diagramei orbită, este cunoscută în literatura de specialitate încă din anii '80, însă în România aceasta nu este implementată în mediul industrial. De aceea în cadrul nivelului secundar software al SAPDM a fost dezvoltată o aplicație concretă și completă pentru determinarea diagramei orbită a rotoarelor HG.

O **contribuție personală** importantă este **procedura de centrare magnetică** a rotoarelor HG prin care se reduce și în unele cazuri chiar elimină, forța magnetică unilaterală de dezechilibru. Așa cum este descris în subcapitolul 5.1.2 efectele UMP conduc la uzura prematură a lagărelor sau chiar la scoaterea din exploatare a HG, prin creșterea nivelului de vibrație peste limita admisibilă funcționării în condiții de siguranță. Cele **două metode de centrare magnetică**, folosind traductoare de proximitate și bobine sondă montate pe pachetele elementare ale statorului au fost **aplicate în premieră în România** la o serie de hidrogenatoare sincrone verticale de putere mijlocie și putere mare, așa cum se prezintă în detaliu în capitolul 6.

O altă **contribuție personală** în cadrul acestui capitol este **subVI-ul dezvoltat pentru interpolarea valorilor necesare pentru reprezentarea formei rotorului și a statorului, obținute prin interpretarea celor 12 tensiuni electromotoare induse în bobinele sondă montate în stator**. Este cunoscut faptul că mediul LabVIEW oferă diverse moduri de reprezentare grafică, cu opțiuni de interpolare prestabilite, care însă în cazul de față nu au fost suficiente pentru a reprezenta cu finețe rezultatele experimentale obținute. În acest scop a fost dezvoltat un subVI de interpolare a valorilor folosind elemente din biblioteca mediului LabVIEW.

Procedura de interpretare a formei rotorului, respectiv a statorului folosind bobine sondă montate pe pachetele elementare ale statorului este cunoscută în literatura de specialitate. **Folosind principiul** acestei proceduri și instrumentația virtuală **s-a dezvoltat** un VI, în cadrul aplicației pentru centrarea magnetică folosind bobine sondă, prin care se oferă **posibilitatea monitorizării stabilității dinamice a rotorului** din punct de vedere al întrefierului. Aplicația poate fi folosită împreună cu orice echipament deja existent în cadrul centralelor hidroelectrice, fără fi necesare intervenții majore în circuitele sistemelor de măsură și monitorizare. Se oferă posibilitatea de a opri mașina în cazul în care întrefierul scade sub limită impusă, evitându-se unele avarii majore. Astfel, această aplicație poate fi considerată **contribuție personală**.

Metoda de determinare a cuplului electromagnetic al mașinilor sincrone la funcționarea în regim asincron, folosind regimul de alimentare cu frecvență variabilă monofazată și rotor în repaus-SSFR, este cunoscută în literatura de specialitate, însă în România a fost implementată la un număr redus de mașini sincrone de mare putere, chiar dacă prezintă avantaje majore față de alte metodologii:

- încercările nu necesită cuplarea mașini sincrone cu o mașina de antrenare, probele realizându-se în regim de repaus al mașinii;
- posibilitatea de încercare a hidrogenatoarelor sincrone reversibile și a motoarelor sincrone de putere mare la care cuplarea cu o mașina de antrenare este practic imposibilă;
- metoda poate fi aplicată la orice tip de mașină sincronă de putere mare indiferent de tipul constructiv, singurele valori de interes fiind puterea activă și rezistența electrică a înfășurării statorice;
- întrucât timpul menținerii curentului prin înfășurarea indusului în timpul încercărilor este foarte scurt, nu apar solicitări termice în mașina de încercat.

Ținând cont de aspectele teoretice și practice ale metodei de determinare a cuplului, în cadrul tezei **s-au dezvoltat instrumente virtuale de achiziție și prelucrare automată a datelor, folosind mediul LabVIEW, prin care se îmbunătățește această metodă (contribuție personală)** din următoarele puncte de vedere:

- timpul de încercare este redus semnificativ prin utilizarea instrumentelor virtuale dedicate pentru achiziția și prelucrare a datelor. În acest fel se calculează automat mărimile de interes, cu reprezentarea grafică curba cuplului în funcție de alunecare și afișarea sub formă numerică principalele mărimi caracteristice ale acesteia: cuplul de pornire, cuplul maxim, alunecarea critică;
- prin folosirea aplicației dezvoltate în mediul LabVIEW și a SAPDM se reduce semnificativ numărul de aparate de măsură clasice necesare (voltmetre, ampermetre, oscilografe, analizoare de putere);
- metoda propusă este foarte utilă uzinelor constructoare de mașini, deoarece se reduce semnificativ timpul de încercare, deci se contribuie la creșterea productivității și în același timp se mărește gradul de fiabilitate a echipamentelor energetice.

## 6. APLICAȚII ÎN MEDIUL INDUSTRIAL

În cadrul acestui capitol se prezintă rezultatele experimentale obținute în mediul industrial, în urma aplicării metodelor și procedurilor prezentate în capitolul 5. Măsurătorile au fost realizate cu un ansamblu de plăci de achiziție National Instruments certificate metrologic cu acces în centralele hidroelectrice (DIGITLINE VPA 323). **Pentru achiziția, prelucrarea și afișarea datelor se folosesc instrumentele virtuale dezvoltate în cadrul tezei, din cel de-al doilea nivel software al SAPDM.**

### 6.1. Centrarea magnetică – Rezultate experimentale

Metoda de centrare magnetică a rotoarelor hidrogenatoarelor a fost aplicată în cadrul unor contracte între societatea SSH Hidroserv SA și Centrul de Cercetări în Hidraulică Automatizări și Procese Termice al Universității "Eftimie Murgu" Reșița.

Așa cum s-a prezentat în subcapitolul 5.1 procedura propusă pentru centrarea magnetică a rotoarelor hidrogenatoarelor se poate implementa atât folosind traductoare de proximitate inductive cât și bobine sondă montate pe pachetele elementare ale miezului statoric. Pentru fiecare procedură se prezintă în detaliu cele mai semnificative rezultate experimentale. La finalul capitolului se prezintă o sinteză a rezultatelor experimentale obținute pentru toate mașinile electrice testate.

#### 6.1.1. Centrarea magnetică folosind traductoare de proximitate

Rezultatele experimentale prezentate în continuare au fost obținute în cazul hidrogenatorului nr. 2 din Centrala Hidroelectrică Hațeg ce aparține Sucursalei de Hidrocentrale (SH) Hațeg [\*8], [\*9].

Mașina sincronă verticală are următoarele date nominale:

- putere aparentă  $S=9330$  kVA;
- putere activă  $P=8400$  kW;
- tensiune nominală  $U=6300$  V;
- curent nominal statoric  $I=855,3$  A;
- frecvența  $f=50$  Hz;
- factor de putere  $\cos\varphi=0,9$ ;
- turația rotorului  $n=215$  RPM;
- tensiune de excitație  $U_{ex}=194$  V;
- curent de excitație  $I_{ex}=381$  A.

Conform metodologiei descrise în subcapitolul 5.1.2, pentru evaluarea influenței forței magnetice unilaterale de dezechilibru asupra dinamicii rotorului, se procedează la măsurarea în regim de mers în gol neexcitat și excitat a nivelului de vibrație absolută și determinarea diagramei orbită la nivelul lagărului radial-axial superior și radial inferior.

Măsurătorile s-au efectuat atât înainte ca mașina să intre în reparație cât și la terminarea reparației odată cu punerea în funcțiune a HG, punându-se astfel în evidență eficiența lucrărilor de mentenanță.

Pentru măsurarea vibrațiilor absolute s-au folosit accelerometre Hansford Sensors tip HS-100F5005401 iar pentru vibrațiile relative, respectiv diagrama orbită, traductoare de proximitate inductive din cadrul SAPDM (TD1, TD2, TD3, TD4), montate pe direcțiile X și Y celor două lagăre.

Deoarece s-au obținut rezultate experimentale asemănătoare la nivelul celor două lagăre, în continuare se prezintă doar cele aferente nivelului lagărului radial-axial superior, pentru care se adoptă aceeași abreviere LRAS folosită și în capitolul 5.

Diagramele orbită ce se prezintă în continuare sunt filtrate la frecvența X1 specifică turației mașinii, caz în care se consideră doar vibrația relativă a arborelui rotorului, fără alți parametri externi. Diagramele corespund funcționării HG în regim stabilizat de mers în gol neexcitat la turație nominală și regimului de mers în gol excitat la tensiune nominală. Pentru achiziția și prelucrarea datelor s-au folosit aplicațiile dedicate din cadrul nivelului secundar al SAPDM dezvoltate pentru determinarea diagramei orbită (subcapitolul 5.1.3) și centrarea magnetică (subcapitolul 5.1.4).

Este cunoscut faptul că dinamica rotorului în regim de mers în gol neexcitat stabilizat la turație nominală este influențată de forțe perturbatoare de natură mecanică determinate de:

- dezechilibrul masic al ansamblului celor trei rotoare turbină-generator-excitatoare;
- alinierea necorespunzătoare a arborilor celor trei rotoare;
- regimul hidraulic de curgere din turbină;
- starea peliculei de ulei din lagărele HG;
- fixarea carcasei față fundația hidrocentralei.

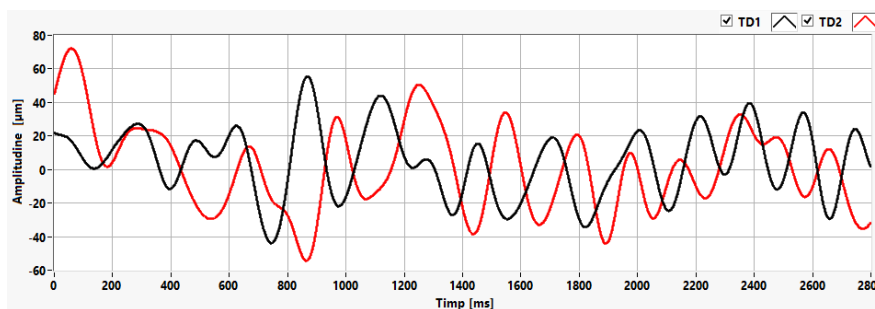


Fig. 6. 1. Formele de undă ale vibrațiilor relative înregistrate pentru un ciclu de 10 rotații ale rotorului în regim de mers în gol neexcitat, înainte de centrarea magnetică HG2 9330 kVA CHE Hațeg

La funcționarea în regim de mers în gol neexcitat a HG de 8,4 MW, formele de undă a vibrațiilor relative înregistrate la nivelul LRAS se prezintă Fig. 6.1 iar diagrama orbită a rotorului corespunzătoare pentru un ciclu de 10 rotații se prezintă în Fig. 6.2. Rezultatele obținute pun în evidență o funcționare încadrată conform [ST5] la un calificativ de "bine" (Zona A). În același timp se poate afirma că valorile forțelor perturbatoare de natură mecanică datorate factorilor descriși mai sus, se încadrează în limite normale fără a influența funcționarea în condiții de siguranță a HG.

Forma diagramei orbită este cea indicată în literatura de specialitate pentru o funcționare corespunzătoare în limitele admisibile pentru dezaxarea arborilor și dezechilibrul mecanic al ansamblului rotoric.

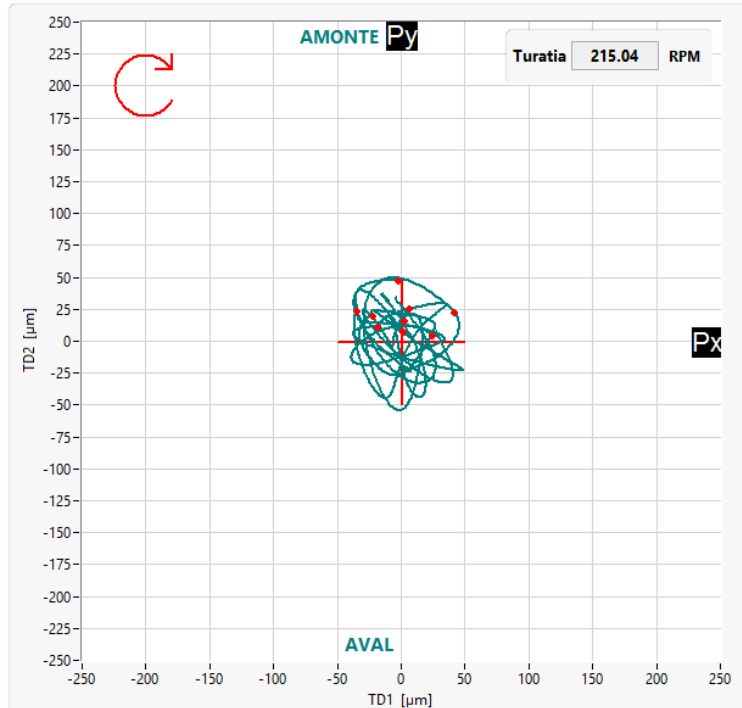


Fig. 6. 2. Diagrama orbită înregistrată în regim de mers în gol neexcitat corespunzătoare a 10 rotații complete a rotorului HG2 9330 kVA din CHE Hațeg, înainte de centrarea magnetică

La funcționarea în regim de mers în gol excitat la tensiune nominală, formele de undă a vibrațiilor relative sunt prezentate în Fig. 6.3 și diagrama orbită pentru un ciclu de 10 rotații în Fig. 6.5, iar pentru 1 rotație în Fig. 6.6.

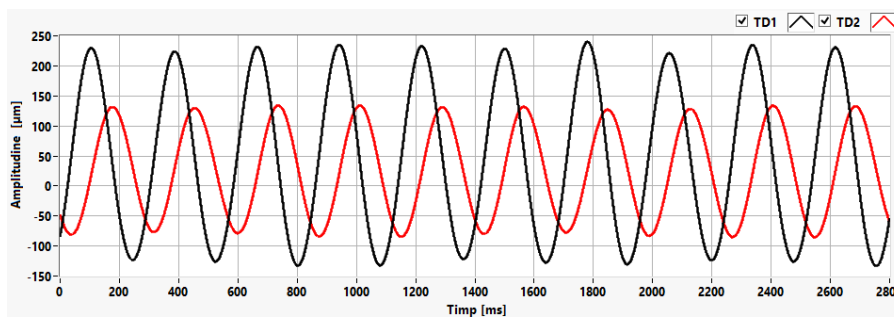


Fig. 6. 3. Formele de undă ale vibrațiilor relative corespunzătoare a 10 rotații ale rotorului în regim de mers în gol excitat, înainte de centrarea magnetică HG2 9330 kVA CHE Hațeg

Formele diagramei orbită pun în evidență prezența unor forțe perturbatoare de natură magnetică datorate neuniformității întrefierului, care determină o rezultantă UMP ce acționează pe direcția radială X. Deplasarea arborelui rotorului în



## 6.1. Centrarea magnetică – Rezultate experimentale 129

timpul procesului tranzitoriu de excitare prezentată în Fig. 6.4, confirmă această afirmație.

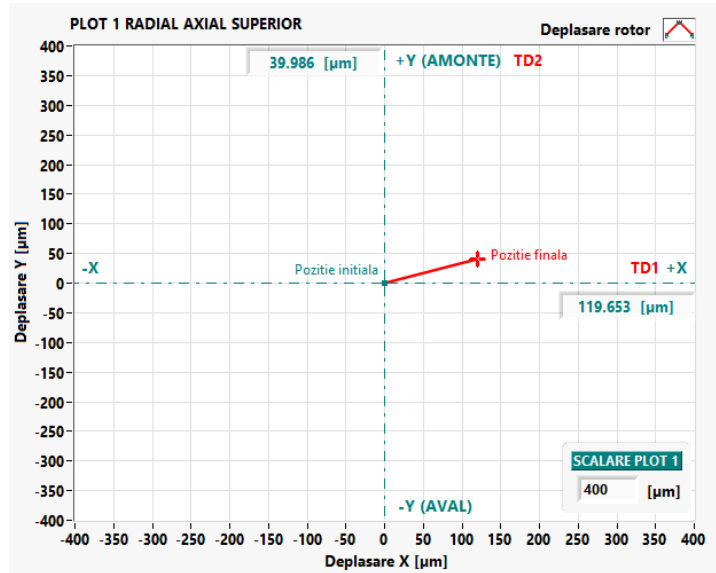


Fig. 6. 4. Deplasarea arborelui rotorului în timpul procesului tranzitoriu de excitare HG2 9330 kVA CHE Hațeg

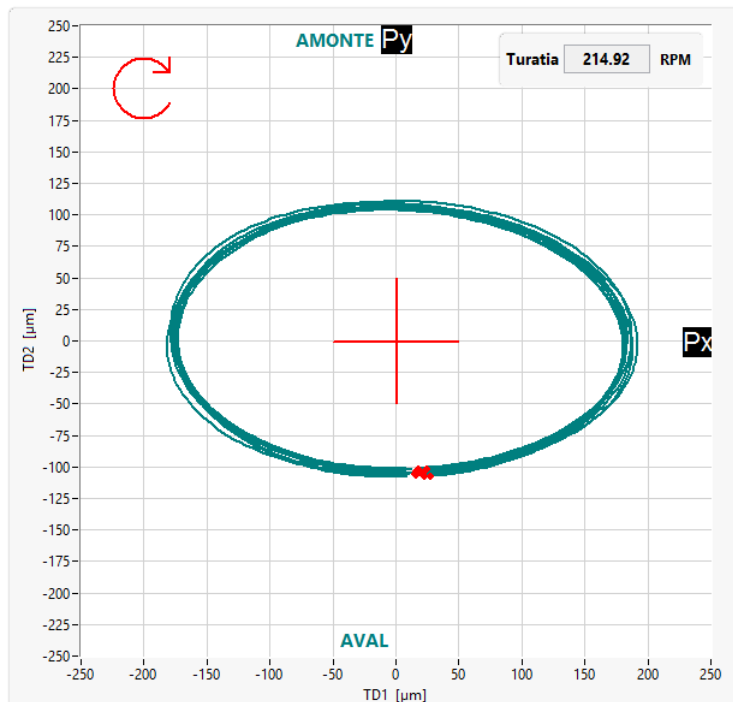


Fig. 6. 5. Diagrama orbită înregistrată în regim de mers în gol excitat, corespunzătoare a 10 rotații complete a rotorului HG2 9330 kVA din CHE Hațeg, înainte de centrarea magnetică

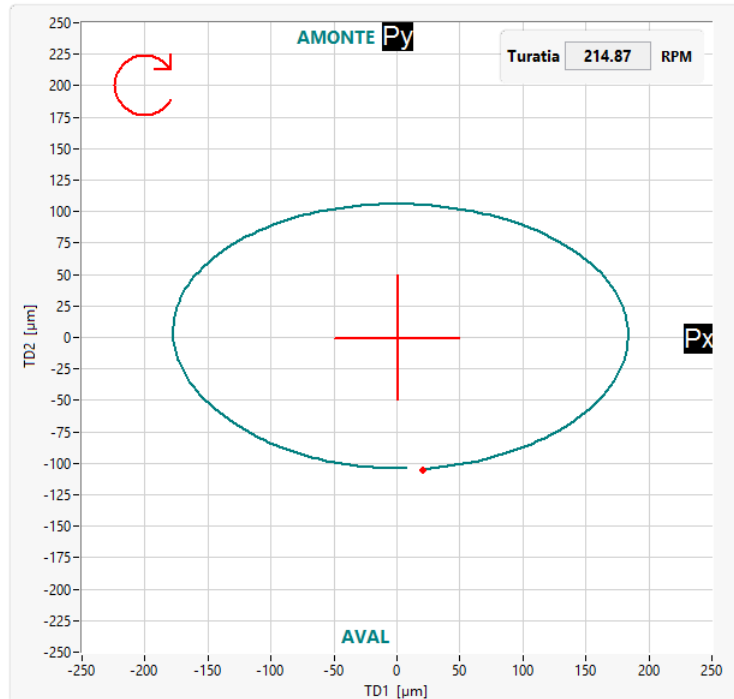


Fig. 6. 6. Diagrama orbită înregistrată în regim de mers în gol excitat, corespunzătoare unei rotații complete a rotorului HG2 9330 kVA din CHE Hațeg, înainte de centrarea magnetică

Din probele efectuate se observă o descentrare magnetică pronunțată a rotorului care se manifestă prin forma specifică a diagramei orbită prezentată în Fig. 6.5, respectiv 6.6. Ca urmare, s-a procedat la aplicarea procedurii propuse pentru centrarea în câmp magnetic a rotorului folosind traductoare de proximitate inductive, prezentată în detaliu în subcapitolul 5.1.4.

După ce hidrogeneratorul a fost centrat din punct de vedere mecanic, în timpul lucrărilor de reparație s-a verificat întrefierul existent în cele patru puncte distincte ale statorului decalate la  $90^0$  (pentru detalii Fig. 5.15) și s-a obținut întrefierul echivalent  $\delta$  după cum urmează:

$$\delta = \begin{pmatrix} 7,2 & 7,3 & 7,4 & 7,5 \\ 7,1 & 7,4 & 7,5 & 7,4 \\ 7,4 & 7,4 & 7,2 & 7,4 \\ 7,3 & 7,2 & 7,5 & 7,4 \end{pmatrix} \quad (6.1)$$

Având în vedere curentul nominal al înfășurării de excitație (381 A) s-a procedat la alimentarea acesteia cu un impuls de curent continuu de 300 A, moment în care s-a verificat tendința de deplasare a rotorului la nivelul LRAS și LRI, folosind cele 2 perechi de traductoare de proximitate montate ortogonal pe direcția +Y și +X pentru fiecare din cele patru poziții a rotorului. Așa cum se poate observa și în Fig. 6.7 TD1 și TD2 au fost montate la nivelul LRAS și TD3 și TD4 la nivelul LRI. Rezultatele obținute la nivelul LRAS sunt prezentate în Fig. 6.8.

6.1. Centrarea magnetică – Rezultate experimentale 131

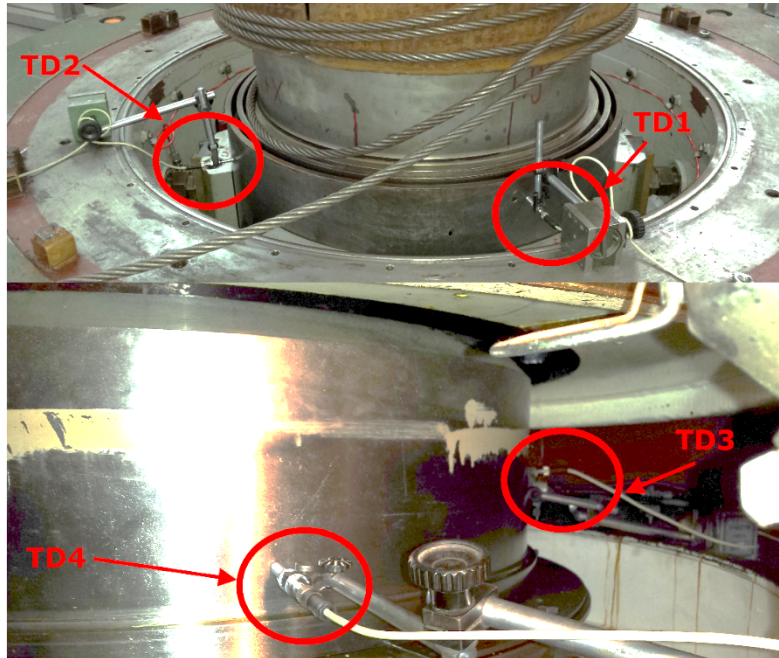


Fig. 6. 7. Poziția traductoarelor de proximitate la nivelul LRAS și LRI în cazul HG2 din CHE Hațeg

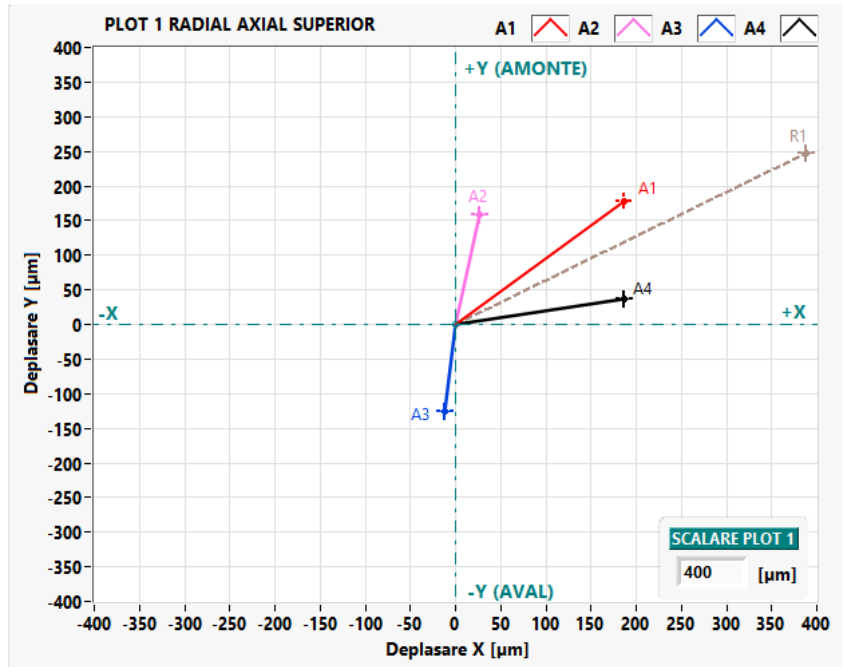


Fig. 6. 8. Tendințele de deplasare ale rotorului (A1, A2, A3, A4) în momentul aplicării impulsului de curent continuu, pentru cele patru poziții ale rotorului și rezultanta acestora (R1), înainte de centrarea magnetică HG2 9330 kVA CHE Hațeg

Din Fig. 6.8 se constată că tendințele de deplasare ale rotorului ( $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ ,  $A_4$ ) pentru cele patru poziții ale acestuia, se manifestă în cadranul I (+X, +Y). Astfel rezultanta  $R_1$  corespunzătoare unei rotații complete va avea aceeași direcție. Acest fapt confirmă prezența UMP datorate neuniformității întrefierului și care conduce la funcționarea necorespunzătoare a hidrogenatorului.

Conform procedurii propuse s-a procedat la modificarea întrefierului prin deplasarea rotorului cu  $350 \mu\text{m}$  (corelată cu deplasarea la impuls de curent) în cadranul III (-X, -Y) pe direcția și în sensul invers rezultantei  $R_1$ .

Pentru a verifica corectitudinea noului întrefier obținut s-a procedat la reverificarea tendințelor de deplasare a rotorului pentru cele 4 poziții ale rotorului în momentul aplicării impulsurilor de curent. Din rezultatele obținute, așa cum se poate observa și în Fig. 6.9, se constată că cele 4 tendințe de deplasare la o rotație completă se anulează reciproc. În acest caz rezultanta  $R_1$  are o valoare neglijabilă, care nu este în măsură să perturbe semnificativ dinamica rotorului HG, fapt ce indică o fixare bună a rotorului în axa magnetică a statorului.

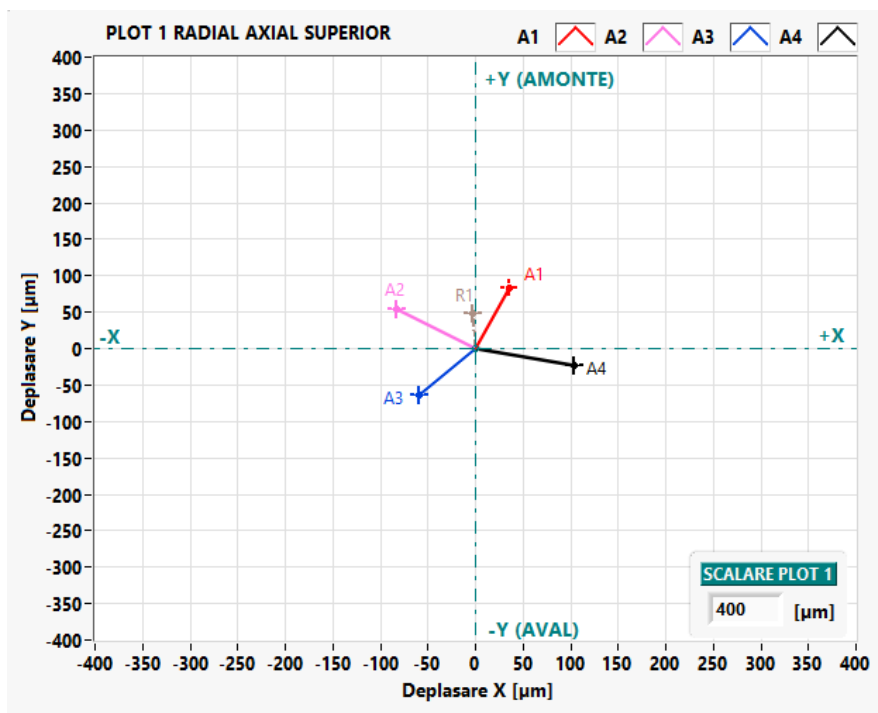


Fig. 6. 9. Tendințele de deplasare ale rotorului ( $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ ,  $A_4$ ) în momentul aplicării impulsului de curent continuu, pentru cele patru poziții ale rotorului și rezultanta acestora ( $R_1$ ), după centrarea magnetică HG2 9330 kVA CHE Hațeg

După terminarea lucrărilor de reparație, la punerea în funcție a HG s-au repetat măsurătorile privind diagrama orbită în cele două regimuri de funcționare neexcitat stabilizat și excitat stabilizat la tensiune nominală. Scopul acestor verificări a fost punerea în evidență a rezultatelor procedurii de centrare în câmp magnetic aplicate în timpul lucrărilor de reparație HG.

La funcționarea în regim de mers în gol excitat la  $U=6,3 \text{ kV}$ , formele de undă a vibrațiilor relative sunt prezentate în Fig. 6.10 și diagrama orbită pentru un ciclu de 10 rotații în Fig. 6.11.

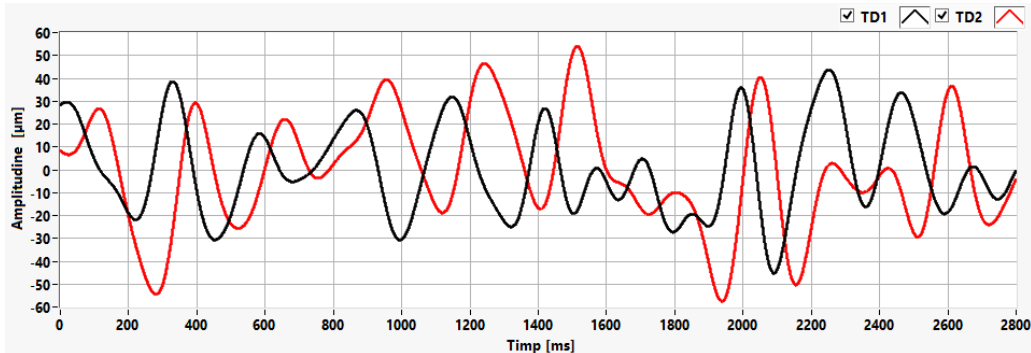


Fig. 6. 10. Formele de undă ale vibrațiilor relative corespunzătoare a 10 rotații ale rotorului în regim de mers în gol excitat, după centrarea magnetică HG2 9330 kVA CHE Hațeg

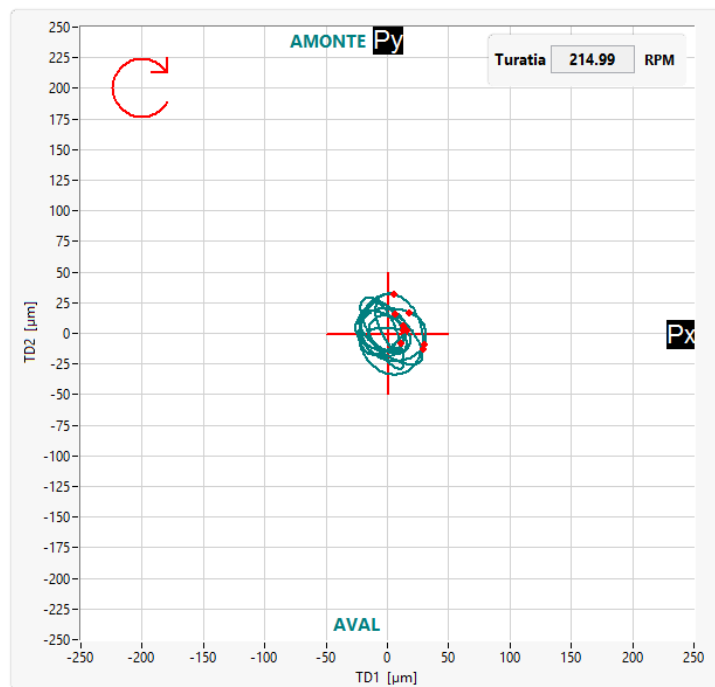


Fig. 6. 11. Diagrama orbită înregistrată în regim de mers în gol excitat corespunzătoare a 10 rotații complete a rotorului HG2 9330 kVA din CHE Hațeg, după centrarea magnetică

Din rezultatele obținute după aplicarea metodei de centrare magnetică se observă că dinamica rotorului în regim de mers în gol excitat la tensiune nominală este influențată doar de forțele perturbatoare de natură mecanică și nu de UMP. Deoarece nivelul vibrației absolute se încadrează conform [ST5] la un calificativ de "bine" (Zona A) se poate concluziona că HG funcționează în condiții de siguranță.

Deoarece una din cele mai importante consecințe ale UMP este creșterea nivelului de vibrație în lagăre, s-au măsurat vibrațiilor absolute la nivelul LRAS înainte și după aplicarea metodei de centrare magnetică.

În Tabelul 6.1 se prezintă valorile RMS ale vibrațiilor absolute măsurate la nivelul LRAS înainte și după aplicarea procedurii de centrare magnetică, pentru 10 măsurători consecutive la un interval de 1 secundă, în regim de mers în gol neexcitat și excitat.

Tabelul 6. 1. Valorile RMS ale vibrațiilor absolute la nivelul LRAS înainte și după centrarea magnetică HG2 9330 kVA CHE Hațeg

Nr. Crt.	Vibrație absolută ÎNAINTE [mm/s]		Vibrație absolută DUPĂ [mm/s]	
	Regim Neexcitat	Regim Excitat	Regim Neexcitat	Regim Excitat
1	0,88	1,23	0,33	0,45
2	0,81	1,07	0,46	0,41
3	0,83	1,14	0,32	0,37
4	0,82	1,16	0,33	0,41
5	0,74	1,17	0,35	0,43
6	0,75	1,16	0,44	0,52
7	0,77	1,16	0,40	0,39
8	0,76	1,13	0,29	0,39
9	0,72	1,10	0,33	0,36
10	0,74	1,07	0,34	0,33
<b>Medie</b>	<b>0,783</b>	<b>1,138</b>	<b>0,359</b>	<b>0,407</b>

Din tabelul 6.1 se poate observa că înainte de aplicarea metodei de centrare magnetică, nivelul vibrației absolute în regim de mers în gol excitat este de 1,138 mm/s, fiind mult mai mare decât cel corespunzător regimului neexcitat 0,783. Această creștere este datorată influenței forței magnetice unilaterale de dezechilibru ce acționează asupra rotorului în mișcare. Nivelul vibrației absolute rămâne aproape constant de la 0,359 mm/s la 0,407 mm/s în cele două regimuri de funcționare după aplicarea procedurii de centrare magnetică, ceea ce confirmă beneficiile și eficiența procedurii propuse de diminuare a UMP.

În continuare se prezintă rezultatele experimentale obținute pentru HG nr. 1 din CHE Mănicești ce aparține Sucursalei de Hidrocentrale Curtea de Argeș [\*10]. Față de hidrogenatoarele din CHE Hațeg care au fost puse în funcțiune în anul 1990, cele două grupuri din CHE Mănicești au fost date în exploatare în anul 1975. Timp de 20 de ani aceste grupurile au funcționat cu nivel ridicat de vibrație absolută, motiv pentru care s-a impus verificarea poziției rotorului în axa magnetică a statorului prin aplicarea procedurii de centrare propusă în această lucrare.

Mașina sincronă verticală are următoarele date nominale:

- putere aparentă  $S=6400$  kVA;
- putere activă  $P=5870$  kW;
- tensiune nominală  $U=6300$  V;
- curent nominal statoric  $I=587$  A;
- frecvența  $f=50$  Hz;
- factor de putere  $\cos\varphi=0,9$ ;
- turația rotorului  $n=166,7$  RPM;
- tensiune de excitație  $U_{ex}=230$  V;
- curent de excitație  $I_{ex}=328$  A;

În urma primei verificări a tendințelor de deplasare ale rotorului ( $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ ,  $A_4$ ), în cele patru poziții distincte decalate la  $90^\circ$  ale rotorului, s-a obținut o rezultantă  $R_1$  în cadranul II (Fig. 6.16).

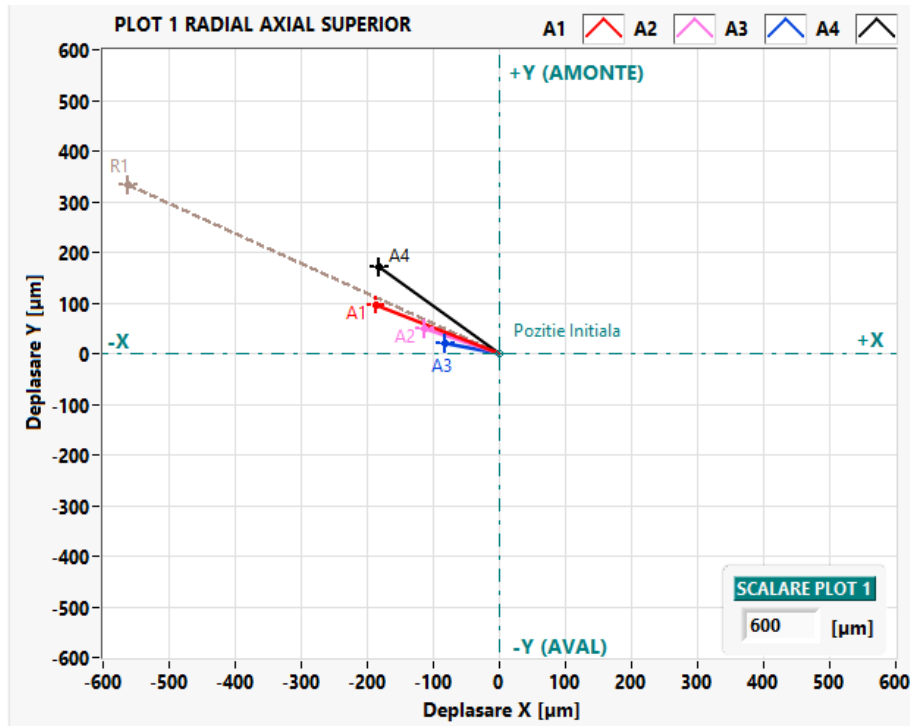


Fig. 6. 12. Tendințele de deplasare ale rotorului ( $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ ,  $A_4$ ) în momentul aplicării impulsului de curent continuu pentru cele patru poziții ale rotorului și rezultanta acestora ( $R_1$ ), înainte de centrarea magnetică HG1 6400 kVA CHE Mănicești

Datorită abaterilor semnificative de formă atât la nivelul statorului cât și la nivelul polilor rotorului pentru acest grup a fost necesară aplicarea de mai multe ori a procedurii de centrare magnetică. Întrefierul a fost corectat în mai multe rânduri prin mutarea rotorului în diverse poziții, până la obținerea unei rezultante cât mai mici.

Rezultatele finale prezentate în Fig. 6.13 s-au obținut prin deplasarea rotorului în sensul invers rezultantei, cu  $1100 \mu\text{m}$  pe direcția  $+X$  și  $200 \mu\text{m}$  pe direcția  $+Y$ . Această nouă poziție a rotorului se încadrează în limitele jocurilor din lagărele HG și camera rotorului turbinei hidraulice.

După corecția întrefierului, se constată că pentru o rotație completă cele 4 tendințe de deplasare ale rotorului aproape se anulează reciproc. Astfel, rezultanta  $R_1$  are o valoare neglijabilă, fapt ce indică o fixare corespunzătoare a rotorului în axa magnetică a statorului.

Pentru a verifica corectitudinea centrării magnetice, s-a înregistrat nivelul de vibrație absolută pentru LRAS înainte și după aplicarea procedurii de centrare magnetică. Datorită nivelului mare de vibrație absolută obținut înainte de centrarea magnetică, interpretarea măsurătorilor s-a realizat prin analiza spectrului de frecvență a semnalelor vibrațiilor absolute în cele două situații.

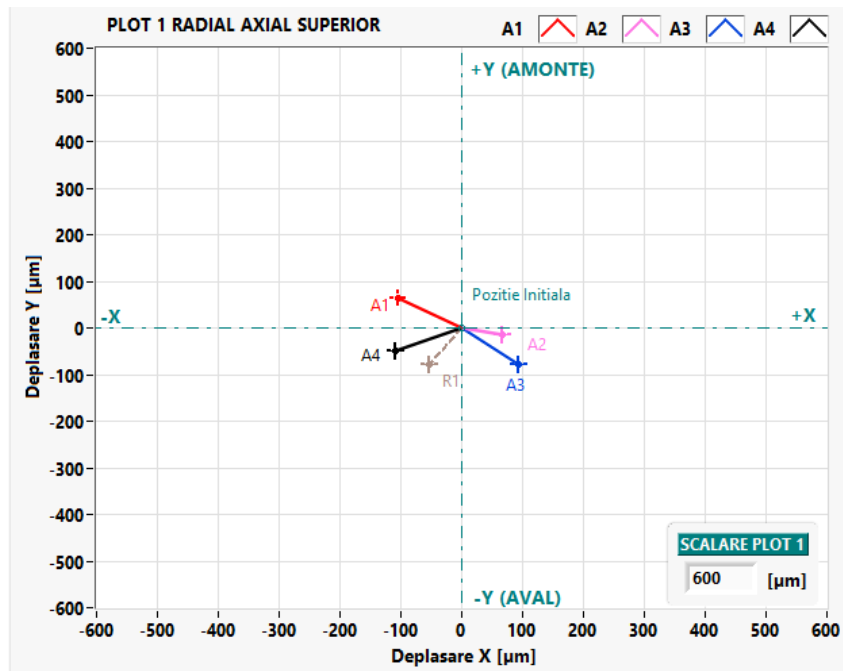


Fig. 6. 13. Tendințele de deplasare ale rotorului (A1, A2, A3, A4) în momentul aplicării impulsului de curent continuu, pentru cele patru poziții ale rotorului și rezultanta acestora (R1), după centrarea magnetică HG1 6400 kVA CHE Mănicești

Ținând cont de cele prezentate în capitolul 5.1.2, rezultă că UMP conduce la creșterea doar a armonicii X1 din spectrul vibrației absolute măsurat la nivelul lagărelor hidrogeneratorului. Aprecierea gradului de corectitudine a centrării se face prin luarea în considerare doar a valorii amplitudinii armonicii X1 din semnalul de vibrație analizat. Trebuie precizat însă că această forță magnetică unilaterală de dezechilibru conduce în timp la îmbătrânirea prematură a lagărelor și astfel la amplificarea și altor armonici din spectrul de vibrații.

Valorile RMS corespunzătoare a 10 măsurători consecutive la intervale de 1 secundă a nivelului global de vibrație absolută pentru LRAS, înainte și după centrarea magnetică în regim de mers în gol neexcitat și excitat stabilizat, se prezintă în Tabelul 6.2. Rezultatele descompunerilor vibrațiilor absolute în componente spectrale, prezentate în Fig. 6.14–6.17, corespund primei măsurători din Tabelul 6.2.

Din rezultatele prezentate în Tabelul 6.2 se observă o creștere a nivelului de vibrație absolută din regim neexcitat în regim excitat de la valoarea de 1,850 mm/s la 4,217 mm/s, fapt datorat influenței UMP a cărei amplitudine este condiționată de starea de excitație a mașinii, așa cum s-a prezentat și în subcapitolul 5.1.2. După centrarea magnetică se observă o diminuare semnificativă a nivelului de vibrație absolută, valoarea acestora scăzând de aproape 10 ori în regim excitat, de la valoarea de 4,217 la 0,481 mm/s.

Pentru a se evita confuzia dintre valoarea RMS a vibrației absolute totale afișată în tabelul 6.2 ( $Vib_{RMS}$ ) și valorile RMS ale componentelor spectrale afișate în Fig. 6.14-6.17 ( $X_{iRMS}$ ), se prezintă următoarea corelație dintre cele două valori efective [K2], [S11]:



$$Vib_{RMS} = \sqrt{\sum_{i=0}^n X_{nRMS}} \quad (6.2)$$

Tabelul 6. 2. Valorile RMS ale vibrațiilor absolute la nivelul LRAS înainte și după centrarea magnetică HG1 6400 kVA CHE Mănicești

Nr. Crt.	Vibrație absolută ÎNAINTE [mm/s]		Vibrație absolută DUPĂ [mm/s]	
	Regim Neexcitat	Regim Excitat	Regim Neexcitat	Regim Excitat
1	1,8	4,2	0,23	0,45
2	2,02	4,43	0,16	0,51
3	1,67	4,25	0,12	0,48
4	2,08	4,4	0,14	0,52
5	1,93	4,23	0,19	0,41
6	1,94	4,09	0,21	0,53
7	1,7	4,24	0,16	0,46
8	1,84	4,37	0,21	0,48
9	1,74	3,96	0,19	0,55
10	1,78	4	0,17	0,42
<b>Medie</b>	<b>1,850</b>	<b>4,217</b>	<b>0,178</b>	<b>0,481</b>

În Fig. 6.14 - 6.15 se prezintă spectrele vibrației absolute înainte de centrarea magnetică, în care se observă o creștere a armonicilor X1 de la valoarea de 1,208 mm/s în regim neexcitat, la 2,534 mm/s în regim excitat. Din Fig. 6.16 - 6.17 rezultă că nivelul armonicilor X1 se reduce semnificativ după centrarea magnetică. Conform celor prezentate în subcapitolul 5.1.2, armonicile suplimentare ce apar pe lângă X1, sunt induse de diferite probleme de natură mecanică precum alinierea necorespunzătoare a arborilor, dezechilibrul masic al rotorului sau degradarea filmului de ulei din lagărul HG. Deoarece scopul metodei de centrare magnetică a rotorului, este de a remedia doar dezechilibrul magnetic produs de UMP și nu dezechilibrul mecanic existent, se consideră că rezultatele prezentate în Tabelul 6.2 sunt confirmate și de analiza în domeniul frecvență a vibrațiilor absolute, pentru cazul în care se consideră doar valoarea efectivă a vibrației absolute corespunzătoare armonicilor X1.

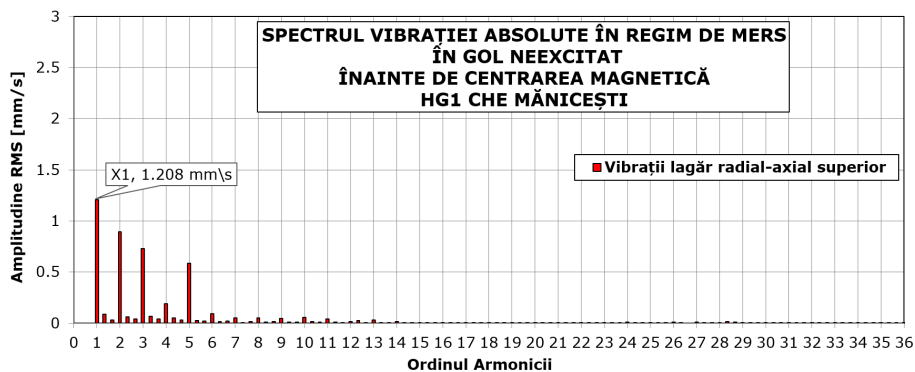


Fig. 6. 14. Spectrul vibrației absolute în regim de mers în gol neexcitat la nivelul LRAS, înainte de centrarea magnetică HG1 6400 kVA CHE Mănicești

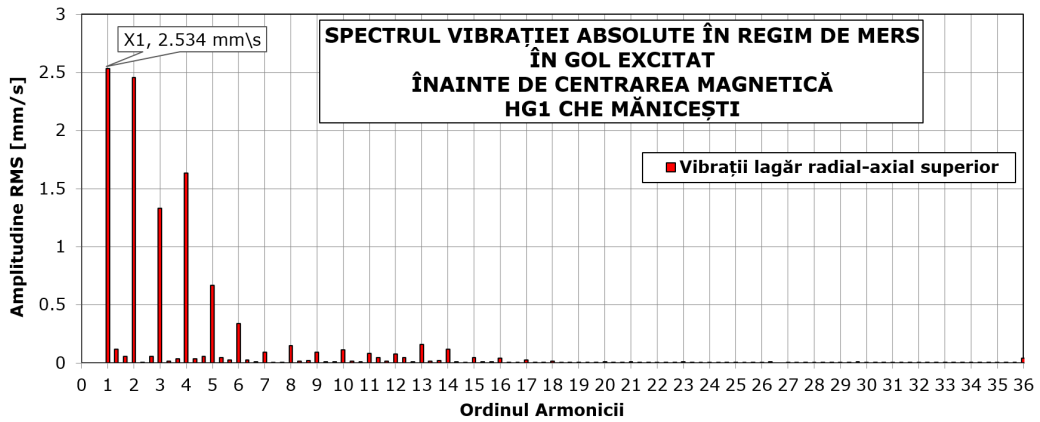


Fig. 6. 15. Spectrul vibrației absolute în regim de mers în gol excitat la nivelul LRAS, înainte de centrarea magnetică HG1 6400 kVA CHE Mănicești

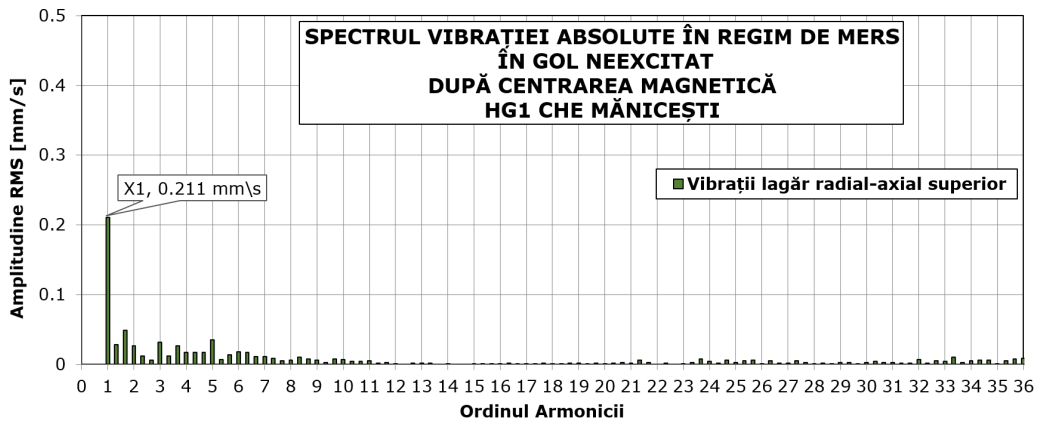


Fig. 6. 16. Spectrul vibrației absolute în regim de mers în gol neexcitat la nivelul LRAS, după centrarea magnetică HG1 6400 kVA CHE Mănicești

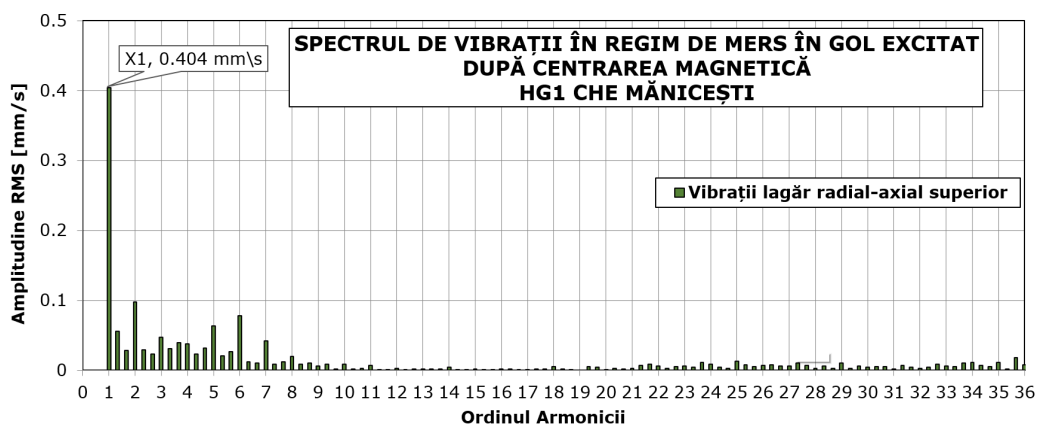


Fig. 6. 17. Spectrul vibrației absolute în regim de mers în gol excitat la nivelul LRAS, după centrarea magnetică HG1 6400 kVA CHE Mănicești

### 6.1.2. Centrarea magnetică folosind bobine sondă

Rezultatele experimentale prezentate în continuare au fost obținute la HG nr. 1 din CHE Râul Mare Retezat ce aparține succursalei Hidrocentrale Hațeg [\*11], [\*12]. Hidrogeneratorul sincron vertical are următoarele date nominale:

- putere aparentă  $S=186$  MVA;
- putere activă  $P=167,5$  MW;
- tensiune nominală  $U=15750$  V;
- curent nominal statoric  $I=6820$  A;
- frecvența  $f=50$  Hz;
- factor de putere  $\cos\varphi=0,9$ ;
- turația rotorului  $n=500$  RPM;
- tensiune de excitație  $U_{ex}=225$  V;
- curent de excitație  $I_{ex}=1693$  A.

Cele 12 bobine sondă (B1-B12) au fost montate în 12 secțiuni ale statorului pe câte un pachet elementar de tole, în timpul lucrărilor de reparație al HG.

Pentru cele 4 poziții distincte ale rotorului decalate la  $90^\circ$ , reprezentarea fazorială a valorilor maxime a celor 12 tensiuni electromotoare induse în bobinele sondă, în momentul aplicării unui impuls de curent de 500 A în înfășurarea rotorică a HG este prezentată în Fig. 6.18.

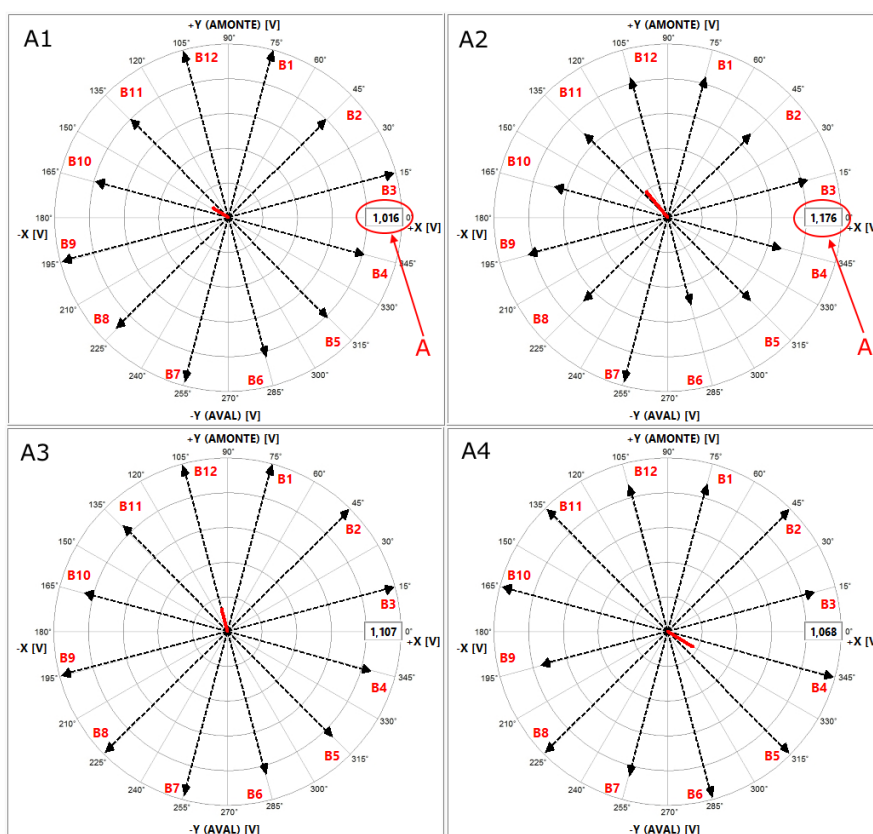


Fig. 6. 18. Reprezentări fazoriale ale tensiunilor electromotoare induse în bobinele sondă, înainte de centrea magnetică, corespunzătoare celor patru poziții distincte ale rotorului

Așa cum s-a prezentat în subcapitolul 5.1.5, rezultantele celor 12 tensiuni electromotoare induse în bobinele sondă reprezentate sub formă de vectori, se consideră a fi egală ca direcție și sens cu tendințele de deplasare ale rotorului ( $A_1, A_2, A_3, A_4$ ).

Instrumentul virtual dezvoltat pentru reprezentarea fazorială a celor 12 tensiuni electromotoare stabilește automat scara diagramei în funcție de valoarea maximă a tensiunilor induse, afișată în detaliul A al Fig. 6.18.

Trebuie specificat faptul că se poate obține o corelație între valoarea modulului rezultantei exprimată în volți și deplasarea rotorului exprimată în  $\mu\text{m}$ , însă în cadrul procedurii de centrare magnetică folosind bobine sondă se ține cont doar direcția și sensul rezultantei pentru aprecierea UMP și nu de modulul acesteia.

Din Fig. 6.18 se observă că înainte de centrarea magnetică, rotorul are o tendință de deplasare predominantă în cadranul II (-X, +Y) pentru 3 poziții distincte ale rotorului. Acest fapt conduce în timpul funcționării HG la o forță magnetică unilaterală de dezechilibru ce va acționa tot pe direcția cadranelor II. În aceste condiții s-a procedat la corectarea întrefierului prin deplasarea rotorului în cadranul IV pe direcția +X cu 100  $\mu\text{m}$  și pe -Y cu 180  $\mu\text{m}$ .

După centrarea magnetică, s-a repetat procedura de verificare a tendințelor de deplasare ale rotorului și s-au obținut rezultatele prezentate în Fig. 6.19. Acestea confirmă o fixare corectă a rotorului în axa magnetică a HG.

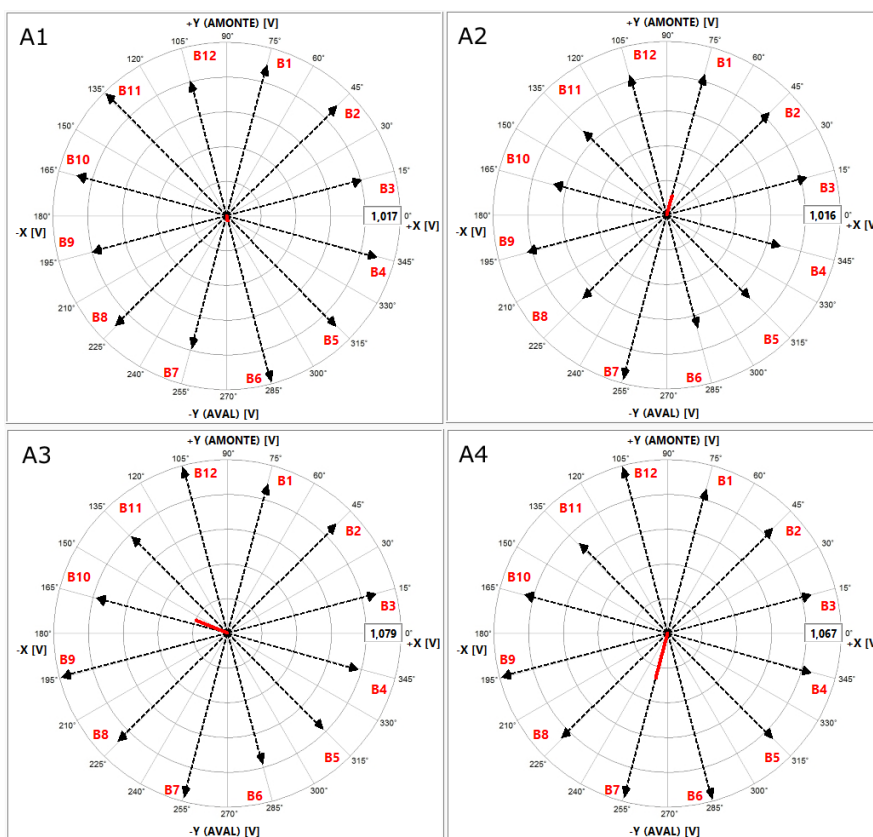


Fig. 6. 19. Reprezentări fazoriale ale tensiunilor electromotoare induse în bobinele sondă, după centrarea magnetică, corespunzătoare celor patru poziții distincte ale rotorului

### 6.1. Centrarea magnetică – Rezultate experimentale 141

Valoarea rezultantei celor 12 vectori la o rotație completă, care este chiar forța magnetică unilaterală de dezechilibru, are o valoare neglijabilă și astfel se compensează dezechilibrul magnetic produs de aceasta.

Validarea metodei de centrare magnetică folosind bobine sondă s-a realizat atât prin măsurarea nivelului vibrației absolute înainte și după aplicarea metodei, cât și prin verificarea poziției rezultantei celor 12 vectori la terminarea reparației și punerea în funcțiune a HG.

Valorile efective ale vibrațiilor absolute pentru LRAS sunt prezentate în Tabelul 6.3, din care se observă următoarele:

- înainte de centrarea magnetică valorile vibrațiilor relative la nivelul LRAS cresc de la 0,980 mm/s în regim neexcitat la 1,544 mm/s în regim excitat, fapt ce confirmă prezența UMP;
- după centrarea magnetică nivelul de vibrație relativă rămâne aproape constant în cele două regimuri de la 0,735 mm/s la 0,825 mm/s, fapt ce denotă o poziție corectă a rotorului în axa magnetică a statorului.

Tabelul 6. 3. Valorile RMS ale vibrațiilor absolute la nivelul LRAS înainte și după centrarea magnetică HG1 186 MVA CHE Râul Mare Retezat

Nr. Crt.	Vibrație absolută ÎNAINTE [mm/s]		Vibrație absolută DUPĂ [mm/s]	
	Regim Neexcitat	Regim Excitat	Regim Neexcitat	Regim Excitat
1	1,00	1,50	0,82	0,89
2	0,94	1,61	0,62	0,82
3	0,94	1,81	0,71	0,79
4	1,01	1,91	0,70	0,93
5	0,85	1,72	0,68	0,75
6	1,14	1,56	0,80	0,81
7	1,07	1,43	0,91	0,74
8	1,00	1,29	0,75	0,81
9	0,85	1,29	0,66	0,84
10	1,00	1,32	0,69	0,86
<b>Medie</b>	<b>0,980</b>	<b>1,544</b>	<b>0,735</b>	<b>0,825</b>

De asemenea, așa cum s-a prezentat în subcapitolul 5.1.5 prin folosirea bobinelor sondă montate pe pachetele elementare ale statorului se poate monitoriza în timpul funcționării HG, forma rotorului și cea a statorului. Principul procedurii și modul de utilizare a aplicației dezvoltate folosind mediul LabVIEW sunt prezentate în detaliu în cadrul subcapitolului 5.1.5, de aceea în continuare se prezintă doar rezultatele experimentale obținute pentru HG1 din CHE Râul Mare Retezat.

Formele de undă ale tensiunilor electromotoare induse în cele 12 bobine sondă și ale semnalului (*Taho*) furnizat de senzorul optic folosit pentru măsurarea turăției și ca referință pentru determinarea formelor celor două subansamble ale HG, sunt prezentate în Fig.6.20. Rezultatele corespund regimului de mers în gol excitat al HG la tensiunea nominală U=15 KV.

Din Fig. 6.20 se observă că forma de variație a celor 12 tensiuni electromotoare nu se modifică în timp, ceea ce indică un întrefier constant. Acest lucru este confirmat și de reprezentarea fazorială din Fig. 6.21 în care se observă că amplitudinile tensiunilor electromotoare induse în bobinele sondă sunt aproximativ egale și valoare rezultantei lor, implicit a UMP este foarte mică.

Amplitudinile celor 12 vectori sunt exprimate ca valori maxime ale formelor de undă corespunzătoare tensiunilor electromotoare induse în bobinele sondă.

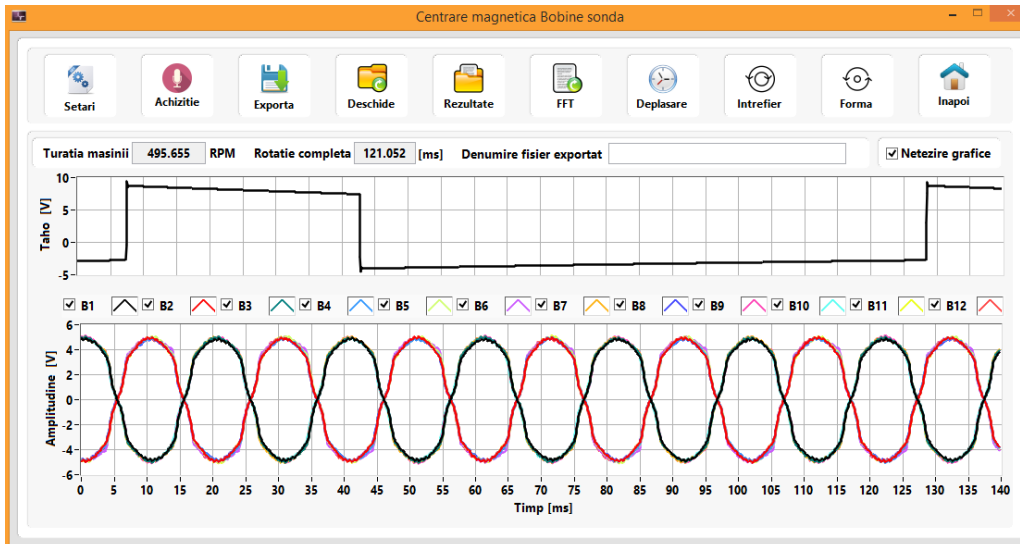


Fig. 6. 20. Formele de undă ale tensiunilor electromotoare induse în bobine sondă în timpul funcționării HG1 186 MVA din CHE Râul Mare Retezat în regim de mers în gol excitat

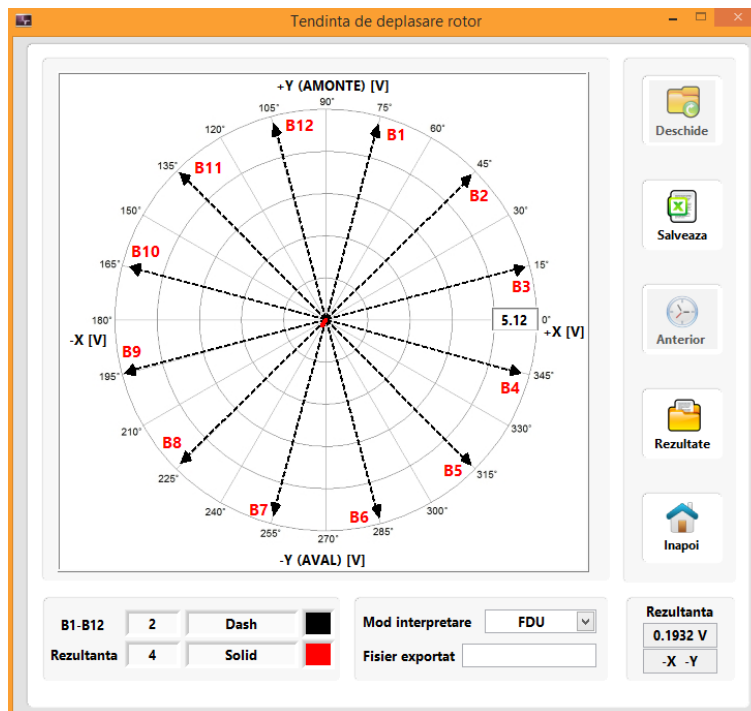


Fig. 6. 21. Reprezentare fazorială a tensiunilor electromotoare induse în bobinele sondă după centrarea magnetică în timpul funcționării în regim excitat  $U=15$  KV HG1 186 MVA CHE Râul Mare Retezat

Metoda propusă pentru centrarea magnetică a HG are scopul de a diminua forța magnetică unilaterală de dezechilibru și nu eliminarea acesteia care este un proces aproape imposibil datorită abaterilor de formă rotor-stator.

Tensiunile electromotoare induse în bobinele sondă și rezultanta lor prezentată în Fig. 6.21, exprimată în volți, reprezintă la o anumită scară chiar UMP, care are o valoare neglijabilă și care nu influențează funcționarea în condiții de siguranță a HG. Acest fapt este confirmat de măsurătorile de vibrație absolută prezentate în Tabelul 6.3.

Deoarece toate cele 12 amplitudini ale semnalelor sinusoidale prezentate în Fig. 6.20 sunt aproximativ egale, se confirmă faptul că nu există defecte electrice în bobinajul rotorului.

Așa cum s-a prezentat în subcapitolul 5.1.5, aplicația din cadrul celui de-al doilea nivel de prelucrare software al SAPDM, dezvoltată pentru centrarea magnetică a rotoarelor HG folosind bobine sondă, oferă și posibilitatea analizei în domeniul frecvență a celor 12 tensiuni electromotoare induse în timpul funcționării generatorului în regim de mers în gol excitat sau sarcină. Fereastra aferentă spectrului tensiunii electromotoare induse în prima bobină (B1) este prezentată în Fig. 6.22, în care se observă o amplitudine considerabilă doar pentru X1.

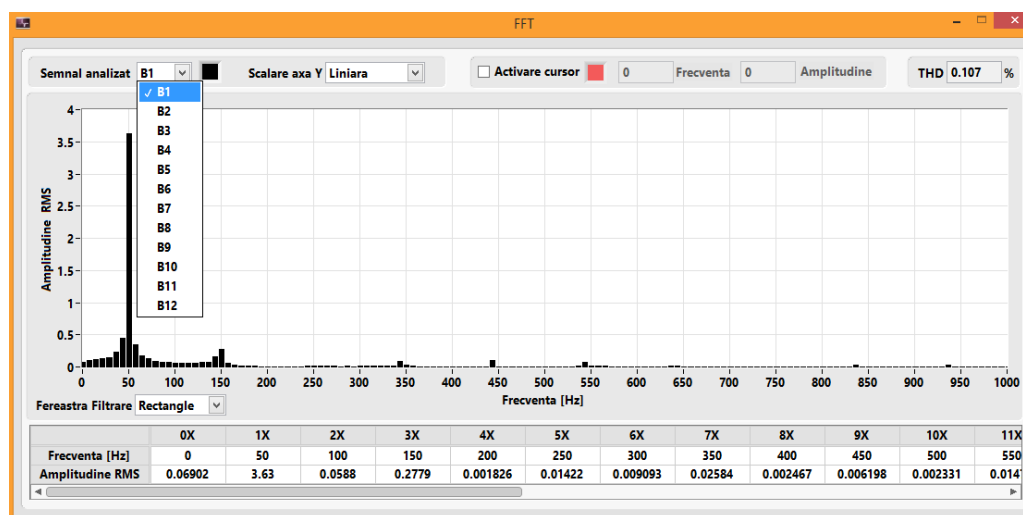


Fig. 6. 22. Analiza FFT a tensiunii electromotoare induse în prima bobină sondă HG1 186 MVA CHE Râul Mare Retezat

Folosind ca referință primul pol (P1) și înregistrând tensiunile electromotoare induse în fiecare bobină (B1-B12), pentru o rotație completă, în Fig. 6.23 detaliul A se obține forma statorului. Dacă se folosește ca referință prima bobina (B1) și se înregistrează tensiunile electromotoare induse de toți polii rotorului (P1-P12) în aceasta, se obține forma rotorului prezentată în Fig. 6.23 detaliul B.

Așa cum se poate observa și în Fig. 6.20 o rotație completă este definită ca fiind intervalul dintre două impulsuri generate de senzorul de turație optic și corespunde unui interval de timp de 120 ms.

În Fig. 6.23 se notează cu *V.MAX 1* valoarea maximă a tensiunilor electromotoare induse de P1 în bobinele sondă, iar cu *V.MAX 2* valoarea maximă a tensiunilor electromotoare induse în B1 de toți polii rotorului (P1-P12).

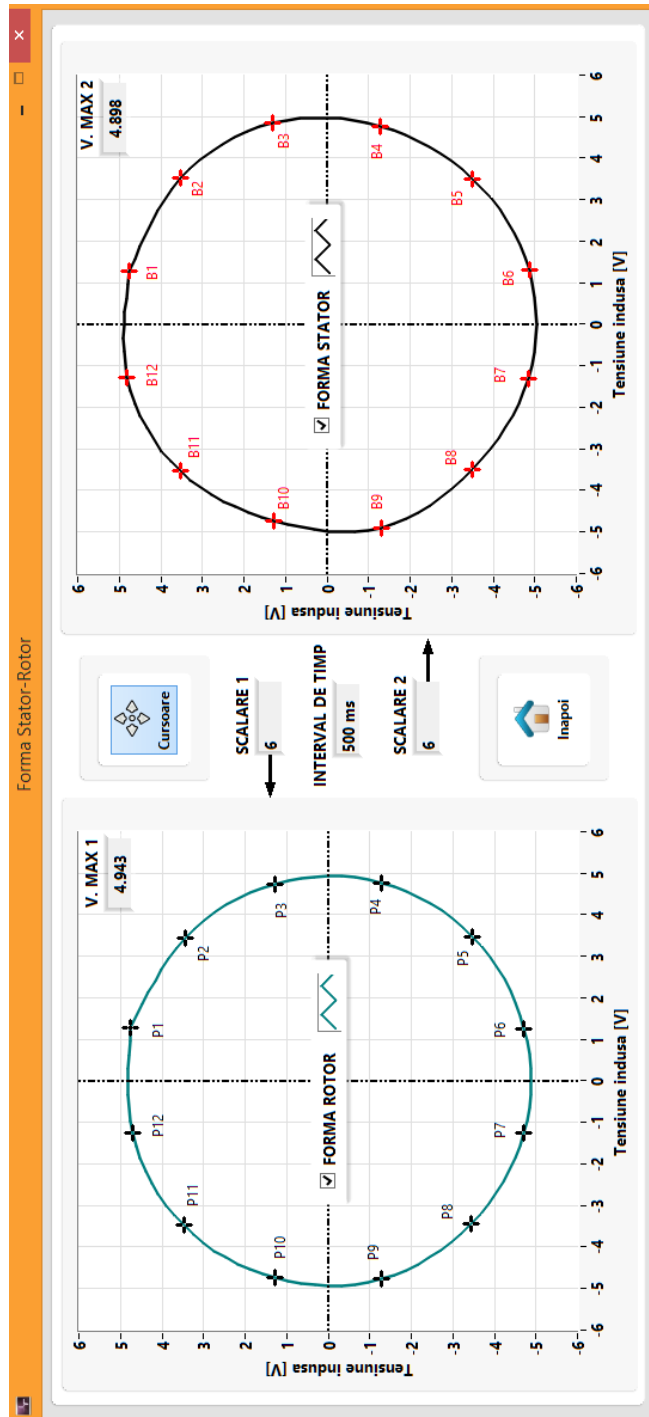


Fig. 6. 23. Forma rotorului și cea a statorului pentru HG1 186 MVA din CHE Răul Mare Retezat la funcționarea în regim excitat la  $U=15$  KV



Așa cum s-a prezentat în subcapitolul 5.1, pe baza procedurii de apreciere a formei rotor și stator folosind bobine sondă montat pe pachetele elementare ale statorului, s-a dezvoltat un VI prin care se monitorizează stabilitatea dinamică a rotorului în timpul funcționării HG. Principiul folosit pentru dezvoltarea VI-ului constă în reprezentarea abstractă în același grafic, a formei rotorului și a statorului (prezentate anterior în Fig. 6.23) și stabilirea unui cerc limită în care este permisă deplasarea rotorului în timpul funcționării HG.

În Fig. 6.24 se prezintă variația întrefierului la funcționarea în regim de mers în gol excitat la tensiune nominală, la punerea în funcție a HG1 din CHE Râul Mare Retezat, după aplicarea procedurii de centrare magnetică [\*12].

Pentru a determina constanta de calibrare cu ajutorul căreia s-a realizat corelația [V]-[mm], s-a măsurat întrefierul static în dreptul bobinelor B1, B4, B7, B10 (detaliul A Fig. 6.24), iar în timpul funcționării HG s-au înregistrat tensiunile electromotoare (*t.e.m*) induse de polii P1, P4, P7, P10 în B1, B4, B7 și B10. Valorile *t.e.m* obținute se afișează în detaliul B al Fig. 6.24. Pe baza constantei de calibrare determinată experimental, se calculează și afișează atât în [mm] cât și [V], valorile întrefierului în cele 12 puncte distincte corespunzătoare poziției celor 12 bobine sondă, precum și valoarea medie a acestora (detaliul C).

Abateră maximă acceptată pentru întrefier, în cazul HG de 167,5 MW, este de 2,59 mm (linie punctată de culoare roșie Fig. 6.24) care corespunde cu 10 % din valoarea întrefierului mediu determinat experimental (detaliul D din Fig. 6.24).

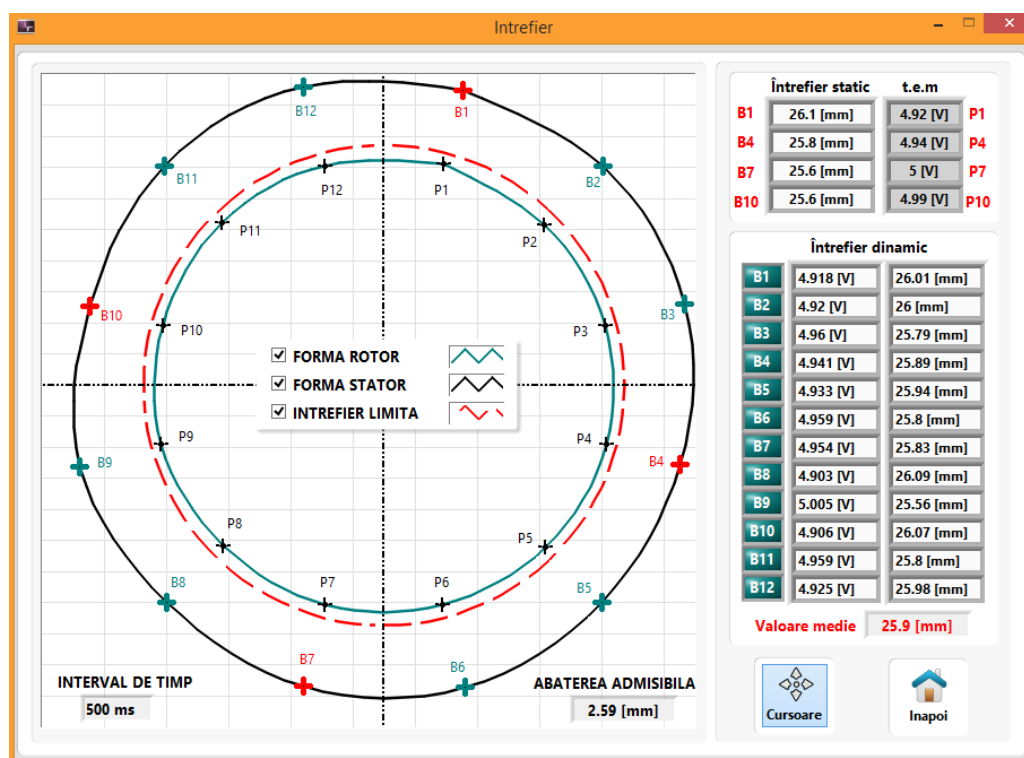


Fig. 6. 24. Monitorizarea variației întrefierului în timpul funcționării în regim excitat la  $U=15$  KV HG 1 186 MVA din CHE Retezat

Pe baza rezultatelor prezentate mai sus, se confirmă faptul că metoda de centrare magnetică folosind bobine sondă oferă aceeași eficiență în diminuarea valorii UMP, ca și procedura ce utilizează traductoare de proximitate, însă oferă avantajul monitorizării formei rotorului și a statorului în timpul funcționării HG. De asemenea se obține posibilitatea de a monitoriza și stabilitatea dinamică a rotorului, printr-o procedură modernă, relativ simplă și bazată pe instrumentație virtuală.

### 6.1.3. Sinteza a rezultatelor experimentale obținute la toate mașinile electrice de putere centrate magnetic

Cele două metode de centrare magnetică, cu utilizarea traductoarelor de proximitate și a bobinelor sondă montate în stator, au fost aplicate la un număr de 23 hidrogeneratoare și un motor sincron. O diagramă comparativă a nivelului de vibrație absolută măsurat înainte și după aplicarea centrării magnetice este prezentată în Fig. 6.26 [\*8]-[\*25]. Deoarece la unele mașini sincrone s-au efectuat măsurători de vibrații doar la punerea în funcțiune, după aplicarea metodei de centrare magnetică, nivelul de vibrație absolută este prezentat în Fig. 6.25 [\*26]-[\*36].

Rezultatele prezentate în Fig. 6.25 și 6.26 corespund funcționării mașinilor în regim de mers în gol excitat la tensiune nominală și reprezintă valoarea medie a unui set de 10 măsurători calculate la un interval de 1 secundă pentru LRAS.

În practică au existat cazuri în care hidrogeneratorul încercat, a prezentat un întrefier uniform și astfel tendințele de deplasare ale rotorului după aplicarea impulsului de curent pentru cele patru poziții distincte decalate la  $90^{\circ}$  ale rotorului, se anulau reciproc pentru o rotație completă. În aceste cazuri nu a fost necesară corectarea întrefierului. Astfel de rezultate s-au obținut la următoarele mașini sincrone:

- HG2 9,3 MVA din CHE Ostrovul Mare, Sucursala de Hidrocentrale Hațeg [\*13];
- HG2 186 MVA din CHE Râul Mare, Sucursala de Hidrocentrale Hațeg [\*14], [\*15];
- HG2 6,9 MVA din CHE Subcetate, Sucursala de Hidrocentrale Hațeg [\*16], [\*17];
- HG2 9,3 MVA din CHE Ostrovul Mic, Sucursala de Hidrocentrale Hațeg [\*18];
- HG1 9,3 MVA din CHE Hațeg, Sucursala de Hidrocentrale Hațeg [\*19];

De asemenea au existat cazuri în care în urma verificărilor, modificarea întrefierului prin deplasarea rotorului nu a fost posibilă datorită limitării impuse de jocurile în camera rotorului turbinei. În acest caz s-a optat pentru mutarea statorului în direcția și sensul rezultantei celor patru deplasări ale rotorului pentru o rotație completă. Astfel de rezultate s-au obținut la următoarele tipuri de mașini sincrone:

- motor sincron 5,5 MVA din Stația Săcuieu, Sucursala Hidrocentrale Cluj [\*26].
- HG2 10 MVA din CHE Tileagd, Sucursala de Hidrocentrale Oradea [\*30];

În urma analizei rezultatelor experimentale obținute pentru hidrogeneratoarele testate (Fig. 6.25 și 6.26), din punct de vedere al nivelului de vibrație absolută se observă următoarele:

- în centralele hidroelectrice din amenajarea Curtea de Argeș există hidrogeneratoare puse în funcțiune în perioada 1970-1985, care actualmente prezintă un nivel foarte mare de vibrație [\*10], [\*31], [\*32].

**Un exemplu în acest sens fiind HG1 din CHE Mănicești, care înainte de aplicarea metodei de centrare magnetică a funcționat cu un nivel**

**de vibrație absolută de 4,2 mm/s, valoare care depășește nivelul maxim admis de 2,5 mm/s.** În urma aplicării procedurilor de centrare magnetică s-a redus nivelul de vibrație la valoarea de 0,48 mm/s, deci cu mult sub limita maximă admisibilă.

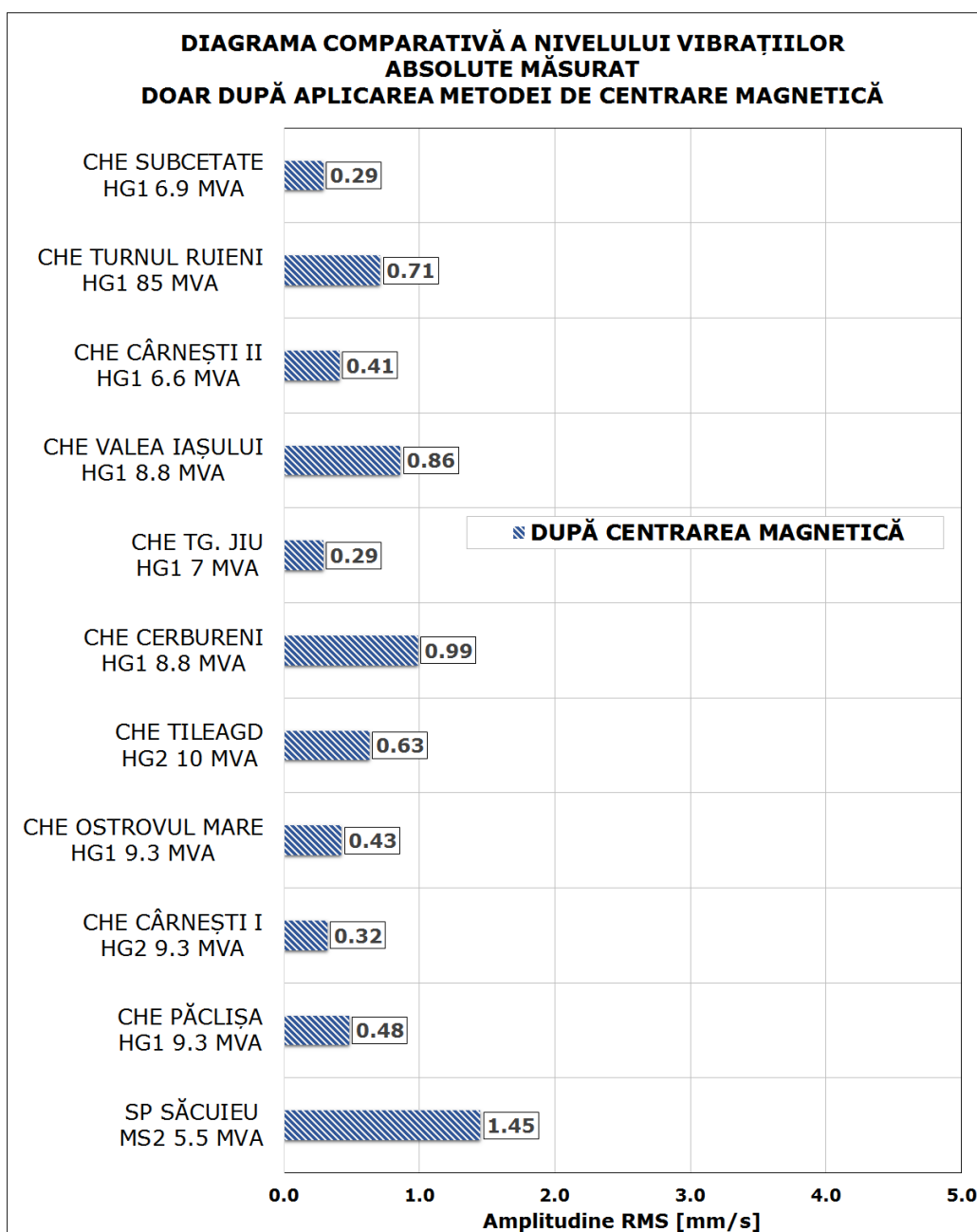


Fig. 6. 25. Diagrama comparativă a nivelului vibrațiilor absolute măsurate doar după aplicarea metodei de centrare magnetică

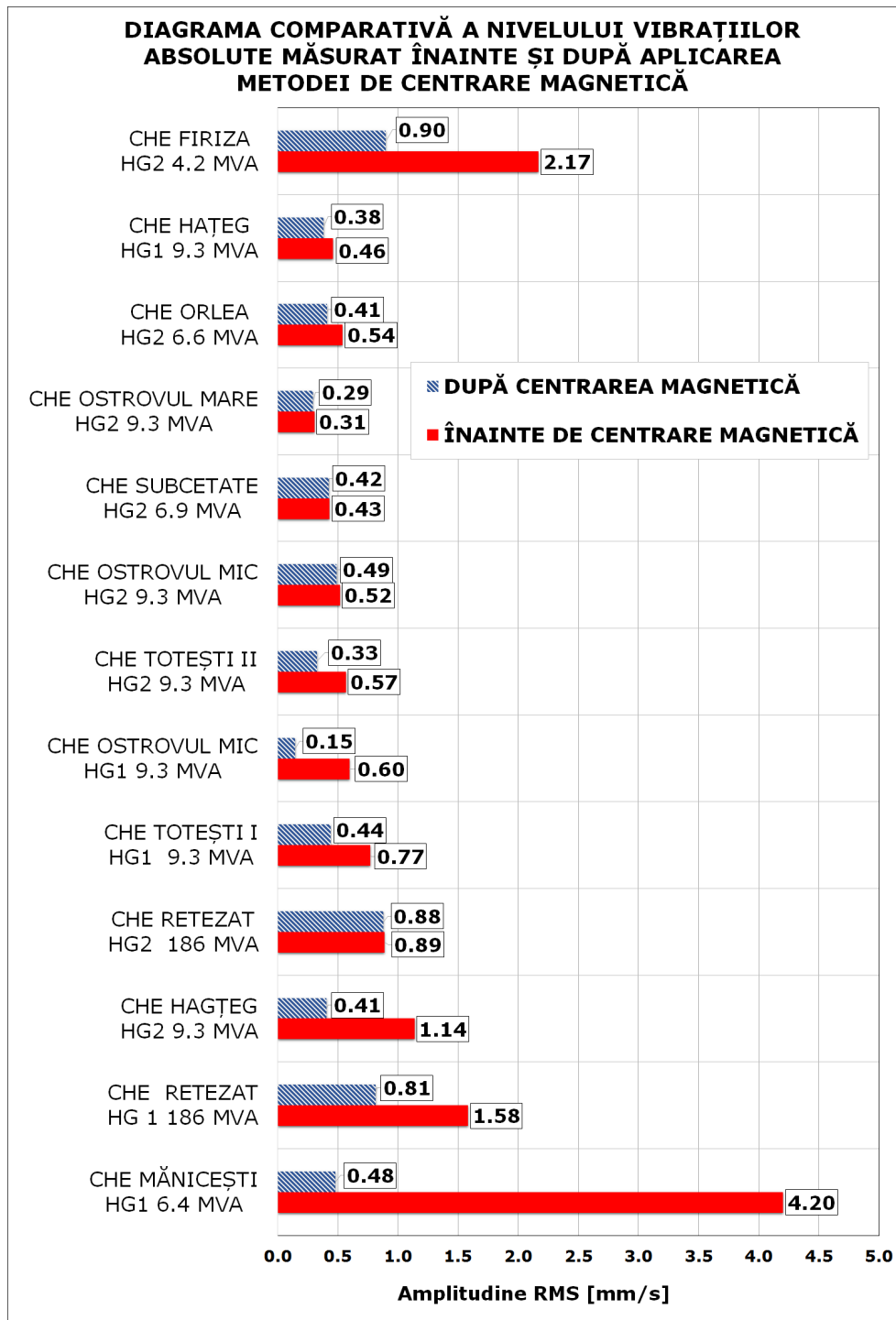


Fig. 6. 26. Diagrama comparativă a nivelului vibrațiilor absolute măsurate înainte și după aplicarea metodei de centrare magnetică

## 6.2. Cuplul electromagnetic asincron - Rezultate experimentale

Rezultatele experimentale prezentate în continuare se referă la determinarea cuplului electromagnetic asincron al mașinii sincrone folosind instrumentația virtuală, conform metodologiei prezentate în detaliu în subcapitolul 5.2.3, în regimul de alimentare cu frecvență variabilă și rotor în repaus prezentat în subcapitolul 5.2.2.

Măsurătorile s-au realizat pe standul de probă pentru mașini electrice al Uzinei Constructoare de Mașini Reșița. Mașina de încercat a fost un motor sincron MS având următoarele date nominale:

- putere activă  $P=3,6$  MW;
- tensiune nominală  $U=6000$  V;
- curent nominal statoric  $I=385$  A;
- frecvența  $f=50$  Hz;
- factor de putere  $\cos\varphi=0,9$ ;
- turația rotorului  $n=600$  RPM;
- curent de excitație  $I_{ex}=300$  A.

Pentru a obține condițiile de testare impuse de metoda propusă de determinare a cuplului electromagnetic s-a folosit un număr de 4 mașini electrice din cadrul standului de testare, conectate conform Fig. 6.27.

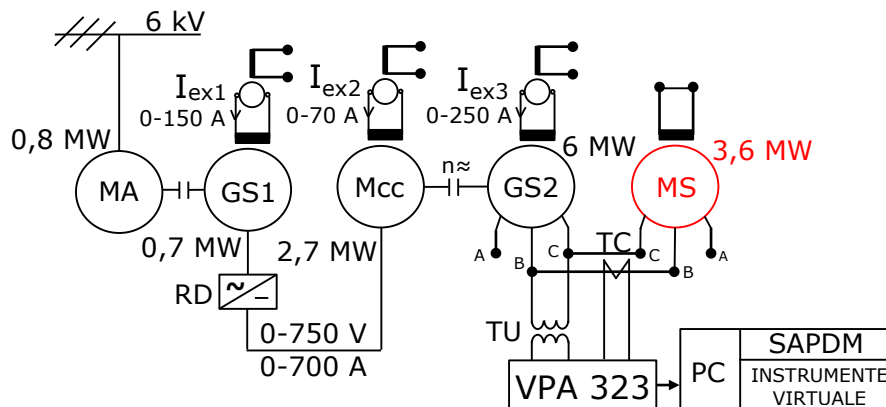


Fig. 6. 27. Schema de conectare a mașinilor electrice folosite pentru alimentarea cu frecvență variabilă a MS 3,6 MW

Conform schemei de principiu din Fig. 6.27, s-a utilizat ca sursă de tensiune alternativă de frecvență variabilă un generator sincron GS2 de 6MW antrenat de un motor de curent continuu Mcc 2,7 MW. Mașina de antrenare Mcc este alimentată în rotor de la generatorul sincron GS1 de 0,7 MW prin intermediul punții redresoare RD. Pentru antrenarea GS1 se folosește un motor asincron MA de 0,8 MW conectat la rețeaua de 6 kV.

Modificarea frecvenței tensiunii generatorului GS2 se realizează prin modificarea turației motorului de curent continuu Mcc în limitele 0-600 RPM. Reglajul de turație a Mcc are loc în condiții de flux constant și tensiune de alimentare rotorică variabilă în limitele 0-600 V. Curentul de excitație al Mcc este

menținut constant prin intermediul unei excitație separate având curentul nominal în rotor de 70 A, corespunzător curentului de excitație nominal al Mcc. Tensiunea de alimentare a Mcc este furnizată de generatorul sincron GS1 prin intermediul redresorului necomandat RD.

Modificarea tensiunii de alimentare a Mcc are loc prin variația curentului de excitație  $I_{ex1}$ , în limitele 0-150 A, curent furnizat de o excitație separată. GS1 asigură o tensiune redresată în limitele 0-750 V, la un curent maxim de 1000 A.

GS1 este antrenat la turația nominală de 1500 rpm de către MA având puterea nominală de 0,8 MW și tensiunea nominală 6 KV. Se obține astfel, pentru alimentarea motorului de încercat MS, o tensiune alternativă de frecvență variabilă în limitele 0-50 Hz, la un curent maxim de 800 A și un domeniu de tensiune cuprins între 0-3000 V. Sistemul de achiziție și prelucrare de date a fost conectat în secundarul transformatoarelor de măsură pentru tensiune TU (1000/100 V) și pentru curent TC (400/5 A). Mașina de încercat fiind în stare de repaus s-au alimentat cele două faze înseriate B și C cu tensiunea alternativă monofazată furnizată de GS2, iar rotorul a fost poziționat pe rând în axa transversală și apoi în cea longitudinală în vederea determinării parametrilor după cele două axe, înfășurarea rotorică fiind scurtcircuitată.

Pentru diferite valori ale frecvenței de alimentare  $f_v$ , s-au achiziționat și calculat valorile  $U_{BC}$ ,  $I_B$  și  $\cos(\varphi)$  folosind sistemul de achiziție produs de firma DIGITLINE VPA 323. Deoarece din punct de vedere hardware VPA 323 are în componență echipamente National Instruments s-au putut folosi cele 16 intrări împreună cu aplicațiile din cadrul nivelului secundar SAPDM pentru centrarea magnetică, care au fost special dezvoltate pentru a funcționa și cu alte echipamente NI. Datorită constantelor de calibrare interne necunoscute ale celor două analizoare de putere trifazate ale VPA 323, nu a fost posibilă folosirea aplicației dezvoltate pentru nivelul primar de achiziție și prelucrare ale SAPDM împreună cu VPA 323. De aceea pentru măsurătorile prezentate în acest subcapitol s-a folosit aplicația proprie FastView prin care se achiziționează și exportă în fișiere Excel valorile  $U_{BC}$ ,  $I_B$ ,  $f_v$  și  $\cos(\varphi)$ , pentru cele două poziții ale rotorului în axa  $d$  și  $q$ . Cele două fișiere au fost apoi încărcate în cadrul aplicației, dezvoltate în cadrul tezei, dedicate determinării caracteristicii cuplului electromagnetic la pornirea în asincron a mașinilor sincrone (Fig. 6.27), din cel de-al doilea nivel de prelucrare software al SAPDM. Detaliile sunt date în subcapitolul 5.2.3. Din acest motiv nu se mai prezintă modul de utilizare și facilitățile aplicației în cadrul acestui capitol.

În funcție de cele două fișiere încărcate, aplicația dezvoltată calculează următoarele mărimi, folosind relațiile prezentate în subcapitolele 5.2.2 și 5.2.3:

- alunecarea  $s$  a rotorului (5.31);
- defazajul  $\varphi$  dintre  $U_{BC}$  și  $I_B$ ;
- impedanța echivalentă  $Z_S(s)$  a MS în regimul SSFR (5.35);
- impedanța echivalentă  $Z_R(s)$  a MS în stare de rotație în regim asincron (5.36);
- componentele asincrone după axa longitudinală  $m_{ad}$  și transversală  $m_{aq}$  (5.41);
- cuplul electromagnetic dezvoltat de MS în regim asincron  $m_a$  (5.42).

Valorile calculate în u.r. sunt prezentate în Tabelul 6.4 pentru poziția rotorului în axa  $d$  iar pentru axa  $q$  în Tabelul 6.5.

În Fig. 6.28 se prezintă cele trei caracteristici ale cuplului electromagnetic asincron în funcție de alunecarea  $s$ , exprimate în u.r., corespunzătoare celor două componente după axa longitudinală  $m_{ad}=f(s)$  (linie albastră), transversală  $m_{aq}=f(s)$  (linie roșie) și media lor  $m_a=f(s)$  (linie neagră).

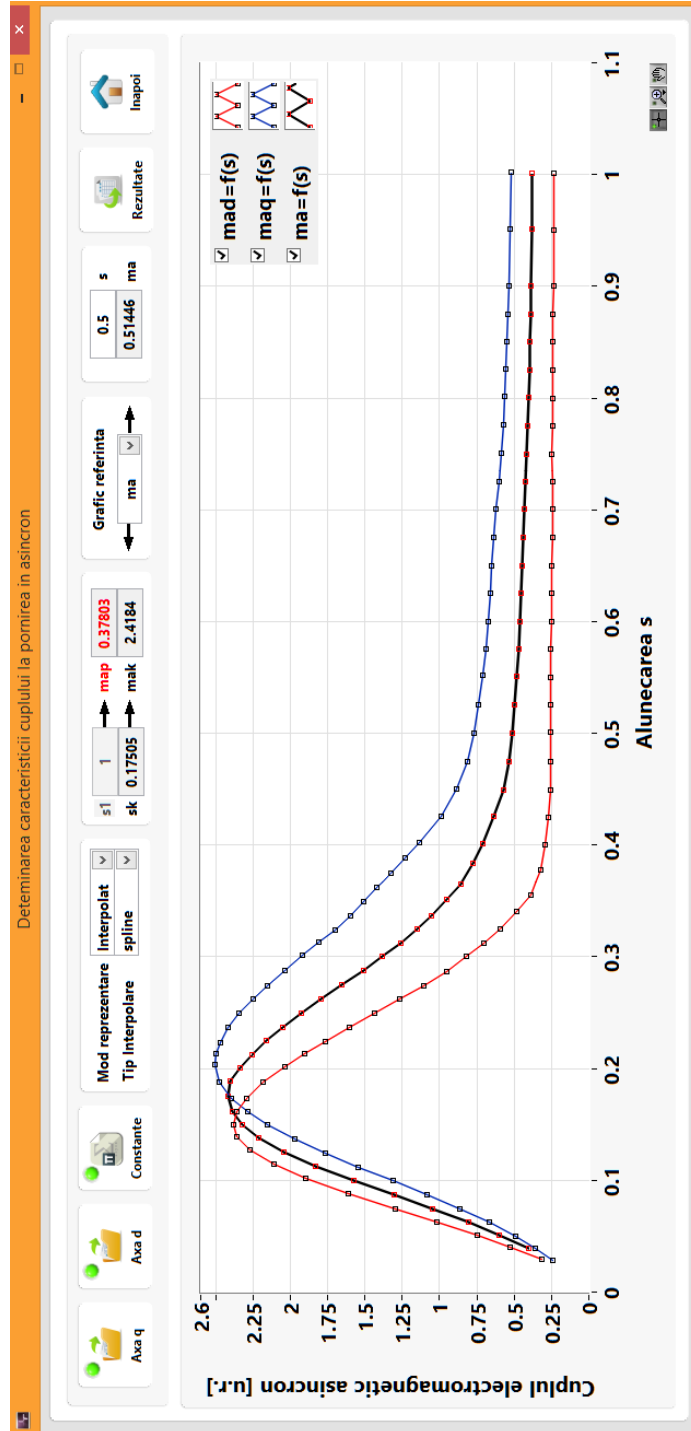


Fig. 6. 28. Caracteristica cuplului la pornirea în asincron a MS 3,6 MW reprezentată folosind aplicația dedicată din cadrul nivelului secundar de prelucrare al SAPDM

152 APLICAȚII ÎN MEDIUL INDUSTRIAL - 6

Din dependența  $m_a=f(s)$  rezultă următoarele mărimi caracteristice, exprimate în u.r. :

- cuplul de pornire  $m_{ap}=0,37803$  corespunzător alunecării  $s=1$ ;
- cuplul maxim  $m_{ak}=2,4184$  corespunzător alunecării critice  $s_k=0,17505$ ;

Tabelul 6. 4. Mărimile calculate de SAPDM pentru determinarea curbei cuplului la pornirea în asincron a MS 3,6 MW pentru poziționarea rotorului în axa  $d$

Nr. Crt.	$f_v$ [Hz]	$s$ [-]	$U_{bc}$ [V]	$I_b$ [A]	$Z_s(s)$ [ $\Omega$ ]	$\varphi$ [°]	$\cos(\varphi)$ [0]	$\sin(\varphi)$ [0]	$re(s)$ [ $\Omega$ ]	$X_e(s)$ [ $\Omega$ ]	$Z_R(s)$ [ $\Omega$ ]	$m_{ad}$ [u.r.]
1	50.04	1.001	627.46	143.17	2.191	83.685	0.110	0.994	0.241	2.176	2.190	0.238
2	45.00	0.900	571.32	142.02	2.011	83.339	0.116	0.993	0.245	2.220	2.233	0.237
3	42.51	0.850	1055.70	286.61	1.842	83.050	0.121	0.993	0.240	2.150	2.164	0.241
4	40.00	0.800	1035.78	298.63	1.734	82.819	0.125	0.992	0.239	2.151	2.164	0.240
5	37.50	0.750	961.75	294.76	1.631	82.473	0.131	0.991	0.243	2.157	2.170	0.246
6	35.02	0.700	894.71	292.65	1.529	82.241	0.135	0.991	0.240	2.163	2.176	0.239
7	32.51	0.650	833.61	292.75	1.424	81.779	0.143	0.990	0.245	2.167	2.181	0.248
8	30.01	0.600	770.08	291.75	1.320	81.315	0.151	0.989	0.247	2.174	2.188	0.252
9	27.50	0.550	707.08	290.97	1.215	80.793	0.160	0.987	0.250	2.181	2.195	0.254
10	25.05	0.501	643.65	289.05	1.113	80.212	0.170	0.985	0.251	2.190	2.204	0.256
11	22.44	0.449	578.24	287.50	1.006	79.455	0.183	0.983	0.254	2.203	2.218	0.258
12	20.03	0.401	516.27	284.98	0.906	78.229	0.204	0.979	0.271	2.214	2.230	0.290
13	17.78	0.356	460.06	282.12	0.815	75.995	0.242	0.970	0.325	2.225	2.248	0.391
14	16.24	0.325	421.34	278.37	0.757	72.602	0.299	0.954	0.433	2.224	2.265	0.596
15	15.00	0.300	390.77	273.92	0.713	69.023	0.358	0.934	0.555	2.220	2.288	0.817
16	13.72	0.274	359.23	267.36	0.672	64.342	0.433	0.901	0.724	2.207	2.323	1.107
17	12.46	0.249	328.51	258.51	0.635	58.869	0.517	0.856	0.936	2.183	2.375	1.434
18	11.20	0.224	297.75	246.94	0.603	52.771	0.605	0.796	1.188	2.143	2.450	1.768
19	10.10	0.202	271.05	234.36	0.578	47.078	0.681	0.732	1.448	2.096	2.548	2.035
20	8.68	0.174	236.57	215.23	0.550	39.646	0.770	0.638	1.833	2.020	2.728	2.293
21	7.51	0.150	208.50	194.14	0.537	33.280	0.836	0.549	2.270	1.962	3.000	2.381
22	6.34	0.127	179.97	170.48	0.528	28.478	0.879	0.477	2.785	1.985	3.420	2.273
23	5.08	0.102	149.03	141.56	0.526	27.127	0.890	0.456	3.488	2.362	4.213	1.894
24	3.71	0.074	114.22	107.89	0.529	30.796	0.859	0.512	4.543	3.652	5.830	1.300
25	2.53	0.051	82.25	77.23	0.533	38.372	0.784	0.621	5.868	6.533	8.781	0.745
26	1.47	0.029	51.06	48.69	0.524	48.394	0.664	0.748	7.650	13.336	15.374	0.318

Tabelul 6. 5. Mărimile calculate de SAPDM pentru determinarea curbei cuplului la pornirea în asincron a MS 3,6 MW pentru poziționarea rotorului în axa  $q$

Nr. Crt.	$f_v$ [Hz]	$s$ [-]	$U_{bc}$ [V]	$I_b$ [A]	$Z_s(s)$ [ $\Omega$ ]	$\varphi$ [°]	$\cos(\varphi)$ [0]	$\sin(\varphi)$ [0]	$re(s)$ [ $\Omega$ ]	$X_e(s)$ [ $\Omega$ ]	$Z_R(s)$ [ $\Omega$ ]	$m_{aq}$ [u.r.]
1	50.11	1.002	1015.26	224.90	2.257	80.038	0.173	0.985	0.390	2.218	2.252	0.518
2	45.01	0.900	1064.49	264.56	2.012	79.514	0.182	0.983	0.393	2.198	2.232	0.533
3	42.5	0.850	1001.33	262.53	1.907	79.106	0.189	0.982	0.402	2.203	2.240	0.548
4	40.06	0.801	1135.54	321.22	1.768	78.697	0.196	0.981	0.401	2.163	2.200	0.566
5	37.51	0.750	1071.49	322.43	1.662	78.171	0.205	0.979	0.412	2.168	2.207	0.585
6	35.03	0.701	1002.70	321.48	1.560	77.408	0.218	0.976	0.431	2.172	2.215	0.620
7	32.5	0.650	1080.30	378.07	1.429	76.703	0.230	0.973	0.437	2.139	2.183	0.651
8	30	0.600	1011.74	381.07	1.328	75.995	0.242	0.970	0.451	2.147	2.194	0.673
9	27.58	0.552	935.47	379.85	1.231	74.989	0.259	0.966	0.475	2.156	2.208	0.714
10	25	0.500	851.79	376.78	1.130	73.620	0.282	0.959	0.511	2.169	2.228	0.772
11	22.49	0.450	771.05	372.75	1.034	71.398	0.319	0.948	0.578	2.179	2.255	0.888
12	20.13	0.403	698.91	368.29	0.949	67.294	0.386	0.923	0.721	2.174	2.291	1.133
13	18.76	0.375	655.79	363.27	0.903	64.024	0.438	0.899	0.842	2.163	2.321	1.328
14	17.45	0.349	615.43	358.10	0.859	60.791	0.488	0.873	0.965	2.149	2.356	1.510
15	16.21	0.324	576.75	351.44	0.821	57.248	0.541	0.841	1.105	2.129	2.398	1.700
16	15.08	0.302	541.34	342.06	0.791	52.987	0.602	0.799	1.285	2.095	2.458	1.918
17	13.72	0.274	498.92	329.26	0.758	47.701	0.673	0.740	1.522	2.042	2.547	2.151
18	12.49	0.250	460.52	313.84	0.734	42.269	0.740	0.673	1.792	1.976	2.667	2.341
19	11.16	0.223	419.82	295.88	0.709	36.486	0.804	0.595	2.114	1.890	2.835	2.471
20	10.17	0.203	389.43	278.25	0.700	31.788	0.850	0.527	2.427	1.812	3.029	2.507
21	8.65	0.173	342.81	247.11	0.694	25.578	0.902	0.432	3.009	1.731	3.472	2.391
22	7.49	0.150	307.29	220.10	0.698	22.631	0.923	0.385	3.580	1.793	4.004	2.154
23	6.22	0.124	266.99	187.55	0.712	22.780	0.922	0.387	4.382	2.215	4.910	1.765
24	4.98	0.100	225.70	152.90	0.738	26.234	0.897	0.442	5.499	3.276	6.401	1.311
25	3.74	0.075	181.08	117.14	0.773	31.897	0.849	0.528	7.202	5.460	9.038	0.866
26	2.49	0.050	129.95	80.62	0.806	38.739	0.780	0.626	10.200	10.127	14.374	0.488
27	1.42	0.028	78.85	49.88	0.790	45.733	0.698	0.716	15.081	19.930	24.993	0.239





- pierderile în cupru din înfășurările statorului  $p_{Cu1}$  (5.21);
- pierderile suplimentare  $p_s$  (Tabelul 5.2);
- puterea electromagnetică  $P_{ek}$  (5.20)
- cuplul electromagnetic de pornire în asincron  $m_{ap}$ ;

De asemenea în Fig. 6.30 se afișează pierderile în fier  $p_{fe}$  determinate anterior dintr-o probă de funcționare în regim de mers în gol și puterea activă nominală a motorului sincron  $P_n=3600$  kW. Toate valorile pierderilor și ale puterilor sunt exprimate în kW.

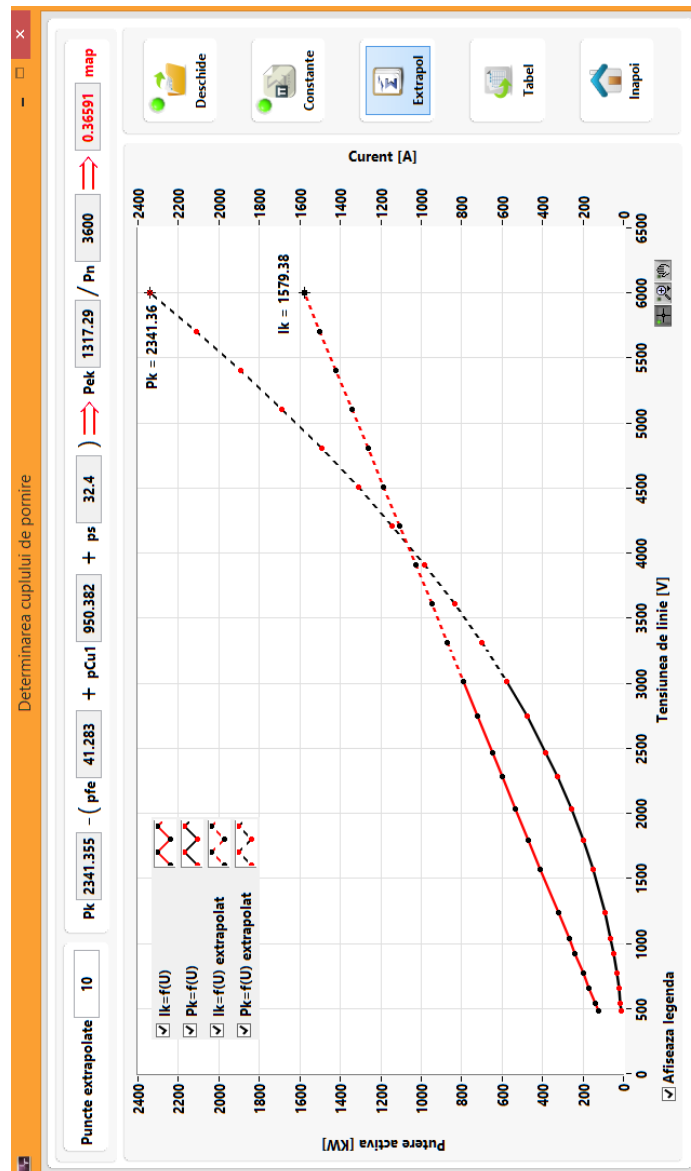


Fig. 6. 30. Caracteristica de funcționare în regim de scurtcircuit asincron a motorului sincron de 3,6 MW, extrapolată la tensiunea nominală

Dacă se compară valoarea cuplului de pornire în asincron a MS 3,6 MW obținut în urma probei de scurtcircuit folosind metoda bilanțului energetic,  $m_{ap}=0,36591$  u.r. și cel obținut prin metoda propusă bazată pe regimul de alimentare cu frecvență variabilă și rotor în repaus  $m_{ap}=0,37803$  u.r., se observă că cele două valori sunt apropiate, obținându-se astfel validarea metodei propuse.

### 6.3. Concluzii

Cercetările experimentale efectuate la o serie de hidrogeneratoare din România cu puteri și turații diferite au scos în evidență că performanțele de funcționare ale acestora sunt dependente de mai mulți factori, dintre care dinamica rotorului are cea mai mare importanță.

În cadrul prezentei lucrări s-a demonstrat atât teoretic cât și experimental posibilitatea apariției unor forțe suplimentare perturbatoare de natură mecanică datorate unui dezechilibru masic al rotorului, cât și de natură magnetică datorate unui dezechilibru magnetic determinat de neuniformitatea întrefierului. În regimul tranzitoriu de aruncare din sarcină amplitudinea acestor forțe perturbatoare pot atinge o valoare considerabilă, astfel punându-se în pericol atât siguranța HG cât și a personalului de exploatare.

Metoda prezentată de punere în evidență a acestor forțe suplimentare de natură mecanică și magnetică prin interpretarea formei diagramei orbită a rotorului este ușor de aplicat și se bazează pe prelucrarea semnalelor furnizate de traductoare de proximitate montate la nivelul lagărelor HG.

Cele două proceduri de diminuare a forțelor suplimentare perturbatoare, prin centrarea magnetică a rotorului folosind traductoare de proximitate, respectiv bobine sondă montate pe pachetele elementare ale statorului, au fost aplicate cu succes la 23 de hidrogeneratoare și un motor sincron din România. De remarcat este faptul că prin aplicarea centrării magnetice s-au îmbunătățit performanțele de funcționare ale hidrogeneratorului nr. 1 din CHE Mănicești, la care s-a redus nivelul de vibrație absolută în lagăre de 10 ori [\*10].

**Ca urmare a rezultatelor obținute, societatea SSH Hidroserv SA Sucursala Hațeg a introdus procedura de centrare magnetică în cadrul verificărilor din timpul lucrărilor de reparație a hidrogeneratoarelor.**

Prin intermediul bobinelor sondă montate în stator se creează posibilitatea monitorizării on-line a întrefierului și stabilirea unei limite maxime admisibile în funcție de regimul de funcționare al HG. În condițiile în care o astfel de instalație de monitorizare ar fi fost implementată în CHE Râul Mare Retezat, s-ar fi putut evita evenimentul din 1986 când HG1 a fost complet avariat, în urma contactului fizic dintre rotor și stator. În urma rezultatelor experimentale prezentate în cadrul acestui capitol, se poate afirma cu certitudine că există posibilități reale de eliminare a oricărui incident de natura celui din 1986, prin aplicarea procedurilor de centrare magnetică în timpul reparației hidrogeneratoarelor și monitorizarea în timpul funcționării a formei rotor stator, implicit a abaterilor de întrefier.

Ținând cont că o parte din HG din România sunt proiectate și executate pentru a funcționa atât în regim de generator cât și de motor, se impune cunoașterea cu precizie a caracteristicii cuplului electromagnetic în funcție de alunecare. Rezultatele experimentale obținute în urma aplicării metodei propuse în cadrul tezei, de determinare a cuplului în regim asincron pentru motorul sincron de 3,6 MW, confirmă corectitudinea și eficiența acesteia.

## **7. CONCLUZII GENERALE, CONTRIBUȚII ȘI DIRECȚII DE DEZVOLTARE**

### **7.1. Concluzii generale**

Obiectivul principal al tezei constă în elaborarea unor metode și proceduri de testare bazate pe instrumentație virtuală, care să contribuie la îmbunătățirea performanțelor de funcționare a generatoarelor sincrone din centralele hidroelectrice din România.

Proiectarea și execuția echipamentelor electroenergetice au în vedere obținerea performanțelor de calitate, care să asigure funcționarea în condiții de siguranță o perioadă de timp cât mai mare. Experiența practică a demonstrat, mai ales în cazul mașinilor sincrone, că nici o metodă de proiectare, chiar ținând cont de procesele tehnologice și de materialele utilizate în construcția echipamentelor respective, nu poate garanta comportarea ulterioară în exploatare. Este foarte important ca punerea în funcție a echipamentelor respective să fie însoțite de expertize complexe care să certifice încadrarea în parametri de performanță impuși, în scopul asigurării unei funcționări în condiții de siguranță pe o perioadă cât mai mare de timp.

Eventualele defecte ce pot să apară în timpul funcționării HG pot conduce la avarii importante, însoțite de pagube materiale însemnate cu repercusiuni de durată pentru întreg sistemul energetic.

Fiabilitatea funcționării sistemului electroenergetic este privită ca o proprietate a acestuia de a asigura alimentarea cu energie electrică a consumatorilor în limitele de calitate impuse tensiunii electrice de alimentare, luând în considerare ieșirile din funcțiune planificate și forțate ale componentelor sistemului.

Având în vedere marile puteri transportate și consumate în sistemele energetice moderne, precum și pagubele majore care pot apărea datorită întreruperii alimentării cu energie electrică a consumatorilor din industrie, transporturi, telecomunicații etc., funcționarea neîntreruptă în condiții de siguranță a centralelor hidroelectrice devine un obiectiv primar pentru energia românească. Îndeplinirea acestui obiectiv este condiționată în mare măsură de performanțele tehnico-economice ale echipamentelor ce produc energie electrică, în cadrul cărora un loc aparte îl ocupă hidrogeneratoarele de putere mare. Dezvoltarea impetuoasă a echipamentelor energetice de producere a energiei electrice a avut loc în principal pe linia parametrilor cantitativi (creșterea intensă a puterilor instalate din centralele hidroelectrice), fără să se acorde atenția cuvenită și unei dezvoltări pe linia creșterii parametrilor calitativi care asigură creșterea duratei de viață și funcționarea în condiții de siguranță a echipamentelor respective.

Practica a demonstrat că nu întotdeauna performanțele impuse prin proiect se regăsesc și în realitate în timpul exploatării hidrogeneratoarelor. În cele mai multe cazuri, la punerea în funcție a HG s-au constatat performanțe mult sub cele prevăzute în proiect, fapt ce a condus la o exploatare ineficientă a echipamentelor respective.

Întrucât majoritatea hidrogeneratoarelor din România au fost proiectate și puse în funcțiune înainte de 1989, urmează ca acestea să intre în etapa de

re tehnologizare și modernizare. În acest scop este necesar ca înainte de demontare, echipamentele respective să fie supuse unor teste complexe prin care să se identifice parametri actuali și care să certifice performanțele reale. Această expertiză inițială constituie punctul de plecare pentru re tehnologizare.

În cadrul capitolului 2 s-au prezentat principalele aspecte ce definesc starea tehnică a unui hidrogenerator: stabilitatea întrefierului, stabilitatea statorului, stabilitatea dinamică a părților rotitoare, performanțele de izolație, precizia instalației de măsură a debitului turbinat. Pentru o parte din aceste aspecte, în teza s-au prezentat proceduri și metode moderne care oferă posibilitatea unei aprecieri cât mai obiective asupra stării tehnice reale a hidrogeneratoarelor, unele dintre acestea fiind contribuții personale, aplicate în premieră în România.

## 7.2. Contribuții

Pornind de la obiectivele propuse, pe durata celor 3 ani a programului individual de cercetare științifică s-au studiat 281 de titluri bibliografice ce cuprind rapoarte științifice, cărți, articole de pe site-uri web și lucrări științifice, dintre care 11 referințe bibliografice aparțin autorului.

În continuare se prezintă principalele contribuții personale obținute, în urma cercetărilor efectuate în domeniul abordat în prezenta lucrare:

- pe baza unor lucrări actuale din literatura de specialitate și a experienței practice din cadrul CCHAPT, s-au realizat următoarele:
  - o sinteză a principalelor probleme de mentenanță care condiționează exploatarea în condiții optime de siguranță a HG din România;
  - o sinteză a principalelor cerințe care se impun pentru realizarea unui sistem de achiziție și prelucrare automată a datelor, dedicat testării mașinilor electrice (subcapitolul 4.1);
  - o sinteză asupra fenomenelor cauzate de forța magnetică unilaterală de dezechilibru-UMP, ce influențează în sens negativ funcționarea în condiții de siguranță a HG (subcapitolul 5.1.2);
  - o sinteză asupra principalelor metode cunoscute privind diminuarea UMP (subcapitolul 5.1.2);
  - o sinteză a metodelor indirecte de determinare a cuplului electromagnetic aplicabile la mașini electrice de putere mare (subcapitolul 5.2.1).
- conceperea și realizarea hardware, software a unui sistem de achiziție și prelucrare a datelor dedicat testării mașinilor electrice de mică și mare putere-SAPDM, folosind instrumentația virtuală (subcapitolul 4.2). SAPDM conceput și realizat în cadrul tezei prezintă posibilități multiple de implementare în mediu industrial datorită modularității și flexibilității atât din punct de vedere hardware cât și software. Un aspect importat este faptul că SAPDM a fost conceput special pentru a corespunde condițiilor tehnice existente în centralele hidroelectrice. În consecință, implementarea SAPDM în circuitele de măsură ale hidrocentralelor nu necesită lucrări suplimentare de adaptare, fiind necesară doar conectarea în circuitele secundare de tensiune și curent. Pentru măsurarea mărimilor mecanice (turație, vibrații, tendințe de deplasare) se utilizează traductoare ce sunt foarte ușor de montat, fără a fi necesare modificări constructive în cadrul ansamblelor și subansamblelor HG. În urma măsurărilor comparative cu un sistem de achiziție verificat metrologic având clasa de precizie 0,1 marca DIGITLINE

- VPA 323 (subcapitolul 4.2.5) pentru SAPDM s-a obținut o clasă de precizie de 0,26 % la măsurarea puterii active;
- implementarea metodei de punere în evidență a UMP prin interpretarea diagramei orbită a rotorului, în unele hidrocentrale din România;
  - conceperea aplicațiilor software din cadrul nivelului secundar al SAPDM, astfel încât acestea să fie compatibile și cu alte echipamente de achiziție, în scopul implementării acestora în cadrul sistemelor de monitorizare și testare existente în centralele hidroelectrice;
  - folosind instrumentația virtuală s-au dezvoltat două proceduri de diminuare a forței magnetice unilaterale de dezechilibru-UMP prin centrarea în câmp magnetic a rotoarelor HG, după cum urmează:
    - prima procedură (subcapitolul 5.1.4) constă în montarea a 2 perechi de traductoare de proximitate la nivelul lagărelor HG pentru verificarea tendințelor de deplasare ale rotorului în momentul aplicării unor impulsuri de curent în înfășurarea rotorică. În funcție de tendința de deplasare a rotorului la o rotație completă, se aplică o corecție a întrefierului stabilit inițial din considerente geometrice. Pentru achiziția și prelucrarea datelor se folosesc instrumente virtuale special dezvoltate în cadrul nivelului secundar al SAPDM.
    - a doua procedură de centrare magnetică (subcapitolul 5.1.5) constă în montarea a unor bobine sondă pe pachetele elementare ale statorului și interpretarea tensiunilor electromotoare induse în acestea în scopul aprecierii tendinței de deplasare a rotorului în momentul aplicării impulsurilor în înfășurarea de excitație a mașinii. De asemenea se folosesc VI-uri dedicate din cadrul nivelului secundar software al SAPDM;
    - cele două proceduri de centrare magnetică a rotoarelor HG au fost implementate în premieră în România, cu participarea autorului tezei în colectivul de testare, la un număr de 23 hidrogeneratoare sincrone verticale și un motor sincron de putere mare (Fig. 6.25 și 6.26). Pentru aceste mașini s-au obținut îmbunătățiri atât din punct de vedere al nivelului de vibrație în lagăre, cât și din punct de vedere al temperaturilor de funcționare în lagăre. Ca urmare a beneficiilor obținute în urma aplicării centrării magnetice, SSH Hidroserv SA a introdus această procedură în timpul lucrărilor de reparație a hidrogeneratoarelor din Sucursala Hațeg.
  - pe baza procedurii cunoscute în literatura de specialitate pentru aprecierea formei rotorului și statorului a HG prin intermediul bobinelor sondă montate pe pachetele elementare ale statorului, în cadrul aplicației software dezvoltate pentru ce-a de-a doua procedură de centrare magnetică, s-a elaborat un instrument virtual pentru monitorizarea stabilității dinamice a rotorului din punct de vedere al întrefierului, atât în regimuri staționare cât și tranzitorii;
  - elaborarea în cadrul primului nivel de prelucrare software al SAPDM a subVI-ului pentru eliminarea defazajului cauzat de folosirea a modulelor de achiziție din seria NI CompactDAQ, care au în componență un convertor analog numeric delta-sigma și a modulelor de achiziție cu un convertor analog numeric cu aproximări succesive (subcapitolul 4.2.5). Trebuie specificat faptul că această eroare poate fi eliminată prin înlocuirea șasiului cDAQ-9172, cu un șasiu de generație mai nouă care are în componență două sau mai multe baze de timp. Deoarece înlocuirea șasiului cDAQ-9172 nu a fost posibilă a fost necesară elaborarea acestui subVI de compensare a

defazajului. Rezultatele experimentale obținute prin compararea SAPDM cu sistemul VPA 323, permit validarea subVI-ului dezvoltat;

- elaborarea în cadrul celui de-al doilea nivel de prelucrare software a unui subVI pentru interpolarea valorilor ce corespund amplitudinilor celor 12 tensiuni electromotoare induse în bobinele sondă montate pe pachetele elementare ale statorului, în scopul reprezentării cât mai corecte a formei rotorului și a statorului pentru mașina testată. Mediul LabVIEW oferă opțiuni de interpolare predefinite în cadrul indicatoarelor grafice, însă acestea nu au fost suficiente pentru a reprezenta cu finețe rezultatele experimentale;
- prin elaborarea unor instrumente virtuale dedicate de achiziție și prin modul original de prelucrare a datelor, s-au adus completări la metoda cunoscută în literatura de specialitate privind determinarea cuplului electromagnetic asincron al mașinilor sincrone folosind regimul de alimentare cu frecvență variabilă și rotor în repaus (subcapitolul 5.2.3). Un avantaj major al metodei propuse în cadrul lucrării constă în reducerea semnificativă a timpului de încercare a mașinii sincrone, dar și a timpului alocat prelucrărilor de date prin reprezentarea automată a mărimilor de interes și a curbei cuplului în funcție de alunecare.

### **7.3. Direcții de dezvoltare ulterioară a cercetării abordate în teză**

În scopul continuării cercetărilor în domeniul testării mașinilor electrice, pentru viitor se au în vedere următoarele:

- îmbunătățirea aplicației software dezvoltate în mediul LabVIEW pentru monitorizarea diagramei orbită a rotoarelor HG. În acest sens se propune elaborarea unor instrumente virtuale, care pe baza analizei formei diagramei și a spectrului de vibrație să ofere posibilitatea diagnozei on-line a HG, prin specificarea principalelor cauze (UMP, dezalinieră arborilor excitatoare-generator-turbină, degradarea filmului de ulei, etc) care conduc la modificarea traiectoriei arborelui rotorului și implicit la instabilitatea dinamică a acestuia;
- dezvoltarea unei aplicații software dedicate pentru determinarea caracteristicii cuplului electromagnetic asincron cu considerarea saturației, folosind regimul de pornire lentă în gol la tensiune scăzută. Acest aspect a fost abordat în cadrul acestei lucrări, însă s-au dezvoltat instrumente virtuale doar pentru a determina cuplul de pornire în asincron a mașinii sincrone, folosind metoda bilanțului energetic cu scopul de a valida metoda propusă;
- elaborarea unor instrumente virtuale pentru evaluarea eficientă a stării izolației înfășurărilor statorice la mașini electrice de putere mare. Folosind un echipament existent Presco AG PD-4 pentru măsurarea descărcărilor parțiale, se propune dezvoltarea unei aplicații în mediul LabVIEW care să realizeze achiziția, prelucrarea și afișarea automată a rezultatelor într-un mod cât mai util, prin intermediul comunicației RS232. Trebuie specificat faptul că echipamentul menționat anterior este prevăzut cu un display monocrom pentru afișarea rezultatelor. De asemenea se propune ca în viitorul apropiat, SAPDM să fie completat din punct de vedere hardware astfel încât să corespundă cerințelor necesare pentru măsurători de descărcări parțiale în izolație;

160 CONCLUZII GENERALE, CONTRIBUȚII ȘI DIRECȚII DE DEZVOLTARE - 7

---

- îmbunătățirea metodelor cunoscute de determinare a randamentului hidrogenatoarelor de putere mare, prin dezvoltarea unor instrumente virtuale dedicate achiziției și prelucrării automate a datelor.



## BIBLIOGRAFIE

- [A1] Alhasawi F.B., Milanovic J.V., *Ranking the Importance of Synchronous Generators for Renewable Energy Integration*, Power Systems, IEEE Transactions on, Volume 27, Issue 1, June 2011, pp. 416-423.
- [A2] J. L. G. Araco, *Studiu privind defectele hidrogenatoarelor*, REVISTA TEHNOLOGIILE ENERGIEI producerea, transportul și distribuția energiei electrice și termice, Editura ICEMENERG, 2010.
- [A2] Nafkha A., Naoues M., Cichon K., Kliks A., *Experimental spectrum sensing measurements using USRP Software Radio platform and GNU-radio*, Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CROWNCOM), 2014 9th International Conference on, 2-4 June 2014, pp. 429-434.
- [A4] Aguirre I.J.O., Ruiz M.B., Diaz J.I.S.M., *Platform for Testing and Measuring Based on Virtual Instrument*, Tecnologias del Aprendizaje, IEEE Revista Iberoamericana de, Volume 8, Issue 3, August 2013, pp. 143-151.
- [A5] Kenneth L. Ashley, *Analog Electronics with LabVIEW*, Prentice Hall PTR, 2002.
- [A6] Riccard de Asmundis, *MODELLING, PROGRAMMING AND SIMULATIONS USING LABVIEW™ SOFTWARE*, InTech Croația, 2011.
- [A7] Gacsádi Alexandru, Tiponuş Virgil, *SISTEME DE ACHIZIȚII DE DATE*, Editura Universității din Oradea, 2005.
- [A8] Leopoldo Angrisani, Francesco Bonavolontà, Annalisa Liccardo, Rosario Schiano Lo Moriello, Luigi Ferrigno, Marco Laracca, Gianfranco Miele, *Multi-channel simultaneous data acquisition through a compressive sampling-based approach*, Measurement, Volume 52, 2014, pp. 156-172.
- [A9] Ana B. M. Aguiar, Arezki Merkhouf, Kamal Al-Haddad, *Influence of the Air Gap Length of the Magnetic Core loss in the Large Hydro Generator*, Electrical Machines (ICEM), 2012 XXth International Conference on, September 2012, pp. 328-332.
- [A10] Belahcen, A, Arkkio, A., *Computation of additional losses due to rotor eccentricity in electrical machines*, Electric Power Applications IET Volume 4, Issue 4, July 2014, pp. 259-266.
- [A11] A. N. Novozhilov, E. V. Kryukova, T. A. Novozhilov, *A method of diagnostics of induction-motor rotor eccentricity*, Russian Electrical Engineering, Volume 85, Issue 7, July 2014, pp. 457-459.

## 162 BIBLIOGRAFIE

---

- [A12] Ahmed S., Toliyat H.A., *A novel speed sensorless technique for obtaining the speed-torque characteristics of induction motors for commissioning*, Electric Machines and Drives Conference, IEMDC 2001, IEEE International, June 2001, pp. 905-910.
- [A13] M.R. Aghamohammadi, M. Pourgholi, *Experience with SSFR Test for Synchronous Generator Model Identification Using Hook-Jeeves Optimization Method*, International Journal Of Systems Applications, Engineering & Development, Volume 2, Issue 3, 2008, pp. 122-127.
- [B1] BP statistical Review of World Energy 2014, London UK.
- [B2] Jarry-Bolduc D., Cote E., *Hydro energy generation and instrumentation & measurement: hydropower plant efficiency testing*, Instrumentation & Measurement Magazine, IEEE, Volume 17, Issue 2, Aprilie 2014, pp. 10-14.
- [B3] Bojic S., Bozic D., Pavlica M., *Refurbishment of small hydro power plant*, Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), 2012 International Conference on, November 2012, pp. 1-5.
- [B4] Hossein Samadi-Boroujeni, *HYDROPOWER-PRACTICE AND APPLICATION*, InTech Publisher, Croatia, 2012.
- [B5] Buzzini D., Zago M., *Testing large ASDS*, Petroleum and Chemical Industry Technical Conference (PCIC), 2012 Record of Conference Papers Industry Applications Society 59th Annual IEEE, 24-26 September 2012, pp. 1-9.
- [B6] Bertalanic Z., Pavlica M., Maljkovic Z., *Analysis of hydro-generator's losses determined by calorimetric method*, Electrical Machines (ICEM), 2010 XIX International Conference on, 6-8 September 2010, pp. 1-6.
- [B7] Edson da Costa Bortoni, Siniscalchi R.T., Jardini J.A., *Determination of Hydro Generator Efficiency Using Infrared Thermal Imaging Techniques*, Energy Conversion, IEEE Transactions on, Volume 26, Issue 4, 29 September 2011, pp. 1134-1139.
- [B8] Rick Bitter, Taqi Mohiuddin, Matt Nawrocki, *LabVIEW Advanced Programming Techniques Second Edition*, CRC Press Taylor & Francis Group, New York, 2007.
- [B9] Bortoni Ed.C., Jardini, J.A., *A standstill frequency response method for large salient pole synchronous machines*, Energy Conversion, IEEE Transactions on, Volume 19, Issue 4, November 2004, pp. 687-691.
- [B10] Blanco J.R., Ferrero F.J., Valledor M., Campo J.C., *A low-cost open-source data acquisition system*, Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD), 2014 11th International, 11-14 February 2014, pp. 1-6.

- [B11] M. Biriescu, V.Groza, V.Crețu, O.Proștean, Gh.Madescu, Moș Marțian, *Computer Aided Testing of Electrical Machines*, The International Conference on „Computer as a Tool”, IEEE Region 8, Warsaw, EUROCON 2007 September 9-12, pp. 1910-1915.
- [B12] M. Biriescu, V. Crețu, G.Liuba, Moș Marțian, G.Madescu, V. Groza, *Testing of electrical machines with a dedicated system for data acquisition and processing*, International Conference on Electrical Machines- ICEM 2006, Chania, Crete Island, Greece, (Proceedings on CD), 2006.
- [B13] M. Biriescu, *Transformatoare și mașini electrice*, Editura “Orizonturi Universitare” Timișoara 2009.
- [B14] Peter A. Blume, *The LabVIEW Style Book*, Pearson Education, US, 2007.
- [B15] Thomas J. Bress., *Effective LabVIEW Programming*, NTS Press 2013.
- [B16] B. A. T. Iamamura, Y. Le Menach, A. Tounzi, N. Sadowski, E. Guillot, *Study of Static and Dynamic Eccentricities of a Synchronous Generator Using 3-D FEM*, Magnetics, IEEE Transactions on, Vol. 46, Issue 8, July 2010, pp. 3516-3519.
- [B17] R. Belmans, A. Vandenput, W. Geysen, *Calculation of the flux density and the unbalanced pull in two pole induction machines*, Elektrotechnik, Vol. 70, Issue 3, pp. 151-161, 1987.
- [B18] R. Belmans, W. Geysen, H. Jordan, A. Vandenput, *Unbalanced magnetic pull and homopolar flux in three phase induction motors with eccentric rotors. Proceedings*, International Conference on Electrical Machines- Design and Application, Budapest, 916-921, 1982.
- [B19] Alena Bilošová, Jan Biloš, *Vibration Diagnostics*, Investments in Education Development, Technical University of Ostrava, 2012.
- [B20] Ebrahimi B.M, Faiz J. *Magnetic field and vibration monitoring in permanent magnet synchronous motors under eccentricity fault*, Electric Power Applications IET, Volume 6, Issue 1, January 2012, pp. 35-45.
- [B21] Bill Pryor, *Machinery diagnostics using shaft centerline position measurements*, GE'S Orbit Magazine December 1984.
- [B22] Bill Pryor, *Determining shaft centerline position in four easy steps*, GE'S Orbit Magazine December 1984.
- [B23] Mark A. Jordan, *Shaft Centerline Position*, GE'S Orbit Magazine December 2003.
- [B24] Baghli L., Pautex J.F., Mezani S., *Wireless instantaneous torque measurement, application to induction motors*, Electrical Machines (ICEM), 2010 XIX International Conference on, 6-8 September 2010, pp. 1-6.

## 164 BIBLIOGRAFIE

---

- [B25] Biriescu Marius, Groza Viorel, Crețu Vladimir, Liuba Gheorghe, Toader Dumitru, Moț Marțian, Madescu Gheorghe, Mușuroi Sorin, Șorândaru Ciprian, *Some Aspects Concerning Testing of Electrical Machines in Power Engineering*, WEC Regional Energy Forum FOREN 2006, 11-15 June, pp. 1-6.
- [B26] M. Biriescu, G. Liuba, C. Sorandaru, M. Mot, G. Madescu, *Determination of the Asynchronous Torque-Speed Characteristic of a Synchronous Reversible Generator*, Energy Conversion, International Conference on Electrical Machines ICEM 2004, Cracow Poland 2004, pp. 301-4.
- [B27] Buinac R., Tomljenovic V., *Determination of the torque-speed characteristic of induction motor in electric machinery education*, Information & Communication Technology Electronics & Microelectronics (MIPRO), 2013 36th International Convention on, 20-24 May 2013, pp. 765-769.
- [B28] Iob Boldea, *Synchronous Generators*, CRC Taylor & Francis, Florida 2006.
- [B29] Bladh J., Wallin M., Saarinen L., Lundin U., *Standstill Frequency Response Test on a Synchronous Machine Extended With Damper Bar Measurements*, Energy Conversion, IEEE Transactions on, Volume:PP, Issue 99, 14 September 2015, pp. 1-11.
- [C1] D. Comănescu, G Crihan, D. Zlatanovici, *Relevanța măsurătorilor pentru determinarea duratei de viață rămasă a hidrogeneratorului*, REVISTA TEHNOLOGIILE ENERGIEI producerea, transportul și distribuția energiei electrice și termice, Editura ICEMENERG, 2014.
- [C2] Jon Conway, Steve Watts, *A software engineering approach to LabVIEW*, Prentice Hall Professional Technical Reference, 2003.
- [C3] Qiu Chengqun, *Design of Virtual Instrument Based on MATLAB and LabVIEW*, Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA), 2013 Fifth International Conference on, 16-17 January 2013, pp. 466-469.
- [C4] Chambers C., Scaffidi C., *Smell-driven performance analysis for end-user programmers*, Visual Languages and Human-Centric Computing (VL/HCC), 2013 IEEE Symposium on, 15-19 September 2013, pp. 159-166.
- [C5] Cory L. Clark, *LabVIEW Digital Signal Processing*, The McGraw-Hill Companies, Inc., 2005.
- [C6] Colak I., Garip I., Sagioglu S, Bayhan S., *Remote monitoring of the load characteristics of synchronous generators*, Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG), 2011 International Conference on, 11-13 May 2011, pp. 1-4.

- [C7] Hakan Calis, Eyup Caki, *LabVIEW Based Laboratory Typed Test Setup for the Determination of Induction Motor Performance Characteristics*, Journal Electr. Eng. Technol, Volume. 9, No. 6, 2014, pp. 1928-1934.
- [C8] Yeong-Chin Chen, Jian-kai Lan, *Implementation of Power Measurement System with Fourier Series and Zero-Crossing Algorithm*, Measuring Computer, Consumer and Control (IS3C), 2014 International Symposium on, 10-12 June 2014, pp. 601-604.
- [C9] Claudio Bruzzese, *Diagnosis of Eccentric Rotor in Synchronous Machines by Analysis of Split-Phase Currents-Part II: Experimental Analysis*, Industrial Electronics, IEEE Transactions on, Vol. 61, Issue 8, October 2013, pp. 4206-4216.
- [C10] Claudio Bruzzese, *Diagnosis of Eccentric Rotor in Synchronous Machines by Analysis of Split-Phase Currents- Part I: Theoretical Analysis*, Industrial Electronics, IEEE Transactions on, Vol. 61, Issue 8, October 2013, pp. 4193-4205.
- [C11] David K. Cheng, *Fundamentals of Engineering Electromagnetics*, Addison-Wesley Series in Electrical Engineering, US 1993.
- [C12] Concordia Ch., *Synchronous machines. Theory and performance*, New York, John Willey and sons, 1951.
- [D1] Drubel O., *Challenges in calculation and design of large synchronous generators*, Electrical Machines Design Control and Diagnosis (WEMDCD), 2013 IEEE Workshop on, 11-12 March 2013, pp. 18-23.
- [D2] Calinoiu D., Ionel R., Lascu M., Cioabla A., *Arduino and LabVIEW in educational remote monitoring applications*, Frontiers in Education Conference (FIE), 2014 IEEE, 22-25 October 2014, pp.1-5.
- [D3] D. Guo, F. Chu, D. Chen, *The unbalanced magnetic pull and its effects on vibration in a three-phase generator with eccentric rotor*, Journal of Sound and Vibration, Vol. 254, Issue2, 4 July 2002, pp. 297-312.
- [D4] Kuemmler H., Gross T., Kolerus J., *Machine vibrations and diagnostics the world of ISO*, Petroleum and Chemical Industry Technical Conference (PCIC), 2013 Record of Conference Papers Industry Applications Society 60th Annual IEEE, 23-25 September 2013, pp. 1-13.
- [D5] David G. Dorrell, Shek J.K.H., Hsieh Min-Fu., *The Development of an Indexing Method for the Comparison of Unbalanced Magnetic Pull in Electrical Machines*, Industry Applications, IEEE Transactions on, Volume:PP, Issue 99, 11 August 2015, pp. 1-8.
- [D6] Damir Zarko, Drago Ban, Ivan Vazdar, Vladimir Jari, *Calculation of Unbalanced Magnetic Pull in a Salient-Pole Synchronous Generator*, Power

- Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC), 2010 14th International, 6-8 Sept. 2010, pp 2536-2549.
- [D7] Damir Zarko, Drago Ban, Ivan Vazdar, Vladimir Jaric, *Calculation of Unbalanced Magnetic Pull in a Salient-Pole Synchronous Generator Using Finite-Element method and Measured Shaft Orbit*, Industrial Electronics, IEEE Transactions on, Vol. 59, Issue 6, June 2012, pp. 2536-2549..
- [D8] Dorrell D.G., Salah A., *Detection of rotor eccentricity in wound rotor induction machines using pole-specific search coils*, Power Apparatus and Systems, Magnetics Conference (INTERMAG), 2015 IEEE, 11-15 May 2015, pp. 1.
- [D9] Toma Dordea, Marius Biriescu, Ghoerghe Liuba, Gheorghe Madescu, Marțian Moț, *Mașini Electrice Parte Complementară*, Editura Orizonturi Universitare, Timișoara, 2002.
- [D10] Dymond J.H., Mistry B., Ong R., *Acceleration tests to determine salient pole synchronous motor inrush currents and torques*, Industry Applications Magazine IEEE, Volume 8, Issue 4, August 2002, pp. 44-50.
- [D11] Dymond J.H., Ong R., McKenna P.G., *Locked-rotor and acceleration testing of large induction machines-methods, problems, and interpretation of the results*, Industry Applications, IEEE Transactions on, Volume 36, Issue 4, August 2000, pp. 958-964.
- [D12] Toma Dordea, *Mașini electrice\*Teorie*, Editura ASAB, București 2002.
- [D13] Drăgănescu O., *Încercările mașinilor electrice rotative*, Editura Tehnică București, 1987.
- [D14] P.L. Dandeno, H.C. Karmaker, *Experience with standstill frequency response (SSFR) testing and analysis of salient pole synchronous machines*, Energy Conversion, IEEE Transactions, Volume 14, Issue 4, December 1999, pp. 1209-1217.
- [D15] P.L. Dandeno, *Supplementary Definitions & Associated Test Methods for Obtaining Parameters for Synchronous Machine Stability Study Simulations*, Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on, Volume: PAS-99, Issue 4, July 1980, pp. 1625-1633.
- [D16] Danilevici B., Dombrovski V.V., Ia.Kazovski E., *Parametrii mașinilor electrice de current alternativ*, Editura Tehnică București, 1968.
- [E1] A. Elez, J. Študir, J. Polak, *Cutia neagră pentru mașinile electrice*, REVISTA TEHNOLOGIILE ENERGIEI producerea, transportul și distribuția energiei electrice și termice, Editura ICEMENERG, 2013.
- [E2] Nesimi Ertugrul, *LabVIEW for Electric Circuits, Machines, Drives, and Laboratories*, Prentice Hall Professional, 2002.

- [E3] Maurizio Di Paolo Emilio, *Embedded Systems Design for High-Speed Data Acquisition and Control*, Springer International Publishing, Switzerland 2015.
- [E4] Maurizio Di Paolo Emilio, *Data Acquisition Systems From Fundamentals to Applied Design*, Springer Science+Business Media, New York 2013.
- [E5] A. Elez, J. Študir, J. Polak, *Sistem de detectare a spirelor scurtcircuitate ale înfășurării de excitație de la hidrogenatoare*, REVISTA TEHNOLOGIILE ENERGIEI producerea, transportul și distribuția energiei electrice și termice, Editura ICEMENERG, 2014.
- [F1] Silviu Folea, *Practical Applications and Solutions Using LabVIEW Software*, Intech Publisher, Croatia, 2011.
- [F2] Baruch Zoltan Francisc, *ARHITECTURA CALCULATOARELOR*, Editura TODESCO, Cluj-Napoca 2002.
- [G1] Mohammed Taih Gatte, Rasim Azeez Kadhim, *Energy Conservation-Chapter 4 Hydro Power*, Intech Publisher, 2012.
- [G2] F. Garnacho, M.A. Sánchez-Urán, J. Ortego, F. Álvarez, M.A. Jiménez, *Sistem de monitorizare online a descărcărilor parțiale cu localizare și generare automată a alarme*, REVISTA TEHNOLOGIILE ENERGIEI producerea, transportul și distribuția energiei electrice și termice, Editura ICEMENERG, 2014.
- [H1] T. J. Hammons, *Electricity Infrastructures in the Global Marketplace-Chapter 2 Harnessing Untapped Hydropower*, Intech Publisher, 2011.
- [H2] HYDRO-ENGINEERING, *Interfețe*, Conferința THINK-HYDRO.com, 2-4 Noiembrie 2011.
- [H3] Zlatko Hanić, Mario Vražić, Mario Vražić, Stjepan Stipetic, Stjepan Stipetic, *Problems Related to Excitation Winding Surface Temperature Measurement of a Salient Pole Synchronous Generator in Rotation*, Journal of Energy and Power Engineering, Volume 6, Issue 5, August 2012, pp. 826-832.
- [H4] Hudon C., Levesque M., Torriano F., Gingras S., Picard J., Petit A., *On-line rotor temperature measurements*, Electrical Insulation Conference (EIC), 8-11 June 2014, pp. 373-377.
- [H5] H. Hegeduš, P. Mostarac, R. Malarić, *Comparison of RMS Value Measurement Algorithms of Non-coherent Sampled Signals*, MEASUREMENT SCIENCE REVIEW, Volume 11, No. 3, 2011, pp. 79-84.
- [H6] Zhang Hongxin, Zhou Hao, Guo Xinping, Yan Yu, *Study on Shaft Orbits Measurement and Identification Based on LabVIEW*, Measuring Technology

- and Mechatronics Automation (ICMTMA), 2013 Fifth International Conference on, 16-17 Jan. 2013, Hong Kong, pp. 1087-1090.
- [H7] Zhang Hongxin, Zhou Hao, Guo Xinpeng, Yan Yu, *Rotor Fault Diagnosis and Simulation based on LabVIEW*, Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology 6(19), Maxwell Scientific Organization, pp 1087-1090, January 2013.
- [H8] Ciprian HARLIȘCA, Mircea ARION, Loránd SZABÓ, Ernő KOVÁCS, *ADVANCED DIAGNOSIS METHODS USED IN ELECTRICAL MACHINE'S MONITORING – A LITERATURE SURVEY –*, Proceedings of the International Scientific Conference MicroCAD '2011, Miskolc (Hungary), Section I (Electrical Engineering), 2011, pp. 23-28.
- [H9] Jongman Hong, Doosoo Hyun, Sang Bin Lee, Kral, C., *Offline Monitoring of Airgap Eccentricity for Inverter-Fed Induction Motors Based on the Differential Inductance*, Industry Applications, IEEE Transactions on Volume 49 , Issue 6, 23 May, pp. 2533-2542.
- [I1] D. A. IstseleMOV, E. V. Lyubimov, N. A. Belyaev, *A virtual instrument for determining basic parameters of sinusoidal signals in stationary modes*, Russian Electrical Engineering, Volume 84, Issue 11, November 2013, pp. 626-629.
- [J1] Shujiao Ji, Yanmin Lei, Wanli Zhang, *The design of data acquisition system based on virtual instrument*, Computer Science and Network Technology (ICCSNT), 2012 2nd International Conference on, 29-31 December 2012, pp. 594-597.
- [J2] R. Allen Joseph, T. Narasimmalou, K. Baskaran, Anuj Abraham, *Automated efficiency measurement of three phase induction motor using LabVIEW*, Computer Communication and Informatics (ICCCI), 2013 International Conference on, 4-6 January 2013, pp. 1-5.
- [J3] Jovitha Jerome, *Virtual Instrumentation using LabVIEW*, PHI Learning Private Limited, New Delhi 2010.
- [J4] Jordan M. A, *What are orbits plots, anyway*, GE'S Orbit Magazine December 2000.
- [J5] Jordan M. A, *What are shaft orbits anyway*, 17th Annual Meeting – Vibration Institute Illinois Seminar, 2003, pp. 83-96.
- [J6] Marcel Romulus Jurcu, Ioan Padureanu, **Laurențiu Pădeanu**, Ladislau Augustinov, Cornel Hatiegan, *Tests Regarding the Transitory Regimes of Putting off Load of the Hydroagregate*, Multi-Conference on System & Structures - SysStruc '15, 24 Septembrie 2015, Analele Universității "Eftimie Murgu" Reșița-Fascicula de Inginerie ANUL XXII, Nr.2, 2015, pp. 185-195.



- [K1] Kastern D.G., *Integrating computerized data acquisition and analysis into an undergraduate electric machines laboratory*, Frontiers in Education Conference, FIE 2000, 30th Annual, Volume 1, pp. T1D/13-T1D/18.
- [K2] Nasser Kehtarnavaz, *Digital Signal Processing System Design: LabVIEW-Based Hybrid Programming*, Elsevier Inc, 2008.
- [K3] Kerry E., Snyder D., *Comparing LabVIEW graphical code to text-based alternatives for use in test applications*, AUTOTESTCON, 2010 IEEE, 13-16 September 2010, pp. 1-2.
- [K4] Kaur P., Sharma R.K., *LabVIEW based design of heart disease detection system*, Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE), 2014, 9-11 May 2014, pp. 1-5.
- [K5] R. A. JABBAR KHAN, A. MOHAMMED, M. JUNAID, M. A. MASOOD, A. IFTKHAR, *LabVIEW based Electrical Machines Laboratory for Engineering Education*, WSEAS TRANSACTIONS on ADVANCES in ENGINEERING EDUCATION, Volume 7, Issue 5, May 2010, pp. 161-171.
- [K6] Zdravko Karakehayov, *Data acquisition Applications*, Intech Publisher, 2012.
- [K7] Oleg Kachin, Sergey Kachin, *Diagnostic of Moving Machine Parts*, Strategic Technology (IFOST), 2012 7th International Forum on, Tomsk, 18-21 Sept. 2012, pp. 1-4.
- [K8] Ray. D. Kelm, Dustin Pavelek, *Orbit analysis*, Vibration Institute Annual Training Seminar, June 21, 2012.
- [K9] Kovacs K. Pal, *Analiza regimurilor tranzitorii ale mașinilor electrice*, Editura Tehnică București, 1980.
- [K10] Krause P.C., Wasznczus O., Sudhoff S.D., *Analysis of electric machinery*, IEEE Press, 1994.
- [L1] Ronald W. Larsen, *LabVIEW for Engineers*, Prentice Hall, New jersey, 2011.
- [L2] Lundstrom L., Gustavsson R., Aidanpaa J.O., Dahlback N., *Influence on the stability of generator rotors due to radial and tangential magnetic pull force*, Electric Power Applications, IET, Volume 1, Issue 1, January 2007, pp. 1-8.
- [L3] Lita I., Visan D.A., Cioc I.B., Teodorescu R.M., Ionescu V.M., *Data acquisition system for collision tests in automotive industry*, Electronics Technology (ISSE), 2013 36th International Spring Seminar on, 8-12 May 2013, pp. 393-396.
- [L4] B.P.Lathi, Roger A. Green, *Essentials of Digital Signal Processing*, Cambridge University Press, US, 2014.

## 170 BIBLIOGRAFIE

---

- [L5] Gheorghe Liuba, *Introducere în teoria mașinilor și acționărilor electrice*, Editura Politehnica, Timișoara, 2006.
- [L6] Lin Wang, Cheung R.W., Zhiyun Ma, Jiangjun Ruan, *Finite-Element Analysis of Unbalanced Magnetic Pull in a Large Hydro-Generator Under Practical Operations*, Magnetics, IEEE Transactions on, Volume 44, Issue 6, June 2008, pp. 1558-1561.
- [L7] Laible Theodor, *Die Theorie der Synchronmaschine im nichtstationären Betrieb*, Springer Berlin Heidelberg, 1952.
- [M1] Milic S.D., Zigic A.D., Ponjavic M.M., *Online Temperature Monitoring, Fault Detection, and a Novel Heat Run Test of a Water-Cooled Rotor of a Hydrogenerator*, Energy Conversion, IEEE Transactions on, Volume 28, Issue 3, 20 June 2013, pp. 698-706.
- [M2] S. A. Mortazavizadeh, S. M. G. Mousavi, *A Review on Condition Monitoring and Diagnostic Techniques of Rotating Electrical Machines*, Physical Science International Journal, Volume 4, May 2013, pp. 310-338.
- [M3] Thorsten Mayer, Alessandro Masi, Roberto Losito, *Controlerele programabile pentru automatizare (PAC – Programmable Automation Controllers) de la National Instruments controlează cel mai mare sistem tehnologic din lume*, National Instruments, 2009.
- [M4] Claudia S. Martiș, Horia C. Hedeșiu, Loránd Szabó, Bogdan Tătăranu, Florin Jurcă, Claudiu Oprea, *Electrical Machines Virtual Laboratory: Grid Connection of a Synchronous Generator*, Power Electronics and Motion Control Conference, 2006. EPE-PEMC 2006. 12th International, 30 August 2006, pp. 1709 - 1714.
- [M5] Martinez-Roman J., Perez-Cruz J., Pineda-Sanchez M., Puche-Panadero R., Roger-Folch J., Riera-Guasp M., Sapena-Bano A., *Electrical Machines Laminations Magnetic Properties: A Virtual Instrument Laboratory*, Education, IEEE Transactions on, Volume 58, Issue 3, August 2015, pp. 159-166.
- [M6] Momoh O.D., Loeffler S.J., Dykhuizen N.J., Hack I., Steffen G.D., *LabVIEW based automatic paralleling of synchronous generator system*, System Theory (SSST), 2012 44th Southeastern Symposium on, 11-13 March 2012, pp. 204-208.
- [M7] Mattias Nasselqvist, Rolf Gustavsson, Jan-Olov Aidanpaa, *A methodology for protective vibration monitoring of hydropower units based on the mechanical properties*, Journal of Dynamics, Measurement and Control, Vol. 135 (4), July 2013, pp. 410071-410078.
- [M8] Mattias Nässelqvist, R. Gustavsson, Jan-Olov Aidanpää, *Bearing load measurement in a hydropower unit using strain gauges installed inside pivot pin*, Experimental Mechanics, Vol. 52, Issue 4, pp 361-369, 2012.

- [M9] Marina Griščenko, Elmanis-Helmanis, R., Skopans, U., *Power Generator Mechanical Faults Effects On Electric Power Quality*, Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ), 11-13 June 2014, Rakvere, pp. 143-146.
- [M10] Mattias Wallin, Martin Ranlof, Urban Lundin, *Reduction of Unbalanced Magnetic Pull in Synchronous Machines due to Parallel Circuits*, Magnetics, IEEE Transaction on, Vol. 47, Issue 12, , June 2011, pp. 4827-4833.
- [M11] Mattias Wallin, Johan Bladh, Urban Lundin, *Damper Winding Influence on Unbalanced Magnetic Pull in Salient Pole Generators with Rotor Eccentricity*, Magnetics, IEEE Transactions on, Vol. 49, Issue 9, 23 April 2013, pp. 5158-5165.
- [M12] Mattias Nässelqvist, Rolf Gustavsson and Jan-Olov Aidanpää, *Experimental and Numerical Simulation of Unbalance Response in Vertical Test Rig with Tilting-Pad Bearings*, International Journal of Rotating Machinery, Volume 2014, 6 January 2014.
- [M13] Michon M, Holehouse R.C., Atallah K., Johnstone G., *Effect of Rotor Eccentricity in Large Synchronous Machines*, Magnetics, IEEE Transactions on, Volume:50, Issue 11, 2 December 2014.
- [M14] Monjo L., Kojooyan-Jafari H., Corcoles F., Pedra, J., *Squirrel-Cage Induction Motor Parameter Estimation Using a Variable Frequency Test*, Energy Conversion, IEEE Transactions on, Volume PP, Issue 99, November 2014, pp. 1-8.
- [N1] Bua Nunez, I., Roman J.E.P., Rubio Serrano J., Garcia-Souto J.A., *Multichannel acquisition system and denoising for the detection and location of partial discharges using acoustic emissions*, Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2013 IEEE International, 6-9 May 2013, pp. 1135-1140.
- [N2] Niklas Lundström, Jan-Olov Aidanpää, Anton Grafström, *Small shape deviations causes complex dynamics in large electric generators*, European Physical Journal - Applied Physics, Volume 66, Issue 2, 2014.
- [N3] Niklas Lundström, Jan-Olov Aidanpää, *Dynamic consequences of electromagnetic pull due to deviations in generator shape*, Journal of Sound and Vibration Volume 301, Issues 1-2, 20 March 2007, pp. 207-225.
- [N4] Niklas L. P. Lundström, Jan-Olov Aidanpää, *Dynamics in large generators due to oval rotor and triangular stator shape*, Acta Mechanica Sinica, Volume 27, Issue 1, 15 March 2011, pp. 18-27.
- [N5] Niskanen V., Ahola J., *Implementing clamp on wireless torque measurement system for rotating shaft applications (UI)*, Power Electronics

## 172 BIBLIOGRAFIE

---

- and Applications (EPE 2011), Proceedings of the 2011-14th European Conference on, September 2011, pp. 1-10.
- [O1] P. Otomanski, Z. Krawiecki, A. Odon , *The application of the LabVIEW environment to evaluate the accuracy of alternating voltage measurements*, 13th IMEKO TC1-TC7 Joint Symposium, 1-3 September 2010 London UK.
- [O2] O.W. Andersen, *Compensation of Unbalanced Magnetic Forces by Distributed Parallel Circuits*, International Conference on Electrical Machines ICEM 2004, Cracow Poland 2004, pp. 88-100.
- [O3] Ojo J.O., Ostovic V., Lipo T.A., White J.C., *Measurement and computation of starting torque pulsations of salient pole synchronous motors*, Energy Conversion, IEEE Transactions on, Volume 5, Issue 1, March 1990, pp. 176-182.
- [P1] Stanislav Pejovic, Aleksandar Gajic, Bryan, Anton Bergant, *Pumped and Hydro Storage Reduce Electricity Costs, Clean Environment and Keep Wind and Solar Unpolluted*, 2nd THINK-HYDRO.com International Conference, 13-15 November, Reșița 2013.
- [P2] Ioan Pădureanu, Marcel Romulus Jurcu, Cornel Hațiegan, **Laurențiu Pădeanu**, Eugen Răduca, Flaviu Dilertea, Cristinel Popescu, *The determining of the hydro-generator efficiency through the calorimetric method*, CEEC-TAC3 3rd Central and Eastern European Conference on Thermal Analysis and Calorimetry 25-28 August 2015, Ljubjana Sloveni.
- [P3] Pradhan D., Lakshminarayanan L., Patil V., *A LabVIEW based power analyzer*, Advances in Energy Conversion Technologies (ICAECT), 2014 International Conference on, 23-25 January 2014, pp. 67-71.
- [P4] **Laurențiu Pădeanu**, Doru Vătău, Flaviu Mihai Frigură, Martian Moț, *Virtual Instrumentation System for Training in Field of the Influence of Power Equipment on Telecommunication Lines*, 14th International Conference on Information Technology Based Higher Education and Training (ITHET 2015), Lisabon, 11-13 June 2015, pp. 1-4.
- [P5] **Laurențiu Pădeanu**, Marcus Svoboda, Flaviu Frigură-Iliasa, Petru Andea, *Human Machine Interface for a SCADA System applied on a District Heating Power Plant*, Proceedings of The International Conference on Information and Digital Technologies 2015, 7-9 July 2015, Zilina-Slovakia, pp. 261-266.
- [P6] **L. Pădeanu**, M Moț, *Sistem de achizitie si prelucrare a datelor pentru testarea generatoarelor sincrone*, Proceedings of Zilele Academice Timisene Editia 13, 23-24 mai 2013 Editura "Politehnica" Timisoara.
- [P7] John Park, *Practical Data Acquisition for Instrumentation and Control Systems*, Elsevier IDC Technologies, 2003.

- [P8] Liu Ping, Wu Chengming, Xiao Jianxiu *A Novel Testing System Based on Virtual Instrument for Synchronous Generators*, Electrical and Control Engineering (ICECE), 2010 International Conference on, 25-27 June 2000, pp. 213-216.
- [P9] **L. Pădeanu**, G. Liuba, M. Biriescu, V. Nedelea, M. Mot, M.Svoboda, *CENTRING IN MAGNETIC FIELD OF THE HYDROGENERATOR ROTORS USING ORBIT DIAGRAM*, 6th International Workshop of Soft Computing Applications (SOFA) Vol. 357 of the series Springer Advances in Intelligent Systems and Computing, pp. 1185-1197, 24-26 July Timisoara 2014, Romania.
- [P10] Cristian Petrica, Gheorghe Liuba, **L. Pădeanu**, V. Nedelea, *Air Gap Influence On The Functional And Constructive Performance Of The Hydrogenerator*, 2nd THINK-HYDRO.com International Conference, 13-15 November, Reșița 2013.
- [P11] Pedro Vicente Jover Rodríguez, Anouar Belahcen, Antero Arkkio, Antti Laiho, José A. Antonino-Daviu, *Air-gap force distribution and vibration pattern of Induction motors under dynamic eccentricity*, Electrical Engineering, Volume 90, Issue 3, May 2008, pp. 209-218.
- [P12] Perers R., Lundin U., Leijon M., *Saturation Effects on Unbalanced Magnetic Pull in a Hydroelectric Generator With an Eccentric Rotor*, Magnetics, IEEE Transactions on, Volume 43, Issue 10, Oct. 2007, pp. 3884-3890.
- [P13] Pollock G.B., Lyles J.F., *Vertical hydraulic generators experience with dynamic air gap monitoring*, Energy Conversion, IEEE Transactions on Volume 7, Issue 4, December 2012, pp. 660-668.
- [P14] Petreu D., Farca C., Dobra P., Moga D., *Torque measurement system design*, Automation, Quality and Testing, Robotics, 2008. AQTR 2008. IEEE International Conference on, Volume 1, May 2008, pp. 174-177.
- [P15] Ioan Pădureanu, Marcel Jurcu, Ladislau Augustinov, Cornel Hațiegan, Eugen Răduca, **Laurențiu Pădeanu**, *Optimisation of the Start-up and Operation Regimes of Cooling Water Pumps of a High-Power Hydro Generator*, Analele Universității "Eftimie Murgu" Reșița-Fascicula de Inginerie ANUL XXII, Nr.1, 2015, pp. 345-358.
- [P16] Park R.H., Robertson B.L., *The Reactances of Synchronous Machines*, American Institute of Electrical Engineers, Transactions of the Volume 47, Issue 2, Aprilie 1928, pp. 514-535.
- [Q1] Quraishi M.H., Hoque M.A., Begum A., Alam, M.J. *Computer based radioactivity measurement with acquisition and monitoring radiation data using LabVIEW*, Informatics, Electronics & Vision (ICIEV), 2014 International Conference on, 23-24 May 2014, pp. 1-4.

## 174 BIBLIOGRAFIE

---

- [R1] Raport National 2013, Autoritatea Națională de Reglementare în domeniul Energiei, iulie 2014.
- [R2] Raport National 2012, Autoritatea Națională de Reglementare în domeniul Energiei, aprilie 2013.
- [R3] R. Răduleț, M. Opaschi, *Proiectarea hidrogenatoarelor și a motoarelor sincrone*, Editura tehnică, București, 1980.
- [R4] J. J. Rocha E., F. Czerwinski, A. Koepfler, M. Uemori, *Sisteme de mentenanță predictivă – o aplicație pentru diagnosticarea sistemelor de izolație a generatoarelor sincrone*, REVISTA TEHNOLOGIILE ENERGIEI producerea, transportul și distribuția energiei electrice și termice, Editura ICEMENERG, 2014.
- [R5] Deon Reynders, Steve Mackay, Edwin Wright, *Practical Industrial Data Communications Best Practice Techniques*, Elsevier IDC Technologies 2005.
- [R6] Wang Rui, Xu Rui, Li Hui, *Design and application of LabVIEW courseware in the signal processing teaching*, Computer Science & Education (ICCSE), 2012 7th International Conference on, 14-17 July 2012, pp. 1365-1368.
- [R7] Mircea Radeș, *Dinamica Mașinilor I*, Editura Printech, București, 2007.
- [R8] Rolf K. Gustavsson, Jan-Olov Aidanpa "a", *The influence of magnetic pull on stability of generator rotors*, The 10th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery, 07-11 March 2004, Honolulu Hawaii, pp. 1-9.
- [R9] Rolf K. Gustavsson, Mattias L. Lundstro "m and Jan-Olov Aidanpa "a", *Determination of Journal Bearing Stiffness and Damping at Hydropower Generators Using Strain Gauges*, ASME 2005 Power Conference, 5-7 Aprilie 2005, pp. 933-940.
- [R10] Mircea Radeș, *Dinamica Mașinilor II*, Editura Printech, București, 2009.
- [R11] Rolf K. Gustavsson, Jan-Olov Aidanpa "a", *The influence of nonlinear magnetic pull on hydropower generator rotors*, Journal of Sound and Vibration Volume 297, Issues 3-5, 6 November 2006, pp. 551-562.
- [R12] Mircea Radeș, *Dinamica Mașinilor III*, Editura Printech, București, 2008.
- [R13] Riera-Guasp M., Antonino-Daviu J.A., Capolino G.-A., *Advances in Electrical Machine, Power Electronic, and Drive Condition Monitoring and Fault Detection: State of the Art*, Industrial Electronics, IEEE Transactions on , Volume 62, Issue 3, March 2015, pp. 1746 - 1759.

- [S1] R. Raja Singha, Thanga Raj Chelliaha, Pramod Agarwalb, *Power electronics in hydro electric energy systems – A review*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 32, Aprilie 2014, pp. 944-959.
- [S2] Elisabeta SPUNEI, **Laurențiu PĂDEANU**, Florina PIROI, Ion Piroi, Gheorghe LIUBA, *Research on decreasing the cost price for the synchronous hydrogenerator*, Buletinul Agir 10/2013, Nr. 4, pp. 163-168.
- [S3] Elisabeta SPUNEI, **Laurențiu PĂDEANU**, Florina PIROI, Ion Piroi, Gheorghe LIUBA, *The Synchronous Generators Rated Speed's Influence on Electromagnetic Stresses and on Costs*, Analele Universității „Eftimie Murgu” Reșița, Anul XX, Nr. 2, pp. 267-274.
- [S4] G. C. Stone, J. Letal, B. A. Lloyd, *Progrese privind monitorizarea integrată a stării rotorului și statorului generatoarelor*, REVISTA TEHNOLOGIILE ENERGIEI producerea, transportul și distribuția energiei electrice și termice, Editura ICEMENERG, 2014.
- [S5] Jun Zhang, Shengjie Jiao, Min Ye, Xiaodong Zhang, Jiangcheng Chen, Bin Pang, JinPing Li, Xinxin Xu, *Multichannel subgrade temperature acquisition system based on LabVIEW and serial communication*, Automation Science and Engineering (CASE), 2013 IEEE International Conference on, 17-20 August 2013, pp. 558-563.
- [S6] S. Stipetić, Z. Hanić, M. Vražić, *Application of IR Thermography to Measurements on Synchronous Hydro-generator in Rotation*, Proceedings of the 10th edition of the Quantitive Infrared Thermography (QIRT 10), 27-30 June 2010.
- [S7] Saurabh Singh, Manish Vishwakarma, *A Review of Vibration Analysis Techniques for Rotating Machines*, International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), Volume 4, Issue 3, March 2015, pp.757-761.
- [S8] Shah H.S, Patel P.N., Shah S.P., Thakker M.T., *8 channel vibration monitoring and analyzing system using LabVIEW*, Engineering (NUICONE), 2013 Nirma University International Conference on, 28-30 November 2013, pp. 1-4.
- [S9] H. SAKO, Y. KANEDA S. TOMITA, K. MIO, K. SUZUK, *Sistem de monitorizare online a DP cu antena microstrip pentru masini rotative*, REVISTA TEHNOLOGIILE ENERGIEI producerea, transportul și distribuția energiei electrice și termice, Editura ICEMENERG, 2011.
- [S10] Jean-Jacques Simond, Mai Tu Xuan, Roland Wetter, *An innovative inductive air-gap monitoring system for large low speed hydro-generators*, 18th International conference on Electrical Machines (ICEM 2008), September 2008, pp. 1-5.

## 176 BIBLIOGRAFIE

---

- [S11] Mohamed Salah, Khmais Bacha, Abdelkader Chaari, Mohamed El Hachemi Benbouzid, *Brushless Three-Phase Synchronous Generator Under Rotating Diode Failure Conditions*, IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, Volume 29, No. 3, 09 Aprilie 2014, pp. 594-601.
- [S12] G. C. Stone, *O perspectivă asupra monitorizării on-line a descărcărilor parțiale pentru evaluarea stării izolației înfășurărilor statorice ale mașinilor electrice*, REVISTA TEHNOLOGIILE ENERGIEI producerea, transportul și distribuția energiei electrice și termice, Editura ICEMENERG, 2014.
- [S13] S. Sumathi, P. Surekha, *LabVIEW based Advanced Instrumentation Systems*, Springer Science+Business Media, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2007.
- [S14] Suganthi V.K., Madhuridevi L., Sindhuja K., *Development of software tool for classroom teaching of power quality using LabVIEW*, Advances in Electrical Engineering (ICAEE), 2014 International Conference on, 9-11 January, pp. 1-6.
- [S15] Namrata Singh, *LABVIEW Based Real Time Parameter Monitoring system for Single Phase Induction Motor*, International Journal of Emerging Technologies in Computational and Applied Sciences (IJETCAS) 2013, pp. 52-55.
- [S16] Gundeep Singh Saini, P. N. Hrisheekesha., *A Novel Virtual Instrumentation based method for Automation of Electrical Machines*, International Journal of Applied Information Systems, Volume 2, Nr. 4, 12-17 May 2012, pp. 12-17.
- [S17] Silwal B., Rasilo P., Perkkio L., Hannukainen A., Eirola, T., Arkkio A., *Numerical Analysis of the Power Balance of an Electrical Machine with Rotor Eccentricity*, Magnetics, IEEE Transactions on, Volume:PP, Issue 99, 10 September 2015, pp. 1-4.
- [S18] D.F. Shi, W.J. Wang, P.J. Unsworth, L.S. Qu, *Purification and feature extraction of shaft orbits for diagnosing large rotating machinery*, Journal of Sound and Vibration, Volume 279, Issues 3-5, 21 January 2005, pp. 581-600.
- [S19] Grec C. Stone, Mladen Sasic, Jan Stein, Chris Stinson, *Using magnetic flux monitoring to detect synchronous machine rotor winding shorts*, Pulp and Paper Industry Technical Conference (PPIC), Conference Record of 2012 Annual IEEE, June 2012, pp. 1-7.
- [S20] Silwal B., Rasilo P., Perkkio L., Hannukainen A., Eirola, T., Arkkio A., *Evaluation and Comparison of Different Numerical Computation Methods for the Electromagnetic Torque in Electrical Machines*, Education, Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2013 International Conference on, October 2013, pp. 837-842.



- [S21] Skalka M., Ondrusek C., Schreier L., Michailidis P., *Torque components identification of induction machine by FEM*, Electrical Machines and Power Electronics and 2011 Electromotion Joint Conference (ACEMP), 2011 International Aegean Conference on, 8-10 September 2011, pp. 185-189.
- [S22] Sellschopp F.S., Arjona L., Marco A., *An automated system for frequency response analysis with application to an undergraduate laboratory of electrical machines*, Education, IEEE Transactions on, Volume 47, Issue 1, February 2004, pp. 57-64.
- [S23] Socolov H. I., Kirkin B. I., *Oprederenie ciastotnîh haracteristik sinhronîh maşinî*, In Electricestvo, Nr.1, pp. 29-35, 1962.
- [S24] Sellschopp F.S., Arjona M.A., *A virtual instrument for frequency analysis of electrical machines*, Electric Machines and Drives Conference, IEMDC 2001, IEEE International, 17-20 June 2001, pp. 845-852.
- [ST1] IEEE Std. 1100-2005, *IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding Electronic Equipment*.
- [ST2] IEEE 754-1985, IEEE Standard for Floating-Point Arithmetic.
- [ST3] IEEE Std. 112-2004, *IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators*.
- [ST4] IEEE Std. 115-2009, *IEEE Guide for Test Procedures for Synchronous Machines Part I - Acceptance and Performance Testing Part II - Test Procedures and Parameter Determination for Dynamic Analysis*.
- [ST5] ISO 1940-1:2003, *Mechanical vibration - Balance quality requirements for rotors in a constant (rigid) state - Part 1: Specification and verification of balance tolerances*.
- [ST6] ISO 7919-5:2005, *Mechanical vibration - Evaluation of machine vibration by measurements on rotating shafts - Part 5: Machine sets in hydraulic power generating and pumping plants*.
- [ST7] ISO 10816-5:2000, *Mechanical vibration - Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts - Part 5: Machine sets in hydraulic power generating and pumping plants*.
- [ST8] ISO 13373-1:2002, *Condition monitoring and diagnostics of machines - Vibration condition monitoring - Part 1: General procedures*.
- [ST9] ISO 13373-2:2005, *Condition monitoring and diagnostics of machines - Vibration condition monitoring - Part 2: Processing, analysis and presentation of vibration data*.

## 178 BIBLIOGRAFIE

---

- [T1] Tagare D., *Electricity Power Generation: The Changing Dimensions*, Wiley-IEEE Press, 2011.
- [T2] Peter Tavner, Li Ran, Jim Penman, Howard Sedding, *Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines*, IET POWER AND ENERGY SERIES 56, The Institution of Engineering and Technology 2008.
- [T3] Gabriel TANASESCU, Bogdan GORGAN, Oana DRAGOMIR, Gabriel CONSTANTINESCU, *Online monitoring and diagnosis system for hydrogenerator condition assessment*, THE 8th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ADVANCED TOPICS IN ELECTRICAL ENGINEERING, 23-25 May 2013, pp. 1-4.
- [T4] Tavner P.J., *Review of condition monitoring of rotating electrical machines*, Electric Power Applications, IET, Volume 2, Issue 4, 27 June 2008, pp. 215-247.
- [T5] Jeffrey Travis, Jim Kring, *LabVIEW for Everyone: Graphical Programming Made Easy and Fun, Third Edition*, Prentice Hall, 2006.
- [T6] Bachorec T., Král P., *Simulation of Magnetodynamic Forces Acting on the Eccentric Rotor of the Generator*, Transaction on Electrical Engineering, Volume 3, No.1 2014, pp. 13-17.
- [T7] T. P. Holopainen, A. Tenhunen, E. Lantto, A. Arkkio, *Unbalanced magnetic pull induced by arbitrary eccentric motion of cage rotor in transient operation. Part 1: Analytical model*, Electrical Engineering, Volume 88, Issue 1, 19 April 205, pp. 13-24.
- [T8] T. P. Holopainen, A. Tenhunen, E. Lantto, A. Arkkio, *Unbalanced magnetic pull induced by arbitrary eccentric motion of cage rotor in transient operation. Part 2: Verification and numerical parameter estimation*, Electrical Engineering, Volume 88, Issue 1, 19 April 205, pp. 25-34.
- [T9] Tejas H. Patela, Ashish K. Darpeb, *Vibration response of misaligned rotors*, Journal of Sound and Vibration, Volume 325, Issue 3, 21 August 2009, pp. 609-628.
- [T10] P. Talas, P.O. Toom, D.E. Franklin, R.A. Palylyk, *Application of an On-Line Air Gap Monitor for Hydroelectric Generator Protection and Problem Diagnosis*, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. EC-2, No. 4, December 1987, pp. 526-533.
- [T11] Tetreault A., *Rotor shape vs. rotor field pole shorted turns: Impact on rotor induced vibrations on hydrogenerators*, Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), 2012 International Conference on, 23-27 Sept. 2012, Bali, pp. 133-136.
- [T12] Traore W.F., McCann R., *Torque measurements in synchronous generators using giant magnetoresistive sensor arrays via the Maxwell stress tensor*,

- 
- Power and Energy Society General Meeting (PES), 2013 IEEE, 21-25 July 2013, pp. 1-5.
- [T13] Takahashi A., Kikuchi S., Miyata K., Binder A., *Asynchronous Torque of Line-Starting Permanent-Magnet Synchronous Motors*, Energy Conversion, IEEE Transactions on, Volume PP, Issue 99, November 2014, pp. 1-9.
- [U1] Ugurlu Y., *Measuring the impact of virtual instrumentation for teaching and research*, Global Engineering Education Conference (EDUCON), 2011 IEEE, 4-6 Aprilie 2011, pp. 152-158.
- [V1] Vrazic M, Gasparac I., Pavlica M., *Some problems of synchronous hydro-generator temperature measurement*, Electrical Machines, 2008. ICEM 2008. 18th International Conference on, 6-9 September 2008, pp. 1-4.
- [V2] Mario Vrazic, Ivan Gasparac, Marinko Kovacic, *Measurement Systems for Electrical Machine Monitoring*, Applied Measurement Systems, InTech Publisher 2012.
- [V3] Vrazic M., Kovacic M., Hanic Z., *Design of the monitoring system for a synchronous generators in hydro power plant*, Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), 2012 International Conference on, 11-14 November 2012, pp. 1-5.
- [V4] Vatau D., Svoboda M., Frigura-Iliasa F.M., **Pădeanu L.**, Candea L., *Automatic system for high voltage substation electromagnetic field effects evaluation*, Digital Technologies (DT), 2014 10th International Conference on, 9-11 July 2014, Zilina, SLOVAKIA, pp. 350-355.
- [V5] Michele Vadursi, *Data acquisition*, Intech Publisher, 2010.
- [V6] Peter Vas, *Parameter Estimation, Condition Monitoring, and Diagnosis of Electrical Machines*, Clarendon Press, Oxford 1993.
- [W1] <http://www.visogram.com>
- [W2] <http://myopenlab.de>
- [W3] <http://www.yenka.com>
- [W4] Hong min Wang, Li D.D., Ping Xuem Jie Zhu, Hai-bo Li, *LabVIEW-based data acquisition system design*, Measurement, Information and Control (MIC), 2012 International Conference on, Volume 2, 18-20 May 2012, pp. 689-692.
- [W5] <http://romania.ni.com/solutii>, David McAndrew, *NASA Uses NI LabVIEW to Save Time, Reduce Costs in Automated Testing of Microshutters*.
- [W6] <http://www.masurari.ro>, Măsurări și Automatizări 2012, *Achiziția de date-Concepte fundamentale*.

## 180 BIBLIOGRAFIE

---

- [W7] <http://romania.ni.com/solutii>, Eliandro Félix, *Designing an Automatic Fault Monitoring and Diagnostic System for Large Hydro Generators*.
- [W8] <http://romania.ni.com/solutii>, Nemanja Miložčić, *Monitoring Synchronous Power Generators with LabVIEW and NI CompactDAQ*.
- [W9] <http://romania.ni.com/solutii>, A. Lugli, *Developing a Remote Diagnostic System for Large Electric Power Generators With NI LabVIEW and CompactRIO*.
- [W10] <http://www.mccdaq.com>, Measurement Computing, *Data Acquisition Handbook – A Reference for DAQ and Analog & Digital Signal Conditioning*, 2012.
- [W11] John G. Webster, Halit Eren, *Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook, Second Edition: Electromagnetic, Optical, Radiation, Chemical, and Biomedical Measurement*, CRC Press 2014.
- [W12] Wallin M., Ranlof M., Lundin U., *Design and construction of a synchronous generator test setup*, Electrical Machines (ICEM), 2010 XIX International Conference on, 6-8 September 2010, pp. 1-5.
- [W13] Wenxian Yang, P.J. Tavner, *Empirical mode decomposition, an adaptive approach for interpreting shaft vibratory signals of large rotating machinery*, Journal of Sound and Vibration 321(3-5), 2009, pp. 1144-1170.
- [W14] Willis J.R., Brock G.J., Edmonds, J.S., *Derivation of induced motor models from standstill frequency response tests*, Energy Conversion, IEEE Transactions on, Volume 4, Issue 4, December 1989, pp. 608-615.
- [Y1] Xian Yang, Zhaohui Li, Junting Hua, Yuechao Wu, *Automated Vibration Analysis in Loaded Condition of Hydro Turbine Generator Sets*, Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2012 Asia-Pacific, 27-29 March 2012, pp. 1-5.
- [Y2] Wan Yuan, Gong Chuangli, Wei Zhipeng, Deng Pengcheng, *Partial Discharge Online Monitoring for Hydro-generator*, Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring (CDCIEM), 2011 International Conference on, 19-20 February 2011, pp. 111-114.
- [Y3] Yong-Ming Yang, Xue-Jun Chen, *Partial Discharge Ultrasonic Analysis for Generator Stator Windings*, Journal Electr. Eng. Technol, Volume 9, No. 2, 2014, pp. 670-676.
- [Y4] Yik Yang, *LabVIEW Graphical Programming Cookbook*, Packt Publishing, UK, 2014.
- [Y5] Baosheng Yanga, Jianxin Lia, Qian Zhangb, *G Language Based Design of Virtual Experiment Platform for Communication with Measurement and*

- Control*, Procedia Engineering, Volume 29, 2012 International Workshop on Information and Electronics Engineering, pp. 1549-1553.
- [Y6] Calleecharan Y., Aidanpaa J.O., *On the dynamics of an hydropower generator subjected to unbalanced magnetic pull*, Computation in Electromagnetics (CEM 2011), IET 8th International Conference on, 11-14 Aprilie 2011, pp 1-2.
- [Z1] D. Zlatanovici, S. Dumitrescu, A. Bauer, Y. Telivets, *Determinarea randamentului cu metoda frânării la hidrogenatoarelor electrice*, REVISTA TEHNOLOGIILE ENERGIEI producerea, transportul și distribuția energiei electrice și termice, Editura ICEMENERG, 2012.
- [Z2] Zlatanovici D., Dumitrescu S., Bauer A., Telivets Y., *DETERMINATION OF HYDROELECTRIC GENERATOR EFFICIENCY BY MEANS OF THE RETARDATION METHOD*, Journal of Sustainable Energy, Volume 2, Issue 3, September 2011, pp. 60-66.
- [Z3] D. Zlatanovici, S. Dumitrescu, *Măsurarea periodică, on-line, a descărcărilor parțiale - o metodă eficientă pentru evaluarea stării izolației înfășurărilor statorice la hidrogenatoarele electrice*, REVISTA TEHNOLOGIILE ENERGIEI producerea, transportul și distribuția energiei electrice și termice, Editura ICEMENERG, 2013.
- [Z4] Wei Zhan, Porter J.R., Morgan J.A., *Experiential Learning of Digital Communication Using LabVIEW*, Education IEEE Transactions on, Volume 57, Issue 1, 30 February 2014, pp. 34-41.
- [Z5] Zia M.T., Curley A., Duran O., Razmkhah O. , *Application of LabView and cRIO for high precision positioning of mars rover using DC motors*, Space Technology (ICST), 2011 2nd International Conference on, 15-17 September 2011, pp. 1-4.
- [Z6] Luchian ZAHARIA, *Sisteme de măsurare computerizate pentru achiziția de date*, Universitatea Tehnică "Gheorghe Asachi" din Iași, 2005.
- [Z7] Zhimeng Luo, Jianzhong Zhou, Xiuqiao Xiang, Yaoyao He and Shan Peng, *A new method for automatically idenrifying the shaft orbit moving direction of hydroelectric generating set*, Sensor Review Volume 30, Number 3, 2010, pp. 197-203, Esmerald Group Publishing Limited.
- [Z8] Maljkovic Z., Sundrica, M., Tomicic B., *Asynchronous Starting Process of Hydro-generator*, Proceedings of the 2008 International Conference on Electrical Machines, 6-9 September 2008, pp. 1-6.
- [\*1] C.V. Câmpian, Gh. Liuba, D. Frunzăverde, D. Nedelcu, I. Pădureanu, C. Dumbravă, **L. Pădeanu**, *PROBE EFECTUATE PE HA1 DIN CHE RETEZAT PENTRU CREȘTEREA PUTERII DE FUNCȚIONARE*, CCHAPT comanda nr. 10120 din 02.12.2014 Sucursala Hațeg - SSH Hidroserv SA.

## 182 BIBLIOGRAFIE

---

- [\*2] Gh. Liuba, **L. Pădeanu**, L. Augustinov, I. Pădureanu, Jurcu Marcel Romulus, C. Pădeanu, *SERVICIUL DE DETERMINARE A PARAMETRIILOR DE FUNCȚIONARE LA TURBINA ȘI GENERATORUL SINCRON DIN CHRE REMEȚI*, CCHAPT comanda nr. 2427 din 24.09.2013 Sucursala Cluj - SSH Hidroserv SA.
- [\*3] C.V. Câmpian, Gh. Liuba, D. Frunzăverde, C. Dumbravă, A. Cuzmoș, **L. Pădeanu**, C. Pădeanu, *STUDIU PRIVIND RIDICAREA INDISPONIBILITĂȚII DE PUTERE LA HA1 ȘI HA2 DIN CHE RETEZAT SH HAȚEG FAZA II (HA NR. 2 DIN CHE RETEZAT) – LOTUL I*, CCHAPT contract nr. 87 din 19.07.2011 Sucursala Hidrocentrale Hațeg - Hidroelectrică.
- [\*4] C.V. Câmpian, Gh. Liuba, D. Frunzăverde, C. Dumbravă, A. Cuzmoș, **L. Pădeanu**, C. Pădeanu, *ANALIZA COMPORTĂRII HIDROAGREGATELOR DIN CHE RETEZAT – SH HAȚEG ÎN REGIMULUI TRANZITORII ȘI ÎNCĂRCĂRI PARȚIALE - FAZA II (HA NR. 2 DIN CHE RETEZAT) – LOTUL II*, CCHAPT contract nr. 87 din 19.07.2011 Sucursala Hidrocentrale Hațeg - Hidroelectrică.
- [\*5] Gh. Liuba, C.V. Câmpian, V.M. Nedelea, L. Augustinov, C. Copocean, **L. Pădeanu**, C. Pădeanu, *DETERMINAREA NIVELULUI DE DESCĂRCĂRI PARȚIALE LA HIDROAGREGATELE HA1, HA2 DIN CHE RETEZAT*, CCHAPT contract nr. 160 din 14.12.2011 Sucursala Hidrocentrale Hațeg - Hidroelectrică.
- [\*6] Gh. Liuba, **L. Pădeanu**, L. Augustinov, I. Pădureanu, Jurcu Marcel Romulus, C. Pădeanu, *Măsurarea descărcărilor parțiale HA2 din CHE Remeți*, CCHAPT comanda nr. 1661 din 19.08.2015 Sucursala Cluj - SSH Hidroserv SA.
- [\*7] Gh. Liuba, C.V. Câmpian, V.M. Nedelea, L. Augustinov, C. Copocean, **L. Pădeanu**, C. Pădeanu, C. Dumbravă, A. Cuzmoș, *MĂSURAREA DEBITULUI TURBINAT LA CHE PLOPI și CHE SUBCETATE*, CCHAPT contract nr. 2569/2011 Sucursala Hidrocentrale Hațeg - Hidroelectrică.
- [\*8] Gh. Liuba, V.M. Nedelea, **L. Pădeanu**, I. Pădureanu, Jurcu Marcel Romulus, C. Pădeanu, *CENTRARE MAGNETICĂ ROTOR GENERATOR HA2 DIN CHE HAȚEG*, CCHAPT comanda nr. 14767 din 15.03.2013 Sucursala Hațeg - SSH Hidroserv SA.
- [\*9] Gh. Liuba, V.M. Nedelea, **L. Pădeanu**, L. Augustinov, I. Pădureanu, Jurcu Marcel Romulus, C. Pădeanu, *DOCUMENTAȚIE DE EXPERTIZĂ HA DUPĂ TERMINAREA REPARAȚIEI PENTRU HA2 DIN CHE HAȚEG*, CCHAPT CONTRACT NR.38 din 08.08.2013 Sucursala Hidrocentrale Hațeg - Hidroelectrică.
- [\*10] Gh. Liuba, **L. Pădeanu**, L. Augustinov, I. Pădureanu, Jurcu Marcel Romulus, C. Pădeanu, *CENTRARE ROTOR HIDROGENERATOR ÎN CÂMP MAGNETIC – HA1 CHE MĂNICEȘTI*, CCHAPT contract nr. 8353 din 26.09.2014 Sucursala Curtea de Argeș - SSH Hidroserv SA.

- [\*11] Gh. Liuba, C.V. Câmpian, **L. Pădeanu**, V.M. Nedelea, I. Pădureanu, Jurcu Marcel Romulus, C. Pădeanu, *ÎNCERCĂRI DE CENTRARE MAGNETICĂ ROTOR HIDROGENERATOR HG1 DIN CHE RETEZAT*, CCHAPT comanda nr. 14835 din 02.04.2013 Sucursala Hațeg - SSH Hidroserv SA.
- [\*12] Gh. Liuba, C.V. Câmpian, V.M. Nedelea, **L. Pădeanu**, L. Augustinov, I. Pădureanu, Jurcu Marcel Romulus, C. Pădeanu, *DOCUMENTATI PRIVIND MONITORIZAREA SI CONTROLUL LA PUNEREA ÎN FUNCȚIE A HA1 DIN CHE RETEZAT*, CCHAPT comanda nr. 14835 din 02.04.2013 Sucursala Hațeg - SSH Hidroserv SA.
- [\*13] Gh. Liuba, C.V. Câmpian, V.M. Nedelea, L. Augustinov, C. Copocean, **L. Pădeanu**, C. Pădeanu, *CENTRARE HA2 OSTROVUL MARE ÎN CÂMP MAGNETIC*, CCHAPT comanda nr. 12401 din 06.12.2011 Sucursala Hațeg - SSH Hidroserv SA.
- [\*14] Gh. Liuba, V.M. Nedelea, L. Augustinov, **L. Pădeanu**, I. Pădureanu, Jurcu Marcel Romulus, C. Pădeanu, *CENTRARE MAGNETICĂ ROTOR HG2 DIN CHE RĂUL MARE RETEZAT*, CCHAPT comanda nr. 15662 din 19.12.2013 Sucursala Hațeg - SSH Hidroserv SA.
- [\*15] Gh. Liuba, **L. Pădeanu**, V.M. Nedelea, L. Augustinov, I. Pădureanu, Jurcu Marcel Romulus, C. Pădeanu, *DOCUMENTATI PRIVIND MONITORIZAREA SI CONTROLUL LA PUNEREA ÎN FUNCȚIE A HA2 DIN CHE RETEZAT*, CCHAPT 15662 din 19.12.2013 Sucursala Hațeg - SSH Hidroserv SA.
- [\*16] Gh. Liuba, **L. Pădeanu**, L. Augustinov, I. Pădureanu, Jurcu Marcel Romulus, C. Pădeanu, *CENTRARE ROTOR HIDROGENERATOR ÎN CÂMP MAGNETIC – HA2 CHE SUBCETATE*, CCHAPT comanda 16456 din 16.04.2014 Sucursala Hațeg - SSH Hidroserv SA.
- [\*17] Gh. Liuba, **L. Pădeanu**, L. Augustinov, I. Pădureanu, Jurcu Marcel Romulus, C. Pădeanu, *CENTRARE ROTOR HIDROGENERATOR ÎN CÂMP MAGNETIC – HA2 CHE OSTROVUL MIC*, CCHAPT comanda nr. 16455 din 16.04.2014 Sucursala Hațeg - SSH Hidroserv SA.
- [\*18] Gh. Liuba, C.V. Câmpian, V.M. Nedelea, L. Augustinov, C. Copocean, **L. Pădeanu**, C. Pădeanu, *CENTRARE MAGNETICĂ ROTOR GENERATOR HG1 HAȚEG*, CCHAPT comanda nr. 12063 din 17.10.2011 Sucursala Hațeg - SSH Hidroserv SA.
- [\*19] Gh. Liuba, C.V. Câmpian, V.M. Nedelea, L. Augustinov, C. Copocean, **L. Pădeanu**, C. Pădeanu, *ÎNCERCĂRI COMPLEXE CU ÎNREGISTRAREA REGIMURILOR TRANZITORII LA PORNIREA ȘI OPRIREA HA2 DIN CHE ORLEA*, CCHAPT comanda nr. 2470 din 11.06.2014 Sucursala Hațeg - SSH Hidroserv SA.
- [\*20] Gh. Liuba, V.M. Nedelea, L. Augustinov, **L. Pădeanu**, I. Pădureanu, Jurcu Marcel Romulus, C. Pădeanu, *DOCUMENTAȚIE PRIVIND MONITORIZAREA ȘI CONTROLUL LUCRĂRILOR DE REPARȚIE HG 2 CHE TOTEȘTI II – LN3*,

## 184 BIBLIOGRAFIE

---

- CCHAPT CONTRACT 62 DIN 06/06/2012 Sucursala Hidrocentrale Hațeg - Hidroelectrică.
- [\*21] Gh. Liuba, **L. Pădeanu**, L. Augustinov, I. Pădureanu, Jurcu Marcel Romulus, C. Pădeanu, *CENTRARE ROTOR HIDROGENERATOR ÎN CÂMP MAGNETIC - HA1 CHE OSTROVUL MIC*, CCHAPT comanda nr. 17295 din 26.08.2014 Sucursala Hațeg - SSH Hidroserv SA.
- [\*22] Gh. Liuba, L. Augustinov, I. Pădureanu, Jurcu Marcel Romulus, **L. Pădeanu**, C. Pădeanu, *EXPERTIZARE STARE TEHNICĂ STATOR-ROTOR HG1 DIN CHE OSTROVUL MIC*, CCHAPT comanda nr. 17295 din 26.08.2014 Sucursala Hațeg - SSH Hidroserv SA.
- [\*23] Gh. Liuba, **L. Pădeanu**, V.M. Nedelea, L. Augustinov, I. Pădureanu, Jurcu Marcel Romulus C. Pădeanu, *DETERMINAREA PERFORMANTELOR REALE DE FUNCTIONARE LA HA1 DIN CHE TOTESTI I*, CCHAPT comanda 15339 din 22.11.2013 Sucursala Hațeg - SSH Hidroserv SA.
- [\*24] Gh. Liuba, V.M. Nedelea, L. Augustinov, **L. Pădeanu**, I. Pădureanu, Jurcu Marcel Romulus, C. Pădeanu, *CENTRARE MAGNETICĂ ROTOR GENERATOR 4,2 MW CHE STRĂMTORI-FIRIZA*, CCHAPT comanda nr. 7622 din 24.07.2013 UZINSIDER GENERAL CONTRACTOR SA.
- [\*25] Gh. Liuba, **L. Pădeanu**, V.M. Nedelea, L. Augustinov, I. Pădureanu, Jurcu Marcel Romulus, C. Pădeanu, *DOCUMENTATIE PRIVIND MONITORIZAREA SI CONTROLUL LA INTRAREA IN REPARATIE A HA DIN CHE STRAMTORI-FIRIZA*, CCHAPT comanda nr. 7622 din 24.07.2013 UZINSIDER GENERAL CONTRACTOR SA.
- [\*26] Gh. Liuba, C.V. Câmpian, V.M. Nedelea, L. Augustinov, C. Copocean, **L. Pădeanu**, C. Pădeanu, *CENTRARE ÎN CÂMP MAGNETIC ROTOR LA MOTOR SINCRON NR. 2 STAȚIA POMPE SĂCUIEU*, CCHAPT comanda nr. 2302 din 30.09.2011 Sucursala Hidrocentrale Cluj - Hidroelectrică.
- [\*27] Gh. Liuba, V.M. Nedelea, L. Augustinov, **L. Pădeanu**, I. Pădureanu, Jurcu Marcel Romulus, C. Pădeanu, *DOCUMENTAȚIE PRIVIND MONITORIZAREA ȘI CONTROLUL LA TERMINAREA REPARAȚIEI ȘI LA PUNEREA ÎN FUNCȚIE A HIDROGENERATORULUI NR. 1 DIN CHE PĂCLIȘA*, CCHAPT CONTRACT 62 DIN 06/06/2012 Sucursala Hidrocentrale Hațeg - Hidroelectrică.
- [\*28] Gh. Liuba, L. Augustinov, I. Pădureanu, Jurcu Marcel Romulus, **L. Pădeanu**, C. Pădeanu, *PROBE ȘI VERIFICĂRI HIDROAGREGAT HG2 DIN CHE CARNESTI I*, CCHAPT comanda nr. 3936 din 12.09.2014 Sucursala Hațeg - SSH Hidroserv SA.
- [\*29] Gh. Liuba, C.V. Câmpian, L. Augustinov, I. Pădureanu, Jurcu Marcel Romulus, **L. Pădeanu**, C. Pădeanu, *ÎNCERCĂRI COMPLEXE CU ÎNREGISTRAREA REGIMURILOR TRANZITORII LA PORNIREA ȘI OPRIREA HG1 DIN CHE OSTROVUL MARE*, CCHAPT comanda nr. 3936 din 12.09.2014 Sucursala Hațeg - SSH Hidroserv SA.



- [\*30] Gh. Liuba, C.V. Câmpian, V.M. Nedelea, L. Augustinov, C. Copocean, **L. Pădeanu**, C. Pădeanu, *CENTRARE HA2 TILEAGD ÎN CÂMP MAGNETIC*, CCHAPT contract nr. 2166 din 14.09.2011 Sucursala Hidrocentrale Oradea - Hidroelectrica.
- [\*31] Gh. Liuba, **L. Pădeanu**, V.M. Nedelea, L. Augustinov, I. Pădureanu, Jurcu Marcel Romulus, C. Pădeanu, *CENTRARE ROTOR HIDROGENERATOR ÎN CÂMP MAGNETIC - HA1 CHE CERBURENI*, CCHAPT contract nr. 397 din 18.07. 2014 Sucursala Curtea de Argeş - SSH Hidroserv SA.
- [\*32] Gh. Liuba, **L. Pădeanu**, L. Augustinov, I. Pădureanu, Jurcu Marcel Romulus, C. Pădeanu, *CENTRARE ROTOR HIDROGENERATOR ÎN CÂMP MAGNETIC - HA1 CHE VALEA IAŞULUI*, CCHAPT contract nr. 7252 din 01.09.2014 Sucursala Curtea de Argeş - SSH Hidroserv SA.
- [\*33] Gh. Liuba, **L. Pădeanu**, L. Augustinov, I. Pădureanu, Jurcu Marcel Romulus, C. Pădeanu, *CENTRARE ROTOR HIDROGENERATOR ÎN CÂMP MAGNETIC - HA1 CHE CĂRNEȘTI 2*, CCHAPT comanda nr. 17294 din 02.12.2014 Sucursala Hațeg - SSH Hidroserv SA.
- [\*34] Gh. Liuba, **L. Pădeanu**, L. Augustinov, I. Pădureanu, Jurcu Marcel Romulus, C. Pădeanu, *CENTRARE ROTOR HIDROGENERATOR ÎN CÂMP MAGNETIC - HA1 CHE SUBCETATE*, CCHAPT comanda nr. 16456 din 16.04.2014 Sucursala Hațeg - SSH Hidroserv SA.
- [\*35] Gh. Liuba, L. Augustinov, I. Pădureanu, Jurcu Marcel Romulus, **L. Pădeanu**, C. Pădeanu, *EXPERTIZARE STARE TEHNICĂ STATOR-ROTOR HG1 DIN CHE SUBCETATE*, CCHAPT comanda nr. 17295 din 26.08.2014 Sucursala Hațeg - SSH Hidroserv SA.
- [\*36] Gh. Liuba, L. Augustinov, I. Pădureanu, Jurcu Marcel Romulus, **L. Pădeanu**, C. Pădeanu, *ÎNTOCMIRE RAPORT HG1 CHE TURNUL RUIENI*, CCHAPT comanda nr. 19631 din 10.10.2015 Sucursala Hațeg - SSH Hidroserv SA.

## ANEXE

### A1. Lucrări științifice publicate pe parcursul stagiului doctoral

#### a) Lucrări științifice publicate în volumele unor manifestări științifice (Proceedings) indexate Web of Science-WoS (ISI) Proceedings:

- 1) **L. Pădeanu**, G. Liuba, M. Biriescu, V. Nedelea, M. Mot, M.Svoboda, "Centring in magnetic field of the hydrogenerator rotors using orbit diagram", *6th International Workshop of Soft Computing Applications (SOFA 2014) Vol. 357 of the series Springer Advances in Intelligent Systems and Computing*, pp. 1185-1197, Timisoara, Romania, 24-26 July 2014.
- 2) Vatau D., Svoboda M., Frigura-Iliasa F.M., **Pădeanu L.**, Candea L., "Automatic system for high voltage substation electromagnetic field effects evaluation", *10th International Conference on Digital Technologies (DT)*, Zilina, SLOVAKIA, 9-11 July 2014, pp. 350-355.
- 3) **Laurențiu Pădeanu**, Marcus Svoboda, Flaviu Frigură-Iliasa, Petru Andea, "Human Machine Interface for a SCADA System applied on a District Heating Power Plant", *Proceedings of The International Conference on Information and Digital Technologies 2015*, 7-9 July 2015, Zilina-Slovakia, pp. 261-266.

#### b) Lucrări științifice publicate în reviste de specialitate indexate BDI:

- 1) Elisabeta SPUNEI, **Laurențiu PĂDEANU**, Florina PIROI, Ion Piroi, Gheorghe LIUBA, "Research on decreasing the cost price for the synchronous hydrogenerator", *Buletinul Agir 10/2013*, Nr. 4, pp. 163-168 (lucrare indexată INDEX COPERNICUS, ACADEMIC KEYS, getCITED).
- 2) Elisabeta SPUNEI, **Laurențiu PĂDEANU**, Florina PIROI, Ion Piroi, Gheorghe LIUBA, "The Synchronous Generators Rated Speed's Influence on Electromagnetic Stresses and on Costs", *Analele Universității „Eftimie Murgu” Reșița-Fascicula de Inginerie*, Anul XX, Nr. 2, Reșița 2013, pp. 267-274 (lucrare indexată EBSCO, DOAJ, INDEX COPERNICUS).
- 3) Ioan Pădureanu, Marcel Jurcu, Ladislau Augustinov, Cornel Hațiegan, Eugen Răduca, **Laurențiu Pădeanu**, "Optimisation of the Start-up and Operation Regimes of Cooling Water Pumps of a High-Power Hydro Generator", *Analele Universității "Eftimie Murgu" Reșița-Fascicula de Inginerie*, ANUL XXII, Nr.1, 2015, pp. 345-358 (lucrare indexată EBSCO, DOAJ).

- 4) **Laurențiu Pădeanu**, Doru Vătău, Flaviu Mihai Frigură, Martian Moț, "Virtual Instrumentation System for Training in Field of the Influence of Power Equipment on Telecommunication Lines", *14th International Conference on Information Technology Based Higher Education and Training (ITHET 2015)*, Lisabon, 11-13 June 2015.
- 5) Marcel Romulus Jurcu, Ioan Padureanu, **Laurențiu Pădeanu**, Ladislau Augustinov, Cornel Hațiegan, "Tests Regarding the Transitory Regimes of Putting off Load of the Hydroagregate", *Multi-Conference on System & Structures - SysStruc '15*, 24 Septembrie 2015, Analele Universității "Eftimie Murgu" Reșița-Fascicula de Inginerie ANUL XXII, Nr.2, 2015, pp. 185-195 (*lucrarea indexată EBSCO, DOAJ*).

**c) Lucrări științifice publicate în volumele unor manifestări științifice**

- 1) Ioan Pădureanu, Marcel Romulus Jurcu, Cornel Hațiegan, **Laurențiu Pădeanu**, Eugen Răduca, Flaviu Dilertea, Cristinel Popescu, "The determining of the hydro-generator efficiency through the calorimetric method" , *CEEC-TAC3 3rd Central and Eastern European Conference on Thermal Analysis and Calorimetry*, 25-28 August 2015, PS1.48 Ljubjana Slovenia.
- 2) **L. Pădeanu**, M Moț, " Sistem de achiziție și prelucrare a datelor pentru testarea generatoarelor sincrone", *Proceedings of Zilele Academice Timisene Editia 13*, 23-24 mai 2013 Editura "Politehnica" Timisoara.
- 3) Cristian Petrica, Gheorghe Liuba, **L. Pădeanu**, V. Nedelea, "Air Gap Influence On The Functional And Constructive Performance Of The Hydrogenerator", *2nd THINK-HYDRO.com International Conference*, 13-15 November, Reșița 2013.