

# **SCHEMĂ DE DISTRIBUȚIE A DATELOR ÎN CAZUL SIMULĂRILOR NUMERICE PARALELE DE ÎNALTĂ PERFORMANȚĂ APLICATĂ PENTRU CONTROLUL SISTEMELOR EOLIENE LA VITEZĂ VARIABILĂ A VÂNTULUI**

Teză destinată obținerii  
titlului științific de doctor inginer  
la  
Universitatea Politehnica Timișoara  
în domeniul CALCULATOARE ȘI TEHNOLOGIA  
INFORMAȚIEI  
de către

**Ing. Florica Balog**

Conducător științific: prof.univ.dr.ing. Horia Ciocârlie  
Referenți științifici: prof.univ.dr. Vasile Gheorghiuță Găitan  
prof.univ.dr.ing. Teodor Leuca  
prof.univ.dr.ing. Octavian Proștean

Ziua susținerii tezei: 7 Iulie 2017

Seriile Teze de doctorat ale UPT sunt:

- |   |  |
|---|--|
| 1. Automatică                               | 10. Știința Calculatoarelor                |
| 2. Chimie                                   | 11. Știința și Ingineria Materialelor      |
| 3. Energetică                               | 12. Ingineria sistemelor                   |
| 4. Ingineria Chimică                        | 13. Inginerie energetică                   |
| 5. Inginerie Civilă                         | 14. Calculatoare și tehnologia informației |
| 6. Inginerie Electrică                      | 15. Ingineria materialelor                 |
| 7. Inginerie Electronică și Telecomunicații | 16. Inginerie și Management                |
| 8. Inginerie Industrială                    | 17. Arhitectură                            |
| 9. Inginerie Mecanică                       | 18. Inginerie civilă și instalații         |

Universitatea Politehnica 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, 2017

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 Timișoara. Toate încălcările acestor drepturi vor fi penalizate potrivit Legii române a drepturilor de autor.

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

## Cuvânt înainte

Teza de doctorat a fost elaborată pe parcursul activității mele în cadrul Departamentului de Calculatoare și Tehnologia Informației al Universității Politehnica Timișoara.

Toate simulările prezentate în această teză au fost realizate pe calculatorul personal Intel(R) Core(TM) i7-2600K CPU @ 3.40GHz, 8.00GB RAM.

Mulțumesc conducătorului de doctorat prof.dr.ing. Horia CIOCÂRLIE, dar în mod deosebit mulțumesc domnului prof.dr.ing. Marius BABESCU pentru tot sprijinul acordat și pentru asistența permanentă pe parcursul activității mele din cadrul studiilor doctorale.

Totodată, doresc să mulțumesc membrilor comisiei de îndrumare: prof.dr.ing Stefan Holban, prof.dr.ing Ionel Jian, conf.dr.ing Dan Pescaru pentru suportul profesionist și pentru sfaturile utile acordate.

În final, mulțumesc membrilor comisiei de susținere publică a tezei de doctorat pentru faptul c-au acceptat să fie membrii ai acestei comisii, inclusiv pentru timpul și efortul de-a studia și evalua prezenta teză, precizând aici președintele comisiei: prof. univ. dr. ing. Lăcrămioara STOICU TIVADAR și referenții științifici: prof.univ.dr. Vasile Gheorghită GĂITAN, prof.univ.dr.ing. Teodor LEUCA, și prof.univ.dr.ing. Octavian PROȘTEAN.

În sfârșit, doresc să mulțumesc părinților mei, fără a căror susținere, răbdare și educație nimic nu ar fi fost posibil.

Timișoara, Iulie 2017

Florica BALOG

Dedicated to my daughter,  
the reason of my being

## Acknowledgements

I am grateful and thank my PhD supervisor Prof. Dr. Eng. Ciocârlie Horia, for all of his support, help, patience, strength of character and guidance.

Also, I acknowledge, credit and thank Prof. Dr. Eng. Babescu Marius for his support and for the fact that I built the initial part of this thesis on his ideas.

BALOG, Florica

**Schemă de distribuție a datelor în cazul simulărilor numerice paralele de înaltă performanță aplicată pentru controlul sistemelor eoliene la viteză variabilă a vântului**

Teze de doctorat ale UPT, Seria 14, Nr. 35, Editura Politehnica, 2017, 142 pagini, 84 Figuri, 10 tabele.

ISSN:2069-8216

ISSN-L:2069-8216

ISBN:978-606-35-0140-1

Cuvinte cheie: structură paralelă "quad-parallel", schemă de distribuție a datelor, diagrama fluxului de date, metodă de paralelizare, simulare numerică, metodă de analiză numerică, energia eoliană

Rezumat,

Creșterea exponențială a performanței supercomputerelor oferă posibilitatea reducerii timpului necesar simulărilor numerice mari. Pe de altă parte, simulările numerice mari implică lucru cu seturi de date mari. Acesta a fost motivul pentru care autorul a propus o schemă de distribuție a datelor care distribuie un set mare de date (un interval mare de simulare în mai multe subintervale de simulare pe care se va simula simultan o anumită porțiune de cod paralelizabilă) unui sistem de calcul paralel de tip multicore. Pentru analizarea fluxului de date pe structura paralelă propusă autorul a definit diagrama fluxului de date. Toate contribuțiile aduse au fost verificate și utilizate în cazul soluționării unor probleme complexe din domeniul energiei eoliene.

## Cuprins

Cuprins .....	5
Lista de figuri .....	9
Lista de tabele .....	11
Abstract .....	10
Abrevieri .....	11
1. INTRODUCERE .....	14
1.1. Tema și domeniul de lucru .....	14
1.2. Motivația alegerii temei .....	14
1.3. Obiectivele tezei .....	15
1.4. Prezentarea generală a tezei .....	15
2. CALCULUL ȘTIINȚIFIC DE ÎNALTĂ PERFORMANȚĂ APLICAT PENTRU PROBLEME REFERITOARE LA GENERAREA ENERGIEI EOLIENE .....	16
2.1. Noțiuni generale. Aspectul software al calculului de înaltă performanță .....	16
2.2. Sisteme de calcul paralel .....	17
2.2.1. Calculatoare cu memorie partajată .....	18
2.3. Predicții și provocări în supercomputing .....	20
2.4. HPC în științele ingineresti .....	20
2.4.1. Provocări ale domeniului energiei eoliene .....	21
Concluzii .....	22
3. CONTROLUL SISTEMELOR EOLIENE LA VITEZĂ VARIABILĂ .....	23
3.1. Introducere .....	23
3.2. Precizări de bază referitoare la controlul sistemelor eoliene .....	24
3.2.1. Precizări .....	24
3.2.2. Modele matematice .....	26
3.2.2.1. Modele matematice ale turbinei .....	26
3.2.3. Controlul sistemului eolian .....	31
3.2.4. Structura de control a sistemului eolian .....	37
Concluzii .....	40
3.3. Conducerea sistemelor eoliene la viteză variabilă a vântului .....	40
3.3.1. Prezentarea teoretică a problemei .....	41
3.3.2. Determinarea caracteristicilor puterii turbinei prin măsurători .....	44
3.3.3. Conducerea sistemului eolian considerând dependența lui $\omega_{ref}$ de $V_{Mediu}$ .....	46
Concluzii .....	48
3.4. Dinamica sistemului eolian la sarcină optimă .....	48
3.4.1. Aspecte teoretice ale problemei .....	48
3.4.2. Parte aplicativă. Studii de caz .....	49
3.4.3. Metoda de calcul a valorii reale $\omega_{OPTIM}$ .....	53
3.4.4. Studiu de caz, importanța modelelor matematice pentru optimizarea funcționării sistemelor eoliene .....	54
Concluzii .....	55
3.5. Maximizarea energiei captate a vitezei vântului .....	56
3.5.1. Formularea problemei .....	56
3.5.2. Modelul matematic al turbinei .....	57

3.5.3. Determinarea energiei maxime prin anularea derivatei puterii .....	58
3.5.4. Determinarea simplificată a energiei optime .....	59
3.5.5. Determinarea energiei maxime prin calcularea energiei obținute .....	61
3.5.6. Determinarea energiei maxime prin încărcări succesive ale generatorului .....	62
3.5.7. Determinarea energiei de vârf printr-un eșantion la funcționarea în gol .....	64
Concluzii .....	68
3.6. Viteza echivalentă și puterea echivalentă a unui sistem eolian care lucrează optim la viteză variabilă .....	70
3.6.1. Modelele matematice ale turbinei și generatorului .....	70
3.6.2. Studiu de caz .....	71
Concluzii .....	77
3.7. Comportamentul sistemului eolian controlat optim la viteză variabilă .....	77
3.7.1. Studiu de caz .....	77
3.7.2. Controlul optim al sistemului eolian la viteză variabilă .....	85
Concluzii .....	86
Concluzii și direcții de cercetare .....	86
4. METODE DE PARALELIZARE EXPLICITĂ PE O STRUCTURA PARALELĂ DE TIP MULTICORE .....	88
4.1. Introducere .....	88
4.2. Soluționarea paralelă a controlului unui sistem eolian la viteză variabilă a vântului .....	89
4.2.1. Introducere .....	89
4.2.2. Soluționarea serială a ecuației diferențiale .....	90
4.2.3. Soluționarea paralelă a ecuației diferențiale .....	91
Concluzii .....	94
4.3. Dezvoltarea și paralelizarea unei simulări numerice directe pentru a studia comportamentul unui sistem eolian controlat optim la viteză variabilă a vântului .....	95
4.3.1. Introducere .....	95
4.3.2. Problema cu valoare inițială. Ecuațiile diferențiale guvernatoare .....	96
4.3.3. Activități de cercetare similare .....	98
4.3.4. Accelerarea codului MATLAB .....	98
4.3.5. Implementarea studiului propus. Simularea problemei cu valoare inițială .....	99
Concluzii .....	118
4.4. Metodă de paralelizare a unei tehnici de analiză numerică explicită pe o structură multicore .....	120
4.4.1. Introducere .....	120
4.4.2. Metoda de paralelizare .....	121
4.4.3. Ecuația diferențială guvernatoare a problemei cu valoare inițială .....	122
4.4.4. Metoda de analiză numerică aplicată problemei cu valoare inițială propusă .....	123
Concluzii .....	128
5. CONCLUZII ȘI PERSPECTIVE .....	129
5.1. Impactul tezei și contribuții .....	129
5.2. Direcții de cercetare .....	131
5.3. Publicații .....	131
BIBLIOGRAFIE .....	137

## Lista de figuri

1. Calcul paralel [49].....	16
2. Sisteme cu acces uniform la memorie (Shared Memory (UMA)) [53].....	19
3. Sisteme cu acces neuniform la memorie (Shared Memory (NUMA)) [53] .....	19
4. Teren complex [56] .....	21
5. Caracteristicile mecanice experimentale.....	26
6. Caracteristicile mecanice la $V_{MAX}=8.6[m/s]$ și $V_{MIN}=4[m/s]$ .....	27
7. Caracteristicile de putere la $V_{MAX}=8.6[m/s]$ and $V_{MIN}=4[m/s]$ .....	27
8. Variația reală a vitezei vântului .....	28
9. Viteza modelată a vântului .....	28
10. Dependența puterii de $\omega$ , at $V$ ca și parametru.....	29
11. Modelul ortogonal al generatorului sincron cu magneți permanenți.....	30
12. Variația în timp a lui $\omega$ la $\omega(0)=177.92[rad/s]$ .....	32
13. Variația în timp a lui $\omega$ la $\omega(0)=277.92[rad/s]$ .....	32
14. Variația în timp a lui $R$ pentru $\omega(0)=177.92[rad/s]$ .....	33
15. Variația în timp a lui $\omega$ pentru $\omega(0)=177.92[rad/s]$ .....	33
16. Variația în timp a lui $R$ pentru $\omega(0)=277.92[rad/s]$ .....	34
17. Variația în timp a lui $\omega$ pentru $\omega(0)=277.92[rad/s]$ .....	34
18. Variația în timp a lui $\omega$ , la $\omega(0)=174[rad/s]$ , și $R(0)=74.371[\Omega]$ .....	35
19. Variația în timp a lui $R$ la $\omega(0)=174[rad/s]$ și $R(0)=74.371[\Omega]$ .....	36
20. Variația în timp a lui $\omega$ la $\omega(0)=174[rad/s]$ .....	37
21. Variația în timp a lui $\omega$ la $\omega(0)=274[rad/s]$ .....	37
22. Variația în timp a lui $\omega$ la $\omega(0)=374[rad/s]$ .....	37
23. Controlul sistemului eolian folosind $\omega_{ref}$ ca și referință.....	38
24. Controlul sistemului eolian (TV+GSMP).....	39
25. Variația în timp a vitezei vântului .....	41
26. Controlul sistemului eolian folosind $\omega_{ref}$ .....	42
27. Caracteristicile mecanice experimentale.....	43
28. Caracteristicile puterii la $V_1$ and $V_2$ .....	44
29. Caracteristicile puterii la $t=700[s]$ .....	44
30. Caracteristicile puterii în intervalul $\Delta t$ variind $0[s]$ , la $1200[s]$ .....	45
31. Dependența lui $\omega_{ref}$ de $V_{Mediu}$ .....	45
32. Conducerea sistemului eolian cu ajutorul valorii $\omega_{ref}$ .....	46
33. Deplasarea punctului de funcționare.....	47
34. Caracteristicile puterii la $V_{Max}$ , $V_{Mediu}$ , și $V_{Min}$ .....	47
33. Dependența lui $\omega_{ref}$ de $V_{Mediu}$ .....	48
35. Controlul sistemului eolian .....	49
36. Variația în timp a lui $R$ și $\omega$ pentru $K_2=0.01$ .....	50
37. Variația în timp a lui $R$ și $\omega$ pentru for $K_2=0.1$ .....	50
38. Variația în timp a lui $R$ și $\omega$ pentru, for $K_2=0.001$ .....	51
39. Variația în timp a lui $R$ și $\omega$ pentru, $K_2=-0.0001$ .....	52
40. Variația în timp a lui $R$ și $\omega$ pentru, $K_2=-0.001$ .....	52
41. Variația în timp a lui $R$ și $\omega$ pentru, $K_2=-0.01$ .....	53
42. Variația în timp a lui $R$ și $\omega$ pentru, $K_2=-0.1$ .....	53
43. Conducerea sistemului eolian .....	55
44. Dependența puterii de $\omega$ .....	57
45. Variația vitezei vântului .....	57
46. Caracteristicile mecanice ale turbinei .....	60
47. Variația în timp a vitezei unghiulare mecanice.....	60

48. Graficul funcției exponențiale având trei valori pentru $\omega$ .....	62
49. Variația în timp a vitezei unghiulare mecanice.....	63
50. Variația puterii generatorului.....	64
51. Variația în timp a vitezei unghiulare mecanice la viteză variabilă a vântului și $\omega(0)=500[\text{rad/s}]$ .....	65
52. Variația în timp a vitezei unghiulare mecanice (detaliu).....	65
53. Variația în timp a vitezei unghiulare mecanice la viteză variabilă a vântului și $\omega(0)=243[\text{rad/s}]$ .....	66
54. Caracteristicile puterii .....	67
55. Variația în timp a vitezei vântului .....	73
56. Variația în timp a puterii .....	73
57. Variația în timp a vitezelor: $V_{\text{AVERAGE}}$ , $V_{\text{ECH}}$ , și $V$ .....	76
58. Variația în timp a vitezei unghiulare mecanice optime .....	76
59. Variația în timp a $P_{\text{WT}}$ .....	77
60. Variația în timp a $P_{\text{WT}}$ (detaliu) .....	77
61. Variația rezistenței de sarcină (detaliu) .....	78
62. Variația rezistenței de sarcină.....	78
63. Variația în timp a lui $\omega$ .....	79
64. Variația în timp a puterilor .....	80
65. Variația lui $\omega$ , și zona de optim energetic .....	82
66. Variația în timp a lui $\omega$ .....	83
67. Variația în timp a lui $\omega$ la $R_4=364.55[\Omega]$ .....	84
68. Variația în timp a puterilor $P_{\text{PMSG}}(t)$ și $P_{\text{WT}}(t)$ .....	85
69. Controlul optim al sistemului eolian.....	86
70. Variația vitezei unghiulare mecanice (soluționare serială) .....	91
71. Structura de tip "quad-parallel" .....	92
72. Parallel command window.....	94
73. Variația în timp a lui $\omega$ la $V_{\text{REAL}}$ și $V_{\text{AVERAGE}}$ [37] .....	97
74. Implementare serială .....	100
75. Soluția exactă și soluția aproximativă a ecuației mișcării la viteză reală a vântului.....	103
76. Soluția exactă și soluția aproximativă a ecuației mișcării la viteză echivalentă a vântului.....	103
77. Soluția exactă a ecuației mișcării în cazul vitezei reale și vitezei echivalente a vântului.....	104
78. Soluția numerică a ecuației mișcării în cazul vitezei reale și vitezei echivalente a vântului.....	104
79. Execuția unui job batch .....	107
80. Schemă de distribuție a datelor pentru două structuri de tip "single program-multiple data" dezvoltată pentru structura "quad-parallel" propusă în [29] .....	109
81. Schemă de distribuție a datelor pentru două structuri de tip "single program-multiple data" aplicată pentru domeniul energiei eoliene.....	110
82. Diagrama fluxului de date în cadrul sesiunii paralele.....	111
83. Variația vitezei unghiulare mecanice, zona de optim energetic [9] .....	123
845. Soluția numerică a problemei cu valoare inițială considerată .....	125

## Lista de tabele

1. Datele de intrare necesare începerii simulării ecuației mișcării cu ajutorul integratorului R .....	101
2. Valorile numerice ale vitezei unghiulare mecanice obținute la viteză reală a vântului.....	102
3. Valorile numerice ale vitezei unghiulare mecanice obținute la viteză echivalentă a vântului.....	102
4. Soluția numerică a ecuației mișcării obținută la viteză reală a vântului, pe fiecare worker Matlab .....	114
5. Soluția numerică a ecuației mișcării obținută la viteză echivalentă a vântului, pe fiecare worker Matlab .....	116
6. Eficiența codului paralel .....	118
7. Datele de intrare necesare începerii simulării problemei cu valoare inițială considerată.....	124
8. Valorile numerice ale vitezei unghiulare mecanice obținute pentru $n=4$ .....	124
9. Soluția numerică, pe fiecare worker, obținută cu ajutorul metodei de paralelizare propusă.....	126
10. Eficiența metodei de paralelizare propusă. Performanța multicore.....	128

## Abstract

Datorită faptului că fenomenele fizice de mare importanță în știință și inginerie sunt descrise de sisteme de ecuații diferențiale dificil de soluționat prin metode clasice (metode care implică un timp de soluționare mare), în această teză sunt prezentate mai multe contribuții referitoare la metode de paralelizare explicită (utilizate pentru reducerea timpului necesar simulărilor numerice mari), pe baza paralelismului datelor, contribuții care au fost verificate și utilizate pentru soluționarea unor probleme cu valoare inițială din domeniul energiei eoliene.

Un concept de bază propus în această teză este cel referitor la structura paralelă de tip "quad-parallel" (utilizată ca suport paralel pentru celelalte concepte definite în teză) pe baza căreia au fost dezvoltate și celelalte concepte referitoare la metodele de paralelizare propuse.

Un alt concept este schema de distribuție a datelor utilizată pentru a distribui un set mare de date (în cazul de față, pentru a distribui intervalul inițial de simulare în mai multe subintervale de simulare) structurii paralele pe care rulează aplicația propusă spre a fi rezolvată cu ajutorul calculului paralel, iar pentru a analiza modalitatea de distribuție a datelor pe structura paralelă (pe fiecare nucleu al structurii paralele), autorul a propus un alt concept numit diagrama fluxului de date.

Schema de distribuție a datelor poate fi utilizată și în cazul soluționării altor tipuri de probleme cu valoare inițială care se bazează pe un interval mare de simulare și unde este suportat paralelismul datelor.

De asemenea, s-a propus o altă metodă de paralelizare care îmbină calculul serial cu cel paralel în același algoritm, metodă care a fost utilizată pentru a paraleliza și implementa eficient tehnica de analiză numerică Runge Kutta de ordinul 4 utilizată pentru soluționarea unei probleme cu valoare inițială din domeniul energiei eoliene.

Toate conceptele propuse și prezentate în această teză au fost testate și utilizate pentru soluționarea unor probleme cu valoare inițială din domeniul energiei eoliene.

## Abrevieri

CiSE	
computational science and engineering .....	16
CPU	
Central Processing Unit .....	20
CS	
Computer Science .....	19
CSE	
computing in science and engineering .....	16
GP-GPU	
General-Purpose Graphics Processing Unit.....	24
HPC	
High Performance Scientific Computing.....	16
MIMD	
Multiple Instruction, Multiple Data.....	20
MISD	
Multiple Instruction, Single Data .....	21
MPL	
Mathematical Programming Language.....	20
MPP	
Massive parallel processing .....	16
NUMA	
Non-Uniform Memory Acces.....	22
PVM	
Parallel Virtual Machine.....	20
RANS	
Reynholds-average Navier Stokes .....	25
SIMD	
Single Instruction, Multiple Data .....	20
SISD	
Single Instuction, Single Data .....	21
SMP	
symmetric multiprocessing.....	21
spmd	
single program multiple data.....	112
UMA	
Uniform Memory Acces.....	21
VLDB	
Very large database .....	16

# 1. INTRODUCERE

## 1.1. Tema și domeniul de lucru

Domeniul de lucru poate fi tradus în "computație în știință și inginerie" (CSE) sau știință computațională și inginerie (CiSE).

Computația în știință și inginerie poate fi considerată ca și un punct central care necesită cunoștințe de arhitectura calculatorului, sisteme de operare, rețele de calculatoare, limbaje de programare, algoritmi numerici, modele matematice, fenomene fizice, precum și teoria computației.

Din punct de vedere software, domeniul calculului de înaltă performanță (HPC) înseamnă calcul paralel (știința calculatoarelor) și calcul științific (matematică aplicată).

Din punct de vedere hard, se regăsesc mai multe ramuri ale ingineriei calculatoarelor referitoare la arhitectură și comunicații.

Dacă se iau în considerare clusterelor sau centrul de calcul, și nu supercomputerele ca și produse finite, se iau în considerare probleme referitoare la sisteme de operare, sisteme de fișiere paralele (mai multe sisteme de fișiere paralele pot fi utilizate pe sisteme MPP mari) precum Lustre care este un sistem de fișiere construit pe ideea că există mai multe noduri în MPP care manipulează transferul datelor între cererea de discuri a utilizatorilor), baze de date mari (VLDB, multi-index, multi-rezoluție), job scheduler, profiling, soluții de stocare (rețele de sisteme de fișiere, etc.). Aici, problemele sunt departe de-a fi rezolvate.

## 1.2. Motivația alegerii temei

Vântul reprezintă "materia brută" pentru toate tipurile de sisteme eoliene, fiind totodată o resursă de energie regenerabilă. Datorită faptului că este abundentă, curată și că are o contribuție minimă asupra încălzirii globale sau schimbării climatice, energia vântului a câștigat interes pe plan global.

Majoritatea articolelor care tratează problema energiei vântului se referă, în general, la controlul sistemelor eoliene la viteză constantă, care este însă un caz ideal. În realitate, viteza vântului este variabilă, cum este și cazul României. Prin urmare, pentru a controla viteza vântului la viteză variabilă, trebuie luate în considerare problemele implicate de variația vitezei vântului.

Prin urmare, pentru a controla sistemele eoliene la viteză variabilă, apar mai multe probleme legate de variația vitezei vântului, fiind astfel necesare metode de soluționare a acestor probleme. Însă, problemele precizate sunt descrise de ecuații diferențiale complicate care necesită timp pentru a fi soluționate în mod serial folosind metodele numerice de simulare pe un singur procesor.

Astfel, toate simulările numerice realizate în teză se bazează pe modele matematice care modelează fenomenele fizice. Aceste simulări numerice sunt consumatoare de timp datorită faptului că implică ecuații diferențiale obișnuite complicate, precum și condițiile lor inițiale.

Din acest motiv, sunt necesare metode care implică reducerea timpului necesar simulării (cerut de soluționarea ecuațiilor diferențiale [60] care modelează problemele legate de energia eoliană), folosind capacitatea calculului de înaltă performanță pentru a paraleliza calculul științific utilizând algoritmi paraleli mai consistenți.

### 1.3. Obiectivele tezei

În inginerie, impactul simulării pe calculator este semnificativ dar continuă să crească. Prin urmare, o problemă actuală importantă este aceea că puterea de calcul crește mai repede decât capacitatea de-a gestiona rezultatele simulării numerice.

Prima generație de calculatoare avea capacitatea de-a procesa 50-70 operații pe secundă, în timp ce calculatoarele actuale sunt de  $10^{15}$  ori mai rapide, estimându-se că bariera exa-FLOPS se va atinge în jurul anilor 2020-2025.

Ecuția mișcării turbinei și generatorului sincron cu magneți permanenți este o ecuație diferențială obișnuită complicată care necesită timp pentru a fi rezolvată folosind analiza numerică clasică. În acest sens, sunt necesare metode de reducere a timpului de soluționare seriale cum ar fi metode de soluționare paralelă când sunt utilizate mai multe resurse de calcul.

Dacă viteza unghiulară mecanică este controlată prin impunerea vitezei de referință pe intervalul  $\Delta t$ , sistemul eolian este controlat optim obținându-se energie eoliană maximă la viteză variabilă a vântului. Se subliniază faptul că variația în timp a vitezei unghiulare mecanice este dată de ecuația mișcării a turbinei și generatorului sincron cu magneți permanenți.

Prin urmare, în cadru acestei teze, autorul a propus și utilizat mai multe contribuții în domeniul calculului științific de înaltă performanță, contribuții care, ulterior, au fost aplicate unor probleme reale din domeniul energiei eoliene.

Așadar, autorul a propus două tehnici de paralelizare explicită utilizate pentru soluționarea mai multor probleme reale din domeniul energiei eoliene. Aceste tehnici de paralelizare fac posibilă soluționarea ecuațiilor diferențiale complicate (care descriu probleme energetice reale) într-un timp mai mic reducându-se altfel timpul de soluționare.

Un alt obiectiv atins în această teză este utilizarea capacității unui sistem multicore cu memorie partajată pentru a soluționa aplicații din domeniul energiei eoliene, cu ajutorul metodelor de paralelizare propuse.

### 1.4. Prezentarea generală a tezei

Această secțiune descrie structura tezei; restul documentului este organizat după cum urmează:

Capitolul 2 descrie o prezentare generală a domeniului calculului de înaltă performanță. De asemenea, este descrisă aplicarea calculului de înaltă performanță în științe ingineresti cum ar fi HPC în domeniul energiei vântului.

Capitolul 3 prezintă mai multe metode de control a sistemelor eoliene la viteză variabilă a vântului. În acest sens, capitolul 3 este structurat pe 7 subcapitole, fiecare dintre acestea conținând metode diferite de control a sistemelor eoliene la viteză variabilă a vântului.

Ca urmare, subcapitolul 3.2 include câteva precizări de bază referitoare la controlul sistemelor eoliene de putere. Acest subcapitol prezintă totodată și problemele implicate de variația vitezei vântului, și pe baza rezultatelor obținute, autorul a propus două structuri de control.

În subcapitolul 3.3, autorul a propus o metodă de determinare a vitezei unghiulare de referință pentru a extrage energia maximă la viteză variabilă a

vântului. O altă problemă importantă este determinarea rezistenței de sarcină a generatorului sincron cu magneți permanenți în așa fel încât să se obțină o funcționare în punctul de putere maximă a turbinei.

Subcapitolul 3.4 prezintă dinamica sistemului eolian la încărcare optimă, prezentându-se câteva studii de caz care se bazează pe comportamentul sistemului eolian pentru diferite valori ale constantei de proporționalitate.

În subcapitolul 3.5, autorul prezintă trei metode originale de estimare a energiei maxime a unui sistem eolian care funcționează la viteză variabilă. Prin urmare, ideea de bază este determinarea vitezei de rotație care corespunde energiei maxime date de turbină. Prin simulare, s-a determinat viteza unghiulară mecanică la care se obține o energie maximă din viteză variabilă a vântului.

Subcapitolul 3.6 prezintă analiza dinamicii sistemului eolian la viteză variabilă. Pentru a realiza această analiză, autorul a utilizat modele matematice obișnuite corespunzătoare turbinei și generatorului sincron cu magneți permanenți. Pe baza măsurării vitezei vântului și a generatorului, autorul a definit două mărimi de bază, și anume viteza echivalentă a vântului și viteza unghiulară mecanică optimă. Analizând viteza de rotație a generatorului s-a determinat zona de funcționare optimă, zonă care este caracterizată de viteza unghiulară mecanică optimă.

În subcapitolul 3.7, viteza unghiulară mecanică este obținută măsurând viteza vântului, după care sarcina generatorului este modificată folosind un controler astfel încât să se obțină o funcționare optimă din punct de vedere energetic. În cazul controlului sistemelor eoliene, pentru a obține o energie maximă, pe baza vitezei vântului, autorul a propus metode de calcul a vitezei de rotație de referință. La viteză variabilă, autorul a definit două mărimi, și anume, viteza echivalentă a vântului și puterea echivalentă, acestea fiind mărimi fundamentale pentru a determina viteza unghiulară mecanică optimă.

Capitolul 4 este structurat pe 3 subcapitole fiecare conținând metode de paralelizare explicită propuse folosind o structură paralelă numită "quad-paralel". În plus, pentru a verifica eficiența metodelor de paralelizare propuse, autorul a soluționat câteva probleme cu valoare inițială din domeniul energiei eoliene.

Astfel, subcapitolul 4.2 prezintă soluționarea paralelă a controlului unui sistem eolian la viteză variabilă. Așadar, utilizând calculul paralel, autorul a implementat controlul unui sistem eolian la viteză variabilă pentru a reduce timpul de soluționare serială a problemei legate de energia eoliană propusă.

Pentru a studia comportamentul unui sistem eolian controlat optim la viteză variabilă a vântului, subcapitolul 4.3 prezintă o metodă de dezvoltare și paralelizare a unei simulări numerice directe. Astfel, pe baza paralelismului datelor, autorul a propus o metodă de paralelizare explicită folosind o structură paralelă quad-core. Această metodă de paralelizare necesită o schemă de distribuție a datelor. Prin urmare, autorul a propus o schemă de distribuție a datelor care distribuie un set mare de date unei structuri paralele folosind o diagramă a fluxului de date propusă în această teză.

Subcapitolul 4.4 prezintă o strategie de paralelizare a unei tehnici de analiză numerică explicită pe-o structură paralelă de tip quad-core. Drept urmare, pentru verificarea eficienței metodei de paralelizare propuse, autorul a considerat pentru soluționare o problemă de test folosind metoda de paralelizare explicită a tehnicii de analiză numerică propusă.



## 2. CALCULUL ȘTIINȚIFIC DE ÎNALTĂ PERFORMANȚĂ APLICAT PENTRU PROBLEME REFERITOARE LA GENERAREA ENERGIEI EOLIENE

### 2.1. Noțiuni generale. Aspectul software al calculului de înaltă performanță

Calculul paralel [61-65] reprezintă cea mai apropiată disciplină din branșa calculatoarelor (adică CS). Jurnalele care se ocupă de calculul științific, se ocupă practic de matematică aplicată: metode numerice, modele matematice simplificate de tip element/volum finit, etc.

Calculul paralel reprezintă execuția simultană pe multiple procesoare a acelorași instrucțiuni pentru a rezolva mai rapid o problemă special adaptată și subdivizată.

Calculul paralel poate fi utilizat pentru probleme care necesită multe calcule și a căror soluționare durează mult, dar care pot fi divizate în mai multe subprobleme independente. Așadar, calculul paralel este o soluție rapidă pentru problemele de mare complexitate.

În cel mai simplu sens, calculul paralel reprezintă utilizarea simultană a multiple resurse de calcul pentru rezolvarea unei probleme computaționale folosind mai multe procesoare, prin urmare o problemă este ruptă în mai multe părți diferite care pot fi executate simultan pe diferite procesoare, așa cum rezultă din Figura 2.1 [49].

În general, conceptul de paralelism implică divizarea unui task în mai multe subtask-uri mai mici decât cel original, atribuirea task-urilor mai multor workeri care vor lucra în paralel, coordonarea workeri-ilor, precum și evitarea descompunerii task-ului inițial în prea multe subtask-uri, astfel încât timpul de comunicare dintre workeri să nu fie mai mare decât timpul de lucru necesar rulării task-ului atribuit [50].

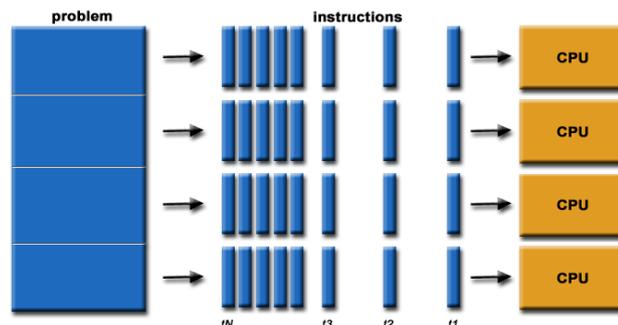


Figura 2.1. Calcul paralel [49]

Un sistem de calcul paralel este un calculator cu mai multe procesoare care lucrează în paralel. Primele astfel de sisteme au fost supercomputerele. În plus, noile procesoare pentru PC-uri sunt sisteme de calcul paralel.

Programarea în calcul paralel [61-66] se bazează pe partiționarea întregii probleme în mai multe taskuri, alocarea task-urilor procesoarelor componente, precum și sincronizarea task-urilor pentru a obține rezultate concludente.

Dificultatea programării paralele este materializată prin faptul că necesită luarea în considerare a caracteristicilor arhitecturii paralele utilizate, precum și de caracteristicile rețelei de calculatoare.

Calculul științific se bazează pe construirea de modele matematice și pe utilizarea calculatoarelor pentru a analiza și rezolva probleme științifice. În principiu, se vorbește despre aplicații de simulare pe calculator și alte forme de probleme de calcul în diverse discipline științifice [52].

Prin calcul științific se proiectează și analizează algoritmi pentru soluționarea numerică a problemelor matematice din știință și inginerie, iar această activitate se numește analiză numerică [52].

## 2.2. Sisteme de calcul paralel

Capacitatea calculatoarelor de-a procesa cantități mari de date [67-76] are o continuă creștere. Pe măsură ce puterea de calcul a crescut, puterea de procesare a atins o barieră fizică, astfel încât mai multă putere de procesare nu poate fi pusă pe același chip fără supraîncălzire.

Această problemă a fost rezolvată punând mai multe procesoare pe același chip, rezultând astfel un chip multicore. În prezent, aceste chipuri multicore reprezintă kituri standard pentru laptop-uri, desktop-uri și smartphone-uri [52].

Din punct de vedere energetic, chip-le multicore sunt mai eficiente, iar numărul de nuclee care poate fi într-o continuă creștere este practic nelimitat.

În prezent, task-le care nu puteau fi executate, pot fi executate [50]. Pe de altă parte, procesele care durau zile sau chiar săptămâni pentru a fi executate, în prezent acestea pot fi executate mai repede. Însă, în timp ce această putere de procesare permite calculatoarelor să execute task-le mai repede, implică noi provocări.

Înainte apariției calculatoarelor multicore, software-ul a fost scris pentru o singură unitate de procesare centrală (CPU) pe un singur chip [51]. În prezent, pentru a exploata potențialul chip-lor multicore, software-ul trebuie scris în paralel.

Calculatorul paralel [59-66F] este un computer care conține mai multe procesoare fiind astfel capabil să proceseze informația concurrent, prin urmare se poate spune că mașinile paralele sunt singura modalitate care îndeplinește cerințele aflate într-o continuă creștere a puterii de calcul.

Prin urmare, un calculator paralel implică utilizarea mai multor procesoare, a unei rețele de interconectare, un mediu de dezvoltare a programelor paralele, unui sistem de operare precum și a unei paradigme de programare paralelă care include: comunicarea prin mesaje cum ar fi MPI, MPL, PVM, paralelismul datelor, un algoritm paralel (care implică algoritmul și descompunerea datelor în mai multe părți, distribuirea acestora mai multor procesoare care vor lucra simultan, coordonarea activităților, precum și comunicarea între procesoare) [50].

Astfel, programele paralele a o portabilitate scăzută deoarece depind direct de design-ul și organizarea hardware pentru care a fost scris programul paralel.

Există așadar două concepte dominante: SIMD și MIMD [49].

- SIMD (Single Instruction, Multiple Data) – Un singur flux de instrucțiuni, pe un singur procesor sau pe mai multe elemente de calcul, oferă paralelism lucrând simultan (concurrent) pe mai multe fluxuri de date, cum ar fi calculatoarele vectoriale;
- MIMD (Multiple Instruction, Multiple Data) – Mai multe fluxuri de instrucțiuni pe mai multe procesoare care lucrează simultan pe

diferite elemente de date. Atât calculatoarele paralele cu memorie partajată cât și cele cu memorie distribuită sunt exemple în acest caz [49]. Există așadar două categorii SISD (Single Instruction Single Data) și MISD (Multiple Instruction Single Data) [49]

### **2.2.1. Calculatoare cu memorie partajată**

Calculatoarele cu memorie partajată diferă foarte mult, dar în general, ele au în comun capacitatea procesoarelor de-a accesa întreaga memorie ca și spațiu global de adrese [53].

Mai multe procesoare pot lucra independent, dar partajează aceeași memorie. În plus, modificările făcute într-o locație de memorie de către un procesor, sunt vizibile tuturor celorlalte procesoare.

Un calculator cu memorie partajată este un sistem în care un număr de procesoare lucrează pe un spațiu de adrese care, din punct de vedere fizic, este distribuit și comun tuturor celorlalte procesoare.

Dacă se ține cont de timpul de acces la memoria principală, calculatoarele cu memorie partajată pot fi împărțite în două clase principale, UMA și NUMA [53].

#### **2.2.1.1. Sisteme cu acces uniform la memorie (UMA)**

În acest caz, latența și lățimea de bandă sunt același pentru toate procesoarele și pentru toate locațiile de memorie, fiind vorba despre multiprocesare simetrică (SMP [49], așa cum se poate vedea în figura 2.2.

Astfel, spațiul fizic de memorie este partajat de toate procesoarele atât la citire cât și la scriere, iar timpul de acces al tuturor procesoarelor la toate cuvintele memoriei partajate este același [53].

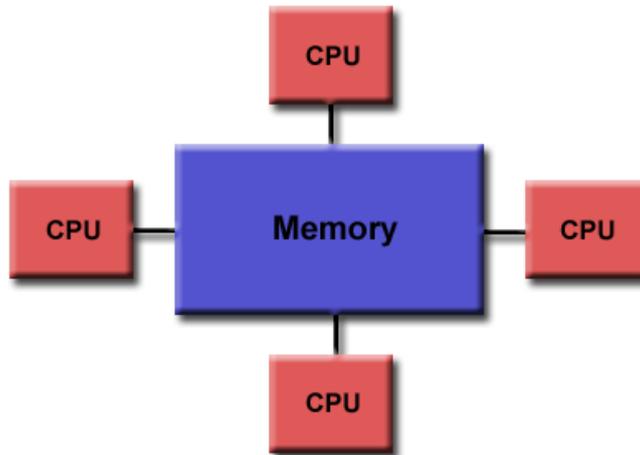


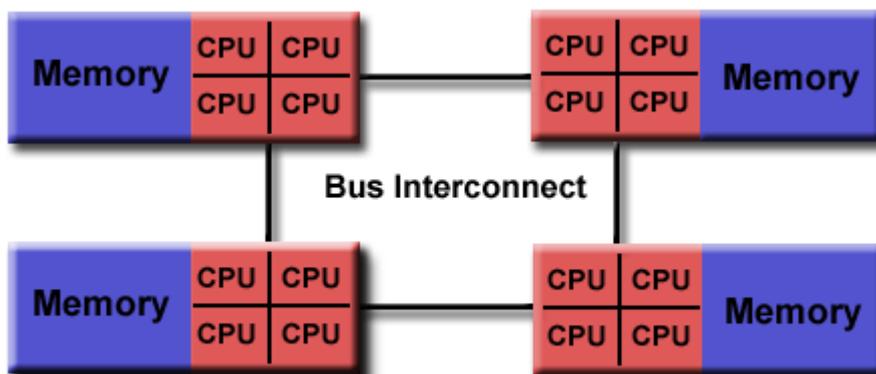
Figura 2.2. Sisteme cu acces uniform la memorie (Shared Memory (UMA)) [53]

### 2.2.1.2. Sisteme cu acces neuniform la memorie (NUMA)

În acest caz, din punct de vedere fizic, memoria este distribuită, dar din punct de vedere logic este partajată (comună), așa cum se observă în figura 2.3.

Aspectul fizic al acestor sisteme este destul de similar cu cel al sistemelor cu memorie distribuită, dar rețeaua face ca memoria întregului sistem să apară ca un singur spațiu de adrese.

Figura 2.3. Sisteme cu acces neuniform la memorie (Shared Memory (NUMA)) [53]  
Ținând cont de natura distribuită, performanța accesului la memorie variază



În funcție de procesorul care accesează și ce parte de memorie accesează (acces local versus acces la distanță). În acest caz, timpul de acces la resurse nu este constant, el depinzând de locația cuvântului de memorie la care se dorește accesul [53].

### **2.3. Predicții și provocări în supercomputing**

În următorii ani, progresele în supercomputing vor avea un impact în toate domeniile care utilizează orice tip de calcul și simulare.

Stocarea și distribuția energiei este un domeniu în care marile schimbări sunt așteptate să apară. Progresele în supercomputing, în astfel de domenii, se vor reflecta în cazul bateriilor de mare capacitate, dar la un cost mai mic. Așadar, prin utilizarea supercomputerelor, se preconizează o mai bună gestionare a rețelei precum și o semnificativă îmbunătățire a capacității de-a prezice cantitatea de energie care este necesară a fi produsă.

Unii experți presupun că până în 2027, supercomputing-ul va avea un rol în dezvoltarea energiei verzi, folosind fisiunea nucleară prin intermediul reactoarelor termonucleare care ar putea produce mai multă energie decât o centrală nucleară, dar fără generarea de deșeuri radioactive.

De asemenea, se așteaptă ca supercomputing-ul să joace un rol important în cazul predicțiilor referitoare la prognoză. Simulările de înaltă fidelitate și înaltă rezoluție vor duce la o prognozare mai bună a furtunilor și uraganelor, ajutând astfel zonele afectate pentru a le preveni.

Potențialul supercomputing-ului nu este limitat la aplicații legate de Pământ, ci și la simulări performante legate de domeniul cosmologic. Aceste componente includ materia neagră, energia neagră, geometria Universului, precum și explicația pentru rata de expansiune accelerată a Universului.

Un alt domeniu în care se așteaptă apariția unor efecte majore este cel medical. În zilele noastre, descoperirea de noi medicamente este un proces îndelungat care necesită screening-ul extins a mai multor compuși, însă cu ajutorul supercomputerelor se va schimba această situație, efectuându-se astfel simulări avansate în domeniul dinamicii moleculare, simulări care vor duce la accelerarea procesului de descoperire a medicamentelor. În plus, supercomputerele sunt utilizate pentru a studia potențialul medicinei regenerative, proces care ar putea elimina anumite boli, întârzierea efectului de îmbătrânire, și deci ar putea chiar extinde viața.

Referitor la discuția celor mai mari provocări ale supercomputingului, părerile sunt totuși împărțite, astfel, mulți cercetători argumentează că puterea și deci disiparea ei va fi cea mai mare constrângere.

Astfel, una din cele mai mari provocări tehnice va fi reducerea consumului de energie, luându-se în considerare oportunitatea de-a oferi performanță de 1000 ori mai mare în același consum de energie ca al supercalculatoarelor curente.

Alte probleme importante care includ hardware-ul aflat în curs de dezvoltare, software-ul și aplicații rezistente la eșec, proiectează algoritmi pentru a scala astfel de sisteme, și la programarea acestor sisteme care ar putea avea sute de milioane de nuclee.

Din alt punct de vedere, cea mai mare provocare va fi lățimea de bandă și capacitatea.

### **2.4. HPC în științele ingineresti**

Științele ingineresti reprezintă un inovator tehnologic major aparținând Comunității Europene și contribuie în mod substanțial la succesul său economic.

Industria se confruntă cu oportunități și provocări apărute din aplicații ale calculului de înaltă performanță. Eficiența și funcționarea cu succes a HPC-lui vor fi

importante în cazul înțelegerii problemelor ingineresti utilizând modelarea, simularea și optimizarea de înaltă fidelitate.

Subiectele care se referă la calcule ingineresti sunt extrem de diverse și acoperă exemple cum ar fi ingineria aeronautică, ingineria automotiv, ingineria civilă, seismică, ingineria fluxului de multi-fluide, procesare chimică, ingineria nucleară, ingineria biologică și medicală, dar și ingineria eoliană.

Obiectivul principal este de-a identifica provocările și obstacolele, dar și de-a dezvolta software de înaltă fidelitate pentru a influența deciziile operaționale, lucru care necesită o bună înțelegere a tendințelor hardware și software în domeniul HPC, precum arhitecturile GP-GPU Intel aflate în curs de dezvoltare .

### 2.4.1. Provocări ale domeniului energiei eoliene

Vântul este o sursă de energie regenerabilă. Energia vântului a căpătat un interes continuu la nivel mondial datorită faptului că este abundentă, curată și are o contribuție minimă la încălzirea globală sau la schimbările climatice.

Energia vântului este cea mai comună, și în același timp, sursă de energie regenerabilă nesecată. Pe de altă parte, energia vântului are un potențial imens în a juca un rol important pe piața de energie alături de sursele de energie convenționale [54].

Producția de electricitate generată de generatoarele de vânt poate fi stocată în baterii și poate fi convertită în 220V/50Hz ca. Producția de putere eoliană nu necesită combustibil, nu poluează, și este și silențioasă [55]. Această soluție este ideală pentru regiunile care au surse bune de vânt și care sunt departe de rețeaua electrică.

Energia eoliană poate oferi electricitate pentru frigidere, pompe de apă, mașini de spălat, televizoare, sisteme de iluminat, tool-uri de putere, sisteme de comunicație și nu numai.

Datorită extinderii industriei, producția crescută de energie eoliană, la nivel global, implică construirea de ferme eoliene în zone unde terenul este mai complex, cum ar fi dealuri, munți, văi, zone puternic instabile cu viteză mică a vântului [55].

Două caracteristici importante a vântului în cazul terenului complex sunt separarea fluxului și turbulențele anizotropie.

În prezent, majoritatea fermelor eoliene se află pe teren complex, așa cum se observă în figura 2.4, fapt ce determină ca turbulența (vântul puternic care conține fluctuații turbulente) să fie un factor important în cazul acestor așezări, iar componentele turbinei care funcționează în regim de turbulentă se află sub presiune și prin urmare sunt supuse riscului de-a eșua. Pe de altă parte, evitarea acestor turbulențe înseamnă costuri mari de energie pentru client [56].



Figura 2.4. Teren complex [56]

Modalitățile standard care caracterizează condițiile de vânt local se bazează pe valorile vitezei vântului pe parcursul a 10 minute, precum și pe gradul de turbulență.

Cele mai utilizate tehnici de simulare pentru densitatea vântului folosesc valoarea medie a ecuațiilor lui Reynolds Navier Stokes (RANS ) având turbulența  $k-\epsilon$  [55].

Simulările numerice diferă una de alta prin numărul de formulare, urmat de modelul de turbulență utilizat, tipul condițiilor de suprafață aplicate, tipul rețelei adoptate, precum și de tipul terenului considerat [57].

Prin utilizarea calculului paralel, pot fi implementate probleme legate de energia vântului la viteze variabile a vântului, probleme care se referă la soluționarea ecuațiilor (ecuațiile mișcării) folosind algoritmul Runge-Kutta.

De asemenea, pot fi implementate probleme care verifică integritatea structurală a turbinelor de vânt, precum și probleme legate de domeniul CFD, dar pentru toate aceste probleme, calculul paralel este un tool care ajută la reducerea timpului de soluționare.

## Concluzii

Riscul de-a nu înțelege puterea de calcul actuală, care este într-o continuă creștere, a calculatoarelor multicore, precum și creșterea masivă a puterii și performanței, este un risc de-a rămâne în urmă.

Calculul științific de înaltă performanță se află la intersecția unui număr de discipline și seturi de abilități științifice (în sensul că necesită cel puțin cunoștințe de bază și abilități în domniile științifice respective).

Computațiile apar într-un context practic, și necesită anumite cunoștințe de fizică și implică cunoștințe ingineresti, de unde și numele de "computație în știință și inginerie". Mai mult decât atât, problemele aplicative în astfel de domenii sunt probleme de algebră lineară și probleme de combinatorică, implementarea necesitând cunoștințe de analiză numerică, algebră liniară, analiză matematică dar și matematică discretă.

Aspectele referitoare la implementare se completează cu nevoia de-a înțelege arhitectura calculatorului atât la nivel de CPU cât și la nivel de calcul paralel.

În cele din urmă, o altă implicare a domeniului HPC o constituie nevoia de-a avea anumite abilități specifice de software management.

## **3. CONTROLUL SISTEMELOR EOLIENE LA VITEZĂ VARIABILĂ**

### **3.1. Introducere**

Acest capitol se bazează exclusiv pe șapte articole care sunt prezentate în lista de lucrări și care au fost publicate în reviste de specialitate.

Activitatea de cercetare prezentată în acest capitol se bazează pe metode de control a sistemelor eoliene la viteze variabile.

Multe lucrări, din domeniul energiei eoliene, se referă la controlul sistemelor eoliene la viteză constantă, fapt ce constituie un caz ideal. În realitate însă, viteza vântului este variabilă, cum este și cazul României. Astfel, pentru a controla sistemul eolian, trebuie să se țină cont de problemele implicate de variația vitezei vântului.

Primul subcapitol, prezintă câteva precizări de bază referitoare la controlul sistemelor eoliene dar și la problemele care apar datorită variației vitezei vântului. În acest sens, autorul prezintă modele matematice corespunzătoare turbinei și generatorului sincron cu magneți permanenți. Mai mult, autorul prezintă o metodă originală, care este bazată pe două structuri de control pentru a controla sistemul eolian la viteză variabilă a vântului.

Cel de-al doilea subcapitol prezintă o metodă propusă pentru controlul optim a unui sistem eolian care implică captarea energiei maxime la viteză variabilă. Acest lucru necesită controlul vitezei și cuplului turbinei de vânt, dar și adaptarea sarcinii generatorului la viteza vântului.

Prin urmare, pentru a extrage energia mecanică maximă la viteză variabilă a vântului, pe baza caracteristicii de putere a turbinei, autorul a propus o metodă de determinare a vitezei unghiulare mecanice de referință. O altă problemă importantă este determinarea rezistenței de sarcină a generatorului sincron cu magneți permanenți pentru a obține o funcționare în punctul de putere maximă a turbinei.

În cazul controlului sistemelor eoliene, problema fundamentală este determinarea vitezei unghiulare mecanice de referință. În cazul oricărui sistem de control, problema fundamentală este cunoașterea vitezei de rotație pentru care energia captată este maximă.

Subcapitolul 3 prezintă dinamica sistemului eolian care constă dintr-o turbină cuplată cu un generator sincron cu magneți permanenți, la încărcare optimă. Prin urmare, autorul prezintă mai multe studii de caz referitoare la comportamentul sistemului eolian.

Sistemul eolian lucrează optim la energie maximă dacă turbina de vânt captează energia posibilă maximă într-un interval de timp (de ordinul zilelor). În acest sens, subcapitolul 4 au fost prezentate trei metode originale de estimare a energiei maxime a unui sistem eolian care funcționează la viteză variabilă.

Problema fundamentală în cazul oricărui sistem de control este cunoașterea vitezei de rotație pentru care energia captă este maximă. Astfel, controlul optim a unui sistem eolian implică captarea energiei maxime la o viteză semnificativ variabilă a vântului. Acest lucru presupune controlul vitezei și cuplului turbinei de vânt și adaptarea sarcinii generatorului la viteza vântului.

Așadar, obiectivul principal a fost determinarea vitezei de rotație care corespunde energiei maxime date de turbina de vânt. Prin simulare, a fost determinată viteza unghiulară mecanică la care energie este maximă, considerându-se viteza vântului variabilă.

În cazul domeniului de lucru tehnico-economic, viteza vântului aparține intervalului  $4 \div 25$  [m/s], dar cele mai bune rezultate se obțin în intervalul  $12 \div 15$  [m/s].

Datorită momentelor de inerție mari ale turbinei, modificarea vitezei de rotație a generatorului sincron cu magneți permanenți este un proces lent, prin urmare, urmărirea variației rapide a vitezei vântului (cum este necesar în cazul funcționării în MPP) nu este posibilă. Astfel, determinarea punctului de putere maximă este o problemă complexă cu implicații semnificative în cazul determinării vitezei de rotație care corespunde energiei maxime, precum și în cazul reglării calității la viteză variabilă, cum este cazul real al României.

Considerând o viteză variabilă a vântului, problema este determinarea vitezei de rotație care corespunde energiei maxime astfel încât să se obțină un profit maxim, din punct de vedere economic, pe locația în care vor fi instalate turbinele de vânt. În acest sens, subcapitol 5 prezintă o analiză a dinamicii sistemului eolian la viteză variabilă a vântului. Această analiză este bazată pe simulări numerice care utilizează ecuația mișcării. Pentru a realiza această analiză, autorul a utilizat modele matematice obișnuite atât pentru turbină cât și pentru generatorul sincron cu magneți permanenți.

Datorită faptului că sistemul eolian lucrează optim dacă turbina captează energia maximă posibilă într-un interval de ordinul zilelor dat, subcapitolul 6 tratează exact acest aspect: obținerea energiei optime la viteză variabilă a vântului. Astfel, viteza unghiulară mecanică optimă  $\omega_{OPTIM}$  este determinată la o viteză vântului măsurată, astfel încât energia obținută să fie maximă.

Astfel, acest subcapitol prezintă determinarea experimentală a zonei de optim energetic și dinamica sistemului la diferite încărcări.

Toate contribuțiile prezentate în acest capitol sunt verificate prin simulări numerice. Aceste contribuții se bazează pe modele matematice care modelează fenomenele fizice.

## 3.2. Precizări de bază referitoare la controlul sistemelor eoliene

### 3.2.1. Precizări

În acest subcapitol, autorul prezintă o metodă originală care se bazează pe două structuri diferite de control a sistemelor eoliene la viteze variabile ale vântului [27]. În cazul acelor sisteme eoliene de putere care prezintă momente mari de inerție, datorită vitezei variabile a vântului, viteza de rotație a turbinei și generatorului sincron cu magneți permanenți nu poate fi modificată în timp astfel încât să se obțină funcționarea în MPP a turbinei. În acest sens, autorul prezintă două structuri de control [27]. Prima structură este bazată pe calcularea sarcinii generatorului sincron cu magneți permanenți, iar cea de-a doua se bazează pe modificarea sarcinii folosind regulatoare. Pentru ambele structuri a fost utilizată viteza de rotație a turbinei.

Viteza vântului variază conform relației (3.1), dar cele mai bune rezultate se obțin în intervalul  $12 \div 15$  m/s.

$$V = 4 \div 25 [m/s] \quad (3.1)$$

Sistemele eoliene de putere sunt controlate considerând valoarea medie a vitezei vântului [8-17]. Recent, au fost propuse structuri de control pe baza măsurării vitezei instantanee a vântului [1-5], iar aceste structuri utilizează modele

matematice corespunzătoare turbinei. În cazul funcționării sistemelor eoliene, datorită variației vitezei vântului, apar o serie de probleme importante cum ar fi:

1. Determinarea sarcinii generatorului se realizează astfel încât să se obțină energia maximă posibilă pe o perioadă lungă (de ordinul zilelor);
2. Determinarea celor mai eficiente metode de control;
3. Determinarea unor modele matematice reale pentru turbină și generator;
4. Stabilirea valorilor limită astfel încât să se potrivească cu condițiile inițiale (viteza și sarcina generatorului) este realizată prin simulare.
5. Stabilirea calității ciclului de lucru pentru structuri de control diferite trebuie realizată prin simulare.

În cazul celor mai multe articole [1,21], au fost propuse metode de control la putere mare, dar care implică oprirea turbinei datorită faptului că creșterea artificială de putere nu este obținută de la vânt, ci din variația energiilor cinetice a maselor aflate în mișcare de rotație. Din acest motiv, este recomandată funcționarea la energie maximă care este obținută într-un interval mare de timp. Astfel, este necesară determinarea vitezei generatorului astfel încât energia captată de turbină să atingă valoarea maximă la viteză variabilă în timp. Valoarea de referință a vitezei de rotație poate fi obținută folosind două metode:

1. Necesitatea de-a calcula rezistența de sarcină a generatorului utilizând modelele matematice ale turbinei și generatorului și măsurând viteza vântului;
2. Folosind regulatoare care modifică sarcina generatorului astfel încât să se obțină viteza de referință.

La anumite valori ale constantelor regulatorului, în cazul ajustării regulatorului apar suprareglări și instabilități. Dacă dependența dintre viteza unghiulară de referință și viteza vântului este dată de producătorul turbinei, astfel de situații pot fi evitate. Rezistența de sarcină a generatorului poate fi calculată, iar sistemul eolian funcționează în parametrii optimi dacă se cunoaște viteza unghiulară de referință. Modificarea vitezei de rotație a generatorului este lentă datorită momentelor foarte mari de inerție a turbinei, neputând urmări această variație rapidă a vitezei vântului așa cum este necesar pentru a putea lucra în MPP [1], [3], [15].

Cele mai importante specificații privind controlul sistemelor eoliene sunt redate mai jos:

1. Datorită inerțiilor mecanice mari, simulările și toate celelalte rezultate practice trebuie să aibă intervale de cel puțin ordinul zilelor.
2. Cele mai bune sisteme de control trebuie să ofere energie maximă într-un interval lung de timp.
3. Controlul sistemelor eoliene la putere maximă obținută de la generatorul electric duce la frânarea turbinei și la o creștere artificială a puterii pentru moment. Creșterea artificială de putere nu este obținută de la vânt, ci de la variația energiilor cinetice a maselor aflate în mișcare de rotație. În final, după o perioadă lungă, energia obținută este mai mică decât în cazul anterior.
4. Pe de altă parte, controlul sistemelor eoliene la energie maximă, care este obținută de la generatorul electric, este soluția corectă din punct de vedere tehnico-economic, și necesită estimarea mărimilor fundamentale dependente de viteza vântului, cum ar fi viteza de rotație a turbinei, intensitatea curentului sau rezistența de sarcină a generatorului.

Controlul optim al sistemelor eoliene implică captarea energiei maxime la viteză variabilă. Acest lucru necesită controlul vitezei de rotație și a cuplului turbinei,

precum și adaptarea sarcinii generatorului la viteza vântului. În intervalul de eșantionare  $\Delta t$ , generatorul electric trebuie să atârne energia eoliană maximă disponibilă, diferența energiilor cinetice a maselor aflate în mișcare de rotație dar și viteza de rotație reală a generatorului ia valoarea vitezei de rotație de referință.

Pe intervalul  $\Delta t$ , la  $V(t)$ , energia maximă disponibilă este obținută luând viteza de referință și variația energiilor cinetice precum și creșterea și descreșterea sarcinii adiționale a generatorului. Sistemul eolian lucrează optim la, la energie maximă, când turbina are energia maximă posibilă într-un interval lung de timp, de ordinul zilelor.

### 3.2.2. Modele matematice

#### 3.2.2.1. Modele matematice ale turbinei

Caracteristicile mecanice experimentale ale turbinei sunt date printr-o funcție analitică ale cărei caracteristici trec prin punctele experimentale, așa cum este prezentat în figura 3.1, [3]. Modelul matematic considerat pentru turbină permite estimarea vitezei unghiulare mecanice de referință  $\omega_{ref}$ .

Ecuția (3.2) reprezintă expresia analitică propusă pentru turbină care însă este redusă la arborele generatorului.

$$M_{TV} = A \cdot \sin\left(\frac{\omega}{V} \cdot B\right) \quad (3.2)$$

unde  $A$  și  $B$  sunt obținute cu ajutorul caracteristicilor experimentale mecanice,  $V$  este viteza vântului, iar  $\omega$  este viteza unghiulară mecanică. Figura 3.1 arată caracteristicile experimentale mecanice ale turbinei pentru următoarele viteze ale vântului  $V=8.6[m/s]$ ,  $6.3[m/s]$  și  $4[m/s]$ .

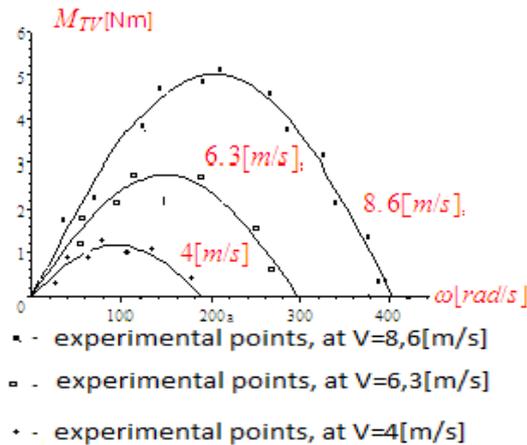


Figura 3.1. Caracteristicile mecanice experimentale

Valoarea caracteristicilor mecanice ( $M_{TV}(\omega)$ ) este obținută cu ajutorul relației (3.3).

$$M_{TV} = 11 \cdot \left(\frac{V}{13}\right)^{1.9} \cdot \sin\left(\frac{\omega_{GE}}{V} \cdot 6.6666 \cdot 10^{-2}\right) \quad (3.3)$$

Figura 3.2 prezintă caracteristica mecanică (zona umbrită) obținută în cazul variației vitezei vântului în intervalul  $V_{MAX}=8.6[m/s]$  și  $V_{MIN}=4[m/s]$ . În cazul vitezei medii a vântului ( $V_{MEDIE}=(8.6+4)/2=6.3[m/s]$ ), a fost obținută caracteristica mecanică reprezentată prin linie punctată.

Viteza unghiulară mecanică de referință ( $\omega_{ref}$ ), calculată cu ajutorul valorii instantanee a vitezei vântului este  $\omega_{ref1}^*$ , iar cea calculată cu ajutorul valorii medii a vântului este  $\omega_{ref2}^*$ . Cele două valori sunt diferite, așa cum se observă în figura 3.2.

Pentru  $\omega = \omega_{ref1}^*$  și  $V=V_{MAX}=8.6[m/s]$ , punctul de funcționare este  $P_1$ . La  $\omega = \omega_{ref2}^*$  și  $V=V_{MEDIE}=6.3[m/s]$  punctul de funcționare este  $P_2$ , iar pentru  $V=V_{MIN}=4[m/s]$  punctul de funcționare este  $P_3$ .

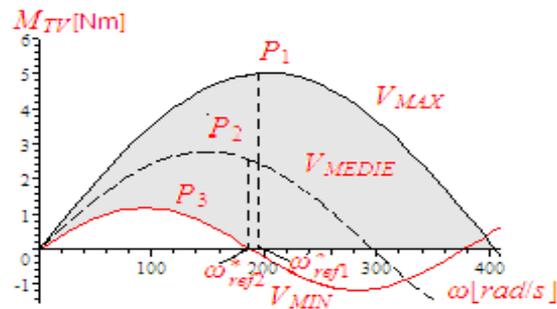


Figura.3.2. Caracteristicile mecanice la  $V_{MAX}=8.6[m/s]$  și  $V_{MIN}=4[m/s]$   
Caracteristicile de putere pentru  $V_{MAX}=8.6[m/s]$  și  $V_{MIN}=4[m/s]$  sunt prezentate în figura 3.3.

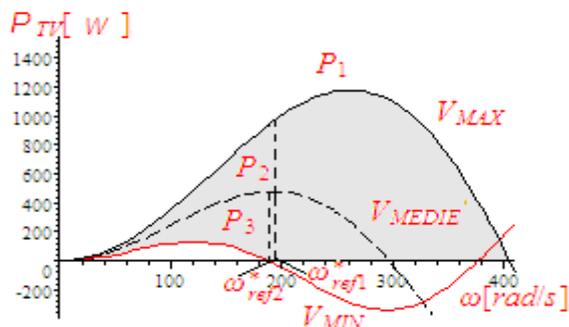


Figure.3.3. Caracteristicile de putere la  $V_{MAX}=8.6[m/s]$  și  $V_{MIN}=4[m/s]$

### 3.2.2.2. Modelul matematic al vitezei vântului

Dacă variația reală a vitezei vântului are forma prezentată în figura 3.4, în care  $V$  poate fi considerat ca având o evoluție sinusoidală de perioadă  $T=35[s]$ . Perioada variației vitezei vântului cuprinsă între  $V_{MAX}=8.6[m/s]$  și  $V_{MIN}=4[m/s]$  a fost determinată luând în considerare măsurarea vitezei reale a vântului, așa cum este prezentat în figura 3.4.

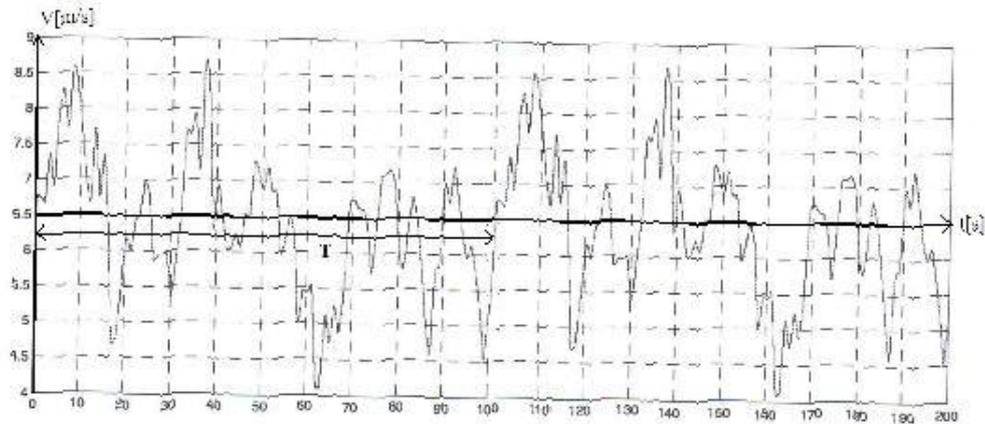


Figura 3.4. Variația reală a vitezei vântului  
Viteza medie a vântului  $V_{MEDIE}=6.3[m/s]$ , poate fi exprimată cu ajutorul relației (3.4), așa cum se poate vedea în figura 3.5.

$$V(t) = V_{MEDIE} + 2.3 \cdot \sin\left(2 \cdot \frac{\pi}{T}\right) = 6.3 + 2.3 \cdot \sin(0.17943t) \quad (3.4)$$

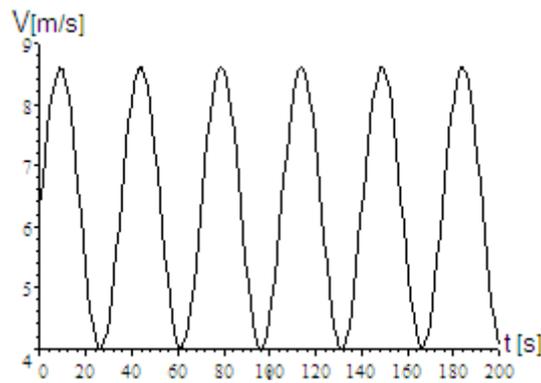


Figura 3.5. Viteza modelată a vântului

Dacă viteza generatorului se presupune constantă, având o anumită valoare, și că viteza vântului are o variație sinusoidală, problema este determinarea vitezei de rotație a generatorului astfel încât energia captată de către turbină în intervalul de timp  $T$  să fie maximă.

### Precizări

Punctul de putere maximă  $P_{MAX1}$  a turbinei are coordonatele  $(\omega_{M1}, P_{M1})$  la viteza vântului  $V_{MIN}$ , în timp ce  $P_{MAX2}$  are coordonatele  $(\omega_{M2}, P_{M2})$  la viteza vântului  $V_{MAX}$ . Puterea maximă a turbinei depinde de caracteristica vitezei vântului, conform relației (3.5).

$$P_{MAX} = K \cdot V^3 \quad (3.5)$$

Prin urmare, în cazul analizat al vitezei minime a vântului  $V_{\text{MIN}}=4[\text{m/s}]$  și cea maximă  $V_{\text{MAX}}=8.6[\text{m/s}]$ , puterea maximă dată de turbină are următoarele valori:

$$P_{\text{MAX1}} = K \cdot 4^3 = K \cdot 64[\text{W}], \text{ at } V_{\text{MIN}}=4[\text{m/s}]$$

$$P_{\text{MAX2}} = K \cdot 8.6^3 = K \cdot 636.06[\text{W}], \text{ at } V_{\text{MAX}}=8.6[\text{m/s}]$$

Figura 3.6 prezintă dependența puterii de  $\omega$ , la  $V_{\text{MIN}}=4[\text{m/s}]$  și  $V_{\text{MAX}}=8.6[\text{m/s}]$ .

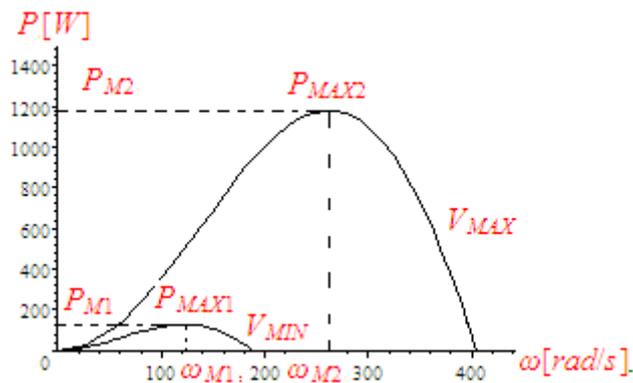


Figura 3.6. Dependența puterii de  $\omega$ , at  $V$  ca și parametru

Pentru a funcționa în punctul de putere maximă ( $P_{\text{MAX1}}$  și  $P_{\text{MAX2}}$ ) și respectiv la  $\omega_{\text{M1}}=121[\text{rad/s}]$  și  $\omega_{\text{M2}}=261[\text{rad/s}]$ , din ecuația mișcării dată în (3.6), la  $J=50[\text{kg}\cdot\text{m}^2]$ ,  $d\omega=261-121=140[\text{rad/s}]$ ,  $dt=10[\text{s}]$  (din variația în timp a vitezei vântului prezentată în figura 4), ecuația mișcării devine (3.7).

$$M_{\text{TV}} - M_{\text{G}} = J \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (3.6)$$

$$M_{\text{TV}} - M_{\text{G}} = 50 \cdot \frac{140}{10} = 700[\text{Nm}] \quad (3.7)$$

Din moment ce  $M_{\text{TV}}$  și  $M_{\text{G}}$  care au valori în intervalul  $0 \div 6[\text{Nm}]$ , nu pot fi obținute, se poate concluziona că sistemul eolian nu poate funcționa în punctul de putere maximă. Neputând lucra în MPP, problema este de-a determina viteza de rotație a turbinei, astfel încât sistemul eolian să atingă maximul energetic pe-o perioadă de ordinul zilelor.

### 3.2.2.3. Modelul matematic al generatorului sincron cu magneți permanenți

În aplicațiile curente ale sistemelor eoliene, datorită faptului că procesele sunt lente și implică inerții mecanice mari, pentru geratorul electric a fost considerat modelul ortogonal simplificat, model care este dat în [3]. Pentru un sistem eolian care puterea  $P=5[\text{KW}]$ , parametrii generatorului sunt următorii:  $R=1.6[\Omega]$ ,  $L_d=0.07[\text{H}]$ ,  $L_q=0.08[\text{H}]$ , și  $\Psi_M=1.3[\text{Wb}]$ .

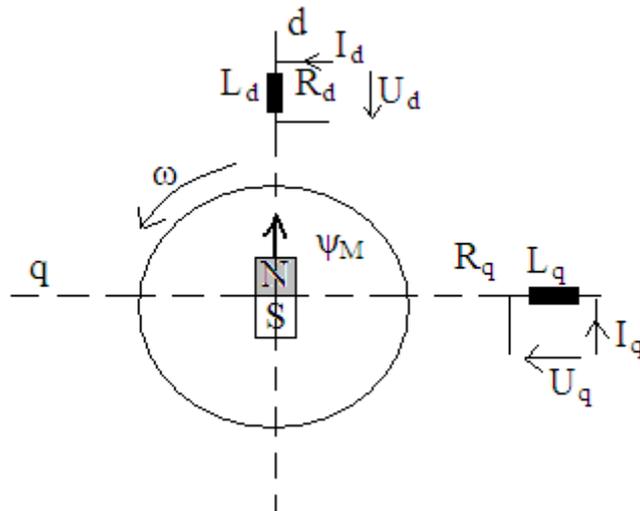


Figura 3.7. Modelul ortogonal al generatorului sincron cu magneți permanenți  
În cazul regimului staționar, este utilizat sistemul algebric (3.8) al generatorului sincron cu magneți permanenți.

$$\begin{cases} -U \cdot \sqrt{3} \cdot \sin(\theta) = R_1 \cdot I_d - \omega \cdot L_q \cdot I_q \\ U \cdot \sqrt{3} \cdot \cos(\theta) = R_1 \cdot I_q + \omega \cdot L_d \cdot I_d + \omega \cdot \Psi_M \\ M_{PMSG} = p_1 \cdot (L_d - L_q) \cdot I_d \cdot I_q + I_q \cdot \Psi_M \end{cases} \quad (3.8)$$

Unde  $M_{PMSG} = M_G$  este cuplul generatorului,  $R_1$  este rezistența înfășurării statornice,  $L_d$  este inductanța înfășurării statornice pe axa d,  $L_q$  este inductanța înfășurării statornice pe axa q,  $p_1$  este numărul de perechi de poli, iar  $\Psi_M$  este fluxul permanent.

### Determinarea sarcinii generatorului

Problema constă în determinarea sarcinii generatorului, astfel încât viteza de rotație să oscileze în jurul valorii optime.

Folosind relația (1.6), și integrând pe-o perioadă de timp  $T$ , se obține:

$$\int_0^T M_{TV} \cdot dt - \int_0^T M_G \cdot dt = J \cdot (\omega_{final} - \omega_{initial})$$

For  $\omega_{final} = \omega_{initial}$ , s-a obținut:

$$\int_0^T M_{TV} \cdot dt - \int_0^T M_G \cdot dt = 0$$

La o viteză instantanee a vântului  $V(t) = 6.3 + 2.3 \cdot \sin 0.17943t$ ,  $\omega_{ref1}^* = 197.92 [rad / s]$  s-a obținut.

Dacă  $M_G = ct$ , atunci  $M_G = M_{TV-mediu} = \frac{1}{T} \int_0^T M_{TV} \cdot dt$ , pentru această valoare medie a cuplului, rezistența de sarcină este  $R=138.83[\Omega]$ .

#### 3.2.3. Controlul sistemului eolian

Dacă viteza unghiulară de referință ( $\omega_{ref}$ ) este cunoscută, rezistența de sarcină de referință a generatorului poate fi determinată. Dacă rezistența de referință ( $R=138.83[\Omega]$ ) este cunoscută, controlul sistemului eolian poate fi realizat în două moduri:

##### 1. Rezistența de sarcină are o valoare prescrisă

Viteza unghiulară mecanică  $\omega_{ref1}^* = 197.92 [rad / s]$  a fost calculată folosind relația  $V(t) = 6.3 + 2.3 \cdot \sin 0.17943t$ . Pentru această valoare a vitezei unghiulare mecanice  $\omega_{ref1}^*$ , rezistența de sarcină este  $R=138.83[\Omega]$ . Pe baza acestor rezultate, figura 3.8 prezintă variația în timp a lui  $\omega$  pentru  $\omega(0)=177.92[rad/s]$ , iar figura 3.9 prezintă variația în timp a lui  $\omega$  pentru  $\omega(0)=277.92[rad/s]$ .

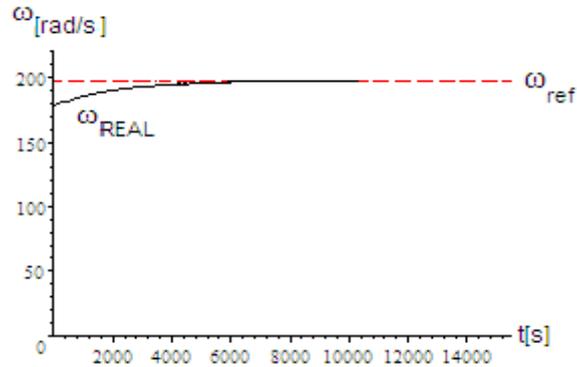


Figura 3.8. Variația în timp a lui  $\omega$  la  $\omega(0)=177.92[\text{rad/s}]$

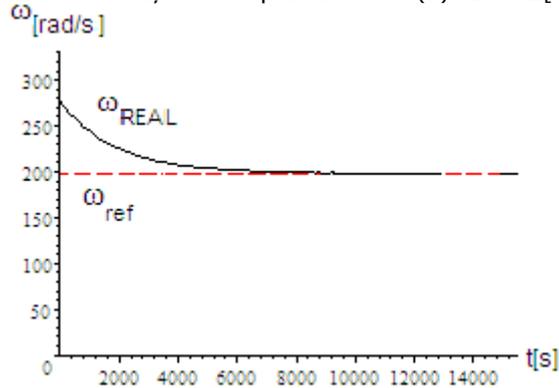


Figura 3.9. Variația în timp a lui  $\omega$  la  $\omega(0)=277.92[\text{rad/s}]$

## 2. Rezistența de sarcină este modificată de reguloare

### a. Regulator P

Ecuția regulatorului P este dată în (3.9).

$$\Delta R = K_1 \cdot \Delta \omega = 4.5064 \cdot 10^{-2} \cdot (\omega - \omega_{ref}^*) \quad (3.9)$$

Ecuția (1.9) ar putea fi scrisă sub forma de mai jos:

$$R = R^* + 4.5064 \cdot 10^{-2} \cdot (\omega - \omega_{ref}^*)$$

Constanta de proporționalitate are valoarea:  $K_1 = 4.5064 \cdot 10^{-2}$ .

Pentru viteza unghiulară  $\omega_{ref1}^* = 197.92[\text{rad/s}]$  și  $R^* = 138.83[\Omega]$ , ecuația regulatorului P este  $R = 138.83 + 4.5064 \cdot 10^{-2} \cdot (\omega - 197.92)$  iar variația în timp a lui  $\omega$ , pentru  $\omega(0) \gg \omega_{ref1}^*$ , și  $\omega(0) \ll \omega_{ref1}^*$ , este obținută cu ajutorul ecuației mișcării.

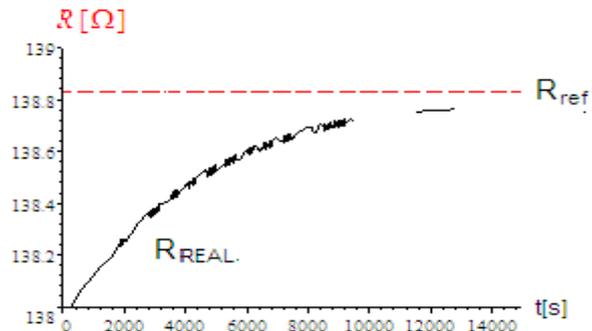


Figura 3.10. Variația în timp a lui R pentru  $\omega(0)=177.92[\text{rad/s}]$

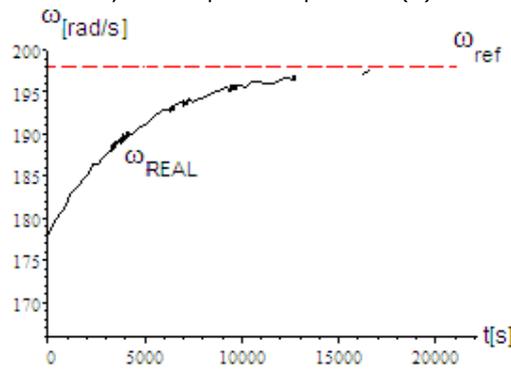


Figura 3.11. Variația în timp a lui  $\omega$  pentru  $\omega(0)=177.92[\text{rad/s}]$

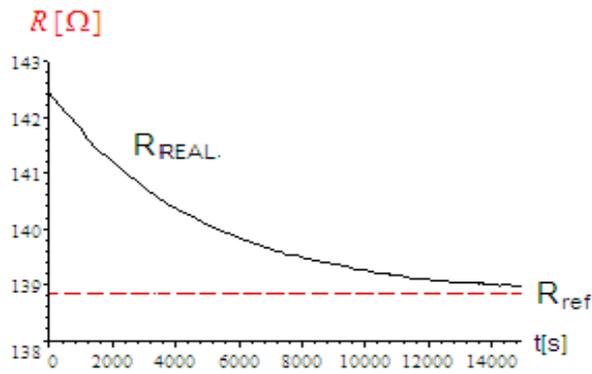
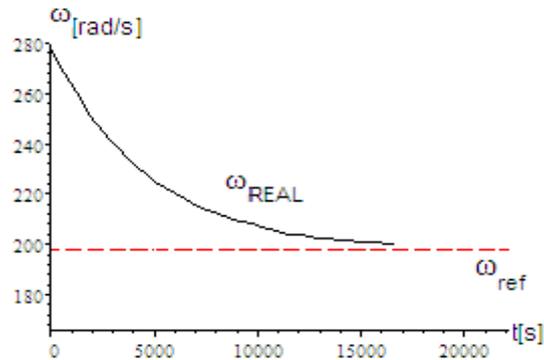


Figura 3.12. Variația în timp a lui R pentru  $\omega(0)=277.92[\text{rad/s}]$

Figura 3.13. Variația în timp a lui  $\omega$  pentru  $\omega(0)=277.92[\text{rad/s}]$ 

**b. Regulator PI (viteza unghiulară mecanică  $\omega$  are o valoare prescrisă)**

Ecuția regulatorului PI este dată în (3.10).

$$\Delta R = K_1 \cdot \Delta\omega + K_2 \int \Delta\omega \cdot dt = K_1 \cdot (\omega - \omega_{ref}) + K_2 \int (\omega - \omega_{ref}) \cdot dt \quad (2.10)$$

sau,

$$\frac{dR}{dt} = K_1 \cdot \frac{d\omega}{dt} + K_2 \cdot (\omega - \omega_{ref})$$

Constanta de proporționalitate este  $K_1 = 4.5064 \cdot 10^{-2}$ . Astfel, ecuația regulatorului PI este următoarea:

$$\frac{dR}{dt} = 4.5064 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{d\omega}{dt} + K_2 \cdot (\omega - \omega_{ref})$$

Pentru viteza vântului dată de ecuația  $V(t) = 6.3 + 2.3 \cdot \sin 0.17943t$ , viteza unghiulară mecanică are următoarea formă:  $\omega_{ref1}^* = 197.92[\text{rad/s}]$ .

Determinarea constantelor regulatorului ( $K_1$  și  $K_2$ ) se realizează cu ajutorul următoarelor simulări.

Atât ecuația mișcării cât și ecuația regulatorului PI formează un sistem de ecuații diferențiale. Acest sistem modelează comportamentul ansamblului care constă dintr-o turbină și un generator sincron cu magneți permanenți.

$$\left\{ \begin{aligned} & -845 \cdot \omega \cdot (5 \cdot R + 8) \cdot \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot R^2 + 2000 \cdot R + 1600}{(1250 \cdot R^2 + 4000 \cdot R + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2} + \\ & + 8.27 \cdot 10^{-2} \cdot \left( (6.3 + 2.3 \sin 0.179t)^{1.9} \sin \left( \frac{\omega}{(6.3 + 2.3 \sin 0.179t)} \cdot 6.6 \cdot 10^{-2} \right) \right) = 50 \cdot \frac{d\omega}{dt} \\ & \frac{dR}{dt} = 4.5064 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{d\omega}{dt} - 0.01 \cdot (\omega - 197.92) \\ & R(0) = 74.371[\Omega] \\ & \omega(0) = 174[\text{rad/s}] \end{aligned} \right.$$

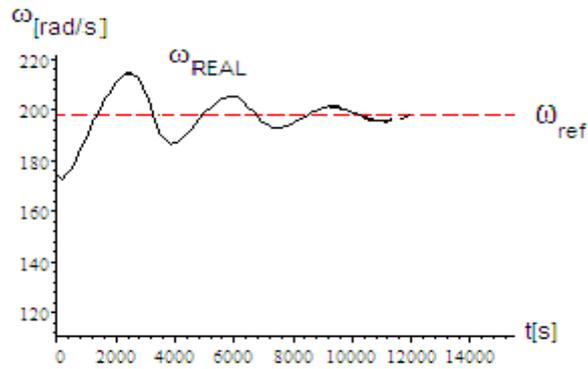


Figura 3.14. Variația în timp a lui  $\omega$ , la  $\omega(0)=174[\text{rad/s}]$ , și  $R(0)=74.371[\Omega]$

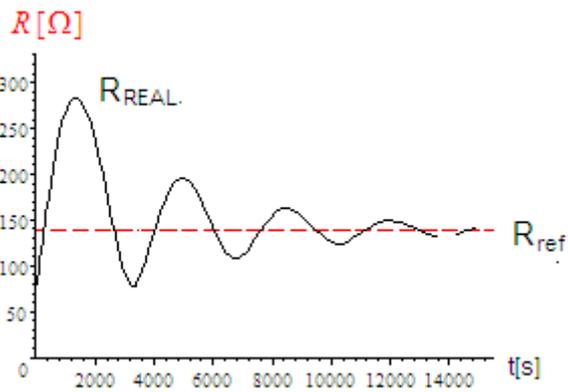


Figura 3.15: Variația în timp a lui R la  $\omega(0)=174[\text{rad/s}]$  și  $R(0)=74.371[\Omega]$

### c. Regulator PD (viteza unghiulară mecanică $\omega$ are o valoare prescrisă)

Ecuția regulatorului PD este dată în (3.11).

$$\Delta R = K_1 \cdot \Delta \omega + K_3 \cdot \frac{d\Delta \omega}{dt} = K_1 \cdot (\omega - \omega_{ref}) + K_3 \cdot \frac{d(\omega - \omega_{ref})}{dt} \quad (3.11)$$

sau,

$$R = R_{ref} + K_1 \cdot (\omega - \omega_{ref}) + K_3 \cdot \frac{d\omega}{dt}$$

Pentru  $K_1 = 4.5064 \cdot 10^{-2}$  și  $\omega_{ref1}^* = 197.92 [\text{rad} / \text{s}]$ , se obține o altă formă a ecuației regulatorului PD:

$$R = R_{ref} + 4.5064 \cdot 10^{-2} \cdot (\omega - 197.92) + K_3 \cdot \frac{d\omega}{dt}$$

### Determinarea sarcinii generatorului folosind

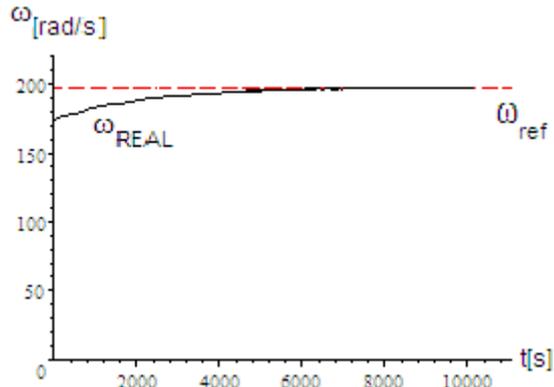
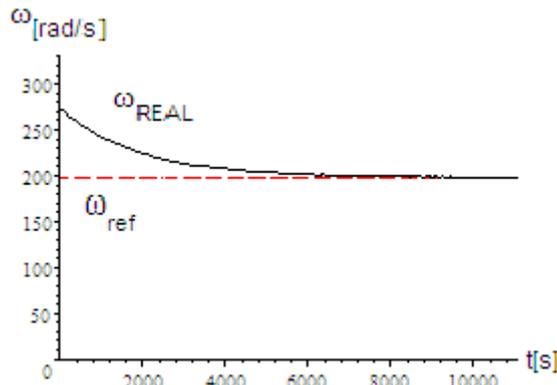
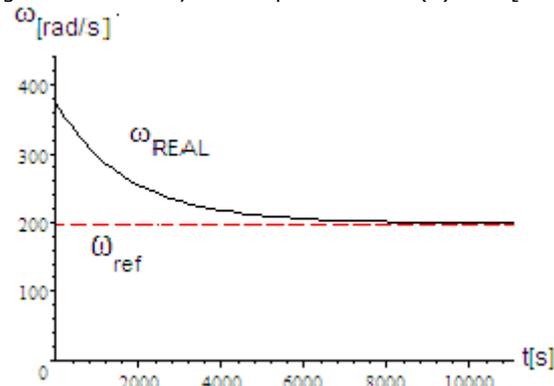
$$M_G = 2.809 \frac{\omega}{R} \quad (\text{modelul simplificat})$$

La viteza instantanee a vântului  $V(t) = 6.3 + 2.3 \cdot \sin 0.17943t$ , viteza unghiulară de referință are următoarea formă:  $\omega_{ref1}^* = 197.92 [\text{rad} / \text{s}]$ . Pentru  $M_G = \text{ct.}$ ,

$$M_G = M_{TV\text{-mediu}} = \frac{1}{T} \int_0^T M_{TV} \cdot dt. \text{ Aceasta este valoarea medie a cuplului pentru}$$

care, rezistența de sarcină este  $R = 235.64 [\Omega]$ , iar  $M_G = 2.809 \frac{\omega}{R}$  s-a obținut din

$$\text{următorul sistem: } \begin{cases} M_G = -2.809 \cdot \frac{\omega}{R} \\ \omega = 197.92 \\ M_G = -2.3594 \\ R = 235.64 \end{cases}.$$

Figura 3.16. Variația în timp a lui  $\omega$  la  $\omega(0)=174[\text{rad/s}]$ Figura 3.17. Variația în timp a lui  $\omega$  la  $\omega(0)=274[\text{rad/s}]$ Figura 3.18. Variația în timp a lui  $\omega$  la  $\omega(0)=374[\text{rad/s}]$ 

### 3.2.4. Structura de control a sistemului eolian

Modificarea sarcinii generatorului s-a realizat prin intermediul convertoarelor de putere interpusă între turbină și blocul de stocare a energiei care poate fi obținut în două variante:

1. În acumuloare electrică (AE), așa cum se observă din figura 3.19.

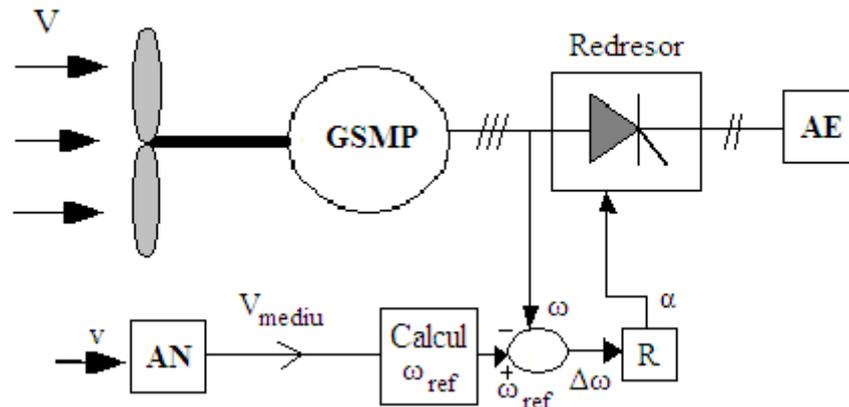


Figura 3.19. Controlul sistemului eolian folosind  $\omega_{ref}$  ca și referință

Anemometrul (AN) poate da fie viteza medie a vântului, fie viteză instantanee într-un interval de timp  $T$ , măsurând viteza vântului [14], putându-se astfel calcula viteza de rotație de referință cu ajutorul relației (3.12).

$$n_{ref} = \omega_{ref} \cdot 2 \cdot \pi \quad (3.12)$$

Prin măsurarea vitezei generatorului se obține  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot n$ , iar diferența  $\Delta\omega = \omega_{ref} - \omega$  reprezintă intrarea regulatorului, așa cum se prezintă în figura 3.19. Regulatorul R modifică sarcina generatorului la ieșirea ( $\alpha$ ) prin intermediul unghiului de aprindere al tiristorului redresorului trifazat [7].

Energia maximă disponibilă la viteza vântului  $V(t)$ , în intervalul  $\Delta t$ , este captată urmărind viteza unghiulară de referință ( $\omega_{ref}$ ).

2. În acumuloare electrică (AE), super-capacitoare (SC), și rețea, așa cum se prezintă în figura 3.20.

Funcționarea la viteză optimă (RPM),  $\omega$ , a fost obținut prin estimarea vitezei vântului cu ajutorul anemometrului (AN) din figura 3.20 și prin calcularea lui  $\omega_{ref}$ .

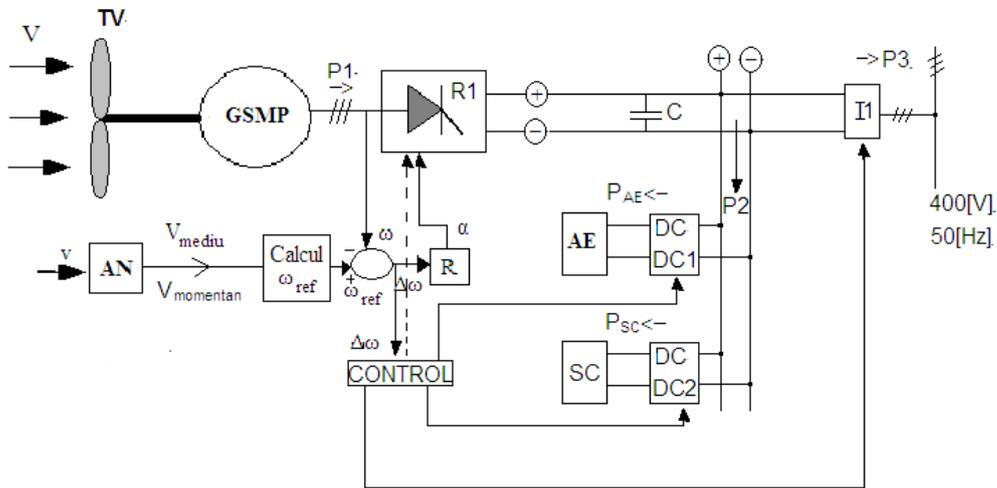


Figura 3.20. Controlul sistemului eolian (TV+GSMP)

### Algoritmul de control

1. Calcularea vitezei unghiulare mecanice ( $\omega_{ref}$ ) se face pe baza modelului matematic al turbinei, măsurând viteza vântului cu ajutorul anemometrului (AN);
2. Prin măsurarea vitezei unghiulare mecanice ( $\omega$ ) la arborele generatorului, se poate calcula diferența  $\Delta\omega = \omega_{ref} - \omega$ , care reprezintă intrarea regulatorului R;
3. Cu ajutorul regulatorului R, sarcina generatorului este modificată prin intermediul unghiului de conducție al tiristoarelor redresorului comandat;
4. Pentru  $\omega = \omega_{ref}$  se obține energie maximă într-un interval de timp oarecare, astfel încât puterea sistemului este:  $P_1 = P_2 + P_3$ ;
5. Puterea  $P_1$  generată de GSMP (generatorul sincron cu magneți permanenți) este împărțită în două componente:
  - $P_2$  – puterea dată elementelor de stocare, cum ar fi acumuloare electrice AE (PAE) și super-capacitoare SC (PSC);
  - $P_3$  – puterea dată rețelei electrice, prin inverterul  $I_1$ . Această putere poate fi menținută constantă printr-un control pozitiv al unghiului de conducție al tiristoarelor. În acest fel, variația de putere, care este generată de variația vitezei vântului, poate fi diminuată prin stocarea vârfurilor de energie în AE/SC printr-un control corespunzător al convertoarelor (DC-DC1 și DC-DC2).

## Precizări

1. Controlul redresorului  $R_1$  se realizează prin intermediul vitezei de rotație a generatorului.
2. Controlul invertorului  $I_1$  se realizează menținând constantă puterea  $P_3$ .
3. Controlul convertoarelor DC-DC1 și DC-DC2 se realizează considerând puterea  $P_2=P_1-P_3$  și urmărind variația vitezei vântului.

## Concluzii

Acest subcapitol prezintă problemele legate de variația vitezei vântului.

Modelele matematice ale turbinei și generatorului sincron cu magneți permanenți permit determinarea vitezei de rotație optime, astfel încât energia captată să fie maximă.

Utilizând modele matematice corespunzătoare pentru turbină și generator, au fost simulate diferite moduri de funcționare, și au fost determinate energiile obținute în condițiile în care viteza unghiulară a fost calculată atât cu ajutorul vitezei instantanee cât și cu ajutorul vitezei medii.

Din simulările prezentate mai sus, pot fi subliniate următoarele aspecte importante referitoare la controlul sistemelor eoliene:

În toate cazurile analizate, viteza unghiulară mecanică prescrisă ( $\omega_{ref}$ ) pentru sarcina generatorului este obținută în 12200[s], adică 3.38[h].

Dacă ajustarea rezistenței de sarcină este realizată cu ajutorul regulatorului P, viteza unghiulară mecanică este obținută în 3.38[h] și nu apar suprasarcini.

Condițiile inițiale (viteza unghiulară mecanică  $\omega(0)$  și rezistența de sarcină  $R(0)$ ) nu influențează în mod semnificativ comportamentul sistemului, în sensul apariției suprasarcinilor sau instabilităților în cazul controlului sistemului, prin calcularea sarcinii generatorului ca valoare prescrisă sau folosind regulatorul P având mărimea de referință  $\omega_{ref}$ .

Timpul de control este de ordinul orelor și poate varia între 3[h]-5[h].

De asemenea, a fost analizată și influența condițiilor inițiale asupra dinamicii sistemului, și au fost propuse soluții pentru reducerea duratei regimului tranzitoriu.

În acest subcapitol, au fost prezentate două structuri de control, pe baza rezultatelor obținute.

Toate contribuțiile prezentate în acest subcapitol sunt de mare importanță pentru mediul economic putând fi utilizate cu încredere în practică deoarece sunt rezultate experimentele obținute considerând problemele reale existente în mediul tehnic.

## 3.3. Conducerea sistemelor eoliene la viteză variabilă a vântului

Sistemul eolian la care se face referire constă dintr-o turbină cuplată la un generator sincron cu magneți permanenți.

În [28], autorul a propus o metodă pentru controlul sistemelor eoliene la viteză variabilă a vântului.

Pentru a extrage energia mecanică maximă la viteză variabilă, pe baza caracteristicilor de putere a turbinei, autorul a propus o metodă de determinare a vitezei unghiulare mecanice de referință. O altă problemă importantă a fost

determinarea rezistența de sarcină a generatorului sincron cu magneți permanenți astfel încât să se obțină o funcționare în MPP a turbinei.

Parametrii modelelor matematice ale turbinei și generatorului au fost obținuți din date experimentale.

Structura de control este realizată măsurând viteza instantanee a vântului și determinarea MPP-lui turbinei prin măsurarea puterii generatorului precum și-a vitezei medii a vântului.

### 3.3.1. Prezentarea teoretică a problemei

În cazul controlului sistemelor eoliene, problema fundamentală este determinarea vitezei unghiulare mecanice de referință ( $\omega_{ref}$ ). Așadar, dependența puterii turbinei ( $P_{TV}$ ) de viteza unghiulară mecanică poate fi obținută măsurând atât viteza unghiulară mecanică cât și puterea generatorului. Această funcție are un maxim ( $\omega_{ref}$ ,  $P_{TV}$ ) care se numește punct de putere maximă. Cunoșcând coordonatele celor două puncte de putere maximă, se obține dependența dintre  $\omega_{ref}$  și viteza medie a vântului ( $V_{Mediu}$ ) calculând constantele  $a$  și  $b$ , conform relației (3.13).

$$\omega_{ref} = a \cdot V^b \quad (3.13)$$

În plus, comparând  $\omega_{ref}$  cu  $\omega$ , se ajustează sarcina generatorului astfel încât să se obțină  $\omega = \omega_{ref}$ .

În timpul unei zile, viteza vântului poate varia semnificativ, de exemplu între 0[m/s] și 12[m/s], [1], așa cum se poate observa din înregistrarea pe o perioadă lungă de timp dată în figura 3.21.

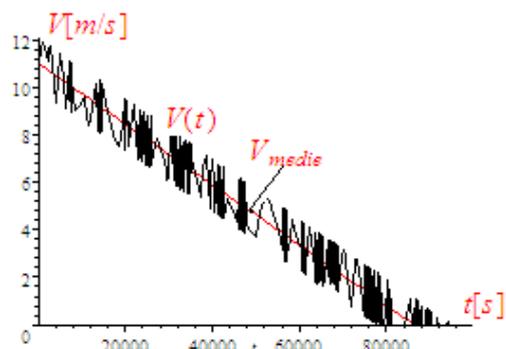


Figura 3.21. Variația în timp a vitezei vântului  
O formă de variație a vitezei vântului este dată în relația (3.14).

$$V(t) = V_{Mediu} + V_{alt} = 11 - \frac{11}{24 \cdot 3600} t + 1.1 \cdot \sin 1.8t \quad (3.14)$$

Problema de bază este determinarea vitezei generatorului astfel încât energia captată să fie maximă, obținându-se astfel o funcționare la putere mare [3].

Scopul controlului sistemului eolian [1-6] este de-a obține putere electrică maximă la viteză variabilă a vântului.

Pentru a se asigura funcționarea sistemului eolian în MPP, problema fundamentală este determinarea vitezei unghiulare mecanice ( $\omega$ ) care corespunde MPP-lui numită  $\omega_{ref}$ , iar în acest fel, caracteristica puterii turbinei ( $P_{TV}(\omega)$ ) poate fi determinată experimental [1-5].

În intervalul  $\Delta t$ , puterea dată de turbină (relația (3.15)) se găsește atât în puterea electrică debitată de generator ( $P_G$ ), cât și în variația energiilor cinetice a maselor în mișcare de rotație ( $\Delta W_c$ ).

$$P_{TV-CALCUL} = P_G + \frac{\Delta W_c}{\Delta t} \quad (3.15)$$

Viteza unghiulară mecanică ( $\omega_{ref}$ ) caracterizează MPP-ul și este determinată măsurând puterea electrică a generatorului ( $P_G$ ) prezentată în figura 3.22, precum și măsurând viteza unghiulară mecanică  $\omega$  (considerând variația energiilor cinetice a maselor în mișcare de rotație dată în (3.16)).

$$\Delta W_c = J \cdot \frac{(\omega(t_k))^2 - \omega(t_{k-1}))^2}{2} \quad (3.16)$$

unde,  $J$  este momentul de inerție echivalent al arborelui generatorului,  $\omega(t_k)$  este viteza unghiulară mecanică la momentul  $t_k$ , iar  $\omega(t_{k-1})$  este viteza unghiulară mecanică la momentul  $t_{k-1}$ .

Condițiile inițiale pentru conectarea sistemului (viteza unghiulară mecanică  $\omega(0)$  și rezistența de sarcină  $R(0)$ ) sunt determinate folosind modelele matematice ale turbinei și generatorului.

### 3.3.1.1. Modelele matematice ale turbinei și generatorului sincron cu magneți permanenți

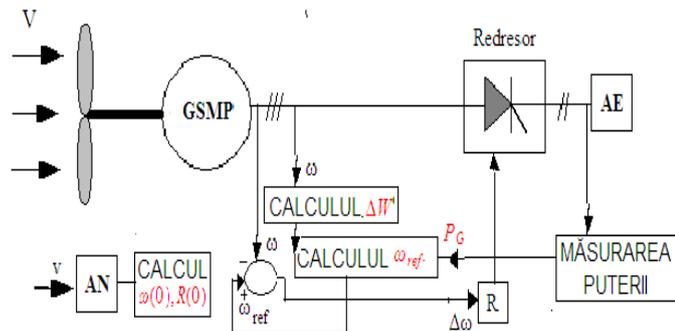


Figura 3.22. Controlul sistemului eolian folosind  $\omega_{ref}$

Toate simulările se bazează pe modele matematice originale ale turbinei. Deși modelele matematice ale turbinei și generatorului sunt aproximative, sunt utile în cazul determinării MPP-lui, în sensul că se pot stabili valorile inițiale pentru viteza unghiulară mecanică  $\omega$  și rezistența de sarcină echivalentă  $R$  a generatorului. Aceste valori sunt selectate în MPP la o viteză unghiulară mecanică mai mică decât  $\omega_{ref}$ .

Modelul matematic al turbinei este un model ce permite estimarea vitezei unghiulare mecanice de referință ( $\omega_{ref}$ ), model care permite totodată determinarea aproximativă a vitezei de rotație optimă, astfel încât energia captată să fie maximă.

Caracteristicile experimentale ale puterii sau cuplului turbinei sunt date de producător [8], caracteristici care se numesc  $P_{TV}(\omega)$  și  $M_{TV}(\omega)$ , fiind date în figura 3.23.

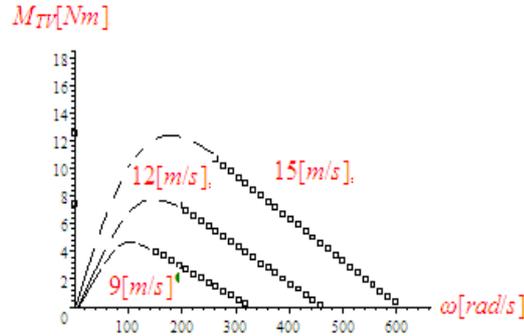


Figura 3.23. Caracteristicile mecanice experimentale

Pe baza caracteristicilor mecanice experimentale, în zona de funcționare a turbinei, dependența momentului de viteza vântului poate fi scrisă în forma (3.17), [1].

$$M_{TV} = aV^b \cdot \omega + c \cdot V^d \quad (3.17)$$

unde  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  sunt coeficienți ce depind de geometria turbinei, și sunt calculați conform catalogului producătorului [1].

Viteza unghiulară mecanică de referință (RPM sau  $\omega_{ref}$ ) este foarte importantă deoarece permite controlul optim al sistemului eolian astfel încât să se obțină energie maximă la vânt variabil. Valoarea lui  $\omega_{ref}$  este obținută în două metode:

1. **Maximizarea energiei mecanice** – valoarea lui  $\omega_{ref}$  este determinată din maximizarea energiei mecanice ( $W_m$ ), conform relației (3.18).

$$\omega_{ref} = \frac{\int_0^T cV^d dt}{2 \cdot \int_0^T aV^b dt} \quad (3.18)$$

2. **Caracteristica puterii turbinei** – în acest caz,  $\omega_{ref}$  este determinat folosind caracteristica puterii turbinei prin măsurători.

Pentru a analiza funcționarea sistemului eolian la viteză variabilă a vântului, autorul a utilizat modelul matematic ortogonal al generatorului dat în relația (3.19), [5]:

$$\begin{cases} U_d = R_1 \cdot I_d - \omega \cdot L_q \cdot I_q \\ U_q = R_1 \cdot I_q - \omega \cdot L_d \cdot I_d + \omega \cdot \psi_{MP} \\ M_{motor} = p_1 \cdot (L_d - L_q) \cdot I_d \cdot I_q + I_q \cdot \psi_{MP} \end{cases} \quad (3.19)$$

unde  $R_1$  rezistența înfășurării statornice,  $L_d$  este inductanța înfășurării statornice pe axa d,  $L_q$  este inductanța înfășurării rotorice pe axa q,  $p_1$  este numărul de perechi de poli, iar  $\psi_{MP}$  este fluxul magnetic permanent.

Puterea debitată de generator are valoarea dată în relația (3.20).

$$P_G = U_d \cdot I_d + U_q \cdot I_q \quad (3.20)$$

### 3.3.2. Determinarea caracteristicilor puterii turbinei prin măsurători

Caracteristicile puterii la  $V_1=11[m/s]$  și  $V_2=10.208[m/s]$  sunt date în figura 3.24.

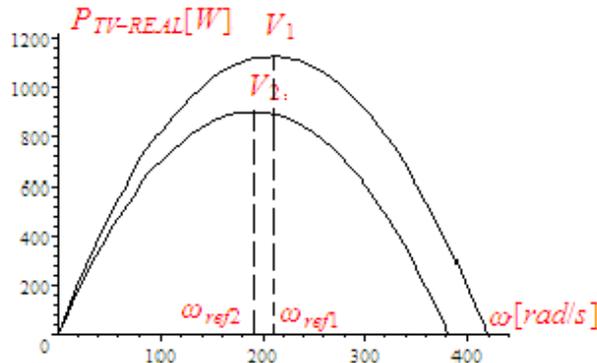


Figura 3.24. Caracteristicile puterii la  $V_1$  and  $V_2$

În simulări, viteza unghiulară mecanică ( $\omega_{ref1}=209.24[rad/s]$ ,  $\omega_{ref2}=191.29[rad/s]$ ) a fost obținută prin anularea derivatei puterii. În timpul funcționării,  $\omega_{ref}$  a fost determinat prin măsurarea în timp a puterii generatorului și turbinei, astfel că se obține puterea debitată de turbină în intervalul  $\Delta t$ .

În cazul turbinei, pentru a determina MPP al caracteristicii puterii, a fost monitorizată puterea data de generator, în pași, la intervale de timp  $\Delta t$ .

Pentru valori ale lui  $t_k$  variind 100, 200 și 2700[s], prin măsurarea lui  $P_G$  și  $\omega$ , și calculând puterea  $P_{TV-CALCUL}$ , s-a obținut  $\omega_{ref}=191.02[rad/s]$ . În cazul simulărilor, a fost utilizată ecuația mișcării pentru determinarea lui  $\omega$ .

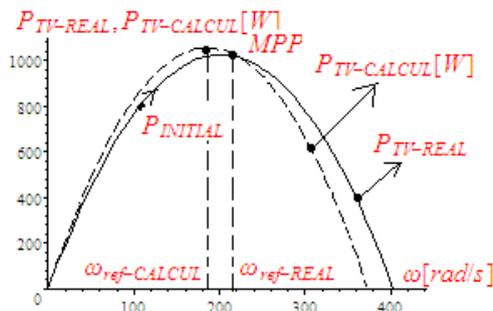


Figura 3.25. Caracteristicile puterii la  $t=700[s]$

Diferența dintre  $\omega_{ref-REAL} = 191.02[rad/s]$  și  $\omega_{ref-CALCUL} = 201.71[rad/s]$  este mai mică de 5%.

În intervale de timp  $\Delta t$  ce variază de la 0[s], la 1200[s], cu  $V(0)=11[\text{m/s}]$  și  $V(1200)=9.7604[\text{m/s}]$ , caracteristicile puterii turbinei aparțin zonei umbrite, așa cum se observă în figura 3.26.

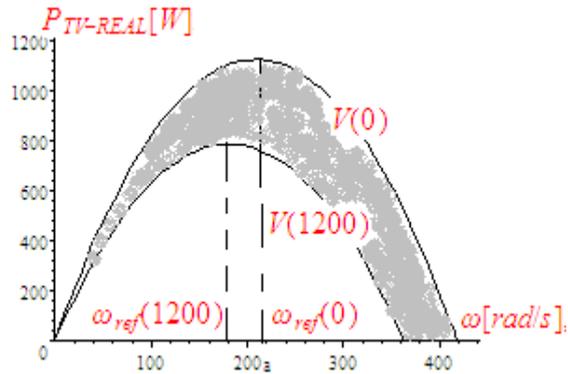


Figura 3.26. Caracteristicile puterii în intervalul  $\Delta t$  variind 0[s], la 1200[s]

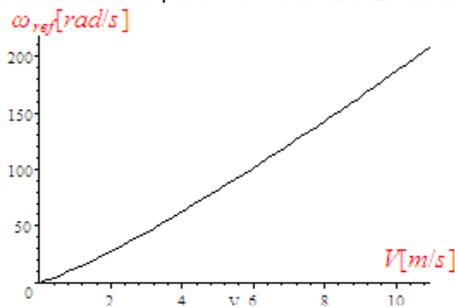


Figura 3.29. Dependența lui  $\omega_{ref}$  de  $V_{Mediu}$

Pentru mai multe valori medii,  $\omega_{ref}$ , este calculat prin anularea derivatei puterii, rezultând astfel dependența lui  $\omega_{ref}$  de viteza medie a vântului, așa cum se observă în figura 3.29, unde constantele  $a$  și  $b$  sunt calculate pe bază de măsurători.

Algoritmul de conducere este dat în figura 3.30:

- 1) Se măsoară viteza vântului, după care se calculează  $\omega(0)$  din modelul matematic al turbinei;
- 2) Sarcina inițială a generatorului  $R(0)$  este determinată pentru  $\omega(0)$ ;
- 3) Se determină caracteristicile de putere ale turbinei;
- 4) Se calculează  $\omega_{ref}$  pentru  $P_{Max}$ , pentru caracteristica de putere  $P_{TV-CALCUL}(\omega)$ ;
- 5) Sarcina generatorului este modificată astfel încât viteza unghiulară mecanică să fie în jurul valorii lui  $\omega_{ref}$ .

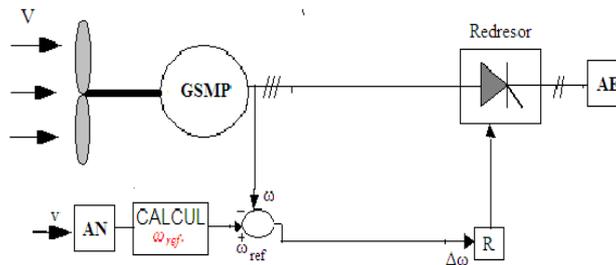


Figura 3.30. Conducerea sistemului eolian cu ajutorul valorii lui  $\omega_{ref}$

În [28], au fost realizate două studii de caz:

- 1) Cazul în care viteza medie a vântului are un salt;
- 2) Cazul în care viteza medie a vântului are o scădere.

În primul studiu de caz, au fost formulate următoarele concluzii:

- a)  $\omega_{ref}$  poate fi obținut prescriind valoarea curentă a sarcinii AE, la fel ca în figura 3.30.
- b) Datorită faptului că viteza vântului nu variază în salturi, prin urmare, variația în timp a lui  $\omega_{ref}$  poate fi obținută urmărind modificarea sarcinii generatorului în funcție de  $\Delta\omega$ , așa ca în relația 3.21.

$$\Delta\omega = \omega - \omega_{ref} \quad (3.21)$$

- c) Măsurând curentul ( $I$ , din (3.22)), viteza unghiulară mecanică ( $\omega$ ), cuplul ( $M_G$ ), pot fi calculați parametrii de bază ai modelului matematic al generatorului ( $L_d$  și  $L_q$ ). Astfel, modelul matematic al generatorului sincron este validat prin măsurători.

$$I = \sqrt{I_d^2 + I_q^2} \quad (3.22)$$

În cel de-al doilea studiu de caz, autorul a concluzionat faptul că pe baza măsurătorilor directe a vitezei unghiulare mecanice și a puterii utile a generatorului, funcționarea optimă a sistemului eolian în MPP poate fi realizată.

### 3.3.3. Conducerea sistemului eolian considerând dependența lui $\omega_{ref}$ de $V_{Mediu}$

Controlul optim a sistemului eolian implică captarea energiei maxime la vânt variabil, fapt ce necesită controlul vitezei și cuplului turbinei, adaptarea sarcinii generatorului la viteza vântului.

Structura de control are două etape:

- **Determinarea vitezei unghiulare mecanice  $\omega_{ref}$ , pentru un interval de timp dat.** În această etapă, nu s-au utilizat regulatoare, ci doar măsurători în timp a vitezei unghiulare mecanice și a puterii date de generator. Aceste valori se bazează pe calcularea lui  $\omega_{ref}$ .
- **Determinarea rezistenței de sarcină  $R$  a generatorului, astfel încât viteza unghiulară mecanică să atingă**

**valoarea lui  $\omega_{ref}$ .** În acest caz, s-au utilizat regulatoare sau algoritmi pentru a seta sarcina generatorului astfel încât să se obțină  $\omega_{ref}$ .

Viteza unghiulară mecanică,  $\omega_{ref}$ , este obținută folosind caracteristica puterii turbinei care a fost obținută prin măsurători, fapt ce înseamnă că funcția  $P_{TV}(\omega)$  are un maxim pentru viteza unghiulară mecanică  $\omega_{ref}$ .

Deplasarea punctului de funcționare din  $P_{INITIAL}$  în MPP este oscilatorie, așa cum se observă în figura 3.27.

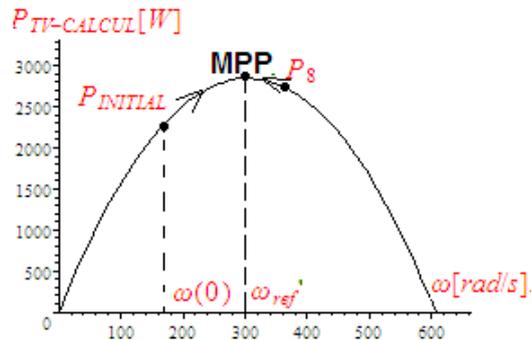


Figura 3.27. Deplasarea punctului de funcționare

Viteza unghiulară mecanică,  $\omega_{ref}$ , a fost modificată semnificativ în funcție de viteza vântului, așa cum se prezintă în figura 3.28, având o variație de aproximativ 27.972% într-un interval scurt ( $\Delta t \cong 1.7444[s]$ ),  $V_{Max}=11.839[m/s]$ ,  $V_{Mediu}=10.739[m/s]$ , și  $V_{Min}=9.639[m/s]$ .

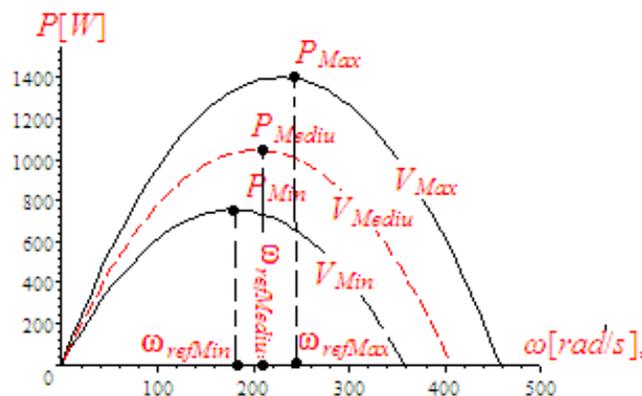
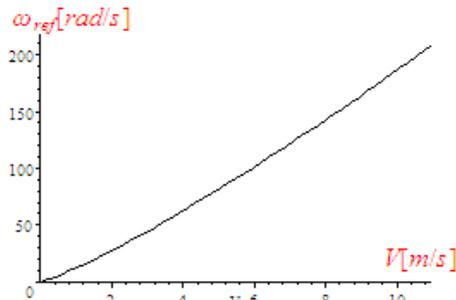


Figura 3.28. Caracteristicile puterii la  $V_{Max}$ ,  $V_{Mediu}$ , și  $V_{Min}$

Datorită inerțiilor mecanice, în acest interval de timp scurt, viteza unghiulară mecanică nu se modifică semnificativ, prin urmare, conducerea sistemelor eoliene trebuie să se realizeze ținând cont de viteza medie a vântului ( $V_{Mediu}$ ).

Procesul de control, prezentat în figura 2.10 se bazează atât pe monitorizarea vitezei medii a vântului ( $V=V_{Mediu}$ ) și pe determinarea lui  $\omega_{ref}$  din dependența lui  $\omega_{ref}$  de viteza medie a vântului, așa cum se prezintă în figura 3.29.

Figura 3.29. Dependenta lui  $\omega_{ref}$  de  $V_{Mediu}$ 

### Concluzii

Cu toate că modelele sunt aproximative, modelele matematice ale turbinei și generatorului sunt foarte utile în cazul stabilirii condițiilor inițiale, în cazul conectării sarcinii generatorului în MPP.

Parametrii modelelor matematice ale turbinei și generatorului au fost determinați pe baza datelor experimentale. viteza unghiulară mecanică corespunzătoare MPP-ului ( $\omega_{ref}$ ), poate fi determinată experimental prin determinarea experimentală a caracteristicii de putere a turbinei, obținându-se puterea mecanică maximă.

Pentru a ajusta corespunzător sarcina generatorului, cel mai bun algoritm de conducere este bazat pe măsurarea vitezei medii a vântului ( $V_{Mediu}$ ), determinarea lui  $\omega_{ref}$  și modificarea sarcinii generatorului, astfel încât viteza unghiulară mecanică să fie apropiată de  $\omega$ .

### 3.4. Dinamica sistemului eolian la sarcină optimă

În cazul controlului sistemului eolian, problema fundamentală este determinarea vitezei unghiulare mecanice de referință. În orice sistem de control, problema fundamentală este cunoașterea vitezei de rotație pentru care energia captată este maximă.

În acest subcapitol, autorul prezintă dinamica sistemului eolian la încărcare optimă [26]. Prin urmare, au fost efectuate câteva studii de caz referitoare la comportamentul sistemului eolian pentru diferite valori ale constantei de proporționalitate a regulatorului.

#### 3.4.1. Aspecte teoretice ale problemei

Sistemele eoliene de mare putere sunt controlate considerând viteza medie a vântului [8], [31], [32], [11], [12], [13], [14], [15], [33], [17], dar în acest caz nu se obține energie maximă.

Recent, s-au propus structuri de control care se bazează pe măsurarea vitezei instantanee [1-5], dar care folosesc un model matematic corespunzător pentru turbină.

În literatura de specialitate există multe articole care tratează funcționarea în MPP la viteză constantă [1-5], [8], [31], [32], [11], [12-14], [15], [31], cu alte cuvinte, funcționarea la viteză variabilă este foarte puțin tratată [1-5]. Însă, acest aspect este tratat în prezenta teză, astfel încât să se obțină energie maximă.

### 3.4.2. Parte aplicativă. Studii de caz

Cunoașterea vitezei unghiulare optime ( $\omega_{OPTIM}$ ) este o problemă fundamentală în cazul controlului sistemelor eoliene deoarece acest lucru implică obținerea de energie maximă. Astfel,  $\omega_{OPTIM}$  devine o mărime de referință în cazul controlului sistemelor eoliene, putându-se scrie egalitatea  $\omega_{ref} = \omega_{OPTIM}$ .

Rezistența optimă  $R_{OPTIM} = 451.84[\Omega]$  se poate obține folosind controlere, precum cel PI care are ecuația dată în (3.23), nefiind necesară cunoașterea acesteia.

$$\frac{dR}{dt} = K_1 \cdot \frac{d\omega}{dt} + K_2 \cdot (\omega - \omega_{ref}) \quad (3.23)$$

În acest caz, intrarea controlerului PI este eroarea  $\Delta\omega$ , iar ieșirea este unghiul de conducție al tiristoarelor convertorului interpus între generator și rețea, așa cum se observă în figura 3.31. Mărimea de referință a regulatorului este  $\omega_{ref}$ .

Datorită constantei de proporționalitate  $K_1 = 4.5064 \cdot 10^{-2}$ , ecuația regulatorului PI devine (3.25).

Ajustarea regulatorului este o problemă mai dificilă deoarece sistemul este nelinear, iar ajustarea poate fi făcută prin simulări succesive cu ajutorul ecuației mișcării (3.24), unde  $\omega_{ref} = \omega_{OPTIM} = 550.07[\text{rad/s}]$ ,  $\omega(0) = 500[\text{rad/s}]$ , și  $R(0) = 555[\Omega]$ .

$$50 \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_{TV} - M_{GSMP} \quad (3.24)$$

$$\frac{dR}{dt} = 4.5064 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{d\omega}{dt} + K_2 \cdot (\omega - \omega_{ref}) \quad (3.25)$$

Determinarea constantelor regulatorului ( $K_1$  și  $K_2$ ) se face prin simulările prezentate mai jos. Ecuația mișcării și a regulatorului PI formează sistemul de ecuații diferențiale care modelează ansamblul care constă dintr-o turbină și un generator. Următoarele figuri prezintă variația în timp a lui  $R$  și  $\omega$  pentru diferite valori ale constantei  $K_2$ .

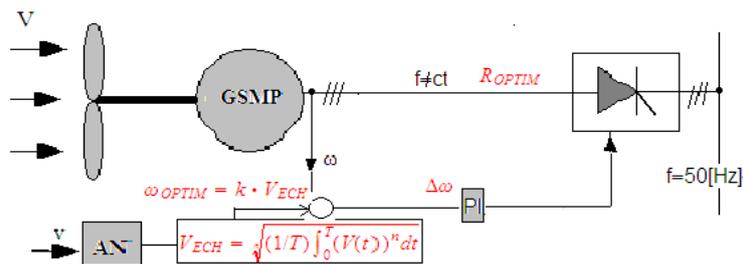


Figura 3.31. Controlul sistemului eolian

1.  $\frac{dR}{dt} = 4.5064 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{d\omega}{dt} + 0.01 \cdot (\omega - 550.07)$

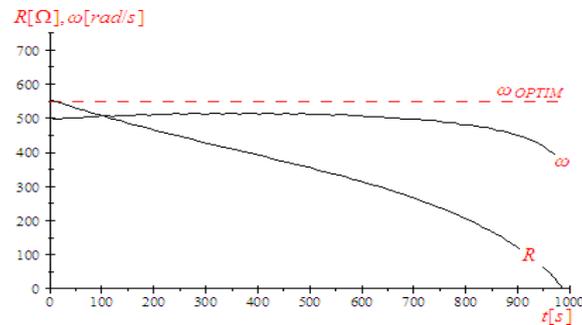


Figura 3.32. Variația în timp a lui R și  $\omega$  pentru  $K_2=0.01$

În acest caz, după un timp  $t=1000[s]$ , generatorul este pus în scurt circuit, așa cum se prezintă în figura 3.32.

$$2. \quad \frac{dR}{dt} = 4.5064 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{d\omega}{dt} + 0.1 \cdot (\omega - 550.07)$$

Generatorul este pus în scurt circuit după un timp de  $t=100[s]$ , așa cum se prezintă în figura 3.33.

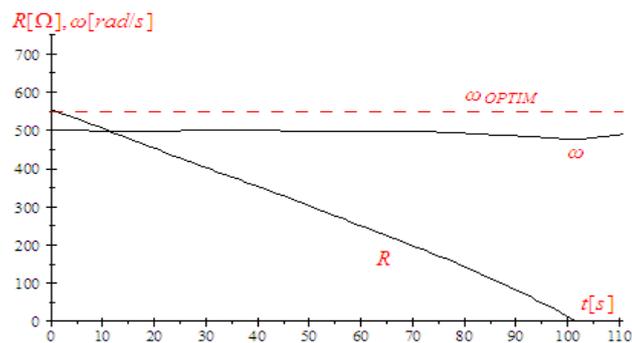


Figura 3.33. Variația în timp a lui R și  $\omega$  pentru  $K_2=0.1$

$$3. \quad \frac{dR}{dt} = 4.5064 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{d\omega}{dt} + 0.001 \cdot (\omega - 550.07)$$

În acest caz sistemul este instabil, așa cum rezultă din figura 3.34 din evoluția în timp a vitezei unghiulare mecanice, care atinge valoarea corespunzătoare regimului de funcționare în gol, când rezistența de sarcină devine mare.

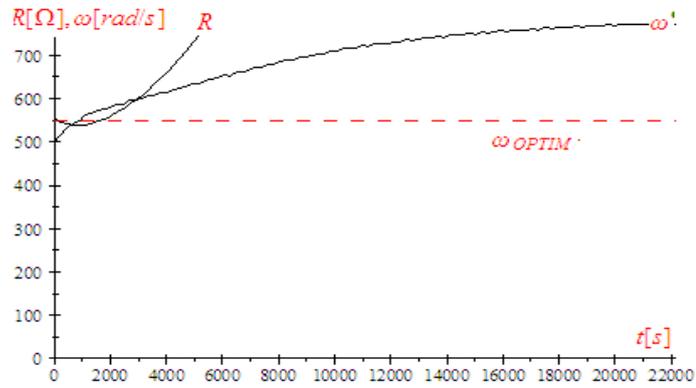


Figura 3.34. Variația în timp a lui R și  $\omega$  pentru  $K_2=0.001$

4. 
$$\frac{dR}{dt} = 4.5064 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{d\omega}{dt} + 0.0001 \cdot (\omega - 550.07)$$

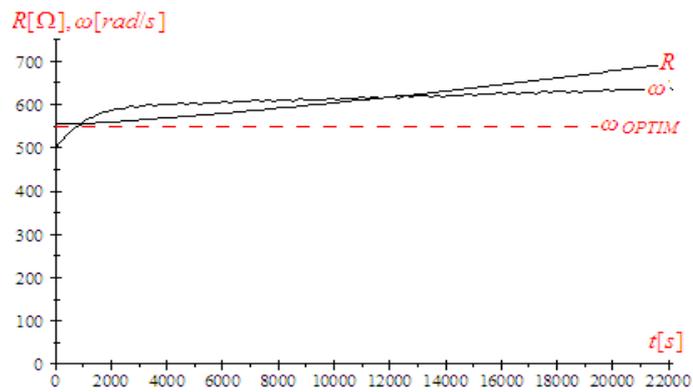
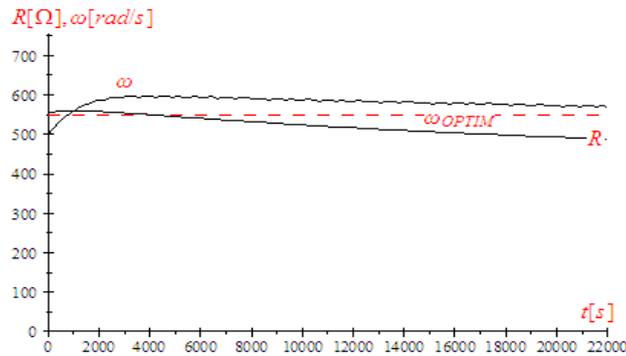


Figura 3.35. Variația în timp a lui R și  $\omega$  pentru  $K_2=0.0001$

5. 
$$\frac{dR}{dt} = 4.5064 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{d\omega}{dt} - 0.0001 \cdot (\omega - 550.07)$$

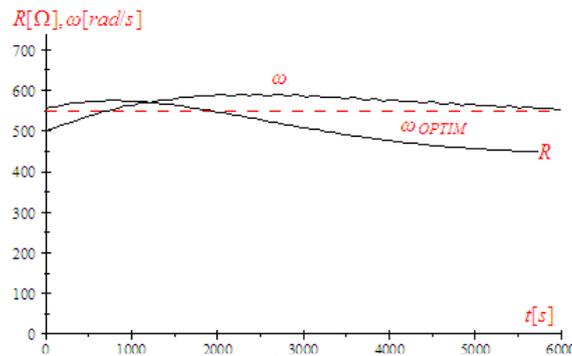
Sistemul este instabil datorită creșterii continue a vitezei unghiulare mecanice, așa cum se prezintă în figura 3.35.

Figura 3.36. Variația în timp a lui R și  $\omega$  pentru,  $K_2=-0.0001$ 

În acest caz sistemul este instabil, iar viteza unghiulară mecanică atinge valoarea optimă după un interval lung de timp (mai mare de 2200 s) așa cum se prezintă în figura 3.36.

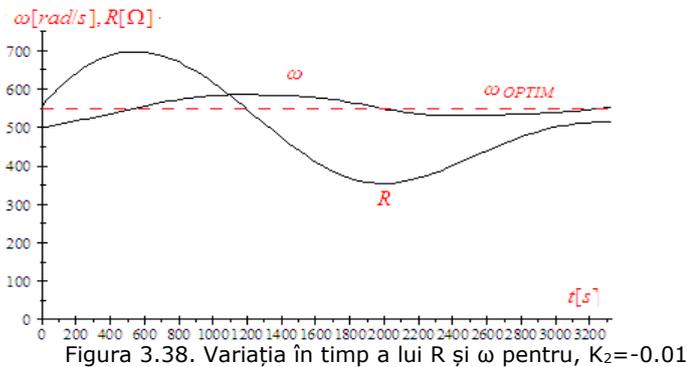
$$6. \quad \frac{dR}{dt} = 4.5064 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{d\omega}{dt} - 0.001 \cdot (\omega - 550.07)$$

Din figura 3.37 rezultă faptul că viteza unghiulară mecanică ajunge la valoarea optimă după un timp  $t=8888[s]$ , iar rezistența devine  $R(8888)=449.39[\Omega]$ , iar nu la valoarea  $R=451.84[\Omega]$  obținută anterior.

Figura 3.37. Variația în timp a lui R și  $\omega$  pentru,  $K_2=-0.001$ 

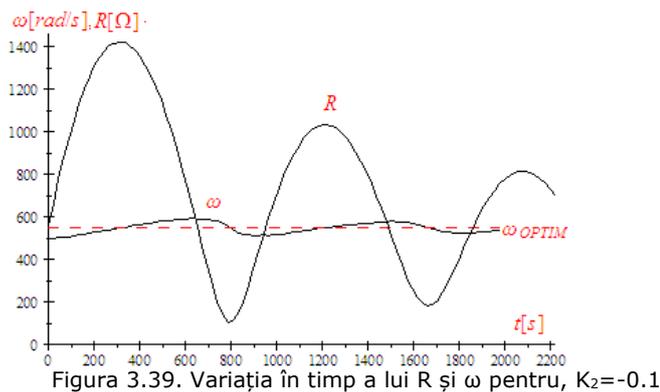
$$7. \quad \frac{dR}{dt} = 4.5064 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{d\omega}{dt} - 0.01 \cdot (\omega - 550.07)$$

Obținerea valorilor regimului staționar se realizează prin oscilații, adică 7.2727[%] pentru viteza unghiulară mecanică, și 55.556[%] pentru rezistența de sarcină.



$$8. \quad \frac{dR}{dt} = 4.5064 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{d\omega}{dt} - 0.1 \cdot (\omega - 550.07)$$

În acest caz, obținerea valorilor regimului staționar se realizează prin oscilații mari, adică 8[%] pentru viteza unghiulară mecanică, și 200[%] pentru rezistența de sarcină.



### 3.4.3. Metoda de calcul a valorii reale $\omega_{OPTIM}$

**Valorile obținute sunt utile în cazul validării metodei de calcul în timp real a lui  $\omega_{OPTIM}$ .**

Cunoscând viteza unghiulară mecanică pentru care energia captată este maximă, este posibilă captarea unei energii maxime prin controlul reguletoarelor interpușe între generator și rețea, așa cum se observă în figura 3.40.

Valoarea lui  $\omega$  depinde semnificativ de cunoașterea cu acuratețe a funcției  $V(t)$ , adică a variației vitezei vântului.

Calcularea vitezei unghiulare mecanice optime ( $\omega_{OPTIM}$ ) necesită cunoașterea (prin măsurători) a vitezei vântului, adică a funcției  $V(t)$ .

Pentru  $V(t)=ct.$ , s-a obținut  $\omega_{OPTIM}=31.817 \cdot V$ . Folosind acest rezultat, pentru  $V(t) \neq ct.$ , este utilă folosirea unei forme echivalente a vitezei vântului dată în (3.26).

$$V_{ECH} = \sqrt[n]{\frac{1}{T} \int_0^T (V(t))^n \cdot dt} \quad (3.26)$$

unde factorul  $n$  este obținut din (3.27), rezultând astfel  $V_{ECH}$ , ca și-n relația (3.28).

$$\omega_{OPTIM} = 31.817 \cdot V_{ECH} \quad (3.27)$$

$$V_{ECH} = 522 / 31.817 = 17.349 (m/s) \quad (3.28)$$

Ecuția (3.28) are soluția  $n=4$ , astfel, viteza echivalentă poate fi calculată folosind relația (3.28).

$$V_{ECH} = \sqrt[4]{\frac{1}{T} \int_0^T (V(t))^4 \cdot dt} \quad (3.28)$$

Pentru o anumită turbină, se poate determina  $\omega_{OPTIM}$  din relația (3.29), unde  $K$  este constanta dimensională a turbinei.

$$\omega_{OPTIM} = k \cdot V_{ECH} \quad (3.29)$$

În concluzie, algoritmul de control este următorul:

- 1) se măsoară viteza vântului după care se determină  $V_{ECH}$ ;
- 2) se calculează  $\omega_{OPTIM}$  din maximizarea funcției energiei;
- 3) prin încărcarea generatorului, viteza unghiulară mecanică este menținută în jurul valorii lui  $\omega_{OPTIM}$ .

#### 3.4.4. Studiu de caz, importanța modelelor matematice pentru optimizarea funcționării sistemelor eoliene

Modelele matematice ale turbinei și generatorului sunt în general date de producător și sunt valabile doar în anumite condiții de laborator [30], [22]. În cazul acestui tip de funcționare, aceste condiții se schimbă în funcție de anumite circumstanțe: precizia instrumentelor de măsură, cerințe fizico-chimice, motiv pentru care modelele matematice trebuie adaptate noilor condiții [34]. Din acest motiv, determinarea lui  $\omega_{OPTIM}$  nu se poate realiza pe baza modelelor matematice.

Modelele matematice sunt totuși utile în cazul stabilirii anumitor legături existente între măsurători [19], [35], și pot fi utilizate în cazul determinării valorii aproximative ale lui  $\omega_{OPTIM}$ .

Prin urmare, algoritmul de conducere prezentat în figura 3.40 este următorul:

- 1) se înregistrează viteza vântului pentru a determina  $V_{ECH}$ ;
- 2) se determină  $\omega_{OPTIM}$  din (3.29);

3) viteza unghiulară mecanică este menținută în jurul valorii  $\omega_{OPTIM}$ , utilizând sarcina generatorului.

În figura 3.40,  $P_{TV-ECH}$  este puterea echivalentă a turbinei,  $P_{GSMP}$  este puterea generatorului,  $R_{OPTIM}$  este sarcina optimă a generatorului.

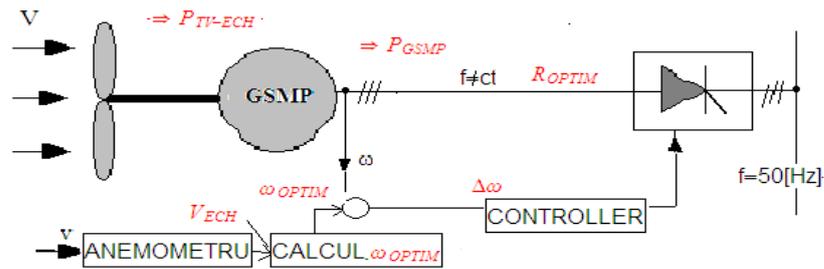


Figura 3.40. Conducerea sistemului eolian

Diferențele care apar din estimarea valorii lui  $\omega_{OPTIM}$  sunt generate de:

- Perioada de eșantionare care are diferite valori în funcție de evoluția în timp a vitezei vântului;
- Diferența de fază dintre viteza vântului și prescrierea valorii optime;
- Metodele de estimare a valorilor optime în timp real.

Din simularea prezentată, se pot formula următoarele concluzii:

- Determinarea vitezei unghiulare mecanice optimă din punct de vedere energetic este o problemă complexă în caz de vânt variabil;
- Determinarea vitezei unghiulare mecanice optime nu poate fi realizată cunoscând doar viteza medie a vântului, fiind astfel necesară înregistrarea vitezei reale a vântului cunoscând funcția  $V(t)$ .
- În relația de calcul a vitezei unghiulare mecanice optime, intervin integralele de ordin 4, 5 și respectiv 6 ale vitezei vântului. Aceste integrale pot fi calculate relativ ușor deoarece funcția  $V(t)$  este cunoscută din măsurători.

## Concluzii

Viteza unghiulară mecanică optimă  $\omega_{OPTIM}$  a fost obținută prin simulări, fiind astfel determinată dependența lui  $\omega_{OPTIM}$  de viteza vântului.

Ajustarea optimă a regulatorului PI a fost posibilă, de asemenea, prin măsurători [29], fiind calculată și sarcina optimă [29].

Determinarea vitezei unghiulare optime nu poate fi realizată doar cunoscând viteza medie a vântului, fiind necesară înregistrarea variației în timp real a vitezei vântului.

În cazul controlului sistemelor eoliene, au fost propuse metode de calcul [29] a vitezei de rotație în funcție de viteza vântului pentru a se obține energie maximă.

### 3.5. Maximizarea energiei captate a vitezei vântului

În acest capitol, autorul prezintă trei metode originale [23] de estimare a energiei maxime a unui sistem eolian care funcționează la viteză variabilă.

Problema fundamentală, este cunoașterea vitezei de rotație pentru care energia captată este maximă.

Controlul optim al unui sistem eolian implică captarea energiei maxime la o viteză a vântului semnificativ variabilă, lucru care necesită controlul vitezei și cuplului turbinei și adaptarea sarcinii generatorului la viteza vântului.

Prin urmare, obiectivul principal al referinței [21] a fost determinarea vitezei de rotație care corespunde energiei maxime dată de turbină. Prin simulare s-a determinat viteza unghiulară mecanică la care energia este maximă.

#### 3.5.1. Formularea problemei

Obiectivul principal al majorității articolelor științifice din acest domeniu este funcționarea sistemelor eoliene în punctul de putere maximă [1-23]. Cu toate acestea, majoritatea articolelor se referă la viteză constantă a vântului [5-23].

Pentru vânt variabil [4], cum este cazul real al României [1], determinarea punctului de putere maximă este o problemă complexă cu implicații majore în ajustarea calității [2,4].

În cazul domeniului de lucru tehnic-economic, viteza vântului are o valoare cuprinsă în intervalul  $V = 4 \div 25 \text{ m/s}$ , însă având cele mai bune rezultate în intervalul  $V = 12 \div 15 \text{ m/s}$ , [9], [13].

Datorită momentelor de inerție foarte mari ale turbinei, modificarea vitezei de rotație a generatorului este lentă, neputându-se urmări variația rapidă a vitezei vântului așa cum ar fi necesar pentru a funcționa în punctul de putere maximă [7], [1], [15], [20].

Datorită faptului că viteza vântului este variabilă semnificativ, problema este determinarea vitezei de rotație corespunzătoare energiei maxime, astfel încât să se obțină un profit maxim pe locația pe care sunt instalate turbinele [2].

Un sistem controlat optim trebuie să producă energie maximă pe un interval mare de timp.

Controlul sistemelor eoliene la putere maximă obținută de la generator cauzează frânarea turbinei și creșterea artificială a energiei electrice din variația energiilor cinetice a maselor aflate în mișcare de rotație, dar în final, energia obținută este mai mică decât în cazul funcționării sistemului eolian la energie maximă [4].

Din acest motiv, controlul optim al sistemelor eoliene trebuie realizat astfel încât să se obțină energie maximă la viteză variabilă a vântului, lucru care necesită controlul vitezei unghiulare mecanice impunând viteza de referință ( $\omega_{\text{ref}}$ ) pe intervalul  $\Delta t$ , și prin urmare, energia maximă disponibilă este extrasă pentru viteza vântului  $V(t)$ .

Sistemul eolian funcționează optim la viteză variabilă a vântului dacă turbina captează energia maximă posibilă într-un interval de timp de ordinul zilelor [7].

Datorită inerțiilor mecanice mari, simulările și toate celelalte rezultate teoretice și practice trebuie să se bazeze pe intervale de simulare de cel puțin ordinul orelor (de obicei 10 ore).

### 3.5.2. Modelul matematic al turbinei

Pentru simulare, a fost considerat un model matematic clasic pentru turbina de vânt, model care să permită estimarea cuplului și vitezei unghiulare mecanice.

Caracteristicile experimentale ale turbinei sunt date de producător [14], adică funcția  $P_{TV}(\omega)$  dată în figura 3.41.

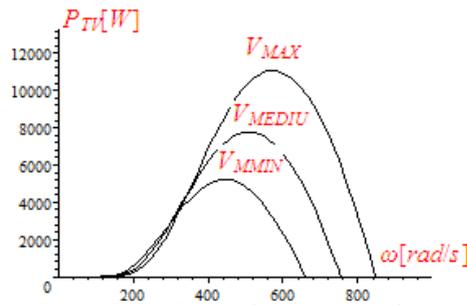


Figura 3.41. Dependenta puterii de  $\omega$

La o viteză a vântului  $V(t)$  conformă cu relația (3.31) care variază cu perioada  $T=35[s]$ , ca în figura 3.42, puterea variază între o valoare minimă la o viteză minimă  $V_{MIN}$ , și o valoare maximă la o viteză maximă  $V_{MAX}$ , așa cum rezultă din figura 3.41.

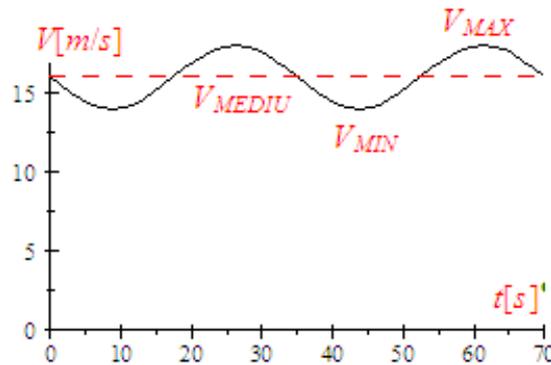


Figura 3.42. Variația vitezei vântului

$$V(t) = 16 - 2 \cdot \sin(0.17943 t) \quad (3.31)$$

Valorile maxime ale puterii sunt definite de viteza unghiulară mecanică ( $\omega_{ref}$ ). Aceste valori sunt valori de referință deoarece, în cazul controlului sistemelor eoliene, sunt considerate ca fiind parametri de referință. Valorile acestor parametri sunt determinate din anularea derivatei puterii, obținându-se astfel următoarele rezultate:

$$\omega_{ref1} = 572.74 [\text{rad/s}], \text{ la } V_{MAX} = 18 [\text{m/s}]$$

$$\omega_{ref2} = 509.09 [\text{rad/s}], \text{ la } V_{MEDIU} = 16 [\text{m/s}]$$

$$\omega_{ref3} = 445.46 [\text{rad/s}], \text{ la } V_{MIN} = 14 [\text{m/s}]$$

Astfel, pentru a funcționa în MPP, trebuie ca viteza unghiulară mecanică să fie modificată de la o valoare minimă ( $\omega_{ref3}$ ) la o valoare maximă ( $\omega_{ref1}$ ) într-un interval de timp foarte scurt  $t=35[s]$ , [9-12]. Această valoare a lui  $t$  este dată de variația în timp a vitezei vântului de perioadă  $T=35[s]$ . Însă, datorită inerțiilor

mecanice foarte mari, modificarea vitezei unghiulare mecanice nu este posibilă în acest interval [1-5].

### 3.5.3. Determinarea energiei maxime prin anularea derivatei puterii

Datorită faptului că puterea este derivata energiei, energia mecanică ( $W_m$ ) este calculată din relația (3.32).

$$\frac{dW_m}{dt} = P_{TV} \quad (3.32)$$

Energia captată  $W(\omega)$  depinde de viteza unghiulară mecanică. Așadar, valoarea maximă a funcției  $W(\omega)$  este obținută prin anularea derivatei din relația (3.33)

$$\frac{dW}{d\omega} = \frac{d}{d\omega} \int_0^T P_{TV} \cdot dt = 0 \quad (3.33)$$

Derivând expresia din integrala (3.33),  $\frac{dW}{d\omega} = 0$ .

Considerând  $\omega = ct.$  pe perioada  $T$ , se obține ecuația de mai jos:

$$\int_0^T \left( V^4 \exp\left(0.24151 \cdot \frac{-400 \cdot V + 21 \cdot \omega}{\omega}\right) \cdot (7.2684 \cdot \omega - 2.3126 \cdot 10^2 \cdot V) \right) \cdot dt = 0$$

Soluționarea ecuației de mai sus este dificilă datorită funcției exponențiale.

Așadar, pentru descompunerea în serie a funcției exponențiale, în forma dată în (3.34), se obține ecuația cu necunoscuta  $\omega$ , așa cum rezultă din (3.35).

$$\exp x = 1 + x \quad (3.34)$$

$$44.688 \cdot \omega^2 \int_0^T V^4 \cdot dt - 2134.5 \cdot \omega \int_0^T V^5 \cdot dt + 22677 \int_0^T V^6 \cdot dt = 0 \quad (3.35)$$

Ecuația (3.35) are o semnificație aparte deoarece arată felul în care viteza vântului influențează valoarea lui  $\omega_{OPTIM}$ .

Viteza unghiulară mecanică  $\omega_{OPTIM}$  depinde de integralele vitezei vântului având puterile 4, 5 și 6, existând astfel două cazuri posibile de soluționare a ecuației, și anume:

**1. Viteză constantă a vântului – Este cazul ideal, deoarece problema este foarte simplă, dar în realitate astfel de cazuri sunt foarte rare.**

$$\text{At } V = ct., \quad \frac{dW}{d\omega} = 0.$$

**2. Viteză variabilă a vântului – Este cazul real. Viteza vântului are o formă sinusoidală de perioadă  $T=35s$ :**

$$V(t) = 16 - 6 \cdot \sin(0.17943t)$$

În acest caz problema devine complicată prin faptul că ecuația nu poate fi soluționată prin metode numerice, iar pentru soluționarea ecuației s-au propus următoarele metode:

- a). Soluționarea prin alegerea diferitelor valori pentru  $\omega$ ;**
- b). Soluționarea prin descompunerea în serie a funcției exponențiale.**

Primul caz se referă la determinarea vitezei unghiulare optime alegând valori succesive pentru  $\omega$ . Astfel, soluționarea ecuației  $dW/d\omega = 1 = 0$  este realizabilă alegând valori succesive pentru  $\omega$ . În acest caz se obține energie maximă pentru  $\omega \cong 551.10227 \text{ rad/s}$ .

### 3.5.4. Determinarea simplificată a energiei optime

Pentru a simplifica calculele, s-au propus două variante astfel încât să se obțină energie optimă:

- 1) Liniarizarea caracteristicilor mecanice;**
- 2) Aproximarea funcției experimentale.**

În primul caz, modelul matematic al caracteristicilor experimentale mecanice ale turbinei (funcția  $M_{TV}(\omega)$ ) este liniarizată considerând două valori ale vitezei vântului, adică  $V=22[\text{m/s}]$  și  $V=11[\text{m/s}]$ .

Pentru  $V=22[\text{m/s}]$ , la funcționarea în gol,  $\omega=1036.2[\text{rad/s}]$ . În cazul funcționării la  $\omega=700[\text{rad/s}]$ , soluția este  $M_T=28.884$ .

Pentru  $V=11[\text{m/s}]$ , la funcționarea în gol,  $\omega=518.11[\text{rad/s}]$ . În cazul funcționării la  $\omega=333[\text{rad/s}]$  soluția este  $M_T=7.5049$ .

$$M_{TV}(\omega) = a \cdot V^b \cdot \omega + c \cdot V^d \quad (3.36)$$

**1.a). Liniarizarea caracteristicilor mecanice,**  $M_{TV}(\omega)$ , în forma dată în (3.36), se obțin următoarele soluții:

$$a = -3.0087 \cdot 10^{-3}$$

$$b = 1.0844$$

$$c = 0.14172$$

$$d = 2.0843$$

Expresia finală a caracteristicii mecanice dată în (3.37) este prezentată grafic în figura 3.43.

$$M_{TV} = -3.0087 \cdot 10^{-3} \cdot V^{1.0844} + 0.14172 \cdot V^{2.0843} \quad (3.37)$$

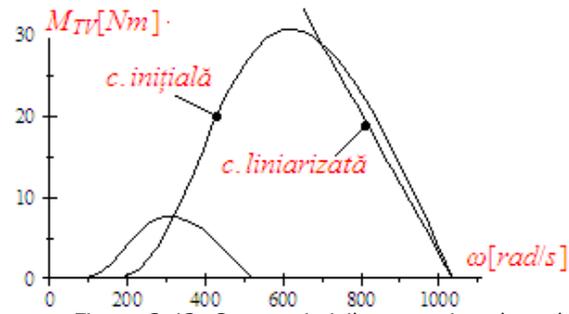


Figura 3.43. Caracteristicile mecanice ale turbinei

Din anularea derivatei energiei se obține  $\omega_{OPTIM} = 403.34 \text{ rad/s}$ . Acest rezultat este diferit față de cel real în care  $\omega_{OPTIM-REAL} = 551.10227 \text{ rad/s}$ .

**1.b). Cazul aproximării funcției exponențiale** se referă la soluționarea derivatei ecuației energiei prin aproximarea funcției exponențiale din relația (3.38).

$$\exp\left(0.24515 \cdot \frac{-400 \cdot (16 - 6 \cdot \sin(0.17943t)) + 21 \cdot \omega}{\omega}\right) = \exp(f(t, \omega)) \quad (3.38)$$

Aproximarea funcției exponențiale s-a realizat în două variante:

- grafic;
- descompunerea în serie.

Pentru  $\omega_1 = 551 \text{ rad/s}$ ,  $\omega_2 = 555 \text{ rad/s}$  și  $\omega_3 = 455 \text{ rad/s}$ , funcția exponențială poate fi aproximată prin relația  $(17 + 13 \sin(0.17943t))$ , deoarece are variația din figura 3.44.

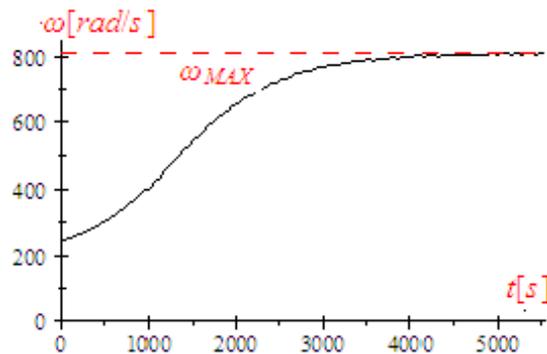


Figura 3.44. Variația în timp a vitezei unghiulare mecanice

În acest caz  $\omega_{OPTIM} = 604.93 \text{ [rad/s]}$  este puțin diferit de cel real  $\omega_{OPTIM-REAL} = 551.10227 \text{ [rad/s]}$ .

În aceste condiții, s-a obținut ecuația (3.39) care are soluția  $\omega = 557.13 \text{ [rad/s]}$ , rezultat care este foarte apropiat de cel real ( $\omega_{OPTIM-REAL}$ ).

$$2.2537 \cdot 10^8 \omega - 1.2556 \cdot 10^{11} \quad (3.39)$$

Dacă funcția exponențială este descompusă în serie ca și-n relația (3.40), din ecuația derivatei energiei se obține ecuația având necunoscuta  $\omega$ , din(3.41).

$$\exp x = 1 + x \quad (3.40)$$

$$44.688 \cdot \omega^2 \int_0^T V^4 \cdot dt - 2134.5 \cdot \omega \int_0^T V^5 \cdot dt + 22677 \int_0^T V^6 \cdot dt = 0 \quad (3.41)$$

Pentru  $V(t)$  având valoarea (3.42) ecuația (3.41) devine (3.43).

$$V(t) = 16 + 6 \sin(0.17943t) \quad (3.42)$$

$$146.53 \cdot \omega^2 - 1.3635 \cdot 10^5 \cdot \omega + 2.8861 \cdot 10^7 = 0 \quad (3.43)$$

Ecuația (4.13) are soluțiile date în (3.44) și (3.45).

$$\omega = 325.60 \text{ rad/s} \quad (3.44)$$

$$\omega = 604.93 \text{ rad/s} \quad (3.45)$$

Valoarea lui  $\omega_{\text{OPTIM}} = 604.96 [\text{rad/s}]$  este puțin diferită de  $\omega_{\text{OPTIM-REAL}} = 551.10227 [\text{rad/s}]$ .

### 3.5.5. Determinarea energiei maxime prin calcularea energiei obținute

Soluționând ecuația mișcării la funcționarea în gol se obține variația în timp a lui  $\omega$ , așa cum rezultă din figura 3.45.

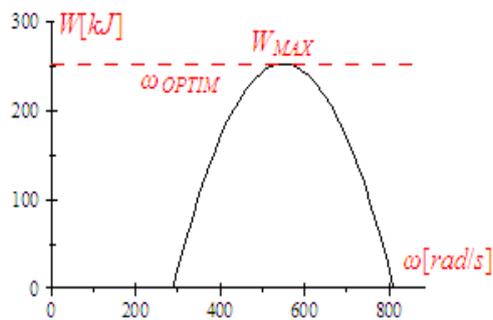
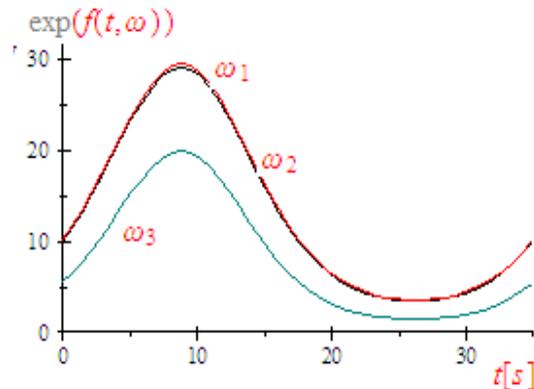


Figura 3.45. Dependența energiei de viteza unghiulară mecanică

Pentru  $t=5555[\text{s}]$ , viteza unghiulară mecanică are valoare maximă  $\omega(5555)=812.8[\text{rad/s}]$ .

În intervalul  $T$ , energia mecanică captată depinde doar de  $\omega$ . Prin urmare, considerând mai multe valori pentru  $\omega$ , se obțin mai multe valori pentru viteza unghiulară mecanică. Pe baza acestor valori, a fost reprezentată grafic dependența energiei de viteza unghiulară mecanică,  $W(\omega)$ , ca în figura 3.46.

Figura 3.46. Graficul funcției exponențiale având trei valori pentru  $\omega$ 

Așa cum se observă din figura 3.46, în cazul controlului sistemului eolian este necesară cunoașterea vitezei unghiulare mecanice optime ( $\omega_{OPTIM}$ ), în sensul că intervalul  $\omega_{MINIM}$  și  $\omega_{MAXIM}$  energia poate lua valori între 0 și  $W_{MAX}$ .

Astfel, energia maximă  $W_{MAX} = 2.5237 \cdot 10^5 J$  se obține pentru  $\omega = 550 rad / s$ .

### 3.5.6. Determinarea energiei maxime prin încărcări succesive ale generatorului

Considerând rezistența de sarcină  $R$  și viteza unghiulară mecanică ( $\omega$ ), este determinat cuplul generatorului, conform relației (3.46).

$$M_{GSMP} = 5445 \cdot \omega^2 (5 \cdot R + 8) \cdot \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot R^2 + 2000 \cdot R + 1600}{(1250 \cdot R^2 + 4000 \cdot R + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2} \quad (3.46)$$

Puterea dată de generator ( $P_{GSMP}$ ) este calculată folosind relația (3.47).

$$P_{GSMP} = 27225 \cdot R \cdot \omega^2 (5 \cdot R + 8) \cdot \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot R^2 + 2000 \cdot R + 1600}{(1250 \cdot R^2 + 4000 \cdot R + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2} \quad (3.47)$$

Din ecuația mișcării dată în (3.48) și cea a energiei electrice din (3.49), la  $V(t) = 16 - 6 \cdot \sin(0.17943t)$  și  $R = 451.84[\Omega]$ , este obținut un sistem diferențial având necunoscutele  $W_e$  și  $\omega$ .

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_{TV} - M_{GSMP} \quad (3.48)$$

$$P_{GSMP} = \frac{dW_e}{dt} \quad (3.49)$$

Dacă valorile rezistenței de sarcină sunt alese în intervalul  $R = 349.84[\Omega] \div 491.84[\Omega]$ , atunci, pentru  $R = 453.84[\Omega]$ ,  $454.84[\Omega]$ ,  $455.84[\Omega]$  este obținută energia maximă  $W_e(4000) = 2.8701 \cdot 10^7 [J]$  și  $\omega_{OPTIM} = 551.48 \div 552.68 [rad/s]$ .

Prin urmare, din ecuația mișcării, pentru  $R = 451.84[\Omega]$ , s-a obținut variația în timp a lui  $\omega$  așa cum se prezintă în figura 3.47.

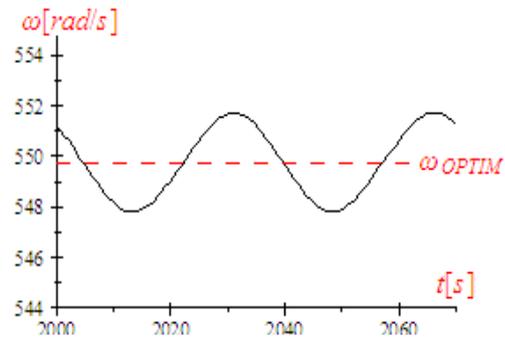
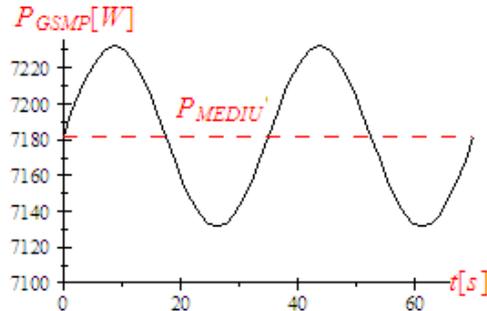


Figura 3.47. Variația în timp a vitezei unghiulare mecanice

Dacă variația în timp a vitezei unghiulare mecanice este scrisă în forma  $\omega(t) = 549.74 + 1.94 \cdot \sin(0.17943t)$ , puterea dată de generator are forma din figura 3.48.

Figura 3.48. Variația puterii generatorului  $P_{GSMF}$ 

Din figura 3.48 se observă faptul că puterea dată de generator variază între  $P_{MAX}=7232.2[W]$  și  $P_{MIN}=7131.6[W]$ . Oscilațiile puterii sunt  $\pm 0.7\%$ . Puterea din figura 3.48 poate fi reprezentată prin (3.50).

$$P_{GSMF}(t) = 7181.9 + 50.3 \cdot \sin(0.17943t) \quad (3.50)$$

### 3.5.7. Determinarea energiei de vârf printr-un eșantion la funcționarea în gol

#### 3.5.7.1. Determinarea maximului funcției energiei mecanice

Folosind ecuația mișcării, s-a determinat atât maximul funcției energiei mecanice ( $W_{MEC}$ ) cât și maximul puterii turbinei ( $P_{TV}$ ) [21].

Dacă ecuația mișcării dată în (3.51) este înmulțită cu  $\omega$ , se obține puterea dată de turbină conform relației (3.52).

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_{TV} \quad (3.51)$$

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega = \omega \cdot M_{TV} = P_{TV} \quad (3.52)$$

Prin integrare, s-a obținut energia mecanică captată în intervalul  $T$ , fiind dată în (3.53), unde  $J$  este momentul de inerție echivalent,  $\omega_k$  este viteza unghiulară mecanică la momentul  $t_k$ , și  $\omega_{k-1}$  este viteza unghiulară mecanică la momentul  $t_{k-1}$ .

$$W_{MEC} = \int_0^T \omega \cdot M_{TV} \cdot dt = J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2) / 2 \quad (3.53)$$

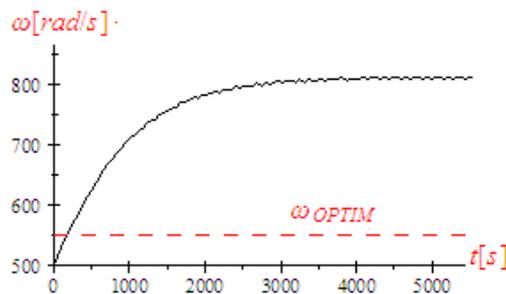


Figura 3.49. Variația în timp a vitezei unghiulare mecanice la viteză variabilă a vântului și  $\omega(0)=500[\text{rad/s}]$

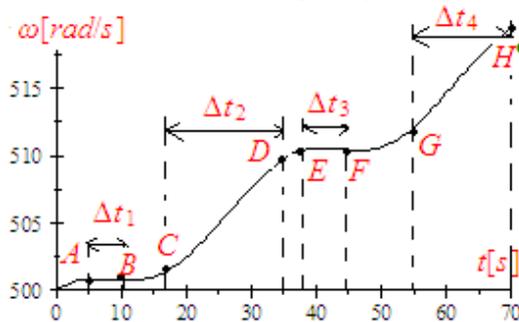


Figura 3.50. Variația în timp a vitezei unghiulare mecanice (detaliu)

Pentru o viteză a vântului de forma (3.54), la funcționarea în gol, se obține variația în timp a vitezei unghiulare mecanice, așa cum rezultă din figura 3.49.

$$V(t) = 16 - 6 \cdot \sin(0.17943t) \quad (3.54)$$

Viteza unghiulară mecanică variază datorită variației vitezei vântului, așa cum rezultă din figura 3.50.

Din figura 3.50 se observă că, în intervalele  $\Delta t_1=5[\text{s}]-10[\text{s}]$  (zona AB), și  $\Delta t_3=38[\text{s}]-44[\text{s}]$  (zona EF), viteza unghiulară mecanică ( $\omega$ ) are o valoare aproape constantă (deci  $d\omega/dt \approx 0$ ), și în intervalele  $\Delta t_2=17.5[\text{s}]-35[\text{s}]$  (zona CD), și  $\Delta t_4=55[\text{s}]-70[\text{s}]$  (zona GH), viteza unghiulară mecanică se modifică semnificativ (deci  $d\omega/dt \neq 0$ ).

$$\text{Zona AB: } \omega(5)=500.81[\text{rad/s}] \div \omega(10)=500.75[\text{rad/s}]$$

$$\text{Zona EF: } \omega(38)=510.39[\text{rad/s}] \div \omega(44)=510.45[\text{rad/s}]$$

$$\text{Zona CD: } \omega(17.5)=501.55[\text{rad/s}] \div \omega(35)=509.76[\text{rad/s}]$$

$$\text{Zona GH: } \omega(55)=512.08[\text{rad/s}] \div \omega(70)=519.45[\text{rad/s}].$$

Prin urmare, este foarte importantă alegerea intervalelor în care se măsoară viteza unghiulară mecanică. Deoarece vântul are o variație sinusoidală de perioadă  $T$ , este recomandat să se ia în considerare intervale  $\Delta t > T$ .

Rezultatele obținute depind de valorile lui  $T$ , așa cum a fost demonstrat în simulările prezentate.

Soluționând ecuația mișcării, în cazul perioadei de eșantionare  $\Delta t=35[\text{s}]=T$ , s-a obținut variația vitezei unghiulare mecanice și valorile acesteia la momentele:  $t=83, 118, 153, \dots, 363[\text{s}]$ . Pentru fiecare valoare a vitezei unghiulare mecanice s-a obținut o valoare pentru energia mecanică. Valoarea energiei maxime ( $W_{\text{MEC-MAX}}$ ) a fost obținută pentru viteza unghiulară mecanică ce aparține intervalului ( $\omega(188)=548.07[\text{rad/s}] - \omega(188-35)=557.17[\text{rad/s}]$ ). Prin urmare, viteza unghiulară mecanică optimă aparține intervalului  $\Delta t=(188[\text{s}]-223[\text{s}])$  având valoarea  $\omega_{\text{OPTIM}}=(548.07[\text{rad/s}]-557.17[\text{rad/s}])/2=556.62[\text{rad/s}]$ .

La funcționarea în gol, pentru o perioadă de eșantionare  $\Delta t=100[\text{s}]$ ,  $\omega(0)=400[\text{rad/s}]$  obținându-se valoarea energiei mecanice maxime ( $W_{\text{MEC-MAX}}$ ) pentru viteza unghiulară mecanică aparținând intervalului ( $\omega(500)=534.5[\text{rad/s}] - \omega(600)=562.43[\text{rad/s}]$ ). Astfel, viteza unghiulară mecanică aparține intervalului  $\Delta t=(500[\text{s}]-600[\text{s}])$  având valoarea  $\omega_{\text{OPTIM}}=(534.5[\text{rad/s}]-562.43[\text{rad/s}])/2=548.47[\text{rad/s}]$ .

Pentru perioada de eșantionare  $\Delta t=200[\text{s}]$ , valoarea energiei mecanice maxime este  $W_{\text{MEC-MAX}}=1.5068 \cdot 10^6[\text{J}]$ , iar viteza unghiulară mecanică optimă are valoarea  $\omega_{\text{OPTIM}}=(506.02-562.43)/2=534.23[\text{rad/s}]$ .

Considerând perioada de eșantionare  $\Delta t=300[s]$ , valoarea energiei mecanice maxime este  $W_{MEC-MAX}=2.0428*106[J]$ , iar viteza unghiulară mecanică optimă are valoarea  $\omega_{OPTIM}=(520.34-434.79)/2=477.57[rad/s]$ .

Dacă perioada de eșantionare este  $\Delta t=400[s]$ , valoarea energiei mecanice maxime este  $W_{MEC-MAX}=2.75*106[J]$ , iar viteza unghiulară mecanică optimă are valoarea  $\omega_{OPTIM}=(593.54-492.23)/2=542.89[rad/s]$ .

Pentru perioada de eșantionare  $\Delta t=800[s]$  și  $\omega(0)=200[rad/s]$ , valoarea energiei mecanice maxime este  $W_{MEC-MAX}=5.112*106[J]$ , iar viteza unghiulară mecanică optimă are valoarea  $\omega_{OPTIM}=(593.54-384.46)/2=489[rad/s]$ .

Dacă  $\Delta t=800[s]$  și  $\omega(0)=200[rad/s]$ , valoarea energiei mecanice maxime este  $W_{MEC-MAX}=9.4987*106[J]$ , iar viteza unghiulară mecanică optimă are valoarea  $\omega_{OPTIM}=(726.47-384.46)/2=555.47[rad/s]$ .

### 3.5.7.2. Determinarea maximului funcției puterii mecanice

Înmulțind ecuația mișcării (3.51) cu  $\omega$  s-a obținut puterea dată de turbină conform relației (3.52).

Dacă se consideră viteza vântului dată în (3.54), la funcționarea în gol, ( $\omega(0)=243$ ), soluționând ecuația mișcării s-a obținut variația în timp a lui  $\omega$  așa cum se observă din figura 3.51. Pe baza variației lui  $\omega$  astfel obținute, s-a definit puterea echivalentă a turbinei pentru viteza vântului dată în (3.54).

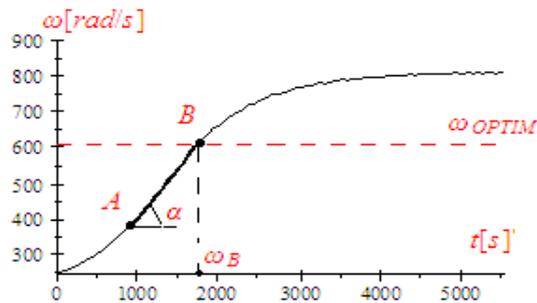


Figura 3.51. Variația în timp a vitezei unghiulare mecanice la viteză variabilă a vântului și  $\omega(0)=243[rad/s]$

În referința [21] autorul a concluzionat că puterea echivalentă a turbinei ( $P_{ECH}(\omega)$ ) generează aceeași formă de variație a vitezei unghiulare mecanice, ca puterea reală ( $P_{TV}$ ) care oscilează ca valoare între puterea maximă a turbinei la  $V_{MAX}=22[m/s]$ .

Pentru  $dt=\Delta t=500[s]$  și  $d\omega=\Delta\omega=\omega_k-\omega_{k-1}$  se obține  $P_{TV}$  care are forma dată în (3.55).

$$P_{TV} = J \cdot \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega = 50 \cdot \frac{\omega_k - \omega_{k-1}}{500} \cdot \omega_k^* = P_{ECH} \quad (3.55)$$

unde  $J$  este momentul de inerție echivalent,  $\omega_k$  este viteza unghiulară mecanică la momentul  $t_k$ ,  $\omega_{k-1}$  este viteza unghiulară mecanică la momentul  $t_{k-1}$ ,  $\omega_k^*$  este viteza unghiulară mecanică la momentul  $(t_{k-1}+t_k)/2$ .

În simulare, în funcționare, dacă perioada de eșantionare este  $\Delta t=250[s]$  iar  $\omega(0)=243[rad/s]$ , din ecuația mișcării, este determinată viteza unghiulară mecanică la momentele  $t=250, 500, \dots, 8000[s]$ , ai apoi se calculează puterea echivalentă cu ajutorul relației (3.56).

$$P_{ECH} = 50 \cdot \frac{\omega_k - \omega_{k-1}}{500} \cdot \omega_k^* \quad (3.56)$$

Valoarea optimă a vitezei unghiulare mecanice care este obținută din puterea calculată din înregistrarea vitezei unghiulare mecanice poate fi determinată direct din observarea vitezei unghiulare mecanice la funcționarea în gol, ca în figura 3.52.

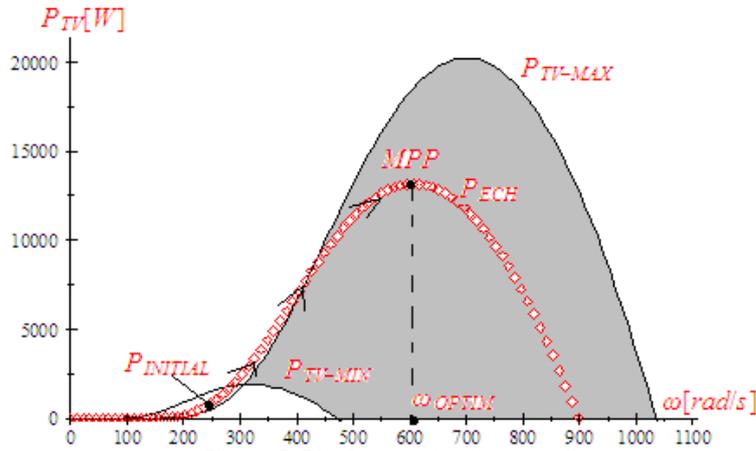


Figura 3.52. Caracteristicile puterii

Pentru  $t=1000[s]$ , s-a obținut  $\omega_{OPTIM}$  deoarece:

- La  $t > 1000[s]$  panta derivativă ( $d\omega/dt$ ) descrește;
- Puterea echivalentă,  $P_{ECH} = J \cdot \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega$ , devine maximă la viteza unghiulară mecanică pentru care produsul  $\frac{d\omega}{dt} \cdot \omega$  este maxim.

În zona AB panta este constantă, așa cum se observă în (3.57).

$$\tan a = \frac{d\omega}{dt} = ct \quad (3.57)$$

În punctul B produsul  $\frac{d\omega}{dt} \cdot \omega$  este maxim deoarece  $\omega_B$  este maxim.

Pentru  $\omega \gg \omega_B$  panta începe să descrească iar puterea echivalentă scade devenind nulă  $\frac{d\omega}{dt} \rightarrow 0$ .

Viteza unghiulară mecanică care corespunde puterii echivalente ( $\omega_B$ ) este diferită de  $\omega_{OPTIM}$  care corespunde energiei maxime (care este obținută prin integrarea puterii).

Pentru  $\omega_{OPTIM1}=606.61[rad/s]$  și CU  $\omega_{OPTIM}=31.817 \cdot V$  (rezultat obținut din maximizarea funcției puterii  $P_{TV}(\omega)$ ), viteza echivalentă a vântului este dată în (3.58).

$$V_{ECH} = \omega_{OPTIM} / 31.817 = 606.61 / 31.817 = 19.066 m/s \quad (3.58)$$

Pentru această valoare a vitezei rezultă caracteristica puterii echivalente,  $P_{ECH}(\omega)$  dată în figura 3.52.

În zona hașurată se află punctele de funcționare între caracteristica puterii la viteză maximă ( $V_{MAX}$ ) și cea minimă ( $V_{MIN}$ ).

Punctul inițial de funcționare ( $P_{INITIAL}$ ) se mută pe caracteristica puterii și atinge MPP în aproximativ 1750[s].

Vârful de energie corespunde puterii echivalente maxime la  $\omega(1750)=606.61\text{rad/s}=\omega_{OPTIM}$ .

Dacă perioada de eșantionare este  $\Delta t=800\text{s}$  iar  $\omega(0)=243\text{rad/s}$ , energia maximă are valoarea 6042.6J.

Pe de altă parte, dacă perioada de eșantionare este  $\Delta t=400\text{s}$  iar  $\omega(0)=243\text{rad/s}$ , energia maximă are valoarea 3465.7J.

Prin urmare, din funcționarea în gol a turbinei, poate fi dedusă variația în timp a vitezei unghiulare mecanice în zona de optim energetic la  $\omega < 600\text{rad/s}$ .

Puterea maximă este obținută la:  $\omega_{OPTIM-P_{ECH}} = 606.61\text{rad/s}$ ,  $463.32\text{rad/s}$ ,  $513.68\text{rad/s}$ , iar energia maximă este obținută la  $\omega_{OPTIM-W_{MEC}} = 552.62\text{rad/s}$ ,  $548.47\text{rad/s}$ ,  $534.23\text{rad/s}$ ,  $477.57\text{rad/s}$ ,  $542.89\text{rad/s}$ , dar valorile apropiate de realitate sunt cele calculate cu o perioadă de eșantionare egală cu perioada de oscilație a vitezei vântului.

Din rezultatele prezentate mai sus se observă influența semnificativă a perioadei de eșantionare.

Prin urmare, cele mai bune rezultate sunt obținute pentru intervale de eșantionare apropiate de perioada de oscilație a vitezei vântului ( $T$ ), care în acest caz este  $T=35\text{s}$ .

## Concluzii

Prin liniarizarea caracteristicilor mecanice ale turbinei se observă că rezultatul obținut este mult diferit de cel real, din moment ce sistemul eolian este neliniar, iar puterea turbinei depinde de viteza la cub. Prin urmare, liniarizând caracteristicile mecanice se obține o eroare mare, adică  $\omega_{OPTIM-LINIARIZARE} = 403.34\text{rad/s}$ , iar nu  $\omega_{OPTIM-REAL} = 552\text{rad/s}$ .

Prin liniarizarea caracteristicilor mecanice, energia maximă se obține la  $\omega_{OPTIM-LINIARIZARE} = 403.34\text{rad/s}$  și prin aproximarea funcției exponențiale, din derivata energiei, a fost obținută energia maximă la  $\omega_2 = 557.13\text{rad/s}$  în cazul variantei grafice, iar  $\omega_3 = 604.93\text{rad/s}$  în cazul descompunerii în serie.

Viteza unghiulară mecanică obținută prin încărcări succesive ale generatorului este  $\omega_{OPTIM-REZ} = 552\text{rad/s}$ .

Deoarece simulările au fost efectuate în condiții similare celor referitoare la funcționarea în condiții reale, prin utilizarea ecuației mișcării, valorile lui  $\omega_{OPTIM-REZ}=\omega_{OPTIM-REAL}=552\text{rad/s}$  sunt apropiate de cele ale optimului energetic.

Metoda de determinare a vitezei unghiulare mecanice, prezentată în acest subcapitol, ar putea reprezenta baza calibrării funcționării în condiții de optim energetic.

Metoda de calculare a maximului este validată pe baza rezultatelor experimentale sigure, iar nu pe baza modelelor matematice. În plus, măsurătorile disponibile date în [1-5] confirmă metoda propusă.

În subcapitolul 4.5, s-a obținut dependența dintre viteza vântului și viteza de rotație (la care ar trebui să funcționeze sistemul eolian astfel încât să se obțină energie maximă).

Determinarea maximului energetic ( $\omega_{OPTIM}$ ) printr-un eșantion la funcționarea în gol poate fi realizat într-un interval scurt de timp, de ordinul minutelor, lucru care este foarte important în aplicații în care viteza vântului variază semnificativ. Această metodă este esențială pentru controlul optim al sistemelor eoliene prescriind viteza unghiulară de referință,  $\omega_{ref} = \omega_{OPTIM}$ , deoarece implică timpi de răspuns mici și valori corecte pentru viteza unghiulară mecanică. Metoda se bazează pe rezultate experimentale sigure, iar nu pe modele matematice care introduc erori și deci pierderi de energie.

Cunoscând viteza de rotație optimă, sarcina generatorului poate fi ajustată astfel încât să se obțină o funcționare la energie maximă.

Pe baza ecuației mișcării, a fost obținută valoarea optimă a vitezei unghiulare mecanice ( $\omega_{OPTIM}$ ) la viteză variabilă a vântului.

Viteza unghiulară mecanică optimă a fost obținută prin simulări. De asemenea a fost determinată dependența lui  $\omega_{OPTIM}$  de viteza vântului.

Integrând puterea, energia maximă a fost determinată la  $\omega_{OPTIM1} = 551.10227 \text{ rad} / s$ .

Din calcularea energiei maxime, folosind integrala puterii, s-a obținut atât

$\omega_{OPTIM1-INTTEGRAL} = 550 \text{ rad} / s$ , cât și puterea echivalentă maximă pentru

$\omega_{OPTIM1-P_{ECH}} = 606.61 \text{ rad} / s$ . Din derivata vitezei unghiulare mecanice s-a obținut

maximul energetic pentru  $\omega_{OPTIM-W_{MEC-MAX}} = 552.62 \text{ rad} / s$ .

Măsurând viteza vântului, s-a determinat  $\omega_{OPTIM}$ , putându-se astfel capta energie maximă la viteza variabilă a vântului.

Analizând mai multe cazuri, s-au determinat mărimile de bază care duc la o funcționare optimă.

Prin simulări s-a dedus viteza de rotație a generatorului astfel încât să se obțină energie maximă la viteză variabilă a vântului.

În cazul controlului sistemelor eoliene s-au propus metode de calcul a vitezei de rotație de referință în funcție de viteza vântului astfel încât să se obțină energie maximă.

Puterea echivalentă maximă ( $P_{ECH}$ ) duce la valoarea  $\omega_{OPTIM1-P_{ECH}} = 606.61 \text{ rad} / s$  care este cu 10.28% diferită de cea reală, ținând cont de faptul că puterea turbinei variază de la o valoare maximă la  $V_{MAX}$  la o valoare minimă la  $V_{MIN}$ .

Valoarea lui  $\omega_{OPTIM-W_{MEC-MAX}} = 552.62 \text{ rad} / s$  este apropiată de optimul energetic, deoarece prin ecuația mișcării, simulările au fost realizate asemănător funcționării în condiții reale.

Metoda de determinare a vitezei unghiulare mecanice optime, prezentată în subcapitolul 5.5, ar putea reprezenta baza calibrării pentru funcționarea în condiții de optim energetic.

Rezultatele obținute prin simulări arată modalitatea de obținere a puterii de vârf, în sensul că viteza corespunzătoare acestei energii maxime a fost determinată. Atât puterea de vârf cât și energia de vârf au fost analizate, dar în practică, este de mare interes doar energia de vârf.

### 3.6. Viteza echivalentă și puterea echivalentă a unui sistem eolian care lucrează optim la viteză variabilă

În acest subcapitol, autorul prezintă o analiză a dinamicii sistemului la viteză variabilă. Analiza [24] se bazează pe simulări numerice care folosesc ecuația mișcării. Pentru a realiza această analiză, în referința [24] s-au utilizat modele matematice obișnuite pentru turbină și generator.

Pe baza măsurării vitezei vântului și a vitezei generatorului, au fost definite două mărimi de bază, și anume, viteza echivalentă a vântului și viteza unghiulară mecanică optimă. viteza unghiulară mecanică optimă este o funcție dependentă de viteza echivalentă a vântului. Analizând variația în timp a vitezei de rotație a generatorului, s-a determinat zona de funcționare optimă, zonă care este caracterizată de viteza unghiulară mecanică optimă.

Literatura de specialitate abundă în lucrări care studiază funcționarea sistemelor eoliene [1÷17] la viteză constantă. Funcționarea la viteză variabilă și în condiții de optim energetic este foarte puțin tratată în literatură [1].

Determinarea MPP este o problemă complexă cu implicații majore în cazul determinării vitezei de rotație care corespunde energiei maxime, și în cazul ajustării calității [2], [4] la viteză variabilă, cum este cazul real al României.

Domeniul de lucru aparține intervalului 4÷25[m/s], dar cele mai bune rezultate se obțin în intervalul 12÷15[m/s].

Datorită momentelor de inerție mari ale turbinei, modificarea vitezei de rotație a generatorului este un proces lent, neputându-se urmări variația rapidă a vitezei vântului așa cum este necesar pentru a funcționa în MPP [7], [1], [15].

Considerând o viteză variabilă a vântului, problema este determinarea vitezei de rotație care corespunde energiei maxime, astfel încât să se obțină un profit maxim pe locația pe care vor fi instalate turbinele [2].

#### 3.6.1. Modelele matematice ale turbinei și generatorului

Pentru simulare, au fost luate în considerare modele matematice clasice pentru turbină și generator. Aceste modele permit estimarea cuplului și vitezei unghiulare mecanice.

##### 3.6.1.1. Modelele matematice ale turbinei

Acest model [14] permite estimarea vitezei unghiulare de referință ( $\omega_{ref}$ ), dar și determinarea aproximativă a vitezei de funcționare optime astfel încât să fie captată energia maximă.

Puterea dată de turbină este calculată cu relația (3.59).

$$P_{WT} = \rho \cdot \pi \cdot R_p^2 \cdot C_p(\lambda) \cdot V^3 \quad (3.59)$$

unde,  $\rho$  este densitatea aerului,  $R_p$  este raza paletelor,  $C_p(\lambda)$  este coeficientul de conversie a puterii,  $\lambda = R_p \cdot \omega / V$ ,  $V$  este viteza vântului, iar  $\omega$  este viteza unghiulară mecanică.

coeficientul de conversie a puterii a fost deja calculat în [24], iar puterea dată de turbină a fost calculată cu relația (3.60).

$$P_{WT}(\omega, V) = k_1 \cdot (k_2 \cdot (V / \omega - 0.0525) - c_3) e^{-k_3(V / \omega - 0.0525)} \cdot V^3 \quad (3.60)$$

unde,  $k_1=1.225\pi \cdot 1.52c_1$ ,  $k_2=c_1/1.5$ ,  $k_3=c_4/1.5$ .

Caracteristicile mecanice ale turbinei sunt date de către producător ( $P_{WT}(\omega, V)$ ), numindu-se și caracteristicile mecanice experimentale ( $M_{WT}(\omega, V)$ ) date în (3.61)

$$M_{WT}(\omega) = P_{WT}(\omega, V) / \omega = k_1 \cdot (k_2 \cdot (V / \omega - 0.0525) - c_3) e^{-k_3(V / \omega - 0.0525)} \cdot V^3 / \omega \quad (3.61)$$

Pentru viteza unghiulară mecanică de referință ( $\omega_{ref}$ ), maximul funcției  $P_{WT}(\omega, V)$  a fost obținut prin derivare.

$$\frac{dP_{WT}}{d\omega} = \frac{d}{d\omega} (k_1 \cdot (k_2 (V / \omega - 0.0525) - c_3) e^{-k_3(V / \omega - 0.0525)} \cdot V^3) = 0$$

Rezultând astfel:

$$\omega_{ref} = 400 \cdot k_3 \cdot \frac{k_2}{400 \cdot k_2 + 21 \cdot k_3 k_2 + 400 \cdot k_3 c_3} \cdot V = k_E \cdot V$$

Rezultatul obținut demonstrează legătura directă dintre  $\omega_{ref}$  și viteza vântului, însă în cazul unei viteze variabile a vântului, rezultatul ar trebui reanalizat.

### 3.6.1.2. Modelul matematic al generatorului

Pentru a analiza sistemul eolian, s-a utilizat modelul matematic ortogonal dat în relația (3.62).

$$\begin{cases} -U\sqrt{3}\sin(\theta) = R_1 I_d - \omega L_q I_q \\ U\sqrt{3}\cos(\theta) = R_1 I_q + \omega L_d I_d + \omega \psi_{PM} \\ M_{PMSG} = p_1 (L_d - L_q) I_d I_q + I_q \psi_{PM} \end{cases} \quad (3.62)$$

unde,  $U$  este tensiunea statorică,  $I_d$  și  $I_q$  sunt curenți statorici,  $M_{PMSG}$  este cuplul electromagnetic,  $R_1$  este rezistența înfășurării statorice,  $L_d$  este inductanța înfășurării statorice din axa  $d$ ,  $L_q$  este inductanța înfășurării rotorice din axa  $q$ ,  $p_1$  este numărul de perechi de poli, iar  $\psi_{PM}$  este fluxul magnetic permanent.

Atât puterea  $P_{PMSG}$  cât și cuplul  $M_{PMSG}$  sunt obținute din (3.62). Aceste două funcții:  $P_{PMSG}(R, \omega)$  și  $M_{PMSG}(R, \omega)$  depind de  $R$  și  $\omega$ . Astfel, pentru  $R=ct.$ , cuplul  $M_{PMSG}$  depinde liniar de  $\omega$ .

### 3.6.2. Studiu de caz

În acest subcapitol, s-a considerat un sistem eolian de putere  $P_N=22$ [kW] pentru a fi analizat la viteză variabilă a vântului în intervalul  $5 \div 22$ [m/s].

### 3.6.2.1. Modelele turbinei și generatorului sincron cu magneți permanenți

Caracteristicile experimentale ( $P_{WT}(\omega, V)$ ) sunt date de producător, iar pentru o turbină de putere  $P_N=22$ [kW], acestea sunt date în (3.63).

$$P_{WT}(\omega, V) = 23.584 \cdot \left( (V / \omega - 0.0525) + 3.1269 \cdot 10^{-2} \right) e^{-98.06(V / \omega - 0.0525)} \cdot V^3 \quad (3.63)$$

unde,  $V$  este viteza vântului, iar  $\omega$  este viteza unghiulară mecanică.

Maximul funcției  $P_{WT}(\omega, V)$  se obține prin derivarea funcției  $P_{WT}(\omega, V)$  în funcție de  $\omega$ , rezultând astfel valoarea lui  $\omega_{ref}$ , așa cum se observă în relația (3.64).

$$\omega_{ref} = 31.817 \cdot V \quad (3.64)$$

Rezultatul obținut este valid pentru  $V=ct$ , iar în cazul unei viteze variabile, rezultatul obținut trebuie reanalizat.

Valorile:  $R_1=1.6$ [ $\Omega$ ],  $L_d=0.07$ [H],  $L_q=0.08$ [H],  $\Psi_{PM}=3.3$ [Wb] sunt obținute din catalogul generatorului de putere  $P_N=22$ [kW].

Cele două funcții:  $P_{PMSG}(R, \omega)$  din (3.66) și  $M_{PMSG}(R, \omega)$  din (3.67) depind de  $R$  (rezistența de sarcină) și  $\omega$  (viteza unghiulară mecanică), fiind obținute din sistemul de ecuații al generatorului (3.65).

$$\begin{cases} -R \cdot I_d = 1.6 \cdot I_d - \omega \cdot 0.08 \cdot I_q \\ -R \cdot I_q = 1.6 \cdot I_q + \omega \cdot 0.07 \cdot I_d + \omega \cdot \Psi_M \\ M_G = -0.01 \cdot I_d \cdot I_q + I_q \cdot \Psi_M \\ \Psi_M = 3.3 \\ P = R \cdot (I_d^2 + I_q^2) \end{cases} \quad (3.65)$$

$$P_{PMSG} = 27225 \cdot R \cdot \omega^2 \cdot \frac{4\omega^2 + 625R^2 + 2000R + 1600}{(1250R^2 + 4000R + 3200 + 7\omega^2)^2} \quad (3.66)$$

$$M_{PMSG} = -5445 \cdot \omega \cdot (5R + 8) \cdot \frac{4\omega^2 + 625R^2 + 2000R + 1600}{(1250R^2 + 4000R + 3200 + 7\omega^2)^2} \quad (3.67)$$

### 3.6.2.2. Viteza vântului variabilă

Puterea turbinei depinde de  $V$  și  $\omega$ , așa cum se prezintă în relația (3.68).

$$P_{WT}(V, \omega) = 23.584 \cdot \left( V / \omega - 2.1231 \cdot 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06(V / \omega - 0.0525)} \cdot V^3 \quad (3.68)$$

La  $V$ , puterea maximă se obține prin anularea derivatei, rezultând astfel  $\omega_{OPTIM}=31.817 \cdot V$ .

La o viteză sinusoidală de perioadă  $T=35$ [s], dată în figura 3.53, și care descrește cu  $e^{t/3600}$ , se obține  $V(t)$  așa cum se observă în (3.69).

$$V(t) = 16 - 6 \cdot \sin(0.17943t) \cdot e^{-t/3600} \quad (3.69)$$

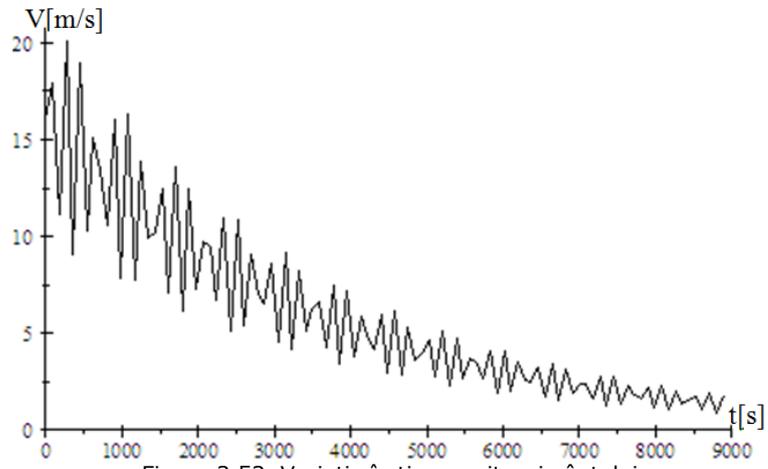


Figura 3.53. Variația în timp a vitezei vântului

În această formă a variației vitezei vântului, se obține variația în timp a puterii turbinei, așa cum se prezintă în figura 3.54.a.

$$P_{WT}(V, \omega) = 23.584 \cdot \left( \begin{array}{l} \left( \left( (16 - 6 \cdot \sin(0.17943t)) \cdot e^{-t/3600} \right) / \omega - 2.1231 \cdot \right) \\ \cdot 10^{-2} \\ e^{-98.06 \left( (16 - 6 \cdot \sin(0.17943t)) \cdot e^{-t/3600} \right) / \omega - 0.0525} \cdot \\ \cdot \left( (16 - 6 \cdot \sin(0.17943t)) \cdot e^{-t/3600} \right)^3 \end{array} \right)$$

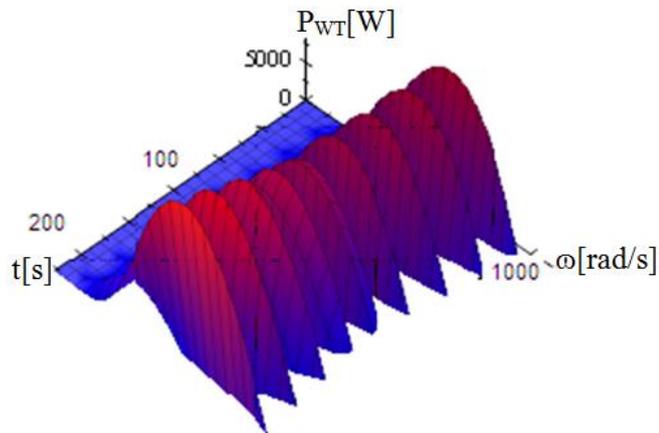
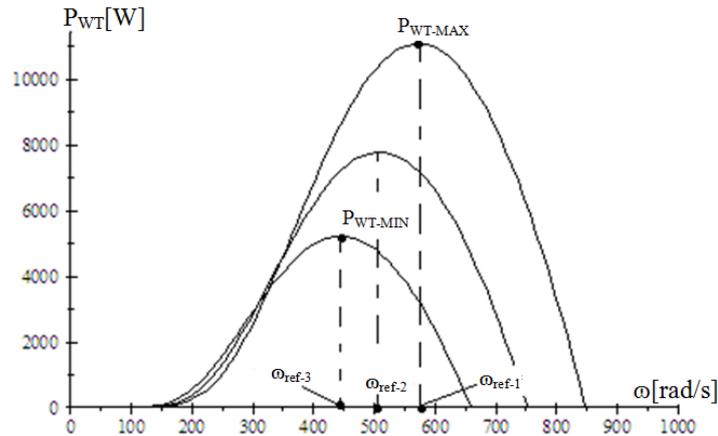


Figura 3.54.a. Variația în timp a puterii

Funcția  $P_{WT}(V, \omega)$  are mai multe maxime, așa cum se prezintă în figura 3.54.a și în figura 3.54.b. Pentru  $V=18[m/s]$ , puterea are un maxim la  $\omega_{ref-1}=572.73[rad/s]$ , care se obține din anularea derivatei funcției  $P_{WT}(V, \omega)$ .

Figura 3.54.b. Dependența puterii de  $\omega$ 

În mod asemănător, au fost obținute următoarele viteze unghiulare mecanice optime:  $\omega_{ref-2}=509.09$ [rad/s] at  $V=16$ [m/s], și  $\omega_{ref-3}=445.43$ [rad/s] la  $V=14$ [m/s].

Pentru a muta punctul de funcționare din  $P_{WT-MAX}$  în  $P_{WT-MIN}$ , în aproximativ 17.5[s], este necesar un cuplu de valoare 0 care este obținut din ecuația mișcării conform relației (3.69).

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{WT} - M_{PMSG} \quad (3.69)$$

unde,  $J$  este momentul de inerție echivalent.

$$40 \cdot \frac{572.73 - 445.43}{17.5} = 290.97 [Nm]$$

Acest lucru este imposibil deoarece momentul maxim al turbinei este  $M_{WT-MAX}=19.335$ [Nm].

Prin urmare, deoarece sistemul eolian nu poate funcționa în MPP, problema este determinarea vitezei unghiulare mecanice la care funcționează sistemul eolian astfel încât să se capteze energie maximă. Prin calcularea energiilor captate la diferite viteze unghiulare mecanice, se poate determina energia maximă captată.

### 3.6.2.3. Determinarea vitezei unghiulare mecanice optime

Sistemul eolian lucrează la momentul  $t_k$ , la viteza unghiulară mecanică  $\omega(t_k)=ct.$  Aproximativ constantă într-un interval scurt de timp. Problema este determinarea valorii lui  $\omega(t_k)$ , astfel încât sistemul eolian să lucreze la energie maximă.

Considerând intervalul de timp la care  $\omega(t_k) \approx ct.$ , având aceeași perioadă de oscilație a vitezei vântului ( $T=35$ [s]), se obține energia captată la diferite valori ale lui  $\omega$ .

$$W(\omega, T) = \int_0^{35} 23.584 \cdot \left( \frac{\left( (16 - 6 \cdot \sin(0.17943(t)) \cdot e^{-t/3600}) / \omega - 2.1231 \cdot 10^{-2} \right)}{e^{-98.06 \left( (16 - 6 \cdot \sin(0.17943(t)) \cdot e^{-t/3600}) / \omega - 0.0525 \right)}} \cdot \left( (16 - 6 \cdot \sin(0.17943(t)) \cdot e^{-t/3600}) \right)^3 \right) dt$$

Pentru  $t=0$ , energia maximă este obținută la  $\omega_{OPTIM-1}=550[\text{rad/s}]$ .

La funcționarea în gol, măsurând viteza unghiulară mecanică, valoarea lui  $\omega_{OPTIM-1}$  poate fi obținută și printr-o altă metodă.

### 3.6.2.4. Viteza și puterea echivalentă

La  $t=0$ , pe baza lui  $\omega_{OPTIM}$ , definind viteza echivalentă a vântului în forma (3.70), folosind dependența dintre  $\omega_{OPTIM}$  și  $V(t)$ , care a fost definită anterior, rezultă că  $N=3.78$ .

$$V_{ECH} = 3.78 \sqrt[3]{\frac{1}{35} \int_{t_k}^{t_k+T} (V(t))^{3.78} dt} \tag{3.70}$$

În concluzie, la momentul  $t_k$ , se poate calcula  $\omega_{OPTIM}$  după cum urmează:

- 1) S-a determinat viteza echivalentă cu relația:

$$V_{ECH} = 3.78 \sqrt[3]{\frac{1}{35} \int_{t_k}^{t_k+T} (V(t))^{3.78} dt} .$$

- 2) Viteza unghiulară mecanică optimă este calculată folosind relația:

$$\omega_{OPTIM} = 31.817 \cdot V_{ECH}$$

Viteza echivalentă la  $t=0[s]$ ,  $100[s]$ ,  $3000[s]$ ,  $6000[s]$  și  $9000[s]$  este:  $V_{ECH}(0)=17.298[\text{m/s}]$ ,  $V_{ECH}(1000)=13.148[\text{m/s}]$ ,  $V_{ECH}(3000)=7.537[\text{m/s}]$ ,  $V_{ECH}(6000)=3.2755[\text{m/s}]$ ,  $V_{ECH}(9000)=1.420[\text{m/s}]$ .

Diferența dintre vitezele echivalente ( $V_{ECH}$ ) și viteza medie a vântului ( $V_{AVERAGE}=16e^{-t/3600}$ ) este mai mică decât 9%, așa cum se prezintă în figura 3.55.

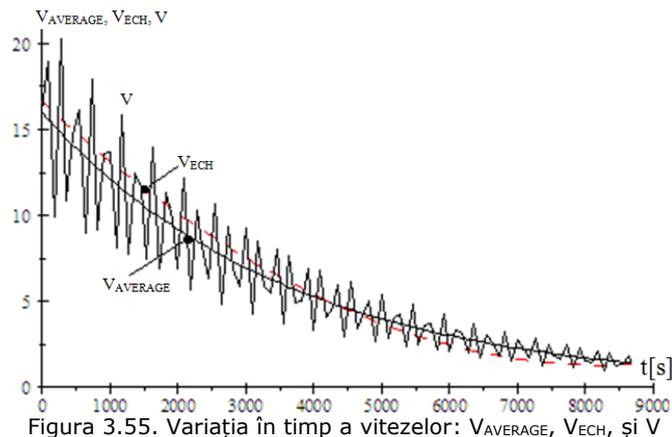


Figura 3.55. Variația în timp a vitezelor:  $V_{AVERAGE}$ ,  $V_{ECH}$ , și  $V$

Figura 3.56 prezintă variația în timp a vitezei unghiulare mecanice optime,  $\omega_{OPTIM} = 31.817 \cdot V_{ECH}$ .

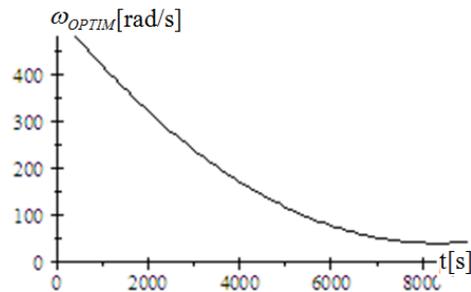


Figura 3.56. Variația în timp a vitezei unghiulare mecanice optime

Ecuția (3.71) reprezintă puterea turbinei la funcționare optimă, în ceea ce privește energia.

$$P_{WT}(t) = 23.584 \cdot \left( \frac{\left( (16 - 6 \cdot \sin(0.17943t)) \cdot e^{-t/3600} \right)}{\left( 7.1031 \cdot 10^{-6} t^2 - 0.11768t + 528.89 \right) - 2.1231 \cdot 10^{-2}} \right) \cdot e^{-98.06 \left( (16 - 6 \cdot \sin(0.17943t)) \cdot e^{-t/3600} \right) / \left( 7.1031 \cdot 10^{-6} t^2 - 0.11768t + 528.89 \right) - 0.0525} \cdot \left( (16 - 6 \cdot \sin(0.17943t)) \cdot e^{-t/3600} \right)^3 \quad (3.71)$$

Puterea medie a turbinei este calculată în (3.72), considerându-se o dependență liniară a eficienței sistemului de putere.

$$P_{WT-AVERAGE} \cdot \frac{0.9 P_{WT-AVERAGE}}{P_{WT-MAX}} = M_{PMSG} \cdot \omega \quad (3.72)$$

Figura 3.57.a. și figura 3.57.b. prezintă variația în timp a funcției  $P_{WT}$ .

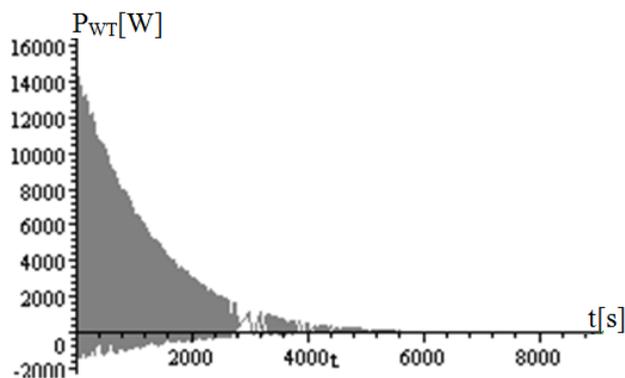
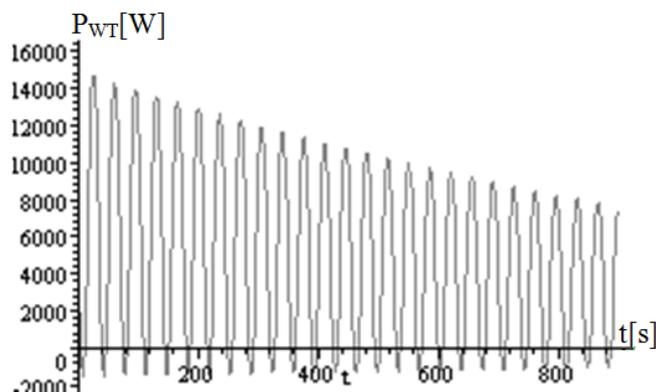


Figura 3.57.a. Variația în timp a  $P_{WT}$

Figura 3.57.b. Variația în timp a  $P_{WT}$  (detaliu)

### Concluzii

În acest subcapitol s-a determinat relația dintre viteza vântului și viteza optimă, la care sistemul trebuie să lucreze pentru a se obține energie maximă.

În urma analizării mai multor cazuri, s-au determinat mărimile de bază care duc la o funcționare optimă.

În acest subcapitol, prin simulări și măsurători a vitezei de rotație a generatorului la funcționarea în sarcină, s-a determinat viteza optimă a generatorului [24], astfel încât să se obțină energie maximă la viteză variabilă.

## 3.7. Comportamentul sistemului eolian controlat optim la viteză variabilă

Datorită faptului că viteza vântului este variabilă în timp, viteza unghiulară mecanică optimă ia diferite valori, fiind astfel necesară o ajustare corespunzătoare a sarcinii generatorului. Datorită inerțiilor mecanice mari, funcționarea sistemului eolian în MPP este posibilă doar la variații mici ale vitezei vântului, astfel încât la variații mari ale vitezei vântului este necesară o metodă bazată pe captarea energiei maxime pe un interval mare de timp.

Acest subcapitol tratează modalitatea de obținere a energiei optime la viteză variabilă, în acest fel, viteza unghiulară mecanică optimă  $\omega_{OPTIM}$  este determinată la o viteză a vântului măsurată  $[1 \div 6]$ , astfel încât energia obținută să fie maximă.

### 3.7.1. Studiu de caz

#### 3.7.1.1. Viteza echivalentă și puterea echivalentă

În acest subcapitol, a fost analizat un sistem eolian de putere  $P_N=22$ [kW] la o viteză ce variază în intervalul, i.e.  $5 \div 22$ [m/s].

Folosind relația (3.71), s-a determinat  $P_{WT-MAX} = 7061.5$ [W].

Prin urmare, s-a obținut variația în timp a rezistenței de sarcină, considerându-se o dependență liniară a cuplului generatorului de  $\omega$ , conform relației (3.73).

$$M_{PMG}(\omega, R) = 7.0263 \cdot \omega \cdot R^{-0.93348} \quad (3.73)$$

Pe baza puterii generatorului  $P_{TV-AVERAGE}$ :

$$P_{WT-AVERAGE} \cdot \frac{0.9 P_{WT-AVERAGE}}{P_{WT-MAX}} \cong 7.0263 \cdot \omega^2 / R$$

s-a determinat rezistența de sarcină folosind relația de mai jos:

$$R = 7.807 \cdot \frac{\omega^2 \cdot P_{WT-MAX}}{P_{WT-AVERAGE}^2}$$

În cazul funcționării la valoarea  $\omega_{OPTIM}$ , rezistența de sarcină ia valoarea de mai jos:

$$R = 55129 \cdot \frac{(7.1031 \cdot 10^{-6} t^2 - 0.11768 t + 528.89)^2}{P_{WT-AVERAGE}^2}$$

Figura 3.58.a. și figura 3.58.b. prezintă variația lui R.

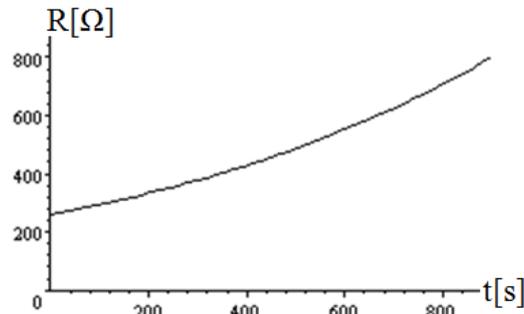


Figura 3.58.a. Variația rezistenței de sarcină (detaliu)

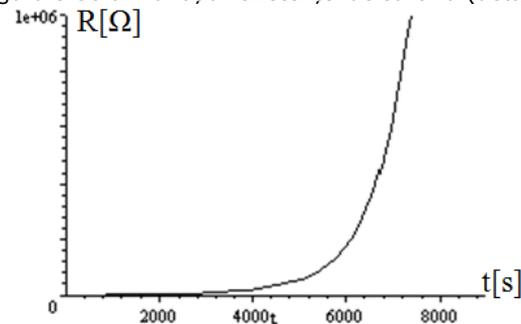


Figura 3.58.b. Variația rezistenței de sarcină

La  $t=0$ , s-a obținut valoarea medie a cuplului turbinei  $M_{WT}=12.831$ [Nm] pentru  $\omega=552.95$ [rad/s].

Rezistența de sarcină a generatorului,  $R(0)=464.55$ [Ω], obținută din egalitatea cuplului turbinei și a generatorului, reprezintă mărimea inițială a ecuației mișcării (3.75).

$$\begin{cases} 12.831 = 5445 \cdot \omega \cdot (5 \cdot R + 8) \cdot \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot R^2 + 2000 \cdot R + 1600}{(1250 \cdot R^2 + 4000 \cdot R + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2} \\ \omega = 552.95 \end{cases} \quad (3.74)$$

$$\text{Ecuția (6.2) are soluția: } \begin{cases} R = 464.55 \\ 552.95 \end{cases} .$$

Ecuția mișcării turbinei și generatorului în forma (3.75) și (3.76) permite vizualizarea variației în timp a vitezei unghiulare mecanice, așa cum rezultă din figura 3.59.

$$40 \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_{TV} - M_G \quad (3.74)$$

$$\begin{aligned} 40 \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} &= 23.584 \cdot \left( \left( (16 - 6 \cdot \sin(0.17943t)) \cdot e^{-t/3600} \right) / \omega - 2.1231 \cdot 10^{-2} \right) \cdot \\ &\cdot e^{-98.06 \left( \left( (16 - 6 \cdot \sin(0.17943t)) \cdot e^{-t/3600} \right) / \omega - 0.0525 \right)} \cdot \left( (16 - 6 \cdot \sin(0.17943t)) \cdot e^{-t/3600} \right)^3 - \\ &- 5445 \cdot \omega^2 \cdot (5 \cdot 464.55 + 8) \cdot \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot 464.55^2 + 2000 \cdot 464.55 + 1600}{(1250 \cdot 464.55^2 + 4000 \cdot 464.55 + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2} \\ \omega(0) &= 552.95 \end{aligned} \quad (3.75)$$

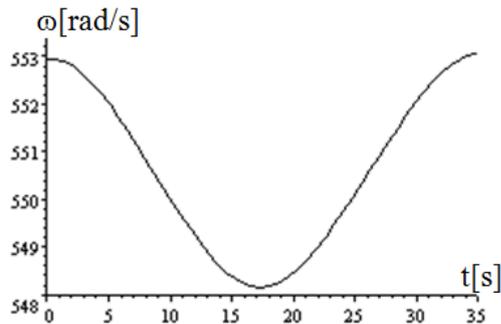


Figura 3.59. Variația în timp a lui  $\omega$

$$40 \cdot \omega d\omega = (M_{WT} \cdot \omega - M_G \cdot \omega) dt \quad (3.76)$$

La  $t=35[s]$ , viteza unghiulară mecanică, calculată din ecuația mișcării (3.76), este  $\omega(35)=553.05[\text{rad/s}]$ , iar prin integrarea ecuației mișcării pe-o perioadă  $T=35[s]$ , s-a obținut:

$$40 \cdot (\omega^2(35) - \omega^2(0)) = 4424 = \int_0^{35} (M_{WT} \cdot \omega - M_G \cdot \omega) dt$$

s-a dedus energia consumată de generator, dată în relația (3.77).

$$\int_0^{35} (M_G \cdot \omega) dt = \int_0^{35} (P_{WT}) dt - 4424 \quad (3.77)$$

sau,

$$\begin{aligned} \int_0^{35} (M_G \cdot \omega) dt &= \int_0^{35} \left( 23.584 \cdot \left( \left( (16 - 6 \cdot \sin(0.17943t)) \cdot e^{-t/3600} \right) / 550.5 - 2.1231 \cdot 10^{-2} \right) \cdot \right. \\ &\left. \cdot e^{-98.06 \left( \left( (16 - 6 \cdot \sin(0.17943t)) \cdot e^{-t/3600} \right) / 550.5 - 0.0525 \right)} \cdot \left( (16 - 6 \cdot \sin(0.17943t)) \cdot e^{-t/3600} \right)^3 \right) dt \\ &- 4424 = 2.4399 \cdot 10^5 [J] \end{aligned}$$

Aceeași valoare a energiei s-a obținut și pentru o viteză echivalentă notată cu  $V_{ECH-POWER}$ ,  $V_{ECH-POWER}=15.884e^{-t/3600}$ [m/s], obținută din (3.78).

$$\int_0^{35} \left( 23.584 \cdot \left( \frac{V_{ECH-POWER}}{550.5 - 2.1231 \cdot 10^{-2}} \cdot e^{-98.06 \left( \frac{V_{ECH-POWER}}{550.5 - 0.0525} \right)} \cdot (V_{ECH-POWER})^3 \right) \right) dt \quad (3.78)$$

$$- 4424 = 2.4399 \cdot 10^5$$

Viteza echivalentă ( $V_{ECH-POWER}$ ) are o valoare apropiată de cea a vitezei medii ( $V_{AVERAGE}$ ).

$$V_{AVERAGE} = \frac{1}{35} \int_0^{35} \left( (16 - 6 \cdot \sin(0.17943t)) \cdot e^{-t/3600} \right) dt = 15.913 \text{ m/s}$$

Utilizând  $V_{ECH-POWER}$ , s-a definit puterea echivalentă  $P_{WT-ECH}(t)$  așa cum rezultă din relația (3.79).

$$P_{WT-ECH}(t) = 23.584 \cdot \left( \frac{(15.844 \cdot e^{-t/3600}) \left( \frac{7.1031 \cdot 10^{-6} t^2 - 0.11768t + 528.89}{2.1231 \cdot 10^{-2}} \right)}{2.1231 \cdot 10^{-2}} \right) \cdot e^{-98.06 \left( \frac{15.844 \cdot e^{-t/3600}}{7.1031 \cdot 10^{-6} t^2 - 0.11768t + 528.89} \right) - 0.0525} \cdot (15.844 \cdot e^{-t/3600})^3 \quad (3.79)$$

Puterea reală  $P_{WT-REAL}(t)$ , și puterea echivalentă  $P_{WT-ECH}(t)$ , sunt date în figura 3.60.

$$P_{WT-REAL}(t) = 23.584 \cdot \left( \frac{\left( (16 - 6 \cdot \sin(0.17943t)) \cdot e^{-t/3600} \right) \left( \frac{7.1031 \cdot 10^{-6} t^2 - 0.11768t + 528.89}{2.1231 \cdot 10^{-2}} \right)}{2.1231 \cdot 10^{-2}} \right) \cdot e^{-98.06 \left( \frac{(16 - 6 \cdot \sin(0.17943t)) \cdot e^{-t/3600}}{7.1031 \cdot 10^{-6} t^2 - 0.11768t + 528.89} \right) - 0.0525} \cdot \left( (16 - 6 \cdot \sin(0.17943t)) \cdot e^{-t/3600} \right)^3$$

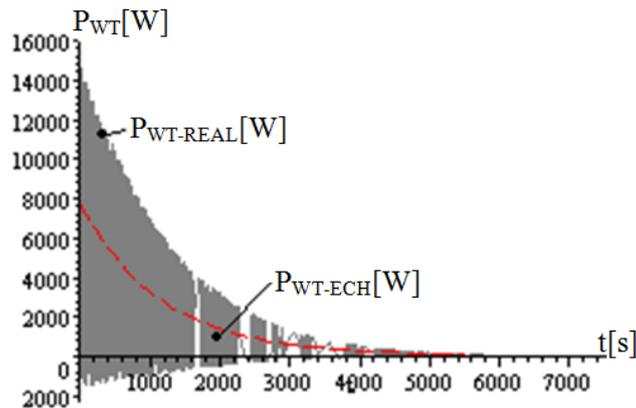


Figura 3.60. Variația în timp a puterilor

Figura 3.61.a. și Figura 3.61.b. prezintă variația în timp a vitezei unghiulare mecanice obținută cu ajutorul ecuației mișcării (3.80), considerându-se atât viteza reală  $V_{REAL}(t)$ , cât și viteza echivalentă  $V_{ECH}(t)$ .

$$V_{REAL}(t) = V(t) = (16 - 6 \cdot \sin(0.17943t)) \cdot e^{-t/3600}$$

$$V_{ECH}(t) \cong V_{MEDIU}(t) = 16 \cdot e^{-t/3600}$$

$$40 \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left( \frac{(16 - 6 \cdot \sin(0.17943t)) \cdot e^{-t/3600}}{\omega - 2.1231 \cdot 10^{-2}} \right) \cdot e^{-98.06 \left( \frac{(16 - 6 \cdot \sin(0.17943t)) \cdot e^{-t/3600}}{\omega - 0.0525} \right)} \cdot \left( \frac{(16 - 6 \cdot \sin(0.17943t)) \cdot e^{-t/3600}}{\omega - 2.1231 \cdot 10^{-2}} \right)^3 -$$

$$-5445 \cdot \omega^2 \cdot (5 \cdot 464.55 + 8) \cdot \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot 464.55^2 + 2000 \cdot 464.55 + 1600}{(1250 \cdot 464.55^2 + 4000 \cdot 464.55 + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2}$$

$$40 \cdot a \cdot \frac{da}{dt} = 23.584 \cdot \left( \frac{16 \cdot e^{-t/3600}}{a - 2.1231 \cdot 10^{-2}} \right) \cdot e^{-98.06 \left( \frac{16 \cdot e^{-t/3600}}{a - 0.0525} \right)} \cdot (16 \cdot e^{-t/3600})^3 - \quad (3.80)$$

$$-5445 \cdot a^2 \cdot (5 \cdot 264.55 + 8) \cdot \frac{4 \cdot a^2 + 625 \cdot 264.55^2 + 2000 \cdot 264.55 + 1600}{(1250 \cdot 264.55^2 + 4000 \cdot 264.55 + 3200 + 7 \cdot a^2)^2}$$

$$\omega(0) = 552.95$$

$$a(0) = 552.95$$

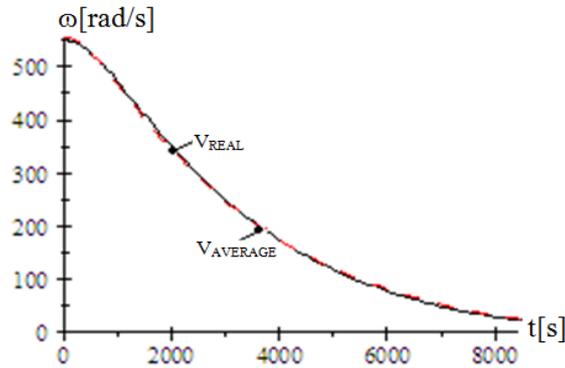


Figura 3.61.a. Variația în timp a lui  $\omega$  la  $V_{REAL}$  și  $V_{AVERAGE}$

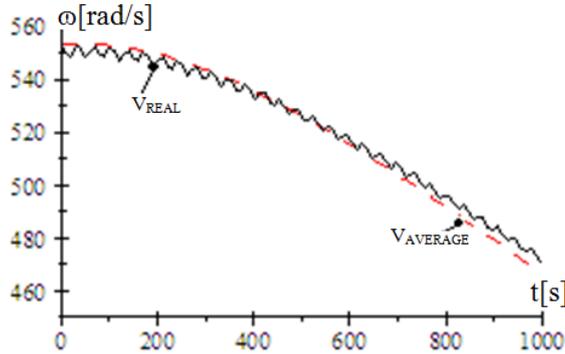


Figura 3.61.b. Variația în timp a lui  $\omega$  la  $V_{REAL}$  și  $V_{AVERAGE}$  (detaliu)

La  $t=999[s]$ , viteza unghiulară mecanică calculată folosind  $V_{AVERAGE}$  este  $\omega_1(999)=466.75[rad/s]$ , iar viteza unghiulară mecanică calculată folosind  $V_{REAL}$  este

$\omega_2(999)=470.31[\text{rad/s}]$ ; diferența dintre cele două cazuri fiind însă mică, adică 0.8%.

Din simulările prezentate mai jos se pot formula următoarele concluzii:

1. Determinarea vitezei unghiulare mecanice optime la viteză variabilă a vântului este o problemă dificilă.
2. Determinarea vitezei unghiulare mecanice optime nu se poate determina doar cunoscând viteza medie, fiind necesară înregistrarea variației reale a vitezei vântului, adică cunoașterea funcției  $V(t)$ .
3. În cazul calculării vitezei unghiulare mecanice optime, intervin integralele puterii de ordinul 4, 5 și 6, integrale ce pot fi calculate relativ ușor din moment ce se cunoaște funcția  $V(t)$  din măsurători.

### 3.7.1.2. Determinarea experimentală a zonei de optim energetic

La funcționarea în gol, prin înmulțirea ecuația mișcării  $J \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_{TV}$ , cu  $\omega$ ,

rezultă că  $J \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_{WT} \cdot \omega = P_{WT}$ , unde  $J$  momentul de inerție echivalent,  $M_{WT}$  este cuplul turbinei, iar  $P_{WT}$  este puterea turbinei.

Pornirea sistemului eolian în gol, măsurând viteza unghiulară mecanică ( $\omega$ ) în timp, prin soluționarea ecuației mișcării (3.81) cu ajutorul simulării, poate fi determinată zona de putere maximă a turbinei la valoarea maximă a produsului

$\omega \cdot \frac{d\omega}{dt}$  care este și valoarea maximă a puterii, așa cum rezultă din figura 3.62.

$$40 \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left( (16 - 6 \cdot \sin(0.17943t)) \cdot e^{-t/3600} \right) / \omega - 2.1231 \cdot 10^{-2} \cdot e^{-98.06 \left( (16 - 6 \cdot \sin(0.17943t)) \cdot e^{-t/3600} \right) / \omega - 0.0525} \cdot \left( (16 - 6 \cdot \sin(0.17943t)) \cdot e^{-t/3600} \right)^3 \quad (3.81)$$

$$\omega(0) = 333$$

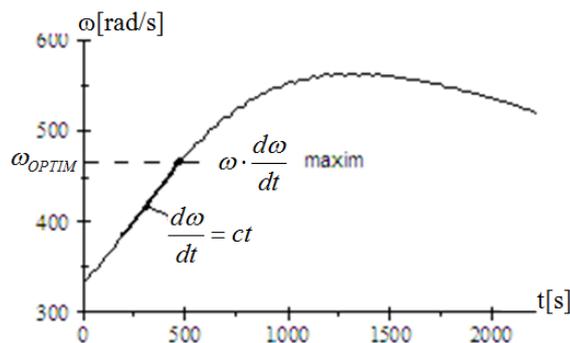


Figura 3.62. Variația lui  $\omega$ , și zona de optim energetic

Cunoașterea valorii  $\omega_{OPTIM}$ , la o anumită formă a variației vitezei vântului, este o necesitate în cazul controlului sistemelor eoliene.

Pentru a determina  $\omega_{OPTIM}$ , s-au utilizat rezultatele măsurătorilor vitezei vântului și-a vitezei de rotație a turbinei, ținând cont de faptul că generatorul funcționează în gol.

Pentru a avea loc egalitatea  $\omega = \omega_{OPTIM}$ , este necesară încărcarea generatorului cu o sarcină definită cu precizie cu ajutorul unui regulator.

### 3.7.1.3. Dinamica sistemului la diferite încărcări

Pentru două valori ale rezistenței de sarcină,  $R=464.55[\Omega]$  și  $R=264.55[\Omega]$ , utilizând relația (3.80), este posibilă redarea variației în timp a vitezei unghiulare mecanice, așa cum rezultă din figura 3.66.

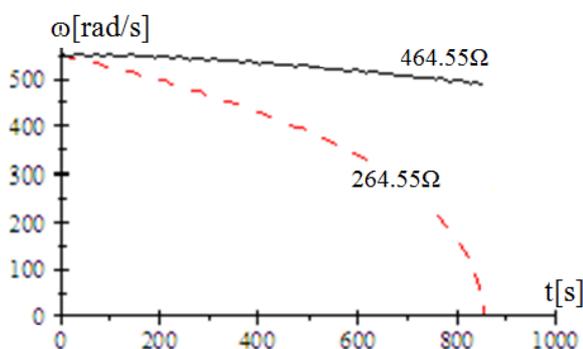


Figura 3.66. Variația în timp a lui  $\omega$

În timpul funcționării sistemului, în cazul rezistenței  $R_1=464.55[\Omega]$ , energia electrică  $W_e$  generată în intervalul  $\Delta t=8888[s]$  are valoarea  $W_{e-1}(8888)=1.4241 \cdot 10^7 [J]$  obținută din relația puterii  $P_{PMSG}(t)=dW_e/dt$ .

În cazul rezistenței  $R_2=264.55[\Omega]$ , într-un timp  $t=830[s]$ , energia electrică obținută prin soluționarea ecuației mișcării (3.82), este  $W_{e-2}(830)=9.0079 \cdot 10^6 [J]$ .

$$40 \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left( (16 - 6 \cdot \sin(0.17943t)) \cdot e^{-t/3600} \right) / \omega - 2.1231 \cdot 10^{-2} \cdot e^{-98.06 \left( (16 - 6 \cdot \sin(0.17943t)) \cdot e^{-t/3600} \right) / \omega - 0.0525} \cdot \left( (16 - 6 \cdot \sin(0.17943t)) \cdot e^{-t/3600} \right)^3 - 5445 \cdot \omega^2 \cdot (5 \cdot 464.55 + 8) \cdot \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot 464.55^2 + 2000 \cdot 464.55 + 1600}{(1250 \cdot 464.55^2 + 4000 \cdot 464.55 + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2} \quad (3.82)$$

$$\frac{dW}{dt} = 27225 \cdot 264.55 \omega^2 \cdot \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot 264.55^2 + 2000 \cdot 264.55 + 1600}{(1250 \cdot 264.55^2 + 4000 \cdot 264.55 + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2}$$

$$\omega(0) = 552.95$$

$$W(0) = 0$$

La  $t=830[s]$ , viteza de rotație a turbinei devine nulă, iar în acest fel nu se mai captează energie.

Diferența dintre cazurile  $W_{e-1}(8888)$  la  $R_1=464.55[\Omega]$ , și  $W_{e-2}(830)$  la  $R_2=264.55[\Omega]$  este mare, adică 36.747%.

Prin urmare, se poate afirma că, încărcarea generatorului în funcție de variația vitezei vântului stabilește cantitatea de energie captată.

În plus, energia maximă  $W_{e-4}(8888)=1.4325 \cdot 10^7$  J este obținută la o sarcină constantă  $R_4=364.55[\Omega]$ .

### 3.7.1.4. Variația în timp a puterilor

La rezistența  $R_4=364.55[\Omega]$ , prin soluționarea ecuației mișcării (3.83), se obține variația în timp a lui  $\omega$ , așa cum se observă în figura 3.67.

$$\begin{aligned}
 40 \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} &= 23.584 \cdot \left( \left( (16 - 6 \cdot \sin(0.17943t)) \cdot e^{-t/3600} \right) / \omega - 2.1231 \cdot 10^{-2} \right) \cdot \\
 &\cdot e^{-98.06 \left( (16 - 6 \cdot \sin(0.17943t)) \cdot e^{-t/3600} \right) / \omega - 0.0525} \cdot \left( (16 - 6 \cdot \sin(0.17943t)) \cdot e^{-t/3600} \right)^3 - \\
 &- 5445 \cdot \omega^2 \cdot (5 \cdot 464.55 + 8) \cdot \\
 &\cdot \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot 364.55^2 + 2000 \cdot 364.55 + 1600}{\left( 1250 \cdot 364.55^2 + 4000 \cdot 364.55 + 3200 + 7 \cdot \omega^2 \right)^2} \quad (3.83) \\
 \frac{dW}{dt} &= 9.9249 \cdot 10^6 \cdot \omega^2 \cdot \frac{4 \cdot \omega^2 + 8.3791 \cdot 10^7}{\left( 7 \cdot \omega^2 + 1.6758 \cdot 10^8 \right)^2} \\
 \omega(0) &= 552.95 \\
 W(0) &= 0
 \end{aligned}$$

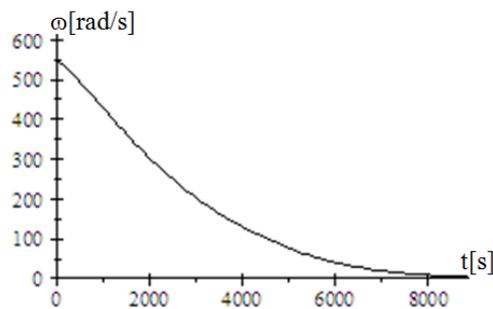


Figura 3.67. Variația în timp a lui  $\omega$  la  $R_4=364.55[\Omega]$

Funcția  $\omega(t)$  poate fi determinată prin analizarea variației lui  $\omega$  di figura 3.67.

$$\omega(t) = 9.4553 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 - 0.14357 t + 552.95$$

Pentru această formă de variație a lui  $\omega$ , se obține puterea dată de turbină în relația (3.84).

$$\begin{aligned}
 P_{WT}(t) &= 23.584 \cdot \left( \left( (16 - 6 \cdot \sin(0.17943t)) \cdot e^{-t/3600} \right) / \right. \\
 &\cdot e^{-98.06 \left( (16 - 6 \cdot \sin(0.17943t)) \cdot e^{-t/3600} \right) / (9.4553 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 - 0.14357t + 552.95) - 0.0525} \cdot \\
 &\cdot \left. \left( (16 - 6 \cdot \sin(0.17943t)) \cdot e^{-t/3600} \right)^3 \right) \quad (3.84)
 \end{aligned}$$

În mod asemănător se poate obține puterea debitată de generator, conform relației (3.85).

$$P_{PMSG}(t) = 9.9249 \cdot 10^6 \cdot \frac{4 \cdot (9.4553 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 - 0.14357t + 552.95)^2 + 8.3791 \cdot 10^7}{(7 \cdot (9.4553 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 - 0.14357t + 552.95)^2 + 1.6758 \cdot 10^8)^2} \cdot (9.4553 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 - 0.14357t + 552.95)^2 \quad (3.85)$$

Figura 3.68 prezintă variația în timp a puterilor turbinei și generatorului.

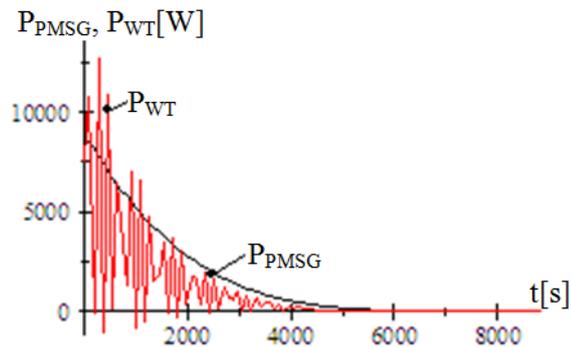


Figura 3.68. Variația în timp a puterilor  $P_{PMSG}(t)$  și  $P_{WT}(t)$

Oscilațiile mari ale puterii turbinei  $P_{WT}(t)$  nu se regăsesc în puterea debitată de generator  $P_{PMSG}(t)$ , datorită inerțiilor mecanice mari ale sistemului ( $J=40[\text{kg}\cdot\text{m}^2]$ ). În acest caz, inerția mecanică este utilă pentru atenuarea oscilațiilor puterii.

### 3.7.2. Controlul optim al sistemului eolian la viteză variabilă

Controlul optim al sistemului eolian trebuie să ofere energie maximă într-un interval mare de timp la viteză variabilă.

Controlul sistemului eolian la putere maximă, obținută de la generatorul electric, este o soluție corectă din punct de vedere tehnic, iar acest lucru impune estimarea mărimilor fundamentale care depind de viteza vântului, cum ar fi viteza de rotație a turbinei, curentul sau rezistența de sarcină a generatorului, dar și variația în timp a vitezei unghiulare mecanice optime  $\omega_{OPTIM}$ .

Energia eoliană maximă disponibilă pentru o viteză a vântului  $V(t)$ , în intervalul  $\Delta t$ , este extrasă prin impunerea vitezei de rotație (adică  $\omega_{OPTIM}$ ).

Funcționarea la o viteză de rotație optimă a fost realizată prin estimarea vitezei vântului cu ajutorul unui anemometru (figura 3.69), precum și prin calcularea lui  $\omega_{OPTIM}$ .

Cu ajutorul regulatorului, viteza unghiulară prescrisă ( $\omega_{OPTIM}$ ) a fost obținută, însă ajustarea regulatorului este o problemă mai ales atunci când viteza vântului este variabilă în timp.

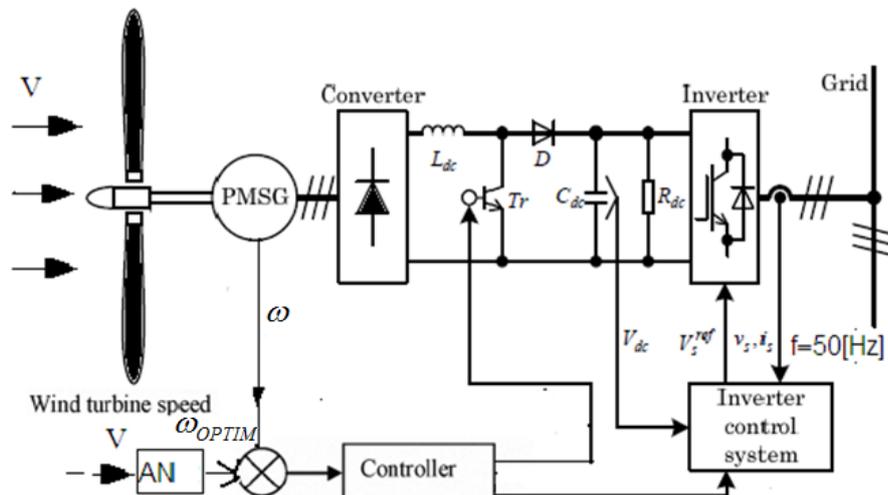


Figura 3.69. Controlul optim al sistemului eolian

### 70. Controlul optim al sistemului eolian

Prin măsurarea vitezei unghiulare mecanice de la arborele generatorului, se poate calcula diferența  $\Delta\omega = \omega_{OPTIM} - \omega$  care este intrare pentru regulator.

Regulatorul modifică încărcarea generatorului modificând unghiul de conducție al tiristoarelor convertorului care preia energia de la generator.

La  $\omega = \omega_{OPTIM}$ , se obține o energie maximă într-un interval dat de timp.

### Concluzii

Viteza unghiulară mecanică a fost obținută prin măsurarea vitezei vântului, după care s-a modificat sarcina generatorului cu ajutorul regulatorului, obținându-se astfel o funcționare optimă din punct de vedere energetic.

Pentru controlul sistemului eolian, s-au propus metode de calcul a vitezei de rotație pe baza vitezei vântului, astfel încât să se obțină o energie maximă.

La viteză variabilă, s-au definit viteza echivalentă a vântului și puterea echivalentă, mărimi fundamentale pentru determinarea lui  $\omega_{OPTIM}$ .

### Concluzii și direcții de cercetare

În acest capitol au fost propuse mai multe metode de control a sistemelor eoliene la viteză variabilă, astfel încât să se obțină energie maximă. Soluționarea ecuațiilor diferențiale [58] a fost realizată considerând o modelare sinusoidală a variației vitezei vântului.

Autorul a concluzionat faptul că, pentru a controla sistemul eolian la viteză variabilă, există mai multe probleme legate de variația vitezei vântului. În acest sens, au fost propuse metode de soluționare a acestor probleme.

Toate contribuțiile prezentate în acest capitol sunt verificate prin simulări numerice care se bazează pe modele matematice care descriu fenomenele fizice.

Aceste simulări sunt consumatoare de timp datorită faptului că implică ecuații diferențiale complicate, dar și condițiile lor inițiale.

Pentru a obține energie maximă la viteză variabilă a vântului, sistemul eolian trebuie controlat optim, dar în acest sens, este necesar controlul vitezei

unghiulare mecanice prin impunerea vitezei de referință pe intervalul  $\Delta t$ . Dar, variația vitezei unghiulare mecanice este dată de ecuația mișcării turbinei și generatorului.

Intențiile viitoare de cercetare se referă la reducerea timpului de soluționare necesar soluționării ecuațiilor diferențiale care modelează problemele domeniului energiei eoliene, prin utilizarea calculului științific de înaltă performanță pentru a paraleliza calculul științific cu ajutorul unor algoritmi paraleli consistenti.

## **4. METODE DE PARALELIZARE EXPLICITĂ PE O STRUCTURA PARALELĂ DE TIP MULTICORE**

### **4.1. Introducere**

Acest capitol se bazează exclusiv pe trei articole publicate în reviste de specialitate.

Așadar, acest capitol este structurat pe patru subcapitole, dintre care primul este o scurtă introducere asupra problematicii abordate în capitolul 4, iar următoarele trei subcapitole conținând contribuții proprii publicate în articolele listate în lista de lucrări.

Contribuțiile prezentate în acest capitol se referă la câteva metode de paralelizare explicite propuse pentru o structură de tip multicore. Pentru a evidenția eficiența acestor metode de paralelizare, s-au considerat pentru soluționare probleme cu valoare inițială din domeniul energiei eoliene. Aceste probleme au fost soluționate cu ajutorul metodelor de paralelizare explicită obținându-se rezultate semnificative.

Metodele de paralelizare au fost propuse în ideea de-a putea soluționa probleme dificile, precum sisteme de ecuații diferențiale obișnuite, cu ajutorul unui sistem multicore cu memorie partajată. Prin urmare, autorul a identificat și-a luat în considerare sisteme de ecuații diferențiale, a căror soluționare este dificil de realizat în mod secvențial, pentru care a utilizat metode de aproximare numerică și pentru care, ulterior, a propus algoritmi de paralelizare pentru a reduce timpul de soluționare, ținând cont de faptul că metodele de aproximare numerică sunt ele însele consumatoare de timp.

Ca atare, subcapitol 4.2 prezintă soluționarea paralelă a controlului unui sistem eolian care funcționează la viteză variabilă a vântului. Ideea de bază a fost reducerea timpului de soluționare necesar în cazul soluționării seriale a problemei legate de energia vântului, prin utilizarea calculului paralel. Însă, pentru partea de calcul paralel a soluționării problemei propuse, autorul a propus o structură paralelă pe care a numit-o "quad-parallel structure".

Subcapitol 4.3 prezintă atât dezvoltarea cât și paralelizarea a unei metode de simulare numerică directă propusă de autor pentru a studia comportamentul unui sistem eolian controlat optim la viteză variabilă a vântului. În acest sens, autorul a propus o metodă de paralelizare explicită care se bazează pe paralelismul datelor, folosind structura paralelă propusă în subcapitolul 4.2. În plus, această metodă de paralelism a datelor necesită o metodă de distribuție a datelor pe structura paralelă propusă, și pe care se lucrează. Drept urmare, autorul a propus o schemă de distribuție a datelor care distribuie un set mare de date pe structura paralelă pe care se lucrează utilizând o diagramă a fluxului de date propusă de autor, dar care este o parte componentă a schemei de distribuție a datelor.

Subcapitolul 4.4 prezintă o altă metodă de paralelizare propusă de autor pentru a fi aplicată unei metode de analiză numerică explicită utilizând o structură paralelă. Pentru a verifica eficiența metodei propuse, autorul a aplicat această metodă pentru a soluționa o metodă de analiză numerică explicită care se referă la utilizarea algoritmului Runge-Kutta de ordinul 4 pentru a soluționa un sistem de ecuații diferențiale ce descriu comportamentul unui sistem eolian la viteză variabilă a vântului.

Toate contribuțiile prezentate în acest capitol sunt contribuții proprii și aparțin domeniului calculului științific de înaltă performanță fiind aplicate pentru a soluționa aplicații reale din domeniul energiei eoliene a căror soluționare serială este foarte dificilă datorită complexității ecuațiilor diferențiale care descriu fenomenele fizice dar și a timpului mare de soluționare, toate acestea fiind publicate în reviste științifice de specialitate.

## 4.2. Soluționarea paralelă a controlului unui sistem eolian la viteză variabilă a vântului

### 4.2.1. Introducere

Ideea de bază este reducerea timpului de soluționare necesar soluționării seriale a unei probleme complexe din domeniul energiei eoliene, folosind calculul paralel. Acest subcapitol prezintă așadar atât soluționarea serială cât și cea paralelă a problemei propuse. Soluționarea serială a problemei menționate constă în dezvoltarea unui program Matlab și rularea acestuia pe clientul Matlab local. Pe de altă parte, soluționarea paralelă a problemei presupune rularea programului Matlab în paralel pe cluster-ul local al limbajului Matlab, cu ajutorul unei structuri paralele propuse.

Ca sursă de energie regenerabilă, vântul este materia primă pentru toate tipurile de sisteme eoliene.

Datorită faptului că viteza vântului este aleatoare [36], energia eoliană ia diferite valori (energia fiind o funcție dependentă de vânt).

Problema referitoare la energia eoliană constă în determinarea variației în timp a vitezei unghiulare mecanice care este dată de ecuația mișcării turbinei și generatorului sincron cu magneți permanenți în relația (4.2) [24].

Ecuația (4.2) a fost soluționată inițial cu ajutorul tool-ului Scientific WorkPlace în [25]. În această referință autorul a avut o problemă legată de timpul de soluționare mare pentru sistemul de ecuații diferențiale ce descriu problema.

Prin urmare, pentru a reduce timpul de soluționare, autorul a implementat această problemă în Matlab R2015a.

În acest sens, în acest subcapitol se prezintă soluționarea serială a problemei, iar pe de altă parte, a fost implementată și soluționarea paralelă a aceleiași probleme în două moduri diferite.

Pentru a evidenția câștigul de performanță obținut în urma soluționării ecuației diferențiale (4.2), folosind cele două metode de paralelizare propuse, autorul a măsurat atât timpul serial cât și timpul paralel.

Variația vitezei unghiulare mecanice este dată de ecuația mișcării din relația (4.1) sau (4.2). Ecuațiile (4.1) și (4.2) sunt obținute pe baza rezultatelor din [24] și [25].

$$40 \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_{TV} - M_G \quad (4.1)$$

$$\begin{aligned}
40 \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} &= 23.584 \cdot \left( \left( (16 - 6 \cdot \sin(0.17943t)) \cdot e^{-t/3600} \right) / \omega - 2.1231 \cdot 10^{-2} \right) \cdot \\
&\cdot e^{-98.06 \left( \left( (16 - 6 \cdot \sin(0.17943t)) \cdot e^{-t/3600} \right) / \omega - 0.0525 \right)} \cdot \left( (16 - 6 \cdot \sin(0.17943t)) \cdot e^{-t/3600} \right)^3 - \\
&- 5445 \cdot \omega^2 \cdot (5 \cdot 464.55 + 8) \cdot \\
&\cdot \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot 464.55^2 + 2000 \cdot 464.55 + 1600}{(1250 \cdot 464.55^2 + 4000 \cdot 464.55 + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2} \\
\omega(0) &= 552.95
\end{aligned} \tag{4.2}$$

În (4.1),  $M_{TV}$  reprezintă cuplul turbinei,  $M_G$  este cuplul generatorului, iar  $\omega$  este viteza unghiulară mecanică. Rezistența de sarcină a generatorului este  $R(0)=464.55[\Omega]$ .

De fapt, ecuația mișcării (4.2) este o ecuație diferențială complicată având condițiile inițiale:  $R(0)=464.55[\Omega]$  și  $\omega(0)=552.95[\text{rad/s}]$ , motiv pentru care se numește problemă cu valoare inițială.

#### 4.2.2. Soluționarea serială a ecuației diferențiale

În acest capitol se prezintă soluționarea problemei utilizând metoda de soluționare numerică Runge-Kutta de ordinul 4 precum și integratorul Matlab ode23.

Soluționarea serială nu este o etapă obligatorie, însă autorul a parcurs și această etapă pentru a verifica corectitudinea metodei de analiză numerică, pe de-o parte, iar pe de altă parte, pentru a compara timpul se soluționare serial cu cel paralel și-a evidențiat în acest fel câștigul de performanță.

Așadar, soluționarea serială este o implementare obișnuită a scriptului Matlab, adică s-a rulat scriptul Matlab `the_main_code.m` dezvoltat pentru a implementa soluționarea serială a problemei pe clientul local Matlab.

Așa cum deja s-a precizat, scriptul `the_main_code.m` a fost dezvoltat de autor pentru a soluționa în mod serial ecuația diferențială ce descrie problema cu valoare inițială propusă spre soluționare, utilizând atât integratorul ode23 (ce implementează algoritmul Runge-Kutta de ordin 2 și 3) cât și ode45 ((ce implementează algoritmul Runge-Kutta de ordin 4,5)) pentru a integra ecuația (4.2), ecuație pe care autorul a implementat-o într-o funcție Matlab numită `Ode_function.m`, funcție care a fost apelată de scriptul `the_main_code.m`.

Metoda de integrare ode23 [38] soluționează ecuația diferențială utilizând algoritmul Runge-Kutta de ordinul 2 și 3. Această funcție calculează aproximarea numerică după care afișează grafic rezultatele în figura 4.1.

Primul argument al solver-ului ode23 implementat în `the_main_code.m` este funcția `Ode_function.m` care implementează ecuația diferențială (4.2). Această funcție primește două argumente reale, respectiv  $t$  și  $\omega$  (viteza unghiulară mecanică), iar rezultatul evaluării funcției este un vector coloană numit `DomegaDt` ce conține valorile derivatei  $d\omega/dt$ .

Al doilea argument al solver-ului ode23 este un vector care are două componente  $t_0=0[s]$ , și  $t_{final}=35[s]$ , deoarece integrarea ecuației (4.2) se face pe intervalul  $0 \leq t \leq 35$ .

Condiția inițială ( $\omega_0=552.95[\Omega]$ ) a ecuației diferențiale (4.2) este cel de-al treilea argument al integratorului ode23.

În cazul acestei probleme cu valoare inițială soluția obținută în cazul utilizării solverului ode23 (roșu) este aproximativ aceeași cu cea în cazul utilizării solver-ului ode45, așa cum rezultă din figura 4.1.

Timpul total petrecut în cazul soluționării seriale a problemei propuse este 1.388989 secunde, așa cum rezultă din listing-ul de mai jos.

```
>> the_main_code
Serial solution:
Elapsed time is 1.388989 seconds.
```

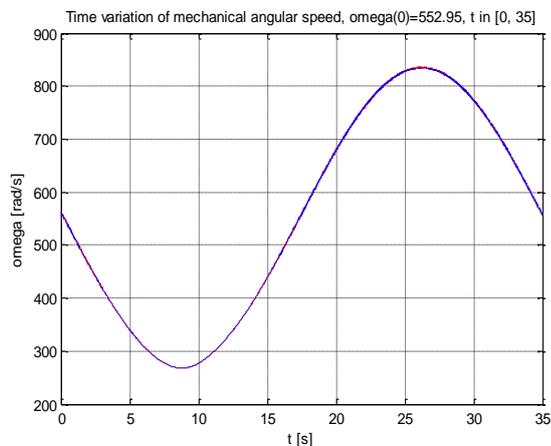


Figura 4.1. Variația vitezei unghiulare mecanice (soluționare serială)

#### 4.2.3. Soluționarea paralelă a ecuației diferențiale

Calculul paralel poate economisi bani și timp. În plus, el poate soluționa probleme complicate care pot fi soluționate concurențial și a căror soluționare serială limitează computația [39].

Utilizatorii dezvoltă algoritmi paraleli fie pentru a reduce timpul alocat computației fie pentru a face o analiză a unor seturi de date mari [40].

Dacă timpul necesar computației este mai mic decât timpul necesar comunicării dintre worker-i (sau timpul necesar transferului datelor prin rețea) atunci calculul paralel nu este util.

Pe de altă parte, analizele care includ seturi de date mici sunt în general impracticabile în ceea ce privește timpul necesar [40].

Argumentele de mai sus sunt doar câteva motive pentru care calculul paralel ar trebui utilizat doar în cazul soluționării aplicațiilor complicate.

Calculul paralel al problemei date s-a realizat cu ajutorul tool-ului de Parallel Computing Toolbox al Matlab-ului 2015a. Acest tool permite soluționarea problemelor computaționale și care se bazează pe seturi mari de date prin utilizarea mai multor procesoare, unități de procesare grafică și cluster-e [41].

Prin urmare, pentru a paraleliza (fără a utiliza tehnologia CUDA sau programarea MPI) problema propusă, autorul a utilizat capacitatea procesării multicore a tool-ului de calcul paralel al limbajului Matlab.

În plus, Parallel Computing Toolbox oferă un cluster local de worker-i pentru clientul Matlab [41].

Astfel, pentru a paraleliza aplicația considerată, autorul a utilizat un supercomputer având un procesor i7 cu patru nuclee. Din acest motiv, scriptul `the_main_code.m` care apelează funcția `Ode_function.m` a fost rulat pe un pool paralel care constă din 4 workeri Matlab utilizați în același timp.

#### 4.2.3.1. Paralelizare utilizând o structură paralelă numită "quad-parallel"

În acest caz, pentru a soluționa scriptul `the_main_code.m` (care implementează problema propusă) în paralel, autorul a propus o structură paralelă care constă din 4 workeri Matlab grupați într-un pool paralel, numită structură de tip "quad-parallel".

Astfel, acest pool paralel este un set de 4 workeri Matlab aflați pe cluster-ul local, dar care pot fi accesați ca entitate la un moment dat din sesiunea client Matlab, așa cum se observă din figura 4.2.

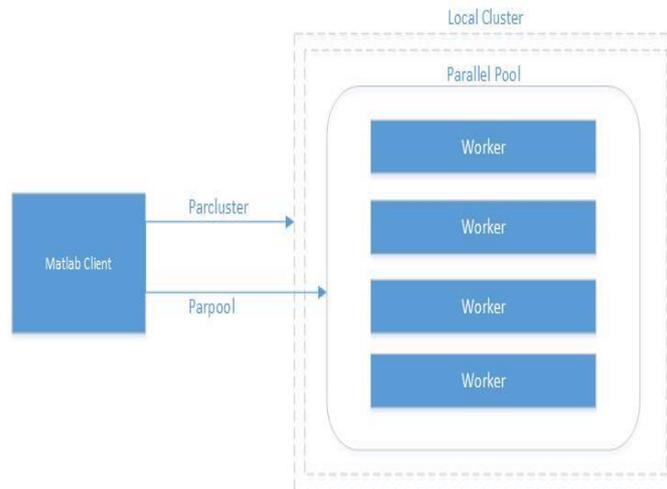


Figura 4.2. Structura de tip "quad-parallel"

Figura 4.2 prezintă structura paralelă de tip "quad-parallel" propusă pentru a soluționa aplicația în paralel astfel încât să se reducă timpul de soluționare.

Pool-ul paralel este deschis cu ajutorul profilului local, deschizându-se astfel o sesiune paralelă în care se soluționează codul `the_main_code.m`,

Rezultatul obținut în cazul soluționării paralele, folosind structura paralelă propusă, arată faptul că timpul paralel este 0.651275 secunde, așa cum rezultă din listing-ul de mai jos.

```
Starting parallel pool (parpool) using the 'local' profile ...
connected to 4 workers.
>> the_main_code
Parallel solution:
    Elapsed time is 0.651275 seconds.
```

Comparând timpul necesar soluționării paralele (0.651275 secunde), cu timpul serial (1.388989 secunde), se poate observa câștigul de performanță care este 0,737714 secunde (ceea ce înseamnă mai mult de 50% mai puțin timp pentru soluționarea problemei).

#### 4.2.3.2. Paralelizare cu ajutorul modului interactiv

În acest caz, problema a fost soluționată cu ajutorul modului interactiv de paralelizare disponibil pe clientul Matlab, permițând astfel execuția paralelă interactivă a programului `the_main_code.m` utilizând aceeași structură paralelă.

Astfel, paralelizarea problemei propuse s-a realizat prin definirea și transmiterea unui job de comunicare și prin deschiderea unei ferestre numite Parallel Command Window (dată în figura 4.3) conectată la cei patru `worker` aparținând structurii paralele propuse și care rulează job-ul trimis.

Prin urmare, un scheduler local a fost utilizat iar cei 4 `worker` au rulat pe clientul local.

În principiu, au fost utilizați 4 `worker`, s-a creat un job de comunicare pentru a fi rulat simultan pe cei 4 `worker`. Fiecare `worker` a rulat scriptul `the_main_code.m` pe propriul său workspace și pe propriile sale variabile. Fiecare dintre cei patru `worker` devine "idle" în momentul în care-și termină activitatea așteptând ca toți ceilalți `worker` care lucrează pe același job să-și termine activitatea.

În figura 4.3 se pot observa timpii necesari soluționării paralele, pe fiecare `worker`, după ce fiecare execuție paralelă interactivă a scriptului `the_main_code.m`.

Pentru a demonstra eficiența structurii paralele propuse în cazul modului interactiv de execuție a problemei propuse, autorul a obținut mai mulți timpi de soluționare (obținuți din mai multe soluționări paralele), astfel, fiecare `worker` conține mai mulți timpi paraleli (câte unul pentru fiecare soluționare paralelă interactivă).

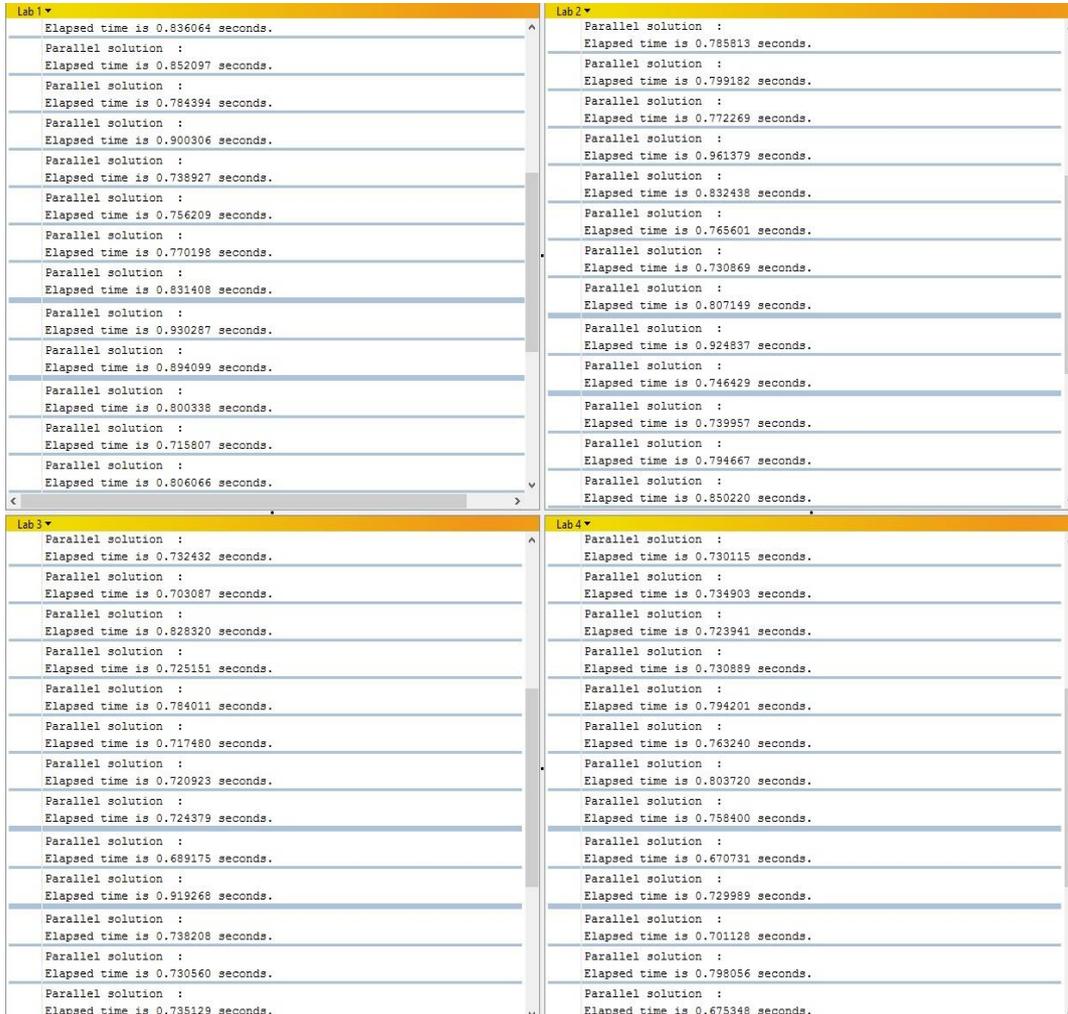


Figura 4.3. Parallel command window

Autorul a constatat faptul că fiecare worker are timp de soluționare diferit pentru aceeași soluționare paralelă (au fost utilizați toți cei patru workeri simultan la fiecare soluționare paralelă), iar toți timpii paraleli (din fiecare worker) sunt mai mici decât timpul serial corespunzător problemei propuse spre soluționare

## Concluzii

Autorul a constatat că, chiar și-n cazul soluționării seriale, s-a obținut un timp de soluționare serială mai mic decât în cazul soluționării problemei cu ajutorul tool-ului Scientific WorkPlace, implementarea aceleiași probleme în Matlab fiind deci un succes.

De asemenea, autorul a mai demonstrat faptul că structura paralelă propusă a fost eficientă atât în cazul modului paralel de execuție cât și-n cazul modului interactiv paralel.

Timpul de soluționare necesar, în cazul problemei propuse utilizând structura paralelă propusă, execuției paralele a fost redus considerabil (0.651275 secunde), dacă se compară acest timp cu timpul serial (1.388989 secunde).

Pe de altă parte, timpii paraleli obținuți din mai multe rulări paralele interactive, în cazul modului interactiv paralel, au valori apropiate de 0.651275 secunde, așa cum se poate observa în figura 4.3.

Astfel, structura paralelă "quad-parallel" este utilă pentru dezvoltarea unui cod paralel mai complicat, în sensul că se poate reduce timpul necesar computației. Așadar, această structură paralelă poate fi utilizată pentru orice alte tipuri de aplicații complexe care necesită calcul paralel pentru reducerea timpului de soluționare.

### **4.3. Dezvoltarea și paralelizarea unei simulări numerice directe pentru a studia comportamentul unui sistem eolian controlat optim la viteză variabilă a vântului**

#### **4.3.1. Introducere**

Acest capitol prezintă dezvoltarea și paralelizarea a unei metode de simulare numerică directă utilizată pentru a studia comportamentul unui sistem eolian care funcționează la viteză variabilă a vântului.

În acest sens, autorul a propus o metodă de serializare care implementează acest studiu secvențial pe resursele hardware disponibile.

Pentru a reduce timpul de soluționare necesar implementării acestui studiu în mod serial, autorul a propus și implementat o metodă de paralelizare explicită bazată pe paralelismul datelor, utilizând structura paralelă "quad-parallel".

Pentru a utiliza metoda referitoare la paralelismul datelor propusă pentru a accelera soluționarea problemei cu valoare inițială, autorul a propus o schemă de distribuție a datelor utilizată pentru a distribui un set mare de date pe structura paralelă "quad-parallel". Această schemă de distribuție a datelor a fost testată în cazul a două structuri paralele de tip "single program-multiple data" care paralelizează algoritmul Runge-Kutta de ordinul 4 pe un sistem multicore cu memorie partajată. Cele două structuri de tip "single program-multiple data" paralelizează fiecare câte o ecuație din cele două ecuații ale unui sistem de ecuații diferențiale care descrie comportamentul sistemului eolian prezentat.

În plus, autorul a propus o diagramă a fluxului de date pentru schema de distribuție a datelor propusă. Această diagramă a fluxului de date a fost propusă pentru a analiza fluxul de date de pe structura paralelă.

Pentru a studia comportamentul unui sistem eolian controlat optim la viteză variabilă, autorul a dezvoltat și paralelizat simularea numerică directă a unui sistem de două ecuații diferențiale, prima ecuație descriind comportamentul sistemului eolian la viteză reală a vântului, iar cea de-a doua ecuație descriind comportamentul sistemului eolian la viteză echivalentă a vântului.

Acest studiu se bazează pe referința [25] care tratează comportamentul unui sistem eolian controlat optim la viteză variabilă. Dar în [25], autorul tratează problema strict din punct de vedere energetic.

Prin urmare, acest capitol este o extensie a referinței [25] în sensul că autorul a utilizat rezultatele experimentale pentru a soluționa problemele cu care s-a confruntat în [25].

Problemele care au intervenit se referă la timp de soluționare mare (de ordinul minutelor) necesar soluționării sistemului de ecuații diferențiale (4.3) (reprezentând ecuația mișcării) care modelează variația în timp a vitezei unghiulare mecanice

Astfel, pentru reducerea timpului de soluționare necesar rezolvării sistemului de ecuații diferențiale, autorul a implementat această problemă în Matlab versiunea R2015a.

Pentru a evidenția câștigul de performanță obținut în urma soluționării sistemului de ecuații diferențiale (4.3) utilizând metodele de paralelizare propuse, autorul a determinat atât timpul de soluționare serial cât și cel paralel.

#### 4.3.2. Problema cu valoare inițială. Ecuațiile diferențiale guvernatoare

Pentru a studia comportamentul sistemului eolian la viteză variabilă [25], a fost analizat un sistem eolian de putere  $P_N=22$ [kW] la o viteză a vântului ce variază în intervalul  $5 \div 22$ [m/s] [21].

Acest studiu se bazează pe simularea numerică directă care utilizează ecuația mișcării (4.3). Pentru a realiza această analiză, s-au utilizat modele matematice corespunzătoare pentru turbină și generator [21].

Ecuația mișcării turbinei și generatorului dată în (4.3) permite vizualizarea variației vitezei unghiulare mecanice [21], considerând o viteză reală a vântului  $V_{REAL}(t)$  (4.1), precum și o viteză echivalentă a vântului  $V_{ECH}(t)$  (4.2), așa cum rezultă din figura 4.1 și figura 4.2.

Așadar, prima ecuație a sistemului (4.3) permite vizualizarea variației în timp a vitezei unghiulare mecanice ce depinde de viteza reală a vântului (4.1), iar cea de-a doua ecuație permite vizualizarea variației în timp a vitezei unghiulare mecanice ce depinde de viteza echivalentă a vântului (4.2).

$$V_{REAL}(t) = V(t) = (16 - 6 \cdot \sin(0.17943t)) \cdot e^{-t/3600} \quad (4.1)$$

$$V_{ECH}(t) \cong V_{MEDIU}(t) = 16 \cdot e^{-t/3600} \quad (4.2)$$

$$\begin{aligned}
 40 \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} &= 23.584 \cdot \left( \left( (16 - 6 \cdot \sin(0.17943t)) \cdot e^{-t/3600} \right) / \omega - 2.1231 \cdot 10^{-2} \right) \cdot \\
 &\cdot e^{-98.06 \left( (16 - 6 \cdot \sin(0.17943t)) \cdot e^{-t/3600} \right) / \omega - 0.0525} \cdot \left( (16 - 6 \cdot \sin(0.17943t)) \cdot e^{-t/3600} \right)^3 - \\
 &- 5445 \cdot \omega^2 \cdot (5 \cdot 464.55 + 8) \cdot \\
 &\cdot \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot 464.55^2 + 2000 \cdot 464.55 + 1600}{\left( 1250 \cdot 464.55^2 + 4000 \cdot 464.55 + 3200 + 7 \cdot \omega^2 \right)^2} \\
 40 \cdot a \cdot \frac{da}{dt} &= 23.584 \cdot \left( \left( 16 \cdot e^{-t/3600} \right) / a - 2.1231 \cdot 10^{-2} \right) \cdot \\
 &\cdot e^{-98.06 \left( 16 \cdot e^{-t/3600} \right) / a - 0.0525} \cdot \left( 16 \cdot e^{-t/3600} \right)^3 - 5445 \cdot a^2 \cdot (5 \cdot 264.55 + 8) \cdot \\
 &\cdot \frac{4 \cdot a^2 + 625 \cdot 264.55^2 + 2000 \cdot 264.55 + 1600}{\left( 1250 \cdot 264.55^2 + 4000 \cdot 264.55 + 3200 + 7 \cdot a^2 \right)^2} \\
 \omega(0) &= 552.95 \\
 a(0) &= 552.95
 \end{aligned}
 \tag{4.3}$$

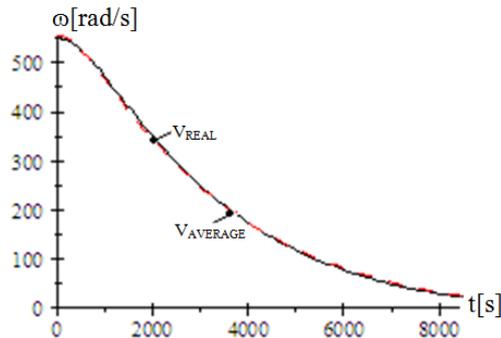


Figura 4.1. Variația în timp a lui  $\omega$  la  $V_{REAL}$  și  $V_{AVERAGE}$  [37]

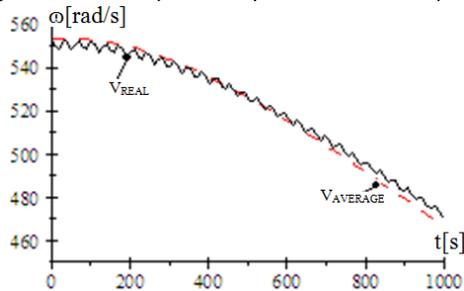


Figura 4.2. Variația în timp a lui  $\omega$  la  $V_{REAL}$  și  $V_{AVERAGE}$  (detaliu) [37]

Până în acest moment, din simulările anterioare realizate în Scientific WorkPlace în [37], autorul a concluzionat că pentru  $t=999[s]$  viteza unghiulară mecanică calculată utilizând  $V_{AVERAGE}$  este  $\omega_1(999)=466.75[rad/s]$ , iar viteza unghiulară mecanică calculată cu  $V_{REAL}$  este  $\omega_2(999)=470.31[rad/s]$ , diferența dintre cele două cazuri fiind redusă, adică 0.8[%].

Simulările au fost realizate considerând un interval de simulare de aproximativ 2.5 ore, deoarece toate simulările trebuie să se bazeze pe un interval de simulare de cel puțin ordinul orelor datorită inerțiilor mecanice mari.

### 4.3.3. Activități de cercetare similare

Dezvoltarea mediului economic implică o necesitate aflată într-o continuă creștere de-a face cercetare multidisciplinară, dar cercetarea multidisciplinară implică domenii conexe, motiv pentru care această teză conectează domenii precum HPC (calcul paralel și calcul științific), domeniul energiei eoliene, dar și analiză matematică (implicit).

În zilele noastre, toate domeniile ingineresti manifestă o necesitate crescută de-ași rezolva problemele cu ajutorul supercomputere-lor și cu ajutorul calculului paralel.

Trebuie remarcat faptul că domeniul calculului paralel nu este un lucru mic, mai mult decât atât, calculul paralel este un instrument care are o mare însemnătate dacă se utilizează acolo unde este nevoie. Acesta a fost unul din motivele pentru care autorul a decis să aplice calculul paralel pentru soluționarea problemelor identificate (și prezentate în această teză) în domeniul energiei eoliene.

Pentru a oferi cea mai simplă extensie practicilor curente de programare în stil SPMD (single program multiple data), contribuții semnificative sunt prezentate în [42] în care autorii prezintă un studiu al componentei de calcul paralel de înaltă performanță.

De asemenea, sunt articole cu valoare științifică care tratează cu succes implementarea calculului paralel în domeniul calculatoarelor, pe probleme teoretice. Din acest motiv, autorul a decis aplicarea calculului paralel pentru soluționarea problemelor complexe cu valoare inițială dintr-un domeniu ingineresc precum domeniul energiei eoliene (care este o "componentă" importantă a domeniului energiei verzi [36]). O mare parte din aceste probleme au fost identificate și analizate în [37].

### 4.3.4. Accelerarea codului MATLAB

Pentru a accelera execuția codului Matlab, în referința [43] autorii prezintă soluții actuale care depind de hardware-ul utilizat. În acest sens, în cazul unui singur procesor, soluția este utilizarea tool-ului Matlab ca atare, multithreading-ul este soluția în cazul hardware-ului multi-core, GPU computing în cazul hardware-ului GPGPU, calcul paralel pentru hardware-ul mutiprocessor, precum și calculul distribuit în cazul cluster-ului și grid-ului.

În acest caz, calculul paralel a fost utilizat pentru accelerarea soluționării codului Matlab dezvoltat, utilizând capacitatea Matlab-ului de-a rula mai mulți workeri (care sunt de fapt sesiuni Matlab fără display) pe un sistem multi-core cu memorie partajată.

Resursele hardware utilizate în cazul implementării contribuțiilor propuse în prezenta teză constau într-un procesor Intel(R) Core(TM) i7-2600K CPU @ 3.40GHz, și 8.00GB RAM.

Așadar, autorul a considerat structura paralelă "quad-parallel" propusă în [29] ca suport paralel pe care dezvoltat și rulat programul Matlab.

#### **4.3.5. Implementarea studiului propus. Simularea problemei cu valoare inițială**

##### **4.3.5.1. Calculul serial al problemei. Metoda de analiză numerică**

În această parte, autorul a propus și dezvoltat un program secvențial care implementează metoda de analiză numerică în Matlab pentru a soluționa sistemul de ecuații diferențiale (4.3).

Metoda de analiză numerică care a fost implementată pentru a fi rulată în mod serial se referă la utilizarea și adaptarea integratorului Runge-Kutta de ordinul 4 [44] pentru soluționarea sistemului de ecuații diferențiale.

Cu alte cuvinte, autorul a dezvoltat un algoritm secvențial care presupune execuția ordonată a proceselor într-o manieră secvențială, așa cum rezultă din figura 4.3.

Motivația pentru calculul serial o constituie faptul că pentru a paraleliza computația numerică, implementarea serială este necesară pentru a verifica corectitudinea metodei de analiză numerică pe de-o parte, iar pe de altă parte, pentru a compara rezultatele obținute și-a evidenția în acest fel câștigul de performanță.

Pentru a testa eficiența codului paralel, unul dintre cei mai simpli și utilizați indicatori de performanță este raportul dintre timpul necesar execuției seriale și timpul necesar execuției paralele.

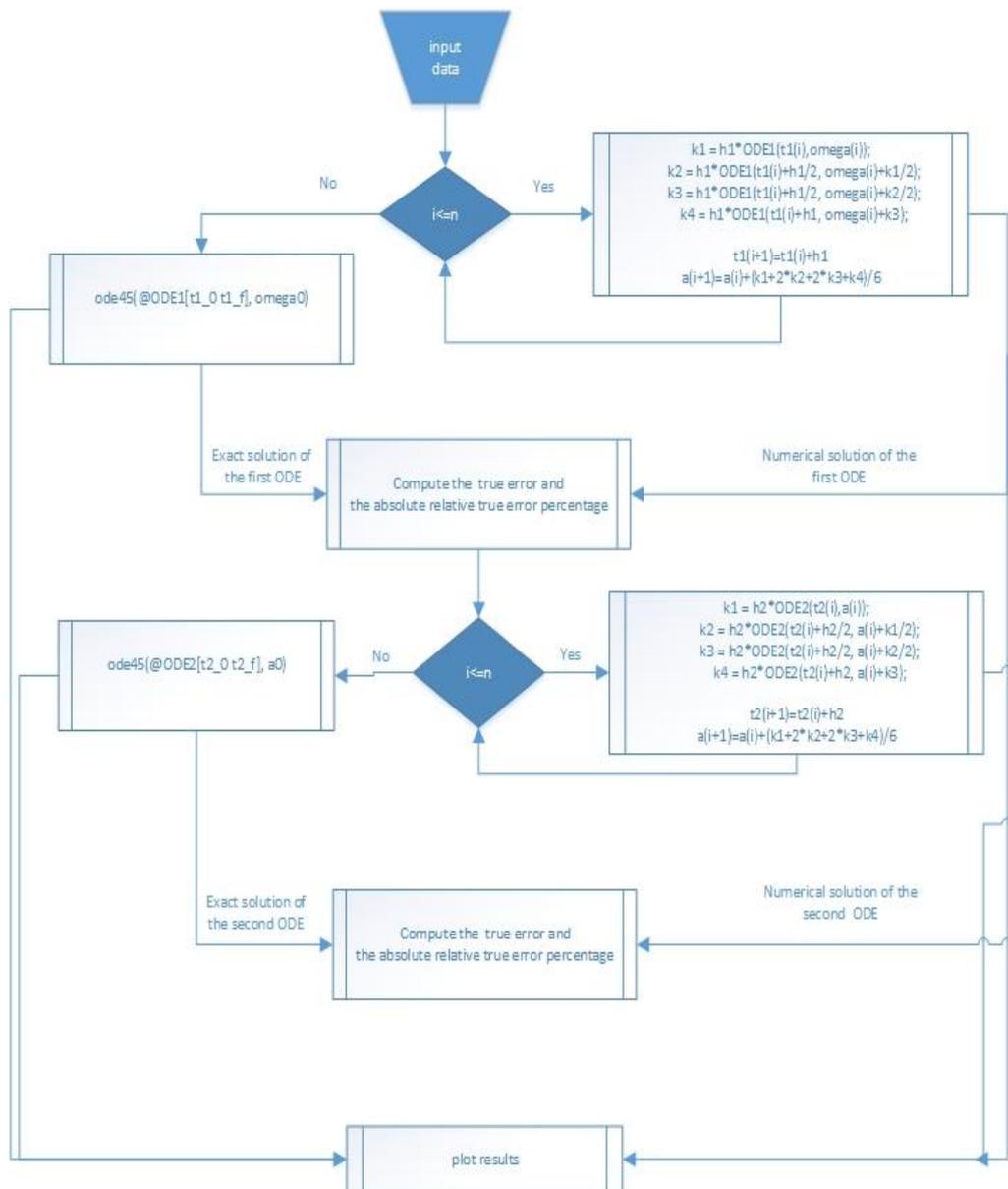


Figura 4.3. Implementare serială

Datorită faptului că metoda iterativă Runge-Kutta [44] este o metodă de numerică de soluționare a problemelor cu valoare inițială, autorul a implementat algoritmul Runge-Kutta de ordinul 4 pentru aproximarea soluției sistemului de ecuații diferențiale (4.3), utilizând ecuațiile exprimate în forma  $d\omega/dt=f(t,\omega)$  și  $da/dt=f(t,a)$ .

Datele de intrare necesare începerii simulării ecuației mișcării (4.3) cu ajutorul integratorului RK4, sunt date în tabelul 4.1. Aceste date de intrare pot fi modificate în fișierul Matlab corespunzător algoritmului serial `rungekutta_sys.m`.

1. Datele de intrare necesare începerii simulării ecuației mișcării cu ajutorul integratorului R

Tabelul 4.1. Datele de intrare necesare începerii simulării ecuației mișcării cu ajutorul integratorului R

Input data	Description
<b>f1=d<math>\omega</math>/dt</b>	the first ordinary differential equation of the system
<b>t1_0=0</b>	location of known initial condition for f1
<b>t1_f=9000</b>	location at where you wish to see the solution of the first ODE
<b><math>\omega</math>0=552.95</b>	corresponding value of the mechanical angular speed at t1_0
<b>f2=da/dt</b>	the second ordinary differential equation of the system
<b>t2_0=0</b>	location of known initial condition for f2
<b>t2_f=9000</b>	location at where you wish to see the solution of the second ODE
<b>a0=552.95</b>	assign initial value of the mechanical angular speed
<b>n</b>	number of steps to take
<b>h=(t_f-t0)/n</b>	the step size h is constant

Simularea metodei începe cu calcularea pașilor metodei k1, k2, k3, și k4, după care s-a adăugat dimensiunea pasului pentru a putea trece la următorul pas, iar în final, prin utilizarea formulei metodei numerice s-a calculat viteza unghiulară mecanică pentru pasul curent. Această secvență de cod a fost executată într-o structură repetitivă până când condiția structurii repetitive a ajuns la valoarea egală cu numărul de pași necesari a fi executați.

Fiecare pas al buclei a fost calculat secvențial, obținându-se valorile k1, k2, k3, k4, precum și viteza unghiulară mecanică la diferite momente de timp.

Practic, autorul a implementat algoritmul Runge-Kutta de ordinul 4 de două ori pentru a soluționa sistemul de ecuații diferențiale, odată pentru fiecare ecuație în parte.

Prin urmare, la fiecare pas al soluționării fiecărei ecuații, valoarea curentă a vitezei unghiulare mecanice a fost obținută pe baza valorilor curente ale k1, k2, k3, k4, așa cum rezultă din tabelul 4.2 și tabelul 4.3.

În cazul vitezei reale a vântului, viteza unghiulară mecanică aproximativă obținută la momentul  $t=8100[s]$  este  $\omega=27.587976623244671[\text{rad/s}]$ , așa cum rezultă din tabelul 4.2, dar viteza unghiulară mecanică aproximativă obținută la același moment de timp ( $t=8100[s]$ ) în cazul vitezei echivalente a vântului este  $a=1.011358677646381[\text{rad/s}]$ , așa cum rezultă din tabelul 4.3.

Soluția exactă a sistemului de ecuații diferențiale a fost obținută cu ajutorul integratorului ode45 aplicat fiecărei ecuații în parte.

În final, autorul a calculat eroarea obținută în cazul celor două cazuri, respectiv în cazul soluției aproximative (obținută cu ajutorul integratorului RK4) și în cazul soluției exacte.

Prin urmare, rezultatele numerice ale programului serial sunt prezentate în tabelul 4.2 și tabelul 4.3, dar rezultatele grafice sunt date în figura 4.4, figura 4.5, figura 4.6, și figura 4.7.

## 2. Valorile numerice ale vitezei unghiulare mecanice obținute la viteză reală a vântului

Tabel 4.2. Valorile numerice ale vitezei unghiulare mecanice obținute la viteză reală a vântului

step	t1	omega
1	0.0000	552.9500000000000050
2	900.0000	632.555047223256790
3	1800.0000	407.508063991528390
4	2700.0000	229.980106587670010
5	3600.0000	191.034719926486900
6	4500.0000	158.670027609523860
7	5400.0000	98.011192860022476
8	6300.0000	65.157213109337420
9	7200.0000	43.050756376701415
10	8100.0000	27.587976623244671

## 3. Valorile numerice ale vitezei unghiulare mecanice obținute la viteză echivalentă a vântului

Tabel 4.3. Valorile numerice ale vitezei unghiulare mecanice obținute la viteză echivalentă a vântului

step	t2	a
1	0.0000	552.9500000000000050
2	900.0000	389.225583828690790
3	1800.0000	264.622875495926960
4	2700.0000	167.589750493471120
5	3600.0000	89.883897844063554
6	4500.0000	38.293598550447264
7	5400.0000	15.448143902902071
8	6300.0000	6.226169777486620
9	7200.0000	2.509361726647572
10	8100.0000	1.011358677646381

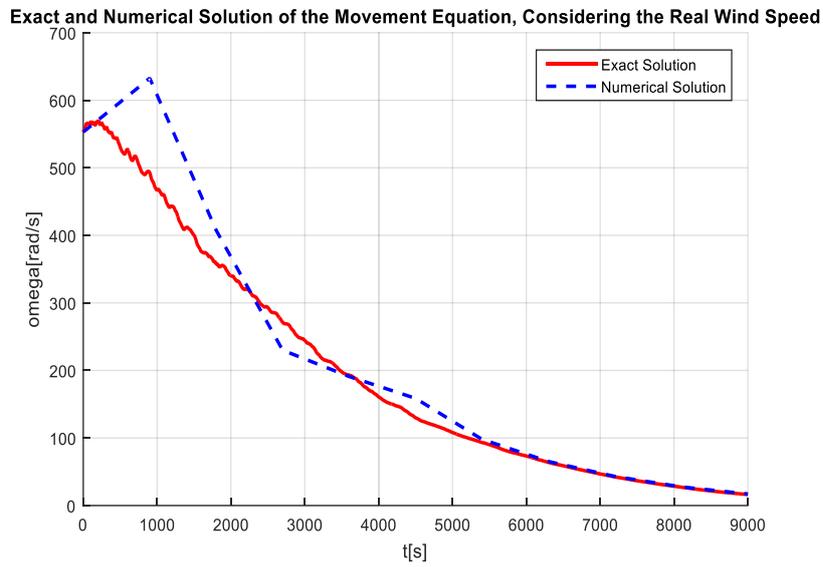


Figura 4.4. Soluția exactă și soluția aproximativă a ecuației mișcării la viteză reală a vântului

Figura 4.5. Soluția exactă și soluția aproximativă a ecuației mișcării la viteză echivalentă a vântului

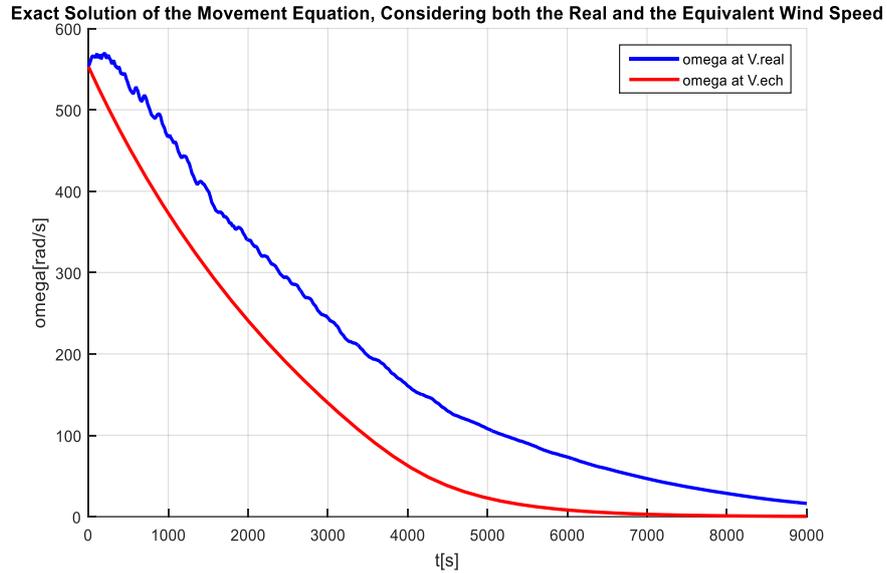
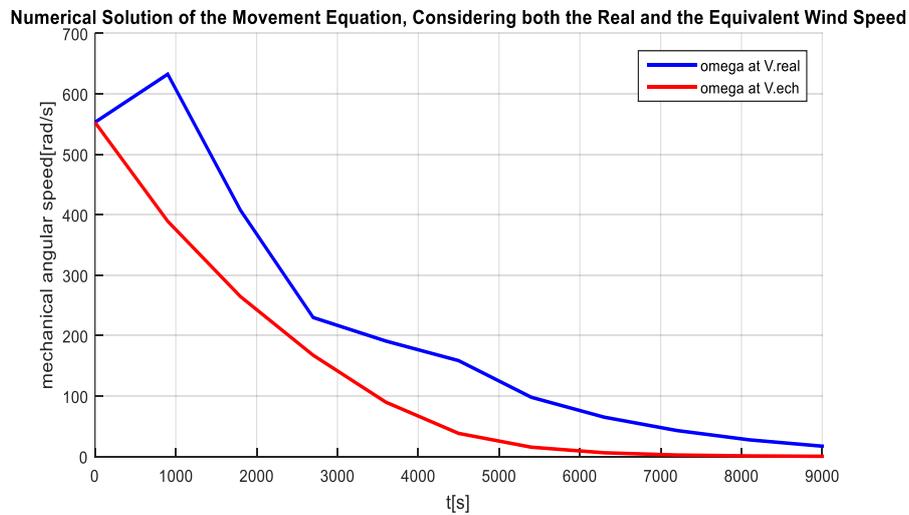


Figura 4.6. Soluția exactă a ecuației mișcării în cazul vitezei reale și vitezei echivalente a vântului

Figura 4.7. Soluția numerică a ecuației mișcării în cazul vitezei reale și vitezei echivalente a vântului



Eroarea absolută dintre soluția numerică și cea exactă în cazul soluționării ecuației mișcării la viteză echivalentă (care este 6.72051[%]) este mai mare decât eroarea absolută dintre soluția numerică și cea exactă în cazul soluționării ecuației mișcării la viteză reală (care este 4.95736[%]), așa cum rezultă din listingul de mai jos.

approximateEch=0.40761

exactEch=0.381944

```

True_error=exactEch-approximateEch=0.381944-0.407612=-0.0256686
Absolute_relative_true_error_percentage=|(exactEch-
approximateEch)/exactEch*100=|-
0.0256686/0.381944|*100=6.72051[%]

approximateReal=17.1336
exactReal=16.3243

True_error=exactReal-approximateReal=16.3243-17.1336=-0.809254
Absolute_relative_true_error_percentage=|(exactReal-
approximateReal)/exactReal|*100=|-
0.809254/16.3243|*100=4.95736[%]

```

Pe de altă parte, autorul a concluzionat faptul că timpul necesar soluționării ecuației diferențiale la viteză echivalentă (0.005132 secunde) este mai mic decât timpul necesar soluționării ecuației diferențiale la viteză reală (0.023608 secunde), datorită faptului că ecuația diferențială la viteză echivalentă are o formă simplificată față de ecuația diferențială la viteză reală.

**Elapsed time required to solve the ODE at equivalent wind speed is 0.005132 seconds.**

**Elapsed time required to solve the ODE at real wind speed is 0.023608 seconds.**

#### 4.3.5.2. Metode de paralelizare explicită

##### 4.3.5.2.1. RULAREA PROGRAMULUI MATLAB CA ȘI SCRIPT BATCH PE UN SINGUR WORKER MATLAB

Acest mod de execuție rulează scriptul `rungekutta_sys.m` dezvoltat pentru a fi rulat serial, pe un singur worker Matlab în cadrul cluster-ului care este specificat prin profilul cluster-ului în mod implicit, fără însă a utiliza o sesiune paralelă.

Datorită faptului că acest mod de execuție nu blochează Matlab-ul este necesar un timp de așteptare pentru a se finaliza execuția job-ului creat (job-ul trebuie să-și schimbe starea din running în finish), după această etapă pot fi vizualizate rezultatele și transmise.

Cu alte cuvinte, după crearea job-ului (ceea ce înseamnă rularea job-ului în background-ul desktop-ului) este necesar un timp până se finalizează execuția lui, după care datele din spațiul de lucru al job-ului sunt încărcate în spațiul de lucru al clientului.

Mai jos sunt listate proprietățile job-ului creat și task-ul corespunzător cu proprietățile lui.

Job

Properties:

```
    ID: 10
    Type: independent
    Username: florica
    State: finished
    SubmitTime: Tue Aug 11 15:11:09 EEST 2015
    StartTime: Tue Aug 11 15:11:22 EEST 2015
    Running Duration: 0 days 0h 0m 3s
```

Job-ul creat are un singur task care are ID=10. Task-ul a fost creat cu ajutorul metodei de createTask a job-lui cu ID=10. Prin urmare, job-ul cu ID=10 este jobul părinte al task-lui cu ID=1.

În acest caz, numărul de identificare al job-lui nu are nici un efect asupra codului. Numărul de identificare este util pentru a identifica job-ul în cadrul sistemului. Sistemul dă un număr de identificare pentru fiecare job creat luând în considerare numărul de identificare anterior care corespunde unui alt job creat.

În acest caz, metoda prezentată în figura 4.8 se referă la rularea funcției rungekutta\_sys.m din clientul Matlab (sesiunea Matlab) pentru a fi rulat în background-ul unei alte sesiuni (adică pe worker-ul Matlab).

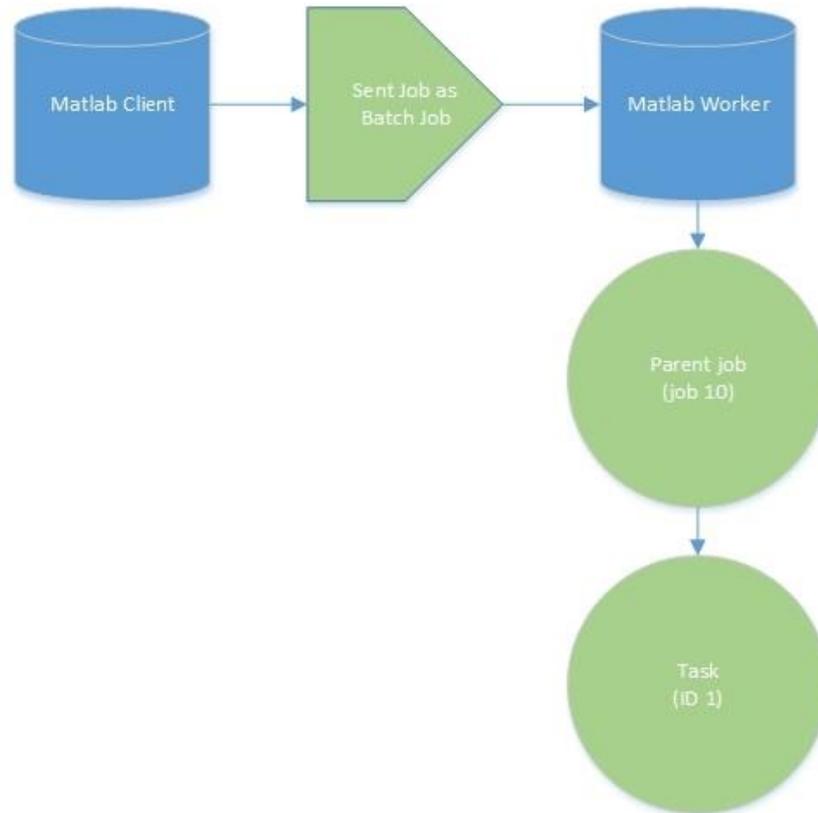


Figura 4.8. Execuția unui job batch

Associated Tasks:

Number Pending: 0

Number Running: 0

Number Finished: 1

Task ID of Errors: []

Task with properties:

ID: 1

State: finished

Function: @parallel.internal.cluster.executeScript

Parent: Job 10

StartTime: Tue Aug 11 15:11:22 EEST 2015

Running Duration: 0 days 0h 0m 3s

Fișierele adăugate automat job-ului creat prin metoda prezentată sunt funcția dezvoltată pentru a fi rulată serial și care implementează metoda Runge-Kutta pentru soluționarea celor două ecuații diferențiale ODE1.m și ODE2.m.

Files that are automatically added for the job with ID 10:

C:\Users\florica\Documents\MATLAB\ODE1.m

C:\Users\florica\Documents\MATLAB\rungekutta\_sys.m

C:\Users\florica\Documents\MATLAB\ODE2.m

În acest caz, autorul a concluzionat faptul că timpul de execuție este egal cu 3 secunde, fapt ce nu constituie un câștig de performanță dacă se compară cu timpul serial.

Prin urmare, autorul a concluzionat că metoda prezentată nu este eficientă din puncte de vedere al costului de performanță deoarece nu este suficient doar un worker dintr-un cluster pentru a soluționa o problemă complexă ca cea prezentată. Din acest motiv, este necesar a fi dezvoltați algoritmi de paralelizare mai consistenți și care pot fi utilizați în cazul soluționării problemelor complexe pentru a reduce în acest fel timpul de soluționare.

#### **4.3.5.2.2. PARALELIZAREA UNUI ALGORITM UTILIZÂND PE UN SISTEM QUAD-CORE CU MEMORIE PARTAJATĂ. PARALELISMUL DATELOR PE STRUCTURA "QUAD-PARALLEL". SCHEMA DE DISTRIBUȚIE A DATELOR PENTRU STRUCTURA DE TIP "SINGLE PROGRAM-MULTIPLE DATA"**

Corpul unei structuri SPMD (single program multiple data), este executat simultan pe patru worker-i Matlab, fiecare având o valoare unică în cadrul sesiunii paralele, valoarea dată de variabila labindex.

Worker-ii nu-și pot vedea unii altora variabilele deoarece comunicarea între worker-i poate avea loc doar prin intermediul clientului Matlab.

Componenta "single program" a structurii spmd se referă la faptul că același cod este executat pe mai mulți worker-i, fiecare worker având date unice și diferite pentru același cod, astfel încât seturi de date multiple pot fi tratate ca fiind mai mulți workeri.

Aplicațiile care pot fi soluționate cu ajutorul structurilor spmd sunt acelea care necesită execuția simultană a aceluiași program pe seturi de date multiple, cum ar fi cazul în care programul necesită un timp mare de execuție situație în care structura spmd permite mai multor worker-i să calculeze soluția simultan, precum și cazul în care programul lucrează pe seturi de date mari, situație în care structura spmd permite distribuția datelor la mai mulți workeri.

Astfel, prin utilizarea structurii paralele propusă în [29], autorul a propus o metodă de distribuție a datelor pe care a numit-o schemă de distribuție a datelor, necesară distribuirii datelor astfel încât să poată fi soluționat sistemul de ecuații diferențiale pe o structură "single program multiple data" definită.

Așadar, schema de distribuție a datelor prezentată în figura 4.9 a fost propusă pentru a distribui datele necesare structurii de tip "single program multiple data".

Pentru a soluționa problema propusă cu ajutorul calculului paralel, autorul a utilizat schema de distribuție a datelor unei structuri de tip "single program multiple data" (care implementează algoritmul Runge Kutta de ordinul 4) separat pentru ambele ecuații ale sistemului.

În acest caz, autorul a considerat ecuația diferențială în cazul vitezei reale a vântului ca fiind prima ecuație a sistemului, dar acest lucru nu are importanță asupra rezultatelor finale obținute.

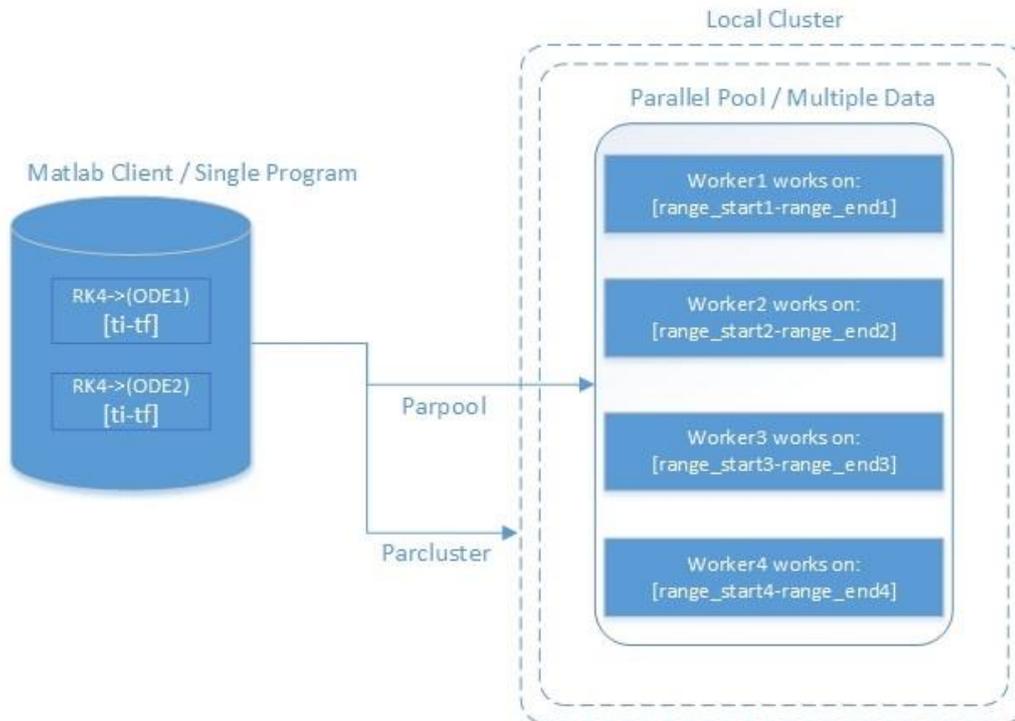


Figura 4.9. Schemă de distribuție a datelor pentru două structuri de tip "single program-multiple data" dezvoltată pentru structura "quad-parallel" propusă în [29]

În cadrul structurii spmd rulează simultan patru instanțe ale aceluiași program (care este de fapt algoritmul Runge Kutta de ordinul 4 aplicat de două ori pentru fiecare ecuație a sistemului de ecuații diferențiale) pe patru workeri Matlab. Pentru a identifica fiecare instanță în cadrul sesiunii paralele, s-a utilizat câte un unic index pentru fiecare instanță în parte.

Pentru a soluționa această problemă cu ajutorul funcționalității de paralelism a datelor a tool-ului Matlab, autorul a implementat două structuri de tip "single program multiple data", câte una pentru fiecare ecuație în parte.

În cazul calculului de înaltă performanță, pentru a comunica între ele, instanțele structurii paralele spmd utilizează interfața de transmitere de mesaje numită (Message Passing Interface - MPI) [45].

Ideea de bază este că programul (identificat prin componenta "single program") care implementează algoritmul Runge Kutta de ordinul 4 consumator de timp, algoritmul care a fost aplicat celor două ecuații ale sistemului de ecuații diferențiale, rulează pe date multiple care au fost distribuite în prealabil cu ajutorul schemei de distribuție a datelor (propusă și prezentată în figura 4.9) pe pool-ul paralel ce constă din patru worker-i Matlab care lucrează pe date diferite.

Algoritmul serial prezentat în figura 4.1 a fost modificat astfel încât să poată face față unui set mare de date distribuite mai multor worker-i dintr-un pool paralel al clusterului local. În acest caz, clientul și worker-ii partajează codul numit "single program" al structurii spmd, fiecare lucrând pe propriul său spațiu de lucru. În acest sens, clientul Matlab execută toate comenzile în afara structurii paralele spmd, iar worker-ii Matlab execută comenzile din cadrul structurii spmd. Cu alte cuvinte,

clientul Matlab supervizează activitatea worker-ilor care conlucrează pe un singur program.

Astfel, algoritmul Runge Kutta de ordinul 4 aplicat pentru fiecare ecuație a sistemului de ecuații diferențiale, pe intervalul  $[t_i-t_f]$ , rulează pe clientul Matlab. Pe baza indexului unic al fiecărui worker, a fost ales un interval de simulare a vitezei unghiulare mecanice. Prin urmare, intervalul de simulare  $[t_i-t_f]$  a fost distribuit conform schemei de distribuție a datelor celor patru workeri Matlab, astfel încât fiecare worker să știe pe ce porțiuni de date din setul inițial lucrează, fiecare worker lucrează astfel doar pe porțiunea sa de date care i-a fost atribuită în urma distribuirii datelor, adică pe intervalul  $[range\_start_i-range\_end_i]$ , unde  $i=1\div 4$ , datorită faptului că structura paralelă constă din patru workeri Matlab, fiecare dintre aceștia utilizând câte un nucleu al structurii hardware.

În momentul în care prima structură SPMD și-a finalizat execuția, se execută cea de-a doua structură SPMD (în care s-a implementat cea de-a doua ecuație diferențială a sistemului) în aceeași sesiune paralelă deschisă în momentul lansării în execuție a primei structurii SPMD, așa cum se observă în figura 4.10.

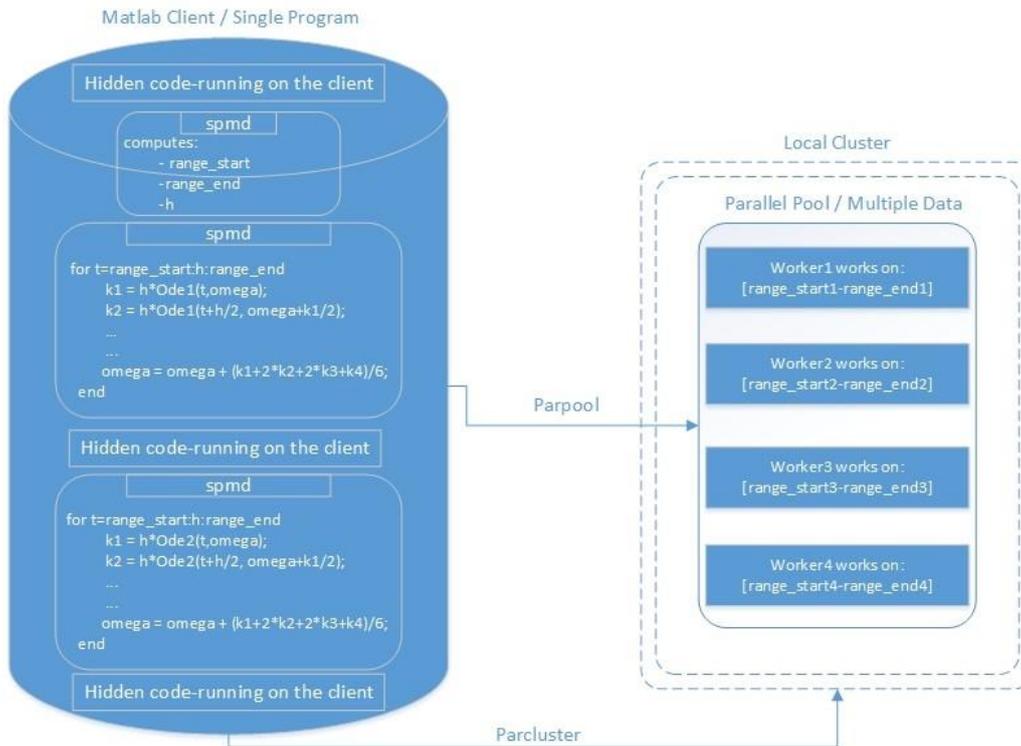


Figura 4.10. Schemă de distribuție a datelor pentru două structuri de tip "single program-multiple data" aplicată pentru domeniul energiei eoliene

În timp ce se execută porțiunea de cod paralel, clientul matlab este în așteptare și veghează activitatea worker-ilor.

După finalizarea blocurilor spmd, programul Matlab dezvoltat pentru soluționarea aplicației își continuă execuția serial pe clientul Matlab.

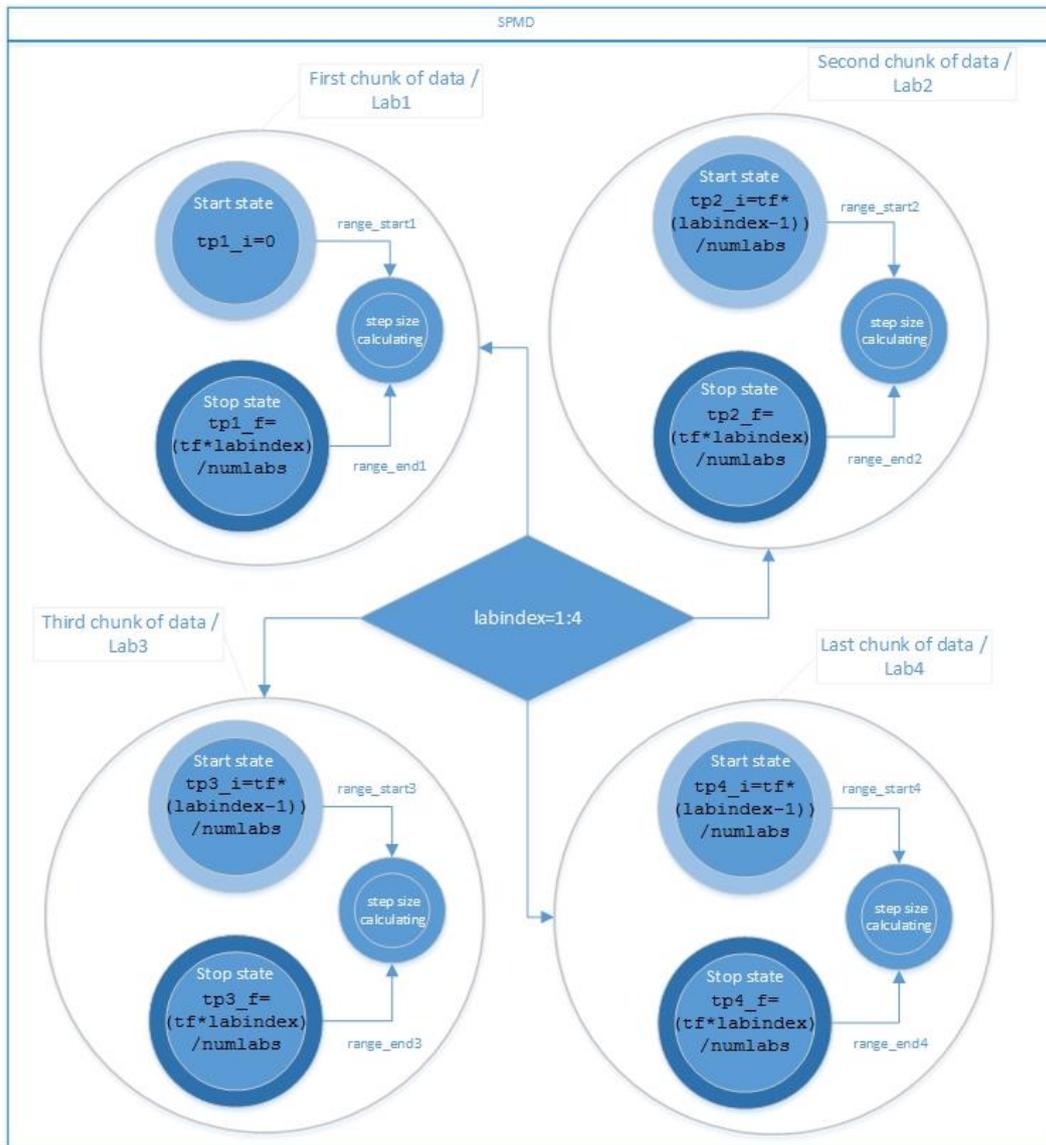


Figura 4.11. Diagrama fluxului de date în cadrul sesiunii paralelele

Când fluxul programului ajunge la primul bloc SPMD definit pentru implementarea algoritmului Runge Kutta de ordinul 4 necesar soluționării primei ecuații diferențiale a sistemului, se deschide o sesiune paralelă, iar intervalul mare de simulare (setul inițial de date) considerat a fi  $[t_i-t_f]$ , dar care, pentru studiul de caz descris, este  $[0-9000]$  secunde (deoarece simulările au fost realizate pe un interval de aproximativ 2.5 ore) a fost distribuit în cadrul acestei sesiuni paralele pe fiecare worker, așa cum se poate observa din listingul de mai jos. În acest moment, fiecare worker calculează o soluție parțială simultan pe porțiunea de date care i-a

fost alocată (în urma procesului de distribuire a datelor) și care corespunde indexului său dat de variabila `labindex`, dar pe propriul său spațiu de lucru.

Figura 4.11 prezintă diagrama fluxului de date corespunzătoare schemei de distribuție a datelor dată în figura 4.9. Diagrama fluxului de date a fost definită într-un bloc SPMD separat, altul decât cele două blocuri SPMD definite pentru implementarea algoritmului RK4 corespunzătoare implementării ecuațiilor sistemului de ecuații diferențiale. Diagrama fluxului de date a fost propusă pentru a analiza fluxul de date pe cei patru worker-i ai sesiunii paralele deschise pe structura "quad-parallel" propusă în [29].

Cei patru worker-i, care au fost utilizați pentru a asigura suport paralel pentru blocul SPMD, trebuie să lucreze pe o singură porțiune de date din setul inițial. În acest sens, în cadrul blocului SPMD în care s-a implementat algoritmul de divizarea a intervalului de simulare în patru subintervale de simulare, câte unul pentru fiecare worker al sesiunii paralele, este reprezentat procesul de distribuție a datelor, astfel încât la finalul execuției acestui bloc SPMD, pe fiecare worker al sesiunii paralele să existe doar o singură porțiune de date.

Fiecare porțiune de date își are limita inferioară pe o stare de start, iar limita superioară se definește pe-o stare finală (stop state), însă între cele două stări (în care se calculează limitele subintervalului de simulare) există o stare intermediară numit proces multiplu în care se calculează pasul dintre limitele subintervalului `[range_start-range_end]`, așa cum se observă în figura 4.11.

Așadar, prin utilizarea schemei de distribuție a datelor din figura 4.10 pentru distribuirea seturilor mari de date necesare soluționării sistemului de ecuații diferențiale prin implementarea și utilizarea algoritmului Runge Kutta de ordinul 4 pentru fiecare ecuație a sistemului, în cazul a două blocuri de tip SPMD, autorul a obținut rezultatele redate în listingul de mai jos:

```
Starting parallel pool (parpool) using the 'local' profile ...
connected to 4 workers.
```

**Lab 1:**

```
Lab 1 works on [0.000000 ,2250.000000 ] .
range_start = 0.000000, range_end = 2250.000000
```

**Lab 2:**

```
Lab 2 works on [2250.000000 ,4500.000000 ] .
range_start = 2250.000000, range_end = 4500.000000
```

**Lab 3:**

```
Lab 3 works on [4500.000000 ,6750.000000 ] .
range_start = 4500.000000, range_end = 6750.000000
```

**Lab 4:**

```
Lab 4 works on [6750.000000 ,9000.000000 ] .
range_start = 6750.000000, range_end = 9000.000000
```

Prin utilizarea schemei de distribuție a datelor, în tabelul 4.4 sunt prezentate rezultatele numerice obținute în urma soluționării problemei propuse paralelizând simularea numerică cu ajutorul metodelor propuse și descrise anterior. Rezultatele

numerice reprezintă de fapt valorile numerice ale vitezei unghiulare mecanice la momente de timp diferite, dar care au fost obținute pe fiecare worker al sesiunii paralele și ca urmare a calculelor făcute de fiecare worker pe porțiunea de date care i-a fost alocată în urma procesului de distribuție a datelor cu ajutorul schemei de distribuție a datelor propusă de autor.

În acest sens, în tabelul 4.4, pe primul worker, sunt date valorile numerice corespunzătoare vitezei unghiulare mecanice în cazul celor patru pași ai algoritmului RK4 care implementează prima ecuație a sistemului (variația vitezei unghiulare mecanice la viteză reală a vântului) pe primul subinterval (prima porțiune de date din setul inițial) obținut în urma procesului de distribuție a datelor, adică pe subintervalul [0.000000-2250.000000].

În mod similar, pot fi justificate și restul valorilor numerice corespunzătoare vitezei unghiulare mecanice obținute pe restul worker-ilor aparținând sesiunii paralele și care lucrează deci pe restul subintervalelor obținute în urma procesului de distribuție a datelor conform schemei de distribuție a datelor propusă în acest sens.

Din tabelul 4.4 se poate observa că toți cei patru pași ai algoritmului RK4 care au fost executați pe un anumit worker al sesiunii paralele la un moment dat de timp, utilizează aceeași porțiune de date (același subinterval obținut în urma procesului de distribuție a datelor) și care a fost, de fapt, alocată worker-ului respectiv.

Următorul worker al aceleiași sesiuni paralele, și care lucrează pe același cod (single program – RK4 algorithm), lucrează pe următoarea porțiune de date (următorul subinterval), iar valorile numerice ale vitezei unghiulare mecanice obținute corespund deci momentelor de timp aparținând acestui subinterval.

Drept urmare, autorul a demonstrat că aceeași secvență de cod (numită "single program") se execută simultan pe mai multe subintervale (date multiple) distribuite conform schemei de distribuție a datelor propusă în acest sens.

În mod similar, în tabelul 4.5 sunt prezentate rezultatele numerice ale soluționării ecuației ce descrie variația vitezei unghiulare mecanice la viteză echivalentă a vântului (adică soluționarea celei de-a doua ecuații a sistemului). Principiul de soluționare este același cu cel deja prezentat și aplicat pentru a soluționa prima ecuație a sistemului.

Așadar, pentru a distribui intervalul inițial de simulare (pentru a-l împărți în patru subintervale, astfel încât fiecare worker să simuleze același cod pe subintervalul alocat lui), în schema de distribuție a datelor, autorul a definit un bloc SPMD în care a implementat un algoritm necesar divizării intervalului inițial de simulare în patru subintervale care au fost alocate celor patru workeri ai sesiunii paralele.

În plus, autorul a mai definit și utilizat alte două blocuri SPMD distincte și în care s-au implementat cele două ecuații diferențiale ale sistemului ce descrie funcționarea sistemului eolian la viteză variabilă a vântului și respectiv la viteză echivalentă.

În momentul în care fluxul programului ajunge la primul bloc SPMD, se deschide o sesiune paralelă în care se soluționează algoritmul corespunzător divizării intervalului inițial de simulare în patru subintervale, câte unul pentru fiecare worker al sesiunii paralele. În continuare, după finalizarea execuției primului bloc SPMD, intervalul inițial de simulare este deja distribuit celor patru workeri ai sesiunii paralele deschise.

Când fluxul programului ajunge la cel de-al doilea bloc SPMD (corespunzător implementării algoritmului Runge Kutta de ordinul 4 necesar soluționării ecuației ce

descrie variația vitezei unghiulare mecanice la viteză reală a vântului), în aceeași sesiune paralelă deschisă odată cu lansarea în execuție a primului bloc SPMD, se soluționează în paralel, pe cei patru workeri (care deja au fiecare alocat câte un subinterval de simulare distribuit în urma execuției primului bloc SPMD), prima ecuație a sistemului de ecuații diferențiale ce descrie funcționarea sistemului eolian atât la viteză reală cât și la viteză echivalentă a vântului.

În continuare, în cadrul aceleiași sesiuni paralele deschisă în prealabil, se execută cel de-al treilea bloc SPMD în care s-a implementat algoritmul Runge Kutta de ordinul 4 necesar soluționării celei de-a doua ecuații a sistemului (ecuație ce descrie variația vitezei unghiulare mecanice la viteză echivalentă a vântului) după principiul descris anterior.

### 3. Soluția numerică a ecuației mișcării obținută la viteză reală a vântului, pe fiecare worker

Matlab

Tabel 4.4. Soluția numerică a ecuației mișcării obținută la viteză reală a vântului, pe fiecare worker Matlab

<i>Lab 1</i>	<b>Step 1:</b>	t = 0.0000	omega = 483.677413527321110
		t = 562.5000	omega = 373.645238079576760
		t = 1125.0000	omega = 280.530497328684480
		t = 1687.5000	omega = 166.549862183479690
t = 2250.0000		omega = 166.549862183479690	
<i>Lab 1</i>	<b>Step 2:</b>	t = 0.0000	omega = 125.867976684358670
		t = 562.5000	omega = 94.568225424928542
		t = 1125.0000	omega = 70.359762963486659
		t = 1687.5000	omega = 51.577753424340955
t = 2250.0000		omega = 37.328707873645570	
<i>Lab 1</i>	<b>Step 3:</b>	t = 0.0000	omega = 26.877509485766019
		t = 562.5000	omega = 19.352342476710398
		t = 1125.0000	omega = 13.934046487937479
		t = 1687.5000	omega = 10.032762989269660
t = 2250.0000		omega = 7.223765418686066	
<i>Lab 1</i>	<b>Step 4:</b>	t = 0.0000	omega = 5.201236531930546
		t = 562.5000	omega = 3.744980114761264
		t = 1125.0000	omega = 2.696450161886082
		t = 1687.5000	omega = 1.941490473018017
t = 2250.0000		omega = 1.397906491997964	
<i>Lab 2</i>	<b>Step 1:</b>	t = 2250.0000	omega = 354.454499899633450
		t = 2812.5000	omega = 238.722457606643390
		t = 3375.0000	omega = 176.342190669827630
		t = 3937.5000	omega = 141.374271314340380

		t = 4500.0000	omega = 117.834707310998380
	<b>Step 2:</b>	t = 2250.0000 t = 2812.5000 t = 3375.0000 t = 3937.5000 t = 4500.0000	omega = 100.061824045842000 omega = 82.641391165724585 omega = 65.162685301776762 omega = 48.611450005735406 omega = 35.221664431261061
	<b>Step 3:</b>	t = 2250.0000 t = 2812.5000 t = 3375.0000 t = 3937.5000 t = 4500.0000	omega = 25.363173723905490 omega = 18.262039961544492 omega = 13.149005662484576 omega = 9.467518466993949 omega = 6.816779043615138
	<b>Step 4:</b>	t = 2250.0000 t = 2812.5000 t = 3375.0000 t = 3937.5000 t = 4500.0000	omega = 4.908199126022142 omega = 3.533988066855878 omega = 2.544532233858353 omega = 1.832106945360938 omega = 1.319148470171460
<b>Lab 3:</b>	<b>Step 1:</b>	t = 4500.0000 t = 5062.5000 t = 5625.0000 t = 6187.5000 t = 6750.0000	omega = 357.638333970547710 omega = 238.817320798900200 ... ... omega = 97.257728864812478
	The same steps of RK4 ...	<b>Distributed data</b> ...	<b>Partial results of the first ode</b> ...
<b>Lab 4:</b>	<b>Step 1:</b>	t = 6750.0000 t = 7312.5000 t = 7875.0000 t = 8437.5000 t = 9000.0000	omega = 375.567905574895350 omega = 255.966117890216650 ... ... omega = 85.810365144689740
	The same steps of RK4 ...	<b>Distributed data</b> ...	<b>Partial results of the first ode</b> ...

Elapsed time required to solve the ODE at real wind speed is 0.000215 seconds.

Elapsed time required to solve the ODE at equivalent wind speed is 0.000185 seconds.

4. Soluția numerică a ecuației mișcării obținută la viteză echivalentă a vântului, pe fiecare worker Matlab

Tabel 4.5. Soluția numerică a ecuației mișcării obținută la viteză echivalentă a vântului, pe fiecare worker Matlab

<i>Lab 1</i>		t = 0.0000	omega = 1.006516678123651
		t = 562.5000	omega = 0.724709287832576
	Step 1:	t = 1125.0000	omega = 0.521803127482797
		t = 1687.5000	omega = 0.375707208471155
		t = 2250.0000	omega = 0.270515638876538
<i>Lab 1</i>		t = 0.0000	omega = 0.194775903151063
		t = 562.5000	omega = 0.140241993397354
	Step 2:	t = 1125.0000	omega = 0.100976642346252
		t = 1687.5000	omega = 0.072704915639068
		t = 2250.0000	omega = 0.052348787156342
<i>Lab 1</i>		t = 0.0000	omega = 0.037692025258748
		t = 562.5000	omega = 0.027138905125981
	Step 3:	t = 1125.0000	omega = 0.019540477498311
		t = 1687.5000	omega = 0.014069479188227
		t = 2250.0000	omega = 0.010130266501670
<i>Lab 1</i>		t = 0.0000	omega = 0.007293965755368
		t = 562.5000	omega = 0.005251780536248
	Step 4:	t = 1125.0000	omega = 0.003781372126762
		t = 1687.5000	omega = 0.002722652834094
		t = 2250.0000	omega = 0.001960356771695
<i>Lab 2</i>		t = 2250.0000	omega = 0.949809548949599
		t = 2812.5000	omega = 0.683879180892514
	Step 1:	t = 3375.0000	...
		t = 3937.5000	...
		t = 4500.0000	omega = 0.255274792994158
<i>Lab 2</i>		t = 2250.0000	omega = 0.183802232512377
	Step 2:	t = 2812.5000	omega = 0.132340762182776
		t = 3375.0000	...

		t = 3937.5000 t = 4500.0000	... omega = 0.049399457492332
	<b>Step 3:</b>	t = 2250.0000 t = 2812.5000 t = 3375.0000 t = 3937.5000 t = 4500.0000	omega = 0.035568457278783 ... ... ... omega = 0.009559527481297
	<b>Step 4:</b>	t = 2250.0000 t = 2812.5000 t = 3375.0000 t = 3937.5000 t = 4500.0000	omega = 0.006883023864633 ... ... ... omega = 0.001849910308784
<b>Lab 3:</b>	<b>Step 1:</b>	t = 4500.0000 t = 5062.5000 t = 5625.0000 t = 6187.5000 t = 6750.0000	omega = 0.680888461891229 omega = 0.490251380423218 ... ... omega = 0.182998434341817
	The same steps of RK4 ...	<b>Distributed data</b> ...	<b>Partial results of the first ode</b> ...
<b>Lab 4:</b>	<b>Step 1:</b>	t = 6750.0000 t = 7312.5000 t = 7875.0000 t = 8437.5000 t = 9000.0000	omega = 0.632059938037877 omega = 0.455094004922597 ... ... omega = 0.169875075682577
	The same steps of RK4	<b>Distributed data</b> ...	<b>Partial results of the first ode</b> ...

### 4.3.5.3. Rezultate finale. Performanța multicore

#### 5. Eficiența codului paralel

Tabel 4.6. Eficiența codului paralel

<i>Parallelizable portions of code</i>	<i>Elapsed time</i>		<i>Speedup</i>	<i>Efficiency</i>
	<i>Serial solution</i>	<i>Parallel solution</i>		
<i>RK4 algorithm -&gt;first ODE</i>	0.005132 seconds	0.000185 seconds	27.74	6.94
<i>RK4 algorithm -&gt;second ODE</i>	0.023608 seconds	0.000215 seconds	109.80	27.45

Accelerarea codului paralel dezvoltat arată de câte ori este mai rapidă execuția codului paralel pe structura "quad-parallel" față de soluționarea serială a aceleiași aplicații.

Datorită faptului că, pentru fiecare ecuație a sistemului de ecuații diferențiale, a fost scris separat câte un algoritm paralel, s-a calculat tot separat și accelerarea soluționării paralele pentru fiecare ecuație în parte, adică pentru fiecare algoritm paralel scris.

Astfel, în cazul soluționării paralele a ecuației diferențiale ce descrie variația vitezei unghiulare la viteză echivalentă, accelerarea obținută este 27.74x, iar în cazul soluționării ecuației mișcării la viteză reală a vântului, s-a obținut o accelerare de 109.80x, așa cum se observă în tabelul 4.6.

În plus, autorul a calculat, pentru ambele cazuri, și raportul dintre speedup și fiecare core (speedup per processor), raport numit eficiența. Astfel s-a obținut o eficiență egală cu 6.94 pentru un speedup de 27.74, precum și o eficiență egală cu 27.45 pentru un speedup de 109.80.

Există totuși o diferență mare între cele două cazuri în sensul că eficiența obținută în primul caz corespunde soluționării unei forme simplificate a ecuației mișcării (fiind vorba de soluționarea ecuației mișcării la viteză echivalentă a vântului-o formă de complexitate redusă) comparativ cu situația soluționării ecuației mișcării la viteză reală când eficiența obținută este de 27.45.

În general, se poate concluziona faptul că o influență deosebită asupra performanței multicore o are complexitatea problemei cu valoare inițială considerată, complexitate ce determină așadar eficiența codului paralel, adică o complexitate ridicată implică și-o eficiență crescută, deoarece timpul alocat computației în sine este mai mare decât timpul alocat schimbului de mesaje.

Așadar, este eficientă scrierea codului paralel în cazul soluționării aplicațiilor complexe, deoarece în acest fel, puterea de calcul a sistemelor paralele ar fi utilizată într-un mod eficient.

#### Concluzii

În acest subcapitol, autorul a propus și dezvoltat un script Matlab pentru a fi rulat în mod serial, script în care s-a implementat o metodă de analiză numerică pentru a soluționa o problemă cu valoare inițială modelată de un sistem de două ecuații diferențiale având două condiții inițiale.

Metoda de analiză numerică implementată în cadrul algoritmului serial propus și dezvoltat se referă la utilizarea și adaptarea algoritmului corespunzător integratorului Runge Kutta de ordinul 4 pentru a soluționa un sistem de ecuații diferențiale. În acest sens, autorul a dezvoltat un algoritm pentru a fi rulat secvențial (fiind vorba despre o execuție ordonată a proceselor într-un mod secvențial).

Implementarea serială este necesară atât pentru a verifica corectitudinea metodei de analiză numerică utilizată cât și pentru a putea compara rezultatele obținute, astfel încât să se evidențieze câștigul de performanță.

Raportul dintre timpul necesar execuției seriale a unei probleme cu valoare inițială și timpul necesar soluționării paralele a aceleiași probleme reprezintă indicatorul cel mai utilizat pentru a calcula performanța algoritmului paralel. Așadar, acest indicator este utilizat pentru a testa eficiența codului paralel, și deci pentru a stabili câștigul de performanță.

Prima metodă de paralelizare explicită propusă și prezentată în acest subcapitol se referă la rularea aplicației ca și batch script (prin intermediul unui batch job creat și executat în acest sens) pe un singur worker Matlab. Acest mod de execuție rulează scriptul serial dezvoltat pe un worker din cluster-ului local care este specificat implicit prin intermediul profilului cluster-ului, dar fără a utiliza o sesiune paralelă.

Autorul a concluzionat faptul că această metodă nu este eficientă din punct de vedere al costului de performanță deoarece n-a fost suficient doar un worker din cadrul cluster-ului local pentru a rula o aplicație de așa complexitate ca cea prezentată, motiv pentru care autorul a constatat necesitatea propunerii și dezvoltării unor algoritmi paraleli mai consistenți care pot da rezultate mult mai bune în ceea ce privește câștigul de performanță.

Prin urmare, pentru a soluționa o problemă cu valoare inițială complexă cu ajutorul calculului paralel, autorul a utilizat capacitatea de paralelism a datelor a tool-ului Matlab, pe baza căreia a propus o metodă de paralelizare care se referă la partajarea intervalului mare de simulare în subintervale de simulare care ulterior au fost alocate worker-ilor sesiunii paralele în cadrul căreia se soluționează problema cu valoare inițială considerată.

Drept urmare, ținând cont de intervalul mare de simulare și de algoritmul consumator de timp Runge Kutta de ordinul 4 care trebuie soluționat în acest interval inițial, autorul a utilizat paralelismul datelor în sensul că a propus și dezvoltat o schemă de distribuție a datelor pe baza căreia a partajat intervalul de simulare inițial în patru subintervale de simulare. În acest fel, algoritmul consumator de timp RK4 a fost simulat simultan pe cele patru subintervale utilizând patru workeri Matlab aparținând sesiunii paralele în care s-a realizat simularea algoritmului, fiecare worker lucrând (simulând) astfel pe o porțiune de date (un subinterval din intervalul inițial).

Mai mult decât atât, schema de distribuție a datelor propusă și-a dovedit eficiența atât prin reducerea timpului de soluționare a ecuației diferențiale ce descrie variația vitezei unghiulare mecanice la viteză reală de la 0.023608 secunde la 0.000215 secunde, cât și prin reducerea timpului de soluționare a ecuației diferențiale ce descrie variația vitezei unghiulare mecanice la viteză echivalentă de la 0.005132 la 0.000185 secunde. Trebuie menționat faptul că speedup-ul este strâns dependent de sistemul de ecuații diferențiale propus spre soluționare.

Schema de distribuție a datelor propusă pentru o structură paralelă numită "quad-parallel" poate fi utilizată cu succes și-n cazul altor tipuri de probleme cu valoare inițială (modelate de ecuații diferențiale complexe), dar care se bazează pe

intervale mari de simulare și evident, unde poate fi utilizată capacitatea de paralelism a datelor.

De asemenea, autorul a demonstrat utilitatea diagramei fluxului de date propusă pentru a analiza fluxul datelor pe workerii Matlab aparținând sesiunii paralele în care s-a soluționat studiul de caz propus.

De precizat este faptul că, în cazul soluționării oricărei probleme cu valoare inițială care necesită paralelismul datelor cu ajutorul calculului paralel, programatorul trebuie să dezvolte o schemă de distribuție a datelor pentru distribui setul mare de date pe structura paralelă utilizată, astfel încât worker-ii Matlab ai sesiunii paralele deschisă pentru soluționarea problemei să știe pe ce porțiuni de date din setul inițial lucrează. Acesta este un motiv important pentru care autorul a propus și dezvoltat o schemă de distribuție a datelor reprezentând un interval mare de simulare, schemă utilizată pentru soluționarea unei probleme din domeniul energiei eoliene.

Toate contribuțiile prezentate în acest subcapitol pot fi extinse și pentru alte tipuri de probleme cu valoare inițială, de diferite complexități, dar și pentru alte tipuri de structuri paralele.

#### **4.4. Metodă de paralelizare a unei tehnici de analiză numerică explicită pe o structură multicore**

##### **4.4.1. Introducere**

În acest subcapitol autorul prezintă o metodă de paralelizare a unei tehnici de analiză numerică explicită pe o structură quad-core. Pentru a demonstra eficiența metodei de paralelizare propuse, autorul a utilizat această metodă pentru a soluționa o problemă cu valoare inițială (descrisă printr-o ecuație diferențială obișnuită având condiție inițială) cu ajutorul unei tehnici de analiză numerică explicită.

Tehnica de analiză numerică se referă la utilizarea integratorului Runge Kutta de ordinul 4 atât pentru componenta serială a metodei de paralelizare cât și pentru componenta paralelă a aceleiași metode.

Componenta serială a metodei de paralelizare rulează serial pe clientul Matlab, iar componenta paralelă rulează în paralel pe date multiple utilizând structura "quad-parallel" propusă în [29].

Acest studiu se bazează pe referința [25] care tratează comportamentul unui sistem eolian controlat optim la viteză variabilă din punct de vedere energetic.

O altă referință pe care se bazează acest studiu este referința [47] în care autorii prezintă dezvoltarea și paralelizarea unei simulări numerice directe utilizată pentru studiul comportamentului unui sistem eolian care funcționează la viteză variabilă.

Astfel, acest subcapitol poate fi considerat ca o extensie a referinței [47] datorită faptului că în acest subcapitol autorul a utilizat două concepte de bază propuse în [47], adică schema de distribuție a datelor și diagrama fluxului de date pentru a soluționa problema propusă utilizând paralelismul datelor (în cazul componentei paralele).

Datorită faptului că fenomenele fizice de mare importanță în știință și inginerie sunt descrise de sisteme de ecuații diferențiale [29], pentru soluționarea acestora, în general, se utilizează metode explicite de aproximare numerică.

În plus, datorită faptului că aplicarea acestor metode de aproximare numerică încă necesită un efort mare din punct de vedere computațional și că

implementarea paralelă a acestora reprezintă o modalitate potrivită de-a obține timpi buni de răspuns [29], în acest subcapitol autorul a propus o metodă de paralelizare și implementare eficientă a metodei de aproximare numerică Runge Kutta de ordinul 4 folosind structura paralelă propusă în [29]

Această metodă a fost utilizată pentru paraleliza algoritmul corespunzător unei metode de analiză numerică RK4 în care s-a implementat ecuația diferențială (4.4) ce descrie problema cu valoare inițială propusă.

Problema cu valoare inițială considerată a fost soluționată în referința [25] cu ajutorul tool-ului Scientific WorkPlace, dar în care s-au obținut timpi de soluționare mari.

Prin urmare, pentru a reduce timpul de soluționare necesar soluționării ecuației diferențiale ce descrie problema propusă, autorul a propus și utilizat o metodă de paralelizare pentru a paraleliza tehnica de analiză numerică utilizată, metodă care constă din două componente (una serială și una paralelă).

#### 4.4.2. Metoda de paralelizare

Spre deosebire de articolul [47] unde autorii au propus separat un algoritm pentru a fi rulat serial pe clientul Matlab și un alt algoritm necesar paralelizării unei probleme cu valoare inițială, în acest subcapitol, pentru a soluționa o problemă cu valoare inițială, autorul a propus și dezvoltat o metodă de paralelizare care include și-o componentă serială, prezentată în figura 4.12.

Metoda de paralelizare propusă constă din două componente, una ce rulează pe clientul Matlab (numită componentă serială) și una paralelă ce rulează în paralel pe structura paralelă propusă în [29].

Pentru a verifica eficiența acestei metode, autorul a soluționat o problemă din domeniul energiei eoliene cu ajutorul metodei explicită în patru pași Runge Kutta.

Astfel, componenta serială a metodei propuse rulează în mod serial algoritmul corespunzător metodei de analiză numerică RK4 pe clientul Matlab, iar la finalizarea execuției componentei seriale se calculează timpul serial corespunzător pentru a se compara cu timpul paralel obținut de componenta paralelă a metodei.

După finalizarea execuției componentei seriale, se execută componenta paralelă pe cluster-ul local al pool-ului paralel utilizând structura paralelă propusă în [29].

Componenta paralelă constă din două blocuri de tip SPMD. Primul bloc SPMD distribuie intervalul inițial de simulare în paralel celor patru workeri ai sesiunii paralele deschise odată cu începerea execuției acestui bloc conform schemei de distribuție a datelor propusă în [47], astfel încât fiecare worker al sesiunii paralele să simuleze algoritmul RK4 pe un subinterval unic alocat. Cel de-al doilea bloc SPMD implementează metoda de analiză numerică RK4 necesară soluționării ecuației diferențiale ce descrie problema propusă spre soluționare în paralel pe cei patru workeri ai sesiunii paralele deschise în prealabil, și pe datele (subintervalele) distribuite în urma execuției primului bloc SPMD.

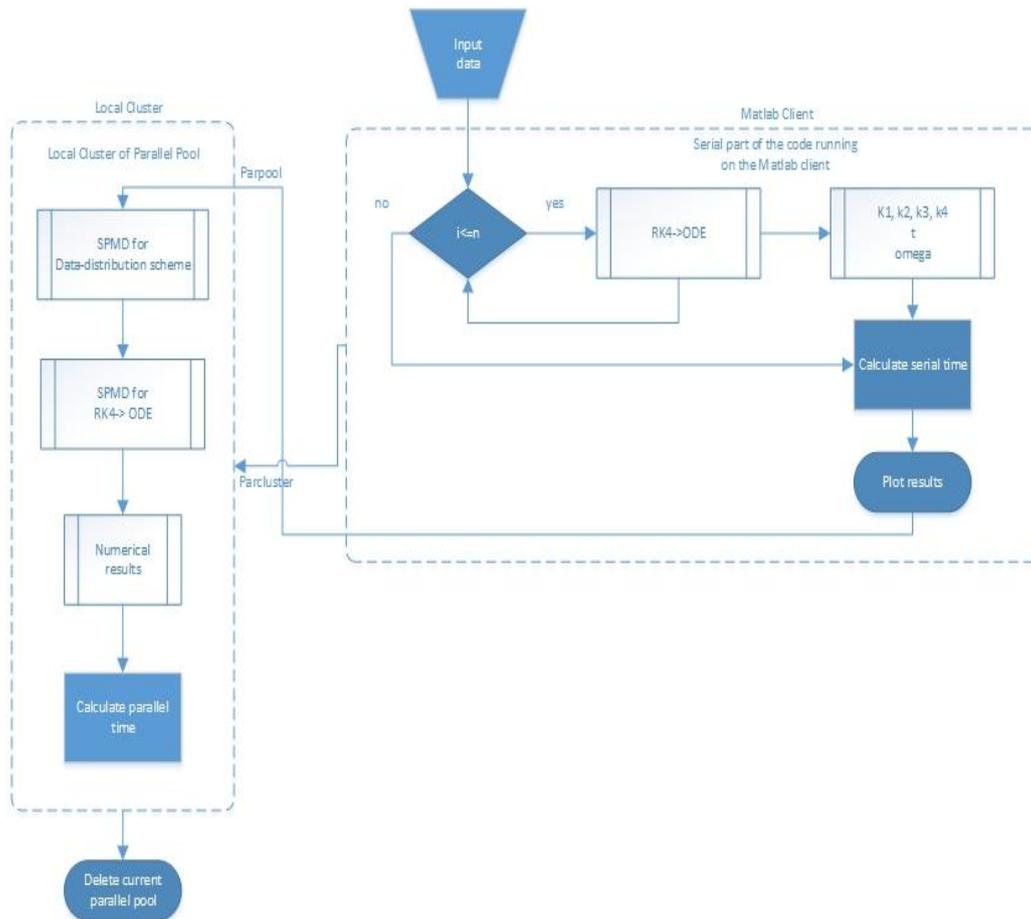


Figura 4.12. Metoda de paralelizare a unei tehnici de analiză numerică explicită

Cele două componente ale metodei de paralelizare propuse sunt conectate prin intermediul pool-ului paralel care este deschis automat după finalizarea execuției componente seriale, moment în care se deschide pool-ul paralel prin intermediul lansării în execuție a primului bloc SPMD definit. La finalul execuției componente paralele se calculează timpul paralel, după care este șters pool-ul paralel.

#### 4.4.3. Ecuația diferențială guvernatoare a problemei cu valoare inițială

Problema cu valoare inițială considerată se referă la determinarea zonei de optim energetic a unui sistem eolian care funcționează la viteză variabilă a vântului. Această problemă a fost tratată în referința [25] din punct de vedere energetic, și unde s-a considerat un sistem eolian de putere  $P_N=22[\text{kW}]$  pentru a fi analizat la viteză variabilă a vântului în intervalul  $5 \div 22[\text{m/s}]$  [24].

Prin soluționarea ecuației mișcării (4.4) cu ajutorul metodei de analiză numerică RK4, se poate determina zona de putere maximă dată de turbină, maxim

care poate fi determinat la valoarea maximă a produsului  $\omega \cdot (d\omega/dt)$  care este valoarea maximă a puterii, așa cum rezultă din figura 4.12.

$$40 \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left( \left( (16 - 6 \cdot \sin(0.17943t)) \cdot e^{-t/3600} \right) / \omega - 2.1231 \cdot 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06 \left( (16 - 6 \cdot \sin(0.17943t)) \cdot e^{-t/3600} \right) / \omega - 0.0525} \cdot \left( (16 - 6 \cdot \sin(0.17943t)) \cdot e^{-t/3600} \right)^3 \quad (4.4)$$

$$\omega(0) = 333$$

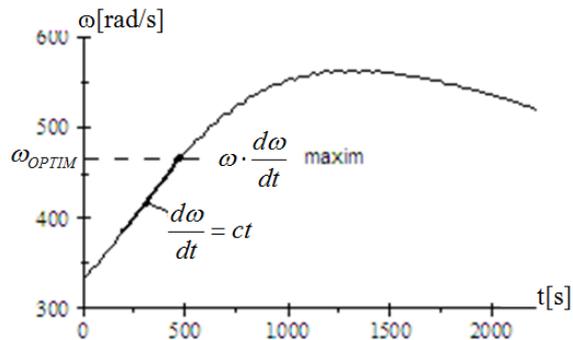


Figura 4.13. Variația vitezei unghiulare mecanice, zona de optim energetic [9]

#### 4.4.4. Metoda de analiză numerică aplicată problemei cu valoare inițială propusă

Datele de intrare necesare începerii simulării problemei cu valoare inițială propusă spre soluționare sunt date în tabelul 4.7, unde  $f$  este funcția Matlab definită pentru a implementa ecuația diferențială (4.4) care descrie procesul de determinare a zonei de optim energetic pornind de la variația vitezei unghiulare mecanice.

**6. Datele de intrare necesare începerii simulării problemei cu valoare inițială considerată**

Tabel 4.7. Datele de intrare necesare începerii simulării problemei cu valoare inițială considerată

Input data	Description
$f=d\omega/dt$	the ordinary differential equation
$t_0=0$	location of known initial condition for f
$t_f=3000$	location at where you wish to see the solution of the ODE
$\omega_0=333$	corresponding value of the mechanical angular speed at $t_0$
$n$	number of steps to take
$h=(t_f-t_0)/n$	the step size h is constant

**4.4.4.1. Rezultatele studiului de caz**

Rezultatele numerice obținute sunt date în tabelul 4.8, iar rezultatul grafic este prezentat în figura 4.13.

În cazul rezultatelor numerice obținute, se poate observa că la fiecare pas al soluționării metodei de analiză numerică aplicată problemei date, variabila t are valori diferite și deci și viteza unghiulară va avea valori dependente de t.

7. Valorile numerice ale vitezei unghiulare mecanice obținute pentru  $n=4$

Tabel 4.8. Valorile numerice ale vitezei unghiulare mecanice obținute pentru  $n=4$ 

step	t	omega
0	0.0000	333.00000000
1	750.0000	613.260696082310460
2	1500.0000	550.093997215520400
3	2250.0000	518.670304658886380
4	3000.0000	459.028496805735020

La fiecare pas, variabila t are valori diferite, iar pentru fiecare valoare a lui t, se calculează variabilele metodei RK4, respectiv  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  și  $k_4$ , iar pe baza acestora, tot în algoritmul corespunzător metodei de analiză numerică RK4 se calculează viteza unghiulară mecanică, conform listingului de mai jos.

```

Step 0: t = 0.00000000, omega = 333.00000000
Step 1: t = 750.0000
        k1 = 225.7046
        k2 = 392.7001
        k3 = 454.8138
        k4 = -239.1682
        omega = 613.260696082310460
Step 2: t = 1500.0000

```

```
k1 = -107.4938
k2 = -112.8088
k3 = -111.1490
k4 = 176.4091
omega = 550.093997215520400
Step 3: t = 2250.0000
k1 = 128.5377
k2 = -111.3365
k3 = -0.2204
k4 = -93.9660
omega = 518.670304658886380
Step 4: t = 3000.0000
k1 = -89.2661
k2 = -59.0121
k3 = -69.6996
k4 = -11.1613
omega = 459.028496805735020
```

Total serial time = 3.8848.

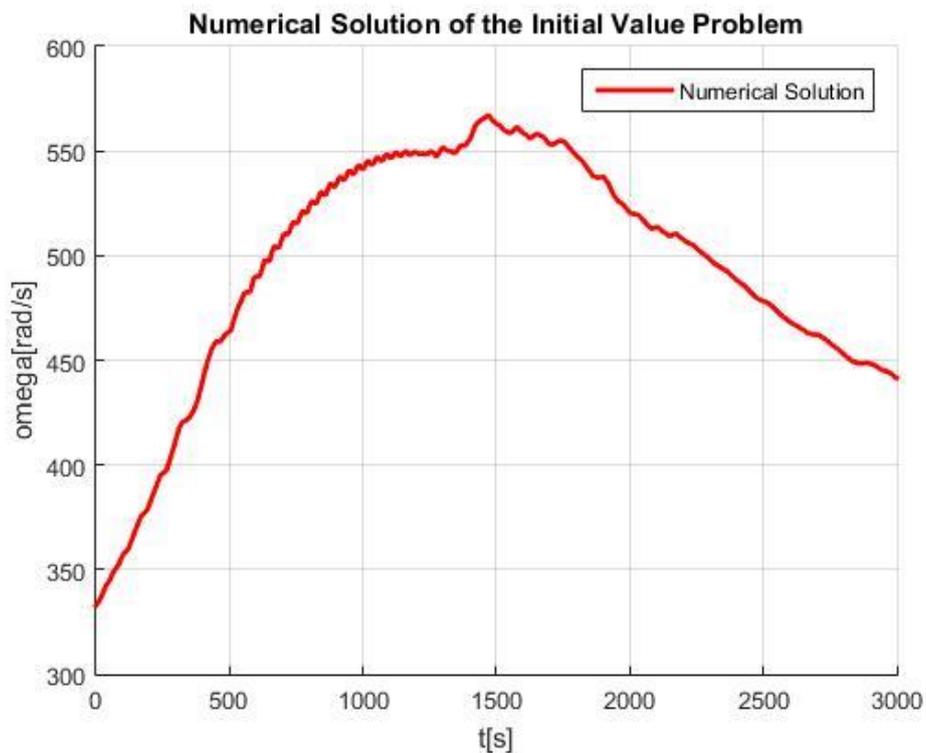


Figura 4.14. Soluția numerică a problemei cu valoare inițială considerată

Timpul necesar execuției componentei seriale a metodei de paralelizare propusă este 3.8848 fiind un rezultat bun comparativ cu cel obținut în referința [25].

După finalizarea execuției componentei seriale, se lansează în execuție componenta paralelă, în care, în urma execuției primului bloc SPMD, se distribuie intervalul inițial de simulare celor patru workeri ai sesiunii paralele deschise, iar pe aceste subintervale astfel distribuite se va simula simultan algoritmul RK4 (corespunzător integrării ecuației diferențiale ce descrie problema propusă spre rezolvare) implementat în cel de-al doilea bloc SPMD al componenteii paralele.

În listingul de mai jos sunt redate subintervalele obținute în urma distribuției datelor cu ajutorul schemei de distribuție a datelor propusă în [47] (aplicată pe problema dată) pentru fiecare worker al sesiunii paralele deschise.

```
Starting parallel pool (parpool) using the 'local' profile ...
connected to 4 workers.
```

```
Lab 1:
```

```
Lab 1 works on [0.000000 ,750.000000 ] .
range_start = 0.000000, range_end = 750.000000
```

```
Lab 2:
```

```
Lab 2 works on [750.000000 ,1500.000000 ] .
range_start = 750.000000, range_end = 1500.000000
```

```
Lab 3:
```

```
Lab 3 works on [1500.000000 ,2250.000000 ] .
range_start = 1500.000000, range_end = 2250.000000
```

```
Lab 4:
```

```
Lab 4 works on [2250.000000 ,3000.000000 ] .
range_start = 2250.000000, range_end = 3000.000000
```

#### 8. Soluția numerică, pe fiecare worker, obținută cu ajutorul metodei de paralelizare propusă

Table 4.9. Soluția numerică, pe fiecare worker, obținută cu ajutorul metodei de paralelizare propusă

<i>Lab 1</i>	Step 1:	t = 0.0000	omega = 551.340168543360620
		t = 187.5000	omega = 586.204717452220050
		t = 375.0000	omega = 587.522978032820670
		t = 562.5000	omega = 638.446629047608440
		t = 750.0000	omega = 622.215222470388540
	Step 2:	t = 0.0000	omega = 701.605704114273750
		t = 187.5000	omega = 701.006293220327050
		t = 375.0000	omega = 680.239280362365320
		t = 562.5000	omega = 710.235895343977750
		t = 750.0000	omega = 680.778444365310070
	Step 3:	t = 0.0000	omega = 747.668839262042180
		t = 187.5000	omega = 735.583640385130140
		t = 375.0000	omega = 708.112846245818100
		t = 562.5000	omega = 730.991877247251640
		t = 750.0000	omega = 697.839277633098960
	Step 4:	t = 0.0000	omega = 760.566264154280360

		t = 187.5000 t = 375.0000 t = 562.5000 t = 750.0000	omega = 745.269943886493020 omega = 715.932299225015300 omega = 736.767554272540560 omega = 702.598963534260860
<i>Lab 2</i>	Step 1:	t = 750.0000 t = 937.5000 t = 1125.0000 t = 1312.5000 t = 1500.0000	omega = 478.210215427783960 omega = 490.029291688201280 omega = 528.249493888488130 omega = 517.318950560280880 omega = 515.652702131701400
	Step 2:	t = 750.0000 t = 937.5000 t = 1125.0000 t = 1312.5000 t = 1500.0000	omega = 522.586689576859270 omega = 526.346545220454350 omega = 558.203378029444930 omega = 542.901998615543560 omega = 536.271055210316040
	Step 3:	t = 750.0000 t = 937.5000 t = 1125.0000 t = 1312.5000 t = 1500.0000	omega = 539.375683500119860 omega = 539.967437477173120 omega = 569.185537676770310 omega = 552.298552747344050 omega = 543.839928233275940
	Step 4:	t = 750.0000 t = 937.5000 t = 1125.0000 t = 1312.5000 t = 1500.0000	omega = 545.524719761291520 omega = 544.944912683605030 omega = 573.169415377007680 omega = 555.710109849608560 omega = 546.588146751132850
<i>Lab 3 :</i>	Step 1:	t = 1500.0000 t = 1687.5000 t = 1875.0000 t = 2062.5000 t = 2250.0000	omega = 470.543839708965950 omega = 486.788338323435650 ... ... omega = 469.112653619221080
	The same steps of RK4 ...	Distributed data ...	Partial results of ODE ...

<i>Lab 4:</i>	Step 1:	t = 2250.0000 t = 2437.5000 t = 2625.0000 t = 2812.5000 t = 3000.0000	omega = 458.653006405039210 omega = 445.573875405903720 ... ... omega = 417.208548295895070
	The same steps of RK4 ...	Distributed data ...	Partial results of ODE ...

Total parallel time = 0.07656

Parallel pool using the 'local' profile is shutting down.

Datorită faptului că timpul paralel total este 0.07656, se poate afirma că s-a obținut un câștig de performanță deoarece timpul serial este mai mic decât timpul paralel. Rezultatele performanței multicore sunt confirmate în tabelul 4.10.

### 9. Eficiența metodei de paralelizare propusă. Performanța multicore

Table 4.10. Eficiența metodei de paralelizare propusă. Performanța multicore

<i>Parallelizable portions of code</i>	<i>Elapsed time</i>		<i>Speedup</i>	<i>Parallel Efficiency</i>
	<i>Serial solution</i>	<i>Parallel solution</i>		
<i>RK4 algorithm -&gt; ODE</i>	3.8848 seconds	0.07656 seconds	50,742	12.685

### Concluzii

Rezultatele obținute indică o accelerare bună, dar și-o eficiență paralelă la fel de bună pentru metoda de paralelizare propusă.

Datorită faptului că structura de tip "single program multiple data" poate lucra cu seturi de date foarte mari sau chiar nelimitate, autorul a utilizat structura de tip "single program multiple data" pentru a soluționa o problemă din domeniul energiei eoliene cu ajutorul calculului paralel, și implicit a paralelismului datelor.

Metoda de paralelizare propusă s-a dovedit a fi eficientă atât din punct de vedere al timpului redus de soluționare, cât și al efortului minim de programare, deoarece în acest caz codul serial și cel paralel au fost gândite pentru a fi rulate împreună în același script Matlab.

Metoda de paralelizare propusă poate fi utilizată cu succes și pe altă structură paralelă decât cea propusă în [29].

Testarea acestei metode pe probleme ingineresti mai complexe descrise de ecuații diferențiale dificil de soluționat prin metode clasice prezintă un interes major care poate fi luat în considerare pentru cercetări ulterioare.

## 5. CONCLUZII ȘI PERSPECTIVE

Problemele ingineresti referitoare la controlul sistemelor eoliene la viteză variabilă sunt descrise de sisteme de ecuații diferențiale de complexitate ridicată.

Soluționarea acestor tipuri de aplicații presupune utilizarea algoritmilor de aproximare numerică a căror soluționare serială necesită însă timp, motiv pentru care sunt necesare metode de paralelizare care să reducă timpul de soluționare în vederea obținerii unui câștig de performanță.

În acest sens, o soluție semnificativă este dată de creșterea potențialului de calcul al supercomputere-lor ce oferă posibilitatea reducerii timpului necesar simulărilor numerice mari.

Însă, potențialul de calcul crescând oferit de supercomputere implică dezvoltarea de noi metode de calcul paralel care, în general, implică lucrul cu seturi mari de date. Drept urmare, metodele de paralelizare trebuie să ofere, între altele, rezultate optime în contextul lucrului cu seturi mari de date.

### 5.1. Impactul tezei și contribuții

Teza propune o direcție nouă în domeniul **High Performance Scientific Computing** prin oferirea de tehnici și metode de paralelizare pentru structuri paralele de tip **Shared-Memory Multicore Systems**.

Direcția de cercetare aleasă este de actualitate, soluția de paralelizare bazată pe paralelismul datelor propusă este potrivită pentru un mediu ce implică probleme ingineresti referitoare la energia vântului în care fenomenele fizice sunt descrise de ecuații diferențiale de complexitate ridicată a căror soluționare numerică folosind metode de calcul științific ce nu implică și metode de calcul paralel necesită timp, iar reducerea timpului de soluționare joacă un rol major în obținerea de rezultate satisfăcătoare.

Metodele de paralelizare bazate pe paralelismul datelor reprezintă o direcție clară pentru domeniul High Performance Scientific Computing în cazul utilizării de sisteme multicore de tip shared memory în vederea obținerii de rezultate performante.

Un eșec întru-un domeniu de High Performance Scientific Computing are efecte majore asupra domeniilor ingineresti implicate, motiv pentru care obținerea de metode și tehnici pentru susținerea metodelor de calcul intensiv existente reprezintă o direcție de cercetare importantă.

Datorită creșterii exponențiale a performanței supercomputere-lor ce oferă posibilitatea reducerii timpului necesar simulărilor numerice mari, prezenta teză reprezintă o abordare proprie și independentă a problematicii pe metode de paralelizare bazate pe paralelismul datelor ținând cont de faptul că simulările numerice mari implică lucrul cu seturi mari de date, motiv pentru care autorul a propus o schemă de distribuție a datelor necesară împărțirii unui set mare de date în mai multe subseturi de date, astfel încât aceeași porțiune paralelizabilă de cod să se execute pe date diferite conform principiului single program multiple data de la care s-a plecat în dezvoltarea conceptului de schemă de distribuție a datelor.

Cu alte cuvinte, un interval mare de simulare se împarte în mai multe subintervale care sunt alocate procesoarelor disponibile (ce aparțin structurii paralele pe care se lucrează), astfel încât fiecare procesor să simuleze aceeași porțiune paralelizabilă de cod pe subintervalul alocat lui, iar pentru analizarea fluxului de date astfel distribuit structurii paralele propusă și prezentată în teza de

față, autorul a propus un concept numit diagrama fluxului de date din care rezultă gradul de "încărcare" a datelor (modul de distribuție a datelor pe "nodurile" de calcul a structurii paralele utilizată) pe elementele componente ale structurii paralele propuse și utilizate ca suport hardware pentru soluționarea aplicațiilor folosind metodele de paralelizare propuse și aplicate pe probleme ingineresti (referitoare la implementarea algoritmilor de control a sistemelor eoliene la viteză variabilă a vântului) de complexitate ridicată.

Teza își propune să ofere o alternativă la soluțiile de paralelizare existente, alternativă care se bazează pe un concept ce implică paralelismul datelor prin oferirea de soluții de distribuție a unui set mare de date în mai multe subseturi corespunzătoare numărului de noduri elementare de calcul utilizat în cazul structurii paralele pe care se lucrează.

În acest sens, autorul a propus un concept numit "quad parallel structure" pe baza căruia autorul a propus și dezvoltat o soluție alternativă de paralelism a datelor.

Obiectivele conturate în definirea soluției au fost atinse în sensul că soluția permite partajarea și distribuția setului inițial de date în funcție de numărul de noduri de calcul al structurii paralele utilizată ca suport hardware.

Contribuțiile aduse în cazul soluției de paralelism explicit a datelor propusă pentru sisteme de calcul paralel de tip shared memory multicore systems:

- Propunerea unui nou algoritm de calcul ce distribuie un set mare de date în mai multe subseturi și atribuirea subseturilor astfel obținute nodurilor elementare de calcul a structurii paralele hardware utilizată prin intermediul unei structurii paralele de tip single program multiple data emulată pe structura hardware utilizată
- Algoritmul permite calcularea limitelor subintervalelor necesare structurii paralele de tip single program multiple data utilizată în cadrul metodei de paralelism a datelor propusă ținând cont de numărul de noduri de calcul elementare al structurii paralele pe care se lucrează.
- Algoritmul permite totodată și calcularea step-ului pentru fiecare subinterval ținând cont de limitele subintervalelor astfel obținute.
- Pe fiecare nod de calcul elementar se face o analiză a fluxului de date astfel obținute cu ajutorul diagramei fluxului de date propusă în acest sens, obținându-se astfel valorile reale ale fiecărui subinterval obținut pe care fiecare nod de calcul va obține o soluție parțială.

Metodologia teoretică este susținută de o parte aplicativă prin faptul că fiecare dintre contribuțiile aduse sunt verificate prin soluționarea de probleme ingineresti care implementează algoritmii și tehnicile propuse.

Totodată soluția propusă permite obținerea de soluții parțiale pe fiecare din nodurile de calcul implicate, în sensul că pe fiecare nod se va calcula o soluție numerică parțială pe subsetul de date atribuit într-un timp de soluționare redus, obținându-se astfel un câștig de performanță multicore dat de raportul dintre speedup (ca raport dintre timpul de calcul serial și timpul de calcul paralel) / procesor.

Soluția propusă este bine fundamentată teoretic fiind materializată prin contribuții în cercetare aplicate pe probleme ingineresti de calcul intensiv, soluția fiind astfel susținută de o parte aplicativă consistentă redată în teza de față.

Teza conturează avantajele și limitările metodologiei propuse în scopul identificării direcțiilor de extensie și de dezvoltare pentru întreaga activitate de cercetarea realizată și prezentată.

Metoda de paralelizare propusă (metodă bazată pe paralelismul datelor) are ca scop direct reducerea timpului de calcul prin distribuirea intervalului inițial de simulare elementelor structurii paralele, și deci nu implică și transferul calculelor din sesiunea Matlab paralelă pe clientul Matlab pentru a fi procesate ulterior.

Un alt dezavantaj al metodei este că este aplicabilă pentru sisteme paralele multicore cu memorie partajată, și nu și-n cazul sistemelor paralele cu memorie distribuită.

## 5.2. Direcții de cercetare

Metoda de distribuție a datelor deschide noi direcții de cercetare în sensul propunerii unor noi metode pentru îmbunătățirea procesului de distribuție a datelor pentru identificarea unor soluții de redare grafică a soluțiilor parțiale obținute pe fiecare nod de calcul elementar al structurii paralele de tip single program multiple data utilizată în sensul dezvoltării conceptului de schemă de distribuție a datelor ca soluție de paralelizare bazată pe paralelismul datelor.

De precizat este faptul că, în prezent, mediul de dezvoltare Matlab nu oferă metode de redare grafică a soluțiilor parțiale pe fiecare nod de calcul al structurii paralele, ci doar redare numerică, fapt ce implică centralizarea datelor și transferul acestora din sesiunea Matlab paralelă pe clientul Matlab, pentru a fi procesate și eventual redare grafic.

Așadar, o sesiune Matlab paralelă permite, cel mult, redarea grafică a rezultatelor obținute pe fiecare nod de calcul în parte. Acest lucru implică identificarea unor metode de transfer a calculelor din sesiunea paralelă pe clientul Matlab, metode care să nu implice însă timpi mari de transfer și care să genereze soluții încă de la momentul la care datele sunt disponibile pe nodurile de calcul.

De asemenea, extinderea conceptului de schemă de distribuție a datelor propus și în cazul sistemelor de calcul paralele cu memorie distribuită, poate constitui un progres științific.

## 5.3. Publicații

### 1. Lucrări științifice publicate în volumele unor manifestări științifice (Proceedings) indexate Web of Science-WoS (ISI) Proceedings

1. Horia Ciocarlie, Florica Balog, Gheza-Mihai Erdodi, Doru-Ionut Petrescu, "Peak Energy Determination by a Sample at Idle Mode Operation", 9th IEEE International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics, Timișoara, Romania, May 15-17, 2014, 978-1-4799-4694-5/14, p295-298.

2. Florica Balog, Horia Ciocarlie, Marius Babescu, Doru-Ionut Petrescu, "Maximizing the Captured Energy of the Wind System", 9th IEEE International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics, Timișoara, Romania, May 15-17, 2014, 978-1-4799-4694-5/14, p289-293.

3. Babescu, M.; Novacescu, F. ; Ciocârlie, H., „The leading of the eolian power systems at speed of wind vary over time”, Computational Science and Computational Intelligence (CSCI), 2014 International Conference on, Las Vegas, NV, 10-13 March 2014, IEEE Explore Digital Library, Volume: 1/ DOI: 10.1109/CSCI.2014.70, Page(s): 368–373, 2014.

**2. Lucrări științifice publicate în reviste de specialitate indexate BDI (cu specificarea BDI)**

1. Florica Novăcescu, „High-performance Scientific Computing. Using Parallel Computing to Improve Performance Optimization Problems”, Analele Universității “Eftimie Murgu” Reșița, vol. 1, ISSN 1453 - 7394, 2011.

2. Florica Novăcescu, „Big Data in High Performance Scientific Computing”, ANALELE UNIVERSITĂȚII “EFTIMIE MURGU” REȘIȚA , ISSN 1453 – 7397, vol. 1, 2013.

3. FLORICA BALOG, HORIA CIOCARLIE, MARIUS BABESCU, GHEZA-MIHAI ERDODI, “The Dynamics of Wind System at the Optimum Load”, BULETINUL INSTITUTULUI POLITEHNIC DIN IASI, Publicat de Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iasi, Tomul LX (LXIV), Fasc. 2, 2014, Sectia AUTOMATICĂ si CALCULATOARE, 2014.

4. Horia Ciocarlie, Florica Balog, Gheza-Mihai Erdodi, Doru-Ionut Petrescu, “Behavior of the wind systems optimally controlled at variable wind speeds”, Scopus, Advances in Intelligent Systems and Computing, Volume 357, Pages 1337-1351, 2016.

5. Florica Balog, Horia Ciocarlie, Marius Babescu, Gheza-Mihai Erdodi, “Equivalent speed and equivalent power of the wind systems working at variable wind speed”, Scopus, Advances in Intelligent Systems and Computing, Volume 357, Pages 1325-1336, 2016.

6. Horia Ciocarlie, Florica Balog, Gheza-Mihai Erdodi, Marius Babescu, „Basic specification regarding the wind power systems control”, INTERNATIONAL JOURNAL OF COMPUTERS & TECHNOLOGY/ ISSN 2277-3601, Vol 12, No. 9, Page(s): 3927-3944, 2014.

**3. Lucrări științifice publicate în volumele unor manifestări științifice (Proceedings) indexate BDI (cu specificarea BDI)**

1. Novăcescu F., „Trends in the field of high performance computing and their influence on HPC field”, Scopus, Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium, 2011.

**4. Lucrări științifice publicate în reviste de specialitate**

1. Florica Balog, Horia Ciocarlie, “Development and Parallelization of a Direct Numerical Simulation in order to Study the Behavior of a Wind Systems Optimally Controlled at Variable Wind Speed”, Wulfenia Journal, 2016.

2. Florica Balog, Horia Ciocarlie, "Parallelization strategy of an explicit numerical analysis technique for a quad-parallel structure", Jokull Journal, Vol. 66, No. 3, Mar 2016.
3. Florica Balog, Horia Ciocarlie, "Parallel Solving of The Wind System Control at Variable Wind Speed", INDIAN JOURNAL OF APPLIED RESEARCH, Volume: 5 | Issue: 6 | June 2015 | ISSN-2249-555X, Page(s): 301-305, 2015.

## BIBLIOGRAFIE

- [1] Babescu M., Borlea I., Jigoria Oprea D., "Fundamental aspects concerning Wind Power System Operattion Part.1, Case Study", IEEE MELECON 2012, Medina Tunisia, 25-28 March, 2012, 978-1-4673-0783-3.
- [2] Babescu M, Borlea I, Jigoria Oprea D.", Fundamental aspects concerning Wind Power System Operattion Part.2, Matemactical Models", IEEE MELECON 2012, Medina Tunisia, 25-28 March, 2012, 978-1-4673-0783-3.
- [3] M. Babescu, O.Gana, L.Clotea", Fundamental Problems related to the Control of Wind Energy Conversion Systems-Maximum Power Extraction and Smoothing the Power Fluctuations deliveres to the Grid", OPTIM-13th International Conference on Optimizytion of Electrical and Electronic Equipment, Optim 2012, Brasov, 24-26 May, 2012.
- [4] Babescu M, Borza I., Gana O., Lacatusu F.", Comportarea sistemului electroenergetic eolian la variatii rapide ale vitezei vântului", Producerea, transportul si utilizarea energiei, Editura RISOPRINT Cluj-Napoca, 2010, ISSN 2066-4125, pp 11-24.
- [5] Babescu M, Boraci.R, Chioreanu C, Koch C, Gana O., "On Functioning of the Electric Wind System at its Maximum Power", ICCO-CONTI 2010, Timisoara, Romania, May 27-29, 2010.
- [6] Bej A., "Turbine de vânt", Editura POLITEHNICA Timisoara, ISBN 973-625-098-9, 2003.
- [7] Barakati S.M, M.Kazerani, and J.D.Aplevich, "Maximum Power Tracking Control for a Wind Turbine System Including a Matrix Converter", IEEE Trans. Energy Convers., vol. 24, no. 3, September 2009, pp.705-713.
- [8] Chen Z., Spooner E., "Grid power with variable speed turbines", IEEE Trans. Power Electron., vol. 16, no. 2, Jun. 2001, pp. 148-154.
- [9] Kaigui Xie, Zefu Jiang, Wenyuan Li, Fellow, "Effect of Wind Speed on Wind Turbine Power Converter Reliability", IEEE Transactions On Energy Conversion, Vol. 27, No. 1, March 2012.
- [10] Lin Cheng, JinLin, Yuan-Zhang Sun, Chanan Singh, Wen-Zhong Gao, Xing-Mei Qin, "A Model for Assessing the Power Variation of a Wind Farm Considering the Outages of Wind Turbines", IEEE Transactions On Sustainable Energy, Vol. 3, No. 3, July 2012.
- [11] Gertmar--"Wind turbines", Berlin, Germany, Springer-Verlag, 2000.
- [12] Jeong H G, Seung R H, Lee K B, "An Improved Maximum Power Point Tracking Method for Wind Power Systems-Energies", 2012, 5, 1339-1354; doi:10.3390/en5051339 energies ISSN 1996-1073.`

- [13] Jiao S., Hunter G., Ramsden V., Patterson D., "Control system design for a 20 KW wind turbine generator with a boost converter and battery bank load", in Proc. IEEE PESC, Vancouver, BC, Canada, Jun. 2001, pp. 2203-2206.
- [14] Kim K.H., Van T.L., Lee D.C., Song S.H., Kim E.H., "Maximum output Power Tracking Control in Variable-Speed Wind Turbine System Considering Rotor Inertial Power", in IEEE transaction on industrial electronics, vol.60, no.8, august 2013, pp.3207-3217.
- [15] Koutroulis E, Kalaitzakis K., "Design of a Maximum Power Tracking System for Wind-Energy-Conversion Applications-486", IEEE Transactions on industrial electronics, Vol. 53, No. 2, April 2006.
- [16] Libao Shi, Chen Wang, Liangzhong Yao, Yixin Ni, Masoud Bazargan, "Optimal Power Flow Solution Incorporating Wind Power", IEEE Systems Journal, Vol. 6, No. 2, June 2012.
- [17] Nishikata S, Tatsuta F, "A New Interconnecting Method for Wind Turbine/Generators in a Wind Farm and Basic Performances of the Integrated System", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 57, Nr.2, feb.2010, p468-476, ISSN 0278-0046.
- [18] Ghizlane Hafidi, Jonathan Chauvin, "Wind speed estimation for wind turbine control", IEEE International Conference on Control Applications Part of 2012 IEEE Multi-Conference on Systems and Control, Dubrovnik, Croatia, 3-5 October, 2012.
- [19] Pandey K K, Tiwari Dr.A.N, "Maximum Power Point Tracking Of Wind Energy Conversion System With Synchronus Generator", International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), Vol. 1 Issue 5, July, 2012 ISSN: 2278-0181, MMMEC Gorakhpur-273010.
- [20] Jianxiao Zou, Junping Yao, Qingze Zou, Hongbing Xu, "A Multi-Objective Optimization Approach to Active Power Control of Wind Farms", American Control Conference Fairmont Queen Elizabeth, Montreal, Canada, 2012, 978-1-4577-1096-4/12.
- [21] Horia Ciocarlie, Florica Balog, Gheza-Mihai Erdodi, Doru-Ionut Petrescu, "Peak Energy Determination by a Sample at Idle Mode Operation", 9th IEEE International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics, Timișoara, Romania, May 15-17, 2014, 978-1-4799-4694-5/14, p295-298.
- [22] Quaschnig V., "Understanding Renewable Energy Systems", ISBN 1-84407-128-6, London Carl Hanser Verlag GmbH & Co KG, 2005.
- [23] Florica Balog, Horia Ciocarlie, Marius Babescu, Doru-Ionut Petrescu, "Maximizing the Captured Energy of the Wind System", 9th IEEE International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics, Timișoara, Romania, May 15-17, 2014, 978-1-4799-4694-5/14, p289-293.
- [24] Florica Balog, Horia Ciocarlie, Marius Babescu, Gheza-Mihai Erdodi, "Equivalent speed and equivalent power of the wind systems working at variable wind speed",

- Scopus, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, Volume 357, Pages 1325-1336, 2016.
- [25] Horia Ciocarlie, Florica Balog, Gheza-Mihai Erdodi, Doru-Ionut Petrescu, "Behavior of the wind systems optimally controlled at variable wind speeds", *Scopus, Advances in Intelligent Systems and Computing*, Volume 357, Pages 1337-1351, 2016.
- [26] FLORICA BALOG, HORIA CIOCARLIE, MARIUS BABESCU, GHEZA-MIHAI ERDODI, "The Dynamics of Wind System at the Optimum Load", *BULETINUL INSTITUTULUI POLITEHNIC DIN IASI*, Publicat de Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iasi, Tomul LX (LXIV), Fasc. 2, 2014, Sectia AUTOMATICĂ si CALCULATOARE, 2014.
- [27] Horia Ciocarlie, Florica Balog, Gheza-Mihai Erdodi, Marius Babescu, „Basic specification regarding the wind power systems control”, *INTERNATIONAL JOURNAL OF COMPUTERS & TECHNOLOGY/ ISSN 2277-3601*, Vol 12, No. 9, Page(s): 3927- 3944, 2014.
- [28] Babescu, M. ; Novacescu, F. ; Ciocârlie, H., „The leading of the eolian power systems at speed of wind vary over time”, *IEEE Explore Digital Library*, Volume: 1/ DOI: 10.1109/CSCI.2014.70, Page(s): 368 – 373, 2014.
- [29] Florica Balog, Horia Ciocarlie, "Parallel Solving of The Wind System Control at Variable Wind Speed", *INDIAN JOURNAL OF APPLIED RESEARCH*, Volume: 5 | Issue: 6 | June 2015 | ISSN-2249-555X, Page(s): 301-305, 2015.
- [30] Petru T., "Modeling Wind Turbines for Power System Studies", Ph. D. Diss., Chalmers, Goteborg, Sweden, Jun. 2003.
- [31] El Aimani S., Francois B., Minne F., Robyns B., Comparativ Analysis of Control Structures for Variable Speed Wind Turbine. in *Proc. CESA*, Lille, France, Joule, 9-11, 2003.
- [32] Gavris M.L., *Dual Input DC-DC Converters for Renewable Energy Processing*. Ph. D. Diss., Univ. "Politehnica Timisoara", Feb. 2013.
- [33] Luca D., Nichita C., Diop A.P., Dakyo B., Ceanga E., Load Torque Estimators for Wind Turbines Simulators. in *Proc. EPE Conf.*, Graz, Austria, CD-ROM, Sep. 2001.
- [34] Ors M., Maximum Power Point Tracking for Small Scale Wind Turbine with Self-Excited Induction Generator-CEAI. Printed in Romania, Technical University of Cluj-Napoca, Department of Automatic Control, Cluj-Napoca, 11, 2, 30–34,2009.
- [35] Petrila D.P., *Energy Conversion and Storage Control for Small Wind Turbine. Systems*-Ph. D. Diss., Univ. "Politehnica Timisoara", 2013.
- [36] Bhupesh Kumar Poosam, Hemant Amhia, „Control System Based on DSP for wind Turbine”, *Indian Journal of Applied Research*, Vol. 3, Issue 1, ISSN - 2249-555X, 2013.

- [37] Florica Balog, Horia Ciocarlie, Marius Babescu, Doru-Ionut Petrescu, "Maximizing the Captured Energy of the Wind System", 9th IEEE International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics, Timișoara, Romania, May 15-17, 2014, 978-1-4799-4694-5/14, p289-293.
- [38] César Pérez López, „MATLAB Differential Equations”, Springer, ISBN-13 (electronic): 978-1-4842-0310-1, 2014.
- [39] B. Barney, "Introduction to parallel computing", [https://computing.llnl.gov/tutorials/parallel\\_comp/#Whatis](https://computing.llnl.gov/tutorials/parallel_comp/#Whatis), 2012.
- [40] S. Samsi A. Krishnamurthy, V. Gadepally, „Parallel MATLAB Techniques”, 2009.
- [41] The MathWorks Inc. 2015, "Parallel Computing Toolbox User's Guide".
- [42] Benjamin A. Allan, Robert C. Armstrong, Alicia P. Wolfe, Jaideep Ray, David E. Bernholdt, James A. Kohl. Journal of Concurrency and Computation: Practice and Experience. Volume 14, Issue 5, Pages 323–345, 2002.
- [43] Yair Altman, Accelerating MATLAB Performance. 1001 tips to speed up MATLAB programs. CRC PressTaylor & Francis Group, 2015.
- [44] Tan Delin, Chen Zheng, On a General Formula of Fourth Order Runge-Kutta Method. Journal of Mathematical Science & Mathematics Education. Vol. 7, No. 2: 1–10, 2012.
- [45] Gaurav Sharma, Jos Martin, "MATLAB: A Language for Parallel Computing", Int J Parallel Prog (2009) 37:3–36, DOI 10.1007/s10766-008-0082-5, Springer, 2008.
- [46] Cleve Moler, Numerical Computing with MATLAB. SIAM. 2nd Ed., ISBN 978-0-898716-60-3, 2008.
- [47] Florica Balog, Horia Ciocarlie, "Development and Parallelization of a Direct Numerical Simulation in order to Study the Behavior of a Wind Systems Optimally Controlled at Variable Wind Speed", Wulfenia Journal, 2016.
- [48] José Miguel Mantas, Pedro González, José A. Carrillo, "Parallelization of Implicit-Explicit Runge-Kutta Methods for Cluster of PCs". Springer, Volume 3648, pp 815-825.
- [49]. Ananth Grama, Anshul Gupta, George Karypis, Vipin Kumar, „Introduction to ParallelComputing, 2nd edition”, ISBN 0-201-64865-2, Addison-Wesley, 2003.
- [50] Ilie Popa, "Introducere în calculul paralel și distribuit. Algoritmi", Editura Matrix Rom, București, 2005.
- [51]. B. Catanzaro, A. Fox, K. Keutzer, D. Patterson, Su Bor-Yiing, M. Snir, K. Olukotun, P. Hanrahan, H. Chafi, "Ubiquitous Parallel Computing from Berkeley, Illinois, and Stanford", Micro, IEEE, vol.30, no.2, pp.41-55, March-April 2010.

- [52] Torsten Hoefler, Umar Kalim, Mark Gardner, Eric Brown, Wu-chun Feng, „Cascaded TCP: Big Throughput for Big Data Applications in Distributed HPC”, The International Conference of High Performance Computing, Storage and Analysis, Salt Lake City, Utah, 2012.
- [53] Blaise Barney, „Introduction to Parallel Computing”, Lawrence Livermore National Laboratory.
- [54] Fernando Villalpando, Marcelo Reggio, Adrian Ilinca, „Assessment of Turbulence Models for Flow Simulation around a Wind Turbine Airfoil”, Hindawi Publishing Corporation, Modelling and Simulation in Engineering, doi:10.1155/2011/714146, 2011.
- [55] Kamal El Omari, Eric Schall, Bruno Koobus and Alain Dervieux, “Turbulence Modeling Challenges In Airship Cfd Studies”, Monografías del Seminario Matemático García de Galdeano 31, 545–554, 2004.
- [56]. Steve M. Legensky, “HPC in Wind Power: Machine Design and Siting”.
- [57]. G.T. Bitsuamlak, T. Stathopoulos, F. Asce, C. Bedard, „Numerical Evaluation of Wind Flow over Complex Terrain”, 2004.
- [58] Pierluigi Amodio, Luigi Brugnano, “Parallel solution in time of ODEs: some achievements and perspectives”, ScienceDirect, Applied Numerical Mathematics 59 (2009) 424–435.
- [59] Bhupesh Kumar Poosam, Hemant Amhia, „Control System Based on DSP for wind Turbine”, Indian Journal of Applied Research, Vol. 3, Issue 1, ISSN - 2249-555X, 2013.
- [60] Robert Hammerling, Othmar Koch, Christa Simon, Ewa B. Weinmüller. Numerical solution of singular ODE eigenvalue problems in electronic structure computations. Elsevier. 1557–1561, 2010.
- [61] Dana Petcu, “Procesare paralelă”, Editura Eubeea, ISBN 973-9479-48-0, 2001.
- [62] D. Petcu, „Algoritmi paraleli”, Tipografia Universității de Vest, Timișoara, 1994.
- [63] D. Petcu, „Calcul paralel”, Tipografia Universității de Vest, Timișoara, 1994.
- [64] S.A. Williams, „Programming models for parallel systems”, Jhon Willey & Sons, Chicester, 1990.
- [65] W. Gropp et al, „Using MPI: portable parallel programming with message-passing-interface”, MIT Press, 1996.
- [66] F. Ionescu, „Principiile calculului paralel”, Editura Tehnica Bucuresti, 1999.
- [67] H. B. Newman, M. H. Ellisman, and J. A. Ocrutt, „Data-intensive e-science frontier research”, Commun. ACM, vol. 46, pp. 68-77, November, 2003.

- 
- [68] M. Valero, „A european perspective on supercomputing“, in ICS 2009: Proceeding of the 23rd international conference on Supercomputing, New York, NY, USA: ACM, 2009, pp. 1-1.
- [69] J. Gray, D. T. Liu, M. Nieto-Santisteban, A. Szalay, D. J. DeWitt, and, G. Herber, „Scientific data management in the coming decade“, SIGMOD Rec. vol. 34, no. 4, pp. 34-41, 2005.
- [70] R. Burns, S. B. Davidson, Y. Ioannidis, M. Livny, and J. M. Patel, „Scientific data management: An orphan in the database community?“, in ICDE 2008: Proceedings in the 2008 IEEE 24 th International Conference on Data Engineering. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2008, p. 9.
- [71] R. Rew and G. Davis, „Data management: NetCDF: an interface for scientific
- [72] D. Korsemyer and C. V. Thompson, „Guest editors introduction: Internet access to scientific data“, IEEE Internet Computing, vol. 9, no. 1, pp. 17-19, 2005.
- [75] V. P. Holmes, S. D. Kleban, D. J. Miller, C. Pavlakos, C. A. Poore, R. L. Vandeward, and C. P. Crowley, „An architecture and implmentation to support large-scale data access in scientific simulation environments“, Proceedings of the 35th Annual Simulation Symposium. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2002, p. 169.
- [76] O. Rubel, Prabhat, K. Wu, H. Childs, J. Meredith, C. G. R. Geddes, E. Cormier-Michel, S. Ahern, G. H. Weber, P. Messmer, H. Hagen, B. Hamann, and E. V. Bethel, „High performance multivariate visual data exploration for extremely large data“, Proceedings of the 2008 ACM/IEEE conference on Supercomputing. Piscataway, NJ, USA: IEEE Press, 2008, pp. 1-12.