

# **FENOMENE TRANZITORII ÎN ECHIPAMENTELE ELECTRICE NAVALE ALIMENTATE HIBRID**

Teză destinată obținerii  
titlului științific de doctor inginer  
la  
Universitatea "Politehnica" din Timișoara  
în domeniul Inginerie Energetică  
de către

**Ing. Florențiu DELIU**

Președinte:	Prof.dr.ing. Nicolae MUNTEANU
Conducător științific:	Prof.dr.ing. Petru ANDEA
Referenți științifici:	Prof.dr.ing. Mihai Octavian POPESCU Prof.dr.ing. Gheorghe SAMOILESCU Prof.dr.ing. Marius BIRIESCU

Data susținerii tezei: 18.03.2011

Seriile Teze de doctorat ale UPT sunt:

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

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

Copyright © Editura Politehnica – Timișoara, 2011

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

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

## PREFAȚĂ

Prezenta lucrare este rezultatul activității de cercetare întreprinse în calitate de cadru didactic la Academia Navală "Mircea cel Bătrân" din Constanța și în același timp doctorand la Facultatea de Electrotehnică și Electroenergetică din Timișoara, Catedra Electroenergetică.

În cadrul acestei teze au fost studiate fenomenele tranzitorii în echipamentele electrice navale, cu precădere în sistemele electroenergetice navale solare, eoliene și cele pe bază de combustibili fosili, în speță motorină prin echipamentele Diesel navale. Folosirea subsistemelor solare și eoliene este analizată și implementată ca o soluție complementară de dată recentă, mai ales prin atragerea în sistemele electroenergetice navale a noilor forme de energie: eoliană și solară. Aceasta impune modelarea, simularea și analiza fenomenelor tranzitorii în echipamentele electrice navale. Cu ajutorul modelelor matematice elaborate se poate verifica prin simulare comportarea navei în diferite regimuri, astfel încât încă din faza de proiectare se pot pune bazele unei funcționări optime din punct de vedere al consumului de energie necesar atât propulsiei cât și celorlalți consumatori de pe navă. De asemenea modelele matematice pentru subsistemul TVN+GSMP+AE pot să furnizeze coordonatele punctului de putere maximă și astfel conducerea navei se realizează optim din punct de vedere al stocării de energie.

În cadrul sistemelor electroenergetice navale cu generatoare sincrone, motoare de antrenare Diesel și turbine de vânt navale se pune problema stabilității dinamice și statice la diverse sarcini. Stabilitatea statică se referă la variații mici și lente ale sarcinii, iar cea dinamică la variații rapide ale sarcinii. Sistemul este static sau dinamic stabil atunci când funcționarea are loc într-un punct staționar bine definit de consumatorii electrice de pe navă. Stabilitatea dinamică a sistemului electroenergetic al navei este analizată cu ajutorul modelului ortogonal prin rezolvarea sistemelor de ecuații diferențiale, neliniare și neomogene.

Sunt studiate influențele reguletoarelor de frecvență și de tensiune asupra sistemului, în timpul fenomenelor tranzitorii ce au loc în echipamentele electrice navale.

Pentru realizarea acestei lucrări doresc să aduc alese și distinse mulțumiri conducătorului științific, domnului prof. dr. ing. Petru ANDEA, Decanul Facultății de Electrotehnică și Electroenergetică din Timișoara, pentru sprijinul și îndrumarea deosebită acordată pe întreaga perioadă a elaborării tezei.

Îmi exprim întreaga considerație față de membrii comisiei de doctorat care au răspuns solicitării de a face parte din comisia de analiză a tezei de doctorat, domnului director Emanuel MUNTMARK de la firma Monsson Alma din Constanța și colegilor de la Academia Navală din Constanța care m-au sprijinit în această activitate de cercetare.

De asemenea, doresc să aduc mulțumiri călduroase colectivului de cadre didactice din Catedra de Electroenergetică a Facultății de Electrotehnică și Electroenergetică din Timișoara și în mod special domnului prof.dr.ing. Ștefan Kilyeni cu care am colaborat deosebit de constructiv.

Doresc să remarc observațiile utile ale domnului prof.dr.ing. Marius Biriescu, care parcurgând cu meticulozitate prezenta lucrare mi-a deschis perspective noi în continuarea cercetărilor.

Timișoara

Florențiu Deliu

*Profesorilor mei,*

Deliu, Florențiu

**Fenomene tranzitorii în echipamentele electrice navale**

Teze de doctorat ale UPT, Seria 13, Nr.1, Editura Politehnica, 2011, 317 pagini, 428 figuri, 4 tabele.

ISSN:2069-8208

ISBN:978-606-554-256-3

Cuvinte cheie: fenomene tranzitorii, modele matematice, echipamente electrice navale, sisteme eoliene, sisteme solare, sisteme Diesel, modelare, simulare, regulatoare.

Rezumat: În cadrul acestei lucrări sunt abordate problematice specifice sistemelor electroenergetice navale, cu precădere analiza fenomenelor tranzitorii ce au loc în sistemele eoliene, solare sau a Diesel generatoarelor.

După o sintetică analiză a stadiului actual a sistemului electroenergetic naval, se tratează noile tendințe de folosire a energiei eoliene și solare în vederea reducerii consumului de combustibil. Sistemul electroenergetic solar conține bateriile solare, convertorul DC-DC și acumulatorii electrice de stocare a energiei obținute. Sistemul eolian conține turbina de vânt navală și generatorul sincron, iar sistemul Diesel conține motorul Diesel și generatorul sincron. Au fost elaborate modelele matematice ale turbinei de vânt navale, generatorului sincron și motorului Diesel, modele pe baza cărora s-au analizat fenomenele tranzitorii ce au loc în echipamentele electroenergetice navale. Se face precizarea că sistemul electroenergetic naval este dinamic stabil numai la valori bine definite pentru constantele reguletoarelor din sistem, constante calculate prin simulări numerice și nu prin metode directe datorită complexității sistemelor diferențiale neliniare neomogene.

S-a analizat întreaga gamă de regulatoare: regulator P (proporțional), regulator PI (proporțional integrator) și regulator PID (proporțional integrator derivativ).

Studiul fenomenelor tranzitorii în echipamentele electrice navale a scos în evidență faptul că folosirea energiei eoliene și solare în momentul de față este o aplicație atât tehnică cât și economică tot mai atractivă, în condițiile în care se estimează o epuizare a combustibililor fosili în următoarele decenii.

## CUPRINS

Listă de figuri .....	9
Listă de tabele.....	21
<b>1. INTRODUCERE</b> .....	23
<b>2. UTILIZAREA SURSELOR DE ENERGIE REGENERABILE</b> .....	27
2.1. Principalele tipuri de surse de energie si caracteristicile lor comparative.....	27
2.2. Potentialul surselor regenerabile de energie din România .....	28
2.3. Politici privind sursele regenerabile de energie și valorificarea acestor....	30
2.3.1. Premise de valorificare a surselor regenerabile de energie din România .....	31
2.4. Agregate aeroelectrice(A.A.E.)....	32
2.4.1. Scurt istoric al utilizării puterii vântului.....	32
2.4.2. Configurații si caracteristici de bază ale turbinelor eoliene.....	35
2.4.3. Sisteme electroenergetice autonome cu grupuri Diesel/solare/aeroelectrice .....	36
2.4.4. Concluzii privind A.A.E .....	37
2.5. Energia fotovoltaică.....	38
2.6. Concluzii .....	39
<b>3. MODELAREA MATEMATICĂ A SISTEMELOR EOLIENE,SOLARE ȘI DIESEL</b> .....	41
3.1. Considerații preliminare .....	42
3.2. Modele matematice .....	42
3.2.1. Motorul Diesel(MD) .....	42
3.2.2. Turbina de vânt navală(TVN) .....	44
3.2.3. Generatorul sincron (GS) .....	51
3.2.3.1. Problema fluxului statoric la GSMP-demagnetizarea MP...	60
3.2.4. Bateria solară (BS) .....	63
3.2.5.Convertorul DC-DC .....	68
3.2.5. Acumulatorii electrice (AE) .....	69
3.3. Concluzii .....	72
<b>4. FENOMENE TRANZITORII IN SUBSISTEMUL (TVN+GSMP+AE)</b> .....	73
4.1. Conducerea subsistemului (TV+GSMP+AE) .....	73
4.1.1. Modificarea vitezei vântului .....	76
4.1.2. Dependența rezistenței de sarcină funcție de viteza vântului, în regim dinamic.....	81
4.1.3. Dependența rezistenței de sarcină funcție de viteza vântului. Model simplificat .....	86
4.2. Fenomene tranzitorii în subsistemul (TV+GSMP+AE) la modificarea vitezei vântului .....	90
4.2.1. Fenomene tranzitorii la modificarea liniară a vitezei vântului .....	101
4.2.2. Fenomene tranzitorii la modificarea armonică a vitezei vântului....	103
4.2.3. Pierderile de energie datorită funcționării la turație constantă .....	107
4.3. Maximizarea energiei electrice în condițiile în care viteza vântului variază .....	109
4.3.1. Conducerea la $V$ și $V'$ cunoscute .....	109
4.3.2. Dependența rezistenței de viteză în regim static.....	110
4.3.3. Dependența rezistenței de viteză în regim dinamic-MAXIMUL ENERGIEI .....	113

4.4. Maximizarea energiei mecanice în condițiile în care viteza vântului variază .....	123
4.4.1. Regimurile de funcționare în gol și sarcină a GSMP la fluctuații ale vitezei vântului .....	124
4.4.2. Calculul turației de referință .....	144
4.4.3. Regimuri tranzitorii la viteze ale vântului variabile .....	148
4.5. Calculul optimal al rezistenței de sarcină .....	173
4.5.1. Studiu de caz: determinarea rezistenței de sarcină cunoscând viteza vântului.....	180
4.5.2. Ponderea înfășurărilor de amortizare .....	183
4.6. Concluzii .....	191
<b>5. FENOMENE TRANZITORII ÎN SUBSISTEMUL (BS+DC-DC+AE) .....</b>	<b>193</b>
5.1. Conducerea subsistemului (BS+DC-DC+AE) .....	193
5.2. Analiza fenomenelor tranzitorii în subsistemului (BS+DC-DC+AE) la modificarea insolației.....	200
5.3. Concluzii .....	201
<b>6. ANALIZA FENOMENELOR TRANZITORII ÎN SUBSISTEMUL MD+GSMP..</b>	<b>203</b>
6.1. Analiza subsistemului (MD+GSMP+AE) la funcționarea MD în punctul de putere maximă.....	203
6.1.1. Dinamica subsistemului (MD+GSMP) cu reglatoare de tip P.....	205
6.1.2. Dinamica subsistemului (MD+GSMP+AE) cu reglatoare de tip PI .....	209
6.1.3. Dinamica subsistemului (MD+GSMP+AE) cu reglatoare de tip PID.....	211
6.2. Conducerea subsistemului (MD+GS) în scopul obținerii tensiunii și frecvenței nominale .....	215
6.2.1. Dinamica subsistemului (MD+GS) cu reglatoare de tip P.....	217
6.2.2. Dinamica subsistemului (MD+GS) cu reglatoare de tip PI. Modelul matematic al GS cu înfășurări de amortizare .....	221
6.2.3. Dinamica subsistemului (MD+GS) cu reglatoare de tip PI. Modelul matematic al GS fără înfășurări de amortizare.....	228
6.2.4. Dinamica subsistemului (MD+GS) cu reglatoare de tip PID. Modelul matematic al GS cu înfășurări de amortizare .....	230
6.2.5. Dinamica subsistemului (MD+GS) cu reglatoare de tip PID. Modelul matematic al GS fără înfășurări de amortizare .....	234
6.3. Model matematic simplificat pentru tratarea problemelor dinamice ale subsistemului (MD+GS) .....	236
6.3.1. Dinamica subsistemului (MD+GS) cu reglatoare de tip P .....	237
6.3.2. Dinamica subsistemului (MD+GS) cu reglatoare de tip PI .....	239
6.3.3. Dinamica subsistemului (MD+GS) cu reglatoare de tip PID .....	241
6.4. Concluzii .....	245
<b>7. APLICAȚII NUMERICE ȘI VERIFICARI EXPERIMENTALE .....</b>	<b>247</b>
7.1. Aplicații numerice.....	247
7.1.1. Calculul rezistenței de sarcină.....	247
7.1.2. Calculul lui R și $\omega$ la diverse constante ale componentei integratoare la PI.....	255
7.1.3. Aplicații numerice pentru acordarea regloarelor.....	266
7.2. Turbina de vânt în zona Mării Negre .....	291
7.3. Viteza vântului în zona litoralului Mării Negre .....	295

---

7.4. Verificări experimentale ale dependentei puterii maxime de cubul vitezei vântului.....	298
7.5. Determinarea caracteristicilor mecanice ale TV .....	298
7.6. Determinarea experimentală a rezistenței de sarcină optime .....	300
7.7. Comportarea sistemului Diesel-Generator .....	301
7.8. Concluzii .....	302
<b>8. CONCLUZII FINALE SI CONTRIBUȚII PERSONALE. PERSPECTIVE DE DEZVOLTARE .....</b>	<b>305</b>
8.1 Concluzii finale si contributii personale .....	305
8.2 Perspective de dezvoltare .....	308
<b>Bibliografie.....</b>	<b>309</b>
Sinteza privind lucrarile proprii .....	315
<b>Anexe</b>	
Anexa 1. Programul Scientific WorkPlace .....	317
Anexa 2. Măsurători experimentale privind viteza vântului/ producția la o turbină eoliană de 5 KW.....	CD

## NOTAȚII, ABREVIERI, ACRONIME

TV – turbina de vânt  
TVN - turbină de vânt navală  
GE - generator electric  
AE - acumulator electric  
BS - baterie solară  
GS - generator sincron  
GScc - generator sincron cu excitație în curent continuu  
GSMP - generator sincron cu magneți permanenți  
GA - generator asincron  
GAI - generator asincron cu inele  
MD - motor Diesel  
AN - anemometru  
 $M_{MD}$  - cuplul motorului Diesel  
 $M_{GSMP}$  - cuplul generatorului sincron cu magneți permanenți  
 $M_{TVN}$  - cuplul turbinei de vânt navale  
q - debit de combustibil  
 $\omega^*$  - viteza unghiulară mecanică optimă la TVN  
 $\omega_{ref}^*$  - viteza unghiulară mecanică de referință la TVN  
 $M_{TVN}^*$  - cuplul optim la TVN  
 $M_{elmg}$  - cuplul electromagnetic  
 $\Psi_S$  - flux statoric  
 $\Psi_{MP}$  - flux magnetic permanent  
V - viteza vântului  
V' - derivata vitezei vântului  
 $L_d$  - reactanța sincronă din axa d  
 $L_q$  - reactanța sincronă din axa q  
 $P_{TVN}$  - puterea mecanică debitată de turbina de vânt navală  
 $P_{GSMP}$  - puterea electrică debitată de generatorul sincron cu magneți permanenți  
J - moment de inerție  
P - regulator proporțional  
PI - regulator proporțional integrator  
PID - regulator proporțional integrator derivativ  
A.A.E – agregate aeroelectrice  
SWP - Scientific WorkPlace  
ICEMENERG – Institutul de cercetari și modernizări energetice  
DIERET – Distance Internet Education on sustainable Renewable Energy Technology



## LISTA DE FIGURI

<b>Nr. crt.</b>	<b>Numărul figurii</b>	<b>Titlul figurii</b>
1.	Fig. 2.1.	Schemele suport pentru utilizarea sursele regenerabile de energie
2.	Fig. 2.2.	Utilizarea energiei vântului în navigația maritimă
3.	Fig. 2.3.	Instalațiilor eoliene utilizate la măcinarea boabelor, Olanda
4.	Fig. 2.4.	Configurații de bază ale agregate aero-electrice
5.	Fig. 2.5.	Conversia electromecanică a energiei eoliene utilizând generatoarele de inducție
6.	Fig. 2.6.	Structura sistemului hibrid
7.	Fig. 2.7.	Schema bloc a unui sistem hibrid eolian-fotovoltaic
8.	Fig. 2.8.	Sistem hibrid autonom cu panouri fotovoltaice
9.	Fig. 2.9.	“Casă solară” – independentă energetic - cu panouri fotovoltaice
10.	Fig. 2.10.	Casa cu sistem energetic hibrid solar-eolian
11.	Fig. 3.1.	Sistem electroenergetic triplu(Diesel-Vânt-Solar)
12.	Fig. 3.2.	Caracteristica mecanică a motorului Diesel
13.	Fig. 3.3.	Modificarea caracteristicii mecanice în funcție de debitul de combustibil
14.	Fig. 3.4.	Variația puterii cu viteza unghiulară
15.	Fig. 3.5.	Cuplul turbinei eoliene navale
16.	Fig. 3.6.	Cuplul turbinei eoliene navale în funcție de reglajul palelor
17.	Fig. 3.7.	Caracteristicile $M_{TVN}$ la 4 și 5 [m/s]
18.	Fig. 3.8.	Modelul ortogonal al GS
19.	Fig. 3.9.	Schema bloc a subsistemului (TVN+GScc)
20.	Fig. 3.10	Puncte de funcționare ale subsistemului (TVN+GScc)
21.	Fig. 3.11.	Schema bloc a subsistemului (TVN +GSMP+ $R_{sarcină}$ )
22.	Fig. 3.12.	Dependența cuplului de rezistența de sarcină
23.	Fig. 3.13.	Dependența cuplului de pulsația(turație)
24.	Fig. 3.14.	Dependența cuplului de pulsația pentru rezistență de sarcină mică
25.	Fig. 3.15.	Dependența cuplului de pulsația pentru rezistență de sarcină mare
26.	Fig. 3.16.	GSMP subexcitat
27.	Fig. 3.17.	GSMP supraexcitat
28.	Fig. 3.18.	Energia solară anuală
29.	Fig. 3.19.	Efectul fotoelectric
30.	Fig. 3.20.	Parcursul electronului fotoelectric

- 
31. Fig. 3.21. Caracteristicile  $U=f(I)$  la BS
  32. Fig. 3.22. Caracteristicile puterii
  33. Fig. 3.23. Bateria solară fixă
  34. Fig. 3.24. Convertor DC-DC cu capacități
  35. Fig. 3.25. Variația curentului  $i_2$  și a tensiunii  $U_d$
  36. Fig. 3.26. Circuitul echivalent la un AE acid
  37. Fig. 3.27. Schema electrică simplificată la un AE
  38. Fig. 3.28. Schema electrică la c.c.
  39. Fig. 4.1. Diagrama fazorială la  $\cos \varphi = 1$
  40. Fig. 4.2. Schema bloc a subsistemului (TVN+GSMP+AE)
  41. Fig. 4.3. Dependența în timp a energiei de viteza vântului
  42. Fig. 4.4. Variația în timp a rezistenței de sarcină
  43. Fig. 4.5. Sistem eolian cu sarcină rezistivă
  44. Fig. 4.6. Variația în timp a vitezei vântului
  45. Fig. 4.7. Variația în timp a lui  $\omega$
  46. Fig. 4.8. Variația în timp a lui  $\omega$  - detaliu
  47. Fig. 4.9. Variația în timp a curentului statoric
  48. Fig. 4.10. Variația în timp a curentului  $I_Q$
  49. Fig. 4.11. Variația în timp a curentului  $I_D$
  50. Fig. 4.12. Variația în timp a vitezei unghiulare
  51. Fig. 4.13. Variația în timp a cuplului electromagnetic
  52. Fig. 4.14. Modificarea punctului de funcționare
  53. Fig. 4.15. Variația curentului statoric în timp
  54. Fig. 4.16. Variația în timp a curentului  $I_Q$
  55. Fig. 4.17. Variația în timp a curentului  $I_D$
  56. Fig. 4.18. Variația în timp a vitezei unghiulare
  57. Fig. 4.19. Variația în timp a cuplului electromagnetic
  58. Fig. 4.20. Variația în timp a curentului statoric
  59. Fig. 4.21. Variația în timp a curentului  $I_Q$
  60. Fig. 4.22. Variația vitezei unghiulare rotorice în timp
  61. Fig. 4.23. Variația în timp a cuplului electromagnetic
  62. Fig. 4.24. Variația în timp a vitezei vântului
  63. Fig. 4.25. Evoluția în timp a vitezei unghiulare mecanice
  64. Fig. 4.26. Evoluția în timp a vitezei unghiulare mecanice
  65. Fig. 4.27. Evoluția în timp a vitezei unghiulare mecanice
  66. Fig. 4.28. Evoluția în timp a vitezei unghiulare mecanice
  67. Fig. 4.29. Schema bloc a subsistemului (TVN +GSMP+  $R_{sarcină}$  )
  68. Fig. 4.30. Dependența rezistenței de sarcină  $R_{sarcină}$  de viteza vântului

- 
- |      |             |   |
|------|-------------|---|
| 69.  | Fig. 4.31.  | Variația în timp a vitezei vântului   |
| 70.  | Fig. 4.32.  | Variația în timp a pulsației  |
| 71.  | Fig. 4.33.  | Variația în timp a vitezei vântului (detaliu)                                 |
| 72.  | Fig. 4.34.  | Variația în timp a pulsației  |
| 73.  | Fig. 4.35.  | Variația în timp a energiei   |
| 74.  | Fig. 4.36.  | Variația în timp a pulsației  |
| 75.  | Fig. 4.37.  | Variația în timp a energiei   |
| 76.  | Fig. 4.38.  | Variația în timp a pulsației  |
| 77.  | Fig. 4.39.  | Variația în timp a energiei   |
| 78.  | Fig. 4.40.  | Variația în timp a pulsației  |
| 79.  | Fig. 4.41.  | Variația în timp a energiei   |
| 80.  | Fig. 4.42.  | Variația în timp a pulsației  |
| 81.  | Fig. 4.43.  | Variația în timp a energiei   |
| 82.  | Fig. 4.44.  | Schema bloc a subsistemului TVN+GSMP cu R variabil                            |
| 83.  | Fig. 4.45.  | Variația în timp a pulsației  |
| 84.  | Fig. 4.46.  | Variația în timp a energiei   |
| 85.  | Fig. 4.47.a | Dependența rezistenței de viteza vântului                                     |
| 86.  | Fig. 4.47.b | Dependența rezistenței de viteza vântului                                     |
| 87.  | Fig. 4.48.  | Caracteristicile mecanice ale TVN   |
| 88.  | Fig. 4.49.  | Variația în timp a vitezei unghiulare $\omega^*$                              |
| 89.  | Fig. 4.50.  | Variația în timp a vitezelor unghiulare $\omega_{\text{optim}}$ și $\omega^*$ |
| 90.  | Fig. 4.51.  | Variația în timp a cuplului   |
| 91.  | Fig. 4.52.  | Variația în timp a pulsației  |
| 92.  | Fig. 4.53.  | Variația în timp a energiei   |
| 93.  | Fig. 4.54.  | Variația vitezei vântului   |
| 94.  | Fig. 4.55.  | Variația în timp a pulsației  |
| 95.  | Fig. 4.56.  | Variația în timp a energiei   |
| 96.  | Fig. 4.57.  | Schema bloc a sistemului eolian cu sarcină rezistivă                          |
| 97.  | Fig. 4.58.  | Variația în timp a lui $\omega$   |
| 98.  | Fig. 4.59.  | Scăderea vitezei în timp  |
| 99.  | Fig. 4.60.  | Variația în timp a lui $\omega$   |
| 100. | Fig. 4.61.  | Scăderea lui $\omega$   |
| 101. | Fig. 4.62.  | Variația în timp a cuplului $M_{GSMP}$  |
| 102. | Fig. 4.63.  | Zona de încărcare   |
| 103. | Fig. 4.64.  | Variația cuplului electromagnetic $M_{GSMP}$                                  |
| 104. | Fig. 4.65a. | Cuplul turbinei și al generatorului la încărcare intermitentă                 |
| 105. | Fig. 4.65b. | Cuplul turbinei și al generatorului la încărcare continuă                     |
| 106. | Fig. 4.66.  | Dependența lui $\omega_{ref}$ de amplitudinea vitezei                         |
| 107. | Fig. 4.67.  | Dependența lui $\omega_{ref}$ de viteza medie                                 |

---

108.	Fig. 4.68.	Conducerea optimală la $\omega_{ref}$
109.	Fig. 4.69.	Schema bloc a subsistemului eolian cu sarcină rezistivă
110.	Fig. 4.70.	Variația în timp a lui $\omega$
111.	Fig. 4.71.	Variația în timp a lui $\omega$
112.	Fig. 4.72.	Variația în timp a lui $\omega$
113.	Fig. 4.73.	Variația în timp a lui $\omega$ (detaliu)
114.	Fig. 4.74.	Variația în timp a lui $I_q$
115.	Fig. 4.75.	Variația în timp a lui $I_d$
116.	Fig. 4.76.	Variația în timp pulsației a $\omega$
117.	Fig. 4.77.	Variația în timp a rezistenței R
118.	Fig. 4.78.	Variația în timp a pulsației $\omega$
119.	Fig. 4.79.a	Variația cuplului cu rezistența
120.	Fig. 4.79.b	Variația în timp a rezistenței R
121.	Fig. 4.80.	Variația în timp a pulsației $\omega$
122.	Fig. 4.81.	Variația în timp a rezistenței R
123.	Fig. 4.82.	Variația în timp a rezistenței R
124.	Fig. 4.83.	Variația în timp a pulsației $\omega$
125.	Fig. 4.84.	Variația în timp a rezistenței R
126.	Fig. 4.85.	Variația în timp a pulsației $\omega$
127.	Fig. 4.86.	Variația în timp a rezistenței R
128.	Fig. 4.87.	Variația în timp a pulsației $\omega$
129.	Fig. 4.88.	Variația în timp a rezistenței R
130.	Fig. 4.89.	Variația în timp a pulsației $\omega$
131.	Fig. 4.90.	Variația în timp a rezistenței R
132.	Fig. 4.91.	Variația în timp a lui $\omega$
133.	Fig. 4.92.	Variația în timp a lui R
134.	Fig. 4.93.	Variația în timp a lui R- detaliu
135.	Fig. 4.94.	Variația în timp a lui $\omega$
136.	Fig. 4.95.	Variația în timp a lui $\omega$ - detaliu
137.	Fig. 4.96.	Variația în timp a lui R
138.	Fig. 4.97.	Variația în timp a lui R- detaliu
139.	Fig. 4.98.	Variația în timp a lui $\omega$
140.	Fig. 4.99.	Variația în timp a lui $\omega$ - detaliu
141.	Fig. 4.100.	Variația în timp a lui R- detaliu
142.	Fig. 4.101.	Variația în timp a lui R
143.	Fig. 4.102.	Variația în timp a lui R- detaliu
144.	Fig. 4.103.	Variația în timp a lui $\omega$
145.	Fig. 4.104.	Variația în timp a lui $\omega$ (detaliu)
146.	Fig. 4.105.	Variația în timp a lui R

147.	Fig. 4.106.	Variația în timp a lui R – (detaliu)
148.	Fig. 4.107.	Variația în timp a lui $\omega$
149.	Fig. 4.108.	Variația în timp a lui $\omega$ - (detaliu)
150.	Fig. 4.109.	Variația în timp a lui R
151.	Fig. 4.110.	Variația în timp a lui R – (detaliu)
152.	Fig. 4.111.	Variația în timp a lui $\omega$
153.	Fig. 4.112.	Variația în timp a lui $\omega$ - (detaliu)
154.	Fig. 4.113.	Variația în timp a lui R
155.	Fig. 4.114.	Variația în timp a lui R- (detaliu)
156.	Fig. 4.115.	Variația în timp a vitezei vântului
157.	Fig. 4.116.	Variația în timp a lui $\omega$
158.	Fig. 4.117.	Variația în timp termenului $0.08 \frac{da}{dt}$
159.	Fig. 4.118.	Variația în timp a termenului $-0.08 \frac{da}{dt}$
160.	Fig. 4.119.	Variația în timp a lui $a$
161.	Fig. 4.120.	Variația în timp a lui $\omega$
162.	Fig. 4.121.	Variația în timp a lui $a$
163.	Fig. 4.122.	Variația în timp a lui $\omega$
164.	Fig. 4.123.	Variația în timp a lui $\omega 0.08b$
165.	Fig. 4.124.	Variația în timp a lui $a$
166.	Fig. 4.125.	Variația în timp a lui $0.08 \frac{da}{dt}$
167.	Fig. 4.126.	Variația în timp a lui $0.08 \frac{db}{dt}$
168.	Fig. 4.127.	Variația în timp a lui $\omega$
169.	Fig. 4.128.	Dependența cuplului de R
170.	Fig. 4.129.	Variația în timp a lui $I_d$
171.	Fig. 4.130.	Variația în timp a lui $I_Q$
172.	Fig. 4.131.	Variația în timp a lui $\omega$
173.	Fig. 4.132.	Variația în timp a curentului statoric
174.	Fig. 4.133.	Variația în timp a lui $\sqrt{I_d^2 + I_Q^2}$
175.	Fig. 4.134.	Variația în timp a cuplului $M_{GSMP}$
176.	Fig. 4.135.	Variația tensiunii U în timp
177.	Fig. 4.136.	Variația în timp a lui $\omega$
178.	Fig. 4.137.	Variația în timp a curentului
179.	Fig. 4.138.	Variația în timp a cuplului $M_{GSMP}$
180.	Fig. 4.139.	Variația în timp a tensiunii
181.	Fig. 4.140.	Variația în timp a lui $I_d$
182.	Fig. 4.141.	Variația în timp a lui $I_Q$

---

183.	Fig. 4.142.	Variația în timp a lui $\omega$
184.	Fig. 4.143.	Variația în timp a curentului
185.	Fig. 4.144.	Variația în timp a cuplului $M_{GSMP}$
186.	Fig. 4.145.	Variația în timp a tensiunii
187.	Fig. 4.146.	Variația în timp a lui $\omega$
188.	Fig. 4.147.	Variația în timp a lui $\sqrt{I_d^2 + I_q^2}$
189.	Fig. 4.148.	Variația în timp a cuplului $M_{GSMP}$
190.	Fig. 4.149.	Variația în timp a lui $\omega$
191.	Fig. 5.1.	Caracteristici $U=f(I)$ la BS
192.	Fig. 5.2.	Caracteristicile bateriei
193.	Fig. 5.3.	Variația curentului în timp
194.	Fig. 5.4.	Schema electrică a subsistemului (BS+DC-DC+AE)
195.	Fig. 5.5.	Schema electrică pentru componenta continuă
196.	Fig. 5.6.	Schema electrică pentru încărcarea AE
197.	Fig. 5.7.	Caracteristicile externe la BS
198.	Fig. 5.8.	Variația în timp a curentului $I_{AE}$
199.	Fig. 5.9.	Variația în timp a curentului $I_{AE}$ -detaliu
200.	Fig. 6.1.	Dependența cuplului de rezistența de sarcină
201.	Fig. 6.2.	Schema bloc a subsistemului MD+GSMP
202.	Fig. 6.3.	Variația în timp a lui $\omega$
203.	Fig. 6.4.	Variația în timp tensiunii statorice
204.	Fig. 6.5.	Variația în timp a cuplului GSMP
205.	Fig. 6.6.	Variația în timp a cuplului MD
206.	Fig. 6.7.	Variația în timp a curentului
207.	Fig. 6.8.	Variația în timp a lui $\omega$
208.	Fig. 6.9.	Variația în timp lui $U$
209.	Fig. 6.10.	Variația în timp cuplului GSMP
210.	Fig. 6.11.	Variația în timp a cuplului MD
211.	Fig. 6.12.	Variația în timp lui $\omega$ detaliu
212.	Fig. 6.13.	Variația în timp curentului
213.	Fig. 6.14.	Variația în timp a cuplului GSMP
214.	Fig. 6.15.	Variația în timp a tensiunii
215.	Fig. 6.16.	Variația în timp a lui $R$
216.	Fig. 6.17.	Variația în timp a lui $\omega$
217.	Fig. 6.18.	Variația în timp a cuplului GSMP
218.	Fig. 6.19.	Variația în timp a tensiunii
219.	Fig. 6.20.	Variația în timp a lui $R$
220.	Fig. 6.21.	Variația în timp a lui $\omega$
221.	Fig. 6.22.	Variația în timp a lui $\omega$

222.	Fig. 6.23.	Variația în timp a lui R
223.	Fig. 6.24.	Variația în timp a lui $\omega$
224.	Fig. 6.25.	Variația în timp a lui R
225.	Fig. 6.26.	Schema bloc de conducerea a subsistemului (MD+GS)
226.	Fig. 6.27.	Dependența puterii reactive de tensiune
227.	Fig. 6.28.	Variația în timp a lui $\omega$
228.	Fig. 6.29.	Variația în timp a lui $I_Q$
229.	Fig. 6.30.	Variația în timp a lui $I_d$
230.	Fig. 6.31.	Variația în timp a lui $I_E$
231.	Fig. 6.32.	Variația în timp a lui $\sqrt{I_d^2 + I_q^2}$
232.	Fig. 6.33.	Variația în timp a cuplului GSMP
233.	Fig. 6.34.	Variația lui în timp a lui q
234.	Fig. 6.35.	Variația lui în timp a lui $\omega$
235.	Fig. 6.36.	Variația în timp a lui $I_Q$
236.	Fig. 6.37.	Variația în timp a lui $I_d$
237.	Fig. 6.38.	Variația în timp a lui $I_E$
238.	Fig. 6.39.	Variația în timp a lui $\sqrt{I_d^2 + I_q^2}$
239.	Fig. 6.40.	Variația în timp a cuplului GSMP
240.	Fig. 6.41.	Variația lui în timp a lui $\omega$ , la regulatorul de tip P
241.	Fig. 6.42.	Variația lui în timp a lui $\omega$ , la regulatorul de tip PI
242.	Fig. 6.43.	Variația în timp a tensiunii
243.	Fig. 6.44.	Variația lui în timp a lui $\omega$
244.	Fig. 6.45.	Variația în timp a lui $\omega$
245.	Fig. 6.46.	Variația în timp a lui $I_E$
246.	Fig. 6.47.	Variația în timp a lui q
247.	Fig. 6.48.	Variația în timp a cuplului GSMP
248.	Fig. 6.49.	Variația în timp a tensiunii
249.	Fig. 6.50.	Variația în timp a lui $\sqrt{I_d^2 + I_q^2}$
250.	Fig. 6.51.	Variația în timp a lui $\omega$
251.	Fig. 6.52.	Variația în timp a tensiunii
252.	Fig. 6.53.	Variația în timp a lui q
253.	Fig. 6.54.	Variația în timp a lui $\omega$
254.	Fig. 6.55.	Variația în timp a lui $\omega$ (detaliu)
255.	Fig. 6.56.	Variația în timp a lui $I_Q$
256.	Fig. 6.57.	Variația în timp a lui $I_d$

- 
257. Fig. 6.58. Variația în timp a lui  $I_E$
258. Fig. 6.59. Variația în timp a lui  $\sqrt{I_d^2 + I_q^2}$
259. Fig. 6.60. Variația în timp a cuplului GSMP
260. Fig. 6.61. Variația în timp a lui  $\omega$
261. Fig. 6.62. Variația în timp a lui  $\omega$
262. Fig. 6.63. Variația în timp a lui  $I_E$
263. Fig. 6.64. Variația în timp a lui  $\omega$
264. Fig. 6.65. Variația în timp a lui  $I_E$
265. Fig. 6.66. Variația în timp a lui  $\omega$
266. Fig. 6.67. Variația în timp a lui  $\omega$
267. Fig. 7.1. Dependența în timp a energiei de viteza vântului
268. Fig. 7.2. Dependența în timp a energiei de viteza vântului
269. Fig. 7.3. Dependența în timp a energiei de viteza vântului
270. Fig. 7.4. Dependența în timp a energiei de viteza vântului
271. Fig. 7.5. Schema bloc a subsistemului TVN+GSMP cu R variabil
272. Fig. 7.6. Variația în timp a pulsației
273. Fig. 7.7. Variația în timp a energiei
274. Fig. 7.8. Variația în timp a pulsației
275. Fig. 7.9. Variația în timp a energiei
276. Fig. 7.10. Variația în timp a pulsației
277. Fig. 7.11. Variația în timp a energiei
278. Fig. 7.12. Variația în timp a pulsației
279. Fig. 7.13. Variația în timp a energiei
280. Fig. 7.14. Variația în timp a pulsației
281. Fig. 7.15. Variația în timp a energiei
282. Fig. 7.16. Variația în timp a rezistenței R
283. Fig. 7.17. Variația în timp a lui  $\omega$
284. Fig. 7.18. Variația în timp a rezistenței R
285. Fig. 7.19. Variația în timp a pulsației  $\omega$
286. Fig. 7.20. Variația în timp a rezistenței R
287. Fig. 7.21. Variația în timp a pulsației  $\omega$
288. Fig. 7.22. Variația în timp a rezistenței R
289. Fig. 7.23. Variația în timp a pulsației  $\omega$
290. Fig. 7.24. Variația în timp a rezistenței R
291. Fig. 7.25. Variația în timp a pulsației  $\omega$
292. Fig. 7.26. Variația în timp a rezistenței R
293. Fig. 7.27. Variația în timp a pulsației  $\omega$
294. Fig. 7.28. Variația în timp a rezistenței R
295. Fig. 7.29. Variația în timp a pulsației  $\omega$



296.	Fig. 7.30.	Variația în timp a rezistenței R
297.	Fig. 7.31.	Variația în timp a pulsației $\omega$
298.	Fig. 7.32.	Variația în timp a rezistenței R
299.	Fig. 7.33.	Variația în timp a pulsației $\omega$
300.	Fig. 7.34.	Variația în timp a rezistenței R
301.	Fig. 7.35.	Variația în timp a R- detaliu
302.	Fig. 7.36.	Variația în timp a pulsației $\omega$
303.	Fig. 7.37.	Variația în timp a pulsației $\omega$ - detaliu -
304.	Fig. 7.38.	Variația în timp a lui $I_q$
305.	Fig. 7.39.	Variația în timp a lui $I_q$ - detaliu
306.	Fig. 7.40.	Variația în timp a lui $I_d$
307.	Fig. 7.41.	Variația în timp a lui $I_d$ - detaliu
308.	Fig. 7.42.	Variația în timp a lui $M_{TVN1}$
309.	Fig. 7.43.	Variația în timp lui $M_{TVN2}$
310.	Fig. 7.44.	Variația lui $M_{TVN}$
311.	Fig. 7.45.	Variația în timp a lui R
312.	Fig. 7.46.	Variația în timp a lui $\omega$
313.	Fig. 7.47.	Variația în timp a lui R
314.	Fig. 7.48.	Variația în timp a lui $\omega$
315.	Fig. 7.49.	Variația în timp a lui R
316.	Fig. 7.50.	Variația în timp a lui $\omega$
317.	Fig. 7.51.	Variația în timp a lui R
318.	Fig. 7.52.	Variația în timp a lui $\omega$
319.	Fig. 7.53.	Variația în timp a lui R
320.	Fig. 7.54.	Variația în timp a lui $\omega$
321.	Fig. 7.55.	Variația în timp a lui R
322.	Fig. 7.56.	Variația în timp a lui $\omega$
323.	Fig. 7.57.	Variația în timp a lui $\omega$
324.	Fig. 7.58.	Variația în timp a lui U
325.	Fig. 7.59.	Variația în timp a cuplului GSMP
326.	Fig. 7.60.	Variația în timp a cuplului MD
327.	Fig. 7.61.	Variația în timp a lui $\omega$
328.	Fig. 7.62.	Variația în timp a curentului
329.	Fig. 7.63.	Variația în timp a lui $\omega$
330.	Fig. 7.64.	Variația în timp a cuplului GSMP
331.	Fig. 7.65.	Variația în timp a lui U
332.	Fig. 7.66.	Variația în timp a rezistenței
333.	Fig. 7.67.	Variația în timp a lui $\omega$

- 
334. Fig. 7.68. Variația în timp a lui  $\omega$
335. Fig. 7.69. Variația în timp a lui  $\omega$
336. Fig. 7.70. Variația în timp a lui  $\omega$
337. Fig. 7.71. Variația în timp a lui  $\omega$
338. Fig. 7.72. Variația în timp a lui  $\omega$
339. Fig. 7.73. Variația în timp a lui  $\omega$
340. Fig. 7.74. Variația în timp a lui  $\omega$
341. Fig. 7.75. Variația în timp a lui  $\omega$
342. Fig. 7.76. Variația în timp a lui  $q$
343. Fig. 7.77. Variația în timp a lui  $\omega$
344. Fig. 7.78. Variația în timp a lui  $I_Q$
345. Fig. 7.79. Variația în timp a lui  $I_d$
346. Fig. 7.80. Variația în timp a lui  $I_E$
347. Fig. 7.81. Variația în timp a lui  $\sqrt{I_d^2 + I_q^2}$
348. Fig. 7.82. Variația în timp a cuplului GSMP
349. Fig. 7.83. Variația în timp a lui  $q$
350. Fig. 7.84. Variația în timp a lui  $\omega$       Variația în timp a lui  $q$
351. Fig. 7.85. Variația în timp a lui  $I_Q$
352. Fig. 7.86. Variația în timp a lui  $I_d$
353. Fig. 7.87. Variația în timp a lui  $I_E$
354. Fig. 7.88. Variația în timp a lui  $\sqrt{I_d^2 + I_q^2}$
355. Fig. 7.89. Variația în timp a cuplului GSMP
356. Fig. 7.90. Variația în timp a lui  $q$
357. Fig. 7.91. Variația în timp a lui  $\omega$
358. Fig. 7.92. Variația în timp a lui  $I_Q$
359. Fig. 7.93. Variația în timp a lui  $I_d$
360. Fig. 7.94. Variația în timp a lui  $I_E$
361. Fig. 7.95. Variația în timp a lui  $\sqrt{I_d^2 + I_q^2}$
362. Fig. 7.96. Variația în timp a cuplului GSMP
363. Fig. 7.97. Variația în timp a lui  $q$
364. Fig. 7.98. Variația în timp a lui  $\omega$
365. Fig. 7.99. Variația în timp a lui  $I_Q$
366. Fig. 7.100. Variația în timp a lui  $I_d$
367. Fig. 7.101. Variația în timp a lui  $I_E$

368. Fig. 7.102. Variația în timp a lui  $\sqrt{I_d^2 + I_q^2}$
369. Fig. 7.103. Variația în timp a cuplului GSMP
370. Fig. 7.104. Variația în timp a lui  $I_E$
371. Fig. 7.105. Variația în timp a lui  $\omega$
372. Fig. 7.106. Variația în timp a lui  $I_E$
373. Fig. 7.107. Variația în timp a lui  $\omega$
374. Fig. 7.108. Variația în timp a lui  $I_E$
375. Fig. 7.109. Variația în timp a lui  $\omega$
376. Fig. 7.110. Variația în timp a lui  $I_E$
377. Fig. 7.111. Variația în timp a lui  $\omega$
378. Fig. 7.112. Variația în timp a lui  $I_E$
379. Fig. 7.113. Variația în timp a lui  $\omega$
380. Fig. 7.114. Variația în timp a lui  $I_E$
381. Fig. 7.115. Variația în timp a lui  $\omega$
382. Fig. 7.116. Variația în timp a lui  $I_E$
383. Fig. 7.117. Variația în timp a lui  $I_E$  (detaliu)
384. Fig. 7.118. Variația în timp a lui  $\omega$
385. Fig. 7.119. Variația în timp a lui  $\omega$  (detaliu)
386. Fig. 7.120. Variația în timp a lui  $I_E$
387. Fig. 7.121. Variația în timp a lui  $I_E$  (detaliu)
388. Fig. 7.122. Variația în timp a lui  $\omega$
389. Fig. 7.123. Variația în timp a lui  $\omega$  (detaliu)
390. Fig. 7.124. Variația în timp a lui  $I_E$
391. Fig. 7.125. Variația în timp a lui  $I_E$  (detaliu)
392. Fig. 7.126. Variația în timp a lui  $\omega$
393. Fig. 7.127. Variația în timp a lui  $\omega$  (detaliu)
394. Fig. 7.128. Variația în timp a lui  $\omega$
395. Fig. 7.129. Variația în timp a lui  $\omega$  (detaliu)
396. Fig. 7.130. Variația în timp a lui  $\omega$
397. Fig. 7.131. Variația în timp a lui  $\omega$  (detaliu)
398. Fig. 7.132. Variația în timp a lui  $\omega$
399. Fig. 7.133. Variația în timp a lui  $\omega$  (detaliu)
400. Fig. 7.134. Variația în timp a lui  $\omega$
401. Fig. 7.135. Variația în timp a lui  $\omega$  (detaliu)
402. Fig. 7.136. Variația în timp a lui  $\omega$
403. Fig. 7.137. Variația în timp a lui  $\omega$  (detaliu)
404. Fig. 7.138. Variația în timp a lui  $\omega$

- 405. Fig. 7.139. Variația în timp a lui  $\omega$  (detaliu)
- 406. Fig. 7.140. Variația în timp a lui  $\omega$
- 407. Fig. 7.141. Variația în timp a lui  $\omega$  (detaliu)
- 408. Fig. 7.142. Variația în timp a lui  $\omega$
- 409. Fig. 7.143. Variația în timp a lui  $\omega$  (detaliu)
- 410. Fig. 7.144. Variația în timp a lui  $\omega$
- 411. Fig. 7.145. Variația în timp a lui  $\omega$  (detaliu)
- 412. Fig. 7.146. Variația în timp a lui  $\omega$
- 413. Fig.7.147.a Eoliene mici pentru încărcat baterii
- 414. Fig.7.147.b Eoliene mici pentru încărcat baterii
- 415. Fig.7.148. Componente principale ale turbinei de vânt
- 416. Fig.7.149. Controler PowerCenter pentru BWC XL.1
- 417. Fig.7.150. Forțele care acționează asupra palelor
- 418. Fig.7.151. Schema bloc a XL.1
- 419. Fig.7.152. Montarea turbinelor(bine/greșit)
- 420. Fig.7.153. Viteza vântului in luna august 2010
- 421. Fig.7.154. Viteza vântului in luna septembrie 2010
- 422. Fig.7.155. Viteza vântului in luna octombrie 2010
- 423. Fig.7.156. Caracteristicile mecanice ale TV
- 424. Fig.7.157. Sistemul eolian cu sarcină rezistivă
- 425. Fig.7.158. Dependența rezistenței de sarcină
- 426. Fig.7.159. Grup Diesel-Generator
- 427. Fig.7.160. Variația in timp a lui  $\omega$
- 428. Fig.7.161. Variația in timp a tensiunii

## LISTA DE TABELE

<b>Nr. crt.</b>	<b>Numărul tabelului</b>	<b>Titlul tabelului</b>
1.	Tabelul 2.1.	Rezervele globale de resurse energetice
2.	Tabelul 2.2.	Distribuția potențialului energetic solar din România
3.	Tabelul 2.3.	Elemente tehnico-economice de exploatare a potențialului energetic al zonelor eoliene din România
4.	Tabelul 3.1.	Valorile randamentului la viteze diferite ale vântului

# 1. INTRODUCERE

În contextul actual al crizei energetice mondiale problematica analizării unor echipamente electrice navale cu surse regenerabile de energie este oportună, necesară și cu un deosebit impact economic.

În acest sens se pune și problema economisirii energiei pe navele maritime și fluviale. Sursele de energii regenerabile care intră în discuție pe nave sunt în principal de două tipuri: energie eoliană și energie solară, deoarece acestea au valori semnificative și se completează reciproc. În acest fel, propulsia navelor nu mai depinde exclusiv de prețul petrolului și deci pot deveni deosebit de rentabile pe termen mediu și lung. Aceasta este o opțiune importantă în viitorul apropiat, mai ales că evoluția tehnologică în domeniul bateriilor de acumulare electrice ce stochează aceste energii este relevantă (se menționează astfel noile acumulate LI-ION care sunt de aproximativ 10 ori mai performante decât cele cu plumb).

România este o țară care depinde din ce în ce mai mult de importul de petrol și deci oferirea unor variante alternative în propulsia navelor, variante bazate pe surse de energie regenerabile SOARE-VÂNT, va diminua efortul financiar al beneficiarilor de nave. În acest fel se poate asigura o piață mai extinsă de nave cu un pronunțat caracter ecologic atât în domeniul navelor maritime și fluviale cât și în cadrul navelor militare aparținând Forțelor Navale Române.

Realizarea acestor obiective implică eforturi deosebite, mai ales de ordin științific, completate evident cu susținere financiară, astfel încât încă din faza de proiectare a navelor să se estimeze contribuția surselor regenerabile de energie în propulsia și alimentarea consumatorilor electrici de pe navă.

Condițiile din Ministerul Apărării Naționale sunt favorabile, dorindu-se în acest sens facilitarea dotării navelor cu sisteme de obținere a energiei electrice din surse regenerabile: SOARE și VÂNT.

Desigur, apar o serie de probleme ridicate de fluctuația energiei, în sensul că: energia solară poate varia de la valoarea maximă  $1KW / m^2$  (cer senin), până la valori foarte mici iar energia eoliană depinde semnificativ de viteza vântului la puterea a III-a.

Ca avantaj, s-a demonstrat faptul că pe litoralul Mării Negre nu apar variații mari ale vitezei vântului, aceasta făcând posibilă o dimensionare și o conducere optimă a sistemelor eoliene.

Având în vedere fluctuația energiei eoliene și solare, se impune a fi analizate regimurile tranzitorii pentru a determina componența sistemelor electroenergetice navale, în condiții diverse, din punct de vedere meteorologic.

În lucrarea de față se abordează o temă de mare actualitate în domeniul navelor maritime și fluviale: analiza regimurilor tranzitorii în echipamentele electrice navale. Proiectarea, construcția și exploatarea echipamentelor electrice navale trebuie să țină seama de fenomenele tranzitorii, deoarece în aceste regimuri solicitările electrice ale echipamentelor sunt maxime.

În prezent, în plan internațional există o orientare importantă pentru dezvoltarea echipamentelor necesare realizării unor sisteme de propulsie și guvernare cât mai eficiente pentru navele maritime. Pe plan mondial, referințele documentare arată interesul deosebit pentru realizarea unor nave ecologice, cu

calități nautice și de manevrabilitate ridicate.

Sunt numeroase directive emise de Uniunea Europeană care privesc domeniul de studiu abordat și anume, impunerea unor termene privind obținerea energiei din resurse regenerabile și a unor norme ecologice, dar mai ales se are în vedere epuizarea resurselor petroliere, cel mai probabil în următorii 50-60 de ani.

Oportunitatea acestor cercetări este dată de utilizarea pe o scară din ce în ce mai largă a resurselor energetice regenerabile, în special a celor solare și eoliene, în vederea economisirii de combustibili fosili în producerea de energie electrică.

Folosirea energiei solare și eoliene a fost posibilă datorită scăderii prețurilor la echipamentele solare și eoliene, coroborată cu politici eficiente de promovare a acestor energii neconvenționale de către firmele ce produc și exploatează navele.

În cadrul tezei sunt studiate problematici importante ale echipamentelor electrice navale, cum ar fi:

- modelarea matematică a turbinei de vânt navale, generatorului sincron și motorului Diesel;
- modelarea matematică sistemului eolian: turbină de vânt navală + generator sincron cu magneți permanenți (**TVN+GSMP**);
- modelarea matematică a sistemului electroenergetic solar: baterii solare + acumulatori electrice (**BS+AE**);
- modelarea sistemului Diesel+generator sincron (**MD+GSMP**);
- analiza regiunilor tranzitorii la sistemele anterior menționate, folosind diverse tipuri de regulatoare.

Principalele obiective tratate în lucrare sunt:

- 1) Analiza soluțiilor existente de conversie a energiei solare și eoliene în energie electrică, precum și integrarea acestora în sistemul electroenergetic naval clasic cu Motoare Diesel și generatoare sincrone;
- 2) Analiza regimurilor tranzitorii în sistemele electroenergetice eoliene și Diesel pe baza modelelor matematice originale ale **TVN**, **GSMP** și **MD**, la modificări curente ale sarcinii și ale vitezei vântului ;
- 3) Analiza, prin simulări numerice și acordarea reguletoarelor de tip **P**(proporțional), **PI**(proporțional integrator) și **PID**(proporțional integrator derivativ).

**Obiectivul principal** al tezei de doctorat îl reprezintă investigarea regimurilor de funcționare ale sistemelor electroenergetice eoliene, solare și Diesel generatoarelor sincrone. **Scopul final** este acela de a facilita dotarea navelor cu sisteme complementare de obținere a energiei electrice din surse regenerabile: vânt și soare.

Teza de doctorat, extinsă pe 317 de pagini, este structurată pe 8 capitole conținând un număr de 428 figuri, scheme și 4 tabele, o prefață, 2 anexe și o listă bibliografică,. Lista bibliografică cuprinde 105 de titluri, semnalându-se prezența unor lucrări reprezentative, atât cele considerate deja clasice, cât și cele de dată relativ mai recentă, apărute în țară sau în reviste de prestigiu din străinătate.

Conținutul lucrării este dezvoltat pe parcursul a 8 capitole.

Capitolul 1 are un caracter introductiv. El motivează preocupările existente pe plan național și internațional în domeniul folosirii energiilor regenerabile pentru propulsia navelor.

La finele capitolului se prezintă modul de valorificare a cercetărilor din prezenta teză de doctorat(publicații, contracte de cercetare științifică, proiectare, realizarea și încercarea de nave pilot cu propulsie electrică din surse regenerabile SOARE și VÂNT). Diseminarea rezultatelor și perspectivele de orientare ulterioară sunt foarte importante pentru valorificarea tezei de doctorat pe care o consider utilă

și practică încă din faza de proiectare și construcție a acestor nave prototip.

Capitolului 2 constă în prezentarea surselor regenerabile de energie, insistându-se în principal asupra energiei eoliene și solare. Aceste două tipuri de surse se analizează în contextul României în special și al UE în general.

Turbinele de vânt existente actual, în principal cele cu ax orizontal, se cuplează de regulă cu sisteme fotovoltaice. Energia fotovoltaică cunoaște un ritm de dezvoltare accentuat. Sunt prezentate la finele capitolului structuri posibile ale unor sisteme hibride eolian-fotovoltaic

Capitolul 3 prezintă actualitatea cercetării precum și modelele matematice originale ale turbinei de vânt navele (**TVN**), generatorului sincron (**GS**) și motorului Diesel(**MD**). La **TVN** modelul matematic ia în considerare modificarea caracteristicilor mecanice cu viteza vântului, la generatorul sincron (**GS**) se tratează modelul matematic la **GSMP**, iar la bateria solară (**BS**) modelul matematic ține seama de modificarea insolației.

Capitolul 4 prezintă metodele de calcul a rezistențelor de sarcină de la **GSMP** astfel încât energia captată de la vânt să fie maximă.

Se analizează mai multe forme de modificare a rezistenței de sarcină în funcție de evoluția în timp a vitezei vântului. În cea de-a doua parte a capitolului este analizată dependența rezistenței de sarcină de viteza vântului la o variație armonică în timp a vitezei vântului.

Se analizează posibilitatea funcționării în punctele de putere maximă a **TVN**, cunoscându-se variația în timp a vitezei vântului.

Procesele tranzitorii sunt analizate la viteze ale vântului variabile în timp liniar, exponențial sau armonic.

În finalul capitolului se prezintă regimurile tranzitorii simulate pentru acordarea sistemului cu regulatoare de tip **P**, **PI** și **PID**.

Capitolul 5 stabilește bazele funcționării subsistemului solar în punctele de putere maximă, în funcție de gradul de insolație, ce se modifică în timp. Având în vedere modelarea acumulatorilor electrice (**AE**), ce stochează energia obținută de la Soare, se calculează armonicile curentului debitat în **AE**, remarcându-se valoarea lor redusă.

Capitolul 6 abordează subsistemul **MD+GSMP**, care completează energia necesară consumatorilor de pe navă, astfel încât tensiunea și frecvența să fie mereu în limitele valorilor nominale.

Problemele esențiale tratate în acest capitol constă în acordarea reguletoarelor, deoarece sistemul analizat fiind neliniar nu se pot aplica criteriile cunoscute. Se analizează în acest capitol reguletoarele de tip **P**, **PI**, **PID**. Oscilațiile cunoscute care apar la reguletoarele folosite pot să scoată subsistemul din starea de funcționare.

Se descriu regimurile tranzitorii, la funcționări stabile sau instabile ale sistemului și influența constantelor reguletoarelor asupra stabilității sistemului.

Capitolul 7 este consacrat analizării rezultatelor experimentale pe o turbină de vânt aparținând firmei MONSSON ALMA, testată în zona litoralului Mării Negre și pe un grup Diesel – generator aparținând unei nave militare .

În prima parte a capitolului se prezintă o turbină eoliană având puterea  $P=5KW$ , montată în zona litoralului românesc al Mării Negre. A doua parte cuprinde înregistrările vitezei vântului pe o perioadă de timp de 3 luni de zile. Puterea activă debitată de sistemul (**TV+GSMP**) a fost măsurată experimental și s-a prezentat evoluția ei în timp. S-au determinat caracteristicile mecanice ale **TV** pentru diverse viteze ale vântului și s-au verificat cu cele din modelul matematic al **TVN**.



În partea a doua a capitolului s-au efectuat verificări experimentale a dependenței puterii maxime de cubul vitezei vântului. La finalul capitolului se prezintă comportarea sistemului Diesel - Generator prin înregistrarea în timp a turației și tensiunii la generatorul electric reglat cu un regulator de tip P.

În final sunt prezentate concluziile desprinse din analiza rezultatelor experimentale.

Ultimul capitol cuprinde concluziile generale și prezentarea sistematizată a contribuțiilor originale ale autorului, precum și reliefaarea direcțiilor și perspectivelor oferite de lucrarea de față pentru continuarea cercetărilor și aplicarea rezultatelor și a experienței obținute. De asemenea, sunt evidențiate concluziile rezultate în urma dezvoltării în lucrare a aplicațiilor software prin simulările numerice date cu sistemele eoliene și solare variabile, aleator în timp, precum și cu sisteme Diesel.

Rezultatele activității de cercetare pot fi valorificate prin realizarea unei tehnologii noi, eficientă și rentabilă, de dezvoltare a unui sistem de propulsie-guvernare pentru nave ecologice, adaptabil la cerințele pieții și cu un preț de cost redus.

De asemenea, rezultatele activității de cercetare pot sta la baza realizării unui model funcțional al unei navei ecologice speciale de dimensiuni mici (eliminând subsistemul Diesel), navă ce poate fi propulsată cu un sistem de acționare electrică cu motor sincron cu magneti permanenți, comandat în frecvență la cuplu maxim prin intermediul unui inverter, fără mecanisme de transmisie, alimentat de la surse hibride regenerabile bazate pe utilizarea celulelor fotovoltaice și a centralelor eoliene.

Rezultatele activității de cercetare prin gradul deosebit de tehnicitate și complexitate pot conduce la crearea unei rețele de cercetare/dezvoltare în domeniul proiectării și construcției navelor ecologice cu destinație specială cu propulsie electrică cu surse de energie hibride, regenerabile, pentru cercetare/observare hidrografică/monitorizare, și realizarea unui model funcțional.

Dezvoltarea activităților de observare, cercetare hidrografică, monitorizare a parametrilor mediului marin, explorarea biosferei din Delta Dunării precum și realizarea de mijloace de propulsie navală ecologice, bazate pe utilizarea energiilor neconvenționale (solară, eoliană) imprimă perspectivelor de dezvoltare caracterul de noutate, necesitate și conformitate deplină cu cerințele actuale ale Uniunii Europene.

O parte a rezultatelor obținute în cadrul tezei au fost publicate, iar restul sunt în curs de publicare, în reviste de prestigiu și în volumele unor manifestări științifice recunoscute din străinătate sau din țară [Deliu2008a], [Deliu2008b], [Deliu2009a], [Deliu2009b], [Deliu2009c], [Deliu2009d], [Deliu2009e], [Deliu2009f], [Deliu2009g], [Dobref2009], [Deliu2010a], [Deliu2010b], [Deliu2010c], [Gheorghiu2010a], [Gheorghiu2010b].

Analizele teoretice și practice realizate în cadrul tezei de doctorat, precum și rezultatele obținute, deschid o serie de perspective și direcții de continuare și aprofundare ulterioară a cercetărilor în domeniu:

- realizarea în țară a modelului funcțional al navei ecologice speciale(ceea ce ar constitui o premieră);
- dezvoltarea capacității de a aborda în viitor și alte tematici referitoare la proiectarea și construcția unor nave speciale cu sisteme de propulsie electrică bazate pe utilizarea surselor de energie hibride regenerabile.

## 2. UTILIZAREA SURSELOR DE ENERGIE REGENERABILE

Problematika capitolului 2 constă în prezentarea surselor regenerabile de energie, insistându-se în principal asupra energiei eoliene și solare. Aceste două tipuri de surse se analizează în contextul României în special și al UE în general.

Se menționează faptul că, energia eoliană era folosită în navigație încă de acum 5000 de ani în urma sub forma velelor cu pânze. Turbinele de vânt existente, în principal cele cu ax orizontal, se cuplează de regulă cu sisteme fotovoltaice. Energia fotovoltaică cunoaște un ritm de dezvoltare accentuat.

Sunt prezentate la finele capitolului structuri posibile ale unor sisteme hibride eolian-fotovoltaic.

### 2.1. Principalele tipuri de surse de energie și caracteristica lor comparativă

În etapa actuală omenirea beneficiază, în fond, de trei categorii de surse de energie, bazate respectiv pe:

- arderea combustibililor fosili (cărbune, petrol, gaze);
- fisiunea nucleară;
- captarea și conversiunea energetică regenerabilă (energia solară, energia vântului, energia potențială a apelor, energia geotermală etc.).

**a) Combustibilii fosili** pe parcursul ultimelor două secole au servit drept bază a energiei moderne, constituind suportul energetic al industrializării și al progresului tehnico-științific înregistrat în perioada menționată. Astăzi circa 90% din cererea globală de energie e satisfăcută prin utilizarea combustibililor fosili.

Există însă numeroase dezavantaje caracteristice pentru aceste resurse energetice, printre care două, cu cele mai grave consecințe:

- volumul limitat al rezervelor explorabile de combustibili fosili;
- impactul puternic asupra mediului ambiant, trecut sub tăcere într-un trecut nu prea îndepărtat, pune sub semnul întrebării posibilitatea existenței într-un viitor apropiat a energiei bazate pe arderea combustibililor fosili.

Zăcămintele de petrol, gaze naturale și cărbune, într-adevăr sunt limitate și, într-o perioadă scurtă, acestea pot fi epuizate (Tabelul 2.1.).

Tabelul 2.1.

**Rezervele globale de resurse energetice**

Tipul de resurse	Rezerve naturale*,Gtep	Producție mondială	Rezerve, Ani
Petrol	140	3,45	40
Gaze naturale	135	2,2	64
Cărbune****	984205	2,2	155
Uraniu**	40->2000	0,34	60->2500***

- \* economic explorabile;
- \*\* în funcție de tehnologia utilizată ;
- \*\*\* pornind de la un consum de 0,65 Gtep;
- \*\*\*\* milioane tone.

### **b) Energia nucleară**

Era energiei nucleare începe în anii '70 ai secolului XX, cunoaște o dezvoltare spectaculoasă și mult promițătoare în anii '80, cucerind, la sfârșitul anilor '90, electroenergetica celor mai dezvoltate țări europene, a Statelor Unite ale Americii și Canadei.

Funcționarea centralelor nucleare nu este însoțită de emisii de gaze nocive, iar rezervele de materie prime nucleară sunt suficiente pentru multe secole de acum înainte.

Pe termen lung, energetica nucleară are șanse de a-și restabili poziția sa deloc neglijabilă, îndeosebi în producerea energiei electrice, dar aceasta se va întâmpla doar după elaborarea unor tehnologii noi, capabile să asigure atât funcționarea sigură a centralelor, cât și prelucrarea deșeurilor radioactive.

**c) Sursele regenerabile** sunt sursele care se regenerează pe măsură ce sunt consumate.

Cele mai importante surse regenerabile de energie (SER) sunt:

- energia vântului (eoliană);
- energia soarelui;
- energia hidroelectrică a râurilor;
- energia fluxurilor-refluxurilor și a valurilor mării;
- energia geotermală;
- energia biomasei.

Criteriile principale care determină perspectivele exploatarea surselor de energie regenerabile sunt:

- răspândirea destul de uniformă pe întregul glob și accesul la utilizarea lor al majorității țărilor lumii;
- aflarea lor în apropierea locului de consum și, ca urmare, lipsa necesității de a transporta energia la distanțe mari;
- accesul populației atât la producerea, cât și la folosirea energiei;
- majoritatea surselor de energie regenerabile sunt nonpoluante.

Aceste avantaje importante au determinat țările industrializate, dar și multe state în curs de dezvoltare, să edifice treptat un sistem energetic nou, care să ia în calcul și sursele de energie netradiționale.

Dezavantajele care au reținut un timp îndelungat implementarea pe scară largă a acestora sunt:

- energia regenerabilă este dispersată, ceea ce determină costuri mari ale instalațiilor de producere a energiei finale, destinate pentru consum;
- neuniformitate de distribuție în timp;
- lipsa posibilităților de stocare, de formare a rezervelor.

## **2.2. Potențialul surselor regenerabile de energie din România**

### **a) Energia solară**

Potențialul energetic solar este dat de cantitatea medie de energie provenită din radiația solară incidentă în plan orizontal care, în România, este de circa 1100 kWh/m<sup>2</sup>-an.

## 2.2 – Potențialul surselor regenerabile de energie din România 29

Harta radiației solare din România s-a elaborat pe baza datelor medii multianuale înregistrate de Institutul Național de Meteorologie și Hidrologie (INMH), procesate și corelate cu observații și măsurători fizice efectuate pe teren de instituții specializate.

În România s-au identificat cinci zone geografice (0 - IV), diferențiate în funcție de nivelul fluxului energetic măsurat. Distribuția geografică a potențialului energetic solar relevă că mai mult de jumătate din suprafața României beneficiază de un flux anual de energie cuprins între 1000 kWh/m<sup>2</sup>-an și 1300 kWh/m<sup>2</sup>-an.

Tabelul 2.2.

### **Distribuția potențialului energetic solar din România**

<b>Zona</b>	<b>Potențial energetic solar înregistrat</b>
0	Peste 1250 kWh/m <sup>2</sup> -an
I	1250 kWh/m <sup>2</sup> -an – 1150 kWh/m <sup>2</sup>
II	1150 kWh/m <sup>2</sup> -an – 1050 kWh/m <sup>2</sup>
III	1050 kWh/m <sup>2</sup> -an – 950 kWh/m <sup>2</sup>
IV	Sub 950 kWh/m <sup>2</sup> -an

Sursa: Studii de cercetare-dezvoltare ICEMENERG

Conversia radiației solare în energie electrică se realizează cu instalații fotovoltaice alcătuite din module solare cu configurații și dimensiuni diferite. Potențialul exploatabil al producerii de energie electrică prin sisteme fotovoltaice este de aproximativ 1200 GWh/an.

Costul investiției pentru realizarea de sisteme fotovoltaice în rețea de module solare a înregistrat o evoluție favorabilă în ultimele decenii, prețul unui modul solar s-a diminuat sistematic ajungând, în prezent, la circa 6\$/1W (instalat).

Prețul energiei electrice produse din surse solare fotovoltaice variază între 25 cenți/kWh și 50 cenți/kWh. Pentru alimentarea unor consumatori izolați și consumatori mici de energie, sistemele fotovoltaice oferă o alternativă economică atractivă, dacă se ține seama de costul ridicat pentru racordarea consumatorilor la rețeaua electrică aferentă sistemului energetic național. În România s-au realizat sisteme fotovoltaice cu puteri variate și în regim de funcționare diferențiat în cadrul unor programe de cercetare-dezvoltare-demonstrare, astfel:

- sisteme autonome - pentru alimentarea unor consumatori izolați (gospodării individuale, centre socio-culturale în Munții Apuseni, litoralul Mării Negre, Delta Dunării ș.a.), stații de radio-telecomunicații, instalații de pompare a apei, iluminat public sau semnalizare trafic, înscrise ca obiective în programul de electrificare rurală;
- sisteme conectate la rețeaua electrică (stații-pilot fotovoltaice cu panouri mobile, sisteme integrate în imobile ș.a.).

### **b) Energia eoliană**

În România s-au identificat cinci zone eoliene distincte (I - V) în funcție de potențialul energetic existent, de condițiile de mediu și topogeografice. Harta eoliană a României s-a elaborat luând în considerare potențialul energetic al surselor eoliene la înălțimea medie de 50 metri, pe baza datelor și informațiilor meteogeografice colectate începând din anul 1990, până în prezent.

Din rezultatele înregistrate a rezultat că România se află într-un climat temperat continental, cu un potențial energetic eolian ridicat în zona litoralului Mării Negre, podișurile din Moldova și Dobrogea ("climat blând") sau în zonele montane ("climat sever"). În regiuni cu potențial eolian relativ bun s-au localizat

amplasamente favorabile, dacă se urmărește "exploatarea energetică a efectului de curgere peste vârf de deal" sau "a efectului de canalizare al curenților de aer".

Pe baza evaluării și interpretării datelor înregistrate rezultă că în România se pot amplasa instalații eoliene cu o putere totală de până la 14000 MW, ceea ce înseamnă un aport de energie electrică de aproape 23000 GWh/an.

Pe baza evaluărilor preliminare în zona litoralului, inclusiv mediul off-shore, pe termen scurt și mediu, potențialul energetic eolian amenajabil este de circa 2000 MW, cu o cantitate medie de energie electrică de 4500 GWh/an.

Tabelul 2.3.

**Elemente tehnico-economice de exploatare a potențialului energetic al zonelor eoliene din România**

<b>Viteză, energie</b> <b>Zona topografică</b>	<b>Montană înaltă</b> (m/s; W/m <sup>2</sup> )	<b>Mare deschisă</b> (m/s; W/m <sup>2</sup> )	<b>Zona litorală</b> (m/s; W/m <sup>2</sup> )	<b>Terenuri plate</b> (m/s; W/m <sup>2</sup> )	<b>Dealuri și podișuri</b> (m/s; W/m <sup>2</sup> )
<b>I</b>	>11,0;>1800	>9,0;>800	>8,5;>700	>7,5;>500	>6,0;>250
<b>II</b>	10,0-1,5; 1200-1800	8,0-9,0; 300-800	7,0-8; 400-700	6,5-7,5; 300-500	5,0-6,0; 150-250
<b>III</b>	8,5-10,0; 700-1200	7,0-8,0; 400-600	6,0-7,0; 250-400	5,5-8,5; 200-300	4,5-5,0; 100-150
<b>IV</b>	7,0-8,5; 400-700	5,5-7,0; 200-400	5,0-6,0; 150-250	4,5-5,5; 100-200	3,5-4,5; 50-100
<b>V</b>	<7,0;<400	<5,5;<200	<5,0;<150	<4,5;<100	<3,3;<50

(Sursa: ICEMENERG)

Valorificarea potențialului energetic eolian, în condiții de eficiență economică, impune folosirea unor tehnologii și echipamente adecvate (grupuri aerogeneratoare cu putere nominală de la 750 kW până la 2000 kW).

Pe plan mondial, "energetica vântului" se găsește într-o etapă de "maturitate tehnologică" însă, în România, ponderea energiei electrice din surse eoliene în balanța energetică rămâne deocamdată sub posibilitățile reale de valorificare eficientă a acestora.

### 2.3. Politici privind sursele regenerabile de energie și valorificarea acestora

În prezent, obiectivele majore ale politicii Uniunii Europene în energie sunt:

- siguranța alimentării cu energie
- sisteme de energie competitive
- protecția mediului

Schemele suport pentru sursele regenerabile, deja introduse în multe țări, se pot rezuma în esență la doua modele de bază:

1. Prețul energiei produse din surse regenerabile este stabilit administrativ,
2. Prețul certificatelor de energie verde este stabilit de piața energiei.

Certificatele Verzi sunt emise pentru producători, pentru fiecare unitate de

## 2.3 – Politici privind sursele regenerabile de energie și valorificarea acestora 31

energie produsă din surse regenerabile de către o instituție eligibilă și sunt denumite în unități de energie (de exemplu 1 MWh). Certificatele de origine emise la nivel național vor fi recunoscute mutual pe piața europeană de electricitate.

Procedurile principale pentru promovarea pe piață a comerțului cu Certificate Verzi, sunt:

- acreditarea producătorilor eligibili
- emiterea de certificate
- controlul calității (verificare și audit)
- mecanisme pentru transferul și comercializarea certificatelor

Pentru implementarea acestor proceduri sunt necesare instituții responsabile pentru control, implementare și funcționare [Delesega2002] .



Fig. 2.1. Schemele suport pentru utilizarea surselor regenerabile de energie

În anul 2010, cifra de afaceri cu comerțul din Certificate Verzi în Europa se estimează la 20 miliarde euro.

### 2.3.1. Premise de valorificare a surselor regenerabile de energie în România

Obiectivele generale ale Strategiei de valorificare a surselor regenerabile de energie constau în:

- integrarea surselor regenerabile de energie în structura sistemului energetic național;
- diminuarea barierelor tehnico-funcționale și psiho-sociale în procesul de valorificare a surselor regenerabile de energie, simultan cu identificarea elementelor de cost și de eficiență economică;
- promovarea investițiilor private și crearea condițiilor pentru facilitarea accesului capitalului străin pe piața surselor regenerabile de energie;
- asigurarea independenței consumului de energie al economiei naționale;
- asigurarea, după caz, a alimentării cu energie a comunităților izolate prin valorificarea potențialului surselor regenerabile locale;
- crearea condițiilor de participare a României la piața europeană de "Certificate verzi" pentru energie din surse regenerabile.

**Sistemele solar-fotovoltaice** își găsesc utilitatea în aplicații din zone geografice izolate sau cu posibilități limitate de acces la rețeaua electrică. În aplicațiile fotovoltaice s-au identificat mai multe tipuri de proiecte, astfel:

- sisteme fotovoltaice autonome pentru electrificarea rurală, cu aplicații în Munții Apuseni sau alte zone montane, în nordul Moldovei, parcuri naturale (ex.: Delta Dunării), etc.;
- sisteme fotovoltaice conectate la rețeaua de transport și distribuție a energiei electrice:

- minicentrale solar-fotovoltaice (câteva sute de kW - 1 MW), în zona litoralului Mării Negre, cu un potențial solar atractiv și pe suprafețe

potențial utilizabile (pe principiul compensării consumului suplimentar sezonier sau pentru compensarea liniilor electrice cap de rețea în zona Deltei Dunării);  
- sisteme fotovoltaice (1 kW - 5 kW) conectate la rețea (în orașe mari, litoral, case de vacanță, etc.).

Realizarea de module fotovoltaice conectate la rețea poate reprezenta o soluție viabilă în aplicații distincte, ca urmare a diminuării costurilor specifice (de exemplu: sisteme de irigații în agricultură) [Andea2010a].

**Energia eoliană:** studii și analize de specialitate privind sursele energetice eoliene exploatabile demonstrează că potențialul eolian al României este de circa 14000 MW (putere instalată), care poate furniza o cantitate de energie de aproximativ 23000 GWh/an.

Analiza datelor meteo-climatice și investigațiile pe teren au condus la identificarea de amplasamente cu potențial energetic eolian favorabil pentru realizarea de centrale eoliene cu performanțe tehnico-economice ridicate.

În zona platoului continental al Mării Negre ("off-shore"), studiile întreprinse evidențiază un potențial energetic eolian de circa 2000 MW.

Amplasamentele off-shore, de la 3 km până la 5 km pe platoul continental al litoralului (până la adâncimea apei de 5 m), sunt considerate eficiente pe termen lung (peste 20 ani) [Andea2010b].

## 2.4. Agregatele Aeroelectrice (A.A.E)

Dintre sursele regenerabile de energie, energia eoliană prezintă una din perspectivele de utilizare cea mai actuală și eficientă.

Conversia energiei eoliene este sursa de generare a electricității cu creșterea cea mai rapidă datorită capacității de dezvoltare din întreaga lume, și se estimează că va rămâne așa și în următoarea decadă.

Instalațiile electrice ale turbinelor de vânt în cadrul sistemelor de putere s-au dezvoltat rapid în special în ultimii 20 de ani, iar statisticile internaționale referitoare la rata de creștere indică faptul că această dezvoltare va continua.

Tehnologia conversiei energiei eoliene în energie electrică este realizată cu generatoare electrice de curent alternativ, sincrone și asincrone (de inducție).

Energia care poate fi obținută, de la vânt, prin intermediul turbinelor eoliene depinde pe de o parte de energia cinetică a vântului, iar pe de altă parte de designul turbinei [Westlake1995].

Recent industria constructoare de turbine eoliene a arătat un real interes pentru sistemele de conversie a energiei cu viteză variabilă. Prin funcționarea la viteză variabilă se poate crește semnificativ captarea energiei eoliene micșorând astfel presiunea mecanică și zgomotul aerodinamic. Și de aceea generarea energiei eoliene este atractivă și pentru cercetare punându-se accent pe creșterea, reînnoirea (topologii noi atât pe partea de design a mașinii cât și pe partea aerodinamică a turbinei) și pe utilizarea ei ca pe o energie nepoluabilă.

### 2.4.1. Scurt istoric al utilizării puterii vântului

Drept sursă energetică vântul este cunoscut omenirii de peste 10 mii de ani. Încă la orizontul civilizației, energia vântului se utiliza în navigația maritimă. Se presupune că egiptenii străvechi mergeau sub pânze cu 5000 de ani în urmă.



Fig. 2.2. Utilizarea energiei vântului în navigația maritimă

În jurul anului 700 pe teritoriul Afganistanului mașini eoliene cu axă verticală de rotație se utilizau pentru măcinarea grăunțelor. Cunoscutele instalații eoliene (mori cu elicele conectate la turn) asigurau funcționarea unor sisteme de irigare pe insula Creta din Marea Mediterană. Morile pentru măcinarea boabelor, care funcționau pe baza vântului, sunt una din cele mai mari performanțe a secolelor evului mediu. În sec. XIV olandezii au îmbunătățit modelul morilor de vânt, răspândite în Orientul Mijlociu, și au început utilizarea largă a instalațiilor eoliene la măcinarea boabelor.



Fig. 2.3. Instalațiilor eoliene utilizate la măcinarea boabelor, Olanda

În 1854, în SUA apare o pompă de apă, care funcționa pe baza energiei vântului. Ca și construcție, această pompă semăna cu modelul morilor de vânt, dar avea mai multe palete (brațe) și un fluger pentru determinarea direcției vântului. Către anul 1940, în SUA peste 6 milioane de instalații de acest tip se utilizau pentru pomparea apei și producerea energiei electrice. Este socotită o premiză a cuceririi Vestului sălbatic, datorită posibilității de asigurare cu apă a fermelor zootehnice. La mijlocul secolului XX survine sfârșitul utilizării energiei vântului, fiind înlocuită cu o sursă energetică modernă - petrolul.

Interesul către energetica vântului re apare în urma crizelor petroliere cunoscute de omenire în ultimele decenii (la începutul anilor '70), datorită creșterii rapide a prețurilor la petrol.

Tendențele de utilizare a vântului sunt îndreptate în primul rând spre producerea energiei electrice, deoarece pentru statele industrializate pompele nu sunt importante.

Potențialul eolian major este observat pe litoralurile marine, pe ridicături și în munți. Asupra resurselor eoliene influențează relieful pământului și prezența barierelor (obstacolelor) plasate la înălțimi de până la 100 metri. De aceea vântul,



#### 34 Utilizarea surselor de energie regenerabile -2

---

Într-o mai mare măsură, depinde de condițiile locale (relief) decât de soare. În localitățile montane, spre exemplu, două suprafețe pot avea potențial solar egal, însă potențialul vântului poate fi diferit datorită diferenței în relief și direcțiile curenților maselor de aer.

Varianta optimă este combinarea într-un sistem a instalațiilor eoliene și solare. Asemenea sisteme simbiotice asigură o productivitate a energiei electrice mai înaltă în comparație cu instalațiile eoliene sau fotoelectrice, luate aparte.

Cantitatea energiei produse pe baza vântului depinde de densitatea aerului, de suprafața de elice și viteza vântului la puterea a treia.

Pe suprafața pământului vegetația și construcțiile aflate pe ea sunt factorul de bază, care influențează la micșorarea vitezei vântului. Cu cât ne îndepărtăm de suprafață, cu atât se micșorează influența reliefului asupra mișcării maselor de aer. Cu alte cuvinte: cu cât mai sus cu atât viteza vântului e mai mare. La înălțimi de circa un kilometru de la suprafața mării relieful practic nu influențează viteza vântului. În straturile de jos a atmosferei o influență majoră asupra vitezei o are contactul cu suprafața pământului: cu cât relieful este mai complicat, cu atât mai mică e viteza vântului. El încetinește în păduri și orașe mari. Dar, suprafețele mari ca litoralul mării practic nu au o influență prea semnificativă asupra vântului. Clădirile, pădurile și alte bariere nu numai că încetinesc vântul, dar și formează curenții turbulenți de aer.

Specialiștii clasifică suprafața reliefului astfel:

- 0** - suprafața apei (nivelul mării);
- 0,5** - un relief complet deschis cu suprafață dreaptă (pistă de decolare);
- 1** - localitate agricolă deschisă, fără garduri și construcții înalte, cu ridicături mici;
- 1,5** - suprafețe agricole, cu clădiri până la 8 metri înălțime, aflate una față de alta la circa 1250 m;
- 2** - suprafețe agricole, cu clădiri până la 8 metri înălțime aflate la 500 m una față de alta;
- 2,5** - suprafețe agricole, cu număr mare de clădiri și vegetație de până la 8 metri înălțime aflate la 250 m una de alta;
- 3** - comune, orașe cu o cantitate mare de clădiri;
- 3,5** - orașe cu clădiri înalte;
- 4** - orașe mari, cu clădiri înalte (zgârâie-nori).

Parametrul tehnic principal care determină succesul economic al turbinei eoliene este energia anuală produsă, care la rândul ei este determinată de parametrii cum ar fi viteza medie a vântului, distribuția statistică a vitezei vântului, distribuția direcțiilor vântului, intensitățile turbulențelor și asprimea terenului înconjurător. Dintre acestea, parametrul cel mai sensibil și important este viteza vântului, care crește cu înălțimea de la sol. Aceasta a dus la renunțarea în mare parte la turbinele eoliene cu axa verticală în favoarea configurației tradiționale mai înaltă cu axă orizontală.

Cu toate că energia eoliană este considerată o opțiune energetică ecologică, ea are unele influențe negative asupra mediului legate de utilizarea sa. Acestea includ: emisii acustice, influența vizuală asupra terenului, impact asupra vieții păsărilor, umbra provocată de rotor și interferența electromagnetică ce poate influența recepția semnalelor radio, TV și radar. Aspectele legate de emisiile acustice au fost reduse datorită progresului în cercetările aero-acustice prin instrumente de proiectare și configurații ale paletelor care au dus la obținerea unor palete mai silențioase. Impactul asupra vieții păsărilor pare să fie o problema relativ minoră. În

afara faptului că sunt competitive ca și cost și ecologice, energia eoliană are unele avantaje față de instalațiile cu combustibili fosili și chiar și față de alte surse de energie regenerabile. În primul rând ea este modulară: adică capacitatea de producție a fermelor eoliene poate fi ușor extinsă deoarece noile turbine pot fi produse și instalate ușor, ceea ce nu este și cazul instalațiilor nucleare sau pe bază de cărbune. În plus, o reparație la o turbină eoliană nu afectează producția de energie a celorlalte. În al doilea rând energia produsă de turbinele eoliene poate duce la amortizarea materialelor folosite pentru producerea lor în circa 3-4 luni în cazul unor amplasamente bune. În al treilea rând, pe parcursul funcționării normale, nu sunt produse emisii în atmosferă.

### 2.4.2. Configurații și caracteristici de bază ale turbinelor eoliene

Sistemul de bază care realizează conversia energiei eoliene este turbina de vânt. Există două configurații generale de bază funcție de axa de rotație a paletelor rotorului turbinei (fig. 2.4.) :

1. Turbine de vânt cu ax orizontal la care axa de rotație este paralelă cu direcția vântului
2. Turbine de vânt cu ax vertical la care axa de rotație este perpendiculară pe direcția vântului

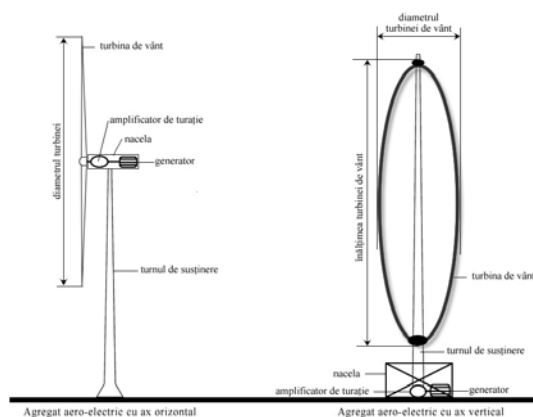


Fig. 2.4. Configurații de bază ale agregate aero-electrice

După cum reiese din figura de mai sus, elementele principale ale unui sistem de conversie a energiei eoliene sunt: rotorul turbinei cu paletel componente, generatorul electric, care poate fi sincron sau asincron (de inducție), cutia de viteze, care poate lipsi în cazul utilizării generatoarelor sincrone, frâna mecanică și sistemul de susținere care poate avea o înălțime de peste 50 de metri, în funcție de locul în care este plasată turbina și de puterea generatorului. De asemenea, turbinele de vânt sunt sau nu echipate și cu un sistem de reglare a pasului paletelor și cu un echipament de monitorizare și control.

Sistemului care realizează conversia puterilor se prezintă schematic în Fig. 2.5.:

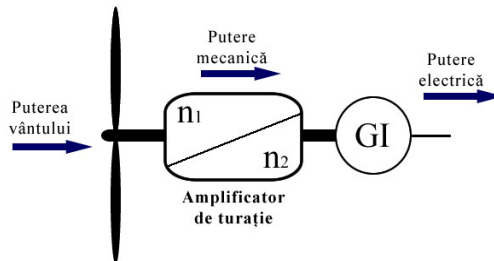


Fig. 2.5. Conversia electromecanică a energiei eoliene utilizând generatoarele de inducție

### 2.4.3. Sisteme electroenergetice autonome cu grupuri Diesel / solare / aeroelectrice

Aceste sisteme prezintă dezavantajul utilizării la grupurile diesel a generatoarelor sincrone, relativ mai complicate, mai mari, mai grele, mai scumpe și mai dificil de întreținut decât generatoarele asincrone, reclamând reglarea turației/frecvenței și a tensiunii cu subsisteme de reglare distincte:

- sistemul de reglare a tensiunii, comun pentru ambele grupuri, cu acțiune asupra excitației generatorului sincron (în cazul când există energie eoliană în exces față de cerințele consumatorilor motorul diesel este oprit iar generatorul sincron, decuplat de motorul diesel, lucrează în regim de compensator sincron);
- sistemul obișnuit de reglare a turației motorul diesel, ce asigură frecvența întregii rețele (inclusiv al grupului aeroelectric);
- sistemul de reglare a frecvenței rețelei în regimul când motorul diesel este oprit (când există excedent de energie la grupul aeroelectric) cu variatoare de putere electronice.

#### Sisteme eoliene hibride

Sistemele eoliene hibride pot fi utilizate în asociație cu alte dispozitive de generare, în special cu generator electric de mică putere la care se mai poate adăuga și o baterie, folosită pentru a stoca energia. În acest caz se mai pot aduna avantajele celor două sisteme de generare a energiei electrice: sistemul eolian reduce consumul de combustibil al generatorului, bateria reduce puterea generatorului, prezența generatorului Diesel reduce mărimea turbinei eoliene și capacitatea bateriei, iar sistemul în ansamblu are o fiabilitate mărită.

Utilizarea unui astfel de sistem hibrid este însă însoțită și de probleme suplimentare privind alegerea puterii fiecărui component și optimizarea sistemului și costului de producție a unui kWh.

În figura următoare este descrisă folosind o schemă bloc, configurația unui astfel de sistem hibrid:

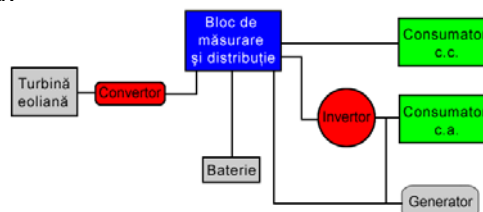


Fig. 2.6. Structura sistemului hibrid

Observații:

Acest sistem folosește două surse de energie complementare:

- o sursă principală: energia vântului convertită în energie electrică cu ajutorul unei turbine eoliene (convertizorul c.a./c.c. fiind integrat în instalație);
- o sursă secundară de combustibil fosil (motorină sau benzină) convertită în energie electrică (c.a.) cu ajutorul unui generator.

Bateria este folosită ca sistem de stocare și ca tampon între intrările și ieșirile de putere. Generatorul alimentează direct consumatorii de putere și asigură simultan încărcarea bateriei printr-un convertor c.a./c.c.. Puterea electrică produsă de generatorul electric asigură cu prioritate alimentarea consumatorilor dar, dacă puterea nu este suficientă restul de energie este asigurată de baterie sau de generatorul secundar dacă bateria nu este încărcată. Când puterea turbinei eoliene este mai mare decât sarcina electrică, surplusul este stocat în baterie sau se pierde dacă bateria este complet încărcată. Generatorul electric pornește doar atunci când nivelul de energie al bateriei este prea scăzut pentru a putea alimenta consumatorii și se oprește din funcționare atunci când bateria a atins capacitatea maximă de încărcare[Andea2010c].

#### Structura unui sistem hibrid eolian-fotovoltaic

Structura unui sistem hibrid eolian-fotovoltaic este prezentată în figura următoare:

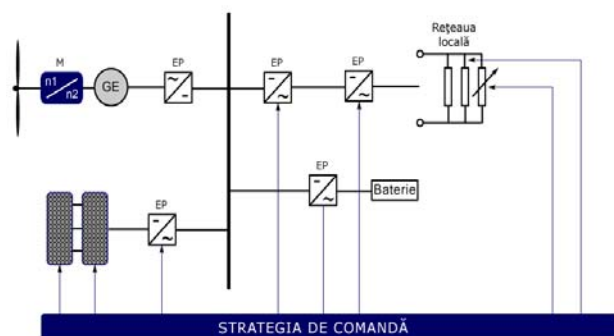


Fig. 2.7. Schema bloc a unui sistem hibrid eolian-fotovoltaic

Sistemul hibrid eolian-fotovoltaic realizează conversia energiei eoliene respectiv a energiei solare în energie electrică. Sistemul este compus dintr-un generator sincron cu magneți permanenți, o turbină eoliană cu viteză variabilă, un grup de panouri fotovoltaice, și un sistem de baterii cu rol de acumulare a surplusului de energie.

#### 2.4.4. Concluzii privind A.A.E.

Cele mai utilizate tipuri de mașini electrice și convertoare statice de putere în conversia electromecanică a surselor regenerabile au fost evaluate.

Bazându-ne pe cele menționate anterior s-ar putea remarca următoarele :

- A.A.E. cele mai răspândite la ora actuală în lume sunt cu ax orizontal și au în componență 3 palete;
- Tendințele actuale în acest domeniu sunt îndreptate către sistemele cu viteză variabilă, în special pentru domenii de putere mare (>2 MW);

- Una din cele mai importante provocări în acest domeniu se referă la aplicațiile de mică putere autonome, sisteme eoliene hibride destinate unor locuri izolate.

## 2.5. Energia fotovoltaică

**Energia fotovoltaică** este energia electrică obținută din energia soarelui prin intermediul elementelor fotovoltaice

**Modulele solare fotovoltaice** sunt dispozitive semiconductoare în stare solidă fără componente mobile care transformă lumina solară în electricitate sub forma curentului continuu. Deși în prezent, costul electricității produse de sistemele PV este încă mai mare decât cel din majoritatea celorlalte tehnologii competitive, acestea se preconizează să-și continue scăderea constantă.

**Sistemele** fotoelectrice, ca regulă, se împart în:

1. *Sisteme autonome*, constituite doar din module fotovoltaice. Pot conține reglatoare și acumulatori.



Fig. 2.8. Sistem hibrid autonom cu panouri fotovoltaice  
(Foto: DIERET Course)

2. *Sisteme hibride*, care reprezintă o combinație de elemente fotoelectrice și alte surse pentru producerea energiei electrice: generatoare eoliene, diesel și altele. Aceste sisteme utilizează acumulatori și reglatoare de capacități și mărimi mai mici.

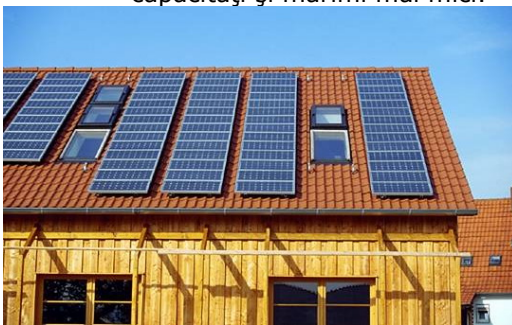


Fig. 2.9. "Casă solară" – independentă energetic - cu panouri fotovoltaice



Fig. 2.10. Casa cu sistem energetic hibrid solar-eolian

3. *Sisteme conectate la rețele electrice* - reprezintă, practic, stații electrice mici, care livrează energie electrică direct în rețeaua comună.

Randamentul practic a fotoelementelor produse în masă este:

- 16-17% pentru siliciu mono-cristalin;
- 14-15% pentru siliciu poli-cristalin;
- 8-9% pentru siliciu amorf.

Calitatea elementelor fotovoltaice produse este diferită, dar majoritatea producătorilor garantează perioada de exploatare între 20-25 de ani și 10 ani pentru capacitatea inițială.

Criteriul de bază pentru compararea diferitor tipuri de elemente este prețul unui Watt capacitate de vârf și nu randamentul nominal. Prețul unui kW este între 2 și 6 dolari.

#### **Avantaje ale utilizării elementelor fotovoltaice**

- *siguranță înaltă* - inițial elementele fotovoltaice au fost elaborate ca tehnologii cosmice, rezistente pentru condiții extreme și de durată lungă de viață; astăzi aceste elementele sunt folosite la obținerea energiei electrice zi de zi pe Pământ, păstrând calitățile de siguranță inițiale;

- *cheltuieli curente mici* - elementele folosesc lumina solară, combustibil gratis. Datorită lipsei componentelor mobile, nu necesită îngrijire deosebită. Sunt rentabile mai ales în locuri izolate, spre exemplu, stații de comunicație, cabane, alte;

- *ecologic curate* - nu consumă combustibil fosil, deci nu poluează, iar în lipsa componentelor mobile nu se formează zgomote (nu produc poluare sonoră), deci poate fi utilizat nemijlocit la consumator.

- *comoditate și cheltuieli mici la instalare* - sistemele fotovoltaice pot fi de diferite mărimi, fiind acomodate la preferințele consumatorului, măbind sau micșorând ulterior capacitatea. Pot fi mobile și, deci, pot fi utilizate în diverse locuri.

- *cheltuieli mici la transportarea energiei produse* - fiind instalate în apropierea nemijlocită a consumatorului nu necesite rețele sau lungimi mari fire de transport a energiei electrice. Acest lucru este o prioritate esențială, deoarece se cunoaște că costul transportării constituie circa 50% din costul final a energiei electrice.

Avantaje ale utilizării panourilor fotovoltaice:

- sunt ușor de montat;
- nu au piese în mișcare, pompe etc;
- fiabilitate foarte mare, durata de viață peste 20 de ani;
- energia produsă se poate stoca în grupuri de baterii și folosi apoi după nevoi sau dacă excedentează se poate livra la rețeaua națională.

Pe lângă aceste avantaje sistemele cu panouri fotovoltaice mai au și unele dezavantaje:

- suprafața necesară pentru montajul panourilor mai mare;
- investiția inițială mare.

## **2.6. Concluzii**

În sistemele electroenergetice de pe nave, în ultima perioadă de timp, se impune și folosirea unor surse regenerabile de energie.

Din sfera surselor de energie regenerabilă, în acest capitol sau reținut în deosebi energia solară și eoliană.

#### 40 Utilizarea surselor de energie regenerabile -2

---

Contribuția personală se referă la identificarea surselor regenerabile de energie fezabile pe navele maritime și fluviale.

În acest sens, energia eoliană și solară se stochează în acumulatori electrice, reducându-se semnificativ consumul de motorină al diesel generatoarelor electrice.

Contribuțiile personale aduse în acest capitol sunt:

- Analiza evolutivă a energiei eoliene cu posibilități la implementarea pe nave;
- Analiza critică a posibilității folosirii energiei solare în sistemul electroenergetic al navei.

În ciuda succesului lor recent, în trecut sursele de energie regenerabile au avut dificultăți în a răzbate pe piețele care erau dominate de instalații tradiționale bazate pe combustibili fosili. Aceasta se datorează parțial faptului că tehnologiile energetice regenerabile și alte tehnologii noi sunt produse în serie abia acum în timp ce în trecut presupuneau cheltuieli de capital mari comparativ cu instalațiile tradiționale, dar și faptului că instalațiile bazate pe cărbune, țiței și gaz au beneficiat de o gamă de subvenții indirecte de-a lungul anilor. Cu toate acestea o altă limitare a fost dată de caracterul nepermanent a unora din sursele de energie regenerabile cum ar fi vântul și soarele. Studiile realizate până în prezent au demonstrat că potențialul surselor de energie regenerabile este enorm, acestea putând acoperi în principiu de câteva ori cererea de energie.

În prezent sursele de energie regenerabile asigură între 15 – 20 % din cererea totală de energie din lume.

Tehnologiile energetice regenerabile tind să fie caracterizate prin cheltuieli de mediu relativ scăzute.

O problemă fundamentală pentru orice tehnologie nouă este că, prin definiție, nu are aceleași dovezi de performanță ca sistemele mai vechi, recunoscute.

Atât tehnologiile solare fotovoltaice cât și energia eoliană au creșteri mari ale vânzărilor, micșorându-se cheltuielile de capital și cheltuielile cu energia produsă, iar performanțele continuă să crească.

Sursele regenerabile dețin un potențial energetic important și oferă disponibilități nelimitate de utilizare pe plan local și național. Valorificarea surselor regenerabile de energie se realizează pe baza a trei premise importante conferite de acestea, și anume: accesibilitate, disponibilitate și acceptabilitate.

Sursele regenerabile de energie pot să contribuie prioritar la satisfacerea nevoilor curente de energie electrică de pe nave.

### 3. MODELAREA MATEMATICĂ A SISTEMELOR EOLIENE, SOLARE ȘI DIESEL

Problematika acestui capitol este axată pe stabilirea modelelor matematice ale turbinei de vânt, bateriei solare, acumuloarelor electrice, convertorului DC-DC și motorului DIESEL.

Caracteristicile mecanice ale motorului DIESEL se analizează în zona stabilă de funcționare, zonă delimitată la turație ridicată. Modelarea turbinei de vânt navale -**TVN**- se face analizând caracteristicile experimentale ale acestui sistem deducând relații matematice dependente de viteza vântului. Generatorul sincron este analizat prin modelul ortogonal, cu parametri identificați de la un sistem (**TVN+GSMP**) terestru existent.

Obiectivul capitolului 3 este de a realiza o modelare cât mai fidelă a sistemelor fizice SOARE-VÂNT-DIESEL, astfel încât să se poată analiza fenomenele tranzitorii ce apar în aceste aplicații, mai ales că, așa cum s-a menționat anterior, energiile regenerabile, în speță SOARE-VÂNT, sunt fluctuante, imprevizibile și depind de condițiile meteorologice în care se găsește nava.

S-a prevăzut, după cum se remarcă din titlul capitolului, și un sistem DIESEL de obținere a energiei electrice, sistem care completează necesarul de energie electrică în condiții meteo nefavorabile. Se menționează faptul că în prezent este singurul care asigură necesarul de energie de pe navă.

Sunt prezentate caracteristicile mecanice ale TVN, MD și modelul ortogonal al generatorului electric, de regulă generator sincron, datorită facilităților în obținerea de putere reactivă alături de cea activă.

Bateriile solare sunt definite prin caracteristicile externe  $U=f(I)$ , iar convertorul DC-DC realizează transferul optim de putere de la bateria solară la acumuloarele electrice.

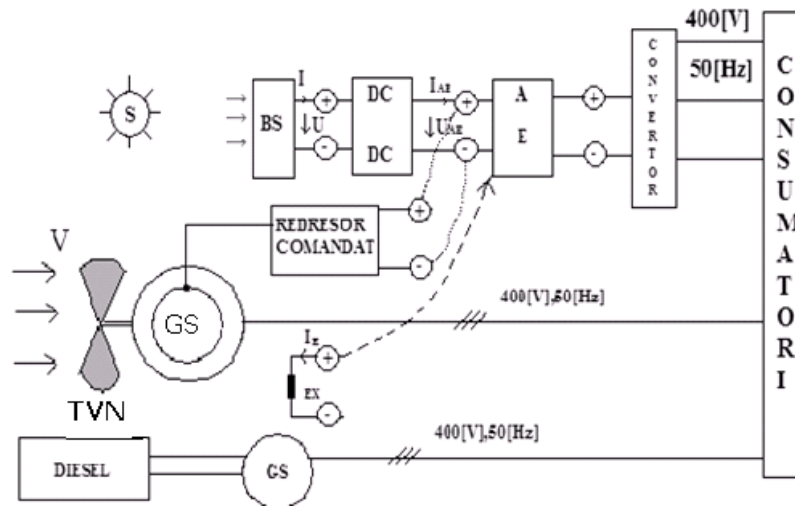


Fig.3.1. Sistem electroenergetic triplu (DIESEL-VÂNT- SOLAR)



### 3.1. Considerații preliminare

Modelele matematice prezentate la motorul Diesel, turbina de vânt navală și generatorul sincron se bazează pe documentația sistemelor similare terestre.

La subsistemul actual de producere a energiei electrice de pe navă cu motor Diesel se menționează faptul că se oferă posibilitatea funcționării în punctul de randament maxim prin folosirea acumulatorilor electrice, soluție inexistentă astăzi pe nave.

Drept consecință consumul de motorină scade semnificativ și nu mai depinde de gradul de fluctuații al consumatorilor de pe navă, acumulatorii electrice fiind o sursă de stocare a energiei electrice, obținute în principal din SOARE și VÂNT și completată numai la nevoie cu energie produsă de Diesel generatoare.

### 3.2. Modele matematice

Se prezintă în continuare modele matematice ale motorului Diesel, turbinei de vânt navale și generatoarelor [Babescu2003], [Bej2003], [Păunescu2005].

#### 3.2.1. Motorul Diesel (MD)

Caracteristica mecanică a motorului Diesel (**MD**) are o formă parabolică și va fi analizată în cele ce urmează.

Sistemele mecanice, (**TVN ,MD**), sunt în general caracterizate de constante de timp mult mai mari decât sistemele electrice. Procesele electromagnetice sunt relativ mult mai rapide decât cele mecanice, așa încât se poate considera că procesele tranzitorii din mașinile electrice s-au stins atunci când începe procesul mecanic de reglare a turației la motorul Diesel.

Caracteristica mecanică (cuplu  $M$  - turație  $n$ ) a motorului Diesel la un anumit debit de combustibil, este o parabolă prezentată în figura 3.2 :

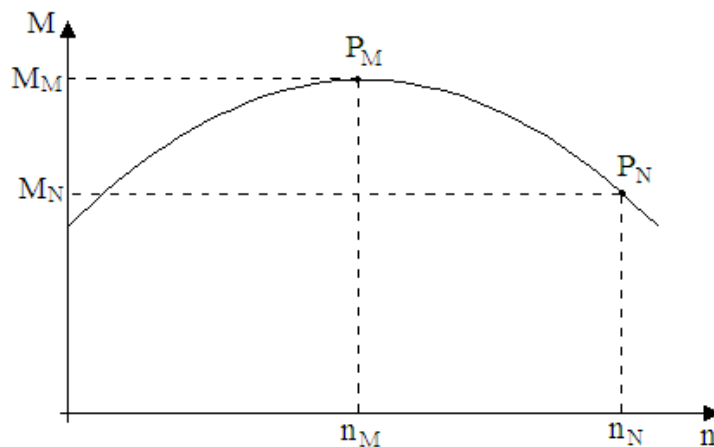


Fig.3.2. Caracteristica mecanică a motorului Diesel  
Zona de funcționare stabilă la MD este la  $n > n_M$  (turații mari)

Din datele de catalog ale motorului Diesel se cunosc:

- punctul de funcționare la putere maximă  $P_M$  este caracterizat prin:

cuplul maxim  $M_M$  ; turația corespunzătoare cuplului maxim  $n_M$  .

- punctul de funcționare la putere nominală  $P_N$  este caracterizat prin:

cuplul nominal  $M_N$  ; turația nominală  $n_N$  .

Caracteristica mecanică  $\mathbf{M=f(n)}$  este o parabolă de ecuație:

$$M = An^2 + Bn + C \quad (3.1)$$

Din  $\frac{dM}{dn} = 0$  se obține turația corespunzătoare cuplului maxim:

$$n_M = -\frac{B}{2A} \quad (3.2)$$

Valoarea cuplului maxim este:

$$M_M = \frac{(4AC - B^2)}{4A} \quad (3.3)$$

Valoarea cuplului nominal este:

$$M_N = An_N^2 + Bn_N + C \quad (3.4)$$

#### Determinarea caracteristicii mecanice a motorului Diesel

Relațiile (3.2), (3.3) și (3.4) constituie un sistem de 3 ecuații cu 3 necunoscute, A,B,C, a cărui rezolvare permite determinarea caracteristicii mecanice  $M = f(\omega_2)$ , unde  $\omega_2$  este viteza unghiulară rotorică dată de relația:

$$\omega_2 = \frac{2\pi n}{60} \quad (3.5)$$

Cu aceste precizări, dacă în sistemul de ecuații:

$$\begin{cases} B = -2An_M \\ B^2 = 4AC - 4AM_M \\ M_N = An_N^2 + Bn_N + C \end{cases} \quad (3.6)$$

Introducem valorile:

$$n_N = 3000 [rpm]$$

$$n_M = 2222 [rpm]$$

$$M_M = 15 [Nm]$$

$$M_N = 5 [Nm]$$

rezultă:

$$\begin{cases} B = -2 \cdot A \cdot 2222. \\ B^2 = 4AC - 4 \cdot A \cdot 15 \\ 5 = A3000^2 + B3000 + C \end{cases} \quad (3.7)$$

$$B = 0.07342 ; C = -66.570 ; A = -1.6521 \times 10^{-5}$$

Caracteristica mecanică  $\mathbf{M=f(\omega_2)}$  este așadar:

$$M_{MD} = An^2 + Bn + C = -1.6521 \times 10^{-5} (9.55\omega_2)^2 + 0.07342 (9.55\omega_2) - 66.57 \quad (3.8)$$

sau:

$$M_{MD} = An^2 + Bn + C = -1.5 \times 10^{-3} (\omega_2)^2 + 0.7\omega_2 - 66.57 \quad (3.9)$$

Cunoscând caracteristica mecanică a motorului Diesel la debitul de motorină  $q_1$ , punctul de funcționare impus de generatorul sincron/asincron este perfect determinat, acesta fiind  $P_1$ .

La o sarcină mai mare a motorului Diesel determinată de un consumator electric mai mare, (ex. motorul asincron de la o pompă etc.), se mărește debitul de combustibil, (motorină), la valoarea  $q_2$  și astfel caracteristica mecanică se modifică din caracteristica (1) în caracteristica (2), (figura.3.3), noul punct de funcționare stabilindu-se în  $P_2$ .

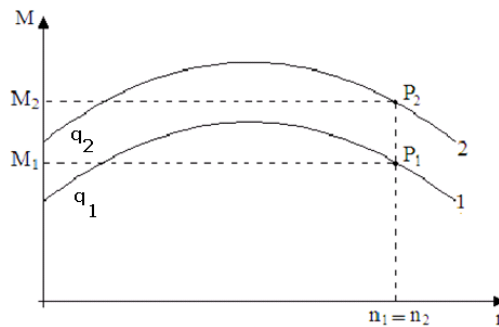


Fig.3.3. Modificarea caracteristicii mecanice funcție de debitul de combustibil

Așa cum se observă din figura de mai sus, punctele de funcționare  $P_1$  și  $P_2$  au aceeași turație, acest fapt fiind impus de inerția maselor în mișcare de rotație.

Evident că procesul tranzitoriu de trecere din punctul  $P_1$  în punctul  $P_2$  este un proces complex și depinde de toate mașinile din sistem (mecanice + electrice).

**Prin modificarea debitului de motorină caracteristicile mecanice se deplasează și deci se poate modifica turația.**

Liniarizarea caracteristicii mecanice la motorul Diesel în punctul de funcționare se poate face cu ecuația:

$$M_D = a\omega_2 + b \quad (3.10)$$

Această caracteristică liniarizată este valabilă pentru o anumită valoare a debitului de motorină. La modificarea sarcinii electrice și cuplul la **MD** trebuie adaptat și deci caracteristica mecanică se va modifica, așa cum s-a precizat anterior.

### 3.2.2. Turbina de vânt navală (TVN)

Viteza vântului în domeniul exploatabil tehnico-economic este [Monsson2010a]:

$$V = 4 \div 25 [m / s]$$

cu cele mai bune rezultate în intervalul [Monsson2010a]:

$$V = 12 \div 15 [m / s]$$

#### PUTEREA TURBINEI NAVALE

Puterea maximală  $P_{Kl}$  care poate să fie dezvoltată de o turbină eoliană navală la viteza **V** depinde aproximativ pătratic, [Bej2003], de viteza unghiulară

rotorică  $\omega$  (sau  $\Omega$ ), conform figurii 3.4.

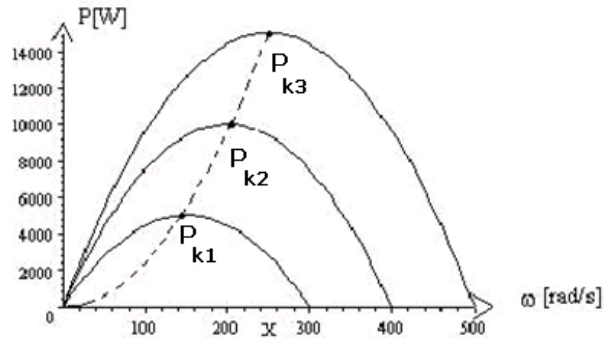


Fig.3.4. Variația puterii cu viteza unghiulară

Punctele de maxim  $P_{k1}$ ,  $P_{k2}$ ,  $P_{k3}$  corespund vitezelor vântului  $V_1, V_2, V_3$  și se obțin la turațiile, respectiv vitezele unghiulare rotorice  $\omega_1^*$ ,  $\omega_2^*$ ,  $\omega_3^*$ .

Strategia de conducere, pentru orice sistem eolian de putere ce produce energie electrică, presupune funcționarea în punctele  $P_{ki}$ ,  $i = 1 \div 3$ , corespunzătoare puterii maxime.

Puterea dezvoltată de turbina eoliană navală depinde de viteza vântului la puterea a treia, [Bej2003]:

$$P_{TVN} = K_{TVN} V^3 \quad (3.11)$$

unde, coeficientul turbinei  $K_T$  depinde de:

- densitatea aerului ( $1.25 [kg/m^3]$ );
- geometria turbinei navale (poziția paletelor-prin unghiul de atac)

Funcționarea stabilă a sistemului TVN+GA este în zona  $\omega \geq \omega_1^*$ .

#### CUPLUL TURBINEI NAVALE

Cuplul turbinei  $M_{TVN}$  în zona funcționării stabile se calculează cu relația:

$$M_{TVN} = \frac{P_{TVN}}{\omega} \quad (3.12)$$

Dependența  $M_{TVN}$  funcție de viteza unghiulară se prezintă sub forma unor drepte de pantă variabile, ce depind de viteza vântului, ca în figura 3.5.

Prin schimbarea poziției paletelor se modifică panta caracteristicilor mecanice și deci turația la care funcționează grupul (**TVN+GS**).

Turbina de vânt are caracteristica mecanică de forma

$$M_{TVN} = A\omega + B \quad (3.13)$$

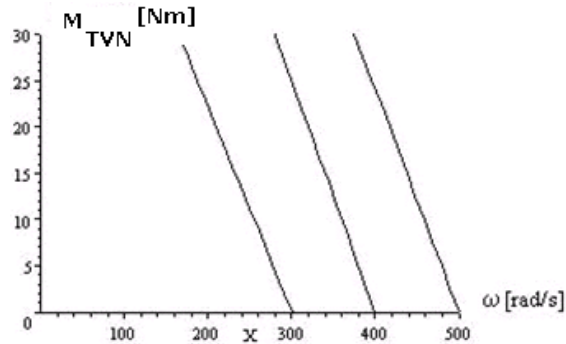


Fig.3.5. Cuplul turbinei eoliene navale

**Caracteristicile mecanice ale TVN, în zona de funcționare, sunt niște drepte**

Turbina **TVN** poate dezvolta, la o anumită viteză a vântului, o putere maximă [Bej2003]:

$$P_{TVN_{max}} = M_{TV} \cdot \omega = -\frac{B^2}{4A} \quad (3.14)$$

relație obținută din:

$$\frac{dP_{TVN}}{d\omega} = \frac{d(A\omega + B)\omega}{d\omega} = 0 \Rightarrow \omega = -\frac{B}{2A} \quad (3.15)$$

Pentru a funcționa în punctul de putere maximă, caracterizat prin cuplul:

$$M_{TVN} = \frac{b}{2} \quad (3.16)$$

și viteza unghiulară rotorică:

$$\omega^* = -\frac{B}{2A} = 2\pi n^* \quad (3.17)$$

sistemul (**TVN+GA**) trebuie reglat astfel încât cuplul la **GA** să devină:

$$M_{GA} = M_{TVN}^* \quad (3.18)$$

**Optimizarea geometrică** a turbinei de vânt navale **TVN** constă în selectarea unor forme constructive astfel încât să se realizeze maximul de putere la o viteză a vântului dată.

Puterea cinetică la viteza **V** și suprafața **S** este:

$$P_c = \rho \frac{V^3}{2} S \quad (3.19)$$

unde:

$\rho$  este densitatea masică a aerului ( $\rho = 1.224 \div 1.25 \left[ \text{kg/m}^3 \right]$  la

$t = 15^\circ [C]$ ), dependentă de:

- presiunea barometrică;
- temperatura aerului;
- umiditatea atmosferică.

Randamentul turbinei de vânt navale **TVN** se definește ca fiind raportul :

$$\eta_T = \frac{P_{abs}}{P_c} \quad (3.20)$$

unde : -  $P_{abs}$  este puterea absorbită de turbina de vânt navală;

-  $P_C$  este puterea cinetică la viteza  $V$  și suprafața  $S$  ;

Randamentul turbinei de vânt depinde de viteza vântului, prezentând un maxim de valoare 0.5 la viteze mai mici ( $4 \div 5 [m/s]$ ) și este cuprins în intervalul  $0.2 \div 0.05$  (0.2 la viteze în jurul a  $3 [m/s]$  și 0.05 la viteze mari: peste  $25 [m/s]$ ).

Valorile randamentului la viteze diferite ale vântului au fost determinate prin măsurători practice, pe o turbină eoliană cu ax orizontal având puterea nominală  $P=5$  KW. Rezultatele măsurătorilor sunt prezentate în tabelul 3.1 [Monsson2010a]:

Tabelul 3.1

$V[m/s]$	3	4	5	6	7	8	9	10
$\eta_T$	0.2	0.5	0.5	0.4	0.3	0.25	0.24	0.22
$V[m/s]$	11	12	13	14	15	17	19	25
$\eta_T$	0.21	0.2	0.19	0.18	0.14	0.12	0.108	0.05

**Randamentele energetice ale TVN sunt maxime la  $v=5$  m/s (sub 50%) și minime (10%) la  $v>19$  m/s**

La o viteză a vântului constantă regimul de funcționare al turbinei de vânt navale este un regim staționar (cuplu motor = cuplul generatorului).

La viteze ale vântului variabile - rafale de vânt - regimul de funcționare devine dinamic. Rafalele de vânt sunt perturbații în câmpul de viteze și turbina **TVN** le recepționează ca pe **unde de șoc: salturi de cuplu**.

**Reglajul paletelor la TVN** modifică caracteristica cuplului, ca în figura 3.6.

Prin schimbarea poziției paletelor se modifică panta caracteristicilor mecanice și implicit turația la care funcționează grupul (**TVN+GS**).

Așa cum se poate observa, sistemul (**TVN+GS**) funcționează la turații și puteri diverse.

Pentru a funcționa în punctul de putere maximă, caracterizat prin cuplul  $M_{TVN}^*$  și viteza unghiulară rotorică  $\omega^* = 2\pi n^*$ , subsistemul (**TVN+GS**) trebuie reglat astfel încât cuplul la **GS** să devină:

$$M_{GA} = M_{TVN}^* \quad (3.21)$$

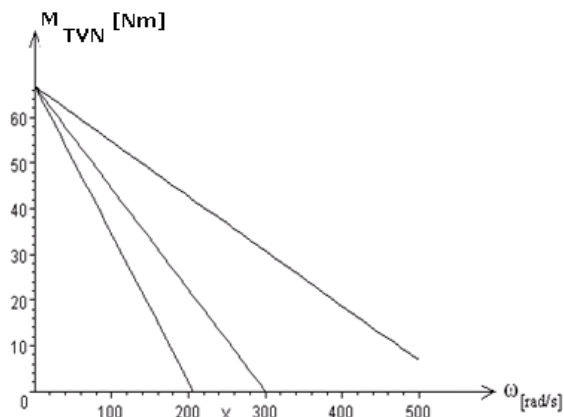


Fig.3.6. Cuplul turbinei eoliene navale în funcție de reglajul paletelor

Cunoscând viteza vântului, (măsurată cu anemometrul), se determină viteza unghiulară rotorică  $\omega^*$  corespunzătoare punctului de funcționare la putere maximă.

Prin intermediul regulatorului, (proporțional **P**  $\Delta a = K_1 \Delta \omega$ , proporțional – integrator – **PI**  $\Delta a = K_1 \Delta \omega + K_2 \int \Delta \omega dt$ , proporțional – integrator – derivativ – **PID**

$\Delta a = K_1 \Delta \omega + K_2 \int \Delta \omega dt + K_3 \frac{d \Delta \omega}{dt}$ ), se comandă unghiul de conducție  $\Delta a$  la elementele de comutație din convertorul de putere:

Reglarea fluxului de putere are loc până când  $\omega = \omega^*$ .

În aceste condiții, la o anumită viteză a vântului, se realizează funcționarea în punctul de putere maximă al turbinei de vânt navale.

Dacă viteza vântului este variabilă în timp sistemul (**TVN+GE**), datorită momentelor de inerție mari, nu poate urmări variația optimă a vitezei unghiulare  $\omega^*$  în timp.

**Funcționarea la putere maximă nu este posibilă la modificări bruște ale vitezei vântului**

**Dependenta cuplului TVN de viteza vântului**

Puterea maximă ce o poate dezvolta **TVN** depinde de viteza vântului (**V**) la puterea a treia:

$$P_{max} = K_p V^3 = M_{TVN} \cdot \omega \quad (3.22)$$

În zona de funcționare se poate considera o caracteristică mecanică liniară pentru **TVN** de forma:

$$M_{TVN} = a\omega + K_1 V^a \quad (3.23)$$

unde :-  $\omega$  - viteza unghiulară mecanică a axului **TVN**;

-  $a, K_1, a$  - coeficienți ce depind de geometria turbinei de vânt navale și care se calculează după datele de catalog, ca în exemplul de mai jos.

Coordonatele punctului de funcționare la putere maximă,  $M_{TVN}^*$  și  $\omega^*$ , se calculează din :

$$\frac{dP}{d\omega} = 0 \Rightarrow \omega^* = -\frac{K_1 V^a}{2a}; \quad M_{TVN}^* = \frac{K_1 V^a}{2} \quad (3.24)$$

și deci  $P_{max}$  are valoarea:

$$P_{max} = M_{TVN}^* \cdot \omega^* = -\frac{K_1 V^{2a}}{4a} = K_p V^3 \quad (3.25)$$

de unde rezultă  $a = 1.5$

**Exemplu**

Datele de catalog ale turbinei sunt [Monsson2010b]:

Turbină cu ax orizontal;

P= 5 KW;

$\omega_0 = 40(\text{rad} / \text{s})$  - viteza unghiulară la funcționarea în gol;

$\omega_{ref} = 30(\text{rad} / \text{s})$  - viteza unghiulară de referință la  $V = 5[m / s]$ ;

$M_{ref} = 5[Nm]$  - cuplul de referință la  $V = 5[m / s]$ .

La funcționarea în gol  $M_{TV} = 0$  și rezultă :

$$0 = a \cdot 40 + K_1 \cdot 5^{1.5}$$

iar la funcționarea la  $M_{ref} = 5[Nm]$  se obține:

$$5 = a \cdot 30 + K_1 \cdot 5^{1.5}$$

Din cele două ecuații de mai sus se obțin valorile

$$a = -0.5; K_1 = \frac{20}{5^{1.5}}$$

În final, caracteristica mecanică a **TVN** are ecuația :

$$M_{TVN} = -0.5\omega + 20\left(\frac{V}{5}\right)^{1.5}$$

și coordonatele punctului de putere maximă sunt :

$$\omega^* = -\frac{K_1 V^{1.5}}{2a} = 20[\text{rad} / \text{s}]$$

$$M_{TVN}^* = \frac{K_1 V^{1.5}}{2} = 10[Nm]$$

La o altă putere a **TVN**, ( forma constructivă a turbinei fiind aceeași), cuplul turbinei este de forma :

$$M_{TVN} = K_{TVN} \left[ -0,5\omega + 20\left(\frac{V}{5}\right)^{1,5} \right];$$

$$P_{TVN}^* = 49 \cdot 245 \left(\frac{V}{4}\right)^3$$

#### Caracteristici mecanice - verificări experimentale

Considerând caracteristica mecanică a **TVN** de forma,[Bej2003]:

$$M_{TVN} = a \cdot \omega + b \cdot V^{1.5}$$

se analizează cuplul turbinei de vânt navale pentru viteze ale vântului de  $4[m/s]$  și  $5[m/s]$ , ca în figura 3.7.

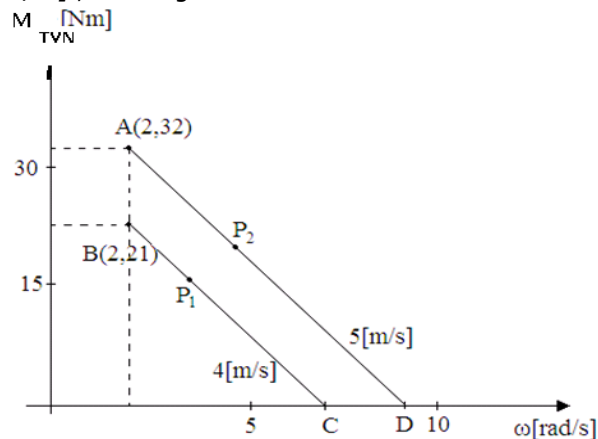


Fig.3.7 Caracteristicile  $M_{TVN}$  la 4 și 5 [m/s]

La viteza  $V = 4[m/s]$  caracteristica mecanică este dreapta **BC** (B(2,21) , C(7,0) ):



$$M_{TVN-4} = -4.2\omega + 29.4$$

iar la viteza  $V = 5[m/s]$  este dreapta **AD** ( $A(2,32)$ ,  $D(9,0)$ ):

$$M_{TVN-5} = -4.5714\omega + 41.143$$

Pentru  $V = 4[m/s]$  se obține punctul de putere maximă  $P_1$  de valoare:

$$P_1 = 51.45[W] \text{ la } \omega_1^* = 3.5[rad/s]$$

și la  $V = 5[m/s]$  punctul  $P_2$  de putere:

$$P_2 = 92.573[W] \text{ la } \omega_2^* = 4.5[rad/s]$$

Din cele două valori  $P_1$  și  $P_2$  se poate verifica relația ce dă dependența puterii maxime de cubul vitezei vântului, adică:

$$P = k \cdot V^3 \text{ sau}$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{k5^3}{k4^3} = \left(\frac{5}{4}\right)^3 = 1.9$$

Din datele punctelor de putere maximă  $P_1 = 51.45[W]$  și  $P_2 = 92.573[W]$  rezultă:

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{92.573}{51.45} = 1.8$$

valoare apropiată celei calculate: 1.9, (diferență de 5%).

În același mod se verifică și relația matematică a caracteristicii mecanice:

$$M_{TVN-4} = -4.2\omega + b \cdot V^a = -4.2\omega + b \cdot 4^a = -4.2\omega + 29.4$$

și:

$$M_{TVN-5} = -4.57\omega + b \cdot V^a = -4.5\omega + b \cdot 5^a = -4.5\omega + 41.143$$

Din cele două relații, folosind termenii liberi de forma  $b \cdot V^a$ , rezultă:

$$29.4 = b \cdot 4^a$$

$$41.143 = b \cdot 5^a$$

sau:

$$\frac{29.4}{41.143} = \left(\frac{4}{5}\right)^a$$

de unde:

$$a = 1.5$$

În concluzie, caracteristica mecanică a **TVN**, la o pantă medie  $4.38 = \frac{4.2+4.57}{2}$ , se calculează cu relația:

$$M_{TVN}^* = -4.38\omega + 29.4 \left(\frac{V}{4}\right)^{1.5} \quad (3.26)$$

Punctul de putere maximă, la viteza  $V$ , este dat de valorile:

$$\omega^* = 3.35 \left(\frac{V}{4}\right)^{1.5} - \text{viteză unghiulară}, \quad (3.27)$$

și

$$M_{TVN}^* = 14.7 \left(\frac{V}{4}\right)^{1.5} - \text{cuplul turbinei de vânt navale} \quad (3.28)$$

### 3.2.3. Generatorul sincron (GS)

Generatorul sincron se utilizează în sistemele energetice în două variante:

- cu excitația în curent continuu (**GScc**) și
- cu excitația cu magneți permanenți (**GSMP**).

#### A) Generatorul sincron cu excitația în curent continuu (GScc)

În regim dinamic **GS** cu excitația în curent continuu este caracterizat, în modelul ortogonal, de ecuațiile [Babescu2003]:

$$\left\{ \begin{array}{l} -U\sqrt{3} \sin\theta = R_d I_d + L_d \frac{dI_d}{dt} - \omega L_q I_q + M_E \frac{dI_E}{dt} + M_D \frac{dI_D}{dt} - \omega M_Q I_Q \\ U\sqrt{3} \cos\theta = \omega L_d I_d + R_q I_q + L_q \frac{dI_q}{dt} + \omega M_E I_E + \omega M_D I_D + M_Q \frac{dI_Q}{dt} \\ U_E = M_E \frac{dI_d}{dt} + R_E I_E + L_E \frac{dI_E}{dt} + M_{ED} \frac{dI_D}{dt} \\ 0 = M_D \frac{dI_d}{dt} + M_{ED} \frac{dI_E}{dt} + R_D I_D + L_D \frac{dI_D}{dt} \\ 0 = M_Q \frac{dI_q}{dt} + R_Q I_Q + L_Q \frac{dI_Q}{dt} \\ J \frac{d\omega}{dt} = p_1 [(L_d - L_q) I_d I_q + M_E I_q I_E - M_Q I_d I_Q + M_D I_q I_D] - M_{motor} \end{array} \right. \quad (3.29)$$

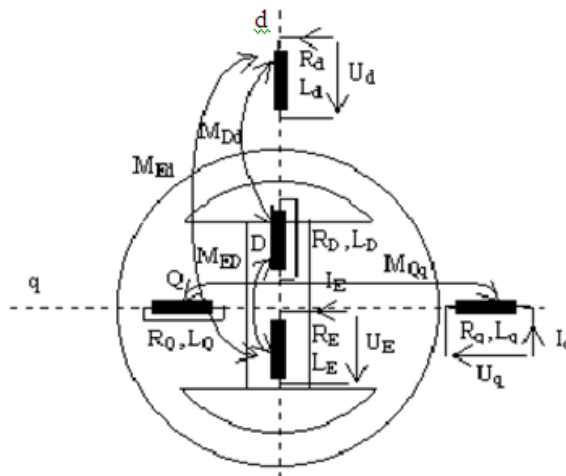


Fig.3.8. Modelul ortogonal al GS

Stabilitatea dinamică se analizează cu sistemul de ecuații diferențiale (3.29) în care condițiile inițiale se obțin din rezolvarea unui sistem algebric.

**Parametrii înfășurării de amortizare,  $R_D$ ,  $L_D$ ,  $R_Q$ ,  $L_Q$  influențează durata procesului tranzitoriu.**

La **GS** condițiile inițiale, (punctul inițial de funcționare), se deduc din sistemul algebric, definit de cuplul inițial  $M_{motor}$ :

$$\begin{cases} -U\sqrt{3} \sin \theta = R_I I_d - \omega L_q I_q \\ U\sqrt{3} \cos \theta = R_I I_q + \omega L_d I_d + \omega M_E I_E \\ M_{motor} = p_1 (L_d - L_q) I_d I_q + M_E I_q I_E \end{cases} \quad (3.30)$$

sau:

$$\begin{cases} \underline{U} = U_d + jU_q = R\underline{I} + j\omega\underline{\Psi}_s \\ \underline{I} = I_d + jI_q \\ \underline{\Psi}_s = \Psi_d + j\Psi_q = (L_d I_d + M_E I_E) + jI_q L_q \end{cases} \quad (3.31)$$

Deci în regim staționar:

$$\underline{U} = R\underline{I} + j\omega\underline{\Psi}_s \quad (3.32)$$

$$\text{iar la } \cos \varphi = 1 \text{ rezultă: } U = RI + \omega\Psi_s \quad (3.33)$$

Parametrii mașinii sunt:

$R_E$  – rezistența înfășurării de excitație

$R_D$  – rezistența înfășurării de amortizare din axa **d**

$R_Q$  – rezistența înfășurării de amortizare din axa **q**

$L_D$  – inductanța proprie a înfășurării de amortizare din axa **d**

$M_{ED}$  – inductanța mutuală dintre înfășurarea de excitație și înfășurarea **D**

$M_{Dd}$  – inductanța mutuală dintre înfășurarea statorică **d** și înfășurarea **D**

$L_Q$  – inductanța proprie a înfășurării de amortizare din axa **q**

$M_{Qq}$  – inductanța mutuală dintre înfășurarea statorică **q** și înfășurarea **Q**

$R_I$  – rezistența înfășurării statorice

$L_d$  – inductanța proprie a înfășurării statorice din axa **d**

$L_q$  – inductanța proprie a înfășurării statorice din axa **q**

$M_{Ed}$  – inductanța mutuală dintre înfășurarea de excitație și înfășurarea **d**

$L_E$  – inductanța proprie a înfășurării de excitație

$\Psi_{sN}$  – fluxul statoric nominal

Curentul de excitație  $I_E$  se poate modifica astfel încât  $\cos \varphi = 1$  și valoarea fluxului să fie cea nominală.

### **B) Generatorul sincron cu magneți permanenți (GSMP)**

În regim dinamic **GSMP** este caracterizat, în modelul ortogonal, de ecuațiile [Babescu2003]:

$$\left\{ \begin{array}{l} -U\sqrt{3} \sin \theta = R_d I_d + L_d \frac{dI_d}{dt} - \omega L_q I_q + M_D \frac{dI_D}{dt} - \omega M_Q I_Q \\ U\sqrt{3} \cos \theta = \omega L_d I_d + R_q I_q + L_q \frac{dI_q}{dt} + \omega M_D I_D + M_Q \frac{dI_Q}{dt} + \omega \Psi_{MP} \\ 0 = M_D \frac{dI_d}{dt} + R_D I_D + L_D \frac{dI_D}{dt} \\ 0 = M_Q \frac{dI_q}{dt} + R_Q I_Q + L_Q \frac{dI_Q}{dt} \\ J \frac{d\omega}{dt} = p_1 \left[ (L_d - L_q) I_d I_q + I_q \Psi_{MP} - M_Q I_d I_Q + M_D I_q I_D \right] - M_{motor} \end{array} \right. \quad (3.34)$$

unde  $\Psi_{MP}$  reprezintă fluxul magnetului permanent.

În acest caz  $L_d < L_q$ , datorită magnetului permanent care are  $\mu_r = 1$ .

Magnetul permanent se caracterizează, în cele ce urmează, prin fluxul  $\Psi_{MP}$  ( $\Psi_{MP} = M_E I_{EO}$ ) sau prin curentul de magnetizare echivalent  $I_{EO}$ .

Stabilitatea dinamică se analizează cu acest sistem de ecuații diferențiale, în care condițiile inițiale se obțin din rezolvarea sistemului algebric (3.30), care poate fi scris sub forma:

$$\left\{ \begin{array}{l} -U\sqrt{3} \sin \theta = R_1 I_d - \omega L_q I_q \\ U\sqrt{3} \cos \theta = R_1 I_q + \omega L_d I_d + \omega \Psi_{MP} \\ M_{motor} = p_1 (L_d - L_q) I_d I_q + I_q \Psi_{MP} \end{array} \right. \quad (3.35)$$

La generatoarele sincrone cu magneți permanenți (**GSMP**) nu se pot realiza simultan condițiile [Youg2004]:

$$\cos \varphi = 1$$

$$\Psi_S = \Psi_{SN}$$

Prin neglijarea rezistențelor statorice ( $R_1 \rightarrow 0$ ) și cu notațiile:

$$p = \sin \theta$$

$$q = \cos \theta$$

la tensiunea și frecvența nominale:

$$U\sqrt{3} = 400 [V], f = 50 [Hz]; \omega = 2\pi f = 314 \left[ \frac{rad}{s} \right]$$

se poate calcula fluxul magnetului permanent  $\Psi_{MP}$  astfel încât factorul de putere  $\cos \varphi$  să fie maxim ( $\cos \varphi = 1$ ).

Cuplul electromagnetic are valoarea:  $M_{elm} = 5 [N \cdot m]$ , iar parametrii generatorului sincron cu magneți permanenți sunt, [Monsson2010b]:

$$P_N = 5 [KW]; R = 1.6 [\Omega] U_N = 220 [V];$$

$$L_d = 0.07 [H]; L_q = 0.08 [H]$$

Înlocuind notațiile de mai sus și parametrii **GSMP** în sistemul algebric (3.35) rezultă sistemul:

$$\left\{ \begin{array}{l} -400p = -314 \cdot 0.08I_q \\ 400q = 314 \cdot 0.07I_d + 314 \cdot \Psi_{MP} \\ 5. = -0.01I_qI_d + \Psi_{MP}I_q \\ p^2 + q^2 = 1 \\ P = -400pI_d + 400qI_q \\ Q = 400pI_q + 400qI_d \\ \cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \\ \cos \varphi = 1. \end{array} \right. \quad (3.36)$$

și se obțin soluțiile:

$$I_q = 3.8109 [A]; I_d = -0.93936 [A]; p = 0.23933; q = 0.97094;$$

$$\Psi_{MP} = 1.3 [Wb]; P = 1570 [W]; Q = 0 [VAR]; \cos \varphi = 1$$

Se obține pentru fluxul magnetului permanent valoarea :

$$\Psi_{MP} = 1.3 [Wb]$$

iar pentru curenți valorile:

$$I_d = -0.939 [A]$$

$$I_q = 3.8 [A]$$

La generatoarele sincrone cu magneti permanenți funcționând la cuplul  $M_{motor} = M_{elmg}$  și la flux statoric dat ( $\Psi_{SN}$ ), ecuațiile de calcul pentru curenți sunt [Andreescu1999]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Psi_s^2 = (L_q I_q)^2 + (\Psi_{MP} + L_d I_d)^2 \\ M_{motor} = p_1 [(L_d - I_q) I_d I_q + \Psi_{MP} I_q] \end{array} \right. \quad (3.37)$$

**Fluxul magnetului permanent  $\Psi_{MP}$  se poate stabili astfel încât factorul de putere  $\cos \varphi$  să fie maxim.**

Funcționarea subsistemului (TVN+GS) la două valori ale vitezei vântului este prezentată în continuare:

### 1. CU GENERATOR SINCRON CU EXCITAȚIE IN CURENT CONTINUU(GScc)

Reglarea turației se face, în subsistemul (TVN+GScc) prezentat în figura (3.9), prin modificarea frecvenței la GScc, deoarece la GS turația este legată rigid de frecvență, astfel:

$$n = n_1 = \frac{f_1}{p_1} (p_1 - \text{numărul perechilor de poli}); \quad (3.38)$$

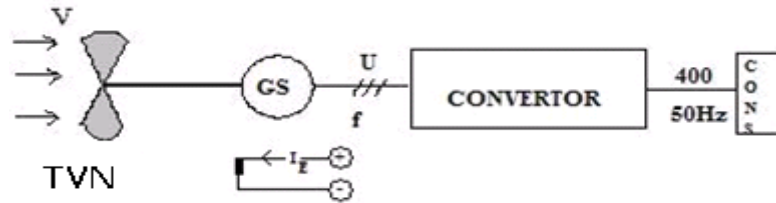


Fig.3.9. Schema bloc a subsistemului (TVN + GScc)

Prin modificarea frecvenței la **GScc** se realizează turația prescrisă  $n^*$  iar cuplul electromagnetic se poate mări prin curentul de excitație  $I_E$  al **GS**, astfel [Andreescu1996]:

$$M_{elmag} = p_1 \cdot M_E \cdot I_E \cdot I_q \quad (3.39)$$

Funcționarea în punctele de putere maximă  $P_1$  și  $P_2$  (figura 3.10), se realizează prin impunerea frecvenței la valorile :

$$f_1 = p_1 \cdot n_1 \quad (3.40)$$

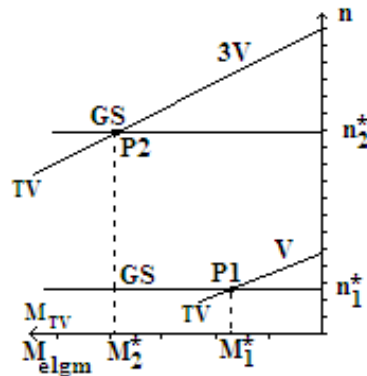


Fig.3.10. Puncte de funcționare ale subsistemului (TVN+GScc)

**Funcționarea în punctele de putere maximă se poate realiza prin reglarea frecvenței și curentului de excitație.**

**Avantaje:**

- 1) se poate regla separat puterea activă (prin cuplu) și cea reactivă (prin curentul de excitație), obținându-se de la **GS** necesarul de puteri;
- 2) reglajul turației la **TVN** se realizează direct din frecvența **GS**.

**Dezavantaje:**

- 1) dimensionarea **GS** trebuie realizată la valoarea maximă a vitezei vântului la care funcționează subsistemul (**TVN+GS**);
- 2) **GS** este mai scump decât **GA** și necesită pentru excitație o sursă de c.c.

## 2.CU GENERATOR SINCRO CU MAGNEȚI PERMANENȚI (GSMP)

În acest caz nu se mai poate modifica cuplul electromagnetic din excitație și valoarea acestuia depinde de tensiunea la borne  $U$ , așa cum se poate observa din

relațiile sistemului de ecuații 3.41[Biriescu1997].

$$\begin{cases} U\sqrt{3} \sin \theta = \omega L_q I_q \\ U\sqrt{3} \cos \theta = -\omega L_d I_d + \omega \psi_{MP} \\ M_{elmg} = p_1 \psi_{MP} I_q \end{cases} \quad (3.41)$$

sau

$$\begin{cases} U^2 = (\omega L_q I_q)^2 + (\omega \psi_{MP} - \omega L_d I_d)^2 \\ M_{elmg} = p_1 \psi_{MP} I_q \end{cases} \quad (3.42)$$

unde :

- $L_d, L_q$  - inductanțele sincrone după axa d și q ;
- $\psi_{MP}$  - fluxul magnetului permanent;
- $\omega = 2\pi f$  - (pulsția statorică).

**Stabilitatea punctelor de funcționare**

Se analizează stabilitatea punctelor de funcționare la sistemul (TVN+GSMP) prin metoda micilor oscilații în jurul poziției de echilibru stabil.

Conectăm la bornele GSMP o rezistență de sarcină,  $R_{sarcină}$ , care trebuie să fie variabilă pentru a funcționa la putere maximă, în condițiile unei viteze a vântului variabilă în timp. (vezi figura 3.11)

Se emite ipoteza că sistemul are un grad de libertate, rezistența  $R_{sarcină}$ , iar punctul de funcționare se deplasează foarte puțin din poziția de echilibru stabil, de exemplu prin modificarea lui  $R_{sarcină}$ .

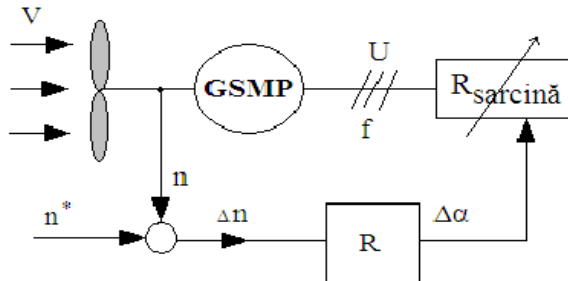


Fig.3.11. Schema bloc a subsistemul (TVN+GSMP+  $R_{sarcină}$ )

Dependența de viteza vântului V, a rezistenței de sarcină  $R_{sarcină}$ , astfel ca subsistemul (TVN+GSMP+  $R_{sarcină}$ ) să funcționeze în punctele de putere maximă, se calculează, pentru  $V=25[m/s]$ , cu ecuațiile:

$$\begin{cases} U_d = 1.6I_d - \omega \cdot 0.08I_q \\ U_q = 1.6I_q + \omega \cdot 0.08I_d + \omega \psi_{MP} \\ U_d = -RI_d \\ U_q = -RI_q \end{cases} \quad \text{TENSIUNILE STATORICE} \quad (3.43)$$

iar  $\left(-0.5\omega_{TVN} + 20 \cdot \left(\frac{V}{5}\right)^{1.5}\right) \frac{20}{314}$  (3.44)

reprezintă CUPLUL TURBINEI DE VANT NAVALE TVN

Din sistemul 3.43 și 3.44, considerând o viteză a vântului de  $V = 25 [m / s]$ , obținem sistemul de ecuații următor:

$$\left\{ \begin{array}{l} V = 25. \\ \omega_T = 20. \left(\frac{V}{5}\right)^{1.5} \\ U_d = 1.6I_d - \omega \cdot 0.08I_q \\ U_q = 1.6I_q + \omega \cdot 0.08I_d + \omega \Psi_{MP} \\ - \left(-0.5\omega_T + 20. \left(\frac{V}{5}\right)^{1.5}\right) \frac{20.}{314.} = \Psi_{MP}I_q \\ U_d = -RI_d \\ U_q = -RI_q \\ \omega = 314. \left(\frac{V}{5}\right)^{1.5} \\ \Psi_{MP} = 1.3 \\ \Psi_S^2 = (0.08I_q)^2 + (\Psi_{MP} + 0.08I_d)^2 \end{array} \right. \quad (3.45)$$

ale cărui soluții sunt:

$$V = 25 [m / s]; \Psi_{MP} = 1.3 [Wb]; \omega = 3510 [rad / s]; \omega_T = 223.61 [rad / s]; \\ I_q = -5.4779 [A]; I_d = -14.126 [A]; R = 107.31 [\Omega]; \Psi_S = 0.47 [Wb]; \\ U_q = 587 [V]; U_d = 1515 [V];$$

și:

$$V = 25 [m / s]; \Psi_{MP} = 1.3 [Wb]; \omega = 3510 [rad / s]; \omega_T = 223.61 [rad / s]; \\ I_q = -5.4779 [A]; I_d = -2.1243 [A]; R = 722.62 [\Omega]; \Psi_S = 1.2 [Wb]; \\ U_q = 3958 [V]; U_d = 1535 [V];$$

Deci funcționarea la  $V = 25 [m / s]$  și la  $M_{TVN} = 7.12 [Nm]$  este posibilă în două puncte de funcționare, pentru  $R_1 = 107.31 [\Omega]$  și  $R_2 = 722.62 [\Omega]$ .

Fluxurile statorice  $\Psi_S$  sunt:  $\Psi_S = 0.47 [Wb]$  în primul caz și  $\Psi_S = 1.2 [Wb]$  în cel de al doilea caz, (generatorul **GSMP** neavând excitație în c.c. nu se poate regla fluxul statoric la valoarea nominală).

În continuare sunt analizate punctele de funcționare  $P_1(R_1 = 107.31 [\Omega])$  și  $P_2(R_2 = 722.62 [\Omega])$ .

Cunoscând rezistențele de sarcină în punctele de funcționare  $P_1$  și  $P_2$  se construiește sistemul de ecuații:

$$\left\{ \begin{array}{l} RI_d = \omega L_q I_q \\ -RI_q = -\omega L_d I_d + \omega \Psi_{MP} \\ M_{elm} = P_1 \Psi_{MP} I_q \end{array} \right. \quad (3.46)$$

și se obțin valorile curenților:  $I_q = -\frac{\Psi_{MP} \cdot R \omega}{R^2 + (\omega L)^2}$ ,  $I_d = -\frac{\Psi_{MP} \cdot L \omega^2}{R^2 + (\omega L)^2}$  și ale



cuplului electromagnetic  $M_{elmg} = p_1 \Psi_{MP} I_q = -p_1 \Psi_{MP} \frac{\Psi_{MP} \cdot R \omega}{R^2 + (\omega L)^2}$ .

La valorile fluxului magnetului permanent  $\Psi_{MP} = 1.3[\text{Wb}]$ , și ale pulsației statorice  $\omega = 3510[\text{rad} / \text{s}]$ , rezultă cuplul sub forma:

$$M_{elmg} = \Psi_{MP} \frac{\Psi_{MP} \cdot R \omega}{R^2 + (\omega L)^2} = 1.3 \frac{1.3R \cdot 3510.6}{R^2 + (3510.6 \cdot 0.08)^2} = \frac{4563.78 \cdot R}{R^2 + 78875.59} \quad (3.47)$$

**Dependența cuplului de  $R_{\text{sarcină}}$**  se analizează în figura 3.12, observându-se că pentru un cuplu de valoare  $M_{elmg} = 7.12[\text{Nm}]$  se obțin două valori ale rezistenței de sarcină:  $R_1 = 107.31[\Omega]$  în punctul  $P_1$  și  $R_2 = 722.62[\Omega]$  în punctul  $P_2$ .

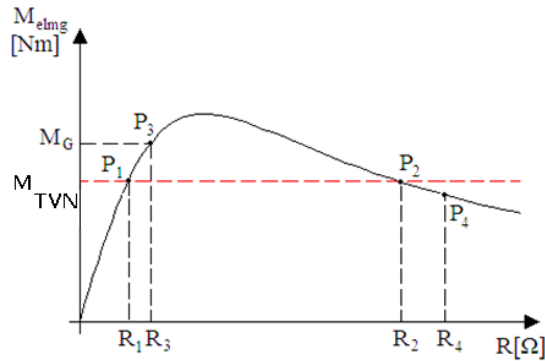


Fig.3.12. Dependența cuplului de rezistența de sarcină

Pentru a analiza punctul de funcționare  $P_1$  se consideră că rezistența  $R_1$  crește (prin încălzire) la  $R_3 = 110[\Omega]$  și deci cuplul generatorului devine:

$$M_G = 7.17 > M_{TVN} = 7.12[\text{N} \cdot \text{m}]$$

și din ecuația mișcării:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{TVN} - M_G \quad (3.48)$$

rezultă  $\frac{d\omega}{dt} < 0$  și deci  $\omega$  ar trebui să scadă, fenomenul fiind invers, așa cum rezultă din figurile 3.13 și 3.14, unde se reprezintă **dependența cuplului  $M_{elmg}$**  de pulsația  $\omega = 2\pi n$  ( $n$  -turația), folosind relațiile:

$$M_{elmg} = \Psi_{MP} \frac{\Psi_{MP} R \omega}{R^2 + (\omega L)^2};$$

$$M_{elmg1} = 1.3 \frac{1.3 \cdot 107.31 \omega}{107.31^2 + (\omega \cdot 0.08)^2};$$

$$M_{elmg2} = 1.3 \frac{1.3 \cdot 722.62 \omega}{722.62^2 + (\omega \cdot 0.08)^2};$$

$$M_{elmg3} = 1.3 \frac{1.3 \cdot 110 \omega}{110^2 + (\omega \cdot 0.08)^2};$$

$$M_{elm\,g4} = 1.3 \frac{1.3 \cdot 730 \omega}{730^2 + (\omega \cdot 0.08)^2}$$

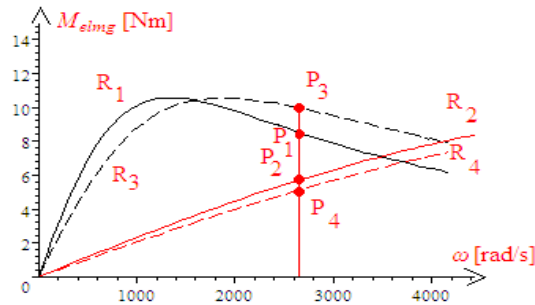


Fig. 3.13. Dependenta cuplului de pulsație (turație)

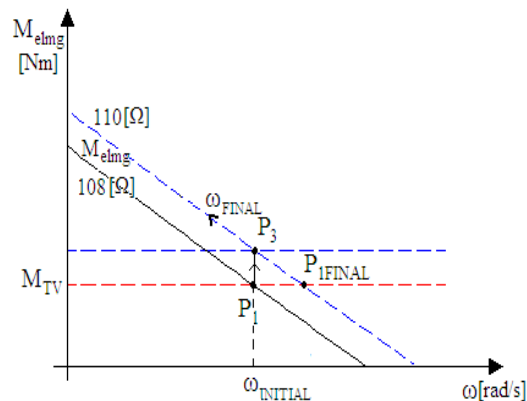


Fig.3.14. Dependenta cuplului de pulsație pentru rezistență de sarcină mică

Observând dependența cuplului **GSMP**,  $M_{elm\,g}$  de turație(pulsație), (figura 3.14), trecerea în punctul de funcționare  $P_{1FINAL}$  nu este posibilă deoarece presupune mărirea lui  $\omega$ , care însă scade, conform ecuației mișcării și deci  $\omega_{FINAL}$  se îndepărtează de  $\omega_{INITIAL}$ . Punctul de funcționare nu se mai stabilizează în  $P_{1FINAL}$ .

În concluzie, funcționarea în  $P_1$ , (la valoarea mică:  $R_1 = 108.91[\Omega]$ ), este **INSTABILĂ**, la același rezultat ajungându-se prin folosirea criteriilor de stabilitate cunoscute: ROUTH, HURWITZ, [Proștean2003].

Funcționarea în  $P_{2FINAL}$  este **STABILĂ** deoarece prin mărirea lui  $R_2$ , (la  $R_4 = 730[\Omega]$ ), cuplul la **GSMP** devine:  $M_{elm\,g} = 7.079 [Nm]$ , (punctul  $P_4$ ), deci mai mic ca al **TVN**:  $M_{TVN} = 7.12 [Nm]$ . În aceste condiții, turația va crește de la  $\omega_{INITIAL}$  la  $\omega_{FINAL}$  (figura 3.15).

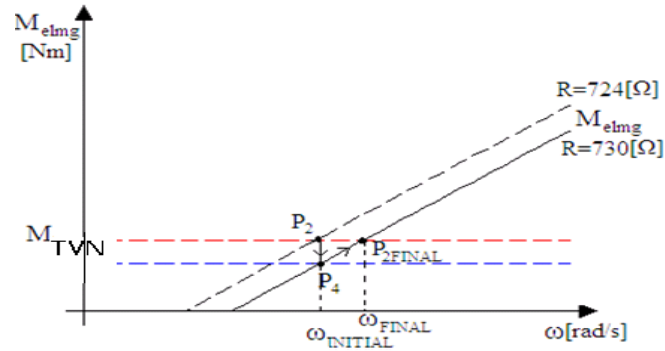


Fig.3.15. Dependența cuplului de pulsație pentru rezistență de sarcină mare

În concluzie, **funcționarea subsistemului este STABILĂ** pentru valori mari ale rezistenței de sarcină. În această variantă și fluxul statoric este apropiat celui nominal.

### 3.2.3.1. Problema fluxului statoric la GSMP. Demagnetizarea MP

Cuplul maxim ce-l poate dezvolta generatorul **GSMP** rezultă la valoarea maximă a curentului  $I_q$  obținut din relațiile de mai jos :

$$U^2 = (\omega L_q I_q)^2 + (\omega \Psi_{MP} - \omega L_d I_d)^2 = (\omega L_q I_q)^2 \quad (3.49)$$

$$I_q = \frac{U}{\omega L_q} \quad (3.50)$$

La curentul  $I_d$  obținut din relația:

$$\omega \Psi_{MP} - \omega L_d I_d = 0 \quad (3.51)$$

respectiv

$$I_d = \frac{\Psi_{MP}}{L_d} \quad (3.52)$$

se obține valoarea maximală a cuplului :

$$M_{elmgMAX} = \frac{p_1 \Psi_{MP} U}{\omega L_q} = \frac{p_1 \Psi_{MP} \Psi_{statoric}}{L_q} \quad (3.53)$$

care depinde de :

- tensiunea la borne  $U$  ;
- fluxul magnetului permanent  $\Psi_{MP}$  ;
- fluxul statoric  $\Psi_{statoric}$  .

#### Avantaje:

1) prin folosirea **MP** (magneților permanenți), se elimină circuitul de excitație din rotor și deci **GSMP** este mai ieftin ca **GScc.**;

2) se poate alege fluxul **MP** astfel încât să se acopere necesarul de putere reactivă din sistem, la o anumită viteză a vântului.

#### Dezavantaje:

1) nu se poate regla puterea reactivă după necesitățile impuse de

consumator;

2) la demagnetizare **GSMP** nu mai funcționează și deci în exploatare trebuie, în permanență, estimat curentul reactiv al **GSMP** astfel încât să nu apară fenomenul de demagnetizare.

Fluxul statoric al curentului de magnetizare  $I_d^*$  din axa - d -, în anumite situații, demagnetizează **MP**.

Fluxul din axa - d - în cazul general, are expresia:

$$\Psi_d = L_d I_d + M_{Ed} I_E + M_{Dd} I_D \quad (3.54)$$

iar în regim staționar  $I_D = 0$  și se obține:

$$\Psi_d = L_d I_d + M_{Ed} I_E \quad (3.55)$$

În cazul magnetului permanent **MP** fluxul  $\Psi_d$  se scrie sub forma:

$$\Psi_d = L_d I_d + \Psi_{MP} \quad (3.56)$$

și devine nul când:

$$L_d I_d = -\Psi_{MP} \quad (3.57)$$

Așadar, la anumite valori ale curentului de magnetizare  $I_d^*$  apare demagnetizarea **MP**:

$$I_d^* = \frac{-\Psi_{MP}}{L_d} \quad (3.58)$$

**Funcționarea la un factor de putere unitar** se poate realiza prin dimensionarea potrivită a magnetului permanent **MP**, astfel;

- puterea activă:  $P = -U_d I_d - U_q I_q$  și

- puterea reactivă:  $Q = -U_q I_d + U_d I_q$

se obțin din puterea aparentă

$$\underline{S} = \underline{U} \cdot \underline{I}^* = (U_d + jI_q)(-I_d + jI_q) = -U_d I_d - U_q I_q + j(U_q I_q - U_d I_d)$$

și deci factorul de putere se poate calcula din:

$$\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}$$

În continuare se tratează un exemplu numeric de dimensionare a magnetilor permanenți ai GS pentru un  $\Psi_{MP} = 1.3 [Wb]$  și un factor de putere unitar  $\cos \varphi = 1$ :

**GSMP - COS  $\varphi = 1$**

$$\cos \varphi = 1, \Psi_{MP} = 1.3 [Wb], L_d = 0.07 [H], L_q = 0.08 [H]$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 400p = -314 \cdot 0.08 I_q \\ 400q = -314 \cdot 0.07 I_d + 314 \cdot \Psi_{MP} \\ 5. = -0.01 I_q I_d - \Psi_{MP} I_q \\ p^2 + q^2 = 1 \\ P = 400p I_d - 400q I_q \\ Q = -400p I_q - 400q I_d \\ \cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \\ \cos \varphi = 1. \end{array} \right.$$

Soluțiile sistemului sunt:

$$Q = 0 [\text{VAR}] ; p = 0.23933 ; q = 0.97094 ; I_d = 0.93936 [\text{A}] ;$$

$$I_q = -3.8109 [\text{A}] ; \Psi_{MP} = 1.3026 [\text{Wb}] ; \cos \varphi = 1 ; P = 1570 [\text{W}] ;$$

**Se poate dimensiona MP astfel încât să se realizeze un factor de putere unitar**

Pentru un magnet permanent cu:

$$\Psi_{MP} > 1.3 [\text{Wb}] \text{ (de exemplu } \Psi_{MP} = 1.6 [\text{Wb}] \text{ )}$$

generatorul **GSMP** devine **supraexcitat**, dă putere reactivă:

$$Q = -1729 [\text{VAR}] ,$$

iar la:

$$\Psi_{MP} < 1.3 [\text{Wb}] \text{ (de exemplu } \Psi_{MP} = 1.0 [\text{Wb}] \text{ )}$$

devine **subexcitat**, (absoarbe putere reactivă):

$$Q = 1777 [\text{VAR}]$$

așa cum se poate observa din aplicațiile următoare.

**GSMP-SUPRAEXCITAT**

$$\cos \varphi = 0.67217, \Psi_{MP} = 1.6 [\text{Wb}]$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 400p = -314 \cdot 0.08I_q \\ 400q = -314 \cdot 0.07I_d + 314 \cdot \Psi_{MP} \\ 5 = -0.01I_qI_d - \Psi_{MP}I_q \\ p^2 + q^2 = 1 \\ P = 400pI_d - 400qI_q \\ Q = -400pI_q - 400qI_d \\ \cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \\ \Psi_{MP} = 1.6 \end{array} \right.$$

$$Q = -1729.4 [\text{VAR}] ; p = 0.19031 ; q = 0.98172 ; I_d = 4.9914 [\text{A}] ;$$

$$I_q = -3.0305 [\text{A}] ; \Psi_{MP} = 1.6 [\text{Wb}] ; \cos \varphi = 0.67217 ; P = 1570 [\text{W}] ;$$

**GSMP-SUBEXCITAT**

$$\cos \varphi = 0.66209, \Psi_{MP} = 1.0 [\text{Wb}]$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 400p = -314 \cdot 0.08I_q \\ 400q = -314 \cdot 0.07I_d + 314 \cdot \Psi_{MP} \\ 5 = -0.01I_qI_d - \Psi_{MP}I_q \\ p^2 + q^2 = 1 \\ P = 400pI_d - 400qI_q \\ Q = -400pI_q - 400qI_d \\ \cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \\ \Psi_{MP} = 1.0 \end{array} \right.$$

$$Q = 1777.1[\text{VAR}]; p = 0.32349; q = 0.94623; I_d = -2.9341 [\text{A}];$$

$$I_q = -5.1511[\text{A}]; \Psi_{MP} = 1[\text{Wb}]; \cos \varphi = 0.66209; P = 1570 [\text{W}];$$

**Valorile cuplului, tensiunii, frecvenței și fluxului magnetului permanent determină nivelul de excitație**

Diagramele fazoriale pentru cele două cazuri, supraexcitat și subexcitat, sunt prezentate în figurile 3.16 și 3.17:

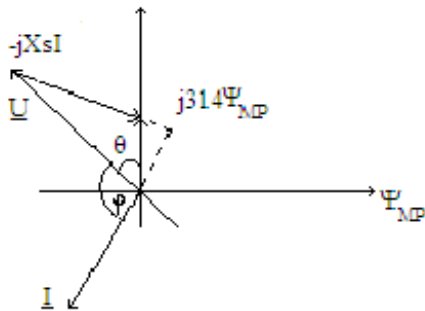


Fig.3.16. GSMP subexcitat

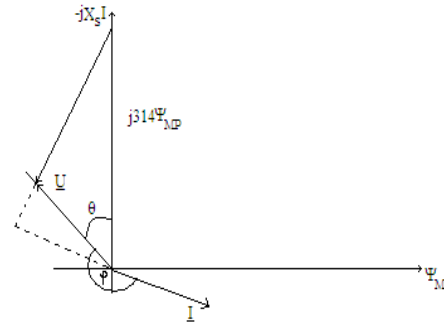


Fig. 3.17. GSMP supraexcitat

### 3.2.4. Bateria solară (BS)

Energia anuală primită de la SOARE este cu mult mai mare decât energia globală consumată de populație, așa cum se poate observa din figura 3.18.

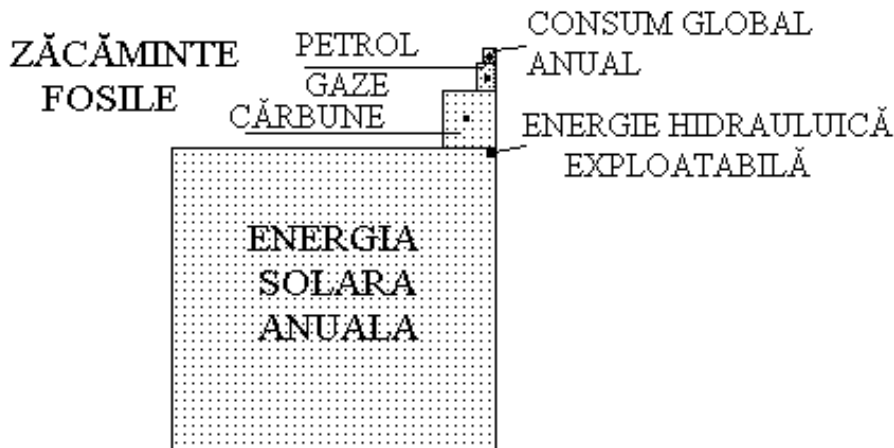


Fig.3.18. Energia solară anuală

Consumul global anual este cu mult mai mic decât energia primită și se bazează, în principal, pe cărbune, petrol și gaze (și în ultima perioadă pe energia nucleară).

Energia hidraulică exploatabilă reprezintă o cotă extrem de redusă din energia solară anuală ajunsă pe Pământ.

Energia eoliană, ca și cea hidraulică, provine din energia solară și sunt, în prezent, atrase tot mai mult în circuitul energetic.

Fluxul de energie de la SOARE scade treptat ca urmare a degradării sale entropice[Andea2010a]. Omul va trebui să înțeleagă, tot mai mult, că depinde de SOARE, el însuși fiind un "dar" solar.

În prezent, randamentele celulelor solare sunt în jurul valorii de 15%:  $\eta = 0.15$

Amortizarea unei instalații solare ce produce energie electrică este de 10 ÷ 15 ani, cu tendințe de scădere prin îmbunătățirea randamentului și prin scăderea prețului de cost la bateriile solare. Radiația solară pe o suprafață de  $1[m^2]$  este în intervalul  $1.3 \div 1.4 [KW/m^2]$  în spațiu extraterestru, ( $1.4 [KW/m^2]$  la 21 iunie și la 21 decembrie) și în jur de  $1 [KW/m^2]$  pe Pământ, la cer senin.

**Puterea electrică ce se poate obține de la Soare pe un  $m^2$  este în prezent de aproximativ 150[W]**

În România media multianuală pe  $-m^2-$  a energiei solare disponibile are valoarea:

$$E_{an} = 1100 \left[ \frac{KWh}{m^2} / an \right]$$

fiind aproximativ la jumătatea intervalului POL-ECUATOR:

$$E_{POL} = 0 \div 200 \left[ \frac{KWh}{m^2} / an \right]$$

$$E_{ECUATOR} = 2200 \left[ \frac{KWh}{m^2} / an \right]$$

Transformarea directă a energiei solare în energie electrică se bazează pe efectul fotoelectric(fig. 3.19), care constă din dislocarea unui electron din atomul semiconductorului de tip- $p$ -sub acțiunea fotonului de energie  $h\nu$  ( $h = 6.63 \cdot 10^{-34}$  [Js]-constanta lui Planck;  $\nu$  - frecvența undei fotonului) [Jiao2001].

Valoarea frecvenței ( $\nu$ ) fotonului incident trebuie să fie cuprinsă între anumite limite astfel încât energia fotonului  $-h\nu-$  să fie suficient de mare ca să scoată din **groapa de potențial** a atomului,electronul ce devine astfel liber, dar să fie mai mică decât energia fotonului ce trece prin rețeaua cristalină a semiconductorului  $-p-$ , fotonul devenind în acest caz neutru.

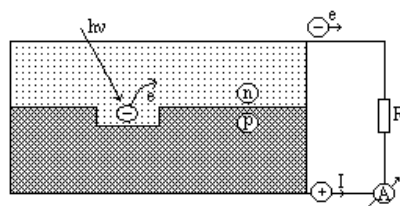


Fig.3.19. Efectul fotoelectric

Energia fotonului este maximă în domeniul **ultraviolet** ( $\nu = 10^{15}$  [Hz]) și minimă în domeniul **infraroșu** ( $\nu = 2 \cdot 10^{14}$  [Hz]):

$$E_{ultraviolet} = h \cdot \nu = 6.63 \cdot 10^{-19} [J] = 4.1 [eV]$$

$$E_{inf\ rarosu} = h \cdot \nu = 1.3 \cdot 10^{-19} [J] = 0.8 [eV]$$

deoarece electronul are sarcina:

$$e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ [As]}$$

și constanta lui Planck este:

$$h = 6.63 \cdot 10^{-34} \text{ [Js]}$$

Energia **fotonului "ultraviolet"** trebuie să fie suficient de mare pentru a **scoate electronul din groapa de potențial** în care se afla în atomul semiconductorului  $-p-$  și să-i imprime o energie suficient de mare ca acest **electron, devenit liber**, să treacă prin rezistența de sarcină  $-R-$ , ajungând în final în semiconductorul  $-p-$  unde se recombina și revine, astfel, în **groapa de potențial** de unde a fost dislocat de fotonul de energie  $-h\nu-$  **inițial**.

Electronii din semiconductorul  $-p-$ , ca urmare a absorbției energiei fotonilor incidenti, devin liberi, parcurgând semiconductorul  $-n-$ , rezistența de sarcină  $-R-$  și ajung din nou în semiconductorul  $-p-$  unde se recombina cu **golurile** de aici, formând, astfel, atomi neutri (figura 3.20).

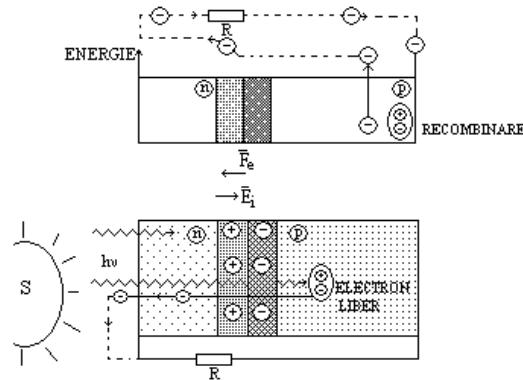


Fig.3.20. Parcursul electronului fotoelectric

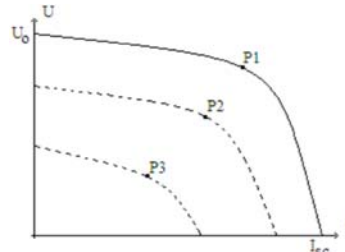
Pe parcursul său **electronul liber parcurge stări energetice din ce în ce mai mici**, starea de energie maximă având-o după ce a trecut zona de contact  $p-n$ , iar cea minimă la recombinația cu golul pozitiv din semiconductorul  $-p-$ .

**Energia fotonului  $-h\nu-$  se regăsește în energia electrică din rezistența de sarcină  $R$ .**

În concluzie, apariția curentului electric  $-I-$  (mișcarea ordonată de electroni), se bazează pe **principiul energiei minime**, în sensul că în natură orice sistem fizic ocupă poziția de energie minimă și poate fi scos din această poziție doar prin consum de energie, în cazul de față energia fotonului  $-h\nu-$ .

**Caracteristicile externe  $-U = f(I)-$**  ale bateriei solare se modifică în funcție de oră, de nebulozitatea din atmosferă și pot fi de forma celor din figura 3.21. [Jiao2001].



Fig.3.21. Caracteristici  $U=f(I)$  la BS

Caracteristica  $U = f(I)$  cu punctul de putere maximă  $P_1$  corespunde radiației solare maxime :  $E_1 = 1 [KW / m^2]$ .

Caracteristica  $U = f(I)$  cu punctul de putere maximă  $P_2$  corespunde radiației solare, de exemplu:  $E_2 = 0.8 [KW / m^2]$ , iar cea cu putere maximă  $P_3$  unei radiații solare  $E_3 = 0.6 [KW / m^2]$ .

Cu modificarea curentului de sarcină -  $I$  - puterea obținută de la o baterie solară se modifică semnificativ, (figura 3.22), atingând o valoare maximală la curentul  $I^*$  ( $U^* I^* = P_{max}$ ).

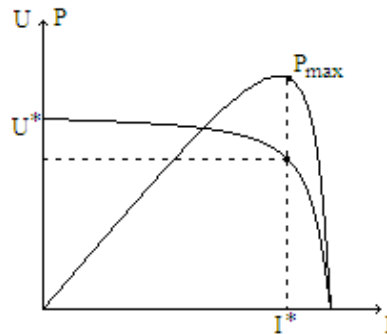


Fig.3.22. Caracteristicile puterii

Conducerea subsistemului cu **BS** trebuie să realizeze mereu funcționarea la  $P_{max}$  mai ales că această valoare se modifică în permanență în funcție de gradul de insolație (nori, ceață, poluare).

#### **Coordonatele punctului de putere maximă, (tensiune $U^*$ , curent $I^*$ ), depind de gradul de insolație**

Așadar, puterea primită de la Soare se modifică continuu și subsistemul (**BS+DCDC+AE**) trebuie să fie astfel reglat încât să funcționeze în punctul de putere maximă.

#### **Comparație între un sistem fix și unul mobil de baterii solare**

Calculul simplificat al raportului dintre energia captată de o baterie solară fixă și energia unei baterii cu sistem de urmărire a mișcării Soarelui pe cer se bazează numai pe unghiul  $\alpha$  dintre raza solară și orizontala locului (la momentul

de timp  $t$ ).

În figura 3.23 se prezintă o baterie solară fixă, care la momentul  $A$ , corespunzător unghiului  $\alpha$ , va avea suprafața perpendiculară pe razele Soarelui de valoare:

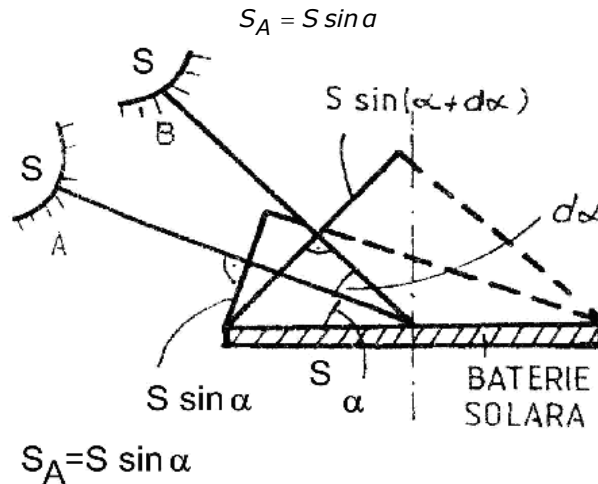


Fig.3.23. Baterie solară fixă.

iar la momentul B corespunzător unghiului  $\alpha + da$ , suprafața este :

$$S_B = S \cdot \sin(\alpha + da) = S \cdot (\sin \alpha + da \cdot \cos \alpha) \quad (3.59)$$

Considerând mișcarea aparentă a Soarelui pe cer de la răsărit la apus în intervalul de timp  $T$ , se poate scrie :

$$\alpha \cdot T = \pi \quad (3.60)$$

și deci :

$$da = \omega \cdot dt = \frac{\pi}{T} \cdot dt \quad (3.61)$$

**Bateriile solare fixe dau doar 60% din puterea electrică disponibilă**

Energia captată în intervalul de timp  $dt$ , la unghiul  $\alpha$ , va fi :

$$dW_1 = K_S \cdot S_A \cdot dt \cong K_S \cdot S \cdot \sin \alpha \cdot dt \quad (3.62)$$

unde :  $K_S$  - constanta solară ( $1 [KW / m^2]$  la cer senin) ;

Energia totală rezultată prin integrare este :

$$W_1 = 2 \cdot \int_0^{\frac{T}{2}} K_S \cdot \sin \alpha \cdot dt = 0.63 \cdot K_S \cdot S \cdot T \quad (3.63)$$

Energia la o baterie solară cu sistem de urmărire este :

$$W_2 = K_S \cdot S \cdot T \quad (3.64)$$

deoarece suprafața este tot timpul orientată perpendicular pe razele Soarelui.

Prin urmare raportul energiilor are valoarea :

$$\frac{W_1}{W_2} = 0.63$$

adică cu 37% mai multă energie captează un sistem mobil față de unul fix,

făcându-l competitiv economic pe cel mobil la puteri mari în zone cu perioade lungi cu cer senin.

**Concluzie:** Știind că nava reprezintă un sistem mobil, implementarea bateriilor solare la bordul acesteia va conduce la un maxim de energie captată de la soare, ceea ce o va face competitivă din punct de vedere economic.

### 3.2.5. Convertorul DC-DC

**Convertorul DC-DC** realizează trecerea de la tensiunea  $U$ , de la **(BS)**, la tensiunea de la bateria de acumulare,  $U_A$ .

Acesta asigură funcționarea în punctul de putere maximă, caracterizat prin tensiunea  $U^*$  și curentul  $I^*$  indiferent de condițiile meteo.

Puterea debitată de subsistemul **(BS)** se va înmagazina în **AE**, realizându-se astfel egalitatea [Celanovic2001]:

$$UI = U_A I_A \quad (3.65)$$

Considerând dependență liniară între mărimea de intrare  $U$  de la convertorul **DC - DC** și mărimea de ieșire  $U_A$ , (tensiunea de la AE), se poate scrie:

$$U = K_{CC} \cdot U_A \quad (3.66)$$

#### **Adaptarea tensiunii de la BS la AE se face prin convertorul DC-DC**

În convertorul **DC-DC** din figura 3.24, stocarea energiei electromagnetice în procesul tranzitoriu de comutație, are loc în condensatoarele **C1** și **C2** și în inductanța **L**, [Celanovic2000].

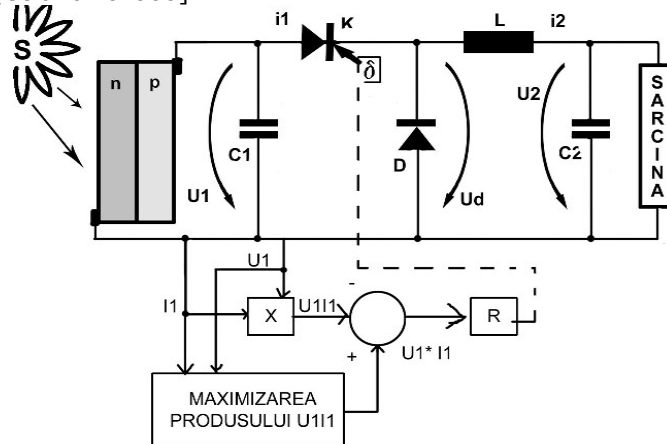


Fig.3.24. Convertor DC-DC cu capacități

Prin blocul de calcul **MAXIMIZAREA PRODUSULUI**  $U_1 I_1$  se realizează funcționarea în jurul punctului de putere maximă, în sensul că se modifică în pași durata de conducție la elementul de comutație **K**. Se reține valoarea unghiului de comutație  $\delta$  care asigură maximizarea produsului  $U_1 I_1$ . Cu acest unghi de comutație  $\delta$ , subsistemul **-BS-AE-** funcționează până când se modifică valoarea insolației.

Prin regulatorul **-R-**, ce are la intrare diferența  $U_1 I_1^* - U_1 I_1$  (valoare maximă) -

$U_1 I_1$  (valoare curentă), se modifică valoarea unghiului de comandă  $\delta$  a convertorului **DC-DC**.

Valoarea medie a curentului  $i_2$  depinde de timpul de conducție  $T_c$  a elementului de comutație  $K$ , fiind [Qiao2009]:

$$I_{2med} = I_R \frac{T_c}{T} = I_R \cdot \delta \quad (3.67)$$

unde:  $I_R = U_1 / R \quad (3.68)$

$$\delta = \frac{T_c}{T}. \quad (3.69)$$

Variațiile în timp ale curentului  $i_2$  și ale tensiunii de pe dioda  $D$ ,  $U_D$ , sunt date în figura 3.25.

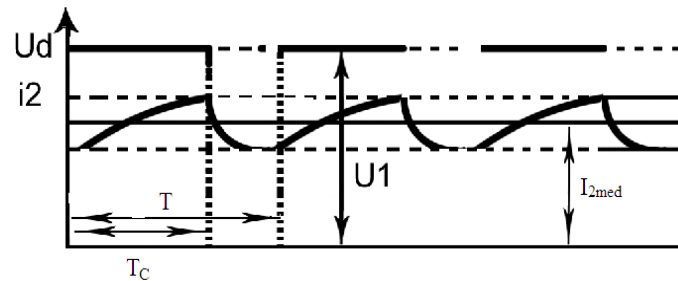


Fig.3.25. Variația curentului  $i_2$  și a tensiunii  $U_D$

Tensiunea pe sarcina  $R$ ,  $U_2$  se poate calcula din expresia:

$$U_2 = U_1 \frac{T_c}{T} = U_1 \delta \quad (3.70)$$

Valoarea inductanței  $-L-$  se determină astfel [Qiao2009]:

$$L = T \left(1 - \frac{U_2}{U_1}\right) \frac{U_2}{2I_{2lim}} \quad (3.71)$$

unde  $I_{2lim}$  = curentul limită minimal prin sarcină.

**Valoarea inductanței  $L$  a convertorului DC - DC depinde de rapoartele  $\frac{U_2}{U_1}$  și  $\frac{U_2}{I_{2minim}}$**

La neglijarea pierderilor de putere în convertorul **DC-DC**, puterea se conservă și deci :

$$U_1 I_1 = U_2 I_2 \quad (3.72)$$

La valori mici ale curentului  $-I_2-$  rezultă tensiuni  $-U_2-$  mari și deci inductanța  $-L-$  trebuie dimensionată corespunzător, fiind proporțională cu valoarea tensiunii  $U_2$  [Ackermann2002].

### 3.2.6. Acumulatorii electrice (AE)

Circuitul echivalent al unui acumulator acid cu plumb (figura 3.26) este format din elemente ce depind de **SOC (starea de încărcare)**, temperatura  $-\theta-$  și de valoarea curentului  $-I-$

**SOC** poate fi estimată prin valorile tensiunii  $-U_{AE}-$  de la bornele

acumulatorului:

$U_{AE} > 14.4[V]$  - baterie încărcată complet,

$U_{AE} = 13.5 \div 14.1[V]$  - funcționare în gol,

$U_{AE} = 12.0 \div 14.1[V]$  - funcționare în sarcină,

$U_{AE} = 11.5 \div 12.7[V]$  - descărcare normală,

$U_{AE} < 11.4[V]$  - baterie descărcată.

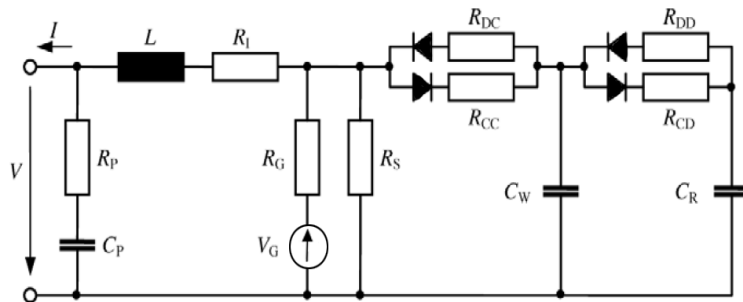


Fig.3.26. Circuitul echivalent la un AE acid

Rezistențele **-R-** din circuitul echivalent se calculează cu relația :

$$R(\theta, I, SOC) = R_0 r(\theta) r(SOC) r(I)$$

unde :

$r(\theta)$  - factor dependent de temperatura **AE**;

$r(SOC)$  - factor dependent de **SOC**;

$r(I)$  - factor dependent de curentul de încărcare  $I$  .

Semnificațiile fizico-chimice ale parametrilor și valorile lor pentru un AE cu plumb sunt :

$L = 9[\mu H]$  - inductanța dintre electrozi,

$R_{I0} = 50[m\Omega]$  - rezistența metalo-ionică dintre electrozi,

$R_p = 1.4[\Omega]$  - rezistența de polarizare,

$C_p = 1[\mu F]$  - capacitatea de polarizare,

$R_{GO} = 765[m\Omega]$  - rezistența dintre electrozi în absența "fierberii"

electrolitului (în faza inițială);

$V_G = 2.4[V]$  - tensiunea electromotoare inițială;

$R_S = 5 \div 10[K\Omega]$  - rezistența datorită impurităților din electrolit;

$R_{DCO} = 25[m\Omega]$  - rezistența chimică a electrozilor  $P_bSO_4$  la descărcare;

$R_{CCO} = 140[m\Omega]$  - rezistența chimică a  $P_bSO_4$  la încărcare;

$R_{DDO} = 40[m\Omega]$  - rezistența chimică a electrolitului la descărcare;

$R_{CDO} = 40[m\Omega]$  - rezistența chimică a electrolitului la încărcare;

$C_W = 20 \div 50[F]$  - capacitatea în timpul funcționării;

$C_R = 20[KF]$  - capacitatea în timpul stocării.

**Tensiunea internă  $V_G$  este dată de diferența potențialelor anodului  $E_a$  și catodului  $E_c$ .**

Schema electrică simplificată a unui **AE** (figura 3.27) se obține prin neglijarea parametrilor  $C_p, R_p, L$  și unificând  $R_{DC}$  și  $R_{CC}$  (respectiv  $R_{DD}$  și  $R_{CD}$ ).

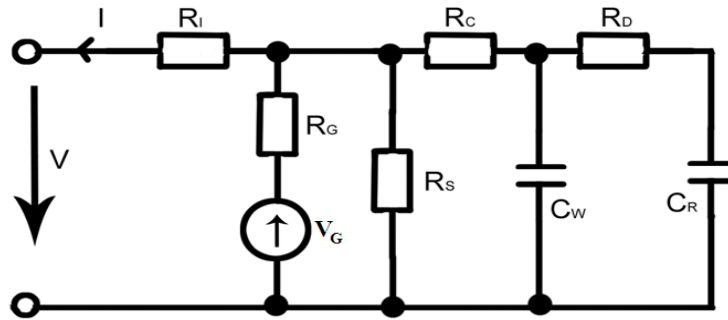


Fig.3.27. Schema electrică simplificată la AE

Rezistența electrozilor **Rc** la descărcare are valoarea:

$$R_C = 25[m\Omega]$$

iar la încărcare este :

$$R_C = 140[m\Omega]$$

Rezistența electrolitului  $R_D$  este:

$$R_D = 40[m\Omega]$$

Schemele din figurile 3.26 și 3.27 sunt aplicabile atât în c.c. cât și în curent variabil în timp, atunci când peste componenta continuă se suprapun armonicile superioare :1,2,3,4...

**Prin reactanțele capacitive trec curenți importanți la frecvențe înalte**  
Reactanțele capacitive:

$$X_C = \frac{1}{\omega C}$$

în cazul armonicilor superioare devin foarte mici.

La o funcționare (încărcare/descărcare) riguroasă în c.c., schema electrică a **AE** se simplifică, în componența ei rămânând doar rezistențe(figura 3.28).

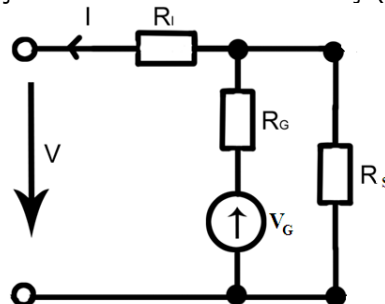


Fig.3.28. Schema electrică la c.c.

Alimentarea în șocuri cu energie a acumulatorilor electrice(**AE**),impuse de variația importantă a vitezei vântului este indicată deoarece se micșorează

rezistența de polarizare  $R_p$  a **AE**.

### 3.3. Concluzii

S-au obținut modele matematice la turbina de vânt, bateria solară, convertoare de putere, acumulatori electrice, motor DIESEL în aplicația navală analizată. Pe baza unor exemple numerice s-au scos în evidență stabilitatea punctelor de funcționare în sistemele eoliene, deoarece funcționarea **GSMP** poate să fie în două puncte funcționare așa cum se observă din figurile explicative date. S-a analizat de asemenea și problema demagnetizării **MP** la bateria solară s-a definit punctul de putere maximă și s-a stabilit o metodă de a funcționa în acest punct, astfel încât puterea obținută de la soare să fie mereu maximă.

În acest capitol, principalele contribuții personale sunt :

- Stabilirea modelelor matematice ale turbinei de vânt **TV** dependent de viteza vântului ;
- Stabilirea naturii punctului de funcționare (stabil/instabil) la **GSMP**;
- Analizarea variațiilor fluxului statoric la **GSMP** cu consecințe privind demagnetizarea **MP**.





## 4. Fenomene tranzitorii în subsistemul (TVN+GSMP+AE)

În capitolul 4 se analizează conducerea subsistemului electroenergetic (TVN+GSMP+AE). Performanțele dinamice ale sistemului sunt analizate având în vedere diverse funcții de variație a vitezei vântului. Generatorul sincron trebuie astfel condus încât să se obțină funcționarea în punctele de putere maximă. Se analizează ponderea înfășurărilor de amortizare în evoluția proceselor tranzitorii.

Sistemul electroenergetic complet : **Diesel+Vânt+Solar** trebuie condus astfel încât subsistemele componente:

- subsistemul eolian (**TVN+GSMP+AE**);
  - subsistemul solar (**BS+AE**);
  - subsistemul Diesel (**MD+GSMP**);
- să funcționeze la parametrii optimi.

Aceasta impune captarea cu randamente maxime a energiilor eoliene și solare, subsistemul (**MD+GSMP**) fiind folosit doar ca sursă complementară de energie, funcționând doar când acumulatele electrice **AE** sunt la capacitatea minimă admisă și nu pot satisface consumatorii electrici.

### 4.1. Conducerea subsistemului (TVN+GSMP+AE)

Conducerea subsistemului (**TVN+GSMP+AE**) trebuie realizată astfel încât puterea captată de turbina de vânt navală **TVN** să fie maximă, la o anumită viteză a vântului.

#### 1) Problema vitezei vântului

Determinarea experimentală a vitezei vântului **V(t)** se face folosind un **ANEMOMETRU** care, la momente de inerție mici, dă valoarea momentană a vitezei. Prin integrarea funcției  $V(t)$ , pe un interval de timp de ordinul minutelor, (interval ce depinde direct proporțional de valoarea momentului de inerție echivalent **J**) se poate estima viteza medie  $V_{mediu}$ , valoare ce se poate folosi în determinarea rezistenței de sarcină  $R_{sarcină}$ . Se impune, însă, o precizare importantă:

**- valoarea rezistenței de sarcină optime depinde de  $V_{mediu}$  și de evoluția în timp a lui **V**, deci de forma funcției **V(t)**.**

Pentru a cunoaște evoluția în timp a vitezei vântului ar fi necesară cunoașterea momentană a vitezei **V** și a derivatei sale  $V'$ .

#### 2) Problema derivatei vitezei vântului

Din cauza "zgomotului", determinarea momentană a derivatei vitezei vântului  $V'$  se face cu mari erori și deci se evită calculul derivatei vitezei vântului. Cu anemometrul de inerție redusă se pot estima valorile maxime și minime ale vitezei vântului pe un interval de timp ciclic de variație a vitezei vântului. Aceste valori maxime și minime, asociate cu viteza medie pe intervalul de timp ciclic

estimat, înlocuiesc calculul derivatei vitezei, iar algoritmul de conducere al sistemului (**TVN+GSMP**) la obținerea unei **energii maxime** se bazează, în principal pe aceste valori.

În concluzie, **valorile rezistenței de sarcină**  $R_{sarcină}(t)$  **depind de:**

- viteza medie a vântului;
- valorile extreme ale vitezei.

### 3) Problema determinării rezistenței optime

Testele de laborator la turbina de vânt navală **TVN** dau un set de date ce stau la baza calculului optimal al sistemului (**TVN+GSMP**), în ideea realizării conducerii optimale. Trebuie să se stabilească din aceste teste de laborator rezistența optimă la o viteză a vântului, constantă sau variabilă. La viteze ale vântului variabile trebuie cunoscute și vitezele maxime/minime pe intervalul de timp reglat pentru ca în procesul de conducere rezistența de sarcină să fie modificată astfel încât energia obținută să fie maximă. Testele de laborator la **TVN** sunt complexe și presupun generarea unor condiții de vânt cât mai apropiate celor reale. În aceste condiții, conducerea sistemului (**TVN+GSMP**) se realizează fizic mai simplu și sunt eliminate erorile, introducând modelele matematice simplificate.

### 4) Problema fluxului magnetului permanent

Cunoscând faptul că tensiunea și frecvența au valori nominale, factorul de putere este unitar, iar cuplul motor are valoarea 5 [Nm], se obține în regim staționar următorul sistem algebric:

$$\left\{ \begin{array}{l} -400p = -314 \cdot 0.08I_q \\ 400q = 314 \cdot 0.07I_d + 314 \cdot \Psi_{MP} \\ 5 = -0.01I_qI_d + \Psi_{MP}I_q \\ p^2 + q^2 = 1 \\ P = -400pI_d + 400qI_q \\ Q = 400pI_q + 400qI_d \\ \cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \\ \cos \varphi = 1. \end{array} \right. \quad (4.1)$$

ale cărui soluții sunt:

$$I_q = 3.8109 [A]; I_d = -0.93936 [A]; p = 0.23933; q = 0.97094;$$

$$\Psi_{MP} = 1.3026 [Wb]; P = 1570.0 [W]; Q = 0 [VAR]; \cos \varphi = 1$$

**Valoarea fluxului magnetului permanent**  $\Psi_M$  **s-a determinat pentru un factor de putere unitar**

Cu  $X_d = \omega L_d = 314 \cdot 0.07$ ,  $X_q = \omega L_q = 314 \cdot 0.08$  și cu valorile curenților:  $I_d = -0.939 [A]$ ,  $I_q = 3.8 [A]$ , se reprezintă diagrama fazorială a **GSMP** din figura 4.1., [Boldea1987].

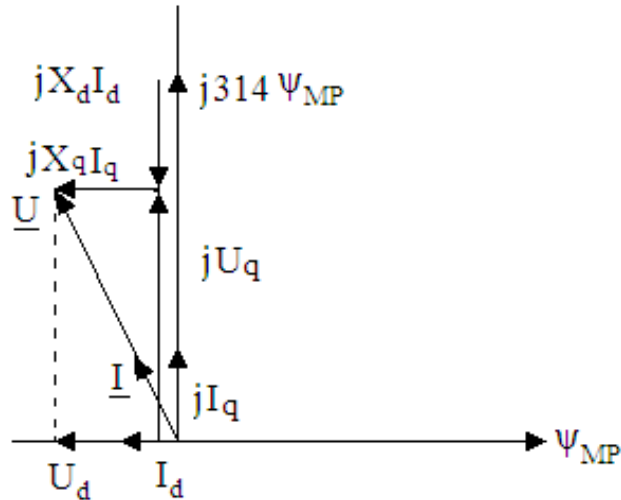


Fig.4.1. Diagrama fazorială la  $\cos \varphi = 1$

Prin mărirea valorii fluxului magnetului permanent **-MP-**, de exemplu  $\Psi_{MP} = 1.5[\text{Wb}]$ , se mărește tensiunea  $U$ , devenind  $U = 465[\text{V}]$ , așa cum rezultă din sistemul 4.2.

$$\left\{ \begin{array}{l} -Up = -314 \cdot 0.08I_q \\ Uq = 314 \cdot 0.07I_d + 314 \cdot \Psi_{MP} \\ 5. = -0.01I_q I_d + \Psi_{MP} I_q \\ p^2 + q^2 = 1 \\ P = -UpI_d + UqI_q \\ Q = UpI_q + UqI_d \\ \cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \\ \Psi_{MP} = 1.5 \\ \cos \varphi = 1. \\ U = R\sqrt{I_d^2 + I_q^2} \end{array} \right. \quad (4.2)$$

care are următoarele soluții:

$$\begin{aligned} U &= 465.24[\text{V}]; I_q = 3.3199[\text{A}]; p = 0.17926; P = 1349.8[\text{W}]; \\ q &= 0.9838; R = 137.86[\Omega]; I_d = -0.60492[\text{A}]; \cos \varphi = 1; \\ \Psi_{MP} &= 1.5[\text{Wb}]; Q = 0[\text{VAR}]. \end{aligned}$$

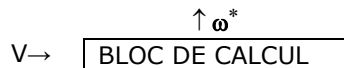
**La factor de putere unitar, prin mărirea fluxului  $\Psi_{MP}$  se mărește tensiunea GSMP.**

#### 4.1.1. Modificarea vitezei vântului

În condițiile funcționării subsistemului **(TVN+GSMP)** la viteze ale vântului variabile, furnizând maximul de putere, viteza unghiulară rotorică  $\omega$  se modifică în mod continuu, depinzând de viteza vântului.

Cunoscând datele de catalog ale turbinei (capitolul 3), și faptul că puterea maximă ce o poate dezvolta **TVN** depinde de viteza vântului la puterea a treia, pentru conducerea subsistemului **(TVN+GSMP)** am introdus un bloc de calcul ce are la intrare viteza vântului  $V$ , iar la ieșire  $\omega^*$  viteza unghiulară rotorică prescrisă la **TVN**.

Cu alte cuvinte conducerea **subsistemul (TVN+GSMP)** cu ajutorul blocului de calcul menține funcționarea subsistemului **(TVN+GSMP)** în punctul de putere maximă, ce are coordonatele  $P(\omega_1^*, M_{TVN}^*)$ .



Conducerea subsistemului **(TVN+GSMP+AE)** trebuie realizată astfel încât puterea captată de turbina de vânt navală **TVN** să fie maximă, la o anumită viteză a vântului.

La viteza vântului  $V$  cuplul fiind:

$$M_{TVN} = -0.5\omega + 20\left(\frac{V}{5}\right)^{1.5}$$

puterea turbinei,

$$P_{TVN} = M_{TVN} \cdot \omega$$

este maximă la:

$$\omega^* = 20\left(\frac{V}{5}\right)^{1.5} [\text{rad/s}]$$

$$M_{TVN}^* = 10\left(\frac{V}{5}\right)^{1.5},$$

valoare obținută din :

$$\frac{dP_{TVN}}{d\omega} = 0$$

**GSMP** va funcționa la frecvența :

$$f = \frac{p_1 \omega^*}{2\pi} K_{red} \quad (4.3)$$

unde:

$p_1$  - numărul perechilor de poli la **GSMP**;

$K_{red} = \frac{314}{20}$  - raportul de multiplicare al reductorului dintre **TVN** și **GSMP**.

Cuplul **GSMP** trebuie să devină de  $K_{red}$  ori mai mic decât cel corespunzător

**TVN:**

$$M_{GSMP} = \frac{M_{TVN}^*}{K_{red}} = \frac{bV^{1.5}}{2K_{red}} = \frac{10\left(\frac{V}{5}\right)^{1.5}}{K_{red}} \quad (4.4)$$

#### 4.1. – Conducerea subsistemului (TVN+GSMP+AE) 77

În acest mod, funcționarea **GSMP** în regim staționar este perfect determinată și rezultă din calculele următoare:

DATELE **TURBINEI**, [Monsson2010b]:

$V_N = 5[m/s]$  - viteza vântului;

$\omega^* = -\frac{k_1 V^{1.5}}{2a} = 20[rad/s]$  la **TVN**, iar la **GSMP** prin reductor  
( $\omega = 314[rad/s]$ )

$M_{TVN}^* = \frac{bV^{1.5}}{2} = 10[Nm]$  la **TVN**, la **GSMP** prin reductor rezultă

$M_{GSMP} = 10 \frac{20}{314} = 0.63694[Nm]$

$M_{TVN} = -0.5\omega + 20\left(\frac{V}{5}\right)^{1.5}$

DATELE **GSMP**, [Monsson2010b]:

$L_d = 0.07[H]$  - reactanța sincronă din axa d;

$L_q = 0.08[H]$  - reactanța sincronă din axa q;

$\Psi_{MP} = 1.3[Wb]$  - fluxul magnetului permanent.

Factorul de putere al **GSMP**:  $\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}$  (P - putere activă; Q -

putere reactivă).

**Ecuțiile GSMP**

$$\begin{cases} -U\sqrt{3} \sin t = 1.6I_d - \omega \cdot 0.08I_q \\ U\sqrt{3} \cos t = 1.6I_q + \omega \cdot 0.07I_d + \Psi_{MP} \\ M = -0.01I_q I_d + \Psi_{MP} I_q \end{cases}$$

**La cuplu și turație date rezultă tensiunea și curentul la GSMP**

**TURBINA** are cuplul  $M_{TVN}^* = 10[Nm]$  la viteza vântului  $V = 5[m/s]$  și  $\omega^* = 20[rad/s]$  (la **GSMP** prin reductor;  $\omega = 314[rad/s]$ ) și  $M_{GSMP} = 0.63694[Nm]$  pentru  $\Psi_{MP} = 1.3[Wb]$  rezultă [Deliu2009f]:

$$\left. \begin{aligned}
 U_d &= 1.6I_d - \omega \cdot 0.08I_q \\
 U_q &= 1.6I_q + \omega \cdot 0.07I_d + \omega \Psi_{MP} \\
 -0.63694 &= -0.01I_qI_d + \Psi_{MP}I_q \\
 U_d &= -RI_d \\
 U_q &= -RI_q \\
 P &= U_dI_d + U_qI_q \\
 Q &= -U_dI_q + U_qI_d \\
 F_p &= \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \\
 \omega &= 314 \\
 \Psi_{MP} &= 1.3 \\
 I_R &= \frac{\sqrt{I_d^2 + I_q^2}}{\sqrt{3}} \\
 U_R &= \frac{\sqrt{U_d^2 + U_q^2}}{\sqrt{3}} \\
 \psi_s^2 &= (0.08I_q)^2 + (\Psi_{MP} + 0.07I_d)^2
 \end{aligned} \right\} \quad (4.5)$$

$$\begin{aligned}
 Q &= 0 \text{ [VAR]}; \quad \omega = 314 \text{ [rad / s]}; \quad \cos \varphi = 1; \quad I_d = -1.4781 \times 10^{-2} \text{ [A]}; \\
 R &= 830.97 \text{ } [\Omega]; \quad U_q = 407.09 \text{ [V]}; \quad I_R = 0.28297 \text{ [A]}; \quad P = -199.61 \text{ [W]}; \\
 U_d &= 12.283 \text{ [V]}; \quad \psi_s = 1.2996 \text{ [Wb]}; \quad I_q = -0.48990 \text{ [A]}; \quad U_R = 235.14 \text{ [V]}; \\
 \Psi_{MP} &= 1.3 \text{ [Wb]}.
 \end{aligned}$$

Sistemul de conducere presupune estimarea turației optime  $n^*$  ( $\omega^* = 2\pi n^*$ )

la viteza vântului  $V$ , iar comanda redresorului interpus între **GSMP** și **AE** trebuie astfel făcută încât să se realizeze coordonatele punctului de putere maximă:  $n^*, M_{TVN}^*$ , [Deliu2009g].

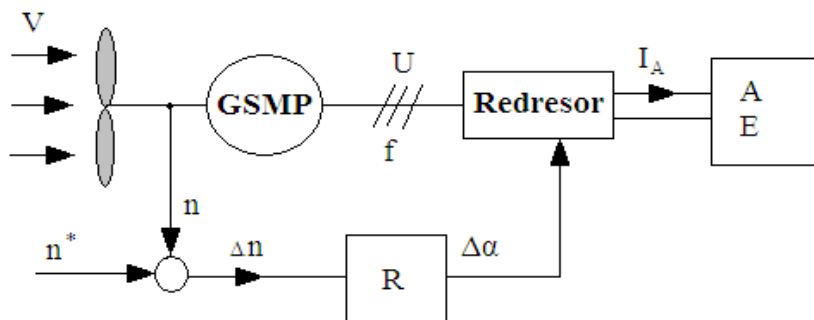


Fig.4.2. Schema bloc a subsistemului (TVN+GSMP+AE)

Caracteristica mecanică a turbinei **TVN** se modifică în funcție de viteza vântului, aceasta fiind de forma:

$$M_{TVN} = -0.5\omega + 20\left(\frac{V}{5}\right)^{1.5}$$

$$M_{GSMP} = \left( -0.5\omega + 20 \left( \frac{V}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314}$$

**La viteza vântului  $V=5[m/s]$  rezultă mărimile specifice punctului de putere maximă : $U, I, f$**

La viteza vântului  $V = 5[m/s]$ , funcționarea subsistemului (**TVN+GSMP**) este modelată în regim staționar, prin sistemul de ecuații algebrice următor[Deliu2009f]:

$$\left\{ \begin{array}{l} V = 5. \\ \omega_T = 20 \left( \frac{V}{5} \right)^{1.5} \\ U_d = 1.6I_d - \omega \cdot 0.08I_q \\ U_q = 1.6I_q + \omega \cdot 0.07I_d + \omega \Psi_{MP} \\ - \left( -0.5\omega_T + 20 \left( \frac{V}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} = -0.01I_qI_d + \Psi_{MP}I_q \\ U_d = -RI_d \\ U_q = -RI_q \\ P = U_dI_d + U_qI_q \\ Q = -U_dI_q + U_qI_d \\ \cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \\ \omega = 314 \cdot \left( \frac{V}{5} \right)^{1.5} \\ \Psi_{MP} = 1.3 \\ f = \frac{\omega}{6.28} \\ I_R = \frac{\sqrt{I_d^2 + I_q^2}}{\sqrt{3}} \\ U_R = \frac{\sqrt{U_d^2 + U_q^2}}{\sqrt{3}} \\ \Psi_S^2 = (0.08I_q)^2 + (\Psi_{MP} + 0.07I_d)^2 \end{array} \right. \quad (4.6)$$

$$Q = 0 \text{ [VAR]}; V = 5.0 \text{ [m/s]}; \cos \varphi = 1; P = 199.62 \text{ [W]}; U_d = 12.283 \text{ [V]};$$

$$U_q = 407.09 \text{ [V]}; R = 830.97 \text{ [\Omega]}; U_R = 235.14 \text{ [V]}; f = 50 \text{ [Hz]};$$

$$\omega_T = 20 \text{ [rad/s]}; \omega = 314 \text{ [rad/s]}; \Psi_{MP} = 1.3 \text{ [Wb]}; \Psi_S = 1.2996 \text{ [Wb]};$$

$$I_R = 0.28297 \text{ [A]}; I_d = -1.4781 \times 10^{-2} \text{ [A]}; I_q = -0.4899 \text{ [A]}$$

**Se obțin mărimile fundamentale la  $P_{max}$ ,  $V$  fiind dată.**

La viteza vântului  $V = 5[m/s]$  și la funcționarea turbinei în punctul de putere maximă, **GSMP** va debita în bateria de **AE** o putere activă:

$$P = 199.62[W]$$

iar curentul, tensiunea și frecvența, în trifazat, au valorile:

$$I_R = 0.28297[A]$$

$$U_R = 235.14[V]$$

$$F = 50.0[Hz]$$

La viteza vântului  $V = 10[m/s]$  și la funcționarea turbinei în punctul de putere maximă, rezultă la **GSMP** următoarele mărimi:

$$\left\{ \begin{array}{l} Q = 0[VAR], \cos \varphi = 1, V = 10[m/s], \Psi_{MP} = 1.3[Wb], P = -1596.9[W], \\ \omega = 888.13[rad/s], \omega_T = 56.569[rad/s], U_q = 1145.0[V], \\ f = 141.42[Hz], U_R = 663.47[V], U_d = 98.182[V], R = 826.97[\Omega], \\ I_q = -1.3845[A], I_R = 0.80230[A], I_d = -0.11873[A], \Psi_S = 1.2964[Wb] \end{array} \right.$$

La viteza vântului  $V = 10[m/s]$  și la funcționarea turbinei în punctul de putere maximă, **GSMP** trifazat va debita, în bateria de **AE** puterea activă  $P$ , curentul

$I_R$ , la tensiunea  $U_R$ :

$$V = 10[m/s]; P = 1596.9[W]; I_R = 0.8[A]; U_R = 663.47[V]; f = 141.42[Hz]$$

La viteza vântului  $V = 25[m/s]$  și la funcționarea turbinei în punctul de putere maximă, rezultă:

$$\left\{ \begin{array}{l} \cos \varphi = 1, V = 25[m/s], Q = 0[VAR], U_q = 4061.7[V], \\ I_R = 3.3233[A], U_d = 1511.8[V], U_R = 2502.2[V], I_d = -2.0079[A], \\ f = 559.02[Hz], \Psi_{MP} = 1.3[Wb], \omega_T = 223.61[rad/s], \omega = 3510.6[rad/s], \\ R = 752.93[\Omega], \Psi_S = -1.2372[Wb], P = 24947.[W], I_q = -5.3946[A] \end{array} \right.$$

#### Puterea se modifică cu viteza vântului la cub.

La viteza vântului  $V = 25[m/s]$  și la funcționarea turbinei în punctul de putere maximă, **GSMP** va debita în bateria de **AE** o putere activă:

$$P = 24947[W]$$

iar curentul și tensiunea, în trifazat, au valorile:

$$I_R = 3.3[A]$$

$$U_R = 2502.2[V]$$

$$F = 559.[Hz]$$

#### Observații:

**1.** La viteze ale vântului în zona  $V = 5 \div 25[m/s]$  fluxul statoric la **GSMP**  $-\Psi_S$  - nu se modifică semnificativ, având valorile:

$$\Psi_S = 1.2996[Wb] \text{ la } V = 5[m/s];$$

$$\Psi_S = 1.2964[Wb] \text{ la } V = 10[m/s];$$

$$\Psi_S = 1.237[Wb] \text{ la } V = 25[m/s].$$

**2.** Puterea activă debitată de **GSMP** se modifică cu viteza vântului la puterea



a treia astfel:

$$P = 199.62[W] \text{ la } V = 5[m/s] ;$$

$$P = 1596.9[W] \text{ la } V = 10[m/s] ;$$

$$P = 24947[W] \text{ la } V = 25[m/s] ;$$

#### Tensiunea și curentul depind de viteza vântului la puterea 1.5

3. Tensiunea și curentul, de la bornele **GSMP**, depind de puterea vântului la puterea 1.5 și se regăsește faptul că puterea activă debitată de **GSMP** se modifică cu viteza vântului la puterea a 3-a:

$$P_{(V^3)} = U_{(V^{1.5})} I_{(V^{1.5})} \cos \varphi = K_U V^{1.5} \cdot K_I V^{1.5} \cos \varphi = K_P V^3 \cdot \cos \varphi$$

4. Valorile tensiunii și ale curentului sunt:

$$U = 235[V]; I = 0.28[A] \text{ la } V = 5[m/s] ;$$

$$U = 663[V]; I = 0.8[A] \text{ la } V = 10[m/s] ;$$

$$U = 2502[V]; I = 3.3[A] \text{ la } V = 25[m/s] ;$$

#### 4.1.2. Dependența rezistenței de sarcină față de viteza vântului în regim dinamic

Principalele mărimi de intrare sunt:

- V- viteza momentană a vântului;

-V *mediu* - viteza medie a vântului;

-V *max,min* - viteza maximă, respectiv minimă.

Ecuatiile statorice ale **GSMP** sunt[Boldea1988]:

$$\begin{cases} U_d = 1.6I_d - \omega \cdot 0.08I_q + 0.08 \frac{dI_d}{dt} \\ U_q = 1.6I_q + \omega \cdot 0.08I_d + \omega \psi_{MP} + 0.08 \frac{dI_q}{dt} \end{cases} \quad (4.7)$$

sau:

$$\begin{cases} 0 = (1.6 + R)I_d - \omega \cdot 0.08I_q + 0.08 \frac{dI_d}{dt} \\ 0 = (1.6 + R)I_q + \omega \cdot 0.08I_d + \omega 1.3 + 0.08 \frac{dI_q}{dt} \end{cases} \quad (4.8)$$

La viteza vântului  $V$ , caracteristica mecanică a **TVN** este de forma:

$$M_{TVN} = \left( -\frac{10}{314} \omega + 20 \left( \frac{V}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} \quad (4.9)$$

și cuplul **GSMP** fiind:

$$M_{elmg} = 1.3I_q \quad (4.10)$$

rezultă ecuația mișcării:

$$5 \frac{d\omega}{dt} = M_{elmg} + M_{TVN} = 1.3I_q + \left( -\frac{10}{314} \omega + 20 \left( \frac{V}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} \quad (4.11)$$

$$P = \frac{dW}{dt}$$

Derivata energiei -  $W(t)$  - se poate scrie:

$$\frac{dW}{dt} = R(I_d^2 + I_q^2) \quad (4.12)$$

obținându-se astfel modelul matematic diferențial al sistemului (TVN+GSMP), sub forma [Deliu2009g]:

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 = (1.6 + R)I_d + 0.08 \frac{dI_d}{dt} - \omega 0.08 I_q \\ 0 = (1.6 + R)I_q + 0.08 \frac{dI_q}{dt} + \omega 0.08 I_d + \omega 1.3 \\ 5 \frac{d\omega}{dt} = 1.3 I_q + \left( -\frac{10}{314} \omega + 20 \left( \frac{V}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} \\ \frac{dW}{dt} = R(I_d^2 + I_q^2) \\ I_d(0) = -1.4782 \times 10^{-2} \\ I_q(0) = -0.48989 \\ \omega(0) = 314.04 \\ W(0) = 0. \end{array} \right. \quad (4.13)$$

Schimbarea de variabilă  $t \rightarrow V$  se face în modul următor:

$$dV = V' dt, \text{ de unde rezultă } dt = \frac{dV}{V'}$$

unde  $V'$  - este derivata după  $t$  a vitezei vântului  $V$ .

**Se analizează dependența lui  $R$  de  $V$**

Cu notațiile  $I_d = a$ ,  $I_q = b$  sistemul de ecuații diferențiale ce modelează

TVN+GSMP, (4.13), devine:

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 = (1.6 + R)a + 0.08 \frac{da}{dt} - \omega 0.08 b \\ 0 = (1.6 + R)b + 0.08 \frac{db}{dt} + \omega 0.08 a + \omega 1.3 \\ 5 \frac{d\omega}{dt} = 1.3 b + \left( -\frac{10}{314} \omega + 20 \left( \frac{V}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} \\ \frac{dW}{dt} = (a^2 + b^2) R \\ a(0) = -1.4782 \times 10^{-2} \\ b(0) = -0.48989 \\ \omega(0) = 314.04 \\ W(0) = 0. \end{array} \right. \quad (4.14)$$

Efectuând schimbarea de variabilă  $t \rightarrow V$  sistemul 4.14 devine:

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 = (1.6 + R)a + 0.08 \frac{da}{dV} V' - \omega 0.08b \\ 0 = (1.6 + R)b + 0.08 \frac{db}{dV} V' + \omega 0.08a + \omega 1.3 \\ 5 \frac{d\omega}{dV} V' = 1.3b + \left( -\frac{10}{314} \omega + 20 \left( \frac{V}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} \\ \frac{d\omega}{dV} V^I = (a^2 + b^2) R \\ a(0) = -1.4782 \times 10^{-2} \\ b(0) = -0.48989 \\ \omega(0) = 314.04 \\ W(0) = 0. \end{array} \right. \quad (4.15)$$

La o viteză a vântului de variație armonică  $V = 5 + 2 \sin 0.3t$ , rezultă:

$$V' = 0.6 \cos 0.3t \quad (4.16)$$

sau

$$V' = (+,-) 0.6 \sqrt{1 - \frac{(V-5)^2}{4}} = \beta \cdot 0.6 \sqrt{1 - \frac{(V-5)^2}{4}} \quad (4.17)$$

unde  $\beta = (+,-)1$  este semnul funcției  $\cos 0.3t$

#### Problema 1)

Semnul derivatei viteză  $V'$  se poate obține din:

$$\beta = \frac{\cos 0.3t}{|\cos 0.3t|}$$

#### Problema 2)

La anumite momente de timp,  $\beta$  este nedeterminat ( $\beta = \frac{0}{0}$ ) și deci pot să

apară erori în rezolvarea sistemului diferențial (4.15).

Deci, cea mai sigură metodă de cunoaștere a vitezei vântului  $V(t)$  și a derivatei sale  $V'(t)$  se realizează prin măsurători.

#### Studiu de caz

Pentru  $V = 5 + t$  și  $V(0) = 5 [m/s]$  rezultă  $V' = 1$  și se analizează dependența

lui  $R$  de  $V$ , [Monsson2010a]:

$$1) R = \frac{R(0) \cdot V(0)}{V} = \frac{831 \cdot 5}{V} = \frac{4155}{V}$$

și se obține sistemul:

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 = \left(1.6 + \frac{4155}{V}\right)a + 0.08 \frac{da}{dV} - \omega 0.08b \\ 0 = \left(1.6 + \frac{4155}{V}\right)b + 0.08 \frac{db}{dV} + \omega 0.08a + \omega 1.3 \\ 5 \frac{d\omega}{dV} = 1.3b + \left(-\frac{10}{314} \omega + 20 \left(\frac{V}{5}\right)^{1.5}\right) \frac{20}{314} \\ \frac{dW}{dV} = (a^2 + b^2) \frac{4155}{V} \\ a(5) = -1.4782 \times 10^{-2} \\ b(5) = -0.48989 \\ \omega(5) = 314.04 \\ W(5) = 0. \end{array} \right.$$

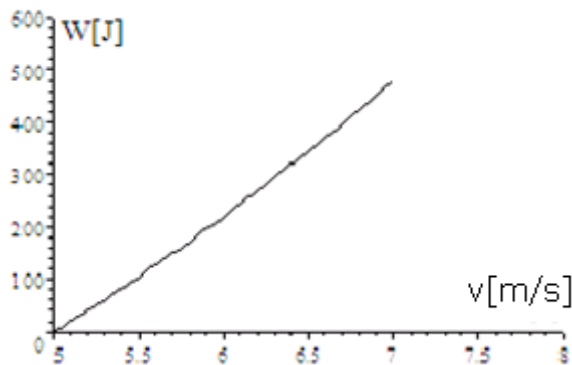


Fig.4.3. Dependența în timp a energiei de viteza vântului

Folosind datele experimentale de la firma Monsson Alma, considerând diverse variații ale rezistenței de sarcină în funcție de viteza vântului și utilizând sistemul de mai sus rezultă variația energiei în funcție de viteza vântului, fig.4.3. Se observă faptul că cel puțin în intervalul cuprins între 5 și 8 secunde energia crește aproximativ liniar cu creșterea vitezei vântului.

#### Calculul rezistenței de sarcină R pe intervale de timp

##### Pasul 1

Pe intervalul de timp  $\Delta t = 0.1[s]$  viteza vântului  $V$  se modifică de la

$$V(0) = 5[m/s] \text{ la } V(0.1) = 5.15[m/s], \text{ [relația } V = (5 + 1.5t) \text{ ], [Monsson2010a]}$$

Pe intervalele de timp  $\Delta t = 0.1[s]$  se lucrează cu variații liniare pentru viteza vântului.

Pe primul interval de timp rezistența  $R$  este constantă:  
 $R(0) = R_0 = 831.[\Omega]$ .

Se rezolvă sistemul de ecuații diferențiale:

$$\begin{cases} 0 = (1.6 + R_0)I_d - \omega \cdot 0.08I_q + 0.08 \frac{dI_d}{dt} \\ 0 = (1.6 + R_0)I_q + \omega \cdot 0.08I_d + 1.3\omega + 0.08 \frac{dI_q}{dt} \\ 5 \frac{d\omega}{dV} = 1.3I_q + \left( -\frac{10}{314}\omega + 20\left(\frac{V}{5}\right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} \end{cases} \quad (4.18)$$

înlocuind  $R(0) = R = 831 [\Omega]$  obținem sistemul:

$$\begin{cases} 0 = (1.6 + 831)I_d - \omega \cdot 0.08I_q + 0.08 \frac{dI_d}{dt} \\ 0 = (1.6 + 831)I_q + \omega \cdot 0.08I_d + 1.3\omega + 0.08 \frac{dI_q}{dt} \\ 5 \frac{d\omega}{dV} = 1.3I_q + \left( -\frac{10}{314}\omega + 20\left(\frac{5 + 1.5t}{5}\right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} \\ I_d(0) = -1.4782 \times 10^{-2} \\ I_q(0) = -0.48989 \\ \omega(0) = 314. \end{cases} \quad (4.19)$$

iar cu valorile condițiilor inițiale calculate din sistemul

$$\begin{cases} 0 = (1.6 + 831)I_d - \omega \cdot 0.08I_q \\ 0 = (1.6 + 831)I_q + \omega \cdot 0.08I_d + 1.3\omega \\ 0 = 1.3I_q + \left( -\frac{10}{314}\omega + 20\left(\frac{5.15}{5}\right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} \end{cases} \quad (4.20)$$

Obținem soluțiile:

$$\omega = 314.04 [\text{rad} / \text{s}]; I_q = -0.48989 [A]; I_d = -1.4782 \times 10^{-2} [A]$$

Pentru  $t = 0.1 [s]$  se obțin valorile

$$I_d(0.1) = -1.4778 \times 10^{-2} [A], I_q(0.1) = -0.48983 [A], \omega(0.1) = 314$$

Acestea constituie valorile condițiilor inițiale pentru pasul 2.

### Pasul 2

Pe intervalul  $t = 0.1 \div 0.2 [s]$  viteza vântului, determinată experimental, se aproximează prin relația [Monsson2010a]:

$$V = 5.15 + 1.1t$$

În al doilea interval de timp rezistența  $-R$  are valoarea  $R(0.1) = R_1$ , valoare care se determină prin încercări, astfel încât funcția :

$$f(t) = R(I_d^2 + I_q^2) \Delta t, \text{ să fie maximă la } \Delta t = 0.1 [s].$$

Se rezolvă sistemul de ecuații diferențiale ce are condițiile inițiale  $I_d(0.1) = -1.4778 \times 10^{-2}, I_q(0.1) = -0.48983, \omega(0.1) = 314$ , pentru diverse valori

ale rezistenței  $R$ , alegându-se valoarea la care  $f(t)$  este maximă.

### Pasul 3

Sistemul de ecuații diferențiale are condițiile inițiale de la pasul 2 și viteza vântului  $V$  se modifică în timp astfel[Monsson2010a]:

$$V = 5.26 + t$$

### Obținerea variației rezistenței de sarcină în timp

Ca și la pasul 2 și la pasul 3,4,...n se dau mai multe valori rezistenței  $R$ , alegându-se valoarea pentru care funcția energie  $f(t) = R(I_d^2 + I_q^2) \cdot \Delta t$  este maximă.

Se obțin valorile optime pentru rezistența de sarcină  $R$  :

$$R_1, R_2, \dots, R_n$$

și deci se poate reprezenta  $R(t)$  :

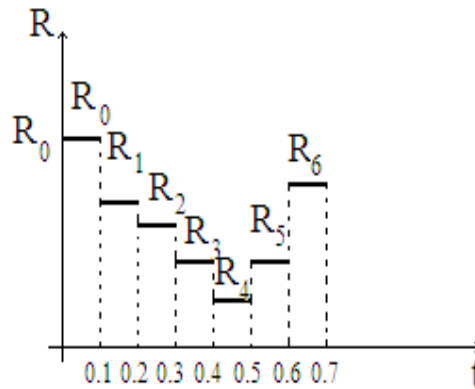


Fig.4.4. Variația în timp a rezistenței de sarcină

La o variație a vitezei vântului în timp de forma  $V = 5.26 + t$ , rezistența de sarcină rămâne constantă pe intervale mici de timp(0,1s), scade esențial în intervalul de timp cuprins între 0 și 0,4 secunde și crește semnificativ în intervalul de timp 0,4 și 0,7 secunde.

### 4.1.3. Dependența rezistenței de sarcină față de viteza vântului. Model simplificat

În vederea efectuării unui studiu calitativ se analizează cel mai simplu generator electric: generatorul de curent continuu cu excitație cu magneți permanenți (**GCMP**), (figura 4.10.), ce are tensiunea:  $U = K_U \cdot \omega$  și debitează pe rezistența de sarcină  $R$ .

Cuplul electromagnetic  $M_{elm}$  se calculează cu relația[Boldea1992]:

$$M_{elm} = \frac{P}{\omega} = \frac{U^2}{\omega R} = \frac{(K_U \cdot \omega)^2}{\omega R} = \frac{K_U^2 \omega}{R} \quad (4.21)$$

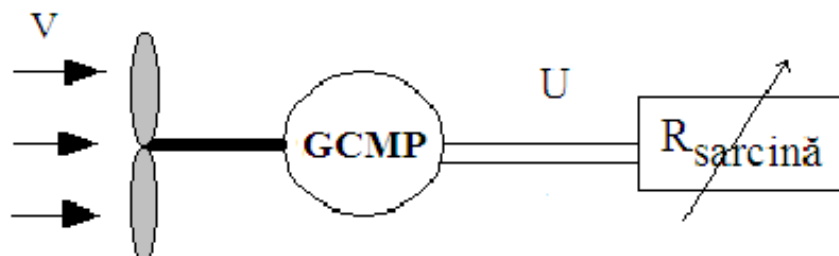


Fig.4.5. Sistem eolian cu sarcină rezistivă

Cuplul turbinei fiind:

$$M_{TVN} = -0.5\omega_{TVN} + 20\left(\frac{V}{5}\right)^{1.5} \text{ cu } \omega_{TVN} = 20\left(\frac{V}{5}\right)^{1.5}$$

la  $V = 5[m/s]$  are valoarea:

$$M_{TVN-5} = 10[Nm] \text{ cu } \omega_{TVN} = 20[rad/s]$$

Ecuția mișcării, pentru  $K_U = 1$ , este:

$$5 \frac{d\omega}{dt} = M_{elmg} + M_{TVN} = -\frac{\omega}{R} + \left( -\frac{10}{314}\omega + 20\left(\frac{V}{5}\right)^{1.5} \right) \frac{20}{314}$$

Puterea  $P$  fiind derivata energie  $W$  se poate scrie [Barakati2005]:

$$P = \frac{dW}{dt}$$

sau

$$P = \frac{U^2}{R} = \frac{\omega^2}{R} = \frac{dW}{dt}$$

Se obține, astfel, sistemul de ecuații diferențiale în care rezistența de sarcină  $R = R_{sarcină}$  se consideră la o viteză a vântului  $V=5(m/s)$  și la o funcționare în punctul de putere maximă.

La  $V=5(m/s)$  și la o funcționare în punctul de putere maximă caracterizat prin turația la turbină  $n_{TVN}$ , respectiv  $\omega_{TVN} = 2\pi n_{TVN}$ , rezultă sistemul de ecuații algebrice 3.22 ce dau rezistența de sarcină  $R=492.98 [\Omega]$ .

$$\left\{ \begin{array}{l} V = 5. \\ \omega_{TVN} = 20\left(\frac{V}{5}\right)^{1.5} \\ \left( -0.5\omega_{TVN} + 20\left(\frac{V}{5}\right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} = \frac{\omega}{R} \\ U = \omega \\ \omega = 314\left(\frac{V}{5}\right)^{1.5} \end{array} \right. \quad (4.22)$$

Soluțiile sistemului sunt:

$$V = 5.0[m/s]; \quad \omega = 314[rad/s]; \quad \omega_{TVN} = 20.0[rad/s]; \quad U = 314[V];$$

$$R = 492.98[\Omega].$$

**Modificarea armonică a vitezei vântului**  $V(t) = 5 + 2 \sin 0.3t$  [Monsson2010a]:

La o variație a vitezei vântului de la  $7[m/s]$  la  $3[m/s]$  după o variație armonică de forma  $V(t) = 5 + 2 \sin 0.3t$  se obține graficul din figura 4.6:

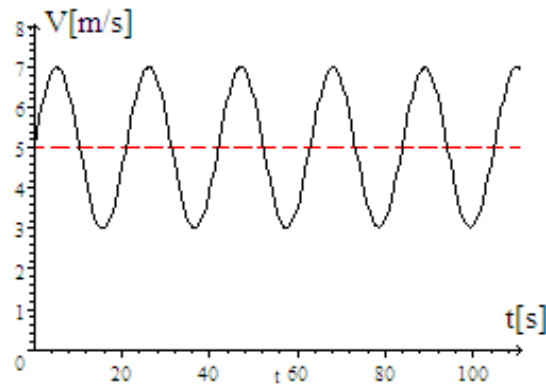


Fig.4.6. Variația în timp a vitezei vântului

Comportarea sistemului se evidențiază prin simularea cu un model matematic folosind o caracteristică mecanică a **TVN** de forma:

$$M_{TVN} = \left( -\frac{10}{314} \omega + 20 \left( 1 + \frac{2 \sin 0.3t}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} \quad (4.23)$$

$$\begin{cases} 5 \frac{d\omega}{dt} = -\frac{\omega}{R} + \left( -\frac{10}{314} \omega + 20 \left( 1 + \frac{2 \sin 0.3t}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} \\ \frac{dW}{dt} = \frac{\omega^2}{R} \\ \omega(0) = 314 \\ W(0) = 0 \end{cases} \quad (4.24)$$

Înlocuind pe  $R = 492.98[\Omega]$  în sistemul (4.24) se obține sistemul de ecuații diferențiale (4.25)

$$\begin{cases} 5 \frac{d\omega}{dt} = -\frac{\omega}{492.98} + \left( -\frac{10}{314} \omega + 20 \left( 1 + \frac{2 \sin 0.3t}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} \\ \frac{dW}{dt} = \frac{\omega^2}{492.28} \\ \omega(0) = 314 \\ W(0) = 0 \end{cases} \quad (4.25)$$

ale cărui soluții sunt:



$$\omega(8888) = 323.85 [\text{rad} / \text{s}],$$

$$\omega(9111) = 322.98 [\text{rad} / \text{s}],$$

$$W(8888) = 1.8723 \times 10^6 [\text{J}],$$

$$W(9111) = 1.9196 \times 10^6 [\text{J}]$$

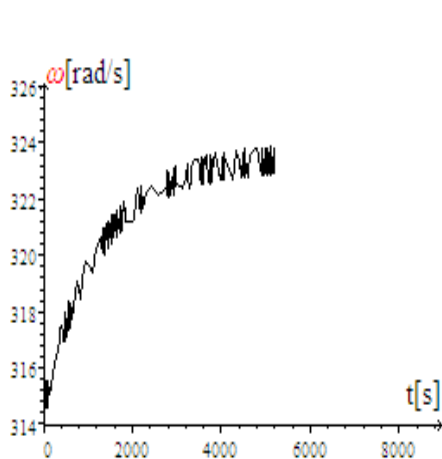


Fig.4.7. Variația în timp a lui  $\omega$

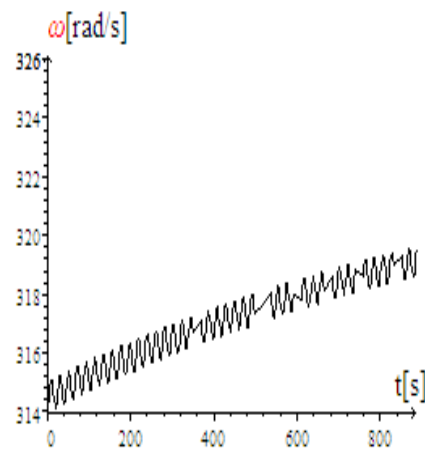


Fig.4.8. Variația în timp a lui  $\omega$  - detaliu

Datorită modelului simplificat, procesul poate fi observat până la  $T = 8888[s]$ , așa cum se observă din variația în timp a vitezei unghiulare mecanice,  $\omega$ , dată în figura 4.8.

Din estimarea pulsației  $\omega$ , la  $t = 8888[s]$  și la  $t = 9111[s]$  se poate trage concluzia că procesul **NU S-A STABILIZAT** și deci ar trebui ca intervalul de timp analizat să fie mărit, problemă însă nerezolvată din cauza dificultăților matematice ce apar în sistemul de calcul - Scientific WorkPlace-MAPLE, care se blochează la  $t > 9111[s]$ . Dificultățile apar, probabil, la calculul funcției  $\sin 0.3t$  care trebuie descompusă în serie și astfel se introduc erori ce blochează sistemul de operare. Calculul la  $v=ct$  nu pune probleme deosebite și estimările pot merge până la  $t=999999[s]$ , deci intervale de timp de ordinul zilelor (11,5 zile). Pentru  $v=5[m/s]$  cu sistemul:

$$\left\{ \begin{array}{l} 5 \frac{d\omega}{dt} = -\frac{\omega}{392.98} + \left( -\frac{10}{314} \omega + 20 \right) \frac{20}{314} \\ \frac{dW}{dt} = \frac{\omega^2}{392.98} \\ \omega(0) = 314. \\ W(0) = 0 \end{array} \right. \quad (4.26)$$

s-a determinat aceeași valoare a  $R_{optim} = 492.98[\Omega]$ , valoare determinată și cu sistemul algebric analizat anterior (4.22).

$$R = 392.98[\Omega], \quad \omega(999999) = 278.56 [\text{rad} / \text{s}], \quad W(999999) = 1.9751 \times 10^8 [\text{J}]$$

$$R = 492.98[\Omega], \quad \omega(999999) = 314[\text{rad} / \text{s}], \quad W(999999) = 2.0000 \times 10^8 [J]$$

$$R = 592.98[\Omega], \quad \omega(999999) = 342.91[\text{rad} / \text{s}], \quad W(999999) = 1.9826 \times 10^8 [J]$$

$$R = 692.98[\Omega], \quad \omega(999999) = 366.95[\text{rad} / \text{s}], \quad W(999999) = 1.9423 \times 10^8 [J]$$

#### 4.2 Fenomene tranzitorii în subsistemul (TVN+GSMP+AE) la modificarea vitezei vântului

Viteza vântului modificându-se, se schimbă și caracteristica mecanică a **TVN**. Se analizează, în cele ce urmează, dinamica subsistemului **(TVN+GSMP+AE)** la modificarea vitezei vântului de la:

$$V(0) = 5[m/s] \text{ la } V(\infty) = 10[m/s]$$

Cuplul turbinei fiind [Cardenas2001]:

$$M_{TVN} = -0.5\omega_{TVN} + 20\left(\frac{V}{5}\right)^{1.5} \quad \text{cu} \quad \omega_{TVN} = 20\left(\frac{V}{5}\right)^{1.5}$$

la  $V = 5[m/s]$  are valoarea:

$$M_{TVN-5} = 10[Nm] \quad \text{cu} \quad \omega_{TVN} = 20[\text{rad} / \text{s}]$$

iar la  $V = 10[m/s]$  și în ipoteza că  $\omega_{TVN} = ct = 20[\text{rad} / \text{s}]$ , este:

$$M_{TVN-10} = -0.5\omega_T + 20\left(\frac{V}{5}\right)^{1.5} = -0.5 \cdot 20 + 20\left(\frac{10}{5}\right)^{1.5} = 46.569[Nm] \quad \text{cu}$$

$$\omega_{TVN} = 20[\text{rad} / \text{s}]$$

**Modificarea exponențială a vitezei vântului**  $V(t) = 10 - 5e^{-8t}$  [Monsson2010a]:

Viteza vântului nu se modifică brusc, iar la o variație exponențială în timp, aceasta are expresia:

$$V(t) = 10 - 5e^{-8t} \quad (4.27)$$

Cu această precizare, cuplul  $M_{TVN}$  se modifică în timp astfel:

$$M_{TVN}(t) = -0.5\omega_{TVN} + 20(2 - e^{-8t}) \quad (4.28)$$

iar la arborele **GSMP** cuplul are expresia:

$$M_{GSMP}(t) = (-0.5\omega_{TVN} + 20(2 - e^{-8t})) \frac{20}{314} \quad (4.29)$$

Viteza unghiulară la arborele **GSMP** fiind:

$$\omega = \omega_{TVN} \frac{314}{20} \quad (4.30)$$

rezultă cuplu  $M_{GSMP}$  sub forma:

$$M_{GSMP}(t) = \left( -0.5 \frac{20}{314} \omega + 20(2 - e^{-8t}) \right) \frac{20}{314} \quad (4.31)$$

sau

$$M_{GSMP}(t) = \left( -\frac{10}{314} \omega + 20(2 - e^{-8t}) \right) \frac{20}{314} \quad (4.32)$$

Sistemul de ecuații diferențiale al **GS**, este de forma:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 -U\sqrt{3} \sin\theta = R_d I_d + L_d \frac{dI_d}{dt} - \omega L_q I_q + M_E \frac{dI_E}{dt} + M_D \frac{dI_D}{dt} - \omega M_Q I_Q \\
 U\sqrt{3} \cos\theta = \omega L_d I_d + R_q I_q + L_q \frac{dI_q}{dt} + \omega M_E I_E + \omega M_D I_D + M_Q \frac{dI_Q}{dt} \\
 U_E = M_E \frac{dI_d}{dt} + R_E I_E + L_E \frac{dI_E}{dt} + M_{ED} \frac{dI_D}{dt} \\
 0 = M_D \frac{dI_d}{dt} + M_{ED} \frac{dI_E}{dt} + R_D I_D + L_D \frac{dI_D}{dt} \\
 0 = M_Q \frac{dI_q}{dt} + R_Q I_Q + L_Q \frac{dI_Q}{dt} \\
 J \frac{d\omega}{dt} = p_1 [(L_d - L_q) I_d I_q + M_E I_q I_E - M_Q I_d I_Q + M_D I_q I_D] - M_{motor}
 \end{array} \right. \quad (4.33)$$

pentru **GSMP** sistemul este de forma:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 -U\sqrt{3} \sin\theta = R_d I_d + L_d \frac{dI_d}{dt} - \omega L_q I_q + M_D \frac{dI_D}{dt} - \omega M_Q I_Q \\
 U\sqrt{3} \cos\theta = \omega L_d I_d + R_q I_q + L_q \frac{dI_q}{dt} + \omega \Psi_{MP} + \omega M_D I_D + M_Q \frac{dI_Q}{dt} \\
 0 = M_D \frac{dI_d}{dt} + R_D I_D + L_D \frac{dI_D}{dt} \\
 0 = M_Q \frac{dI_q}{dt} + R_Q I_Q + L_Q \frac{dI_Q}{dt} \\
 J \frac{d\omega}{dt} = p_1 [(L_d - L_q) I_d I_q + I_q \Psi_{MP} - M_Q I_d I_Q + M_D I_q I_D] - M_{motor}
 \end{array} \right. \quad (4.34)$$

Parametrii **GSMP** au următoarele valori [Monsson2010b]:

$R_I = 1.6[\Omega]$  rezistența înfășurării statorice;

$R_D = 7.95[\Omega]$  rezistența înfășurării de amortizare din axa **d**;

$R_Q = 30.22[\Omega]$  rezistența înfășurării de amortizare din axa **q**;

$L_D = 0.07[H]$  inductanța proprie a înfășurării de amortizare din axa **d**;

$M_{Dd} = 0.05[H]$  inductanța mutuală dintre înfășurarea statorică **d** și înfășurarea **D**;

$L_Q = 0.25[H]$  inductanța proprie a înfășurării de amortizare din axa **q**;

$M_{Qq} = 0.053[H]$  inductanța mutuală dintre înfășurarea statorică **q** și

înfășurarea **Q**;

$L_d = 0.07[H]$  inductanța proprie a înfășurării statorice din axa **d**;

$L_q = 0.08[H]$  inductanța proprie a înfășurării statorice din axa **q**;

Magnetul permanent se caracterizează, în cele ce urmează, prin fluxul  $\Psi_{MP} = 1.3[Wb]$ .

În acest caz :  $L_d < L_q$ , datorită magnetului permanent care are  $\mu_r = 1$ .

$L_D = 0.07[H]$  ;  $M_{Dd} = 0.05[H]$  ;  $L_Q = 0.25[H]$  ;  $M_{Qq} = 0.053[H]$  ;  $L_d = 0.07[H]$  ;

$L_q = 0.08[H]$

**Inductanțele  $L_D$ ;  $M_{Dd}$ ;  $L_Q$ ;  $M_{Qq}$ ;  $L_d$ ;  $L_q$  determină durata procesului tranzitoriu electromagnetic**

Condițiile inițiale la  $V = 5[m/s]$  se determină din sistemul de ecuații algebrice următor:

$$\begin{aligned}
 & V = 5 \\
 & \omega_{TVN} = 20 \left( \frac{V}{5} \right)^{1.5} \\
 & U_d = 1.6I_d - \omega 0.08I_q \\
 & U_q = 1.6I_q + \omega 0.07I_d + \omega \Psi_{MP} \\
 & - \left( -0.5\omega_{TVN} + 20 \left( \frac{V}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} = -0.01I_qI_d + \Psi_{MP}I_q \\
 & U_d = -RI_d \\
 & U_q = -RI_q \\
 & P = U_dI_d + U_qI_q \\
 & Q = -U_dI_q + U_qI_d \\
 & \cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \\
 & \omega = 314 \cdot \left( \frac{V}{5} \right)^{1.5} \\
 & \Psi_{MP} = 1.3 \\
 & f = \frac{\omega}{6.28} \\
 & I_R = \frac{\sqrt{I_d^2 + I_q^2}}{\sqrt{3}} \\
 & U_R = \frac{\sqrt{U_d^2 + U_q^2}}{\sqrt{3}} \\
 & \Psi_S^2 = (0.08I_q)^2 + (\Psi_{MP} + 0.07I_d)^2
 \end{aligned} \tag{4.35}$$

soluțiile sistemului sunt:

$$\begin{aligned}
 & Q = 0, \quad V = 5.0 [m/s], \quad \cos \varphi = 1, \quad P = 199.62 [W], \quad U_d = 12.283 [V] \\
 & U_q = 407.09 [V], \quad R = 830.97 [\Omega], \quad U_R = 235.14 [V], \quad f = 50 [Hz], \\
 & \omega_{TVN} = 20.0 [rad/s], \quad \omega = 314.0 [rad/s], \quad \Psi_{MP} = 1.3 [Wb], \\
 & \Psi_S = 1.2996 [Wb], \quad I_R = 0.28297 [A], \quad I_d = -1.4781 \times 10^{-2} [A], \\
 & I_q = -0.4899 [A].
 \end{aligned}$$

**Fiind dată viteza vântului,  $V$ , rezultă coordonatele lui  $P_{\max}$ :**

$$\begin{aligned}
 & I_d(0) = -1.47 [A] \\
 & I_q(0) = -0.48 [A] \\
 & U_d(0) = 12.28 [V] \\
 & U_q(0) = 407.09 [V] \\
 & \omega(0) = 314 [rad/s] \\
 & R(0) = 830.97 [\Omega]
 \end{aligned}$$

Condițiile finale la viteza vântului  $V = 10 [m/s]$  se obțin din sistemul:

$$\begin{aligned}
V &= 10. \\
\omega_{TVN} &= 20\left(\frac{V}{5}\right)^{1.5} \\
U_d &= 1.6I_d - \omega 0.08I_q \\
U_q &= 1.6I_q + \omega 0.07I_d + \psi_{MP} \\
-\left(-0.5\omega_{TVN} + 20\left(\frac{V}{5}\right)^{1.5}\right) \frac{20}{314} &= -0.01I_qI_d + \psi_{MP}I_q \quad (4.36) \\
U_d &= -RI_d \\
U_q &= -RI_q \\
P &= U_dI_d + U_qI_q \\
Q &= -U_dI_q + U_qI_d \\
\cos \varphi &= \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \\
\omega &= 314 \cdot \left(\frac{V}{5}\right)^{1.5} \\
f &= \frac{\omega}{6.28} \\
\psi_{MP} &= 1.3 \\
I_R &= \frac{\sqrt{I_d^2 + I_q^2}}{\sqrt{3}} \\
U_R &= \frac{\sqrt{U_d^2 + U_q^2}}{\sqrt{3}} \\
\psi_s^2 &= (0.08I_q)^2 + (\psi_{MP} + 0.07I_d)^2
\end{aligned}$$

Soluțiile sistemului sunt:

$$\begin{aligned}
Q &= 0, \quad V = 10.0 [m/s], \quad \cos \varphi = 1, \quad P = 1596.9 [W], \quad U_d = 98.182 [V] \\
U_q &= 1145.0 [V], \quad R = 826.97 [\Omega], \quad U_R = 663.47 [V], \quad f = 141.42 [Hz], \\
\omega_{TVN} &= 56.569 [rad/s], \quad \omega = 888.13 [rad/s], \quad \psi_{MP} = 1.3 [Wb], \\
\psi_s &= 1.2994 [Wb], \quad I_R = 0.80230 [A], \quad I_d = -0.11873 \times 10^{-2} [A], \\
I_q &= -1.3845 [A]
\end{aligned}$$

**Pentru viteza vântului  $V = 10 [m/s]$  se obțin coordonatele lui  $P_{max}$ :**

$$\begin{aligned}
I_d(\infty) &= -0.11873 [A] \\
I_q(\infty) &= -1.3845 [A] \\
U_d(\infty) &= 98.182 [V] \\
U_q(\infty) &= 1145. [V] \\
\omega(\infty) &= 888.13 [rad/s] \\
R(\infty) &= 826.97 [\Omega]
\end{aligned}$$

Trecerea subsistemului (**TVN+AE**) de la  $V = 5 [m/s]$  la  $V = 10 [m/s]$  se poate analiza cu sistemul de ecuații diferențiale (4.37), sistem care fiind de

gradul 2 se va rezolva prin metode numerice, (cu nucleu MAPLE).

**Variație exponențială**

Viteza vântului se consideră că variază exponențial, conform relației:  $V = 10 - 5e^{-8t}$

$$\left. \begin{aligned}
 -830.97I_d &= 1.6I_d + 0.07 \frac{dI_d}{dt} - \omega 0.08I_q + 0.05 \frac{dI_D}{dt} - \omega 0.053I_Q \\
 -830.97I_q &= \omega 0.07I_d + 1.6I_q + 0.08 \frac{dI_q}{dt} + \omega 1.3 + \omega 0.05I_D + 0.053 \frac{dI_Q}{dt} \\
 0 &= 0.05 \frac{dI_d}{dt} + 7.95I_D + 0.07 \frac{dI_D}{dt} \\
 0 &= 0.053 \frac{dI_q}{dt} + 30.22I_Q + 0.25 \frac{dI_Q}{dt} \\
 5 \frac{d\omega}{dt} &= -0.01I_dI_q + I_q 1.3 - 0.053I_dI_Q + \\
 &+ 0.05I_qI_D + \left(-\frac{10}{314} \omega + 20 \cdot (2 \cdot e^{-8 \cdot t})\right) \frac{20}{314} \\
 I_d(0) &= -1.47 \\
 I_q(0) &= -0.48 \\
 I_Q(0) &= 0 \\
 I_D(0) &= 0 \\
 \omega(0) &= 314
 \end{aligned} \right\} \quad (4.37)$$

Atingerea valorii staționare ( $I=1,4[A]$ ) are loc într-un interval de timp relativ mare , având în vedere posibilitățile de calcul ale programului MAPLE și din acest motiv s-a luat un interval de timp mic  $0 \div 0.001[s]$ , mai ales că în acest interval de timp se poate foarte clar observa evoluția în timp a acestui curent.

Curentul de amortizare din axa q ,  $I_Q$  se "stinge" în 0,06 [s], având valori mici (sub 0.003[A] ).

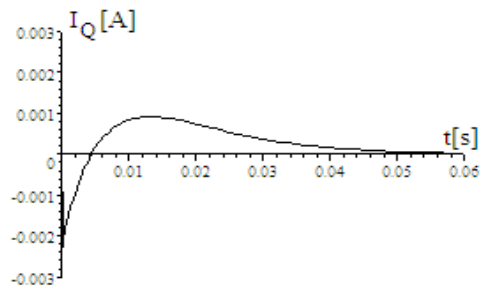
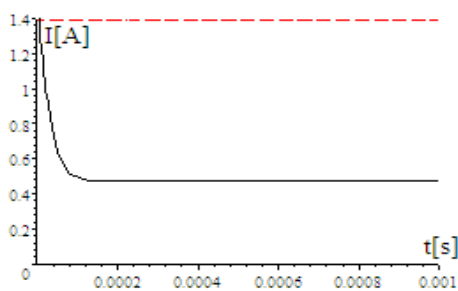


Fig.4.9. Variația în timp a curentul statoric Fig.4.10. Variația în timp a curentul  $I_Q$

**Dependența curentului statoric la începutul procesului**

Curentul de amortizare din axa d ,  $I_D$ , se "stinge" în același interval de timp ,dar are valori mai mari atingând 1.1[A] în vecinătatea punctului inițial.

Viteza unghiulară rotorică la arborele -GSMP-,  $\omega$  ,crește lent de la valoarea inițială  $\omega(0) = 314[rad / s]$ , la valoarea finală  $\omega(0) = 888[rad / s]$ .

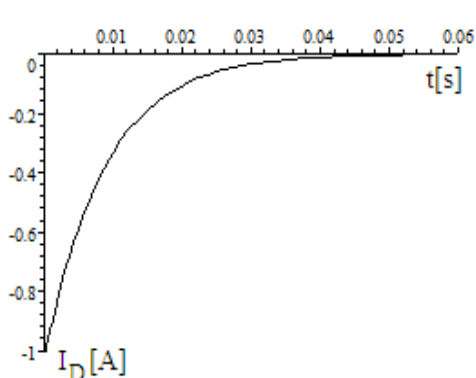
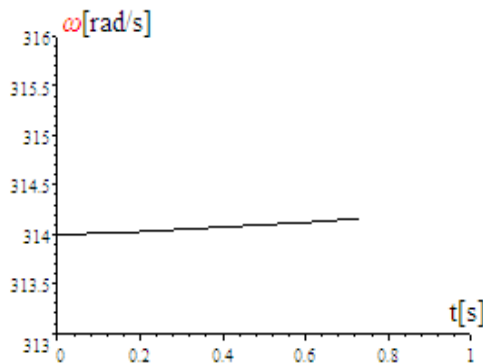
Fig.4.11. Variația în timp curentului  $I_D$ 

Fig.4.12. Variația în timp a vitezei unghiulare

**Datorită lui  $J$  viteza unghiulară se modifică lent.**

Cuplul electromagnetic:

$$M_{elmg} = -0.01I_dI_q + I_q1.3 - 0.053I_dI_Q + 0.05I_qI_D$$

se modifică de la valoarea inițială  $M_{elmg}(0) = -0.6[Nm]$ , la valoarea finală  $M_{elmg}(\infty) = -1.8[Nm]$ , într-un interval de timp de ordinul secundelor.

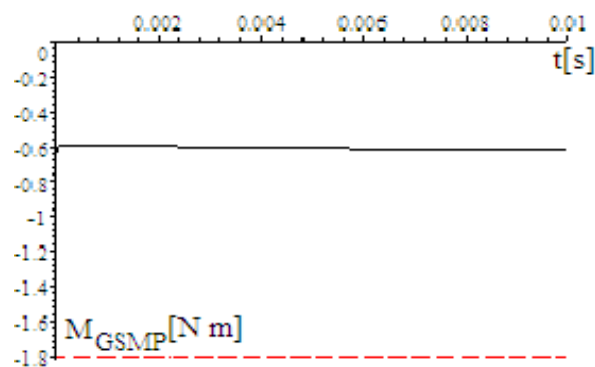


Fig.4.13. Variația în timp a cuplului electromagnetic

Din cauza momentelor de inerție, ( $J = mr^2$ ), mari, procesele mecanice sunt lente și deci modificările curente ale vitezei vântului sunt "amortizate" de către **TVN**.

Puterea electrică obținută este fluctuantă și depinde de viteza vântului la puterea a treia, dacă funcționarea are loc în punctele de putere maximă, dar cum subsistemul (**TVN+GSMP+AE**) prezintă datorită momentelor de inerție mari, o importantă componentă inerțială mecanică, funcționarea în punctele de putere maximă nu este totdeauna posibilă și chiar mai mult, se poate observa că în cele mai multe perioade de timp **funcționarea subsistemului nu este optimă ori cât**

**de rapid ar fi sistemul de conducere.**

**Funcționarea în punctele de putere maximă nu este totdeauna posibilă.**

Considerând o funcționare inițială optimală ,la viteza vântului  $V_1$ , (la  $P_{max}$ ), în punctul  $P_1$  (figura 4.14), prin modificarea vitezei vântului la valoarea  $V_2$ , punctul de funcționare trece în  $P_2$ , iar viteza unghiulară la axul turbinei nu se modifică, datorită inerției mecanice mari [Chen2001].

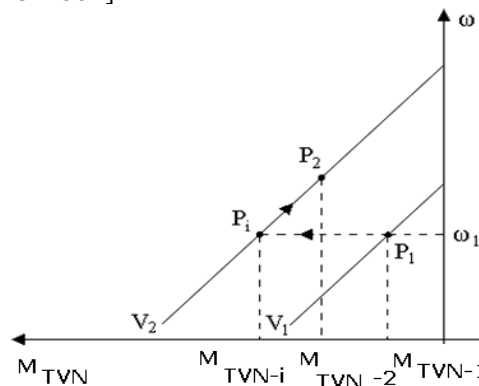


Fig.4.14. Modificarea punctului de funcționare

Cunoscând soluțiile sistemului (4.35) și rezolvând ecuația:

$$P_{TVN} = \left( -0.5\omega_{TVN} + 20 \left( \frac{V}{5} \right)^{1.5} \right) \omega_{TVN} \quad (4.38)$$

Se determină mărimile importante în punctul de putere maximă  $P_1$ :

$P_{TVN} = 200 [W]$  - puterea mecanică dată de **TVN**

$P_{GSMP} = 199 [W]$  - puterea electrică dată de **GSMP**

$\omega_{TVN} = 20 [rad / s]$  - viteza unghiulară mecanică la **TVN**

$U_R = 235 [V]$  - tensiunea la bornele **GSMP**

$I_R = 0.28 [A]$  - curentul debitat de **GSMP**

$f = 50 [Hz]$  - frecvența la **GSMP**

$\psi_S = 1.3 [Wb]$  - fluxul statoric la **GSMP**

**Sistemul funcționează la viteza inițială  $V = 5 [m / s]$**

La viteza vântului  $V = 10 [m / s]$  se modifică caracteristica mecanică a **TVN**, astfel încât și cuplul la **GSMP** se modifică.

**cazul 1 - nu se modifică R**

Așa cum s-a precizat anterior, datorită inerției mecanice mari, turația se consideră constantă ( $\omega_{TVN} = 20 [rad / s]$ ), și deci se obține sistemul de ecuații algebrice de mai jos, în cazul în care nu intervine sistemul de reglare și deci rezistența echivalentă de la bornele **GSMP** are aceeași valoare ca și la  $V = 5 [m / s]$ :  $R = 830.97 [\Omega]$



$$\left. \begin{aligned}
 &V = 10 \\
 &\omega_{TVN} = 20 \\
 &R = 830.97 \\
 &U_d = 1.6I_d - \omega \cdot 0.08I_q \\
 &U_q = 1.6I_q + \omega \cdot 0.07I_d + \omega\Psi_{MP} \\
 &M_G = -0.01I_qI_d + \Psi_{MP}I_q \\
 &U_d = -RI_d \\
 &U_q = -RI_q \\
 &M_{TVN} = \left( -0.5\omega_{TVN} + 20\left(\frac{V}{5}\right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} \\
 &P_{TVN} = \left( -0.5\omega_{TVN} + 20\left(\frac{V}{5}\right)^{1.5} \right) \omega_{TVN} \\
 &P = U_dI_d + U_qI_q \\
 &Q = -U_dI_q + U_qI_d \\
 &\cos\varphi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \\
 &\omega = \frac{314}{20} \omega_{TVN} \\
 &\Psi_{MP} = 1.3 \\
 &f = \frac{\omega}{6.28} \\
 &I_R = \frac{\sqrt{I_d^2 + I_q^2}}{\sqrt{3}} \\
 &U_R = \frac{\sqrt{U_d^2 + U_q^2}}{\sqrt{3}} \\
 &\Psi_S^2 = (0.08I_q)^2 + (\Psi_{MP} + 0.07I_d)^2
 \end{aligned} \right\} \quad (4.39)$$

Soluțiile sistemului sunt:

$$\begin{aligned}
 &\Psi_S = 1.2996[\text{Wb}], \quad f = 50[\text{Hz}], \quad Q = 0[\text{VAR}], \quad \Psi_{MP} = 1.3[\text{Wb}], \quad \cos\varphi = 1, \\
 &\omega_{TVN} = 20[\text{rad/s}], \quad V = 10[\text{m/s}], \quad R = 830.97[\Omega], \quad M_G = -0.63694[\text{Nm}], \\
 &U_d = 12.283[\text{V}], \quad P = -199.62[\text{W}], \quad U_q = 407.09[\text{V}], \quad U_R = -235.14[\text{V}], \\
 &I_d = -1.4781 \times 10^{-2}[\text{A}], \quad I_R = -0.28297[\text{A}], \quad M_{TVN} = 2.9661[\text{Nm}], \\
 &I_q = -0.48990[\text{A}], \quad P_{TVN} = 931.37[\text{W}], \quad \omega = 314[\text{rad/s}].
 \end{aligned}$$

**Sistemul funcționează la viteza finală**  $V = 10[\text{m/s}]$

La  $V = 10[\text{m/s}]$ ,  $R = 830.97[\Omega]$  și  $\omega_{TVN} = 20[\text{rad/s}] = \text{ct}$  rezultă:

$$P_{TVN} = 931[\text{W}]; P_{GSMP} = 199[\text{W}]; U_R = 235[\text{V}]; I_R = 0.28[\text{A}];$$

$$M_{GSMP} = 0.6[Nm] ; M_{TVN} = 2.9[Nm] .$$

**cazul 2 - se modifică R**

Prin schimbarea valorii vitezei vântului de la  $5[m/s]$  la  $10[m/s]$ , prin sistemul de conducere se modifică valoarea rezistenței echivalente de la bornele **GSMP** la valoarea corespunzătoare vitezei  $V = 10[m/s]$ , valoarea acesteia devenind :  $R = 826.97[\Omega]$

$$\begin{aligned}
 & V = 10 \\
 & \omega_{TVN} = 20 \\
 & R = 826.97 \\
 & U_d = 1.6I_d - \omega \cdot 0.08I_q \\
 & U_q = 1.6I_q + \omega \cdot 0.07I_d + \omega\psi_{MP} \\
 & M_G = -0.01I_qI_d + \psi_{MP}I_q \\
 & U_d = -RI_d \\
 & U_q = -RI_q \\
 & M_{TVN} = \left( -0.5\omega_{TVN} + 20\left(\frac{V}{5}\right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} \\
 & P_{TVN} = \left( -0.5\omega_{TVN} + 20\left(\frac{V}{5}\right)^{1.5} \right) \omega_{TVN} \\
 & P = U_dI_d + U_qI_q \\
 & Q = -U_dI_q + U_qI_d \\
 & \cos\varphi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \\
 & \omega = \frac{314}{20} \omega_{TVN} \\
 & \psi_{MP} = 1.3 \\
 & f = \frac{\omega}{6.28} \\
 & I_R = \frac{\sqrt{I_d^2 + I_q^2}}{\sqrt{3}} \\
 & U_R = \frac{\sqrt{U_d^2 + U_q^2}}{\sqrt{3}} \\
 & \psi_s^2 = (0.08I_q)^2 + (\psi_{MP} + 0.07I_d)^2
 \end{aligned} \tag{4.40}$$

4.2. – Fenomene tranzitorii în subsistemul (TVN+GSMP+AE) 99

$$\begin{aligned} \Psi_s &= 1.2996[\text{Wb}], f = 50[\text{Hz}], Q = 0[\text{VAR}], \Psi_{MP} = 1.3[\text{Wb}], \cos \varphi = 1 \\ \omega_{TVN} &= 20.0[\text{rad/s}], V = 10.0[\text{m/s}], R = 826.97[\Omega], M_G = -0.64001[\text{Nm}], \\ U_d &= 12.342[\text{V}], P = -200.58[\text{W}], U_q = 407.08[\text{V}], U_R = -235.14[\text{V}], \\ I_d &= -1.4924 \times 10^{-2}[\text{A}], I_R = -0.28434[\text{A}], M_{TVN} = 2.9661[\text{Nm}], \\ I_q &= -0.49226[\text{A}], P_{TVN} = 931.37[\text{W}], \omega = 314[\text{rad/s}]. \end{aligned}$$

**Punctul de funcționare este caracterizat de valorile mărimilor**  $V = 10[\text{m/s}], R = 826.97[\Omega]$  și  $\omega_T = 20[\text{rad/s}]$ , soluțiile sistemului (4.40) pentru aceste valori fiind:

$$\begin{aligned} P_{TVN} &= 931[\text{W}] ; \\ P_{GSMP} &= 200[\text{W}] ; \\ U_R &= 235[\text{V}] ; \\ I_R &= 0.28[\text{A}] ; \\ M_{GSMP} &= 0.64[\text{Nm}] ; \\ M_{TVN} &= 2.96[\text{Nm}] . \end{aligned}$$

Pe caracteristica mecanică a **TVN**, la  $V = 10[\text{m/s}]$ , trecerea din punctul  $P_1$  în punctul final  $P_2$  se poate observa prin simulare cu modelul matematic următor:

$$\left\{ \begin{aligned} -826.977I_d &= 1.6I_d + 0.07 \frac{dI_d}{dt} - \omega 0.08I_q + 0.05 \frac{dI_D}{dt} - \omega 0.053I_Q \\ -826.97I_q &= \omega 0.07I_d + 1.6I_q + 0.08 \frac{dI_q}{dt} + \omega 1.3 + \omega 0.05I_D + 0.053 \frac{dI_Q}{dt} \\ 0 &= 0.05 \frac{dI_d}{dt} + 7.95I_D + 0.07 \frac{dI_D}{dt} \\ 0 &= 0.053 \frac{dI_q}{dt} + 30.22I_Q + 0.25 \frac{dI_Q}{dt} \\ 5 \frac{d\omega}{dt} &= -0.01I_dI_q + I_q 1.3 - 0.053I_dI_Q + 0.05I_qI_D + \left(-\frac{10}{314}\omega + 56.569\right) \frac{20}{314} \\ I_d(0) &= -1.4924 \times 10^{-2} \\ I_q(0) &= -0.49226 \\ I_Q(0) &= 0 \\ I_D(0) &= 0 \\ \omega(0) &= 314 \end{aligned} \right. \quad (4.41)$$

Variația curentului statoric  $I = \sqrt{I_d^2 + I_q^2}$  în funcție de timp este dată în figura 3.20.

$$\text{Valoarea finală } \sqrt{I_d^2 + I_q^2} = \sqrt{0.11873^2 + 1.3845^2} = 1.3896 [\text{A}]$$

Curentul de amortizare din axa -q-,  $I_Q$ , se "stinge" în 0,04 [s], având valori mici (între 0.0 și 0.0001[A]).

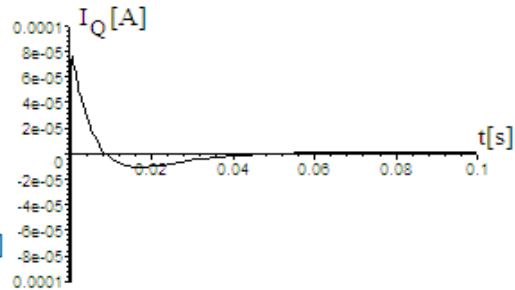
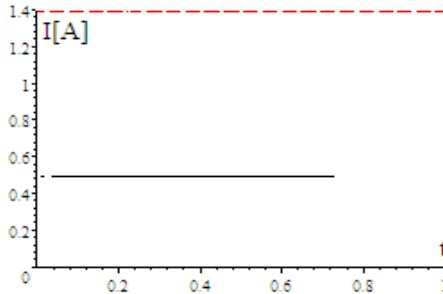


Fig.4.15. Variatia curentului statoric în timp Fig.4.16. Variatia curentul  $I_Q$  în timp

Curentul de amortizare din axa  $d$ ,  $I_D$ , se "stinge" în același interval de timp, dar are valori mai mari: atingând  $0.02[A]$  în vecinătatea punctului inițial.

Viteza unghiulară rotorică la arborele -GSMP-,  $\omega$ , crește lent de la valoarea inițială  $\omega_{(0)} = 314[rad / s]$ , la valoarea finală  $\omega_{(0)} = 888[rad / s]$

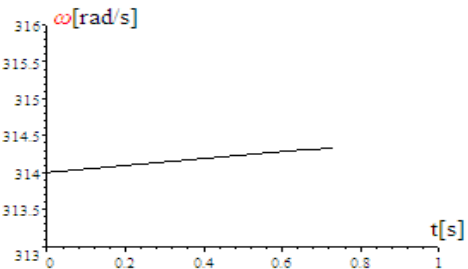
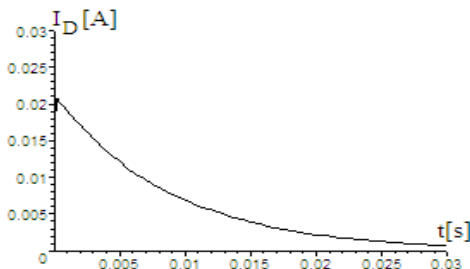


Fig.4.17. Variatia în timp a curentul  $I_D$

Fig.4.18. Variatia în timp a vitezei unghiulare

Cuplul electromagnetic:

$$M_{elm} = -0.01I_d I_q + I_q 1.3 - 0.053I_d I_Q + 0.05I_q I_D \quad (4.42)$$

se modifică de la valoarea inițială  $M_{elm}(0) = -0.6[Nm]$ , la valoarea finală

$M_{elm}(\infty) = -1.8[Nm]$ , într-un interval de timp de ordinul secundelor

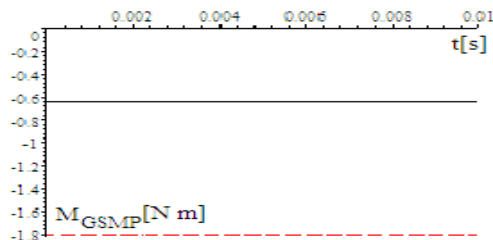


Fig.4.19. Variatia în timp a cuplului electromagnetic

### 4.2.1 Fenomene tranzitorii la modificarea liniară a vitezei vântului

#### Modificarea liniară a vitezei vântului $V(t) = 5 + t$

Prin schimbarea valorii vitezei vântului de la  $5[m/s]$  la  $10[m/s]$ , prin sistemul de conducere se modifică valoarea rezistenței echivalente de la bornele **GSMP** la valoarea  $R = 826.97[\Omega]$ , corespunzătoare vitezei  $V = 10[m/s]$ .

$$\left\{ \begin{array}{l} V = 10 \\ \omega_{TVN} = 20 \\ R = 826.97 \\ U_d = 1.6I_d - \omega \cdot 0.08I_q \\ U_q = 1.6I_q + \omega \cdot 0.07I_d + \omega 1.3 \\ M_G = -0.01I_qI_d + 1.3I_q \\ U_d = -RI_d \\ U_q = -RI_q \\ M_{TVN} = \left( -0.5\omega_T + 20 \left( \frac{V}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} \\ \omega = \frac{314\omega_{TVN}}{20} \end{array} \right. \quad (4.43)$$

**Soluțiile sistemului reprezintă valorile mărimilor punctul de putere maximă la  $V = 10[m/s]$ ,  $R = 826.97[\Omega]$  și  $\omega_T = 20[rad/s]$  și anume:**

$$\begin{aligned} \psi_s &= 1.2996[Wb], f = 50[Hz], Q = 0[VAR], \psi_{MP} = 1.3[Wb], \cos \varphi = 1 \\ \omega_{TVN} &= 20[rad/s], V = 10[m/s], R = 826.97[\Omega], M_G = -0.64001[Nm], \\ U_d &= 12.342[V], P = -200.58[W], U_q = 407.08[V], U_R = -235.14[V], \\ I_d &= -1.4924 \times 10^{-2}[A], I_R = -0.28434[A], M_{TVN} = 2.9661[Nm], \\ I_q &= -0.49226[A], P_{TVN} = 931.37[W], \omega = 314[rad/s]. \end{aligned}$$

Cele mai importante mărimi rezultate fiind:

$$P_{TVN} = 931[W]; P_{GSMP} = 200[W];$$

$$U_R = 235[V]; I_R = 0.28[A];$$

$$M_{GSMP} = 0.64[Nm]; M_{TVN} = 2.96[Nm].$$

Trecerea la  $V = 10[m/s]$  se poate observa prin simulare, cu modelul matematic (3.45), folosind o caracteristică mecanică a **TVN** de forma:

$$M_{TVN} = \left( -\frac{10}{314}\omega + 20 \left( 1 + \frac{t}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314}. \quad (4.44)$$

$$\begin{cases}
 -826.977I_d = 1.6I_d + 0.07 \frac{dI_d}{dt} - \omega 0.08I_q + 0.05 \frac{dI_D}{dt} - \omega 0.053I_Q \\
 -826.97I_q = \omega 0.07I_d + 1.6I_q + 0.08 \frac{dI_q}{dt} + \omega 1.3 + \omega 0.05I_D + 0.053 \frac{dI_Q}{dt} \\
 0 = 0.05 \frac{dI_d}{dt} + 7.95I_D + 0.07 \frac{dI_D}{dt} \\
 0 = 0.053 \frac{dI_q}{dt} + 30.22I_Q + 0.25 \frac{dI_Q}{dt} \\
 5 \frac{d\omega}{dt} = -0.01I_dI_q + I_q 1.3 - 0.053I_dI_Q + 0.05I_qI_D + \left( -\frac{10}{314} \omega + 20 \left( 1 + \frac{t}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} \quad (4.45) \\
 I_d(0) = -1.4924 \times 10^{-2} \\
 I_q(0) = -0.49226 \\
 I_Q(0) = 0 \\
 I_D(0) = 0 \\
 \omega(0) = 314
 \end{cases}$$

Variația curentului statoric  $I = \sqrt{I_d^2 + I_q^2}$  în funcție de timp este dată în figura 4.20.

Curentul de amortizare din axa q,  $I_Q$  are valori foarte mici, procesele fiind lente din punct de vedere electromagnetic iar momentul de inerție echivalent fiind mare. Datorită acestor valori foarte mici ale curentului de amortizare calculul se oprește sub  $0.8[s]$ , programul de simulare fiind prevăzut cu limitări în acumularea erorilor.

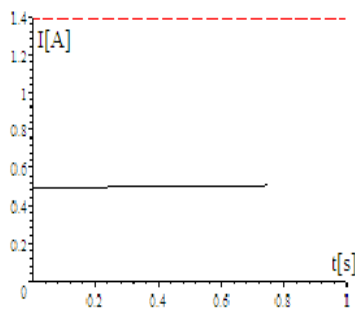


Fig.4.20. Variația în timp a curentului statoric

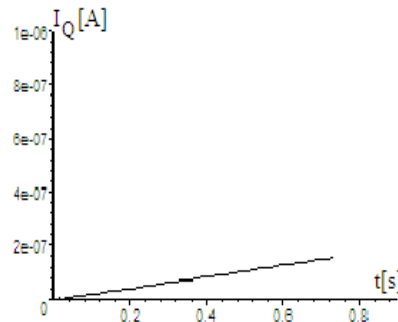


Fig.4.21. Variația în timp a curentului  $I_Q$

Curentul de amortizare din axa d,  $I_D$ , în mod similar cu  $I_Q$  are valori foarte mici, astfel încât practic înfășurarea de amortizare rotorică nu se "simte" în procesele tranzitorii.

Viteza unghiulară rotorică la arborele -GSMP-,  $\omega$ , crește lent în timp, (într-o secundă a crescut de la  $314[rad/s]$  la  $314,5[rad/s]$ ).

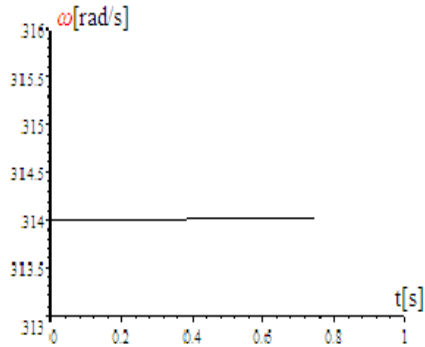


Fig.4.22. Viteza unghiulară rotorică în timp

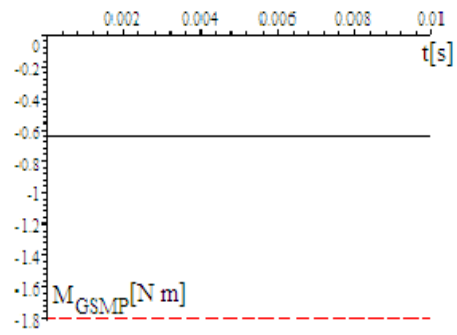


Fig.4.23. Variația cuplului electromagnetic în timp

**Regimul dinamic de la  $V = 5[m/s]$  la  $V = 10[m/s]$**

Cuplul electromagnetic,

$$M_{elm} = -0.01I_d I_q + I_q 1.3 - 0.053I_d I_Q + 0.05I_q I_D \quad (4.46)$$

se modifică de la valoarea inițială  $M_{elm}(0) = -0.6[Nm]$ , la valoarea finală  $M_{elm}(\infty) = -1.8[Nm]$ , într-un interval de timp de ordinul secundelor.

**4.2.2 Fenomene tranzitorii la modificarea armonică a vitezei vântului**

**Modificarea armonică a vitezei vântului  $V(t) = 5 + 2 \sin 0.3t$**

La o variație armonică a vitezei vântului, de forma  $V(t) = 5 + 2 \sin 0.3t$ , de la  $7[m/s]$  la  $3[m/s]$  se obține graficul din figura 4.24:

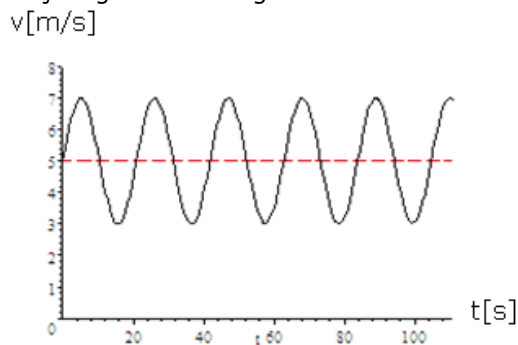


Fig.4.24. Variația vitezei vântului

Trecerea de la  $V = 5[m/s]$  la  $V = 7[m/s]$  se poate observa prin simulare cu modelul matematic (4.48) folosind o caracteristică mecanică a **TVN** de forma:

$$M_{TVN} = \left(-\frac{10}{314} \omega + 20 \cdot (1 + (2 \cdot \sin 0.3t) / 5)^{1.5}\right) \frac{20}{314} \quad (4.47)$$

$$\left. \begin{aligned}
 -826.977I_d &= 1.6I_d + 0.07 \frac{dI_d}{dt} - \omega 0.08I_q + 0.05 \frac{dI_D}{dt} - \omega 0.053I_Q \\
 -826.97I_q &= \omega 0.07I_d + 1.6I_q + 0.08 \frac{dI_q}{dt} + \omega 1.3 + \omega 0.05I_D + 0.053 \frac{dI_Q}{dt} \\
 0 &= 0.05 \frac{dI_d}{dt} + 7.95I_D + 0.07 \frac{dI_D}{dt} \\
 0 &= 0.053 \frac{dI_q}{dt} + 30.22I_Q + 0.25 \frac{dI_Q}{dt} \\
 5 \frac{d\omega}{dt} &= -0.01I_dI_q + I_q 1.3 - 0.053I_dI_Q + 0.05I_qI_D + \left( -\frac{10}{314} \omega + 20 \left( 1 + \frac{2 \sin 0.3t}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} \quad (4.48) \\
 I_d(0) &= -1.4924 \times 10^{-2} \\
 I_q(0) &= -0.49226 \\
 I_Q(0) &= 0 \\
 I_D(0) &= 0 \\
 \omega(0) &= 314
 \end{aligned} \right\}$$

Ca și în cazul anterior, datorită complexităților de calcul, procesul poate fi observat doar până la  $0.8[s]$ , așa cum se observă din variația în timp a vitezei unghiulare mecanice,  $\omega$ , dată în figura 4.25.:

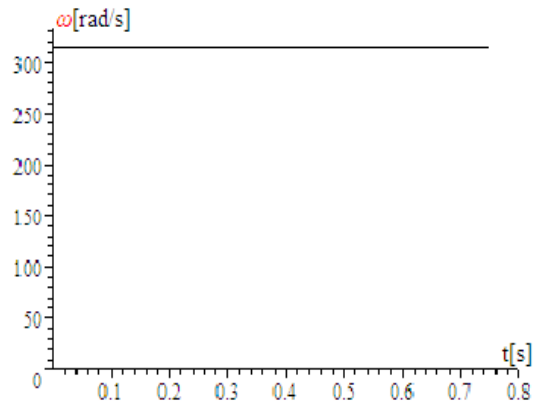


Fig.4.25. Evoluția în timp a vitezei unghiulare mecanice

#### Modificarea lui $\omega$ este nesesezabilă din cauza lui $J$

Se impune construirea unui model simplificat al **GSMP** în ideea extinderii zonei de timp observabile. Pentru a facilita o extindere a timpului de calcul, fără a se acumula erori inadmisibile, modelul matematic al GSMP se simplifică prin eliminarea înfășurărilor de amortizare, obținându-se sistemul de ecuații diferențiale (4.49):



$$\left\{ \begin{array}{l}
 -826.977I_d = 1.6I_d + 0.07 \frac{dI_d}{dt} - \omega 0.08I_q \\
 -826.97I_q = \omega 0.07I_d + 1.6I_q + 0.08 \frac{dI_q}{dt} + \omega 1.3 \\
 5 \frac{d\omega}{dt} = -0.01I_dI_q + I_q 1.3 + \left( -\frac{10}{314} \omega + 20 \left( 1 + \frac{2 \sin 0.3t}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} \\
 I_d(0) = -1.4924 \times 10^{-2} \\
 I_q(0) = -0.49226 \\
 \omega(0) = 314
 \end{array} \right. \quad (4.49)$$

În acest caz se poate observa evoluția în timp a vitezei unghiulare mecanice până la  $1.6[s]$  .

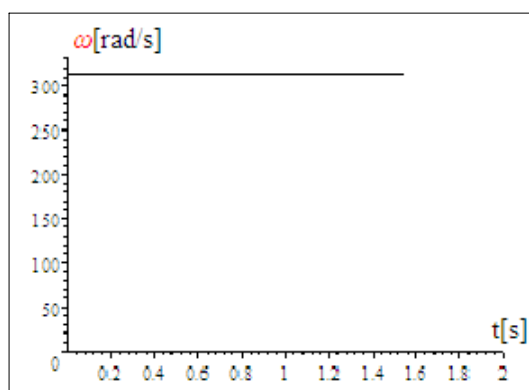


Fig.4.26. Evoluția în timp a vitezei unghiulare mecanice.

#### Regimul dinamic la $V = 5 + 2 \sin 0.3t$ cu modelul simplificat

Pentru a extinde intervalul de timp observabil, se simplifică și mai mult modelul matematic, înfășurările statorice din axele d și q având ecuațiile:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 826.977I_d = \omega 0.08I_q \\
 -826.97I_q = \omega 0.07I_d + \omega 1.3
 \end{array} \right. \quad (4.50)$$

Pentru curenții  $I_d$  și  $I_q$  se obțin valorile:

$$I_d = \left( -130.0 \frac{\omega^2}{8.5486 \times 10^8 + 7.0\omega^2} \right) \quad (4.51)$$

$$I_q = \left( -1.3439 \times 10^6 \frac{\omega}{8.5486 \times 10^8 + 7.0\omega^2} \right) \quad (4.52)$$

Înlocuind în ecuația mișcării această valoare a lui  $I_q$  se obține ecuația diferențială simplificată.

$$\left\{ \begin{array}{l} 0.05 \frac{d\omega}{dt} = \left( -1.3439 \times 10^6 \frac{\omega}{8.5486 \times 10^8 + 7.0\omega^2} \right) 1.3 + \left( -\frac{10}{314} \omega + 20 \left( 1 + \frac{2 \cdot \sin 0.3t}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} \quad (4.53) \\ \omega(0) = 314 \end{array} \right.$$

În aceste condiții, cu un model simplificat, se obține valoarea  $J = 0.05 [Kg \cdot m^2]$ , iar  $\omega$  are o variație în timp de forma celei din figura 4.27.:

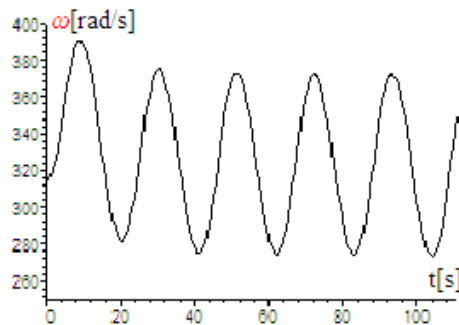


Fig.4.27. Evoluția în timp a vitezei unghiulare mecanice

La valorile reale ale lui  $J$ , (de exemplu  $J = 5 [Kg \cdot m^2]$ ), se obține o variație în timp de 100 [s] a lui  $\omega$  așa cum se observă din figura 3.33.

La o variație a vitezei vântului între  $3 [m/s]$  și  $7 [m/s]$ , viteza unghiulară mecanică  $\omega(t)$  se modifică între  $314 [rad/s]$  și  $315,5 [rad/s]$ , adică cu 5%, față de cazul ideal cu  $J = 0.05 [Kg \cdot m^2]$  când se modifică între  $280 [rad/s]$  și  $390 [rad/s]$ , adică cu 30%.

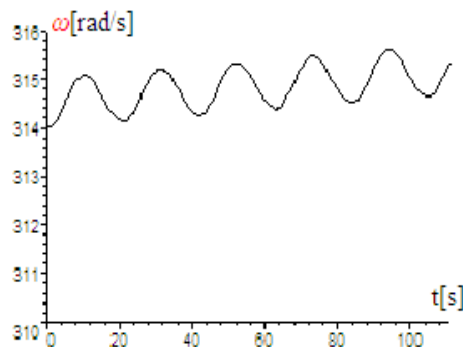


Fig.4.28. Evoluția în timp a vitezei unghiulare mecanice

Deoarece puterea disponibilă la axul turbinei de vânt depinde de viteza vântului la puterea a treia și sistemul (TVN+GSMP) are o mare inerție mecanică, **funcționarea în punctele de putere maximă NU ESTE POSIBILĂ și numai o parte din energia cinetică a vântului se poate utiliza.**

Se pune problema cum este optim, din punct de vedere al captării energiei eoliene, să se dimensioneze aeroagregatele:

a) la puteri mici și cu momente de inerție mici sau

**b)** la puteri mari cu momente de inerție mari?

**1.** Aeroagregatele de puteri mici pot urmări mai bine evoluția în timp a vitezei vântului în schimb, pentru o putere instalată totală dată, la o anumită locație, sunt mai scumpe.

**2.** Aeroagregatele de puteri mari nu pot urmări, datorită inerției mecanice mari, evoluția în timp a vitezei vântului, dar sunt mai ieftine pentru aceeași putere totală dată în locația respectivă.

#### 4.2.3. Pierderile de energie datorită funcționării la turație constantă

Pierderile de energie la aeroagregatele de putere mare se pot estima luând în considerare o anumită evoluție în timp a vitezei vântului.

Conform datelor din tabelul 1 alegem pentru exemplul nostru o viteză optimă de 5 [m/s], cu variații sinusoidale între 3 și 7[m/s].

Expresia matematică a vântului în acest caz este:

$$V(t) = 5 + 2 \sin 0.3t \quad (4.54)$$

Funcționarea la  $V = 5 \text{ [m/s]} = ct.$  poate furniza pe un interval de timp de 100[s] o energie de valoare:

$$W_1(100) = K \cdot V^3(t) \cdot 100 = K \cdot 5^3 \cdot 100 = 12.5 \cdot K \text{ [KJ]} \quad (4.55)$$

Funcționarea la  $V = 5 + 2 \sin 0.3t$  poate furniza pe un interval de timp de 100[s] o energie de valoare:

$$W_2(100) = \int_0^{100} K \cdot V^3(t) dt = K \int_0^{100} (5 + 2 \sin 0.3t)^3 dt = 15.952K \text{ [KJ]} \quad (4.56)$$

Rezultă o pierdere de energie de valoare:

$$\Delta W = \frac{W_2 - W_1}{W_2} 100 = \frac{15.952 - 12.5}{15.952} 100 = 21.6\% \quad (4.57)$$

La puteri mari instalate această pierdere de energie este însemnată.

Pierderile de energie, ca urmare a funcționării la turație constantă, sunt cu atât mai mari cu cât fluctuațiile vitezei vântului sunt mai mari.

Din simulările de regim tranzitoriu, date anterior, se poate observa evoluția în timp a principalelor mărimi ce caracterizează funcționarea subsistemului (TVN+GSMP). Datorită momentelor de inerție mari, procesul de atingere a noului punct de putere maximă durează mai mult decât timpul în care viteza vântului a atins de exemplu 10 [m/s], astfel că subsistemul (TVN+GSMP), indiferent de strategia de conducere nu are timp suficient să se poată stabiliza în punctul de putere maximă corespunzător vitezei de 10 [m/s].

Din acest motiv, strategia de conducere trebuie modificată, astfel încât să se poată obține cât mai multă energie în condițiile unei centrale eoliene date.

**Datorită momentelor de inerție mari, procesul de reglare la putere maximă nu este posibil**

În acest sens se propune un algoritm de reglare cu următoarele etape.

##### Etapa 1

Estimarea **timpului minim necesar de trecere de la viteza  $V_1$  la viteza  $V_2$** . Acest interval de timp este dependent în principal de valoarea momentului de

inerție echivalent de la arborele **GSMP** și de diferența  $V_1 - V_2$  .

Selectarea valorilor vitezelor  $V_1$  și  $V_2$  se face având în vedere zona de mers a navei și înregistrările multianuale ale vitezei vântului, astfel încât  $V_1$  și  $V_2$  să fie cele mai semnificative valori din câmpul de viteze al locației respective.

Valoarea acestui interval de timp, în condițiile mai sus precizate, se poate determina experimental.

### Etapa 2

Estimarea **cu anemometrul a vitezelor medii pe intervale de timp mai mari sau egale cu cel dedus anterior**, prin integrarea vitezei curente în timpul funcționării aeroagregatului. Se cunoaște, astfel, valoarea vitezei optime din punct de vedere al reglării în perioada respectivă de funcționare.

### Etapa 3

Impunerea rezistenței electrice echivalente de la bornele **GSMP**, specifice vitezei estimate anterior, astfel încât funcționarea aeroagregatului, în aceste condiții, se realizează prin **comanda potrivită a CONVERTORULUI** interpus între **GSMP** și consumatorul electric care poate fi:

- baterie de acumuloare electrice **-AE-** pentru stocarea energiei și/sau
- rețeaua de alimentare de tensiune și frecvență standard.

Prin folosirea numai a acumuloarelor electrice investiția și întreținerea **AE** devine mai mare decât în cazul în care o parte din putere este furnizată direct la consumatorii electrice.

Schematic, algoritmul de reglare se dă în continuare:

1  $\left[ \begin{array}{l} \text{ESTIMAREA VARIAȚIILOR DE VITEZĂ } \Delta V = V_1 - V_2 \text{ ȘI A} \\ \text{INTERVALELOR DE TIMP } \Delta t \text{ NECESARE ADUCERII AEROAGREGATULUI} \\ \text{DIN PUNCTUL DE PUTERE MAXIMĂ } P_1(V_1) \text{ ÎN } P_2(V_2) \end{array} \right]$

↓

2  $\left[ \begin{array}{l} \text{ESTIMAREA ÎN TIMPUL FUNCȚIONĂRII PRIN MĂSURĂTORI} \\ \text{A VITEZEI MEDII } V_{\text{MEDIU}} \text{ PENTRU INTERVALUL } \Delta t \end{array} \right]$

↓

3  $\left[ \text{IMPUNEREA ÎNCĂRCĂRII GSMP PENTRU } V_{\text{MEDIU}} \right]$

Funcționarea în regimuri dure cu rafale de vânt face imposibilă funcționarea aeroagregatului în punctele de putere maximă care se modifică rapid și important odată cu schimbarea valorii vitezei vântului, aceasta datorită momentelor de inerție mari ale aeroagregatului și intervalelor foarte mici de timp.

**Funcționarea în regimuri dure a aeroagregatului este imposibilă în punctele de putere maximă**

Pentru a funcționa mereu în punctele de putere maximă este necesar ca:

- valoarea momentelor de inerție să fie mică, ceea ce constructiv nu este posibil, sau
- valoarea cuplului motor (de la **TVN**) să fie foarte mare, cerință de asemenea imposibil de realizat.

### STUDIU DE CAZ

La o **TVN** cu momentul de inerție având valoarea  $J = 6[\text{Kg} \cdot \text{m}^2]$ , trecerea de la  $\omega_1 = 10[\text{rad} / \text{s}]$  (viteza vântului  $V_1 = 4[\text{m} / \text{s}]$ ), la  $\omega_2 = 20[\text{rad} / \text{s}]$

#### 4.2. – Fenomene tranzitorii în subsistemul (TVN+GSMP+AE) 109

(viteza vântului  $V_2 = 8[m/s]$  ), într-un interval de timp  $\Delta t \leq 10[s]$ , (interval de timp în care are loc modificarea vitezei vântului de la  $4[m/s]$ , la  $8[m/s]$  ), necesită un cuplu motor de valoare [Chen2000]:

$$M_{TVN} = J \frac{d\omega}{dt} = 6 \frac{10}{10} = 6 [Nm]$$

Această valoare a cuplului motor de  $6 [Nm]$  poate fi mai mare decât cuplul disponibil la **TVN** la  $\omega_1$  și deci accelerarea motorului turbinei în intervalul de timp disponibil, (maxim  $10 [s]$  ), nu este posibilă.

Considerând și valoarea cuplului rezistent de la **GSMP**, concluzionăm cu atât mai mult că subsistemul (**TVN+GSMP**) nu ajunge să se stabilizeze în punctul de putere maximă.

Din acest motiv se impune o nouă strategie de conducere.

### 4.3. Maximizarea energiei electrice în condițiile în care viteza vântului variază

Problema fundamentală în maximizarea energiei este determinarea **dependenței rezistenței de sarcină  $R(V)$  de valoarea vitezei vântului.**

În continuare se prezintă câteva moduri de estimare a funcției  $R(V)$ , folosind modelul matematic simplificat, fără înfășurări de amortizare considerând puterea electrică sub forma :

$$P = R \frac{(\omega M_E I_E)^2}{R^2 + (\omega L)^2} \quad (4.58)$$

$$\text{Puterea electrica in rezistenta } R \text{ este : } P = \frac{dW}{dt} \quad (4.59)$$

La viteza vântului  $V$  caracteristica mecanică a **TVN** este de forma:

$$M_{TVN} = \left( -\frac{10}{314} \omega + 20 \left( \frac{V}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} \quad (4.60)$$

La diverse forme de variație a rezistenței de sarcină **R**, cu viteza vântului, se determină energia electrică obținută după un timp suficient de mare.

#### 4.3.1. Conducerea la $V$ și $V'$ cunoscute

Cunoscându-se prin măsurători, la un moment dat viteza **V** și derivata sa  $V'$  se obține din:

$$\begin{cases} U_d = 1.6I_d - \omega \cdot 0.08I_q \\ U_q = 1.6I_q + \omega \cdot 0.08I_d + \omega \Psi_{MP} \end{cases} \quad (4.61)$$

la  $U_d = -RI_d$  și  $U_q = -RI_q$

$$\begin{cases} 0 = (1.6 + R)I_d - \omega \cdot 0.08I_q \\ 0 = (1.6 + R)I_q + \omega \cdot 0.08I_d + \omega 1.3 \end{cases} \quad (4.62)$$

valorile curenților  $I_d$  și  $I_q$  .

$$\left\{ \begin{array}{l} I_d = -65 \frac{\omega^2}{1600 + 2000R + 625R^2 + 4\omega^2} \\ I_q = -162.5 \frac{\omega}{1600 + 2000R + 625R^2 + 4\omega^2} (8 + 5R) \end{array} \right. \quad (4.63)$$

sau la  $R_d = R_q = 0$

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 = RI_d - \omega \cdot 0.08I_q \\ 0 = RI_q + \omega \cdot 0.08I_d + \omega 1.3 \end{array} \right. \quad (4.64)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} I_d = -65 \frac{\omega^2}{625R^2 + 4\omega^2} \\ I_q = -812.5\omega \frac{R}{625R^2 + 4\omega^2} \end{array} \right. \quad (4.65)$$

Puterea electrică în rezistența  $R$  fiind:

$$P = R \frac{(\omega M_E I_E)^2}{R^2 + (\omega L)^2} = R \frac{(\omega 1.3)^2}{R^2 + (\omega 0.08)^2} \quad P = R \frac{(\omega M_E I_E)^2}{R^2 + (\omega L)^2} = R \frac{(\omega 1.3)^2}{R^2 + (\omega 0.08)^2} \quad (4.66)$$

se obține energia electrică  $W$  din:

$$W = \int P dt \quad (4.67)$$

**Calculul energiei se face prin integrarea puterii**

#### 4.3.2. Dependența rezistenței de viteză în regim static

În acest caz, la bornele **GSMP** se conectează o rezistență de sarcină,  $R_{sarcină}$ , care trebuie să fie variabilă pentru a permite funcționarea la putere maximizată, în condițiile unei viteze a vântului variabile în timp.

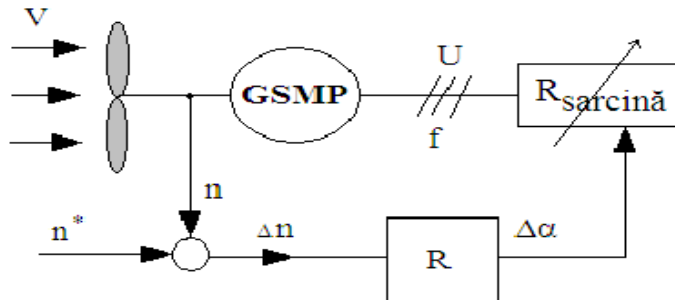


Fig.4.29. Schema bloc a subsistemului (TVN+GSMP+ $R_{sarcină}$ )

Se determină, în continuare, dependența de viteză a vântului  $V$ , a rezistenței de sarcină  $R_{sarcină}$ , astfel ca sistemul (TVN+GSMP+ $R_{sarcină}$ ) să funcționeze în punctele de putere maximă. Se calculează succesiv  $R_{sarcină}$  pentru  $V=25;20;15;5;1$ [m/s]

$$1) V = 25 \text{ [m/s]}$$

$$\begin{aligned}
 & V = 25. \\
 & \omega_{TVN} = 20 \left(\frac{V}{5}\right)^{1.5} \\
 & U_d = 1.6I_d - \omega \cdot 0.08I_q \\
 & U_q = 1.6I_q + \omega \cdot 0.08I_d + \omega \Psi_{MP} \\
 & -\left(-0.5\omega_{TVN} + 20 \cdot \left(\frac{V}{5}\right)^{1.5}\right) \frac{20}{314} = \Psi_{MP} I_q \\
 & U_d = -RI_d \\
 & U_q = -RI_q \\
 & P = U_d I_d + U_q I_q \\
 & Q = -U_d I_q + U_q I_d \\
 & \cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \\
 & \omega = 314 \cdot \left(\frac{V}{5}\right)^{1.5} \\
 & f = \frac{\omega}{6.28} \\
 & \Psi_{MP} = 1.3 \\
 & I_R = \frac{\sqrt{I_d^2 + I_q^2}}{\sqrt{3}} \\
 & U_R = \frac{\sqrt{U_d^2 + U_q^2}}{\sqrt{3}}
 \end{aligned} \tag{4.68}$$

Soluțiile sistemului sunt:

$$\begin{aligned}
 Q &= 0 \text{ [VAR]}, \Psi_{MP} = 1.3 \text{ [Wb]}, f = 559.02 \text{ [Hz]}, \\
 \omega_{TVN} &= 223.61 \text{ [rad/s]}, \omega = 3510.6 \text{ [rad/s]}, \\
 V &= 25 \text{ [V]}, \cos \varphi = -1, \Psi_s = 1.2319 \text{ [Wb]} \\
 I_q &= -5.4779 \text{ [A]}, \mathbf{R} = 722.62 \text{ [\Omega]}, \\
 U_d &= 1535.1 \text{ [V]}, U_q = 3958.4 \text{ [V]}, \\
 U_R &= 2451.2 \text{ [V]}, I_d = -2.1243 \text{ [A]}, \\
 P &= -24945 \text{ [W]}, I_R = 3.3921 \text{ [A]}
 \end{aligned}$$

**2)** Pentru  $V = 20 \text{ [m/s]}$

Soluțiile sistemului (4.68) sunt:

$$\left\{ \begin{aligned}
 & \Psi = 1.3 \text{ [Wb]}, V = 20 \text{ [m/s]}, \Psi_s = 1.2688 \text{ [Wb]}, U = 786.08 \text{ [V]}, \\
 & I = 2.3366 \text{ [A]}, U = 1822.2 \text{ [V]}, U = 3056.8 \text{ [V]}, \mathbf{R} = 779.86 \text{ [\Omega]}, \\
 & f = 400.0 \text{ [Hz]}, I = -1.0080 \text{ [A]}, I = -3.9196 \text{ [A]}, \omega = 2512.0 \text{ [rad/s]}, \\
 & \omega = 160 \text{ [rad/s]}
 \end{aligned} \right.$$

**3)** Pentru  $V = 15 [m / s]$

Soluțiile sistemului (4.68) sunt:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_R = 1206.7 [V], I_R = 1.4887 [A], \Psi_S = 1.2876 [Wb], U_d = 331.65 [V], \\ U_q = 2063.6 [V], \mathbf{R} = 810.56 [\Omega], I_d = -0.40917 [A], \Psi_{MP} = 1.3 [Wb], \\ \omega = 1631.6 [rad / s], \omega_{TVN} = 103.92 [rad / s], f = 259.81 [Hz], I_q = -2.5459 [A], \\ V = 15 [m / s] \end{array} \right.$$

**4)** Pentru  $V = 10 [m / s]$

Soluțiile sistemului (4.68) sunt:

$$\left\{ \begin{array}{l} V = 10 [m / s], \Psi_{MP} = 1.3 [Wb], \Psi_S = 1.2964 [Wb], I_d = -0.11905 [A], \\ \mathbf{R} = 825.43 [\Omega], I_R = 0.80304 [A], U_d = 98.271 [V], U_R = 662.86 [V], \\ I_q = -1.3858 [A], \omega_{TVN} = 56.569 [rad / s], U_q = 1143.9 [V], f = 141.42 [Hz], \\ \omega = 888.13 [rad / s] \end{array} \right.$$

**5)** Pentru  $V = 5 [m / s]$

Soluțiile sistemului (4.68) sunt:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Psi_{MP} = 1.3 [Wb], V = 5 [m / s], \Psi_S = 1.2996 [Wb], I_R = 0.283 [A], \\ I_d = -1.4786 \times 10^{-2} [A], \mathbf{R} = 830.78 [\Omega], U_R = 235.11 [V], U_d = 12.284 [V], \\ \omega_{TVN} = 20.0 [rad / s], f = 50 [Hz], I_q = -0.48996 [A], \omega = 314.0 [rad / s], \\ U_q = 407.04 [V] \end{array} \right.$$

**6)** Pentru  $V = 1 [m / s]$

Soluțiile sistemului (4.68) sunt:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Psi_{MP} = 1.3 [Wb], V = 1 [m / s], \Psi_S = 1.3000 [Wb], \mathbf{R} = 831.53 [\Omega], \\ U_R = 21.039 [V], I_d = -1.1818 \times 10^{-4} [A], I_R = 2.5301 \times 10^{-2} [A], \\ f = 4.4721 [Hz], \omega_{TVN} = 1.7889 [rad / s], \omega = 28.085 [rad / s] \\ U_q = 36.44 [V], \end{array} \right.$$

Astfel se obține dependență  $R_{sarcin\bar{a}}$  față de viteza vântului, dependență care este reprezentată în figura 4.30.



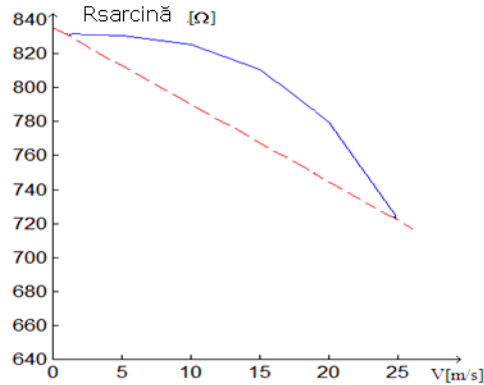


Fig.4.30. Dependența rezistenței de sarcină  $R_{sarcină}$  de viteza vântului

Printr-o aproximare liniară se poate scrie:  $R_{sarcină} = 835.54 - 4.5 \cdot V$ , variația rezistenței de sarcină față de viteza vântului fiind reprezentată în figura 4.30.

### 4.3.3. Dependența rezistenței de viteză în regim dinamic - MAXIMUL ENERGIEI

În regim dinamic viteza vântului se modifică în timp și deci rezistența de sarcină  $R_{sarcină}$  va trebui reglată, astfel încât să se obțină maximul de energie în  $R_{sarcină}$ . Pentru o analiză optimală calitativă se consideră o variație sinusoidală a vitezei vântului  $V(t) = 5 + 2 \sin 0.3t$ , utilizându-se valori cuprinse între 3[m/s] și 7[m/s].

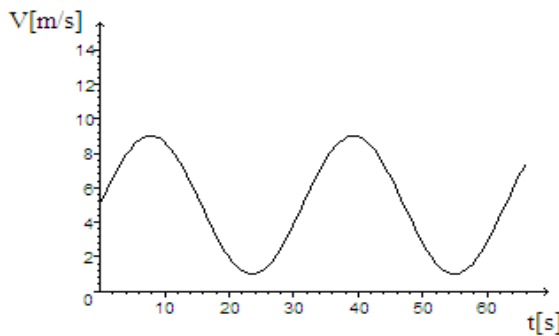


Fig.4.31. Variația în timp a vitezei vântului

La viteza vântului  $V$ , caracteristica mecanică a **TVN** este de forma:

$$M_{TVN} = \left( -\frac{10}{314} \omega + 20 \left( \frac{V}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} \quad (4.69)$$

iar cuplul **GSMP** fiind:

$$M_{elm} = 1.3 I_q \quad (4.70)$$

rezultă ecuația mișcării:

$$5 \frac{d\omega}{dt} = M_{elm} + M_{TVN} = 1.3I_q + \left( -\frac{10}{314} \omega + 20 \left( \frac{V}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} \quad (4.71)$$

Puterea **-P**- fiind derivata energie **-W**- se poate scrie:

$$P = \frac{dW}{dt} \quad (4.72)$$

sau

$$P = R(I_d^2 + I_q^2) = \frac{dW}{dt} \quad (4.73)$$

Se obține, astfel, sistemul de ecuații diferențiale 4.74 în care rezistența de sarcină  $R = R_{sarcin\grave{a}}$  se consideră:

- 1) constantă;  $R = ct$ ;
- 2) variabilă.

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 = (1.6 + R)I_d + 0.08 \frac{dI_d}{dt} - \omega 0.08I_q \\ 0 = (1.6 + R)I_q + 0.08 \frac{dI_q}{dt} + \omega 0.08I_d + \omega 1.3 \\ 5 \frac{d\omega}{dt} = 1.3I_q + \left( -\frac{10}{314} \omega + 20 \left( \frac{V}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} \\ \frac{dW}{dt} = R(I_d^2 + I_q^2) \\ I_d(0) = -1.4782 \times 10^{-2} \\ I_q(0) = -0.48989 \\ \omega(0) = 314.04 \\ W(0) = 0. \end{array} \right. \quad (4.74)$$

Pentru a extinde intervalul de timp observabil, se simplifică modelul matematic, ecuațiile înfășurărilor statorice din axele d și q având forma:

$$\left\{ \begin{array}{l} RI_d = \omega 0.08I_q \\ -RI_q = \omega 0.08I_d + \omega 1.3 \end{array} \right. \quad (4.75)$$

Pentru curenții  $I_d$  și  $I_q$  se obțin valorile:

$$I_d = -65 \frac{\omega^2}{625R^2 + 4\omega^2}; I_q = -812.5\omega \frac{R}{625R^2 + 4\omega^2} \quad (4.76)$$

**Modelul simplificat al GSMP**

Puterea fiind  $P = R(I_d^2 + I_q^2)$ , rezultă :

$$P = R(I_d^2 + I_q^2) = R \left( 1056.3 \frac{\omega^2}{625R^2 + 4\omega^2} \right) \quad (4.77)$$

Înlocuind în ecuațiile mișcării și ale energiei acesteia valorile lui  $I_q$  și

$I_d^2 + I_q^2$  se obțin ecuațiile diferențiale simplificate.

$$\left\{ \begin{array}{l} J \frac{d\omega}{dt} = \left( -812.5\omega \frac{R}{625.0R^2 + 4.0\omega^2} \right) 1.3 + \left( -\frac{10}{314}\omega + 20 \left( 1 + \frac{2 \sin 0.3t}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} \\ \frac{dW}{dt} = R \left( 1056.3 \frac{\omega^2}{625.0R^2 + 4.0\omega^2} \right) \\ \omega(0) = 314 \\ W(0) = 0 \end{array} \right. \quad (4.78)$$

**Condițiile inițiale** la  $V = 5 [m/s]$  și la cuplul turbinei de vânt **TVN**  
 $M_{TVN} = \left( -\frac{10}{314}W + 20 \right) \frac{20}{314}$  se obțin din sistemul:

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 = \left( -812.5\omega \frac{R}{625.0R^2 + 4.0\omega^2} \right) 1.3 + \left( -\frac{10}{314}\omega + 20 \right) \frac{20}{314} \\ \omega = 314 \end{array} \right. \quad (4.79)$$

ale cărui soluții sunt:  $\omega = 314 [rad/s]$ ,  $R = 832.38 [\Omega]$

Pentru  $V = 5 [m/s]$  turația la **GSMP** este 3000[rot/min], adică  
 $\omega = \omega^* = 314 [rad/s]$  obținându-se o rezistență de sarcină  $R = 832.38 [\Omega]$

Cu această valoare a lui R se obține o energie electrică, la  
 $V = 5 + 2 \sin 0.3t$ , mai mică decât pentru  $R = 531 [\Omega]$ , (determinată din condiții de  
optim), așa cum rezultă din calculele de mai jos.

**1)  $R_{sarcină} = ct$**

La valorile reale ale lui  $J$ , (de exemplu  $J = 5 [Kg \cdot m^2]$ ) și la  
 $V(t) = 5 + 2 \sin 0.3t$  se obține :

a)  $R = 831 [\Omega]$

Din sistemul:

$$\left\{ \begin{array}{l} 5 \frac{d\omega}{dt} = \left( -812.5\omega \frac{831.}{625.0 \cdot 831.^2 + 4.0\omega^2} \right) 1.3 + \left( -\frac{10}{314}\omega + 20 \left( 1 + \frac{2 \sin 0.3t}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} \\ \frac{dW}{dt} = 831 \left( 1056.3 \frac{\omega^2}{625.0 \cdot 831.^2 + 4.0\omega^2} \right) \\ \omega(0) = 314 \\ W(0) = 0 \end{array} \right. \quad (4.80)$$

se obține:

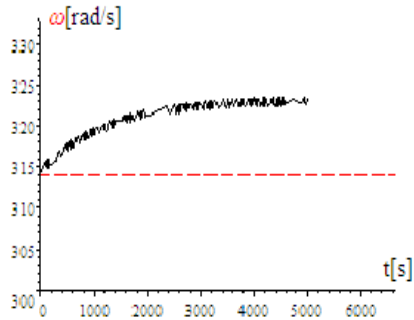


Fig.4.32. Variația în timp a pulsației

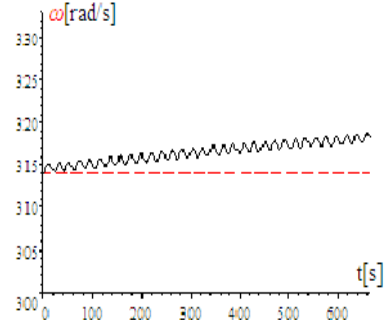


Fig.4.33. Variația în timp a pulsației (detaliu)

$$\omega(5555) = 323.08[\text{rad} / \text{s}], \quad W(5555) = 1.1654 \times 10^6 [\text{J}]$$

**Evoluția în timp a lui  $\omega$  și  $W$  la  $R$  dat.**

b)  $R = 931[\Omega]$

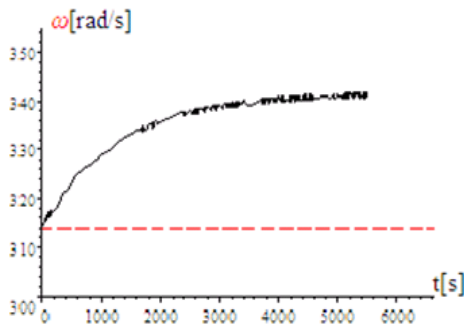


Fig.4.34. Variația în timp a pulsației

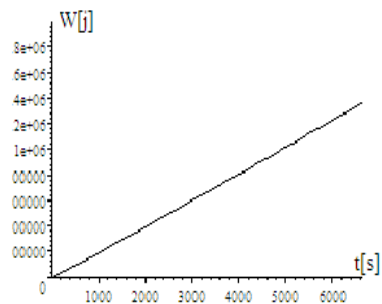


Fig.4.35. Variația în timp a energiei

$$\omega(5555) = 341.14[\text{rad} / \text{s}], \quad W(5555) = 1.1334 \times 10^6 [\text{J}]$$

c)  $R = 531[\Omega]$

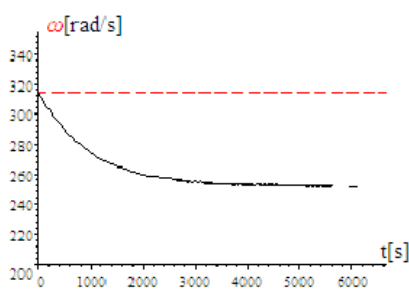


Fig.4.36. Variația în timp a pulsației

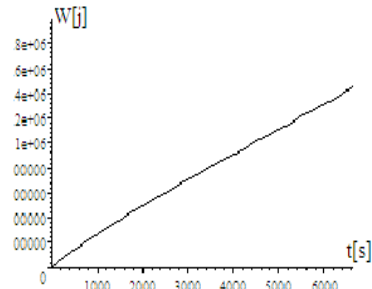


Fig.4.37. Variația în timp a energiei

$$\omega(5555) = 252.2[\text{rad} / \text{s}], \quad W(5555) = 1.2235 \times 10^6 [\text{J}]$$

**Estimarea lui  $\omega$  și  $W$  până la 5555[s] este insuficientă**

d)  $R = 231[\Omega]$

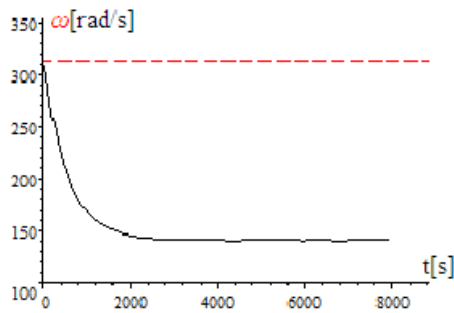


Fig.4.38. Variația în timp a pulsației

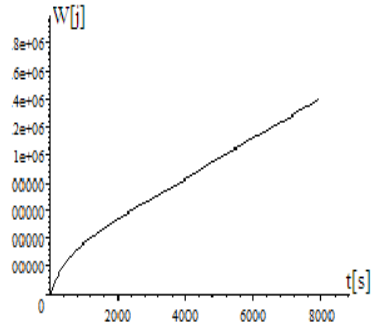


Fig.4.39. Variația în timp a energiei

$$\omega(5555) = 140.66[\text{rad} / \text{s}], \quad W(5555) = 1.0536 \times 10^6 [\text{J}]$$

e)  $R = 31[\Omega]$

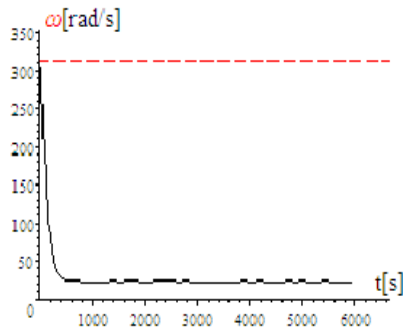


Fig.4.40. Variația în timp a pulsației

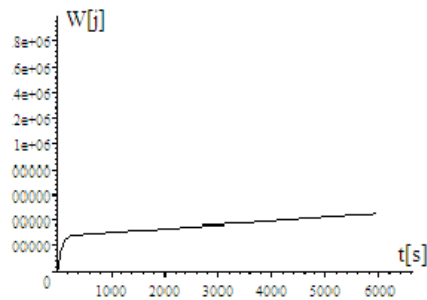


Fig.4.41. Variația în timp a energiei

$$\omega(5555) = 23.249[\text{rad} / \text{s}], \quad W(5555) = 4.3881 \times 10^5 [\text{J}]$$

f)  $R = 1531[\Omega]$

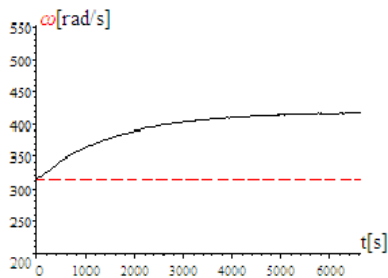


Fig.4.42. Variația în timp a pulsației

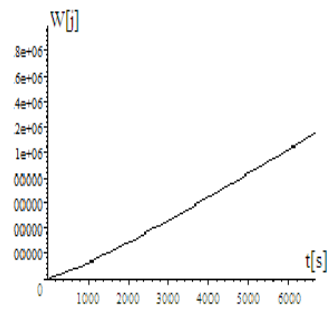


Fig.4.43. Variația în timp a energiei

$$\omega(5555) = 415.77[\text{rad} / \text{s}], \quad W(5555) = 9.3638 \times 10^5 [\text{J}]$$

În continuare se analizează variația în timp a energiei debitate de GSMP în funcție de o rezistență R, considerată variabilă. Conform figurii 4.44. rezistența este formată din ansamblul redresor și acumulator electric.

2)  $R_{sarcin\grave{a}}$  - variabilă:

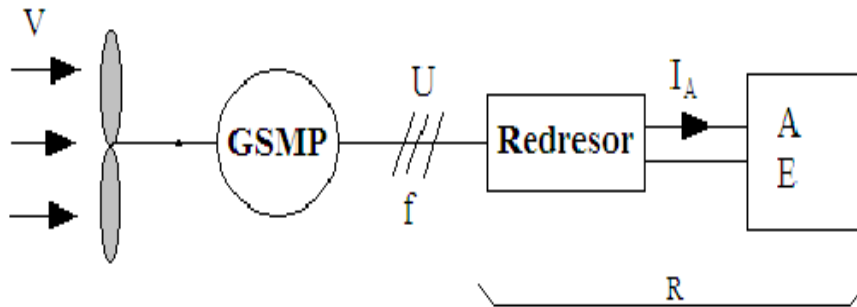


Fig.4.44. Schema bloc a subsistemului TVN+GSMP cu R variabil

**Energia W și viteza  $\omega$  la  $t = 5555[s]$**

- a)  $R = 831[\Omega]$  :  $\omega(5555) = 323.08[rad / s]$ ,  $W(5555) = 1.1654 \times 10^6 [J]$ ,
- b)  $R = 931[\Omega]$  :  $\omega(5555) = 341.14[rad / s]$ ,  $W(5555) = 1.1334 \times 10^6 [J]$ ,
- c)  $R = 531[\Omega]$  :  $\omega(5555) = 252.2[rad / s]$ ,  $W(5555) = 1.2235 \times 10^6 [J]$ ,
- d)  $R = 231[\Omega]$  :  $\omega(5555) = 140.66[rad / s]$ ,  $W(5555) = 1.0536 \times 10^6 [J]$ ,
- e)  $R = 31[\Omega]$  :  $\omega(5555) = 23.249[rad / s]$ ,  $W(5555) = 4.3881 \times 10^5 [J]$ ,
- f)  $R = 1531[\Omega]$  :  $\omega(5555) = 415.77[rad / s]$ ,  $W(5555) = 9.3638 \times 10^5 [J]$ .

$$R_{sacina} = 531 - \beta \sin 0.3t$$

a)  $R = (531 - 77 \sin 0.3t)[\Omega]$

$$\left\{ \begin{array}{l} 5 \frac{d\omega}{dt} = \left( -812.5\omega \frac{(531-77 \sin 0.3t)}{625(531-77 \sin 0.3t)^2 + 4\omega^2} \right) 1.3 + \left( -\frac{10}{314} \omega + 20 \left( 1 + \frac{2 \sin 0.3t}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} \\ \frac{dW}{dt} = (531 - 77 \sin 0.3t) \left( \frac{1056.3 \omega^2}{625(531-77 \sin 0.3t)^2 + 4\omega^2} \right) \\ \omega(0) = 314. \\ W(0) = 0. \end{array} \right. \quad (4.81)$$

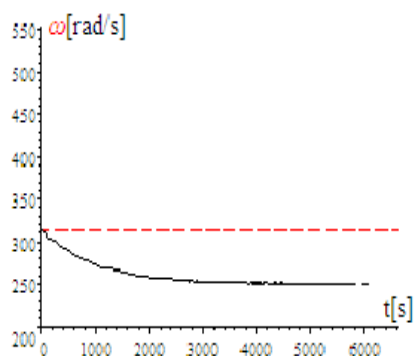


Fig.4.45. Variația în timp a pulsației

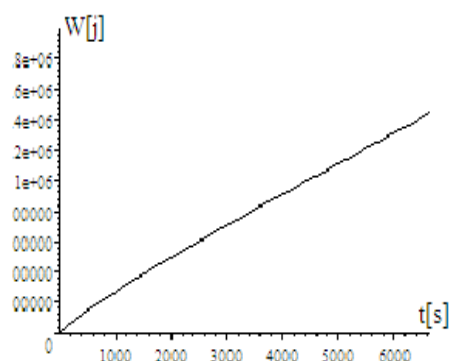


Fig.4.46. Variația în timp a energiei

$$\omega(5555) = 250.58[\text{rad} / \text{s}], \quad W(5555) = 1.2235 \times 10^6 [\text{J}]$$

**Intervalul de timp observabil este limitat din motive de calcul**

Totalizând rezultatele de mai sus se obțin valorile vitezei unghiulare mecanice  $\omega(5555)$  și a energiei electrice  $W(5555)$ , după un timp  $t=5555[\text{s}]$ , (din motive de calcul, în anumite cazuri, la  $t=3666[\text{s}]$ ).

- a)  $R = (531 - 77 \sin 0.3t) [\Omega]$ :  $\omega(5555) = 250.58[\text{rad} / \text{s}]$ ,  $W(5555) = 1.2235 \times 10^6 [\text{J}]$ ,  
 b)  $R = (531 - 177 \sin 0.3t) [\Omega]$ :  $\omega(5555) = 243.26[\text{rad} / \text{s}]$ ,  $W(5555) = 1.2225 \times 10^6 [\text{J}]$ ,  
 c)  $R = (531 - 277 \sin 0.3t) [\Omega]$ :  $\omega(5555) = 228.40[\text{rad} / \text{s}]$ ,  $W(5555) = 1.2162 \times 10^6 [\text{J}]$ ,  
 d)  $R = (531 - 477 \sin 0.3t) [\Omega]$ :  $\omega(3666) = 144.05[\text{rad} / \text{s}]$ ,  $W(3666) = 1.2235 \times 10^6 [\text{J}]$ ,  
 e)  $R = (531 + 77 \sin 0.3t) [\Omega]$ :  $\omega(5555) = 250.57[\text{rad} / \text{s}]$ ,  $W(5555) = 1.2235 \times 10^6 [\text{J}]$ ,  
 f)  $R = (531 + 477 \sin 0.3t) [\Omega]$ :  $\omega(3777) = 144.24[\text{rad} / \text{s}]$ ,  $W(3777) = 8.0399 \times 10^5 [\text{J}]$ .

În punctele de putere maximă se calculează  $R_{\text{sarcină}}$  pentru  $V=25;20;15;5;1. [\text{m/s}]$ .

Puterea electrică în rezistența  $R$  se calculează cu expresia:

$$P_e = RI^2 = R(I_d^2 + I_q^2) \quad (4.82)$$

1)  $V = 25 [\text{m/s}]$

Rezolvând sistemul pentru  $V = 25 [\text{m/s}]$ ,

$$\left\{ \begin{array}{l}
 V = 25 \\
 \omega_{TVN} = 20 \left( \frac{V}{5} \right)^{1.5} \\
 U_d = -\omega \cdot 0.08 I_q \\
 U_q = \omega 0.08 I_d + \omega \Psi_{MP} \\
 - \left( -0.5 \omega_T + 20 \left( \frac{V}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} = \Psi_{MP} I_q \\
 U_d = -R I_d \\
 U_q = -R I_q \\
 \omega = 314 \left( \frac{V}{5} \right)^{1.5} \\
 \Psi_{MP} = 1.3 \\
 P_e = R (I_d^2 + I_q^2)
 \end{array} \right. \quad (4.83)$$

obținem următoarele rezultate:

$$U_d = 1538.5 [V], \omega = 3510 [rad / s], \omega_{TVN} = 223.61 [rad / s],$$

$$I_q = -5.4779 [A], P_e = 25000.0 [W], R = 724.22 [\Omega],$$

$$I_d = -2.1243 [A], U_q = 3967.2 [V], \Psi_M = 1.3 [Wb].$$

Pentru  $R = 724.22 [\Omega]$  energia este maximă. Cu această valoare a lui  $R$  se obține în  $\frac{5555555}{3600 \cdot 24} = 64.3$  [zile], la  $V = 25 [m / s]$ , o energie electrică  $W$  a cărei valoare este  $W(5555555) = 1.3885 \times 10^{11} [J]$ .

Din sistemul:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 5 \frac{d\omega}{dt} = \left( -812.5 \omega \frac{724.22}{625.0 \cdot (724.22)^2 + 4.0 \omega^2} \right) 1.3 + \left( 10 \left( \frac{25}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} \\
 \frac{dW}{dt} = 724.22 \left( 1056.3 \frac{\omega^2}{625 \cdot (724.22)^2 + 4 \omega^2} \right) \\
 \omega(0) = 3510.6 \\
 W(0) = 0
 \end{array} \right. \quad (4.84)$$

Se obține expresia:

$$W(t) = R (I_d^2 + I_q^2) t = 25000 \cdot t = 25000 \cdot 5555555 = 1.3889 \times 10^{11} [J], \quad (4.85)$$

Si următoarele rezultate în funcție de viteza vântului și rezistența R:

a) Pentru  $V = 25 [m / s]$  și  $R = 724.22 [\Omega]$ :

$$\omega(0) = 3510.6 [rad / s], \omega(5555555) = 3510.6 [rad / s],$$

$$W(5555555) = 1.38 \times 10^{11} [J], P_e = 25000 [W], K = 1.6$$

b) Pentru  $V = 20 [m / s]$  și  $R = 781.46 [\Omega]$ :



$$\omega(0) = 2512[\text{rad/s}], \omega(555555) = 251201[\text{rad/s}],$$

$$W(555555) = 7.1 \times 10^{10} [\text{J}], P_e = 12800[\text{W}], K = 1.6$$

c) Pentru  $V = 15[\text{m/s}]$  și  $R = 812.16[\Omega]$  :

$$\omega(0) = 1631.6[\text{rad/s}], \omega(555555) = 1631.6[\text{rad/s}],$$

$$W(555555) = 3.00 \times 10^{10} [\text{J}], P_e = 5400. [\text{W}], K = 1.6$$

d) Pentru  $V = 10[\text{m/s}]$  și  $R = 827.03[\Omega]$  :

$$\omega(0) = 888.13[\text{rad/s}], \omega(555555) = 888.13[\text{rad/s}],$$

$$W(555555) = 8.8 \times 10^9 [\text{J}], P_e = 1600. [\text{W}], K = 1.6$$

e) Pentru  $V = 1[\text{m/s}]$  și  $R = 833.13[\Omega]$  :

$$\omega(0) = 28.085[\text{rad/s}], \omega(555555) = 28.085[\text{rad/s}],$$

$$W(555555) = 8.888 \times 10^6 [\text{J}], P_e = 1.6[\text{W}], K = 1.6$$

Pentru  $R = \text{ct}$  și pentru diverse valori ale vitezei vântului  $V$  s-au calculat energiile după  $t = 555555[\text{s}] = 64,3[\text{zile}]$ . Se poate observa că se verifică, indiferent de viteză, raportul dintre putere și cubul vitezei :

$$K = \frac{P}{V^3} = 1.6$$

#### Puterea depinde de viteza vântului la cub

Modificarea lui  $R$  de forma  $R = a + b \sin 0.3t$  nu ne conduce la mărirea energiei și deci nu se justifică adoptarea unei strategii de conducere pentru  $R$  variabil în timp.

Pentru  $R = 431[\Omega]$  rezultă  $\omega(5555) = 220.9[\text{rad/s}], W(5555) = 1.2111 \times 10^6 [\text{J}];$

Pentru  $R = 501[\Omega]$  rezultă  $\omega(5555) = 243.31[\text{rad/s}], W(5555) = 1.2225 \times 10^6 [\text{J}];$

Pentru  $R = 531[\Omega]$  rezultă  $\omega(5555) = 252.2[\text{rad/s}], W(5555) = 1.2235 \times 10^6 [\text{J}];$

Pentru  $R = 561[\Omega]$  rezultă  $\omega(5555) = 260.71[\text{rad/s}], W(5555) = 1.2226 \times 10^6 [\text{J}];$

Pentru  $R = 631[\Omega]$  rezultă  $\omega(5555) = 279.16[\text{rad/s}], W(5555) = 1.2148 \times 10^6 [\text{J}].$

#### CONCLUZII

1. Pentru  $R = 831. [\Omega]$  energia după 5555[s] este:  $W_1 = 1.1654 \times 10^6 [\text{J}]$ , iar pentru  $R = 531. [\Omega]$  energia după 5555[s] este:  $W_2 = 1.2235 \times 10^6 [\text{J}]$

2. Diferența de energie pentru cele 2 valori de rezistență este:

$$\Delta W = W_2 - W_1 = 1.2235 \times 10^6 - 1.1654 \times 10^6 = 58100 [\text{J}], \text{adică cu}$$

$$\frac{\Delta W}{W_2} \times 100 = \frac{58100}{1.2235 \times 10^6} \times 100 = 4.748\%$$

mai multă energie se obține în condițiile folosirii unui  $R_{\text{optim}}$ , determinat din simulările de mai sus.

3. Din cele de mai sus se observă că **REZISTENȚA OPTIMĂ NU ESTE ESTIMATĂ PENTRU VITEZĂ MEDIE**, așa că va trebui estimată prin simulări dinamice valoarea rezistenței optime la o anumită viteză medie.

4. Rezultatele obținute motivează faptul că dependența puterii de viteza vântului nu este liniară, puterea depinzând de cubul vitezei.

5. Se cunoaște faptul că la turbina de vânt navală **-TVN-**, rezistențele de sarcină sunt dependente de vitezele medii ale vântului, în regim dinamic, astfel că la conducerea sistemului (**TVN+GSMP**) estimatorul de viteză (anemometru) trebuie să furnizeze valoarea medie a vitezei precum și valorile extreme [1].

6. Estimările la  $t = 5555[s] = 1.5[ore]$  **NU SUNT CONCLUDENTE**, deoarece o parte din energie provine din energia de frânare a maselor în mișcare de rotație, așa cum se poate observa din variația lui  $\omega(t)$  pentru cazul  $R=531[\Omega]$ , în sensul că scade semnificativ în timp deși viteza vântului se menține aceeași ( $V = 5 + 2 \sin 0.3t$ ).

7. Estimările la un timp foarte mare, (ordinul zecilor de ore) **SUNT CORECTE**.

În Matematica 5 s-au extins intervalele de timp și astfel s-a putut obține o estimare mai corectă a rezistenței de sarcină de viteza vântului.

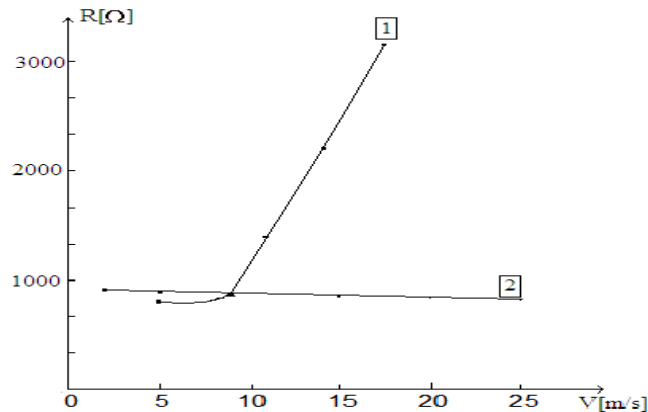


Fig.4.47.a Dependența rezistenței de viteza vântului

Dependența rezistenței de sarcină –  $R$  – a fost dedusă pentru următoarele viteze variabile ale vântului:

$$V = 5 + 3 \sin 0.3t, (R = 716[\Omega]); V = 8 + 3 \sin 0.3t, (R = 748[\Omega]);$$

$$V = 11 + 3 \sin 0.3t, (R = 1430[\Omega]); V = 14 + 3 \sin 0.3t, (R = 2234[\Omega]);$$

$$V = 17 + 3 \sin 0.3t, (R = 3120[\Omega]).$$

Dependența rezistenței de sarcină –  $R$  – a fost dedusă pentru următoarele viteze constante ale vântului:

$$V = 1[m/s], (R = 831[\Omega]);$$

$$V = 5[m/s], (R = 830[\Omega]);$$

$$V = 10[m/s], (R = 825[\Omega]);$$

$$V = 15[m/s], (R = 810[\Omega]);$$

$$V = 20[m/s], (R = 780[\Omega]);$$

$$V = 25[m/s], (R = 722[\Omega]).$$

8. Diferențele dintre cele două cazuri 1 și 2 sunt semnificative.

9. În cazul menținerii vitezei medii la valoarea  $V_{mediu} = 17[m/s]$  și

#### 4.3.-Maximizarea energiei electrice la variațiile vitezei vântului 123

modificând, la componenta alternativă, amplitudinea vitezei vântului de la 3[m/s] la 13 [m/s] dependența rezistenței de sarcină  $R$  a fost dedusă pentru următoarele viteze ale vântului:

$$V = 17 + 3 \sin 0.3t, (R = 3120[\Omega]);$$

$$V = 17 + 5 \sin 0.3t, (R = 3158[\Omega]);$$

$$V = 17 + 7 \sin 0.3t, (R = 3213[\Omega]);$$

$$V = 17 + 9 \sin 0.3t, (R = 3287[\Omega]);$$

$$V = 17 + 11 \sin 0.3t, (R = 3382[\Omega]);$$

$$V = 17 + 13 \sin 0.3t, (R = 3498[\Omega]).$$

#### Rezistența de sarcină optimă depinde semnificativ de viteza medie

S-a obținut dependența rezistenței de sarcină de amplitudinea oscilațiilor vitezei vântului, așa ca în figura 4.47.b.

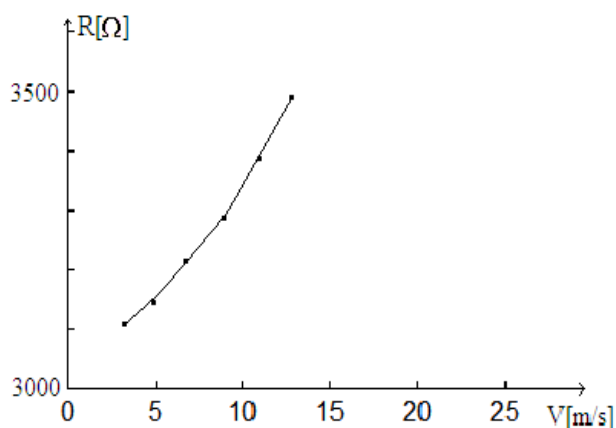


Fig.4.47.b Dependența rezistenței de viteza vântului

#### 4.4. Maximizarea energiei mecanice în condițiile în care viteza vântului variază

##### Formularea problemei

Maximizarea energiei debitate de **GSMP** conduce la valori foarte mici pentru rezistența de sarcină  $R$ , deoarece energia provine de la:

- vânt și de la
- **energia cinetică a maselor în mișcare.**

Prin urmare, maximizarea energiei trebuie analizată la turbina de vânt navală **TVN**, a cărei putere este:

$$P_{TVN} = M_{TVN} \cdot \omega = (-a\omega + bV^{1.5})\omega = \left( -\frac{10}{314}\omega + 20\left(1 + \frac{2 \sin 0.3t}{5}\right)^{1.5} \right) \frac{20}{314}\omega \quad (4.86)$$

este maximă pentru:

$$\omega^* = \frac{bV^{1.5}}{2a} = 314 \left( 1 + \frac{2 \sin 0.3t}{5} \right)^{1.5} \quad (4.87)$$

$$M_{TVN}^* = \frac{bV^{1.5}}{2} = 10 \left( 1 + \frac{2 \sin 0.3t}{5} \right)^{1.5} \frac{20}{314} \quad (4.88)$$

și are valoarea:

$$P_{TVN}^* = \frac{b^2 V^3}{4a} = 200 \left( 1 + \frac{2 \sin 0.3t}{5} \right)^3 \quad (4.89)$$

Din cauza valorii mari a momentelor de inerție  $J$  și a schimbării rapide în timp a vitezei vântului, **nu este posibilă funcționarea permanentă în punctele de putere maximă.**

Există, totuși, un optim din punct de vedere al maximizării energiei pe o perioadă lungă de timp, la o viteză a vântului variabilă în timp. Această maximizare a energiei se poate realiza prin intermediul unei legi de variație în timp a rezistenței de sarcină  $R$  în funcție de viteza vântului.

**Maximizarea energiei se poate realiza prin determinarea variației rezistenței de sarcină  $R$  în funcție de viteza vântului.**

Determinarea funcției  $R(V)$  sau  $R(t)$ , în condițiile obținerii unei energii maxime la sfârșitul unei perioade lungi de timp se face prin intermediul sistemului de ecuații diferențiale al **GSMP**, analizat la  $V = a + b \sin\left(\frac{2\pi}{T}\right)t$

#### 4.4. Regimurile de funcționare în gol și în sarcină a GSMP la fluctuații ale vitezei vântului

Chiar dacă cuplul **GSMP** devine nul, (deci se deconectează  $R$ ), turația la **TVN** nu crește atât de rapid încât să poată urmări variația în timp a vitezei vântului  $V$ , așa cum se poate observa din aplicația dată în continuare, în care, din sistemul de ecuații diferențiale, rămân doar ecuațiile mișcării și ale energiei:

$$\begin{cases} J \frac{d\omega}{dt} = M_{TVN} = (-a\omega + bV^{1.5}) \\ \frac{dW_m}{dt} = P_{TVN} = (-a\omega + bV^{1.5})\omega \end{cases} \quad (4.90)$$

sau:

$$\begin{cases} 5 \frac{d\omega}{dt} = \left( -\frac{10}{314} \omega + 20 \left( \frac{V}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} \\ \frac{dW_m}{dt} = \left( -\frac{10}{314} \omega + 20 \left( \frac{V}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} \omega \\ \omega(0) = 314.04 \\ W_m(0) = 0 \end{cases} \quad (4.91)$$

Având în vedere cele de mai sus se poate concluziona că:

**1. la variații rapide ale vitezei vântului, sistemul TVN+GSMP NU poate da energia maximă disponibilă  $W_{max}$ , datorită inerției mecanice mari;**

**2. GSMP are un rol dezavantajos în perioadele în care  $V$  crește;**

**3. energia vântului în perioadele cu  $V$  în creștere se înmagazinează numai în**

**energia cinetică a maselor în rotație**, dacă **GSMP** funcționează în gol;

**4.GSMP** intervine în perioadele cu  $V = ct$ ,  $V$  în scădere sau  $V$  în creștere lentă.

Se poate calcula valoarea derivatei vitezei vântului de la care **GSMP** este indicat a fi lăsat să funcționeze în gol, folosind relația:

$$J^* = \frac{V}{3VK_T^2} \quad (4.92)$$

Pentru a funcționa la putere maximă, viteza unghiulară  $\omega$  ar trebui să se modifice cu viteza vântului  $V$  sub forma:

$$\omega(V) = \frac{bV^{1.5}}{2a} = 314\left(\frac{V}{5}\right)^{1.5} \quad (4.93)$$

Înlocuind pe  $\omega(V)$  în ecuația mișcării:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{TVN} = \left(-\frac{10}{314} \omega + 20\left(\frac{V}{5}\right)^{1.5}\right) \frac{20}{314} \quad (4.94)$$

se obține:

$$J \frac{d\omega}{dt} = 10\left(\frac{V}{5}\right)^{1.5} \left(\frac{20}{314}\right) \quad (4.95)$$

sau cu  $dt = \frac{dV}{V'}$  rezultă:

$$J \frac{d\omega}{dV} V' = 10\left(\frac{V}{5}\right)^{1.5} \left(\frac{20}{314}\right) \quad (4.96)$$

Sau cu  $\frac{d\omega}{dV} = \left(\frac{314}{5^{1.5}}\right)(1.5V^{0.5})$ ,  $K_T = \frac{314}{20}$ , (raportul de transmisie) se

obține:

$$J \left(\frac{314}{5^{1.5}}\right)(1.5V^{0.5})V' = 10\left(\frac{V}{5}\right)^{1.5} (K_T) \quad (4.97)$$

de unde se obține valoarea momentului de inerție  $J$ , raportat la axul **GSMP**, pentru care sistemul (**TVN+GSMP**) funcționează în punctul de putere maximă:

Derivata vitezei vântului  $V'$  fiind :

$$V' = \frac{V}{3K_T^2 J^*} \quad (4.98)$$

La  $J = J^* = 5[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$ ,  $K_T = \frac{314}{20}$  și  $V = 5[\text{m/s}]$  rezultă:

$$V' = \frac{5 \cdot 20^2}{3 \cdot 314^2 \cdot 5} = 1.3523 \times 10^{-3} [\text{m/s}^2]$$

Se observă valoarea foarte mică a derivatei vitezei astfel că, pentru  $J^* = 5[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$  și la  $V = 5[\text{m/s}]$ , pentru ca în sistem să se injecteze, de la vânt, maximul de putere mecanică, viteza vântului nu trebuie să aibă variații mari în timp. După  $t = 10[\text{s}]$  viteza vântului nu trebuie să fie mai mare decât :

$$V = 10V' + 5 = 10 \cdot 1.3523 \times 10^{-3} + 5 = 5.0135[\text{m/s}]$$

și deci sub

$$\frac{5.0135 - 5}{5} 100 = 0.27\%$$

### PUTEREA MECANICĂ MAXIMĂ INJECTATĂ ÎN SISTEM LA O VARIAȚIE SINUSOIDALĂ A VITEZEI VÂNTULUI

Se analizează în cele ce urmează condițiile în care puterea mecanică injectată în sistem să fie maximă, în condițiile în care viteza vântului  $V$  variază sinusoidal.

Sistemul (**TVN+GSMP**) funcționează inițial, de exemplu, la turația/viteza unghiulară  $\omega$  de valoare:

$$\omega_{GSMP} = 314[\text{rad/s}] \text{ și } \omega_{TVN} = 20[\text{rad/s}]$$

fiind deci în punctul de putere maximă  $P_{\max}$  pentru  $V = 5[\text{m/s}]$  (figura 4.48.).

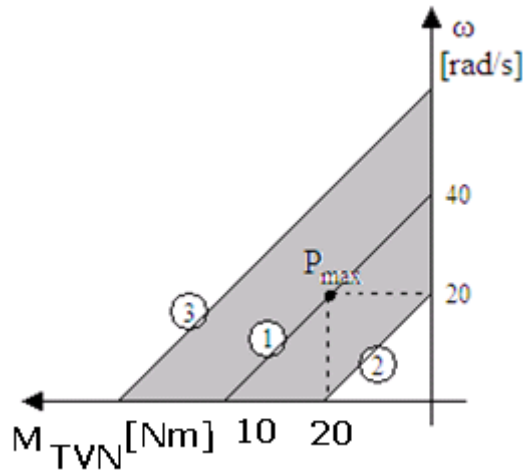


Fig.4.48. Caracteristicile mecanice ale TVN

Caracteristica **1** este trasată pentru  $V = 5[\text{m/s}]$ , **2** pentru  $V = 3[\text{m/s}]$  și **3** pentru  $V = 7[\text{m/s}]$ .

#### Modificarea caracteristicilor mecanice cu viteza vântului

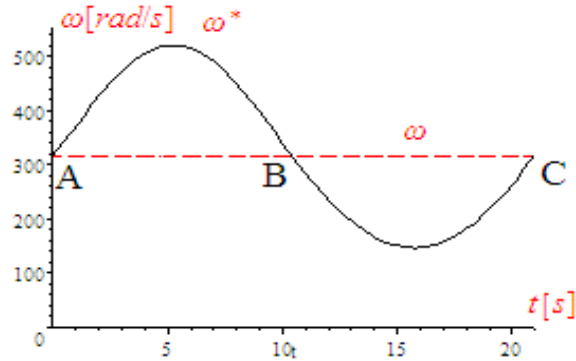
La o viteză a vântului de variație sinusoidală,  $V = 5 + 2 \sin 0.3t$ , caracteristicile mecanice ale **TVN** sunt în zona hășurată, figura 4.48.

Puterea este maximă pentru o variație în timp a vitezei unghiulare mecanice  $\omega^*$  de forma  $\omega^* = 314 \left( 1 + \frac{2 \cdot \sin 0.3t}{5} \right)^{1.5}$  dedusă anterior din  $\frac{dP}{d\omega} = 0$ .

#### Observația 1

În zona de creștere a vitezei vântului,  $\omega^*$  are o variație mai rapidă decât  $\omega$  rezultat din ecuația mișcării  $J \frac{d\omega}{dt} = M_{TVN}$ , la funcționarea în gol ( $M_{GSMP} = 0$ ).

$$\omega^* = 314 \left( 1 + \frac{2 \cdot \sin 0.3t}{5} \right)^{1.5}$$

Fig.4.49. Variația în timp a vitezei unghiulare  $\omega^*$ 

Din acest motiv nu este posibilă funcționarea la putere maximă în toată zona, ci doar în punctele A,B,C. Funcționarea la putere maximă ar impune pe zona AB o accelerare din exterior, (ca și cum generatorul electric devine motor). Pe zona BC este necesar un cuplu mare și variabil la generator pentru ca  $\omega$  să scadă și astfel să urmărească variația lui  $\omega^*$ .

#### Observația 2

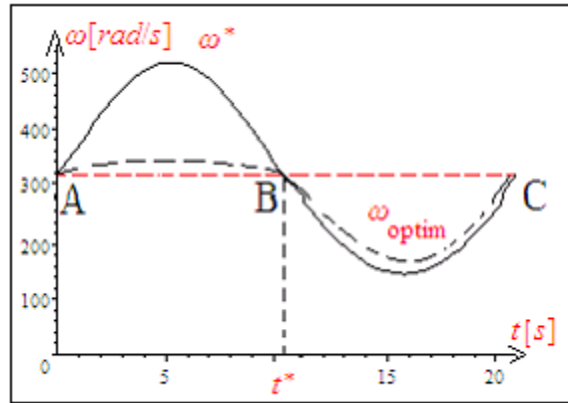
Din cauza variației rapide a vitezei vântului și datorită tendinței de a funcționa cât mai aproape de puterea maximă posibilă ce o poate da **TVN**, sistemul **(TVN+GSMP)** este o sursă de putere sensibil variabilă în timp, fapt considerat perturbator pentru sistemul electroenergetic naval cu mai multe **GS**, dacă **GSMP** debitează în sistemul electroenergetic de tensiune și frecvență date. La o funcționare în regim autonom, cu un singur **GS**, fluctuațiile de putere modifică sensibil tensiunea și frecvența din sistemul de alimentare și pentru a le menține în zona valorilor nominale se impun reglări rapide ale tensiunii pe excitația generatorului sincron, care trebuie să fie cu excitație în curent continuu și nu cu **MP**(magnet permanent).

#### Observația 3

Viteza unghiulară mecanică  $\omega$ , la funcționarea în gol, se stabilizează după  $t > 8000[s]$ , la valoarea  $\omega = 633.54[rad/s]$ , valoare peste care nu mai trece, viteza vântului fiind  $V = 5 + 2 \sin 0.3t$ . La această valoare în sistem nu se mai acumulează energie. Se pune problema calculării unei viteze optime între  $\omega(0) = 314[rad/s]$  și  $\omega(\infty) = 633.5[rad/s]$ , evident cu o conducere corespunzătoare a generatorului electric. Această viteză optimă  $\omega_{optim}$  trebuie să fie de forma:

$$\omega_{optim} = a + b \sin 0.3t \quad (4.99)$$

unde constantele  $a$  și  $b$  se determină printr-un algoritm de calcul ce apropie cât mai mult curbele  $\omega_{optim}(t)$  și  $\omega^*(t)$ .

Fig.4.50. Variația în timp a vitezelor unghiulare  $\omega_{optim}$  și  $\omega^*$ 

În zona AB generatorul funcționează în gol pentru a da posibilitatea vitezei unghiulare  $\omega$  să crească, iar în zona BC  $\omega$  scade pronunțat, apropiindu-se de  $\omega^*$  prin încărcarea corespunzătoare a **GSMP**. În această situație, rezistența de sarcină de la GSMP variază între o valoare foarte mare, (pentru zona AB), și o valoare mică și variabilă, pentru zona BC.

**CAZUL 1**  $J = \infty$

Pentru  $\omega = 314 = ct$ , cuplul turbinei, datorită variației vitezei vântului de forma  $V = 5 + 2 \sin 0.3t$ , se modifică în timp ca în figura 4.51.

$$M_{TVN} = \left( -10 + 20 \left( 1 + \frac{2 \cdot \sin 0.3t}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314}$$

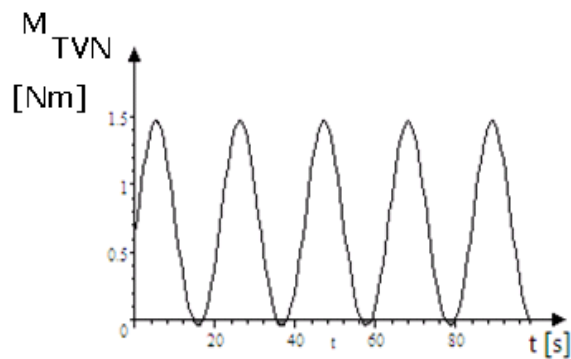


Fig.4.51. Variația în timp a cuplului

**Se observă zona hașurată cu  $M_{TVN}$  negativ, zonă în care sistemul este frânat.**

**CAZUL 2**  $J = 5 [kg \cdot m^2]$

Pentru  $\omega(0) = 314 [rad/s]$  ecuația mișcării pentru arborele **GSMP** este:



$$5 \frac{d\omega}{dt} = \left( -\frac{10}{314} \omega + 20 \left( \frac{V}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} - M_{GSMP} = \left( -\frac{10}{314} \omega + 20 \left( 1 + \frac{2 \sin 0.3t}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} - M_{GSMP} \quad (4.100)$$

Valoarea cuplului generatorului  $M_{GSMP}$  este impusă prin strategia de conducere a sistemului (**TVN+GSMP**), strategie care dorim să o construim astfel încât să se obțină maximul de energie în condiții de variație a vitezei vântului.

Este importantă cunoașterea comportării sistemului pentru  $M_{GSMP} = 0$  în condiții de variație a vitezei vântului.

La funcționarea în gol ecuația mișcării este:

$$5 \frac{d\omega}{dt} = \left( -\frac{10}{314} \omega + 20 \left( 1 + \frac{2 \sin 0.3t}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} \quad (4.101)$$

iar puterea mecanică ce intră în sistem la momentul de timp  $t$  are valoarea:

$$P_m = M_{TVN} \cdot \omega = \left( -\frac{10}{314} \omega + 20 \left( 1 + \frac{2 \sin 0.3t}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} \omega \quad (4.102)$$

Deoarece puterea este derivata energiei  $W_m$  se poate scrie:

$$P_m = \frac{dW_m}{dt} = \left( -\frac{10}{314} \omega + 20 \left( 1 + \frac{2 \sin 0.3t}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} \omega \quad (4.103)$$

#### Funcționarea în gol la variație sinusoidală a vântului

Într-un interval de timp  $\Delta t = 8000[s]$  energia mecanică intrată în sistem se obține din sistemul de ecuații diferențiale de mai jos:

$$\begin{cases} 5 \frac{d\omega}{dt} = \left( -\frac{10}{314} \omega + 20 \left( 1 + \frac{2 \sin 0.3t}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} \\ \frac{dW_m}{dt} = \left( -\frac{10}{314} \omega + 20 \left( 1 + \frac{2 \sin 0.3t}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} \omega \\ \omega(0) = 314 \\ W_m(0) = 0 \end{cases} \quad (4.104)$$

rezultă:  $\omega(8000) = 633.54 [rad / s]$  iar  $W_m(8000) = 7.5695 \times 10^5 [J]$

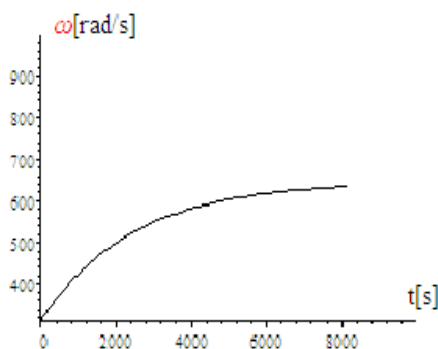


Fig.4.52. Variația în timp a pulsației

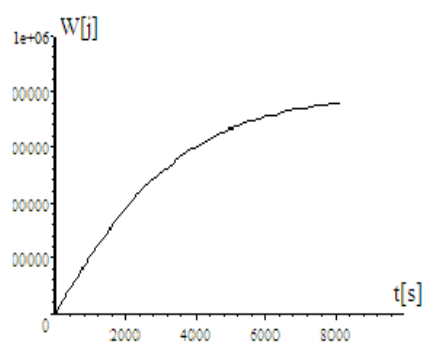


Fig.4.53. Variația în timp a energiei

Energia și pulsația/turația se stabilizează după un interval de timp  $\Delta t > 8000[s] = 2.2222[h]$ , la valorile:

$$W_m(8000) = 7.5695 \times 10^5 [J]$$

$$\omega(8000) = 633.54 [\text{rad} / \text{s}]$$

Aceste rezultate trebuie să se verifice și prin integrare directă, astfel:

$$\frac{dW_m}{dt} = M_{TVN} \cdot \omega = J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega$$

sau:

$$dW_m = J\omega d\omega$$

sau:

$$W_m(t) = \frac{1}{2} J(\omega^2(t) - \omega^2(0))$$

sau:

$$7.569 \times 10^5 \cong \frac{5}{2} (633.54^2 - 314^2)$$

sau:

$$7.569 \times 10^5 \cong 7.5694 \times 10^5$$

Diferența dintre cele două rezultate este neesențială.

#### Observații

**1.** Deoarece energia din sistem nu este transmisă mai departe, (**GSMP** fiind în gol), ea se regăsește numai în energia cinetică a maselor în mișcare de rotație și deci nu mai crește peste un anumit interval de timp.

**2.** Se poate afirma că sistemul mecanic a atins un nivel de **saturație**, nemaiputând capta energie eoliană, deși ea este disponibilă în continuare deoarece viteza vântului rămâne aceeași:  $V = 5 + 2 \sin 0.3t$ .

**3.** La saturație, turbina devine un obstacol fix pentru masele de aer în mișcare (deci pentru vânt).

#### VITEZA VÂNTULUI CREȘTE

Pe un sfert de perioadă,  $\left(\frac{T}{4}\right)$ , variația vitezei vântului, de la  $V = 5 [m/s]$  până la  $V = 7 [m/s]$ , este reprezentată în figura 4.54, zona **A,B**.

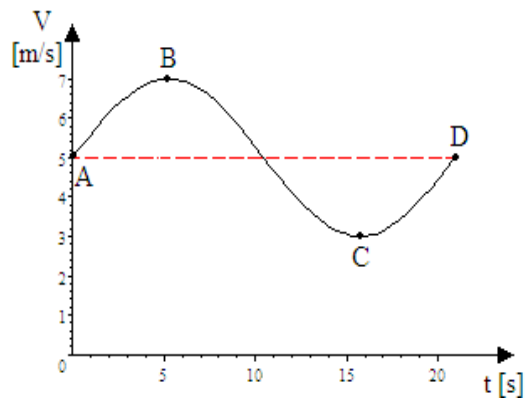


Fig.4.54. Variația vitezei vântului

Analizând fluxul de putere pe un sfert de perioadă,

$\left(\frac{T}{4} = \frac{20.933}{4} = 5.233 [s]\right)$ , prin intermediul sistemului:

$$\begin{cases} 5 \frac{d\omega}{dt} = \left(-\frac{10}{314} \omega + 20 \left(1 + \frac{2 \sin 0.3t}{5}\right)^{1.5}\right) \frac{20}{314} \\ \frac{dW_m}{dt} = \left(-\frac{10}{314} \omega + 20 \left(1 + \frac{2 \sin 0.3t}{5}\right)^{1.5}\right) \frac{20}{314} \omega \\ \omega(0) = 314 \\ W_m(0) = 0 \end{cases} \quad (4.105)$$

se obțin rezultatele:  $\omega_B(5.2333) = 315.21 [rad / s]$ ,  $W_m(5.2333) = 1907.5 [J]$

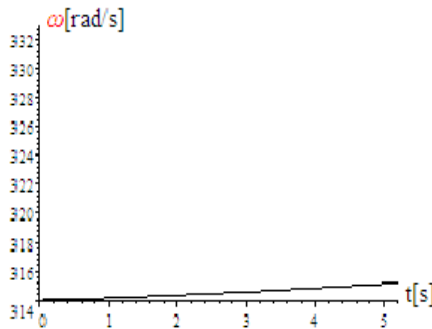


Fig.4.55. Variația în timp a pulsației

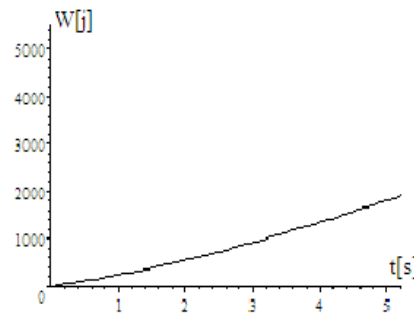


Fig.4.56. Variația în timp a energiei

La o funcționare în punctele de putere maximă caracterizate prin:

$$\omega^* = 314 \left(\frac{V}{5}\right)^{1.5} = 314 \left(1 + \frac{2 \sin 0.3t}{5}\right)^{1.5} \text{ se obțin valorile}$$

$$\omega^*(5.2333) = 520.14 [rad / s]$$

se observă că  $\omega^*(5.2333) = 520.14 > \omega(5.2333) = 315.21$  de la funcționarea în gol și deci NU este posibilă funcționarea în punctele de putere maximă, chiar dacă  $M_{GSMP} = 0$  în zona de creștere a vitezei vântului.

**Turația optimă  $n^* = \frac{\omega^*}{2\pi}$  nu poate fi realizată din cauza inerției**

Energia mecanică primită în sistem de la vânt în zona **AB**,  $W_m(5.2333) = 1907.5 [J]$  este mai mică decât cea maxim posibilă  $W_m^*$ , obținută la

o funcționare în regim de putere maximă, cu  $M_{TVN}^* = 10 \left(1 + \frac{2 \sin 0.3t}{5}\right)^{1.5} \frac{20}{314}$  și

$$\omega^* = 314 \left(1 + \frac{2 \sin 0.3t}{5}\right)^{1.5}$$

$$\begin{aligned}
 W_m^* &= \int_0^{5.2333} M_{TVN}^* \cdot \omega^* dt = \\
 &= \int_0^{5.2333} 10 \left(1 + \frac{2 \sin 0.3t}{5}\right)^{1.5} \cdot 20 \left(1 + \frac{2 \sin 0.3t}{5}\right)^{1.5} dt = \\
 &= \int_0^{5.2333} 200 \left(1 + \frac{2 \sin 0.3t}{5}\right)^3 dt = 2125.5 [J]
 \end{aligned}$$

**Energia mecanică** primită în zona AB ar fi și mai mică dacă intervine și încărcarea generatorului electric, de exemplu cel mai simplu generator electric, generatorul de curent continuu cu excitație cu magneți permanenți (**GCMP**), ce are tensiunea:

$$U = K_U \cdot \omega$$

și debitează pe rezistența de sarcină R, la cuplul electromagnetic -

$$M_{elmg} = \frac{P}{\omega} = \frac{U^2}{R \omega} = \frac{(K_U \omega)^2}{R \omega} = \frac{K_U^2 \omega}{R}$$

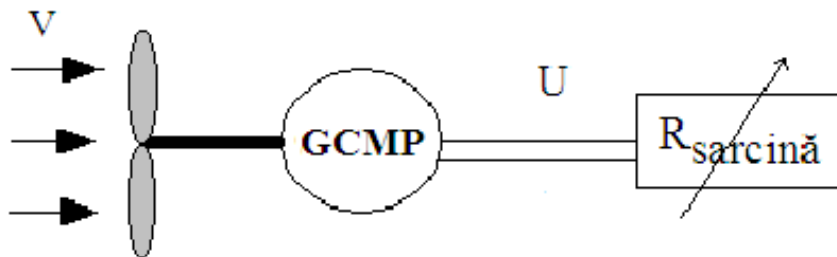


Fig.4.57. Schema bloc a sistemului eolian cu sarcină rezistivă

Ecuția mișcării, la  $K_U = 1$ , este:

$$5 \frac{d\omega}{dt} = -M_{elmg} + M_{TVN} = -\frac{\omega}{R} + \left( -\frac{10}{314} \omega + 20 \left( \frac{V}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314}. \quad (4.106)$$

La  $\mathbf{V=5(m/s)}$  și la o funcționare în punctul de putere maximă caracterizat prin turația la turbină de vânt navală  $n_{TVN}$ , respectiv  $\omega_{TVN} = 2\pi n_{TVN}$ , rezultă sistemul de ecuații algebrice ce dau rezistența de sarcină  $\mathbf{R=492.98 [\Omega]}$ :

$$\left\{ \begin{array}{l}
 V = 5. \\
 \omega_{TVN} = 20 \left( \frac{V}{5} \right)^{1.5} \\
 \left( -0.5 \omega_{TVN} + 20 \left( \frac{V}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} = \frac{\omega}{R} \\
 U = \omega \\
 \omega = 314 \left( \frac{V}{5} \right)^{1.5}
 \end{array} \right. \quad (4.107)$$

Soluțiile sistemului sunt:

$$\left\{ \begin{array}{l} V = 5.0 [m / s], \\ \omega = 314.0 [rad / s], \\ \omega_{TVN} = 20.0 [rad / s], \\ U = 314.0 [V], \\ R = 492.98 [\Omega] \end{array} \right\}$$

Observarea se face prin simulare cu modelul matematic dat de sistemul 4.108:

$$\left\{ \begin{array}{l} 5 \frac{d\omega}{dt} = -\frac{\omega}{492.98} + \left( -\frac{10}{314} \omega + 20 \left( 1 + \frac{2 \sin 0.3t}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} \\ \frac{dW_m}{dt} = \left( -\frac{10}{314} \omega + 20 \left( 1 + \frac{2 \sin 0.3t}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} \omega \\ \omega(0) = 314. \\ W_m(0) = 0 \end{array} \right. \quad (4.108)$$

Se obțin rezultatele:

$$\omega(5.2333) = 314.55 [rad / s], \quad W_m(5.2333) = 1906.4 [J]$$

În concluzie, din punct de vedere al energiei mecanice injectate în sistem rezultă următoarea clasificare:

**1)** energia maximă se obține la  $J \rightarrow 0$  și cu funcționarea în punctele de putere maximă:  $W_m^* = 2125.5 [J]$ .

**2)** energia primită la funcționarea în gol la  $J = 5 [Kgm^2]$  este:

$$W_m^* = 1907.5 [J]$$

**3)** energia cea mai mică se obține la funcționarea în sarcină a generatorului electric  $W_m = 1906.4 [J]$ , energie care scade și mai mult dacă se mărește cuplul la generator, deci sistemul este frânat.

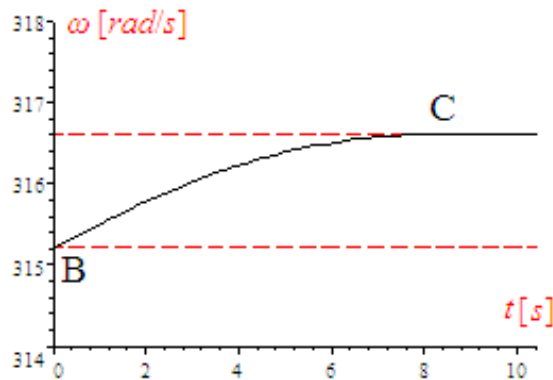


Fig.4.58. Variația în timp a lui  $\omega$

**Inerția mecanică face imposibilă funcționarea optimală**

**VITEZA VÂNTULUI SCADE**

În zona **BC** viteza vântului scade de la valoarea  $V_B = 7[m/s]$  la valoarea minimă  $V_C = 3[m/s]$ , conform relației  $V = 5 + 2 \cdot \cos 0.3t$ , în intervalul de timp  $t_{BC} = 10.466[s]$ , ca în figura 4.59.

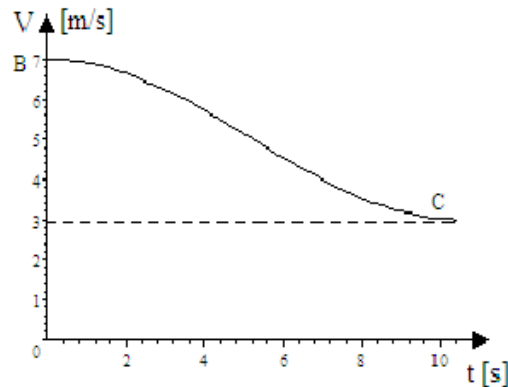


Fig.4.59. Scăderea vitezei în timp

În punctul B viteza unghiulară mecanică este  $\omega_B = 315.21[rad/s]$  și crește în timp, așa cum rezultă din sistemul de ecuații diferențiale 4.109, cu  $V = 5 + 2 \cdot \cos 0.3t$  și cum se observă din figura 4.58.

$$\begin{cases} 5 \frac{d\omega}{dt} = \left( -\frac{10}{314} \omega + \left( 1 + \frac{2 \cos 0.3t}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} \\ \frac{dW_m}{dt} = \left( -\frac{10}{314} \omega + \left( 1 + \frac{2 \cos 0.3t}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} \omega \\ \omega(0) = 315.21 \\ W_m(0) = 0 \end{cases} \quad (4.109)$$

Se obțin rezultatele:

$$\omega(10.466) = 316.62 [rad/s], \quad W_m(10.466) = 2219.7 [J]$$

Energia injectată în sistem la sfârșitul intervalului are valoarea:

$$W_m(10.466) = 2219.7 [J]$$

**Verificare**

Variația vitezei unghiulare mecanice în timp se poate obține și din sistemul inițial 4.110, la care însă originea timpului este cu 5.233[s] în avans și deci se operează la V cu  $V = 5 + 2 \sin 0.3t$ , și deci zona AB este defazată în timp cu 5.233[s], figura 4.60.

$$\begin{cases} 5 \frac{d\omega}{dt} = \left( -\frac{10}{314} \omega + 20 \left( 1 + \frac{2 \sin 0.3t}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} \\ \frac{dW_m}{dt} = \left( -\frac{10}{314} \omega + 20 \left( 1 + \frac{2 \sin 0.3t}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} \omega \\ \omega(0) = 314. \\ W_m(0) = 0 \end{cases} \quad (4.110)$$

Rezultă soluția:

$$\omega(10.4333) = 316.42 [\text{rad} / \text{s}]$$

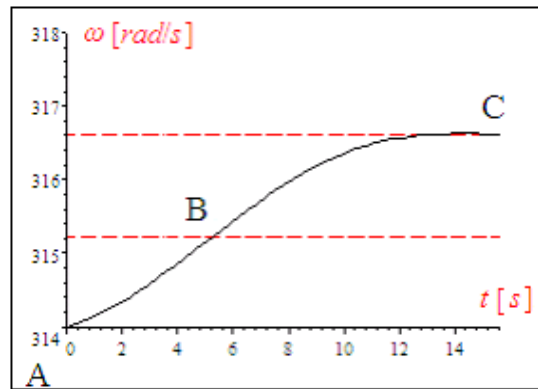


Fig.4.60. Variația în timp a lui  $\omega$

Analizând variația turației/vitezei unghiulare ideale  $\omega^* = 314 \left( \frac{V}{5} \right)^{1.5}$ , comparativ cu  $\omega_{optim}$ , (valoare rezultată din ecuația mișcării), așa cum rezultă din figura 4.65 se observă că de la momentul de timp  $t^*$ , când  $\omega^* = \omega$ , **ESTE POSIBILĂ FUNCȚIONAREA LA PUTERE MAXIMĂ**, în condițiile în care cuplul generatorului electric impune o variație a lui  $\omega$  după legea  $\omega^* = 314 \left( \frac{V}{5} \right)^{1.5}$ . Această cerință se poate rezolva prin înlocuirea în ecuația mișcării a derivatei lui  $\omega^*$ :

$$\begin{aligned} J \frac{d\omega}{dt} &= J \frac{d\omega^*}{dt} = J \frac{d}{dt} \left( 314 \left( 1 + \frac{2 \cos 0.3t}{5} \right)^{1.5} \right) = \\ &= 314 J 1.5 \left( 1 + \frac{2 \cos 0.3t}{5} \right)^{0.5} \left( -0.6 \frac{\sin 0.3t}{5} \right) = \\ &= -471 \cdot 0.6 \sqrt{1 + \frac{2 \cos 0.3t}{5}} \sin 0.3t = \\ &= -282.6 \sin 0.3t \sqrt{1 + \frac{2 \cos 0.3t}{5}} \end{aligned}$$

Se obține din ecuația mișcării variația în timp a cuplului  $M_{GSMP}$

$$\begin{aligned} -282.6 \sin 0.3t \sqrt{1 + \frac{2 \cos 0.3t}{5}} &= \\ &= \left( -\frac{10}{314} \omega^* + 20 \left( 1 + \frac{2 \cos 0.3t}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} - M_{GSMP} \end{aligned}$$

sau:

$$\begin{aligned} M_{GSMP} &= 282.6 \sin 0.3t \sqrt{1 + \frac{2 \cos 0.3t}{5}} + \\ &+ \left( -\frac{10}{314} \omega^* + 20 \left( 1 + \frac{2 \cos 0.3t}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} = \\ &= 282.6 \sin 0.3t \sqrt{1 + \frac{2 \cos 0.3t}{5}} + \frac{200}{314} \left( 1 + \frac{2 \cos 0.3t}{5} \right)^{1.5} \end{aligned}$$

Momentul de timp  $t^*$  se poate deduce din ecuația

$$314 \left( 1 + \frac{2 \cos 0.3t}{5} \right)^{1.5} = 316 \quad \{t^* = 5.2006 [s]\}$$

**Variația lui  $\omega^* = 314 \left( \frac{V}{5} \right)^{1.5}$  și  $\omega$  din ecuația mișcării**

Viteza unghiulară ideală  $\omega^*$  are o variație în timp, conform relației

$$\omega^* = 314 \left( \frac{V}{5} \right)^{1.5} = 314 \left( 1 + \frac{2 \cos 0.3t}{5} \right)^{1.5}$$

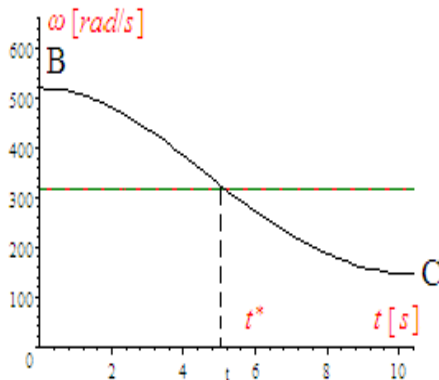


Fig.4.61. Variația în timp a lui  $\omega$

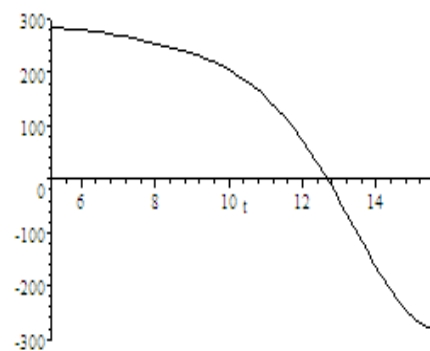


Fig.4.62. Variația în timp a cuplului  $M_{GSMP}$

Din măsurarea vitezei vântului, cu anemometru, se poate, pentru un anumit interval de timp dat, cunoaște viteza medie, cea maximă și cea minimă. Prin urmare, așa cum s-a demonstrat anterior, în zonele de creștere a vitezei, (zona AB), nu este posibilă funcționarea turbinei de vânt navale **TVN** la putere maximă, datorită inerției mecanice mari a maselor în mișcare de rotație și deci în aceste zone



#### 4.4. – Maximizarea energiei mecanice la variații ale vitezei vântului 137

se impune funcționarea în gol a generatorului electric pentru a da posibilitatea accelerării rotorului **TVN** și deci  $\omega(t)$  să se apropie de  $\omega^*(t)$ . Până la momentul de timp  $t = t^*$  și cu GSMP în gol,  $\omega$  crește dar rămâne în continuare mai mic decât  $\omega^*$ . În acest interval de timp  $t = [0, t^*]$  energia vântului se acumulează în masele în mișcarea de rotație și  $\omega(t^*) > \omega(0)$ , așa cum se poate observa din modelările și simulările de mai jos. Considerând perioada de variație a vitezei vântului ca fiind  $T$ , pe zona  $t = (t^*, T)$  are loc o încărcare a GSMP (fig. 4.63.).

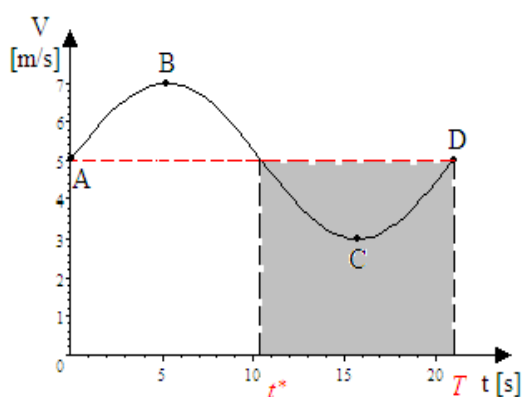


Fig.4.63. Zona de încărcare

#### Încărcarea intermitentă a generatorului captează mai multă energie

##### Calculul timpului de încărcare $t^*$

La o valoare a lui  $T$  de aproximativ 21[s], ( $T=21[s]$ ) se analizează rezolvarea ecuației  $\omega^*(t) = 314 \left(1 + \frac{2 \sin 0.3t}{5}\right)^{1.5} = \omega(t)$  în jurul valorii  $t = t^* \cong 10.5[s]$ . Din sistemul 4.111 se calculează  $\omega(t)$  la  $t = 10.2; 10.4; 10.6; 10.8[s]$ .

$$\begin{cases} 5 \frac{d\omega}{dt} = \left( -\frac{10}{314} \omega + 20 \left(1 + \frac{2 \sin 0.3t}{5}\right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} \\ \frac{dW_m}{dt} = \left( -\frac{10}{314} \omega + 20 \left(1 + \frac{2 \sin 0.3t}{5}\right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} \omega \\ \omega(0) = 314. \\ W_m(0) = 0 \end{cases} \quad (4.111)$$

și se obțin următoarele valori pentru  $\omega(t)$ :

$$\omega_2(10.2) = 316.39[\text{rad} / \text{s}];$$

$$\omega_3(10.4) = 316.41[\text{rad} / \text{s}];$$

$$\omega_4(10.6) = 316.44[\text{rad} / \text{s}];$$

$$\omega_5(10.8) = 316.46[\text{rad} / \text{s}].$$

La  $\omega^*(t) = 314 \left(1 + \frac{2 \sin 0.3t}{5}\right)^{1.5}$  din ecuația  $\omega = \omega^*$  s-a obținut

$t^* = 10.429[\text{s}]$  cu  $\omega(10.429) = \omega^*(10.429) = 316.43[\text{rad} / \text{s}]$ . De la  $t > t^*$  are loc o încărcare a generatorului, astfel încât  $\omega(t)$  să urmărească variația în timp a lui

$$\omega^*(t) = 314 \left(1 + \frac{2 \sin 0.3t}{5}\right)^{1.5}$$

Din ecuația mișcării se deduce variația în timp a cuplului la GSMP cu

$$\begin{aligned} \frac{d\omega}{dt} = \frac{d\omega^*}{dt} &= 314 \cdot 1.5 \left(1 + \frac{2 \sin 0.3t}{5}\right)^{0.5} \left(\frac{0.6 \cos 0.3t}{5}\right) = \\ &= 56.52 \left(1 + \frac{2 \sin 0.3t}{5}\right)^{0.5} \cos 0.3t \end{aligned} \quad (4.112)$$

$$\text{Din relația } 5 \frac{d\omega}{dt} = \left(-\frac{10}{314} \omega + 20 \left(1 + \frac{2 \sin 0.3t}{5}\right)^{1.5} \frac{20}{314} - M_{GSMP}\right) \quad (4.113)$$

se obține,

$$\begin{aligned} 5 \cdot 56.52 \left(1 + \frac{2 \sin 0.3t}{5}\right)^{0.5} \cos 0.3t &= \\ &= \left(-\frac{10}{314} \omega + 20 \left(1 + \frac{2 \sin 0.3t}{5}\right)^{1.5}\right) \frac{20}{314} - M_{GSMP} \end{aligned} \quad (4.114)$$

și rezultă:

$$\begin{aligned} M_{GSMP} &= 10 \left(1 + \frac{2 \sin 0.3t}{5}\right)^{1.5} \frac{20}{314} - \\ &\quad - 282.6 \sqrt{1 + \frac{2 \sin 0.3t}{5}} \cos 0.3t \end{aligned} \quad (4.115)$$

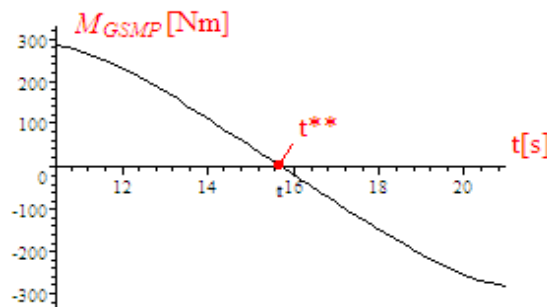


Fig.4.64. Variația cuplului electromagnetic  $M_{GSMP}$

#### 4.4. – Maximizarea energiei mecanice la variații ale vitezei vântului 139

Variația cuplului electromagnetic  $M_{GSMP}(t)$  trebuie făcută în intervalul  $t = [t^* \div T]$  adică de la  $t^* = 10.429[s]$  până la  $t = T = 21[s]$ , după care generatorul se lasă din nou în gol și ciclul se repetă. Din variația în timp a lui  $M_{GSMP}(t)$ , figura 4.64., se observă că pentru  $t^{**} > 15.7[s]$  cuplul  $M_{GSMP}$  devine negativ, (se trece în regim de motor).

La  $t^{**} = 15.7[s]$  valoarea lui  $-\omega-$  este :

$$\omega(15.7) = \omega^*(15.7) = 145.93[\text{rad} / \text{s}]$$

adică foarte mică, față, de  $\omega(0) = 314[\text{rad} / \text{s}]$ , datorită cuplului de frânare foarte mare aplicat de **GSMP**. Pentru a atinge la sfârșitul ciclului, ( $t = T$ ) viteza unghiulară de rotație  $\omega(T) = \omega(0)$  este necesară accelerarea din exterior a arborelui **TVN**, acesta neavând un cuplu suficient de mare iar generatorul **GSMP** ar trebui trecut în regim de motor, fapt nerealizabil datorită inversării fluxului de putere. Din acest motiv este preferabil să se frâneze în zona cu  $t > t^*$  cu un cuplu mai mic, astfel încât la  $t = T$  să se obțină  $\omega(T) = \omega(0) = a$ .

Determinarea vitezei unghiulare mecanice  $a$  se bazează pe valoarea rezistenței de sarcină  $R$ , astfel încât energia mecanică intrată în sistem într-un interval de timp  $T$  să fie maximă.

Calculul rezistenței  $R$ , în intervalul  $[t^* \div T]$  se poate face în două variante:

- 1)  $R = \text{constant}$ ,
- 2)  $R = \text{variabil}$ .

##### **Varianta 1 ( $R = ct$ )**

Din bilanțul de energii rezultă:

$$\int_0^T M_{TVN}(t) \cdot \omega(t) dt = \int_0^T M_{GSMP}(t) \cdot \omega(t) dt \quad (4.116)$$

Într-o primă fază se poate aproxima  $\omega(t) = ct$  și prin simplificare cu  $\omega$  la  $M_{GSMP} = ct$  rezultă la o încărcare intermitentă (figura 4.80a):

$$\int_0^T M_{TVN}(t) \cdot dt = \int_0^T M_{GSMP}(t) \cdot dt = M_{GSMP}(T - t^*) \quad (4.117)$$

sau:

$$\int_0^{21} \left( -\frac{10}{314} \omega + 20 \left( 1 + \frac{2 \sin 0.3t}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} dt = \quad (4.118)$$

$$= M_{GSMP} \cdot (21 - 10.429)$$

##### **Determinarea rezistenței optime la $R = ct$ .**

Determinarea lui  $\omega$  se poate realiza din maximizarea energiei mecanice  $W_m$  obținută pe o perioadă de timp  $T$  astfel:

$$\begin{aligned}
 W_m &= \int_0^T M_{TVN}(t) \cdot \omega(t) dt = \omega \int_0^T M_{TVN}(t) \cdot dt = \\
 &= \left( -\frac{10}{314} \omega^2 21 + 20\omega \int_0^{21} \left( 1 + \frac{2 \sin 0.3t}{5} \right)^{1.5} dt \right) \frac{20}{314} = \\
 &= \left( -\frac{10}{314} \omega^2 + 20\omega 21.634 \right) \frac{20}{314}
 \end{aligned} \quad (4.119)$$

La  $\frac{dW_m}{d\omega} = 0$  sau  $-\frac{20}{314} \omega 21 + 20 \cdot 21.634 = 0$  rezultă  $\omega = 323.48 [rad / s]$

Variația cuplului  $M_{TVN} = \left( -\frac{10}{314} \omega + 20 \left( 1 + \frac{2 \sin 0.3t}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314}$  la

$\omega = 323.48 [rad / s]$  și a cuplului  $M_{GSMP}$  este reprezentată în figura 4.65.a.

La o încărcare continuă

$$M_{GSMP} \cdot 21 = \int_0^{21} \left( -\frac{10}{314} 323.48 + 20 \cdot \left( 1 + \frac{2 \sin 0.3t}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} dt \quad (4.120)$$

așa ca în figura 4.65.b și rezultă:

$$\begin{aligned}
 M_{GSMP} &= \frac{1}{21} \int_0^{21} \left( -\frac{10}{314} 323.48 + 20 \left( 1 + \frac{2 \sin 0.3t}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} dt = \\
 &= 0.65614 [Nm]
 \end{aligned} \quad (4.121)$$

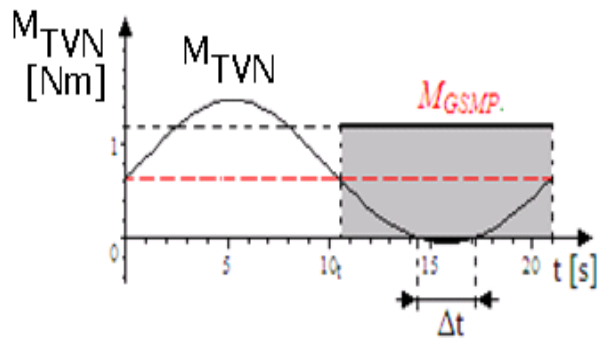


Fig.4.65.a Cuplul turbinei și al generatorului la încărcare intermitentă

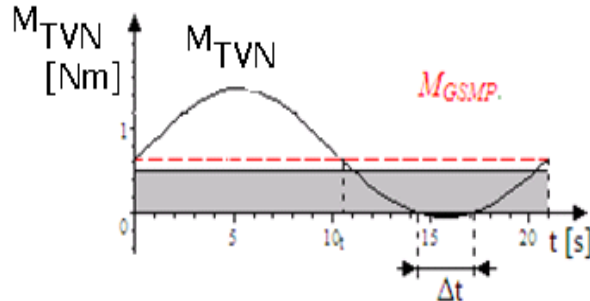


Fig.4.65.b Cuplul turbinei și al generatorului la încărcare continuă

Zona hașurată din figură corespunde intervalului de timp în care **GSMP** este încărcat. Și în acest caz, la o viteză a vântului de forma  $V = 5 + (2 \cdot \sin 0.3t)$  se poate observa, în curba cuplului, zona cu valori negative pentru cuplul **TVN**, zonă hașurată, în care pentru un interval de timp  $\Delta t = 4[s]$  turbina de vânt navală **TVN** se transformă în ventilator, antrenând masele de aer care au o viteză mai redusă, în jurul a 3[m/s].

Rezistența de sarcină  $R = 417.79[\Omega]$ , se obține folosind sistemul algebric următor pentru o valoare a cuplului  $M_{GSMP} = 1.3035[Nm]$ , la încărcare intermitentă a **GSMP**:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_d = -\omega \cdot 0.08I_q \\ U_q = \omega \cdot 0.08I_d + \omega\psi_{MP} \\ -1.3035 = \psi_{MP}I_q \\ U_d = -RI_d \\ U_q = -RI_q \\ \omega = 323.48 \\ \psi_{MP} = 1.3 \\ P_e = R(I_d^2 + I_q^2) \end{array} \right. \quad (4.122)$$

Soluțiile sistemului algebric sunt:

$$\omega = 323.48 [rad / s], I_q = -1.0027 [A],$$

$$U_d = 25.948 [V], \psi_{MP} = 1.3 [Wb],$$

$$P_e = 421.66 [W], R = 417.79 [\Omega],$$

$$I_d = -6.2108 \times 10^{-2} [A], U_q = 418.92 [V]$$

Generatorul debitează o putere  $P_e = 421.66 [W]$  la o tensiune  $U = 419 [V]$ .

La o încărcare continuă

$$M_{GSMP} = \frac{1}{21} \int_0^{21} \left( -\frac{10}{314} 323.48 + 20 \left( 1 + \frac{2 \sin 0.3t}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} dt =$$

$$= 0.65614 [Nm]$$

Din această valoare a cuplului  $M_{GSMP} = 0.65614 [Nm]$ , la încărcare continuă, se obține rezistența de sarcină  $R = 832.37 [\Omega]$ , folosind sistemul algebric de mai jos:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_d = -\omega \cdot 0.08 I_q \\ U_q = \omega \cdot 0.08 I_d + \omega \Psi_{MP} \\ -0.65614 = \Psi_{MP} I_q \\ U_d = -R I_d \\ U_q = -R I_q \\ \omega = 323.48 \\ \Psi_{MP} = 1.3 \\ P_e = R (I_d^2 + I_q^2) \end{array} \right. \quad (4.123)$$

ale cărui soluții sunt:

$$R = 832.37 [\Omega], U_q = 420.12 [V], I_d = -1.5692 \times 10^{-2} [A],$$

$$I_q = -0.50472 [A], U_d = 13.061 [V], \Psi_{MP} = 1.3 [Wb],$$

$$\omega = 323.48 [rad / s], P_e = 212.25 [W]$$

### Varianta 2( $R \neq ct$ )

Din bilanțul de energie la  $M_{GSMP}$  variabil și  $\omega = ct = 323.48 [rad / s]$ , rezultă:

$$\int_0^T M_{TVN}(t) \cdot dt = \int_{t^*}^T M_{GSMP}(t) \cdot dt \quad (4.124)$$

sau

$$13.779 = \int_{10.429}^{21} M_{GSMP}(t) \cdot dt \quad (4.125)$$

Din sistemul algebric:

$$\left\{ \begin{array}{l} -R I_d = -\omega \cdot 0.08 I_q \\ -R I_q = \omega \cdot 0.08 I_d + \omega \Psi_{MP} \\ M_G = \Psi_{MP} I_q \\ \omega = 323.48 \\ \Psi_{MP} = 1.3 \end{array} \right. \quad (4.126)$$

rezultă cuplul generatorului  $M_{GSMP}$  de forma:

$$M_{GSMP} = -2.1355 \times 10^8 \frac{R}{3.9063 \times 10^5 R^2 + 2.616 \times 10^8} \quad (4.127)$$

**La o încărcare intermitentă** și luând originea timpului în  $t^*$ , la o variație

4.4. – Maximizarea energiei mecanice la variații ale vitezei vântului 143

a rezistenței de sarcină de forma:

$$R = (a + b \sin \omega t) = (a + b \sin 0.3t) = (400 - 33 \sin 0.3t) \quad (4.128)$$

pe un interval de timp  $\Delta t = 10.5[s]$ , integrala  $I = \int_{t^*}^T M_{GSMP}(t) \cdot dt$ , devine:

$$I = \int_0^{10.5} 2.1355 \times 10^8 \frac{R}{3.9063 \times 10^5 R^2 + 2.616 \times 10^8} dt =$$

$$= \int_0^{10.5} 2.1355 \times 10^8 \frac{(400 - 33 \sin 0.3t)}{3.9063 \times 10^5 \cdot (400 - 33 \sin 0.3t)^2 + 2.616 \times 10^8} dt = 15.078 \quad (4.129)$$

**Determinarea rezistenței optime la R=variabil**

Pentru  $R = (400 - 22 \sin 0.3t)$  integrala are valoarea:

$$I = \int_0^{10.5} 2.1355 \times 10^8 \frac{(400 - 22 \sin 0.3t)}{3.9063 \times 10^5 \cdot (400 - 22 \sin 0.3t)^2 + 2.616 \times 10^8} dt = 14.803$$

Pentru  $R = (400 - 11 \sin 0.3t)$  integrala are valoarea:

$$I = \int_0^{10.5} 2.1355 \times 10^8 \frac{(400 - 11 \sin 0.3t)}{3.9063 \times 10^5 \cdot (400 - 11 \sin 0.3t)^2 + 2.616 \times 10^8} dt = 14.541$$

Pentru  $R = (422 - 11 \sin 0.3t)$  se obține:

$$I = \int_0^{10.5} 2.1355 \times 10^8 \frac{(422 - 11 \sin 0.3t)}{3.9063 \times 10^5 \cdot (422 - 11 \sin 0.3t)^2 + 2.616 \times 10^8} dt = 13.778$$

Din  $\int_0^T M_{TVN}(t) dt = 13.778$  rezultă că  $R$  cel mai potrivit este

$$R = (422 - 11 \sin 0.3t)$$

În concluzie, se poate opta și pentru o rezistență variabilă în timp pe intervalul  $\Delta t = 10.5[s]$ , de forma:

$$R = (422 - 11 \sin 0.3t),$$

încărcarea fiind în acest caz mai lentă în comparație cu

$$R = 417.79[\Omega] = ct.$$

**La o încărcare continuă** și la o variație a rezistenței de sarcină

$$R = (a + b \sin \omega t) = (a + b \sin 0.3t) = (400 - 33 \sin 0.3t)$$

pe un interval de timp  $\Delta t = T = 21[s]$ , integrala  $I = \int_0^T M_{GSMP}(t) \cdot dt$ ,

devine:

$$I = \int_0^{21} 2.1355 \times 10^8 \frac{R}{3.9063 \times 10^5 R^2 + 2.616 \times 10^8} dt =$$

$$= \int_0^{21} 2.1355 \times 10^8 \frac{(850. - 33 \sin 0.3t)}{3.9063 \times 10^5 \cdot (850. - 33 \sin 0.3t)^2 + 2.616 \times 10^8} dt = 13.504 \quad (4.130)$$

**Determinarea rezistenței optime**

Pentru  $R = (850. - 22 \sin 0.3t)$  integrala are valoarea:

$$I = \int_0^{21} 2.1355 \times 10^8 \frac{(850. - 22 \sin 0.3t)}{3.9063 \times 10^5 \cdot (850. - 22 \sin 0.3t)^2 + 2.616 \times 10^8} dt = 13.498$$

Pentru  $R = (835. - 11 \sin 0.3t)$  integrala are valoarea:

$$I = \int_0^{21} 2.1355 \times 10^8 \frac{(835. - 11 \sin 0.3t)}{3.9063 \times 10^5 \cdot (835. - 11 \sin 0.3t)^2 + 2.616 \times 10^8} dt = 13.737$$

Pentru  $R = (852. - 11 \sin 0.3t)$  se obține:

$$I = \int_0^{21} 2.1355 \times 10^8 \frac{(852. - 11 \sin 0.3t)}{3.9063 \times 10^5 \cdot (852. - 11 \sin 0.3t)^2 + 2.616 \times 10^8} dt = 13.463$$

$$\text{Din } \int_0^T M_{TVN}(t) dt = 13.778 \text{ rezultă că } R \text{ cel mai potrivit este}$$

$$R = (835. - 11 \sin 0.3t)$$

În concluzie, se poate opta și pentru o rezistență variabilă în timp pe intervalul  $\Delta t = 21[s]$ , de forma:

$$R = (835. - 11 \sin 0.3t)$$

**4.4.2. Calculul turației de referință**

Turația/viteza unghiulară mecanică de referință,  $\omega_{ref}$ , are o importanță deosebită, deoarece permite conducerea optimă a sistemului (**TVN+GSMP**), astfel încât se extrage maximum de energie mecanică, la o viteză a vântului variabilă.

Valoarea lui  $\omega_{ref}$  se determină din maximizarea energiei mecanice  $W_m$  pe o perioadă de timp  $T$  definită de variația vitezei vântului:

$$W_m = \omega_{ref} \int_0^T M_{TVN} dt = \omega_{ref} \int_0^T \left( -\frac{10}{314} \omega_{ref} + 20 \left( \frac{V}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} dt =$$

$$= \left( -\frac{10}{314} \omega_{ref}^2 T + \omega_{ref} \int_0^T 20 \left( \frac{V}{5} \right)^{1.5} dt \right) \frac{20}{314} \quad (4.131)$$

deoarece s-a considerat că  $\omega_{ref} = ct$  pe intervalul de timp  $t = 0 \div T$

Se analizează cazurile în care la viteza vântului de forma



$V = a + b \sin\left(\frac{2\pi}{T}\right)t$ , se modifică fie **a**, fie **b**.

**Cazul 1: a=10=ct:** Viteza medie a vântului este constantă și se modifică valorile extreme:

$$V_1 = a + b \sin\left(\frac{2\pi}{T}\right)t = 10 + 2 \sin 0.3t. \quad (4.132)$$

Din anularea derivatei rezultă:

$$\frac{dW_m}{d\omega_{ref}} = -\frac{20}{314} \omega_{ref} \cdot T + \int_0^T 20 \left(\frac{V}{5}\right)^{1.5} dt = 0 \quad (4.133)$$

sau

$$-\frac{20}{314} \omega_{ref} 21 + 20 \int_0^{21} \left(\frac{10 + 2 \sin 0.3t}{5}\right)^{1.5} dt = 0 \quad (4.134)$$

rezultă:  $\omega_{ref} = 894.8 [\text{rad} / \text{s}]$

Analog și la  $V_2$  și  $V_3$  se obține:

$$V_2 = 10 + 4 \sin 0.3t; \quad \omega_{ref} = 914.9 [\text{rad} / \text{s}]$$

$$V_3 = 10 + 6 \sin 0.3t; \quad \omega_{ref} = 949 [\text{rad} / \text{s}]$$

$$V_4 = 10; \quad \omega_{ref} = 314 \left(\frac{V}{5}\right)^{1.5} = 888.13 [\text{rad} / \text{s}] \quad (\text{identic cu rezultatele de la } V=\text{ct.})$$

V=ct.)

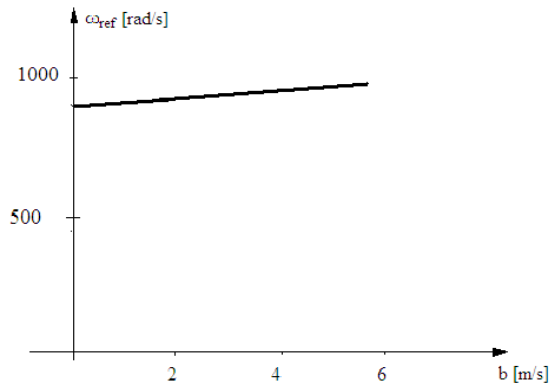


Fig.4.66. Dependența lui  $\omega_{ref}$  de amplitudinea vitezei

Modificarea lui  $\omega_{ref}$  cu  $b$  de forma:

$$\omega_{ref} = 888.13 - 0.021638 b + 1.6997 b^2 - 0.0053 b^3 \quad (4.135)$$

La o variație a vitezei  $b = 0 \div 6 [m/s]$ ,  $\omega_{ref}$  s-a modificat cu 6%, deci nesemnificativ.

**Cazul 2: a≠ct**, Viteza medie a vântului e variabilă.

Metodologia fiind aceeași, ca și în cazul anterior, se obțin:

$$V = 4 + 2 \sin 0.3t; \quad \omega_{ref} = 235.32 [\text{rad} / \text{s}], \text{ comparativ cu } \omega_{ref}^* \text{ calculat cu}$$

$$\omega_{ref}^* = 314 \left( \frac{V}{5} \right)^{1.5} = 224 [\text{rad} / \text{s}];$$

$V = 7 + 2 \sin 0.3t$ ;  $\omega_{ref} = 528.12 [\text{rad} / \text{s}]$ , comparativ cu  $\omega_{ref}^* = 520.14 [\text{rad} / \text{s}]$ ;

$V = 10 + 2 \sin 0.3t$ ;  $\omega_{ref} = 894.8 [\text{rad} / \text{s}]$ , comparativ cu  $\omega_{ref}^* = 888.13 [\text{rad} / \text{s}]$ ;

$V = 13 + 2 \sin 0.3t$ ;  $\omega_{ref} = 1322.2 [\text{rad} / \text{s}]$ , comparativ cu  $\omega_{ref}^* = 1316.4 [\text{rad} / \text{s}]$ ;

$V = 16 + 2 \sin 0.3t$ ;  $\omega_{ref} = 1802.7 [\text{rad} / \text{s}]$ , comparativ cu  $\omega_{ref}^* = 1797.4 [\text{rad} / \text{s}]$ .

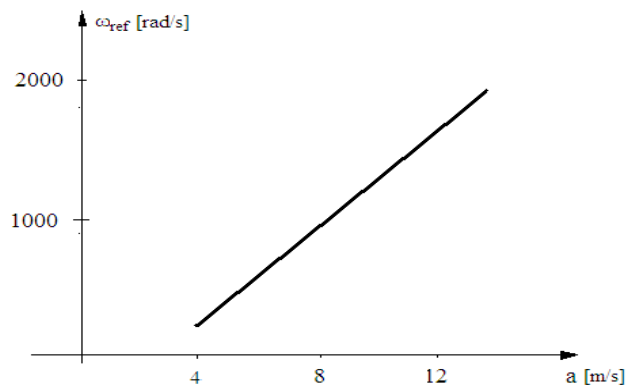


Fig.4.67. Dependența lui  $\omega_{ref}$  de viteza medie

#### Dependența turației optime de amplitudinea vitezei

Turația de referință  $n_{ref}(\omega_{ref} = 2\pi n_{ref})$  depinde în principal de valoarea medie a vitezei vântului, după o lege de forma:

$$\omega_{ref} = 28.167 V_{mediu}^{1.5} \quad (4.136)$$

dedusă din:

$$\omega_{ref} = K V_{mediu}^{1.5}$$

pentru  $\omega_{ref} = 235.32; 528.12; 894.8; 1322.2; 1802.7 [\text{rad} / \text{s}]$  și

$$V_{mediu} = 4; 7; 10; 13; 16 [\text{m} / \text{s}].$$

Relația este apropiată celei deduse la  $V = ct$  și la putere maximă,

$$\omega = 314 \left( \frac{V}{5} \right)^{1.5} = 28.085 V^{1.5} \quad (4.137)$$

Diferența dintre dependențele de viteza medie folosind relația de la  $V=ct$ ;

$\left( \omega_{ref}^* = 314 \left( \frac{V}{5} \right)^{1.5} \right)$ , și rezultatele obținute anterior, este foarte mică, sub 0.5%.

Dependența de amplitudine a lui  $\omega_{ref}$  este redusă de exemplu la  $V_{mediu} = 10 [\text{m} / \text{s}]$ , rezultă o aproximare de felul  $\omega_{ref} = 875.14 \cdot b^{0.032}$

#### Observație importantă:

Funcționarea optimă a sistemului (TVN+GSMP), în sensul captării unei energii maxime în condițiile date:

- 1) prin construcție, momente de inerție mari și
  - 2) variații rapide ale vitezei vântului în timp,
- impune ca toate strategiile de conducere să găsească o valoare optimă a turației/vitezei unghiulare, dependentă de viteza vântului.

În acest sens, în prezenta lucrare s-a folosit pentru viteza unghiulară  $\omega$  valori apropiate, date de relațiile 4.136 și 4.137.

Estimarea vitezei vântului  $V$  nu pune probleme deosebite, în sensul că aceasta se măsoară simplu, cu un anemometru, care poate furniza atât valorile momentane, cât mai ales valoarea medie pe un interval de timp dat. Importantă este valoarea acestui interval de timp, în sensul că el trebuie să fie suficient de mare astfel încât să poată fi aplicabil procedeul de conducere. Aceasta depinde atât de cuplul turbinei de vânt navale  $M_{TVN}$  cât și de momentul de inerție  $J$ , fiindcă în ecuația mișcării aceste două mărimi sunt fundamentale:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{TVN} - M_{GSMP},$$

iar cuplul generatorului  $M_{GSMP}$  poate fi modificat prin algoritmi de conducere între 0 și  $M_{max}$ .

De exemplu la  $J = 5 [Kg \cdot m^2]$  și la  $M_{TVN} \cong 5 [N \cdot m]$  pentru ca  $\omega$  să se modifice cu 5% de la  $\omega(0) = 314 [rad / s]$ , este nevoie de un interval de timp de valoare  $\Delta t$  calculat din ecuația mișcării astfel:

$$5 \cdot \frac{15.7}{\Delta t} = 5$$

$$\text{unde } \Delta t = 15.7 [s]$$

Așadar, se pune problema estimării unei viteze medii pentru intervale de timp de ordinul zecilor de secunde. În aceste condiții modelul matematic al **GSMP** se simplifică semnificativ prin neglijarea termenilor tensiunilor induse prin pulsație.

În concluzie, conceperea sistemului de conducere la viteză variabilă poate avea în vedere doar dependența lui  $\omega_{ref}$  de viteza medie,  $V_{mediu}$ , dependență care reiese din figura 4.68:

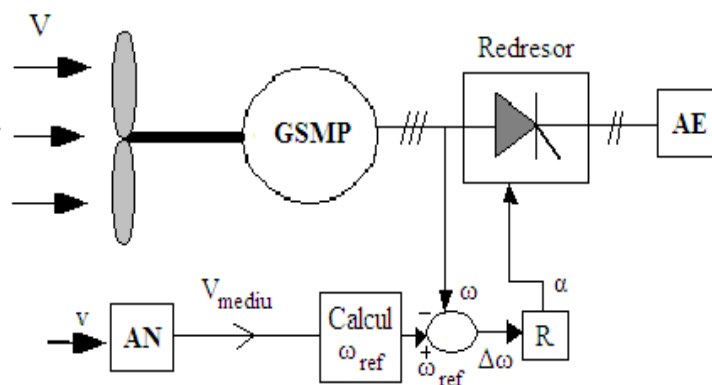


Fig.4.68. Conducerea optimă la  $\omega_{ref}$

Anemometrul –AN- prin măsurarea vitezei poate da valoarea medie a vitezei vântului pe o perioadă de timp  $T$ , și deci se poate calcula turația de referință cu formula:

Din măsurarea turației la **GSMP** se obține  $\omega = 2\pi n$  iar diferența  $\Delta\omega = \omega_{ref} - \omega$  constituie mărimea de intrare pentru regulator, care la ieșire prin  $\alpha$  unghiul de aprindere a tiristoarelor redresorului trifazat, modifică încărcarea generatorului **GSMP**.

#### 4.4.3. Regimuri tranzitorii la viteze ale vântului variabile

Sistemul de ecuații algebrice ce definește funcționarea sistemului **(TVN+GSMP)** în regim staționar, la  $V = V_m + 2 \cdot \sin 0.3t = 5 + 2 \cdot \sin 0.3t$ , este[Mauricio2008]:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_m = 5. \\ \omega_r = 28.167 (V_m)^{1.5} \\ U_d = -\omega_r \cdot 0.08 I_q \\ U_q = \omega_r \cdot 0.08 I_d + \omega_r \Psi_{MP} \\ - \left( -\frac{10}{314} \omega_r + 20 \left( \frac{V_m}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} = \Psi_{MP} I_q \\ U_d = -R I_d \\ U_q = -R I_q \\ \Psi_{MP} = 1.3 \\ P_e = R (I_d^2 + I_q^2) \end{array} \right. \quad (4.138)$$

soluțiile sistemului sunt:

$$\begin{aligned} V_m &= 5.0 [m/s], \Psi_{MP} = 1.3 [Wb], R = 837.26 [\Omega], \\ \omega_r &= 314.92 [rad/s], I_q = -0.48853 [A], \\ U_d &= 12.308 [V], P_e = 200.00 [W], \\ I_d &= -1.47 \times 10^{-2} [A], U_q = 409.02 [V]. \end{aligned}$$

Sarcina conectată la bornele **GSMP** are valoarea:

$$R = 837.26 [\Omega]$$

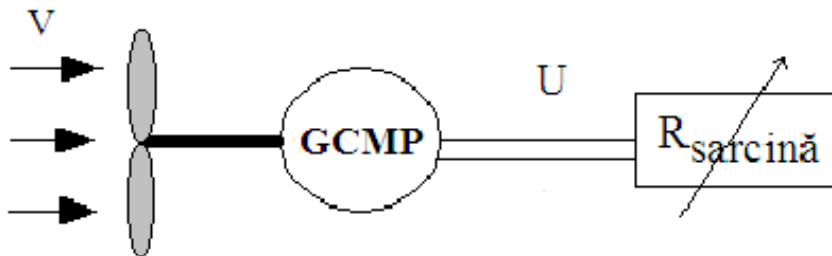


Fig.4.69. Schema bloc a subsistemului eolian cu sarcină rezistivă

**Calculul rezistenței optime în funcție de viteza medie**

Cuplul GSMP:  $M_{GSMP} = 1.3 \cdot I_q$  se calculează din sistemul:

$$\begin{cases} U_d = -\omega_r \cdot 0.08I_q \\ U_q = \omega_r \cdot 0.08I_d + \omega_r \cdot 1.3 \\ U_d = -RI_d \\ U_q = -RI_q \\ I_q = -812.5\omega_r \frac{R}{625.0R^2 + 4.0\omega_r^2} \end{cases} \quad (4.139)$$

și se obține

$$M_{GSMP} = 1.3 \left( -812.5\omega_r \frac{R}{625.0R^2 + 4.0\omega_r^2} \right) \quad (4.140)$$

Aceste valori constituie **condițiile inițiale** din sistemul de ecuații diferențiale ce definesc regimul tranzitoriu de trecere de la  $V_m = 5.[m/s]$ , la  $V_m = 7.[m/s]$ .

**Valorile finale** se obțin din sistemul:

$$\begin{cases} V_m = 7. \\ \omega_r = 28.167(V_m)^{1.5} \\ U_d = -\omega_r \cdot 0.08I_q \\ U_q = \omega_r \cdot 0.08I_d + \omega_r \Psi_{MP} \\ - \left( -\frac{10.}{314} \omega_r + 20 \left( \frac{V_m}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20.}{314.} = \Psi_{MP} I_q, \\ U_d = -RI_d \\ U_q = -RI_q \\ \Psi_{MP} = 1.3 \\ P_e = R(I_d^2 + I_q^2) \end{cases} \quad (4.141)$$

Se obțin soluțiile:

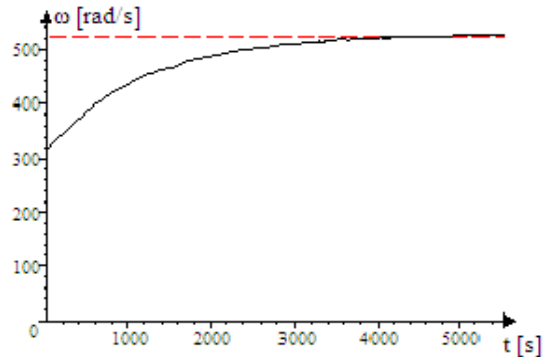
$$I_q = -0.80924[A], \Psi_{MP} = 1.3[Wb], U_d = 33.772[V], \\ P_e = 548.80[W], U_q = 676.47[V], I_d = -0.0404[A].$$

și valorile finale pentru:  $\omega_r = 521.66[rad/s]; R = 835.93[\Omega]$ .

Din sistemul 4.142:

$$\begin{cases} U_d = -\omega_r \cdot 0.08I_q \\ U_q = \omega_r \cdot 0.08I_d + \omega_r \Psi_{MP} \\ J \frac{d\omega}{dt} = M_{TVN} - \Psi_{MP} I_q \end{cases} \quad (4.142)$$

se obține variația în timp a vitezei unghiulare  $\omega$ , reprezentată în figura 4.70.

Fig.4.70. Variația în timp a lui  $\omega$ 

Din graficul funcției  $\omega(t)$  se observă că sistemul **(TVN+GSMP)** trece de la  $\omega(0) = 314.92[\text{rad} / \text{s}]$  la  $\omega_{final} = 521.6[\text{rad} / \text{s}]$ , într-un timp destul de mare:  $t = 5555[\text{s}] = 1.543[\text{h}]$ . Datorită momentelor de inerție mari, (în cazul de față  $J = 5 [\text{kg} \cdot \text{m}^2]$ ), stabilizarea turației/vitezei unghiulare, la modificarea vitezei de la  $V = 5 + 2\sin 0.3t$  la  $V = 7[\text{m/s}]$ , are loc într-un timp de ordinul orelor, 1.543[h]. În varianta în care viteza medie a vântului se modifică din nou, problema alegerii intervalului de mediere a vitezei vântului rămâne deschisă.

#### Reglatoarele de tip P

Regulatorul pe viteza unghiulară mecanică  $\omega$  de tip **P** are ecuația:

$$\Delta R = K \Delta \omega_r = K(521.66 - 314.92) \quad (4.143)$$

și cu  
rezultă:

$$\Delta R = R_f - R_i = 835.93 - 837.26, \quad (4.144)$$

$$K = \frac{\Delta R}{\Delta \omega_r} = \frac{835.93 - 837.26}{521.66 - 314.92} = -6.4332 \times 10^{-3} \quad (4.145)$$

unde:  
obținându-se:

$$\Delta R = R_f - R = -6.4332 \times 10^{-3} (\omega_r - 521.66) \quad (4.146)$$

$$R = (835.93 + 6.4332 \times 10^{-3} (521.66 - \omega)) \quad (4.147)$$

Pentru  $-R$  - astfel determinat rezultă cuplul **GSMP**:

$$\begin{aligned} M_{GSMP} &= 1.3 I_q = 1.3 \left( -812.5 \omega_r \frac{R}{625.0 R^2 + 4.0 \omega_r^2} \right) = \\ &= 1.3 \left( -812.5 \omega_r \frac{(835.93 + 6.4332 \times 10^{-3} (521.66 - \omega))}{625.0 (835.93 + 6.4332 \times 10^{-3} (521.66 - \omega))^2 + 4.0 \omega_r^2} \right) \end{aligned} \quad (4.148)$$

sistemul diferențial 4.149 din care se obține variația în timp a lui  $\omega$  (figura 4.71.):

$$\left\{ \begin{aligned} 5 \cdot \frac{d\omega}{dt} &= 1.3 \left( -812.5\omega \frac{(835.93 + 6.4332 \times 10^{-3}(521.66 - \omega))}{625.0(835.93 + 6.4332 \times 10^{-3}(521.66 - \omega))^2 + 4.0\omega^2} \right) + \\ &+ \left( -\frac{10.}{314} \omega + 20 \cdot \left( \frac{7 + 2 \cdot \sin 0.3t}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20.}{314}. \\ \omega(0) &= 314.92 \end{aligned} \right. \quad (4.149)$$

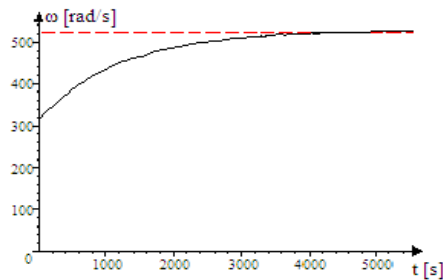


Fig.4.71. Variația în timp a lui  $\omega$

**Variația lui  $\omega$  la reglatoarele de tip P**

La **cupluri ale TVN cu un ordin de mărime mai mare**

$M_{TVN} = \left( -\frac{10.}{314} \omega_r + 20 \left( \frac{V_m}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{200.}{314.}$  și la  $V_m = 5[m/s]$  se obține sistemul condițiilor inițiale:

$$\left\{ \begin{aligned} V_m &= 5. \\ \omega_r &= 28.167(V_m)^{1.5} \\ U_d &= -\omega_r \cdot 0.08I_q \\ U_q &= \omega_r \cdot 0.08I_d + \omega_r \Psi_{MP} \\ - \left( -\frac{10.}{314} \omega_r + 20 \cdot \left( \frac{V_m}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{200.}{314.} &= \Psi_{MP} I_q, \\ U_d &= -RI_d \\ U_q &= -RI_q \\ \Psi_{MP} &= 1.3 \\ P_e &= R(I_d^2 + I_q^2) \end{aligned} \right. \quad (4.150)$$

soluțiile sistemului sunt:

$$\begin{aligned} V_m &= 5.0[m/s], \Psi_{MP} = 1.3[Wb], R = 75.382[\Omega], \\ \omega_r &= 314.92[rad/s], I_q = -4.8853[A], U_d = 123.08[V], \\ P_e &= 2000.0[W], I_d = -1.6327[A], U_q = 368.26[V]. \end{aligned}$$

Sarcina conectată la bornele **GSMP** are valoarea:  $R = 75.382[\Omega]$

Aceste valori constituie **condițiile inițiale** din sistemul de ecuații

diferențiale ce definesc regimul tranzitoriu de trecere de la  $V_m = 5.[m/s]$  la  $V_m = 7.[m/s]$ .

**Valorile finale**, pentru  $V_m = 7.[m/s]$ , se obțin din sistemul:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_m = 7. \\ \omega_r = 28.167(V_m)^{1.5} \\ U_d = -\omega_r \cdot 0.08I_q \\ U_q = \omega_r \cdot 0.08I_d + \omega_r \Psi_{MP} \\ -\left(-\frac{10.}{314} \omega_r + 20. \left(\frac{V_m}{5}\right)^{1.5}\right) \frac{200.}{314.} = \Psi_{MP} I_q \\ U_d = -R_f I_d \\ U_q = -R_f I_q \\ \Psi_{MP} = 1.3 \\ P_e = R(I_d^2 + I_q^2) \end{array} \right. \quad (4.151)$$

soluțiile sistemului sunt:

$$\begin{aligned} \Psi_{MP} &= 1.3 [Wb], V_m = 7.0 [m/s], R_f = 45.648 [\Omega], \\ \omega_r &= 521.66 [rad/s], U_d = 337.72 [V], I_q = -8.0924 [A] \\ P_e &= 5488.0 [W], U_q = 369.41 [V], I_d = -7.3983 [A]. \end{aligned}$$

Deci valorile finale pentru  $\omega_r$  și  $R_{ref}$  sunt:

$$\omega_r = 521.66 [rad/s]; R_f = 45.648 [\Omega]$$

Ecuția regulatorului de tip **-P** este:

$$\Delta R = R_f - R = K \Delta \omega_r = K(521.66 - 314.92) \quad (4.152)$$

iar

$$\Delta R = 45.648 - 75.382,$$

rezultă:

$$K = \frac{\Delta R}{\Delta \omega_r} = \frac{45.648 - 75.382}{521.66 - 314.92} = -0.14382$$

unde

$$R = -0.14382(\omega_r - 521.66)$$

obținându-se

$$\begin{aligned} R &= (45.648 + 0.14382(521.66 - \omega)) = \\ &= (45.648 - 0.14382(\omega - 521.66)) \end{aligned} \quad (4.153)$$

Pentru  $-R$  – astfel determinat, rezultă cuplul **GSMP**:

$$\begin{aligned} M_{GSMP} &= 1.3 I_q = 1.3 \left( -812.5 \omega_r \frac{R}{625.0 R^2 + 4.0 \omega_r^2} \right) = \\ &= 1.3 \left( -812.5 \omega_r \frac{(45.648 - 0.14382(\omega - 521.66))}{625.0 (45.648 - 0.14382(\omega - 521.66))^2 + 4.0 \omega_r^2} \right) \end{aligned} \quad (4.154)$$

și sistemul diferențial 4.155 din care se obține variația în timp a lui  $\omega(t)$ , (figurile 4.72. și 4.73.):



$$\left\{ \begin{aligned} 5. \frac{d\omega}{dt} &= 1.3 \left( -812.5\omega \frac{(45.648 - 0.14382(\omega - 521.66))}{625.0(45.648 - 0.14382(\omega - 521.66))^2 + 4.0\omega^2} \right) + \\ &+ \left( -\frac{10.}{314}\omega + 20. \left( \frac{7+2.\sin 0.3t}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{200.}{314}. \\ \omega(0) &= 314.92 \end{aligned} \right. \quad (4.155)$$

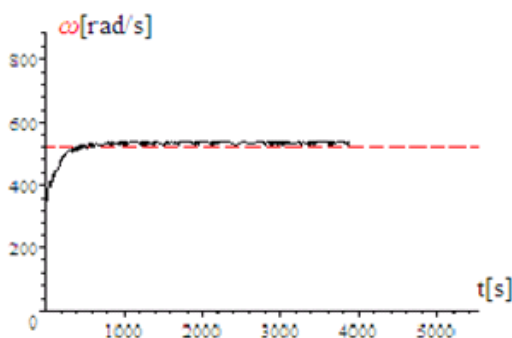


Fig.4.72. Variația în timp a lui  $\omega$

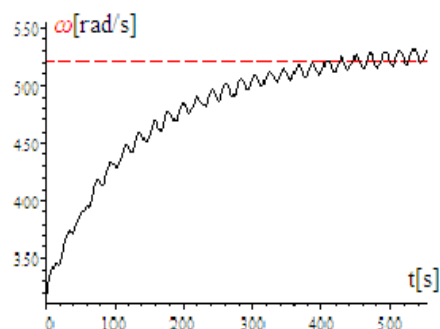


Fig.4.73. Variația în timp a lui  $\omega$  (detaliu)

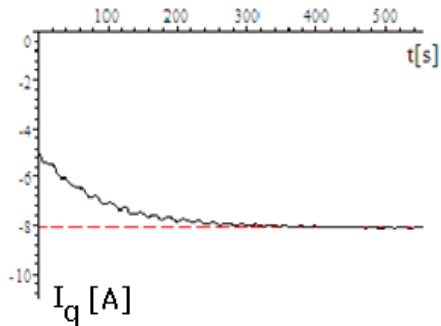
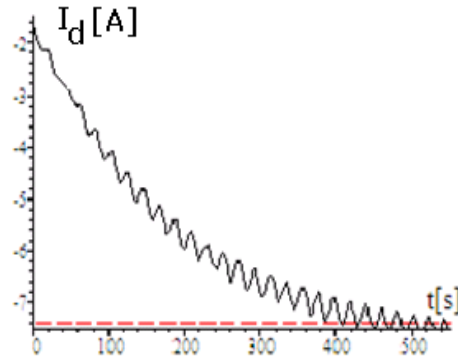
**Variația vitezei în timp produce oscilații ale turației, dependente de J și de cuplul variabil al GSMP**

Stabilizarea în acest caz are loc în mai puțin de 600 [s], respectiv 10 [min]. În figura 4.73. se observă oscilațiile lui  $\omega$  - datorită variației vitezei vântului.

Curentul  $I = \sqrt{I_d^2 + I_q^2}$  se calculează din sistemul :

$$\left\{ \begin{aligned} -RI_d &= -\omega \cdot 0.08I_q \\ -RI_q &= \omega \cdot 0.08I_d + \omega 1.3 \\ I_d &= -65.0 \frac{\omega^2}{625.0R^2 + 4.0\omega^2} = -65.0 \frac{\omega^2}{625.0(45.648 - 0.14382(\omega_r - 521.66))^2 + 4.0\omega^2} \\ I_q &= -812.5\omega \frac{R}{625.0R^2 + 4.0\omega^2} = -812.5\omega \frac{(45.648 - 0.14382(\omega_r - 521.66))}{625.0(45.648 - 0.14382(\omega_r - 521.66))^2 + 4.0\omega^2} \end{aligned} \right. \quad (4.156)$$

reprezentându-se în continuare variațiile în timp ale celor două componente:  $I_q$  și  $I_d$ .

Fig.4.74. Variația în timp a lui  $I_q$ Fig.4.75. Variația în timp a lui  $I_d$ 

Se observă timpul ,  $t=555[s]$ , necesar stabilizării procesului.

#### Reglatoarele de tip PI

Din ecuația regulatorului:

$$\Delta R = K_1 \Delta \omega + K_2 \int \Delta \omega dt \quad (4.157)$$

prin derivare rezultă:

$$-\frac{dR}{dt} = -K_1 \frac{d\omega}{dt} + K_2(521.66 - \omega) \quad (4.158)$$

Pentru constanta  $K_1$  se alege valoarea anterioară de la regulatorul **P**:

$$K_1 = -0.14382$$

și rezultă:

$$-\frac{dR}{dt} = 0.14382 \frac{d\omega}{dt} + K_2(521.66 - \omega) \quad (4.159)$$

Alegerea lui  $K_2$  este mai complicată.

Pentru constanta  $K_2$  se aleg diverse valori:

- 1)  $K_2 = 0.14, J = 5 [Kgm^2], V = 7 [m/s]$ ;
- 2)  $K_2 = 0.14, J = 0.005 [Kgm^2], V = 7 [m/s]$ ;
- 3)  $K_2 = 0.14, J = 0.5 [Kgm^2], V = 7 [m/s]$ ;
- 4)  $K_2 = 0.014, J = 0.5 [Kgm^2], V = 7 [m/s]$ ;
- 5)  $K_2 = -0.014, J = 0.5 [Kgm^2], V = 7 [m/s]$ ;
- 6)  $K_2 = -0.014, J = 5 [Kgm^2], V = 7 [m/s]$ ;
- 7)  $K_2 = -0.0014, J = 5 [Kgm^2], V = 7 [m/s]$ ;
- 8)  $K_2 = 0.0014, J = 5 [Kgm^2], V = 7 [m/s]$ ;

$$9) K_2 = -0.0014, J = 5 [Kgm^2], V = 7 + 2 \cdot \sin 0.3t [m / s];$$

$$10) K_2 = 0.0014, J = 5 [Kgm^2], V = 7 + 2 \cdot \sin 0.3t [m / s]$$

$$11) K_2 = -0.014, J = 5 [Kgm^2], V = 7 + 2 \cdot \sin 0.3t [m / s];$$

$$12) K_2 = 0.014, J = 5 [Kgm^2], V = 7 + 2 \cdot \sin 0.3t [m / s];$$

$$13) K_2 = -0.00014, J = 5 [Kgm^2], V = 7 + 2 \cdot \sin 0.3t [m / s];$$

$$14) K_2 = 0.00014, J = 5 [Kgm^2], V = 7 + 2 \cdot \sin 0.3t [m / s];$$

$$15) K_2 = -0.000014, J = 5 [Kgm^2], V = 7 + 2 \cdot \sin 0.3t [m / s];$$

$$16) K_2 = 0, J = 5 [Kgm^2], V = 7 + 2 \cdot \sin 0.3t [m / s], R(4444) = 43.962;$$

$$17) K_2 = 0.000014, J = 5 [Kgm^2], V = 7 + 2 \cdot \sin 0.3t [m / s]$$

Sunt prezentate în continuare rezultatele simulărilor.

Pentru  $R$  astfel determinat rezultă cuplul **GSMP**:

$$M_{GSMP} = 1.3I_q = 1.3 \left( -812.5\omega_r \frac{R}{625.0R^2 + 4.0\omega_r^2} \right) \quad (4.160)$$

și sistemul diferențial 4.161 din care se obține variația în timp a lui  $\omega(t)$  și

$R(t)$  :

$$\left\{ \begin{array}{l} 5 \frac{d\omega}{dt} = 1.3 \left( -812.5\omega \frac{R}{625.0R^2 + 4.0\omega^2} \right) + \left( -\frac{10.}{314} \omega + 20. \left( \frac{7+2 \cdot \sin 0.3t}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{200.}{314.} \\ -\frac{dR}{dt} = 0.14382 \frac{d\omega}{dt} + K_2 (521.66 - \omega) \\ \omega(0) = 314.92 \\ R(0) = 75.382 \end{array} \right. \quad (4.161)$$

$$1) K_2 = 0.14, J = 5 [Kgm^2], V = 7 [m / s];$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 5 \frac{d\omega}{dt} = 1.3 \left( -812.5\omega \frac{R}{625.0R^2 + 4.0\omega^2} \right) + \left( -\frac{10.}{314} \omega + 20. \left( \frac{7.}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{200.}{314.} \\ -\frac{dR}{dt} = 0.14382 \frac{d\omega}{dt} + 0.14 (521.66 - \omega) \\ \omega(0) = 314.92 \\ R(0) = 75.382 \end{array} \right. \quad (4.162)$$

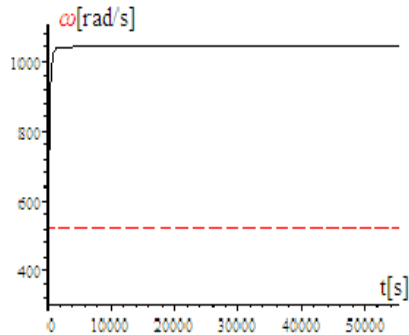


Fig.4.76. Variația în timp pulsației a  $\omega$

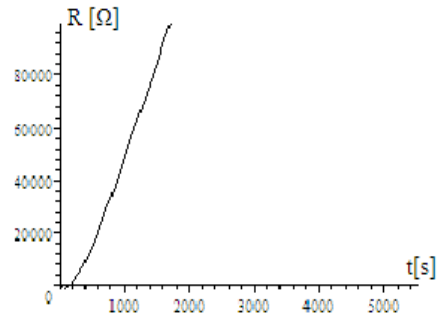


Fig.4.77. Variația în timp a rezistenței R

$$2) K_2 = 0.14, J = 0.005 [Kgm^2], V = 7 [m/s];$$

Variația pulsației  $\omega$  se obține din sistemul de ecuații diferențiale de mai jos, în condițiile în care rezistența de sarcină se reglează cu ajutorul unui regulator de tip PI.

$$\begin{cases} 0.005 \frac{d\omega}{dt} = 1.3 \left( -812.5\omega \frac{R}{625.0R^2 + 4.0\omega^2} \right) + \left( -\frac{10.}{314} \omega + 20. \left( \frac{7.}{5.} \right)^{1.5} \right) \frac{200.}{314.} \\ -\frac{dR}{dt} = 0.14382 \frac{d\omega}{dt} + 0.14(521.66 - \omega) \\ \omega(0) = 314.92 \\ R(0) = 75.382 \end{cases} \quad (4.163)$$

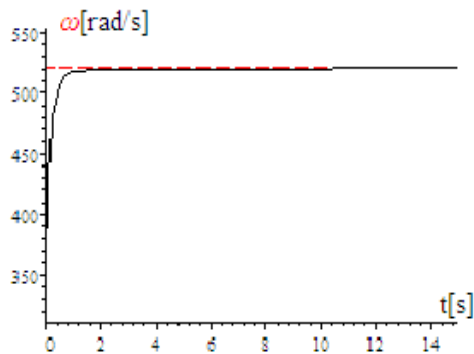


Fig.4.78 Variația în timp a pulsației  $\omega$

**Variațiile turației/pulsației la momente de inerție mici.**

Valorile finale se obțin din sistemul algebric următor, care are soluția stabilă pentru  $R = 38.153 [\Omega]$

$$\begin{cases} 1.3 \left( 812.5\omega \frac{R}{625.0R^2 + 4.0\omega^2} \right) = \left( -\frac{10.}{314} \omega + 20. \left( \frac{7.}{5.} \right)^{1.5} \right) \frac{200.}{314.} \\ 0 = (521.66 - \omega) \end{cases} \quad (4.164)$$

soluțiile sistemului sunt:

$$R = 38 [\Omega] \quad \text{și} \quad R = 45 [\Omega]$$

$$\omega = 521 [\text{rad} / \text{s}] \quad \text{și} \quad \omega = 521 [\text{rad} / \text{s}]$$

S-a ales  $R = 38 [\Omega]$  deoarece punctul A se află în zona de stabilitate, (figura 4.79.a), așa cum s-a demonstrat anterior.

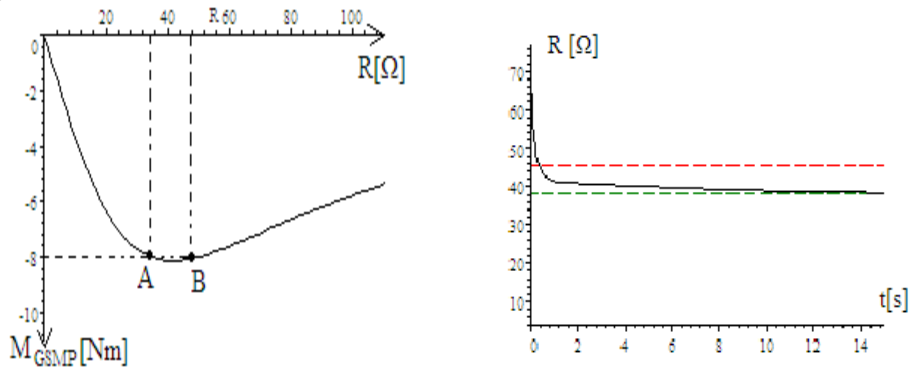


Fig.4.79. a) Variația cuplului cu rezistența ; b) Variația în timp a rezistenței R

3) Cu ajutorul sistemului de ecuații diferențiale 4.161, pentru  $K_2 = 0.14, J = 0.5 [\text{Kgm}^2], V = 7 [\text{m} / \text{s}]$ , se obțin :

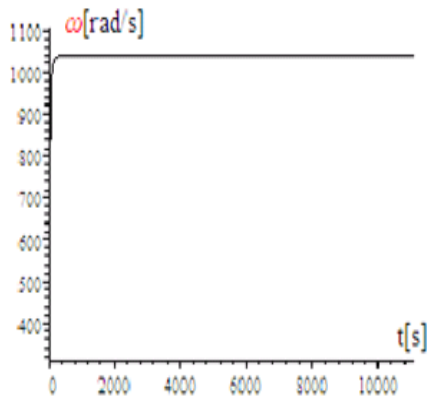


Fig.4.80. Variația în timp a pulsației  $\omega$

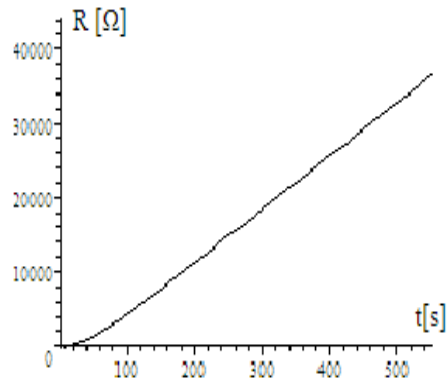


Fig.4.81. Variația în timp a rezistenței R

4) Cu ajutorul sistemului de ecuații diferențiale 4.161, pentru  $K_2 = 0.014, J = 0.5 [\text{Kgm}^2], V = 7 [\text{m} / \text{s}]$ , se obțin:

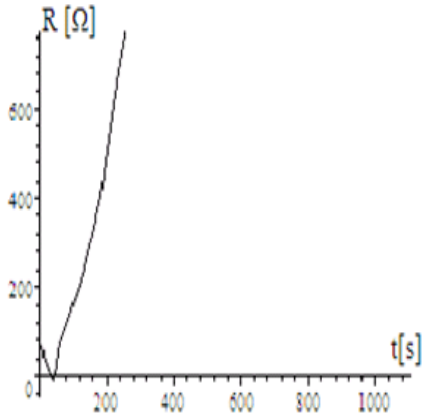


Fig.4.82. Variația în timp a rezistenței R

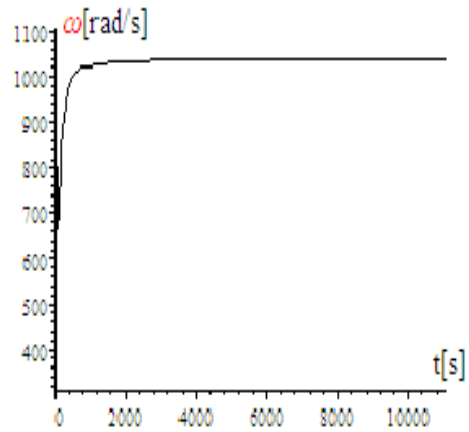


Fig.4.83. Variația în timp a pulsației  $\omega$

5)Cu ajutorul sistemului de ecuații diferențiale 4.161, pentru  $K_2 = -0.014, J = 0.5 [Kgm^2], V = 7 [m/s]$ , se obțin:

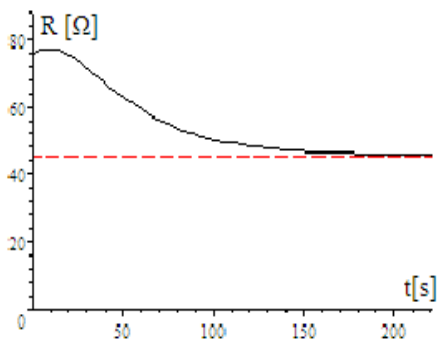


Fig.4.84. Variația în timp a rezistenței R

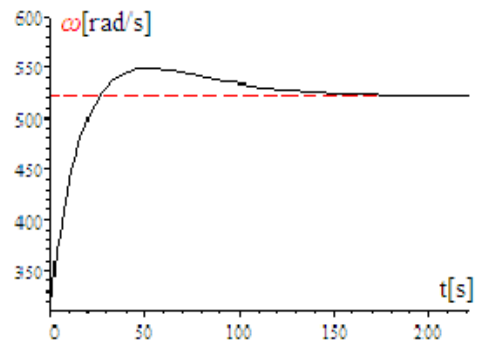


Fig.4.85. Variația în timp a pulsației  $\omega$

6)Cu ajutorul sistemului de ecuații diferențiale 4.161, pentru  $K_2 = -0.014, J = 5 [Kgm^2], V = 7 [m/s]$ , se obțin:

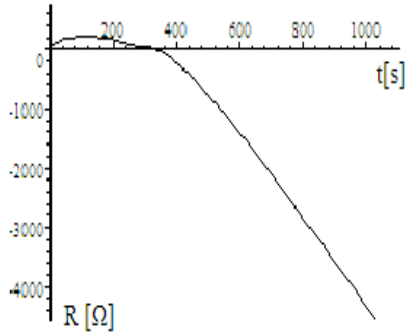


Fig.4.86. Variația în timp a rezistenței R

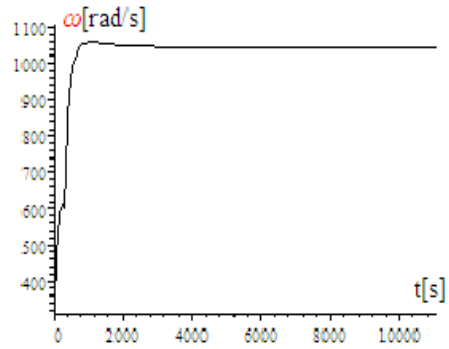


Fig.4.87. Variația în timp a pulsației  $\omega$

7) Cu ajutorul sistemului de ecuații diferențiale 4.161, pentru  $K_2 = -0.0014$ ,  $J = 5 [Kgm^2]$ ,  $V = 7 [m/s]$ , se obțin:

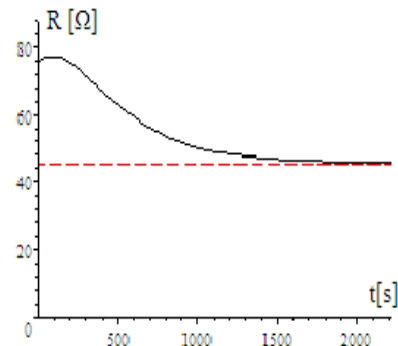


Fig.4.88. Variația în timp a rezistenței R

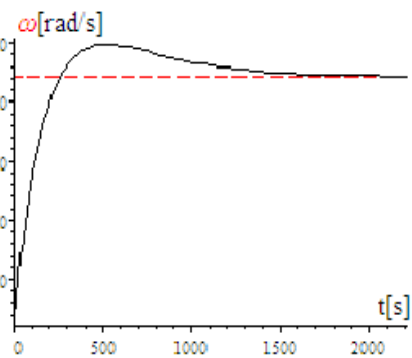


Fig.4.89. Variația în timp a pulsației  $\omega$

8) Cu ajutorul sistemului de ecuații diferențiale 4.161, pentru  $K_2 = 0.0014$ ,  $J = 5 [Kgm^2]$ ,  $V = 7 [m/s]$ , se obțin:

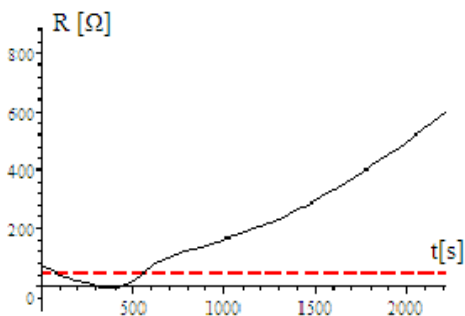


Fig.4.90. Variația în timp a rezistenței R

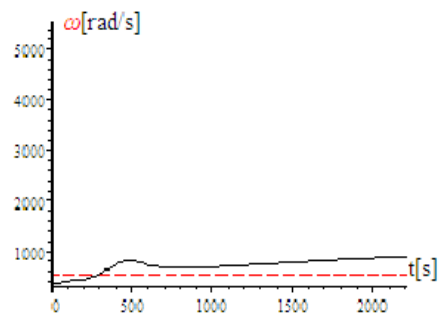


Fig.4.91. Variația în timp a lui  $\omega$

**Se observă variațiile lui R la sistem stabil****CONCLUZII** privind rezultatele simulării :

1. Regulatorul de tip **PI**, prin constanta de integrare  $K_2$ , influențează sensibil stabilitatea procesului.
2. Acordarea regulatorului de tip **PI** este dependentă de valoarea momentului de inerție  $J$  și de variația în timp a vitezei vântului, în sensul că pentru  $K_2 = -0.014$ ;  $V = ct = 7 [m/s]$  și pentru  $J = 0.5 [kg \cdot m^2]$  procesul devine stabil cu  $R$  și  $\omega$  atingând valorile finale  $R_f = 45.648 [\Omega]$  și  $\omega_f = 521.66 [rad/s]$  (a se observa figura 3.99, cazul 5). Pentru  $J = 5 [kg \cdot m^2]$  și  $V = 7 [m/s]$  procesul se stabilizează după un timp de 2000 [s], (a se observa figura 4.103, cazul a-7).
3. Pentru  $V = 7 + 2 \sin 0.3t$ , (deci viteza vântului variabilă), stabilizarea procesului se realizează la valori foarte mici pentru  $K_2$  la (cazul a-10) cu  $K_2 = -0.00014$  la cazul -11- cu  $K_2 = -0.000014$  la -12- cu  $K_2 = 0$ ; la -13- cu  $K_2 = 0.000014$ . Aceste valori foarte mici pentru constanta componentei integratoare demonstrează faptul că această componentă are o pondere foarte mică. Trebuie remarcată și diferența foarte mare  $\Delta\omega(40\%)$  între  $\omega_f$  și  $\omega_i$  ( $\Delta\omega = 521.66 - 314.92 = 206.74 [rot/s]$ ), diferență care este factor în componenta integratoare  $K_2 \cdot \Delta\omega$ .

**Reglatoarele de tip PID**

Din ecuația regulatorului de tip PID:

$$\Delta R = K_1 \Delta\omega + K_2 \int \Delta\omega dt + K_3 \frac{d\Delta\omega}{dt}$$

sau:

$$R_f - R = K_1(\omega_f - \omega) + K_2 \int (\omega_f - \omega) dt + K_3 \frac{d(\omega_f - \omega)}{dt}$$

prin derivare rezultă:

$$-\frac{dR}{dt} = -K_1 \frac{d\omega}{dt} + K_2(\omega_f - \omega) - K_3 \frac{d^2\omega}{dt^2}$$

Pentru constanta  $K_1$  se alege valoarea anterioară de la regulatorul de tip **P**:

$$K_1 = -0.14382$$

și deci rezultă:

$$-\frac{dR}{dt} = -0.14382 \frac{d\omega}{dt} + K_2(\omega_f - \omega) - K_3 \frac{d^2\omega}{dt^2}$$

Notând:

$$\frac{d\omega}{dt} = b$$

rezultă:

$$\frac{d^2\omega}{dt^2} = \frac{db}{dt}$$

și deci ecuația regulatorului de tip **PID**, devine:

$$-\frac{dR}{dt} = -0.14382 \frac{d\omega}{dt} + K_2(\omega_f - \omega) - K_3 \frac{db}{dt}$$



4.4. – Maximizarea energiei mecanice la variații ale vitezei vântului 161

Cu notația  $b = \frac{d\omega}{dt}$ , ecuația diferențială a mișcării

$$5 \frac{d\omega}{dt} = 1.3 \left( -812.5\omega \frac{R}{625R^2 + 4\omega^2} \right) + \left( -\frac{10}{314}\omega + 20 \left( \frac{7 + 2 \sin 0.3t}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{200}{314}$$

devine o ecuație algebrică

$$5b = 1.3 \left( -812.5\omega \frac{R}{625R^2 + 4\omega^2} \right) + \left( -\frac{10}{314}\omega + 20 \left( \frac{7 + 2 \sin 0.3t}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{200}{314}$$

și deci sistemul de mai sus nu este rezolvabil, prin metode numerice. Pentru a rezolva problema se calculează  $b = \frac{d\omega}{dt}$  din ecuația mișcării:

$$b = \frac{d\omega}{dt} = \frac{1.3 \left( -812.5\omega \frac{R}{625R^2 + 4\omega^2} \right) + \left( -\frac{10}{314}\omega + 20 \left( \frac{7 + 2 \sin 0.3t}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{200}{314}}{5}$$

și se înlocuiește  $\frac{db}{dt}$ :

$$\begin{aligned} \frac{db}{dt} &= -211.25 \frac{\left( \frac{d\omega}{dt} R + \omega \frac{dR}{dt} \right) (625R^2 + 4\omega^2) - \omega R \left( 1250R \frac{dR}{dt} + 8\omega \frac{d\omega}{dt} \right)}{(625R^2 + 4\omega^2)^2} + \\ &+ \left( -\frac{10}{314} \frac{d\omega}{dt} + 0.72\sqrt{35 + 10 \sin 0.3t} \cos 0.3t \right) \frac{40}{314} = \\ &= \left( -211.25 \frac{(625R^2 - 4\omega^2) \left( \frac{d\omega}{dt} R - \omega \frac{dR}{dt} \right)}{(625R^2 + 4\omega^2)^2} + \left( -\frac{10}{314} \frac{d\omega}{dt} + 0.72\sqrt{35 + 10 \sin 0.3t} \cos 0.3t \right) \frac{40}{314} \right) \end{aligned}$$

în ecuația regulatorului

$$\begin{aligned} -\frac{dR}{dt} &= -0.14382 \frac{d\omega}{dt} + K_2(\omega_f - \omega) - K_3 \frac{db}{dt} = -0.14382 \frac{d\omega}{dt} + K_2(521.66 - \omega) - \\ &- K_3 \left( -211.25 \frac{(625R^2 - 4\omega^2) \left( \frac{d\omega}{dt} R - \omega \frac{dR}{dt} \right)}{(625R^2 + 4\omega^2)^2} + \right. \\ &\left. + \left( -\frac{10}{314} \frac{d\omega}{dt} + 0.72\sqrt{35 + 10 \sin 0.3t} \cos 0.3t \right) \frac{40}{314} \right) \end{aligned}$$

Se obține sistemul diferențial complet cu regulator **PID**.

Pentru constanta  $K_2$ ,  $K_3$  se aleg diverse valori:

$$K_1, K_2 = \frac{0.01}{6.28}; \frac{0.1}{6.28}; \frac{1}{6.28}; \frac{10}{6.28}; \frac{100}{6.28} \text{ și rezultatele simulărilor se dau în}$$

continuare.

$$\begin{cases}
 5 \frac{d\omega}{dt} = 1.3 \left( -812.5\omega \frac{R}{625R^2 + 4\omega^2} \right) + \left( -\frac{10}{314}\omega + 20 \left( \frac{7 + 2 \sin 0.3t}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{200}{314} \\
 -\frac{dR}{dt} = -0.14382 \frac{d\omega}{dt} + K_2(521.66 - \omega) - \\
 -K_3 \left( -211.25 \frac{(625R^2 - 4\omega^2) \left( \frac{d\omega}{dt} R - \omega \frac{dR}{dt} \right)}{(625R^2 + 4\omega^2)^2} + \left( -\frac{10}{314} \frac{d\omega}{dt} + 0.72\sqrt{35 + 10 \sin 0.3t} \cos 0.3t \right) \frac{40}{314} \right) \\
 \omega(0) = 314.92 \\
 R(0) = 75.382
 \end{cases}$$

$$1) K_2 = \frac{0.001}{6.28}; K_3 = \frac{100}{6.28}$$

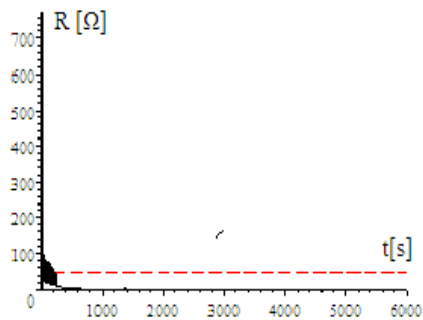


Fig.4.92. Variația în timp a lui R

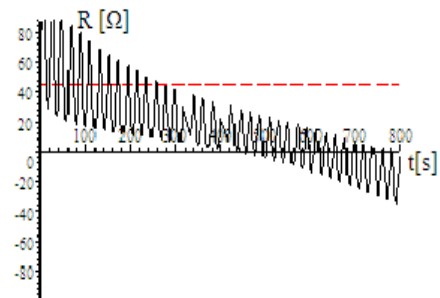


Fig.4.93. Variația în timp a lui R- detaliu

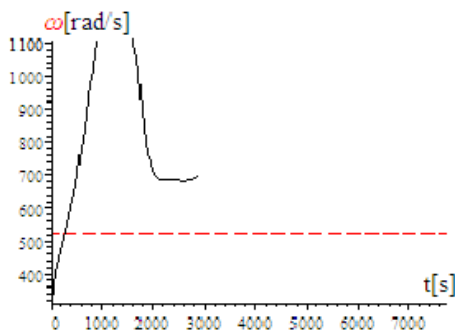


Fig.4.94. Variația în timp a lui ω

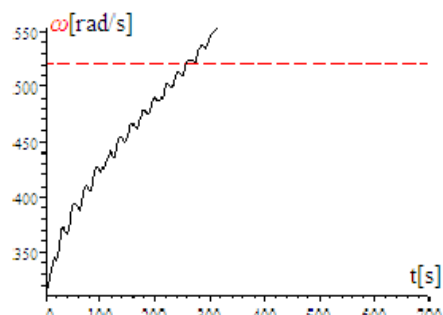


Fig.4.95. Variația în timp a lui ω - detaliu

$$2) K_2 = \frac{0.001}{6.28}; K_3 = \frac{1}{6.28}$$

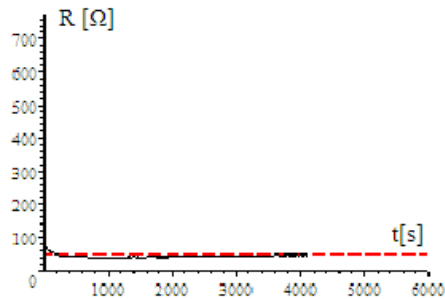


Fig.4.96. Variația în timp a lui R

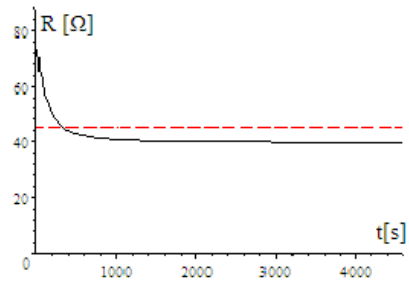


Fig.4.97. Variația în timp a lui R- detaliu

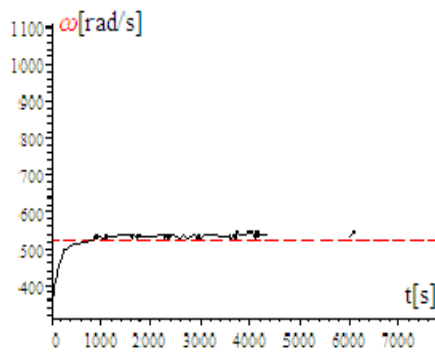


Fig.4.98. Variația în timp a lui  $\omega$

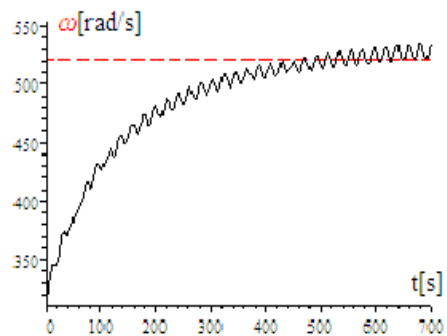


Fig.4.99. Variația în timp a lui  $\omega$  - detaliu

$$3) K_2 = \frac{0.001}{6.28}; K_3 = 0$$

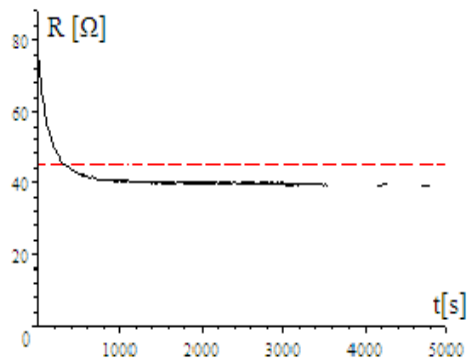


Fig.4.100. Variația în timp a lui R- detaliu

$$4) K_2 = \frac{0.001}{6.28}; K_3 = \frac{0.1}{6.28}$$

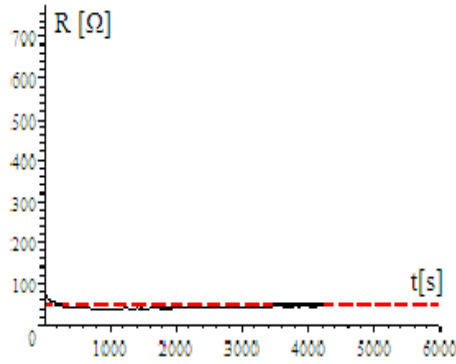


Fig.4.101. Variația în timp a lui R

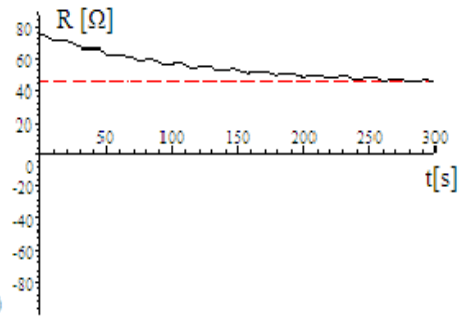


Fig.4.102. Variația în timp a lui R (detaliu)

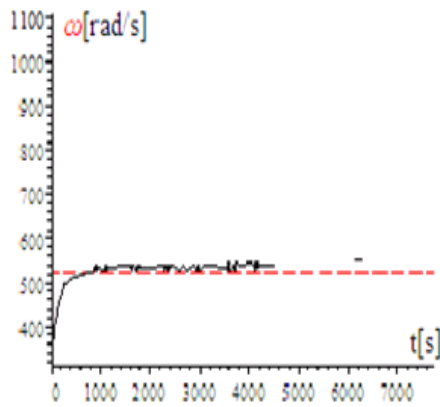


Fig.4.103. Variația în timp a lui ω

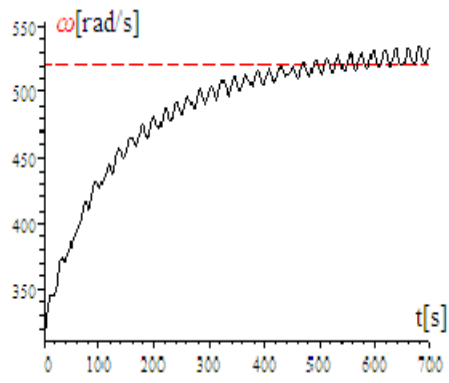


Fig.4.104. Variația în timp a lui ω (detaliu)

$$5) K_2 = \frac{0.1}{6.28}; K_3 = \frac{0.1}{6.28}$$

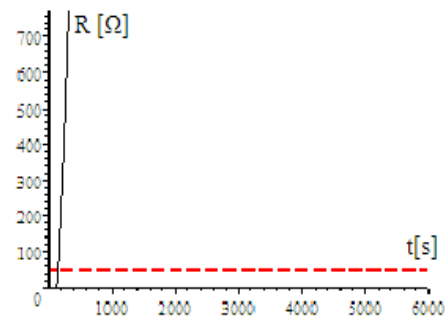


Fig.4.105. Variația în timp a lui R

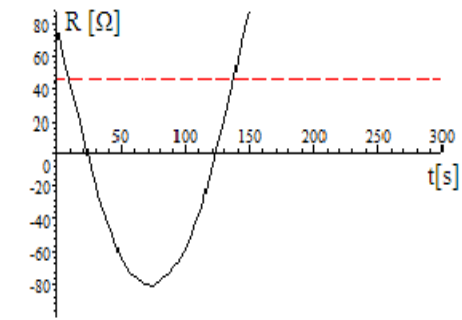


Fig.4.106. Variația în timp a lui R- (detaliu)

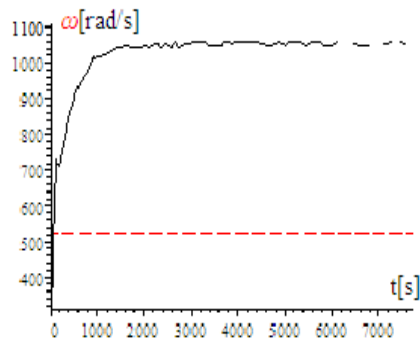


Fig.4.107. Variația în timp a lui  $\omega$

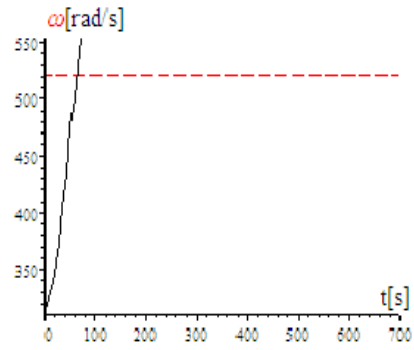


Fig.4.108. Variația în timp a lui  $\omega$  - (detaliu)

$$6) K_2 = \frac{0.001}{6.28}; K_3 = \frac{0.001}{6.28}$$

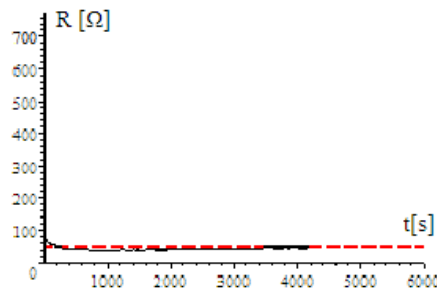


Fig.4.109. Variația în timp a lui R

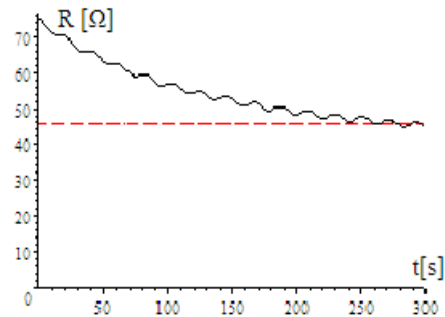


Fig.4.110. Variația în timp a lui R- (detaliu)

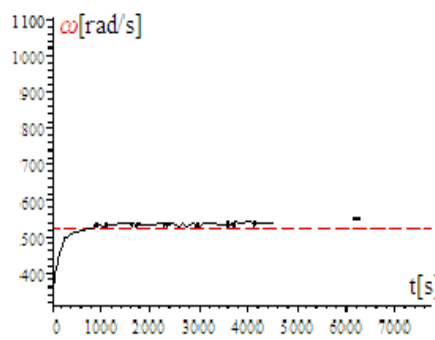


Fig.4.111. Variația în timp a lui  $\omega$

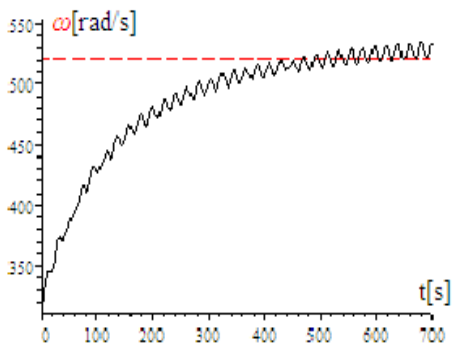


Fig.4.112. Variația în timp a lui  $\omega$  - (detaliu)

$$7) K_2 = \frac{0.01}{6.28}; K_3 = \frac{0.01}{6.28}$$

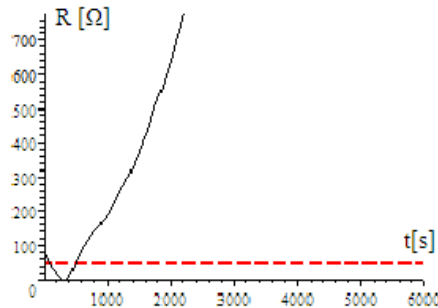


Fig.4.113. Variația în timp a lui R

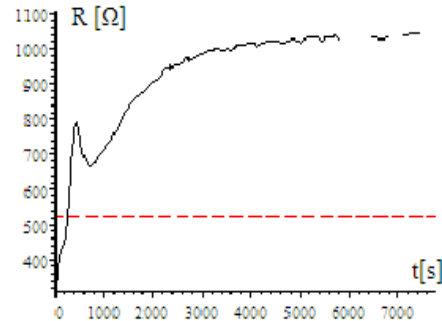


Fig.4.114. Variația în timp a lui R- (detaliu)

**Ponderea componentelor regulatorului PID** se poate observa din simulările anterioare , cu următoarele precizări:

- 1) valorile componentelor integratoare și derivate sunt foarte importante, observându-se că la valori mici sistemul este stabil, iar la valori mari sistemul devine instabil;
- 2) menținând redusă valoarea componentei integratoare și măbind valoarea componentei derivate se pierde stabilitatea sistemului;
- 3) în cazurile în care se pierde stabilitatea, variația în timp a rezistenței este pronunțată, aceasta atingând și valori negative, zonă în care modelul matematic nu mai este valabil, deoarece funcționarea nu mai este în regim de generator;
- 4) diferențele între reglările cu **PI** și **PID**, la aceleași valori pentru constantele integratoare, sunt minore și constau doar în forma de variație în timp a lui **-R-** (se poate observa variația lui **R** la **PID** ;
- 5)regulatorul **-PID-** aduce o îmbunătățire în reglaj în sensul că stabilizarea lui **-R-**, la valoarea finală, se face asimptotic, iar la **PI** are loc un subreglaj.

#### Corelația dintre J și V

Pentru a funcționa la putere maximă, viteza unghiulară  $\omega$  - ar trebui să se modifice cu viteza vântului  $V$  - sub forma:

$$\omega^*(V) = \frac{bV^{1.5}}{2a} = 314 \left( \frac{V}{5} \right)^{1.5} \quad (4.165)$$

Înlocuind pe  $\omega(V)$  în ecuația mișcării:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{TVN} = \left( -\frac{10}{314} \omega + 20 \left( \frac{V}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} \quad (4.166)$$

se obține:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{TVN} = 10 \left( \frac{V}{5} \right)^{1.5} \left( \frac{20}{314} \right) \quad (4.167)$$

sau cu  $dt = \frac{dV}{V'}$  rezultă:

$$J \frac{d\omega}{dt} V' = 10 \left( \frac{V}{5} \right)^{1.5} \left( \frac{20}{314} \right) \quad (4.168)$$

și cu  $\frac{d\omega}{dt} = \left(\frac{314}{5^{1.5}}\right)(1.5V^{0.5})$ ,  $K_T = \frac{314}{20}$  (raportul de transmisie) se obține:

$$J\left(\frac{314}{5^{1.5}}\right)(1.5V^{0.5})V' = 10\left(\frac{V}{5}\right)^{1.5} \frac{1}{K_T} \quad (4.169)$$

de unde se obține valoarea momentului de inerție  $J$ , raportat la axul **GSMP**, pentru care sistemul (**TVN+GSMP**) funcționează în punctul de putere maximă:

**Observații:**

1. Valoarea momentului de inerție  $J$  depinde de:

- viteza vântului  $V$  ;
- derivata vitezei  $V'$  ;
- raportul de transmisie **TVN+GSMP**,  $K_T$ .

2. Pentru o valoare  $J > J^*$ , turația, (respectiv  $\omega$ ), la **GSMP** nu mai poate crește așa de repede, (cum e impusă de  $\omega^* = 20K_T\left(\frac{V}{5}\right)^{1.5}$ ) și deci sistemul **TVN+GSMP** nu mai poate funcționa în punctele de putere maximă.

**Pentru  $J > J^*$  sistemul TVN+GSMP nu poate funcționa în punctele de putere maximă**

3. Derivata vitezei vântului, (în raport cu timpul),  $V'$  este hotărâtoare în calculului lui  $J^*$  și impune ca valoarea lui  $J^*$  să scadă, la variații rapide ale vitezei vântului  $V$ .

4. La viteze ale vântului de valori ridicate și  $J^*$  poate să fie mare, aceasta deoarece la viteze mari și cuplul **TVN**  $M_{TVN}$ , este mare.

**Determinarea lui J**

Pentru a funcționa la  $\omega^*(t)$ ,  $M_{TVN}^*(t)$ , **GSMP** trebuie să aibă cuplul negativ și deci din ecuația mișcării:

$$J \frac{d\omega}{dt} = 1.3I_q + 10\left(\frac{V}{5}\right)^{1.5} \frac{20}{314} \quad (4.170)$$

unde:  $1.3I_q = M_{GSMP}$ , iar  $10\left(\frac{V}{5}\right)^{1.5} \frac{20}{314} = M_{TVN}^*(t)$

$$\text{obținându-se } J \frac{d\omega}{dt} - 10\left(\frac{V}{5}\right)^{1.5} \frac{20}{314} < 0 \quad (4.171)$$

de unde rezultă **-J** - necesar.  $J^*$  depinde de  $V$  și  $V'$

**Observații:**

1) S-au prezentat variațiile în timp, reale și ideale, ale vitezei unghiulare  $\omega$ , respectiv turației la arborele generatorului și s-au remarcat diferențele mari ce există între cele două cazuri: funcționarea reală cu **J** mare și funcționarea ideală cu **J** redus. Prin urmare, conducerea sistemului (**TVN+GSMP**) la **J** real și variații rapide ale vitezei vântului trebuie făcută astfel încât energia primită de la vânt să fie maximă, aceasta presupunând o încărcare optimizată a generatorului, încărcare care trebuie să țină seama de valoarea vitezei vântului și a derivatei sale.

2)La variații lente ale vitezei vântului corelate cu valoarea momentelor de inerție este posibilă funcționarea în punctele de putere maximă, dându-se, în aceste sens, o **relație originală ce leagă între ele mărimile  $J$ ,  $V$  și  $V'$**

3)La momentele de inerție mici, deci la aeroagregate de putere redusă, funcționarea e posibilă în zona optimă a puterilor.

4)Legătura dintre momentul de inerție  $J$  viteza și derivata vitezei vântului, astfel încât sistemul (**TVN+GSMP**) să funcționeze în punctele de putere maximă, conduce la înțelegerea corectă a reglării sistemului.

$$\text{Ponderea termenilor } 0.08 \frac{dI_d}{dt}, 0.08 \frac{dI_q}{dt}$$

Pentru o analiză optimală, calitativă, se alege o variație sinusoidală a vitezei vântului  $V(t) = 5 + 2 \sin 0.3t$ , între 3[m/s] și 7[m/s] dată în figura 4.115.

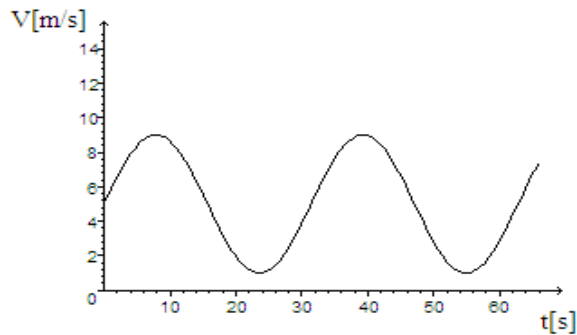


Fig.4.115. Variația în timp a vitezei vântului

La viteza vântului  $V$ , caracteristica mecanică a **TVN** este de forma:

$$M_{TVN} = \left( -\frac{10}{314} \omega + 20 \left( \frac{V}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} \quad (4.172)$$

și cuplul **GSMP** fiind:

$$M_{elmg} = 1.3 I_q \quad (4.173)$$

rezultă ecuația mișcării:

$$5 \frac{d\omega}{dt} = M_{elmg} + M_{TVN} = 1.3 I_q + \left( -\frac{10}{314} \omega + 20 \left( \frac{V}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} \quad (4.174)$$

Puterea  $P$  fiind derivata energie  $W$  se poate scrie:

$$P = \frac{dW}{dt}$$

sau:

$$P = R(I_d^2 + I_q^2) = \frac{dW}{dt}$$

Se obține, astfel, sistemul de ecuații diferențiale în care rezistența de sarcină  $R = R_{sarcină}$  se consideră pentru 2 cazuri: 1)  $R = 531[\Omega]$ ; 2)  $R = 831[\Omega]$



$$\left\{ \begin{array}{l}
 0 = (1.6 + R)I_d + 0.08 \frac{dI_d}{dt} - \omega 0.08I_q \\
 0 = (1.6 + R)I_q + 0.08 \frac{dI_q}{dt} + \omega 0.08I_d + \omega 1.3 \\
 5 \frac{d\omega}{dt} = 1.3I_q + \left( -\frac{10}{314} \omega + 20 \left( \frac{V}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} \\
 \frac{dW}{dt} = R(I_d^2 + I_q^2) \\
 I_d(0) = -1.4782 \times 10^{-2} \\
 I_q(0) = -0.48989 \\
 \omega(0) = 314.04 \\
 W(0) = 0
 \end{array} \right. \quad (4.175)$$

**Ponderea termenilor**

**1.1)**  $R = 531[\Omega]$  ,  $V(t) = 5 + 2 \sin 0.3t$  ,  $I_d = a$  ,  $I_q = b$   
 $\omega(2.5) = 314.01$  ,  $\omega 0.08b$

$$\left\{ \begin{array}{l}
 0 = 532.6a + 0.08 \frac{da}{dt} - \omega 0.08b \\
 0 = 532.6b + 0.08 \frac{db}{dt} + \omega 0.08a + \omega 1.3 \\
 5 \frac{d\omega}{dt} = 1.3b + \left( -\frac{10}{314} \omega + 20 \left( 1 + \frac{2 \sin 0.3t}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} \\
 a(0) = -1.4782 \times 10^{-2} \\
 b(0) = -0.48989 \\
 \omega(0) = 314.04
 \end{array} \right.$$

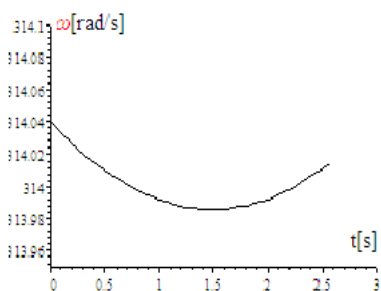


Fig.4.116. Variația în timp a lui  $\omega$

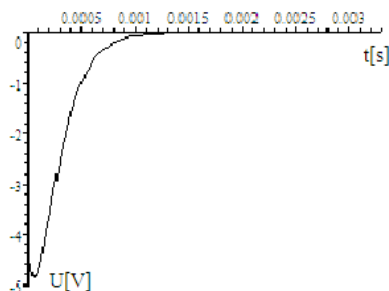


Fig.4.117. Variația în timp termenului

$$0.08 \frac{da}{dt}$$

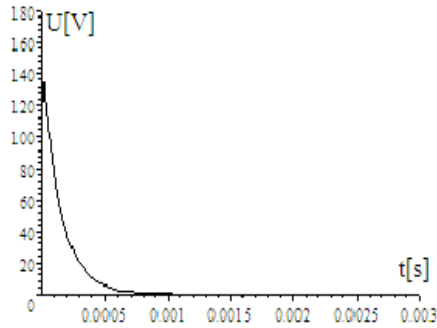


Fig.4.118 Variația în timp a termenului

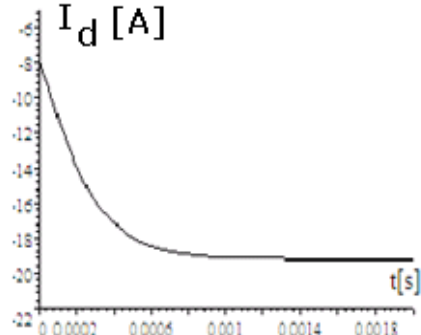


Fig.4.119 Variația în timp a lui  $I_d$

$$-0.08 \frac{da}{dt}$$

**1.2)**  $R = 531[\Omega]$  ,  $V(t) = 5 + 2 \sin 0.3t$  ,  $I_d = a$  ,  $I_q = b$

**Modelul simplificat**

$$\begin{cases} 0 = 532.6a - \omega 0.08b \\ 0 = 532.6b + \omega 0.08a + \omega 1.3 \\ a = -65 \frac{\omega^2}{1.7729 \times 10^8 + 4\omega^2} \\ b = -4.3274 \times 10^5 \frac{\omega}{1.7729 \times 10^8 + 4\omega^2} \\ 5 \frac{d\omega}{dt} = -4.3274 \times 10^5 \frac{\omega}{1.7729 \times 10^8 + 4\omega^2} 1.3 + \left( -\frac{10}{314} \omega + 20 \left( 1 + \frac{2 \sin 0.3t}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} \\ \omega(0) = 314.04 \end{cases}$$

$$\omega 0.08 - 532.6a = 0.08 \frac{da}{dt}; \quad -\omega 0.08a - 1.3\omega - 532.6b = 0.08 \frac{db}{dt}$$

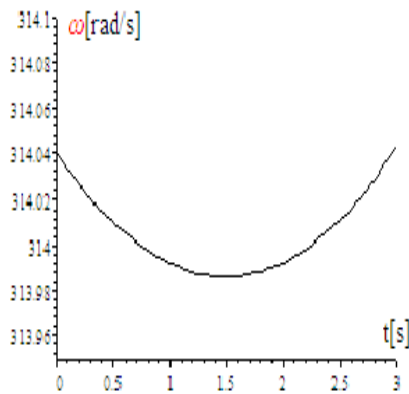


Fig.4.120. Variația în timp a lui  $\omega$

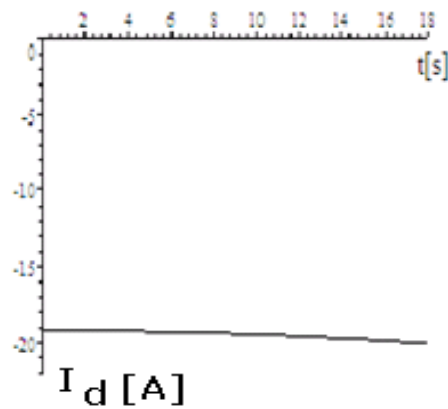


Fig.4.121. Variația în timp a lui  $I_d$

2.1)  $R = 831[\Omega]$  ,  $V(t) = 5 + 2 \sin 0.3t$  ,  $I_d = a$  ,  $I_q = b$

$$\begin{cases} 0 = 832.6a + 0.08 \frac{da}{dt} - \omega 0.08b \\ 0 = 832.6b + 0.08 \frac{db}{dt} + \omega 0.08a + \omega 1.3 \\ 5 \frac{d\omega}{dt} = 1.3b + \left( -\frac{10}{314} \omega + 20 \left( 1 + \frac{2 \sin 0.3t}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} \\ a(0) = -1.4782 \times 10^{-2} \\ b(0) = -0.48989 \\ \omega(0) = 314.04 \end{cases}$$

$$\omega 0.08 - 832.6a = 0.08 \frac{da}{dt} , \quad -\omega 0.08a - 1.3\omega - 832.6b = 0.08 \frac{db}{dt}$$

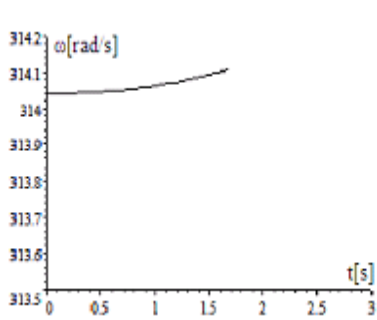


Fig.4.122. Variația în timp a lui  $\omega$

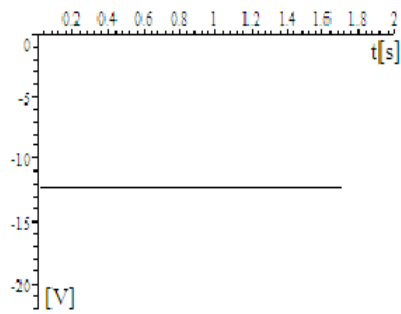


Fig.4.123. Variația în timp a lui  $\omega 0.08b$

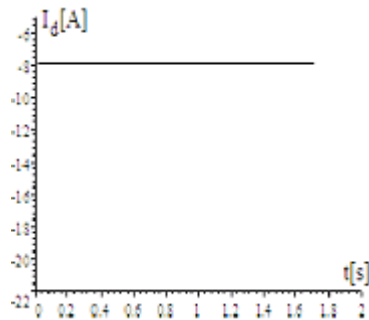


Fig.4.124. Variația în timp a lui  $I_d$

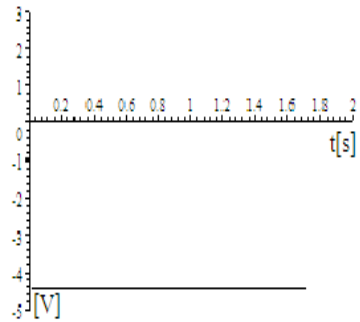


Fig.4.125. Variația în timp a lui  $0.08 \frac{da}{dt}$

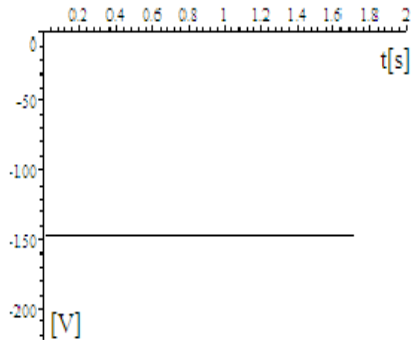


Fig.4.126. Variația în timp a lui  $0.08 \frac{db}{dt}$

**2.2)**  $R = 832.6 [\Omega]$  ,  $V(t) = 5 + 2 \sin 0.3t$  ,  $I_d = a$  ,  $I_q = b$

$$\begin{cases} 0 = 832.6a - \omega 0.08b \\ 0 = 832.6b + \omega 0.08a + \omega 1.3 \\ a = -65 \frac{\omega^2}{4.3326 \times 10^8 + 4\omega^2} \\ b = -6.7649 \times 10^5 \frac{\omega}{4.3326 \times 10^8 + 4\omega^2} \\ 5 \frac{d\omega}{dt} = -6.7649 \times 10^5 \frac{\omega}{4.3326 \times 10^8 + 4\omega^2} 1.3 + \left( -\frac{10}{314} \omega + 20 \left( 1 + \frac{2 \sin 0.3t}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} \\ \omega(0) = 314.04 \\ \omega(2.5) = 314.19 \end{cases}$$

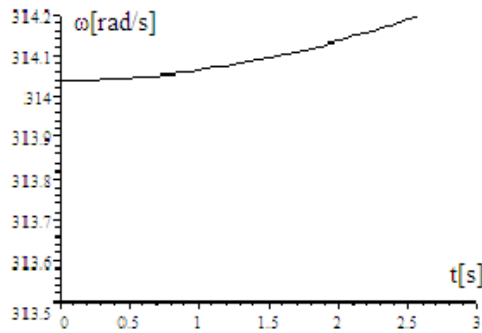


Fig.4.127. Variația în timp a lui  $\omega$

#### 4.5. Calculul optimal al rezistenței de sarcină R

Calculul optimal se face în două variante:

A) cu -R- constant și

B) cu -R- variabil în funcție de viteza vântului.

##### VARIANTA A: R=ct

Calculul optimal al rezistenței de sarcină **R** în condițiile obținerii unei energii maxime se analizează pentru următoarele cazuri:

$$1) V = 5 + 2 \sin 0.3t$$

$$2) V = 5 + 4 \sin 0.3t$$

$$3) V = 10 + 2 \sin 0.3t$$

$$4) V = 10 + 6 \sin 0.3t$$

**CAZUL1:**  $V = 5 + 2 \sin 0.3t$

Pentru a extinde intervalul de timp observabil, se simplifică modelul matematic, ecuațiile înfășurărilor statorice din axele -d- și -q- având forma:

$$\begin{cases} RI_d = \omega 0.08 I_q \\ -RI_q = \omega 0.08 I_d + \omega 1.3 \end{cases} \quad (4.176)$$

Pentru curenții  $-I_d$ - și  $-I_q$ - se obțin valorile:

$$I_d = \left( -65 \frac{\omega^2}{625R^2 + 4\omega^2} \right), \quad I_q = \left( -812.5\omega \frac{R}{625R^2 + 4\omega^2} \right)$$

Puterea fiind  $P = R(I_d^2 + I_q^2)$ , rezultă :

$$P = R(I_d^2 + I_q^2) = R \left( 1056.3 \frac{\omega^2}{625R^2 + 4\omega^2} \right) \quad (4.177)$$

Înlocuind în ecuațiile mișcării și ale energiei aceste valori ale lui  $-I_q$ - și  $I_d^2 + I_q^2$  se obțin ecuațiile diferențiale simplificate.

$$\begin{cases} J \frac{d\omega}{dt} = \left( -812.5\omega \frac{R}{625R^2 + 4\omega^2} \right) 1.3 + \left( -\frac{10}{314} \omega + 20 \left( 1 + \frac{2 \sin 0.3t}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} \\ \frac{dW}{dt} = R \left( 1056.3 \frac{\omega^2}{625R^2 + 4\omega^2} \right) \\ \omega(0) = 314 \\ W(0) = 0 \end{cases} \quad (4.178)$$

**Condițiile inițiale** la  $V=5[m/s]$  și la cuplul turbinei de vânt navale **-TVN-**

$M_{TVN} = \left( -\frac{10}{314} \omega + 20 \right) \frac{20}{314}$  se obține din sistemul:

$$\begin{cases} 0 = \left( -812.5\omega \frac{R}{625R^2 + 4\omega^2} \right) 1.3 + \left( -\frac{10}{314} \omega + 20 \right) \frac{20}{314} \\ \omega = 314 \end{cases} \quad (4.179)$$

valoarea rezistenței  $R=832.38[\Omega]$

La  $V=5$ [m/s] turația **GSMP** este 3000[rot/min], adică  $\omega=\omega^*=314$ [rad/s] obținându-se o rezistență de sarcină  $R=832.38$ [ $\Omega$ ].

La aceeași valoare a rezistenței de sarcină **-R-** se ajunge și folosind sistemul algebric folosit la determinarea performanțelor mărimilor de bază în punctul de putere maximă dat în sistemul algebric de mai jos pentru  $V=5$ [m/s] .

$$\left\{ \begin{array}{l} V = 5 \\ -RI_d = -\omega 0.08I_q \\ -RI_q = \omega 0.07I_d + \omega \Psi_{MP} \\ -\left( -\frac{10}{314}\omega + 20\left(\frac{V}{5}\right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} = \Psi_{MP}I_q \\ \omega = 314\left(\frac{V}{5}\right)^{1.5} \\ \Psi_{MP} = 1.3 \\ \Psi_S^2 = (0.08I_q)^2 + (\Psi_{MP} + 0.07I_d)^2 \end{array} \right. \quad (4.180)$$

ale cărui soluții sunt:

$$\Psi_{MP} = 1.3 \text{ [Wb]}; \quad \omega = 314 \text{ [rad / s]}; \quad I_q = -0.48996 \text{ [A]};$$

$$I_d = -1.4784 \times 10^{-2} \text{ [A]}; \quad R = 832.47 \text{ [}\Omega\text{]}; \quad \Psi_S = 1.2996 \text{ [Wb]}.$$

#### Determinarea la **V** dat a lui **R**

Se obține, la  $V=5$ [m/s] o rezistență de sarcină  $R=832.47$ [ $\Omega$ ]. Cu această valoare a lui **R** se obține o energie electrică, la  $V = 5 + 2 \sin 0.3t$ , ( $V_{\text{mediu}}=5$  [m/s]), mai mică decât pentru  $R=531$ [ $\Omega$ ] (determinată din condiții de optim pentru energie), la valorile reale ale lui **J**, (de exemplu  $J = 5$  [ $\text{Kg} \cdot \text{m}^2$ ]), cu sistemul :

a)  $R=831$ [ $\Omega$ ]

$$\left\{ \begin{array}{l} 5 \frac{d\omega}{dt} = \left( -812.5\omega \frac{R}{625R^2 + 4\omega^2} \right) 1.3 + \left( -\frac{10}{314}\omega + 20\left(1 + \frac{2 \sin 0.3t}{5}\right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} \\ \frac{dW}{dt} = R \left( 1056.3 \frac{\omega^2}{625R^2 + 4\omega^2} \right) \\ \omega(0) = 314 \\ W(0) = 0 \end{array} \right.$$

$$\mathbf{a)} \quad R = 831[\Omega], \quad \omega(11111) = 323.08[\text{rad / s}], \quad W(7777) = 1.1654 \times 10^6[\text{J}]$$

Pentru rezistențe variabile armonic în timp se obțin rezultatele:

**a)**

$$R = (531 - 77 \sin 0.3t)[\Omega], \quad \omega(5555) = 250.58[\text{rad / s}], \quad W(5555) = 1.2235 \times 10^6[\text{J}]$$

**b)**

$$R = (531 - 177 \sin 0.3t)[\Omega], \quad \omega(5555) = 243.26[\text{rad / s}], \quad W(5555) = 1.2225 \times 10^6[\text{J}]$$

c)

$$R = (531 - 277 \sin 0.3t)[\Omega], \omega(5555) = 228.40[\text{rad} / \text{s}], W(5555) = 1.2162 \times 10^6[\text{J}]$$

d)

$$R = (531 - 477 \sin 0.3t)[\Omega], \omega(3666) = 144.05[\text{rad} / \text{s}], W(3666) = 1.2235 \times 10^6[\text{J}]$$

e)

$$R = (531 + 77 \sin 0.3t)[\Omega], \omega(5555) = 250.57[\text{rad} / \text{s}], W(5555) = 1.2235 \times 10^6[\text{J}]$$

f)

$$R = (531 + 477 \sin 0.3t)[\Omega], \omega(3777) = 144.24[\text{rad} / \text{s}], W(3777) = 8.0399 \times 10^5[\text{J}]$$

$$\mathbf{a)} R = 831[\Omega], \omega(5555) = 323.08[\text{rad} / \text{s}], W(5555) = 1.1654 \times 10^6[\text{J}]$$

$$\mathbf{b)} R = 931[\Omega], \omega(5555) = 341.14[\text{rad} / \text{s}], W(5555) = 1.1334 \times 10^6[\text{J}]$$

$$\mathbf{c)} R = 531[\Omega], \omega(5555) = 252.2[\text{rad} / \text{s}], W(5555) = 1.2235 \times 10^6[\text{J}]$$

$$\mathbf{d)} R = 231[\Omega], \omega(5555) = 140.66[\text{rad} / \text{s}], W(5555) = 1.0536 \times 10^6[\text{J}]$$

$$\mathbf{e)} R = 31[\Omega], \omega(5555) = 23.249[\text{rad} / \text{s}], W(5555) = 4.3881 \times 10^5[\text{J}]$$

$$\mathbf{f)} R = 1531[\Omega], \omega(5555) = 415.77[\text{rad} / \text{s}], W(5555) = 19.3638 \times 10^5[\text{J}]$$

Se analizează mai în detaliu zona  $R=531[\Omega]$ , în sensul că se iau, în continuare, mai multe valori ale lui R: 519,529,...și cu sistemul de mai jos se justifică valoarea optimală:  $R^*=531[\Omega]$ .

**CAZUL 1: Calculul lui  $\omega$  și W pentru diverse valori ale lui -R-**

$$\left\{ \begin{array}{l} 5 \frac{d\omega}{dt} = \left( -812.5\omega \frac{519}{625 \cdot 519^2 + 4\omega^2} \right) 1.3 + \left( -\frac{10}{314} \omega + 20 \left( 1 + \frac{2 \sin 0.3t}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} \\ \frac{dW}{dt} = 519 \left( 1056.3 \frac{\omega^2}{625 \cdot 519^2 + 4\omega^2} \right) \\ \omega(0) = 314 \\ W(0) = 0 \end{array} \right.$$

$$\mathbf{1)} R = 519[\Omega], \omega(5555) = 248.69[\text{rad} / \text{s}], W(5555) = 1.2234 \times 10^6[\text{J}]$$

$$\mathbf{2)} R = 529[\Omega], \omega(5555) = 251.62[\text{rad} / \text{s}], W(5555) = 1.2235 \times 10^6[\text{J}]$$

$$\mathbf{3)} R = 532[\Omega], \omega(5555) = 252.49[\text{rad} / \text{s}], W(5555) = 1.2235 \times 10^6[\text{J}]$$

$$\mathbf{4)} R = 533[\Omega], \omega(5555) = 252.78[\text{rad} / \text{s}], W(5555) = 1.2235 \times 10^6[\text{J}]$$

$$\mathbf{5)} R = 534[\Omega], \omega(5555) = 253.07[\text{rad} / \text{s}], W(5555) = 1.2235 \times 10^6[\text{J}]$$

$$\mathbf{6)} R = 539[\Omega], \omega(5555) = 254.51[\text{rad} / \text{s}], W(5555) = 1.2235 \times 10^6[\text{J}]$$

$$\mathbf{7)} R = 549[\Omega], \omega(5555) = 257.35[\text{rad} / \text{s}], W(5555) = 1.2232 \times 10^6[\text{J}]$$

**CAZUL2:** Pentru:  $V = 5 + 4 \sin 0.3t$

Din sistemul:

$$\left\{ \begin{array}{l} 5 \frac{d\omega}{dt} = \left( -812.5\omega \frac{579}{625 \cdot 579^2 + 4\omega^2} \right) 1.3 + \left( -\frac{10}{314} \omega + 20 \left( 1 + \frac{4 \sin 0.3t}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} \\ \frac{dW}{dt} = 579 \left( 1056.3 \frac{\omega^2}{625 \cdot 579^2 + 4\omega^2} \right) \\ \omega(0) = 314 \\ W(0) = 0 \end{array} \right.$$

Se obțin valorile:

- 1)  $R = 519[\Omega]$ ,  $\omega(5555) = 271.32[\text{rad} / \text{s}]$ ,  $W(5555) = 1.4051 \times 10^6[\text{J}]$
- 2)  $R = 529[\Omega]$ ,  $\omega(5555) = 274.51[\text{rad} / \text{s}]$ ,  $W(5555) = 1.4053 \times 10^6[\text{J}]$
- 3)  $R = 532[\Omega]$ ,  $\omega(5555) = 275.46[\text{rad} / \text{s}]$ ,  $W(5555) = 1.4054 \times 10^6[\text{J}]$
- 4) **R=533[Ω]**,  $\omega(5555) = 275.78[\text{rad} / \text{s}]$ ,  $W(5555) = 1.4054 \times 10^6[\text{J}]$
- 5)  $R = 534[\Omega]$ ,  $\omega(5555) = 276.09[\text{rad} / \text{s}]$ ,  $W(5555) = 1.4054 \times 10^6[\text{J}]$
- 6)  $R = 539[\Omega]$ ,  $\omega(5555) = 277.66[\text{rad} / \text{s}]$ ,  $W(5555) = 1.4054 \times 10^6[\text{J}]$
- 7)  $R = 549[\Omega]$ ,  $\omega(5555) = 280.75[\text{rad} / \text{s}]$ ,  $W(5555) = 1.4052 \times 10^6[\text{J}]$
- 8)  $R = 579[\Omega]$ ,  $\omega(5555) = 289.77[\text{rad} / \text{s}]$ ,  $W(5555) = 1.4033 \times 10^6[\text{J}]$

**CAZUL3:** Pentru:  $V = 10 + 2 \sin 0.3t$

Din sistemul :

$$\left\{ \begin{array}{l} 5 \frac{d\omega}{dt} = \left( -812.5\omega \frac{532}{625 \cdot 532^2 + 4\omega^2} \right) 1.3 + \left( -\frac{10}{314} \omega + 20 \left( 1 + \frac{2 \sin 0.3t}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} \\ \frac{dW}{dt} = 532 \left( 1056.3 \frac{\omega^2}{625 \cdot 532^2 + 4\omega^2} \right) \\ \omega(0) = 314 \\ W(0) = 0 \end{array} \right.$$

Se obțin valorile:

- 1)  $R = 519[\Omega]$ ,  $\omega(5555) = 690.44[\text{rad} / \text{s}]$ ,  $W(5555) = 7.1722 \times 10^6[\text{J}]$
- 2)  $R = 529[\Omega]$ ,  $\omega(5555) = 698.37[\text{rad} / \text{s}]$ ,  $W(5555) = 7.1806 \times 10^6[\text{J}]$
- 3)  $R = 532[\Omega]$ ,  $\omega(5555) = 700.73[\text{rad} / \text{s}]$ ,  $W(5555) = 7.1813 \times 10^6[\text{J}]$
- 4)  $R = 533[\Omega]$ ,  $\omega(5555) = 701.51[\text{rad} / \text{s}]$ ,  $W(11111) = 1.5785 \times 10^7[\text{J}]$
- 5)  $R = 534[\Omega]$ ,  $\omega(5555) = 702.30[\text{rad} / \text{s}]$ ,  $W(5555) = 7.1817 \times 10^6[\text{J}]$
- 6)  $R = 539[\Omega]$ ,  $\omega(11111) = 708.39[\text{rad} / \text{s}]$ ,  $W(11111) = 1.5806 \times 10^7[\text{J}]$
- 7)  $R = 549[\Omega]$ ,  $\omega(11111) = 716.20[\text{rad} / \text{s}]$ ,  $W(11111) = 1.5838 \times 10^7[\text{J}]$
- 8)  $R = 559[\Omega]$ ,  $\omega(11111) = 723.89[\text{rad} / \text{s}]$ ,  $W(11111) = 1.5868 \times 10^7[\text{J}]$
- 9)  $R = 579[\Omega]$ ,  $\omega(11111) = 738.96[\text{rad} / \text{s}]$ ,  $W(11111) = 1.5918 \times 10^7[\text{J}]$



$$10) R = 679[\Omega], \omega(11111) = 808.27[\text{rad} / \text{s}], W(11111) = 1.6022 \times 10^7 [\text{J}]$$

$$11) R = 779[\Omega], \omega(11111) = 868.95[\text{rad} / \text{s}], W(11111) = 1.5949 \times 10^7 [\text{J}]$$

$$12) R = 831[\Omega], \omega(11111) = 897.61[\text{rad} / \text{s}], W(11111) = 1.5863 \times 10^7 [\text{J}]$$

**CAZUL4.1:** Pentru:  $V = 10 + 6 \sin 0.3t$

Din sistemul:

$$\begin{cases} 5 \frac{d\omega}{dt} = \left( -812.5\omega \frac{529}{625 \cdot 529^2 + 4\omega^2} \right) 1.3 + \left( -\frac{10}{314} \omega + 20 \left( 1 + \frac{6 \sin 0.3t}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} \\ \frac{dW}{dt} = 529 \left( 1056.3 \frac{\omega^2}{625 \cdot 529^2 + 4\omega^2} \right) \\ \omega(0) = 314 \\ W(0) = 0 \end{cases}$$

Se obțin valorile:

$$1) R = 519[\Omega], \omega(5555) = 732.8[\text{rad} / \text{s}], W(5555) = 8.0188 \times 10^6 [\text{J}]$$

$$2) R = 529[\Omega], \omega(5555) = 741.21[\text{rad} / \text{s}], W(5555) = 8.0224 \times 10^6 [\text{J}] :$$

$$3) R = 531[\Omega], \omega(5555) = 742.88[\text{rad} / \text{s}], W(5555) = 8.0229 \times 10^6 [\text{J}]$$

$$4) R = 532[\Omega], \omega(5555) = 743.71[\text{rad} / \text{s}], W(5555) = 8.0232 \times 10^6 [\text{J}]$$

$$5) R = 533[\Omega], \omega(5555) = 744.54[\text{rad} / \text{s}], W(5555) = 8.0234 \times 10^6 [\text{J}]$$

$$6) R = 534[\Omega], \omega(5555) = 702.30[\text{rad} / \text{s}], W(5555) = 7.1817 \times 10^6 [\text{J}]$$

$$7) R = 539[\Omega], \omega(5555) = 706.19[\text{rad} / \text{s}], W(5555) = 7.1825 \times 10^6 [\text{J}]$$

$$8) R = 549[\Omega], \omega(5555) = 713.88[\text{rad} / \text{s}], W(5555) = 7.1832 \times 10^6 [\text{J}]$$

$$9) R = 579[\Omega], \omega(5555) = 736.27[\text{rad} / \text{s}], W(5555) = 7.1778 \times 10^6 [\text{J}]$$

**VARIANTA B: -R=f(V)**

Pentru  $R=533[\Omega]$ , dedus anterior în varianta A, la  $V = 10 + 2 \sin 0.3t$  se ia pentru rezistența de sarcină -R-, funcția:

$$R(t) = R_{\text{optim}} \cdot \frac{10}{V} = 533 \cdot \frac{10}{V}$$

La  $t=0$ ,  $V(0)=10$  și din acest motiv s-a înmulțit  $R_{\text{optim}}$  cu 10, astfel că la  $R(0)=R_{\text{optim}}=533[\Omega]$ .

**CAZUL4.2:** Pentru:  $V = 10 + 9 \sin 0.3t$

Din sistemul:

$$\begin{cases} 5 \frac{d\omega}{dt} = \left( -812.5\omega \frac{529}{625 \cdot 529^2 + 4\omega^2} \right) 1.3 + \left( -\frac{10}{314} \omega + 20 \left( 1 + \frac{9 \sin 0.3t}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} \\ \frac{dW}{dt} = 529 \left( 1056.3 \frac{\omega^2}{625 \cdot 529^2 + 4\omega^2} \right) \\ \omega(0) = 314 \\ W(0) = 0 \end{cases}$$

Se obțin valorile:

- 1)  $R = 519[\Omega]$ ,  $\omega(5555) = 795.84[\text{rad} / \text{s}]$ ,  $W(5555) = 9.3475 \times 10^6[\text{J}]$
- 2)  $R = 529[\Omega]$ ,  $\omega(5555) = 804.94[\text{rad} / \text{s}]$ ,  $W(5555) = 9.3515 \times 10^6[\text{J}]$
- 3)  $R = 531[\Omega]$ ,  $\omega(5555) = 806.75[\text{rad} / \text{s}]$ ,  $W(5555) = 9.3521 \times 10^6[\text{J}]$
- 4)  $R = 532[\Omega]$ ,  $\omega(5555) = 807.65[\text{rad} / \text{s}]$ ,  $W(5555) = 9.3524 \times 10^6[\text{J}]$
- 5)  $R = 533[\Omega]$ ,  $\omega(5555) = 808.55[\text{rad} / \text{s}]$ ,  $W(5555) = 9.3527 \times 10^6[\text{J}]$
- 6)  $R = 534[\Omega]$ ,  $\omega(5555) = 809.44[\text{rad} / \text{s}]$ ,  $W(5555) = 9.3529 \times 10^6[\text{J}]$
- 7)  $R = 539[\Omega]$ ,  $\omega(5555) = 813.9[\text{rad} / \text{s}]$ ,  $W(5555) = 9.3538 \times 10^6[\text{J}]$
- 8)  $R = 549[\Omega]$ ,  $\omega(5555) = 822.73[\text{rad} / \text{s}]$ ,  $W(5555) = 9.3543 \times 10^6[\text{J}]$
- 9)  $R = 579[\Omega]$ ,  $\omega(5555) = 848.39[\text{rad} / \text{s}]$ ,  $W(5555) = 9.3466 \times 10^6[\text{J}]$

**Variația rezistenței -R- cu viteza-V-**

**CAZUL5:** pentru:  $V = 10 + 2 \sin 0.3t$ ,  $R = \frac{5330}{V} = \frac{5330}{10 + 2 \sin 0.3t}$

Din sistemul:

$$\left\{ \begin{array}{l} 5 \frac{d\omega}{dt} = \left( -812.5\omega \frac{\frac{5330}{10 + 2 \sin 0.3t}}{625 \cdot \left( \frac{5330}{10 + 2 \sin 0.3t} \right)^2 + 4\omega^2} \right) 1.3 + \\ \quad + \left( -\frac{10}{314} \omega + 20 \left( 1 + \frac{6 \sin 0.3t}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} \\ \frac{dW}{dt} = \frac{5330}{10 + 2 \sin 0.3t} \left( 1056.3 \frac{\omega^2}{625 \cdot \left( \frac{5330}{10 + 2 \sin 0.3t} \right)^2 + 4\omega^2} \right) \\ \omega(0) = 314 \\ W(0) = 0 \end{array} \right.$$

Se obțin valorile:

- 1)  $\omega(5555) = 744.9[\text{rad} / \text{s}]$ ,  $W(5555) = 8.0229 \times 10^6[\text{J}]$
- 2)  $R = 533[\Omega]$ ,  $\omega(5555) = 744.54[\text{rad} / \text{s}]$ ,  $W(5555) = 8.0234 \times 10^6[\text{J}]$

După un timp suficient de mare:  $t=5555[\text{s}]$  energiile în cele două cazuri,  $R=ct$  și  $R=var$  sunt comparabile diferența fiind de 0.006%, deci neesențială.

**CAZUL6:** pentru:  $V = 10 + 2 \sin 0.3t$ ,  $R = \frac{5330}{V^2} = \frac{53300}{(10 + 2 \sin 0.3t)^2}$

Din sistemul:

$$\left. \begin{aligned}
 5 \frac{d\omega}{dt} &= \left( -812.5\omega \frac{53300}{(10 + 2 \sin 0.3t)^2} \right) 1.3 + \\
 &\quad + \left( -\frac{10}{314}\omega + 20 \left( 1 + \frac{6 \sin 0.3t}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} \\
 \frac{dW}{dt} &= \frac{53300}{(10 + 2 \sin 0.3t)^2} \left( 1056.3 \frac{\omega^2}{625 \cdot \left( \frac{53300}{(10 + 2 \sin 0.3t)^2} \right)^2 + 4\omega^2} \right) \\
 \omega(0) &= 314 \\
 W(0) &= 0
 \end{aligned} \right\}$$

Se obțin valorile:

**1)**  $\omega(5555) = 737.15[\text{rad} / \text{s}], W(5555) = 8.0191 \times 10^6[\text{J}]$

**2)**  $R = 533[\Omega], \omega(5555) = 744.54[\text{rad} / \text{s}], W(5555) = 8.0234 \times 10^6[\text{J}]$

În acest caz diferența la energii este mai mare: 0.05%, dar tot neesențială.

**CAZUL7:** pentru:  $V = 10 + 2 \sin 0.3t, R = \frac{5330}{\sqrt{V}} = \frac{533\sqrt{10}}{\sqrt{10 + 2 \sin 0.3t}}$

Din sistemul:

$$\left. \begin{aligned}
 5 \frac{d\omega}{dt} &= \left( -812.5\omega \frac{533\sqrt{10}}{\sqrt{10 + 2 \sin 0.3t}} \right) 1.3 + \\
 &\quad + \left( -\frac{10}{314}\omega + 20 \left( 1 + \frac{6 \sin 0.3t}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} \\
 \frac{dW}{dt} &= \frac{533\sqrt{10}}{\sqrt{10 + 2 \sin 0.3t}} \left( 1056.3 \frac{\omega^2}{625 \cdot \left( \frac{533\sqrt{10}}{\sqrt{10 + 2 \sin 0.3t}} \right)^2 + 4\omega^2} \right) \\
 \omega(0) &= 314 \\
 W(0) &= 0
 \end{aligned} \right\}$$

Se obțin valorile:

$$1) \omega(5555) = 745.76[\text{rad} / \text{s}], W(5555) = 8.0235 \times 10^6 [\text{J}]$$

$$2) R = 533[\Omega], \omega(5555) = 744.54[\text{rad} / \text{s}], W(5555) = 8.0234 \times 10^6 [\text{J}]$$

Și în acest caz diferența de energie este redusă: 0.001%.

**Concluzii:**

- 1) Pentru  $R = \text{var}$ , (de diverse forme:  $R = \frac{R_0}{V}$ ,  $R = \frac{R_0}{\sqrt{V}}$ ,  $R = \frac{R_0}{V^2}$ ) nu se obțin diferențe mari față de  $R = \text{ct}$
- 2) Diferența la energii este neesențială.

#### 4.5.1. Studiul de caz: determinarea rezistenței de sarcină cunoscând viteza vântului

Ecuatiile înfășurărilor statorice din axele -d- și -q- au forma:

$$\begin{cases} RI_d = \omega 0.08 I_q \\ -RI_q = \omega 0.08 I_d + \omega 1.3 \end{cases}$$

cu valorile:

$$I_d = \left( -65 \frac{\omega^2}{625R^2 + 4\omega^2} \right), I_q = \left( -812.5 \frac{R}{625R^2 + 4\omega^2} \right)$$

**Model simplificat**

Puterea fiind  $P = R(I_d^2 + I_q^2)$ , rezultă :

$$P = R(I_d^2 + I_q^2) = R \left( 1056.3 \frac{\omega^2}{625R^2 + 4\omega^2} \right)$$

Înlocuind în ecuațiile mișcării și ale energiei aceste valori ale lui  $-I_q-$  și  $I_d^2 + I_q^2$  se obțin ecuațiile diferențiale simplificate.

$$\begin{cases} J \frac{d\omega}{dt} = \left( -812.5\omega \frac{R}{625R^2 + 4\omega^2} \right) 1.3 + \left( -\frac{10}{314} \omega + 20 \left( 1 + \frac{2 \sin 0.3t}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} \\ \frac{dW}{dt} = R \left( 1056.3 \frac{\omega^2}{625R^2 + 4\omega^2} \right) \\ \omega(0) = 314 \\ W(0) = 0 \end{cases}$$

**CAZUL1.1:**  $V=5[\text{m/s}]$

**STATIC**

La o viteză a vântului dată, de exemplu  $V=5[\text{m/s}]$ , funcționarea în punctul de putere maximă al **TVN** este caracterizată de mărimile de bază, (rezistența de sarcină, curenți, turații), obținute din sistemul următor.

**Punctul stabil**

$$\left\{ \begin{array}{l} V = 5 \\ -RI_d = -\omega 0.08 I_q \\ -RI_q = \omega 0.08 I_d + \omega \Psi_{MP} \\ -\left( -\frac{10}{314} \omega + 20 \left( \frac{V}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} = \Psi_{MP} I_q \\ \omega = 314 \left( \frac{V}{5} \right)^{1.5} \\ \Psi_{MP} = 1.3 \\ M_G = \Psi_{MP} I_q \end{array} \right.$$

Soluții sistemului sunt:

$$I_q = -0.48 [A], M_G = -0.63 [N \cdot m], \omega = 314 [rad / s],$$

$$\Psi_{MP} = 1.3 [Wb], I_d = -16.2 [A], R = 0.75 [\Omega]$$

$$\text{și } I_q = -0.48 [A], M_G = -0.63 [N \cdot m], \omega = 314 [rad / s],$$

$$\Psi_{MP} = 1.3 [Wb], I_d = -0.014 [A], R = 832.38 [\Omega]$$

Funcționarea stabilă are loc în punctul  $P_2$  la  $R_{sarcină} = 382 [\Omega]$ , așa cum s-a demonstrat la modelul matematic al **GSMP**.

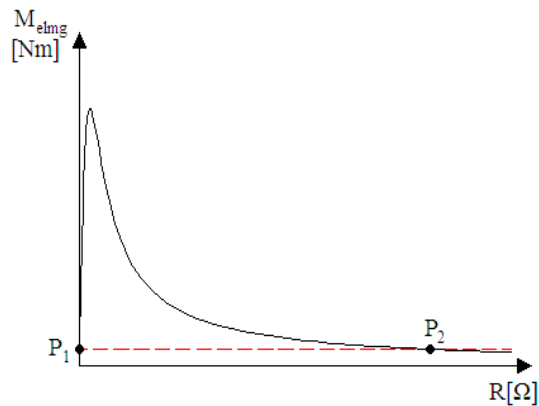


Fig.4.128. Dependența cuplului de R

### DINAMIC

1)  $V=5[m/s]$  și diverse valori pentru  $-R-$

Din sistemul :

$$\left\{ \begin{array}{l} 5 \frac{d\omega}{dt} = \left( -812.5\omega \frac{842.38}{625 \cdot 842.38^2 + 4\omega^2} \right) 1.3 + \left( -\frac{10}{314} \omega + 20 \right) \frac{20}{314} \\ \frac{dW}{dt} = 842.38 \left( 1056.3 \frac{\omega^2}{625 \cdot 842.38^2 + 4\omega^2} \right) \\ \omega(0) = 314 \\ W(0) = 0 \end{array} \right.$$

$$t=555555[s]=64.3[\text{zile}]$$

Se obțin valorile:

$$1) R = 533.38[\Omega], \omega(555555) = 245.32[\text{rad} / \text{s}], W(555555) = 1.0581 \times 10^9 [\text{J}]$$

$$2) R = 543.38[\Omega], W(555555) = 1.0623 \times 10^9 [\text{J}]$$

$$3) R = 743.38[\Omega], W(555555) = 1.1077 \times 10^9 [\text{J}]$$

$$4) R = 822.38[\Omega], \omega(555555) = 312.1[\text{rad} / \text{s}], W(555555) = 1.1111 \times 10^9 [\text{J}]$$

$$5) R = 832.38[\Omega], \omega(555555) = 314[\text{rad} / \text{s}], W(555555) = 1.1112 \times 10^9 [\text{J}]$$

$$6) R = 842.38[\Omega], \omega(555555) = 315.87[\text{rad} / \text{s}], W(555555) = 1.1111 \times 10^9 [\text{J}]$$

**CAZUL1.2:** Pentru:  $V = 5 + 2 \sin 0.3t$

**DINAMIC**

2)  $R = 832.38 [\Omega]$ , din sistemul:

$$\left\{ \begin{array}{l} 5 \frac{d\omega}{dt} = \left( -812.5\omega \frac{832.38}{625 \cdot 832.38^2 + 4\omega^2} \right) 1.3 + \left( -\frac{10}{314}\omega + 20 \left( 1 + \frac{2 \sin 0.3t}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} \\ \frac{dW}{dt} = 832.38 \left( 1056.3 \frac{\omega^2}{625 \cdot 832.38^2 + 4\omega^2} \right) \\ \omega(0) = 314 \\ W(0) = 0 \end{array} \right.$$

se obțin valorile:

$$a) R = 832.38[\Omega], \omega(5555) = 323.34[\text{rad} / \text{s}], W(5555) = 1.165 \times 10^6 [\text{J}], \\ V = 5 + 2 \sin 0.3t$$

$$b) R = 832.38[\Omega], \omega(5555) = 314[\text{rad} / \text{s}], W(5555) = 1.111 \times 10^6 [\text{J}], V = 5$$

**Timpul maxim observabil : 5555s**

$$a) R = 831[\Omega], \omega(5555) = 323.08[\text{rad} / \text{s}], W(5555) = 1.1654 \times 10^6 [\text{J}],$$

$$b) R = 931[\Omega], \omega(5555) = 341.14[\text{rad} / \text{s}], W(5555) = 1.1334 \times 10^6 [\text{J}],$$

$$c) R = 531[\Omega], \omega(5555) = 252.2[\text{rad} / \text{s}], W(5555) = 1.2235 \times 10^6 [\text{J}],$$

$$d) R = 231[\Omega], \omega(5555) = 140.66[\text{rad} / \text{s}], W(5555) = 1.0536 \times 10^6 [\text{J}],$$

$$e) R = 31[\Omega], \omega(5555) = 23.249[\text{rad} / \text{s}], W(5555) = 4.3881 \times 10^5 [\text{J}],$$

**CAZUL1.3:** Pentru  $V = 5 + 4 \sin 0.3t$

**DINAMIC**

2)  $R = 832.38 [\Omega]$ , din sistemul:

$$\left\{ \begin{array}{l} 5 \frac{d\omega}{dt} = \left( -812.5\omega \frac{832.38}{625 \cdot 832.38^2 + 4\omega^2} \right) 1.3 + \left( -\frac{10}{314}\omega + 20 \left( 1 + \frac{4 \sin 0.3t}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} \\ \frac{dW}{dt} = 832.38 \left( 1056.3 \frac{\omega^2}{625 \cdot 832.38^2 + 4\omega^2} \right) \\ \omega(0) = 314 \\ W(0) = 0 \end{array} \right.$$

Se obțin valorile:

- a)**  $R = 832.38[\Omega]$ ,  $\omega(5555) = 352.55[\text{rad} / \text{s}]$ ,  $W(5555) = 1.3399 \times 10^6[\text{J}]$ ,  
 $V = 5 + 4 \sin 0.3t$
- b)**  $R = 832.38[\Omega]$ ,  $\omega(5555) = 323.34[\text{rad} / \text{s}]$ ,  $W(5555) = 1.165 \times 10^6[\text{J}]$ ,  
 $V = 5 + 2 \sin 0.3t$
- c)**  $R = 832.38[\Omega]$ ,  $\omega(5555) = 314[\text{rad} / \text{s}]$ ,  $W(5555) = 1.111 \times 10^6[\text{J}]$ ,  $V = 5$
- d)**  $\omega(5555) = 314[\text{rad} / \text{s}]$ ,  $W(5555) = 1.111 \times 10^6[\text{J}]$ ,  $V = 5$

**PRECIZĂRI:**

**1.** Estimările energiei pentru un interval de timp de 5555[s] **NU** sunt concludente deoarece:

a) energia  $W(5555)$  - provine din energia vântului și din energia maselor în mișcare de rotație, așa cum se poate observa și din scăderea lui  $\omega$  ;

b) la intervale de timp mici, (ca cel anterior precizat), tendința este ca rezistența de sarcină  $R$  să scadă sub valoarea determinată **STATIC** la  $V_{\text{mediu}}$ , (la  $V=5[\text{m/s}]$ ,  $R_{\text{STATIC}}=832.38[\Omega]$ ;  $R < R_{\text{STATIC}}$ );

**2** Estimările energiei pentru intervale mari de timp:  $t=555555[\text{s}]=1543[\text{h}]=64[\text{zile}]$ , sunt posibile doar la  $V=ct$  ;

**3.** La viteze ale vântului variabile estimările energiei se pot face doar **pentru un timp**  $t=5555[\text{s}]$  **și deci nu sunt concludente**. Calculele ar trebui **refăcute** la -t- de ordinul zilelor.

**4.5.2. Ponderea înfășurărilor de amortizare**

Se analizează, în continuare, la  $V=5[\text{m/s}]$  -,două regimuri tranzitorii:

**1)** modificarea lui  $R$  și

**2)** modificarea cuplului,

cu și fără înfășurări de amortizare.

**1) Modificarea bruscă a sarcinii(R).**

**a)** În cazul **GSMP cu înfășurări de amortizare**, sarcina -R- de la bornele generatorului se modifică brusc de la  $R_i=826.977[\Omega]$  la  $R_f=226.977[\Omega]$  inițial

**Ponderea înfășurării de amortizare la ,modificarea lui -R-**

$$\begin{cases} -826.977I_d = 1.6I_d + 0.07 \frac{dI_d}{dt} - \omega 0.08I_q \\ -826.97I_q = \omega 0.07I_d + 1.6I_q + 0.08 \frac{dI_q}{dt} + \omega 1.3 \\ 0 = -0.01I_dI_q + I_q 1.3 + \left( -\frac{10}{314} \omega + 20 \right) \frac{20}{314} \\ \left\{ \omega = 313.24, I_q = -0.49108, I_d = -1.4852 \times 10^{-2} \right\} \end{cases}$$

$$\text{Final} \quad \begin{cases} -226.977I_d = 1.6I_d + 0.07 \frac{dI_d}{dt} - \omega 0.08I_q \\ -226.97I_q = \omega 0.07I_d + 1.6I_q + 0.08 \frac{dI_q}{dt} + \omega 1.3 \\ 0 = -0.01I_dI_q + I_q 1.3 + \left( -\frac{10}{314} \omega + 20 \right) \frac{20}{314} \end{cases}$$

$$\{I_d = -0.03641, \omega = 135.38, I_q = -0.76846\}$$

Sistemul de ecuații diferențiale ce modelează **GSMP**, în cazul modificării bruște a rezistenței de sarcină **R**, este prezentat în continuare.

$$\left\{ \begin{array}{l} -226.977I_d = 1.6I_d + 0.07 \frac{dI_d}{dt} - \omega 0.08I_q + 0.05 \frac{dI_D}{dt} - \omega 0.053I_Q \\ -226.977I_q = \omega 0.07I_d + 1.6I_q + 0.08 \frac{dI_q}{dt} + \omega 1.3 + \omega 0.05I_D + 0.053 \frac{dI_Q}{dt} \\ 0 = 0.05 \frac{dI_d}{dt} + 7.95I_D + 0.07 \frac{dI_D}{dt} \\ 0 = 0.053 \frac{dI_q}{dt} + 30.22I_Q + 0.25 \frac{dI_Q}{dt} \\ 5 \frac{d\omega}{dt} = -0.01I_dI_q + I_q 1.3 - 0.053I_dI_Q + 0.05I_qI_D + \left( -\frac{10}{314} \omega + 20 \right) \frac{20}{314} \\ I_d(0) = -1.4852 \times 10^{-2} \\ I_q(0) = -0.49108 \\ I_Q(0) = 0 \\ I_D(0) = 0 \\ \omega(0) = 313.24 \end{array} \right.$$

$$I_d(2.6) = -0.19223, I_q(2.6) = -1.7582, \omega(2.6) = 312.38$$

#### Curenții din înfășurările de amortizare

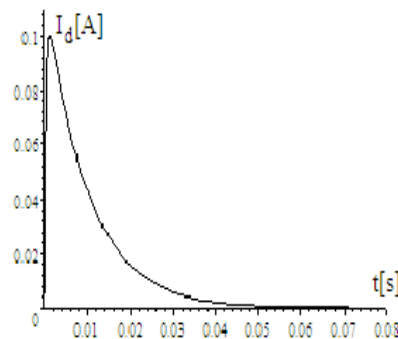


Fig.4.129. Variația în timp a lui  $I_d$

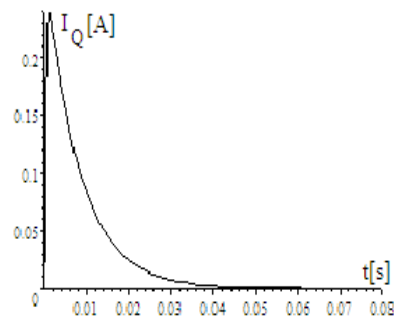


Fig.4.130. Variația în timp a lui  $I_q$



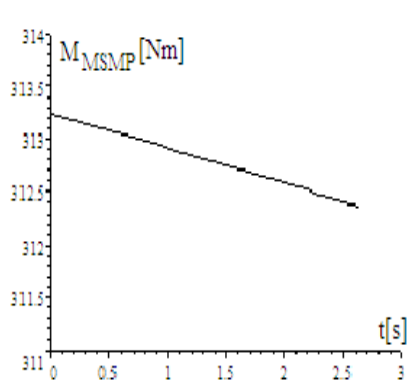


Fig.4.131. Variația în timp a lui  $\omega$

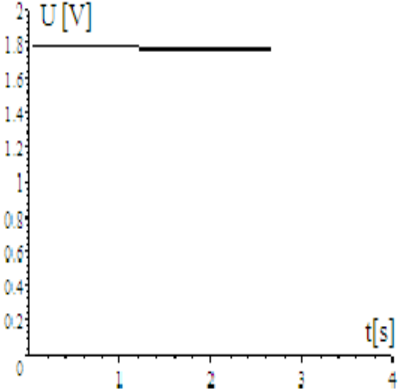


Fig.4.132. Variația în timp a curentului statoric

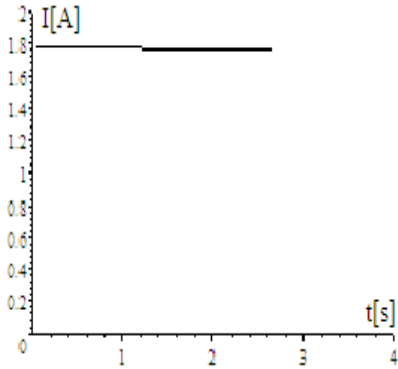


Fig.4.133. Variația în timp a lui  $\sqrt{I_d^2 + I_q^2}$

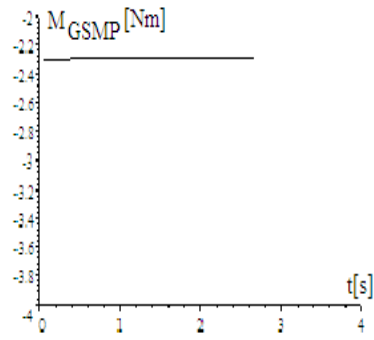


Fig.4.134. Variația în timp a cuplului  $M_{GSMP}$

$$M_{GSMP} = -0.01I_d I_q + I_q 1.3 - 0.053I_d I_Q + 0.05I_q I_D$$

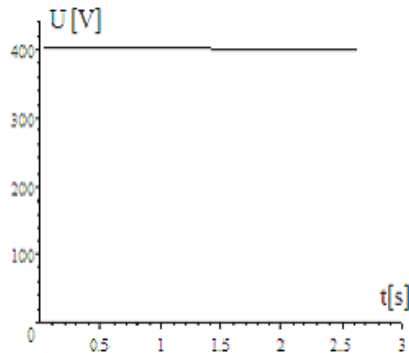


Fig.4.135. Variația tensiunii U în timp

$$\sqrt{(226.977I_d)^2 + (226.977I_q)^2} = U$$

**Modelul fără înfășurări de amortizare**

b) La modelul **fără înfășurări de amortizare** sistemul de ecuații diferențiale este format doar din 3 ecuații de bază.

$$\left\{ \begin{array}{l} -226.977I_d = 1.6I_d + 0.07 \frac{dI_d}{dt} - \omega 0.08I_q \\ -226.97I_q = \omega 0.07I_d + 1.6I_q + 0.08 \frac{dI_q}{dt} + \omega 1.3 \\ 5 \frac{d\omega}{dt} = -0.01I_dI_q + I_q 1.3 + \left( -\frac{10}{314} \omega + 20 \right) \frac{20}{314} \\ I_d(0) = -1.4852 \times 10^{-2} \\ I_q(0) = -0.49108 \\ \omega(0) = 313.24 \end{array} \right.$$

$$I_d(2.6) = -0.19223, I_q(2.6) = -1.7582, \omega(2.6) = 312.38$$

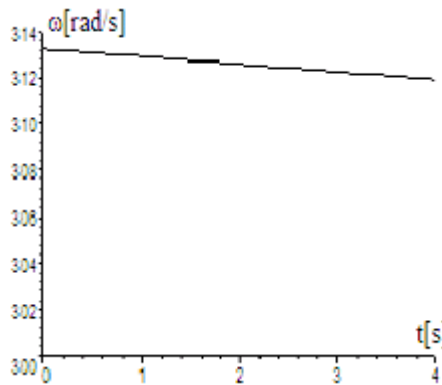


Fig.4.136. Variația în timp a lui  $\omega$

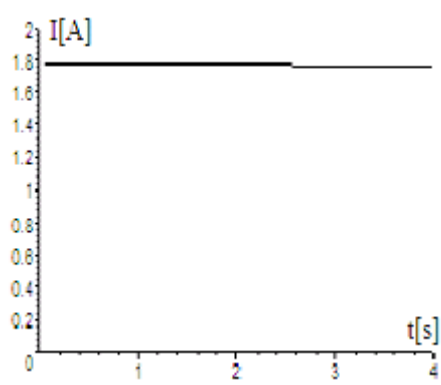


Fig.4.137. Variația în timp a curentului

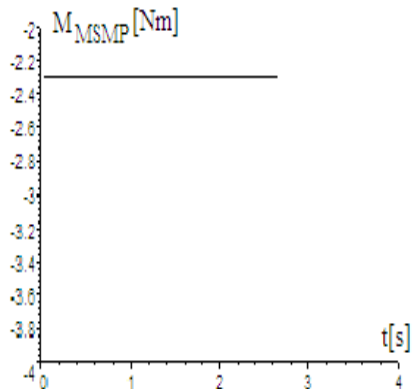


Fig.4.138. Variația în timp a cuplului  $M_{GSMP}$

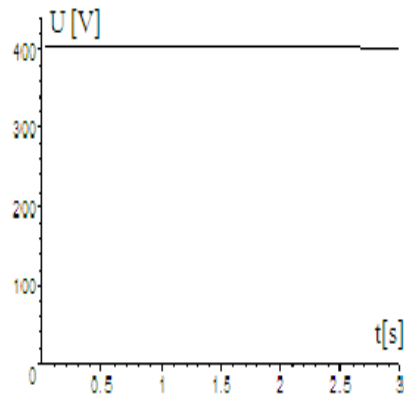


Fig.4.139. Variația în timp a tensiunii

$$M_{GSMP} = -0.01I_dI_q + I_q 1.3 - 0.053I_dI_q + 0.05I_qI_D$$

$$U = \sqrt{(226.977I_d)^2 + (226.977I_q)^2}$$

**a) În cazul GSMP cu înfășurări de amortizare**

$$I_d(2.6) = -0.19223, I_q(2.6) = -1.7582, \omega(2.6) = 312.38$$

**Studiul comparativ privind înfășurarea de amortizare**

**b) La modelul fără înfășurări de amortizare**

$$I_d(2.6) = -0.19223, I_q(2.6) = -1.7583, \omega(2.6) = 312.38$$

Din rezultatele de mai sus se observă că după un timp  $t=2.6[s]$  diferența între cele 2 modele (cu înfășurări de amortizare și fără înfășurări de amortizare) este:

- la  $I_d$  - nicio diferență;
- la  $I_q$  - a patra zecimală;
- la  $\omega$  - nicio diferență.

Prin urmare, se poate modela **GS** doar prin 3 ecuații fundamentale :

- două pentru înfășurarea statorică după cele 2 axe -d- și -q-;
- una pentru înfășurarea de excitație.

Din suprapunerea variațiilor în timp a principalelor mărimi:

- $\omega$ - viteza unghiulară mecanică iar  $\sqrt{I_d^2 + I_q^2}$  curentul statoric;

$$-0.01I_dI_q + I_q1.3 - 0.053I_dI_Q + 0.05I_qI_D \text{ cuplul GSMP};$$

$$\text{și } \sqrt{(RI_d)^2 + (RI_q)^2} \text{ tensiunea statorică};$$

se observă că înfășurările de amortizare au o pondere foarte redusă în evoluția principalelor mărimi mai sus precizate.

**2) Modificarea bruscă a cuplului motor**

**a) În cazul GSMP cu înfășurări de amortizare**, cuplul motor se modifică brusc de la  $M_{TVN} = 0.63848 [Nm]$  la  $M_{TVN} = 5.63848 [Nm]$ .

Sistemul de ecuații diferențiale ce modelează **GSMP**, în cazul modificării bruște a cuplului motor, este dat în continuare.

$$\left\{ \begin{array}{l} -826.977I_d = 1.6I_d + 0.07 \frac{dI_d}{dt} - \omega 0.08I_q + 0.05 \frac{dI_D}{dt} - \omega 0.053I_Q \\ -826.977I_q = \omega 0.07I_d + 1.6I_q + 0.08 \frac{dI_q}{dt} + \omega 1.3 + \omega 0.05I_D + 0.053 \frac{dI_Q}{dt} \\ 0 = 0.05 \frac{dI_d}{dt} + 7.95I_D + 0.07 \frac{dI_D}{dt} \\ 0 = 0.053 \frac{dI_q}{dt} + 30.22I_Q + 0.25 \frac{dI_Q}{dt} \\ 5 \frac{d\omega}{dt} = -0.01I_dI_q + I_q1.3 - 0.053I_dI_Q + 0.05I_qI_D + 5.63848 \\ I_d(0) = -1.4852 \times 10^{-2} \\ I_q(0) = -0.49108 \\ I_Q(0) = 0 \\ I_D(0) = 0 \\ \omega(0) = 313.24 \end{array} \right.$$

$$I_d(0.7) = -1.4918 \times 10^{-2}, I_q(0.7) = -0.49216, \omega(0.7) = 313.94$$

**Comportarea modelului la modificarea cuplului**

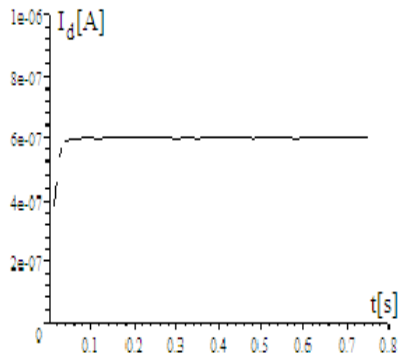


Fig.4.140. Variația în timp a lui  $I_d$

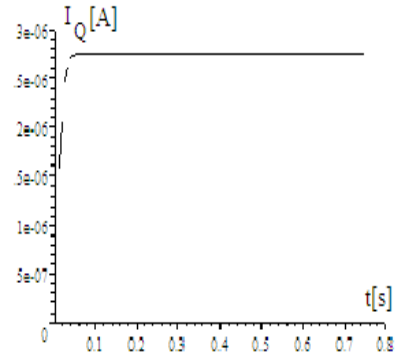


Fig.4.141. Variația în timp a lui  $I_q$

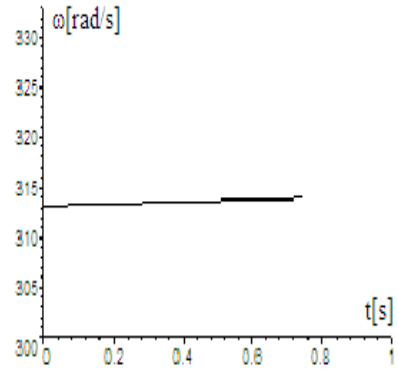


Fig.4.142. Variația în timp a lui  $\omega$   
 $\omega(0.75) = 313.99$

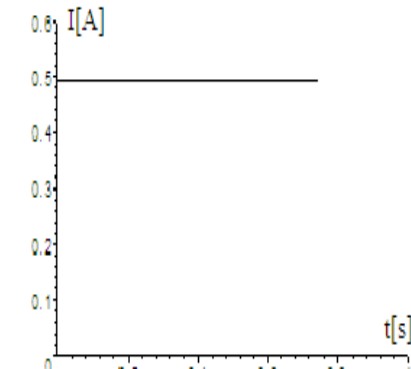


Fig.4.143. Variația în timp a curentului  $I$

$$\sqrt{I_d^2(0.75) + I_q^2(0.75)} = 0.49247$$

**Cu înfășurări de amortizare**

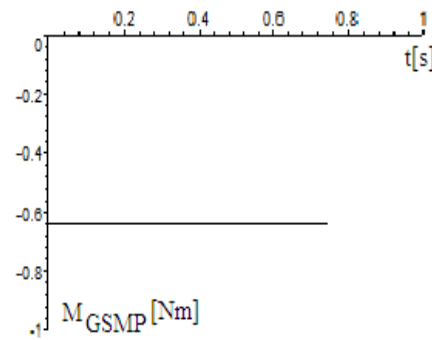


Fig.4.144. Variația în timp a cuplului  $M_{GSMP}$

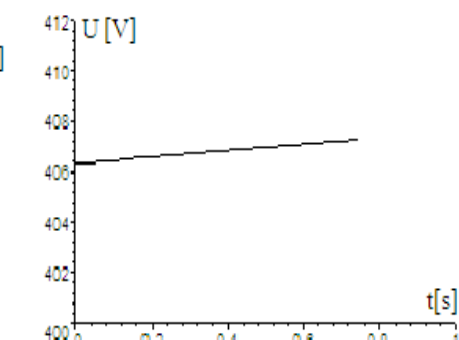


Fig.4.145. Variația în timp a tensiunii

$$M_{GSMP} = -0.01I_d I_q + I_q 1.3 - 0.053I_d I_Q + 0.05I_q I_D$$

$$U = \sqrt{(826.977I_d)^2 + (826.977I_q)^2}$$

b) La modelul **fără înfășurări de amortizare** sistemul de ecuații diferențiale este format doar din 3 ecuații de bază.

$$\left\{ \begin{array}{l} -826.977I_d = 1.6I_d + 0.07 \frac{dI_d}{dt} - \omega 0.08I_q \\ -826.977I_q = \omega 0.07I_d + 1.6I_q + 0.08 \frac{dI_q}{dt} + \omega 1.3 \\ 5 \frac{d\omega}{dt} = -0.01I_d I_q + I_q 1.3 + 5.63848 \\ I_d(0) = -1.4852 \times 10^{-2} \\ I_q(0) = -0.49108 \\ \omega(0) = 313.24 \end{array} \right.$$

$$I_d(0.7) = -1.4918 \times 10^{-2}, I_q(0.7) = -0.49216, \omega(0.7) = 313.94$$

$$\omega(1.5) = 314.7 [rad / s] \text{ și } \omega(0.75) = 313.99 [rad / s]$$

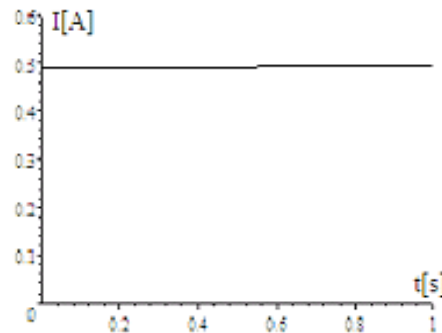
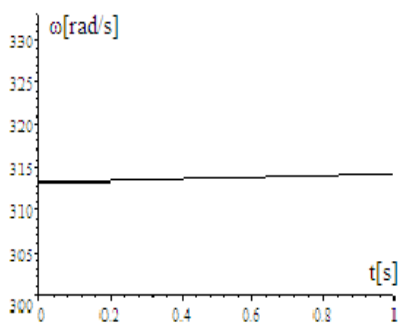


Fig.4.146. Variația în timp a lui  $\omega$  Fig.4.147. Variația în timp a lui  $\sqrt{I_d^2 + I_q^2}$

**Fără înfășurări de amortizare**

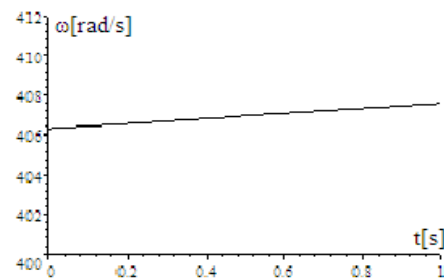
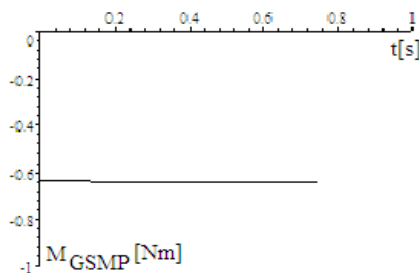


Fig.4.148. Variația în timp a cuplului  $M_{GSMP}$  Fig.4.149. Variația în timp a lui  $\omega$

$$M_{GSMP} = -0.01I_d I_q + I_q 1.3 - 0.053I_d I_Q + 0.05I_q I_D$$

$$\sqrt{(826.977I_d)^2 + (826.977I_q)^2}$$

**a) În cazul GSMP cu înfășurări de amortizare**

$$I_d(0.7) = -1.4918 \times 10^{-2}, I_q(0.7) = -0.49216, \omega(0.7) = 313.94$$

**b) La modelul fără înfășurări de amortizare**

$$I_d(0.7) = -1.4918 \times 10^{-2}, I_q(0.7) = -0.49216, \omega(0.7) = 313.94$$

Din rezultatele de mai sus se observă că după un timp  $t=0.7[s]$  nu există nici o diferență la principalele mărimi:

- curenții  $I_d$  și  $I_q$  și
- viteza unghiulară  $\omega$ .

Din suprapunerea variațiilor în timp a principalelor mărimi:

$\omega$  - viteza unghiulară mecanică;

$\sqrt{I_d^2 + I_q^2}$  - curentul statoric;

$(-0.01I_dI_q + I_q1.3 - 0.053I_dI_Q + 0.05I_qI_D)$  - cuplul **GSMP**;

$\sqrt{(RI_d)^2 + (RI_q)^2}$  - tensiunea statorică;

se observă că înfășurările de amortizare au o pondere foarte redusă în evoluția principalelor mărimi mai sus precizate.

## CONCLUZII

### A. Probleme matematice

1. Ponderea înfășurărilor de amortizare este redusă și deci ecuațiile respective pot fi eliminate.

2. Influența termenilor  $L \frac{dI}{dt}$  în ecuațiile statorice este în jurul a 20%, dar pentru a observa sistemul pe o perioadă mai lungă de timp se pot neglija.

3. Intervalul de timp trebuie să fie foarte mare, la analiza dependenței sarcinii de viteza vântului, altfel energia obținută este într-o proporție mare din energia maselor în mișcare și astfel rezultatele optimizării rezistenței de sarcină sunt eronate.

4. **Intervalul de timp T de valoare  $t=5555[s]=1.5[ore]$ , la momentul de inerție J de valoare  $J = 5[kg \cdot m^2]$ , este insuficient** pentru a estima corect

valoarea optimă a rezistenței de sarcină și sunt necesare analize la  $T > 15[ore]$ ;

5. Acordarea reguletoarelor necesită la fel intervale de timp mari.

### Probleme în estimarea corectă a evoluției fenomenului în timp

#### B. Probleme de program

În Scientific WorkPlace cu nucleul MAPLE, calculele se pot face chiar până la ordinul orelor și așa cum s-a demonstrat, în acest interval de timp sistemul nu se stabilizează. Pentru a extinde intervalul de timp observabil este necesar ori a face în continuare simplificări în modelul matematic, ori a schimba programul de calcul utilizat cu unul mai performant.

## 4.6. Concluzii

În sistemele electroenergetice de pe nave, analiza fenomenelor tranzitorii care apar în funcționarea subsistemului (**TVN+GSMP+AE**) este esențială. Această stabilitate în funcționare este determinată de variația vitezei vântului în timp și de sistemul de conducere și chiar în regim static punctele de funcționare pot să fie stabile sau instabile.

Contribuțiile personale cele mai importante din acest capitol sunt:

- deducerea dependenței rezistenței de sarcină de viteza vântului în regim static și dinamic;
- analiza fenomenelor tranzitorii la modificarea vitezei vântului;
- maximizarea energiei electrice în condițiile în care viteza vântului variază;
- calculul turației de referință astfel încât energia preluată de la vânt să fie maximă;
- analiza ponderii înfășurărilor de amortizare.

## 5. FENOMENE TRANZITORII ÎN SUBSISTEMUL (BS+DC-DC+AE)

Tematica capitolului 5 este axată în principal pe analiza sistemului electroenergetic **BS+DC+DC+AE**. Se iau în considerare modificările insolației în timpul zilei și deci în permanență punctele de putere maximă își schimbă coordonatele. În acest sens este necesară asigurarea unui sistem de conducere astfel încât sistemul să funcționeze în punctele de putere maximă. Procesele tranzitorii sunt mai lente față de cele eoliene, deoarece insolația nu se modifică așa de rapid precum viteza vântului. Pentru adaptarea tensiunii la bateria solară se folosește un convertor **DC-DC**. Acumulatorul electric e modelat prin elemente rezistive și capacitive, aceasta deoarece în curentul de încărcare al **AE** sunt o seamă de armonici care se închid prin elementele capacitive. Coordonatele punctului de putere maximă ( **$U^*$** -tensiune,  **$I^*$** -curent) sunt mărimi prescrise în sistemele de conducere și realizarea lor se face prin comanda tiristoarelor/tranzistoarelor din convertorul **DC-DC**.

Subsistemul solar (**BS+AE**) trebuie condus astfel încât să funcționeze la parametrii optimi.

Aceasta impune captarea maximă a energiei solare, subsistemul (**MD+GSMP**) fiind folosit doar ca sursă complementară de energie și funcționează doar când acumuloarele electrice **-AE-** sunt la capacitatea minimă admisă și nu pot satisface consumatorii electrici.

### 5.1. Conducerea subsistemului (BS+DC-DC+AE)

**Caracteristicile externe**  $U=f(I)$  ale bateriei solare se modifică în funcție de oră, de nebulozitatea din atmosferă și pot fi de forma celor din figura 5.1. [Teleke2009].

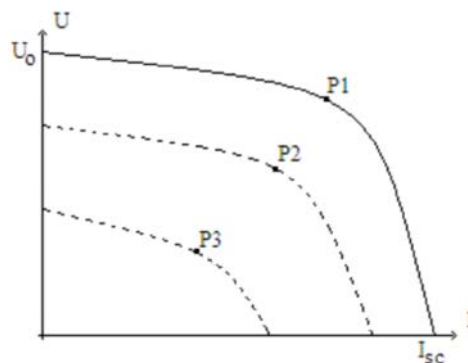


Fig.5.1 Caracteristici  $U=f(I)$  la BS

Caracteristica cu punctul de putere maximă  $P_1$  corespunde radiației solare



maxime:  $E_1 = 1 [kW/m^2]$

**Punctul de putere maximă**

Caracteristica cu punctul de putere maximă  $P_2$  corespunde radiației solare, de exemplu:  $E_2 = 0.8 [kW/m^2]$ , iar cea cu putere maximă  $P_3$  unei radiații solare  $E_3 = 0.6 [kW/m^2]$ . Cu modificarea curentului de sarcină  $I$  puterea obținută de la o baterie solară se modifică semnificativ, atingând o valoare maximală la curentul  $I^*$  ( $U^* I^* = P_{max}$ )

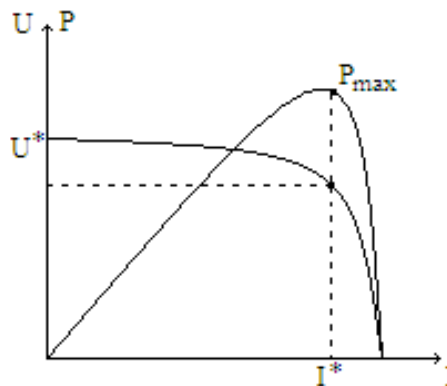


Fig.5.2. Caracteristicile bateriei

Conducerea subsistemului cu **BS** trebuie să realizeze mereu funcționarea la  $P_{max}$ , știind că această valoare se modifică în permanență în funcție de gradul de insolație (nori, ceață, poluare). Coordonatele punctului de putere maximă, (tensiune  $U^*$ , curent  $I^*$ ), depind de gradul de insolație.

**Punctul de putere maximă  $P_{max} = U^* I^*$**

Așadar, puterea primită de la Soare se modifică continuu și subsistemul (**BS + DC - DC + AE**) trebuie să fie astfel reglat încât să funcționeze în punctul de putere maximă.

Având în vedere faptul că **AE** și convertorul **DC-DC** au fost prezentate în capitolul 2, sunt estimate în continuare pierderile de putere datorate armonicilor curentului generat de convertorul **DC-DC**.

Cunoscând forma curentului generat de convertorul **DC-DC**, apar armonici, în principal de ordinele  $1 \div 7$  (celelalte sunt de o mie de ori mai mici).

Curentul se descompune în armonici sub forma [Qiao2009]:

$$i(t) = \frac{I_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} I_n \sin(n\omega t + \varphi) \quad (5.1)$$

unde:

$$I_0 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i(x) dx = \frac{1}{3.14} \int_0^4 \left( 2 + \frac{2(1 - e^{-0.1x})}{1 - e^{-0.4}} \right) dx +$$

$$+ \frac{1}{3.14} \int_4^{6.28} \left( \frac{2e^{-0.4} - 4e^{-0.628} + 2e^{-0.1x}}{e^{-0.4} - e^{-0.628}} \right) dx$$

$$I_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$$
(5.2)

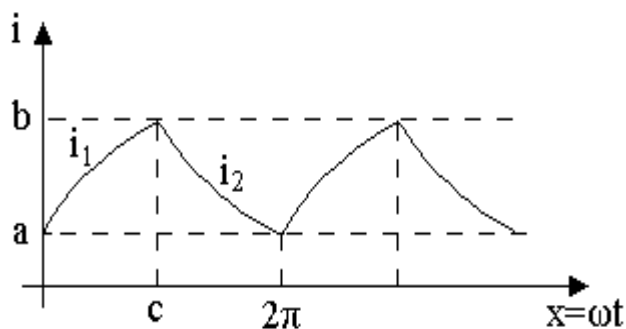


Fig.5.3. Variația curentului în timp

**Armonicile curentului sunt[Puttonen2001]:**

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i(x) \cos(nx) dx = \frac{1}{3.14} \int_0^C \left( a + \frac{(b-a)(1 - e^{-\beta x})}{1 - e^{-\beta c}} \right) \cos(nx) dx +$$

$$+ \frac{1}{3.14} \int_C^{6.28} \left( \frac{ae^{-\beta c} - be^{-\beta 6.28} + (b-a)e^{-\beta x}}{e^{-\beta c} - e^{-\beta 6.28}} \right) \cos(nx) dx$$
(5.3)

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i(x) \sin(nx) dx = \frac{1}{3.14} \int_0^C \left( a + \frac{(b-a)(1 - e^{-\beta x})}{1 - e^{-\beta c}} \right) \sin(nx) dx +$$

$$+ \frac{1}{3.14} \int_C^{6.28} \left( \frac{ae^{-\beta c} - be^{-\beta 6.28} + (b-a)e^{-\beta x}}{e^{-\beta c} - e^{-\beta 6.28}} \right) \sin(nx) dx$$
(5.4)

Schema electrică a subsistemului (**BS+DC-DC+AE**), pentru  $i_2(t)$  (curentul de sarcină) periodic, având variația dată anterior este prezentată în figura 5.4.

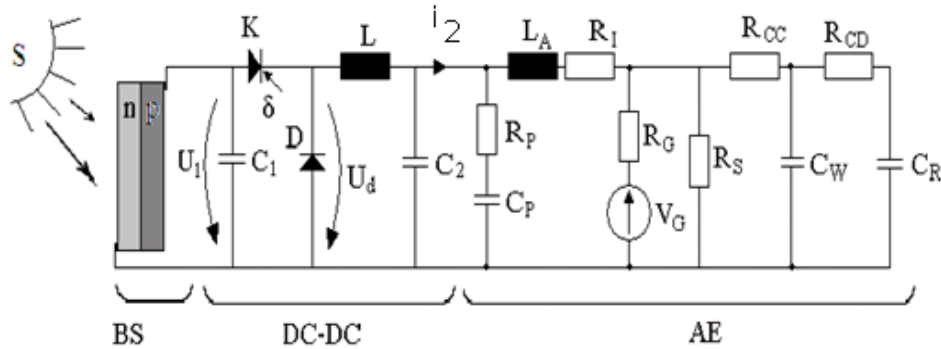


Fig.5.4. Schema electrică a subsistemului (BS+DC-DC+AE)

Pentru componenta continuă,  $\frac{I_0}{2} = 3[A]$ , schema electrică se simplifică și este redată în figura 5.5.

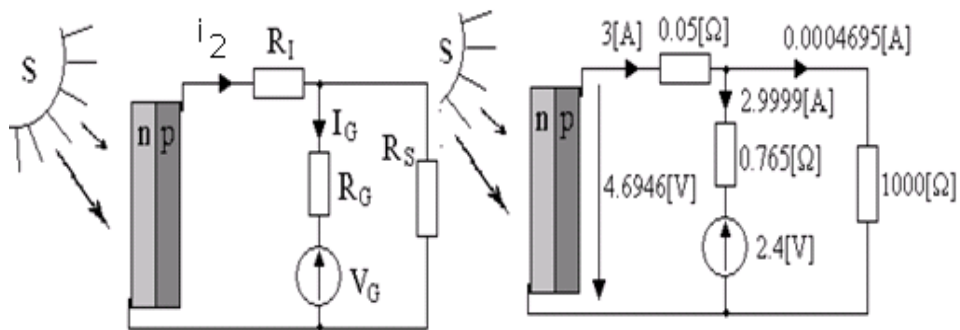


Fig.5.5. Schema electrică pentru componenta continuă

Puterea furnizată pe o suprafața de  $0,2m^2$  din (BS), pe componenta continuă este:

$$P_{BS} = U_{BS} \cdot I_0 = 4.6946 \cdot 3 = 14[W]$$

Valorile efective ale curenților armonicilor de ordinul  $1 \div 7$  se calculează din forma curentului  $i(t)$ , care descompus în serie dă valorile:

$$I_0 = \frac{1}{3.14} \int_0^4 \left( 2 + \frac{2(1 - e^{-0.1x})}{1 - e^{-0.4}} \right) dx +$$

$$+ \frac{1}{3.14} \int_4^{6.28} \left( \frac{2e^{-0.4} - 4e^{-0.628} + 2e^{-0.1x}}{e^{-0.4} - e^{-0.628}} \right) dx = 6.0571$$

$$a_1 = \frac{1}{3.14} \int_0^4 \left( 2 + \frac{2(1 - e^{-0.1x})}{1 - e^{-0.4}} \right) \cos x dx +$$

$$+ \frac{1}{3.14} \int_4^{6.28} \left( \frac{2e^{-0.4} - 4e^{-0.628} + 2e^{-0.1x}}{e^{-0.4} - e^{-0.628}} \right) \cos x dx = -0.75861$$

$$a_2 = \frac{1}{3.14} \int_0^4 \left( 2 + \frac{2(1 - e^{-0.1x})}{1 - e^{-0.4}} \right) \cos 2x dx +$$

$$+ \frac{1}{3.14} \int_4^{6.28} \left( \frac{2e^{-0.4} - 4e^{-0.628} + 2e^{-0.1x}}{e^{-0.4} - e^{-0.628}} \right) \cos 2x dx = -0.12280$$

$$a_3 = \frac{1}{3.14} \int_0^4 \left( 2 + \frac{2(1 - e^{-0.1x})}{1 - e^{-0.4}} \right) \cos 3x dx +$$

$$+ \frac{1}{3.14} \int_4^{6.28} \left( \frac{2e^{-0.4} - 4e^{-0.628} + 2e^{-0.1x}}{e^{-0.4} - e^{-0.628}} \right) \cos 3x dx = -1.0555 \times 10^{-2}$$

$$a_4 = \frac{1}{3.14} \int_0^4 \left( 2 + \frac{2(1 - e^{-0.1x})}{1 - e^{-0.4}} \right) \cos 4x dx +$$

$$+ \frac{1}{3.14} \int_4^{6.28} \left( \frac{2e^{-0.4} - 4e^{-0.628} + 2e^{-0.1x}}{e^{-0.4} - e^{-0.628}} \right) \cos 4x dx = -5.6258 \times 10^{-2}$$

$$a_5 = \frac{1}{3.14} \int_0^4 \left( 2 + \frac{2(1 - e^{-0.1x})}{1 - e^{-0.4}} \right) \cos 5x dx +$$

$$+ \frac{1}{3.14} \int_4^{6.28} \left( \frac{2e^{-0.4} - 4e^{-0.628} + 2e^{-0.1x}}{e^{-0.4} - e^{-0.628}} \right) \cos 5x dx = -1.2161 \times 10^{-2}$$

$$a_6 = \frac{1}{3.14} \int_0^4 \left( 2 + \frac{2(1 - e^{-0.1x})}{1 - e^{-0.4}} \right) \cos 6x dx +$$

$$+ \frac{1}{3.14} \int_4^{6.28} \left( \frac{2e^{-0.4} - 4e^{-0.628} + 2e^{-0.1x}}{e^{-0.4} - e^{-0.628}} \right) \cos 6x dx = -9.2771 \times 10^{-3}$$

$$a_7 = \frac{1}{3.14} \int_0^4 \left( 2 + \frac{2(1 - e^{-0.1x})}{1 - e^{-0.4}} \right) \cos 7x dx +$$

$$+ \frac{1}{3.14} \int_4^{6.28} \left( \frac{2e^{-0.4} - 4e^{-0.628} + 2e^{-0.1x}}{e^{-0.4} - e^{-0.628}} \right) \cos 7x dx = -1.9688 \times 10^{-2}$$

**Calculul armonicilor curentului**

$$b_1 = \frac{1}{3.14} \int_0^4 \left( 2 + \frac{2(1 - e^{-0.1x})}{1 - e^{-0.4}} \right) \sin x dx +$$

$$+ \frac{1}{3.14} \int_4^{6.28} \left( \frac{2e^{-0.4} - 4e^{-0.628} + 2e^{-0.1x}}{e^{-0.4} - e^{-0.628}} \right) \sin x dx = -0.25799$$

$$b_2 = \frac{1}{3.14} \int_0^4 \left( 2 + \frac{2(1 - e^{-0.1x})}{1 - e^{-0.4}} \right) \sin 2x dx + \\ + \frac{1}{3.14} \int_4^{6.28} \left( \frac{2e^{-0.4} - 4e^{-0.628} + 2e^{-0.1x}}{e^{-0.4} - e^{-0.628}} \right) \sin 2x dx = 0.11575$$

$$b_3 = \frac{1}{3.14} \int_0^4 \left( 2 + \frac{2(1 - e^{-0.1x})}{1 - e^{-0.4}} \right) \sin 3x dx + \\ + \frac{1}{3.14} \int_4^{6.28} \left( \frac{2e^{-0.4} - 4e^{-0.628} + 2e^{-0.1x}}{e^{-0.4} - e^{-0.628}} \right) \sin 3x dx = -2.5789 \times 10^{-2}$$

$$b_4 = \frac{1}{3.14} \int_0^4 \left( 2 + \frac{2(1 - e^{-0.1x})}{1 - e^{-0.4}} \right) \sin 4x dx + \\ + \frac{1}{3.14} \int_4^{6.28} \left( \frac{2e^{-0.4} - 4e^{-0.628} + 2e^{-0.1x}}{e^{-0.4} - e^{-0.628}} \right) \sin 4x dx = -6.3852 \times 10^{-3}$$

$$b_5 = \frac{1}{3.14} \int_0^4 \left( 2 + \frac{2(1 - e^{-0.1x})}{1 - e^{-0.4}} \right) \sin 5x dx + \\ + \frac{1}{3.14} \int_4^{6.28} \left( \frac{2e^{-0.4} - 4e^{-0.628} + 2e^{-0.1x}}{e^{-0.4} - e^{-0.628}} \right) \sin 5x dx = 1.6515 \times 10^{-2}$$

$$b_6 = \frac{1}{3.14} \int_0^4 \left( 2 + \frac{2(1 - e^{-0.1x})}{1 - e^{-0.4}} \right) \sin 6x dx + \\ + \frac{1}{3.14} \int_4^{6.28} \left( \frac{2e^{-0.4} - 4e^{-0.628} + 2e^{-0.1x}}{e^{-0.4} - e^{-0.628}} \right) \sin 6x dx = -1.0844 \times 10^{-2}$$

$$b_7 = \frac{1}{3.14} \int_0^4 \left( 2 + \frac{2(1 - e^{-0.1x})}{1 - e^{-0.4}} \right) \sin 7x dx + \\ + \frac{1}{3.14} \int_4^{6.28} \left( \frac{2e^{-0.4} - 4e^{-0.628} + 2e^{-0.1x}}{e^{-0.4} - e^{-0.628}} \right) \sin 7x dx = 2.8313 \times 10^{-3}$$

Valorile efective ale curenților se calculează cu relația[Puttonen2001]:

$$I_n = \frac{\sqrt{a_n^2 + b_n^2}}{\sqrt{2}} \quad (5.5)$$

și se obțin:

$$I_1 = \frac{\sqrt{a_1^2 + b_1^2}}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{0.75861^2 + 0.25799^2}}{\sqrt{2}} = 0.56828$$

$$I_2 = \frac{\sqrt{a_2^2 + b_2^2}}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{0.1228^2 + 0.11575^2}}{\sqrt{2}} = 0.11968$$

$$I_3 = \frac{\sqrt{a_3^2 + b_3^2}}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{1.0555^2 + 2.5789^2} \times 10^{-2}}{\sqrt{2}} = 1.9762 \times 10^{-2}$$

$$I_4 = \frac{\sqrt{a_4^2 + b_4^2}}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{5.6258^2 + 0.63852^2} \times 10^{-2}}{\sqrt{2}} = 4.0155 \times 10^{-2}$$

$$I_5 = \frac{\sqrt{a_5^2 + b_5^2}}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{1.2161^2 + 1.6515^2} \times 10^{-2}}{\sqrt{2}} = 1.4545 \times 10^{-2}$$

$$I_6 = \frac{\sqrt{a_6^2 + b_6^2}}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{0.92771^2 + 1.0844^2} \times 10^{-2}}{\sqrt{2}} = 1.0121 \times 10^{-2}$$

$$I_7 = \frac{\sqrt{a_7^2 + b_7^2}}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{1.9688^2 + 0.28313^2} \times 10^{-2}}{\sqrt{2}} = 1.417 \times 10^{-2}$$

Schema electrică a **AE** cu datele parametrilor precizați în capitolul 3, este:

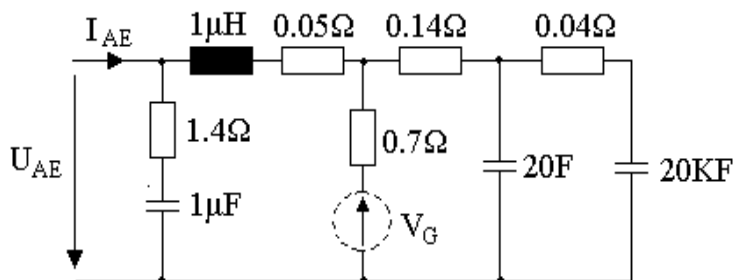


Fig.5.6. Schema electrică pentru încărcarea AE

#### Schema simplificată

Cu unele mici simplificări, impedanța de regim armonic a **-AE-** este:

$$\underline{Z}_{AE} = R_{AE} + j\omega L_{AE} = 0.17 + j \cdot 0.97 \frac{\omega}{10^6} \quad (5.6)$$

Pierderile de putere, având în vedere armonicile  $1 \div 7$ , sunt:

$$P_{1 \div 7} = 0.17(I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_7^2) = 0.0577 [W]$$

și reprezintă 0,4% din puterea utilă  $P_U = 14 [W]$ , deci o valoare acceptabilă.

**Observație:** Impedanța de regim tranzitoriu  $\underline{Z}_{AE}$ , a acumulatorului electric **AE**, se poate determina experimental foarte simplu, printr-o probă în regim sinusoidal ( $\omega = 2\pi f$ ), la frecvența  $f$ , (indicat ar fi  $f \cong 1 [kHz]$ ) și prin măsurarea puterii active **P<sub>AE</sub>** și a curentului **I<sub>AE</sub>**, rezultă :

$$R_{AE} = \frac{P_{AE}}{I_{AE}^2} \quad (5.7)$$

**În concluzie** folosirea unui convertor **DC-DC** între bateria solară **BS** și acumulatorii electrice **AE**, deși introduce armonici, este eficientă prin faptul că asigură funcționarea în punctele de putere maximă, indiferent de condițiile meteo.

Inductanța **L** a convertorului **DC-DC** se calculează cu relația 3.71 (capitolul 3, pagina 69):

$$L = T \left(1 - \frac{U_2}{U_1}\right) \frac{U_2}{2I_2} = 10^{-3} \left(1 - \frac{144}{200}\right) \frac{144}{2} = 0.02 \text{ [H]}$$

Valoarea inductanței **L** impune timpul de răspuns pentru subsistemul **(BS+DC-DC+AE)**.

## 5.2. Analiza fenomenelor tranzitorii în subsistemului (BS+DC-DC+AE) la modificarea insolației

Radiația solară modificându-se, se schimbă și caracteristica externă  $U = f(I)$  a **BS**.

Se analizează, în continuare, dinamica subsistemului **(BS+DC-DC+AE)** la modificarea nivelului de insolație de la  $E_1 = 1 \text{ [kW/m}^2\text{]}$  în punctul **P<sub>1</sub>**, la cer senin, la  $E_2 = 0.8 \text{ [kW/m}^2\text{]}$  în punctul **P<sub>2</sub>**, la cer seminoros.

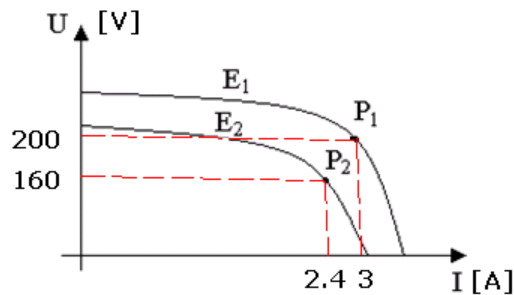


Fig.5.7. Caracteristicile externe la BS

În punctul de funcționare la putere maximă, **P<sub>1</sub>**, valorile tensiunii și curentului sunt:  $U_1=200\text{[V]}$  și  $I_1=3\text{[A]}$

### Coordonatele punctului de putere maximă

La bateria de acumulare **-AE-** tensiunea fiind:

$$U_{AE} = 144 \text{ [V]}$$

rezultă un curent, la cer senin, în acumulator, de valoare:

$$I_{AE1} = \frac{U_1 I_1}{U_{AE}} = 4.1667 \text{ [A]}$$

În punctul de putere maximă, **P<sub>2</sub>**, specific nivelului de insolație  $E_2 = 0.8 \text{ [kW/m}^2\text{]}$  valorile tensiunii și curentului sunt:  $U_2=160\text{[V]}$  și  $I_2=2.4\text{[A]}$ .

Curentul prin **-AE-**, la cer seminoros are valoarea:

$$I_{AE2} = \frac{U_2 I_2}{U_{AE}} = 2.6667 \text{ [A]}$$

La modificări ale radiației solare trebuie schimbat și intervalul de conducție astfel:

$$T_C = T \frac{I_{AE2}}{I_{AE1}} = 10^{-3} \frac{2.6667}{4.1667} = 0.00064 \text{ [s]}$$

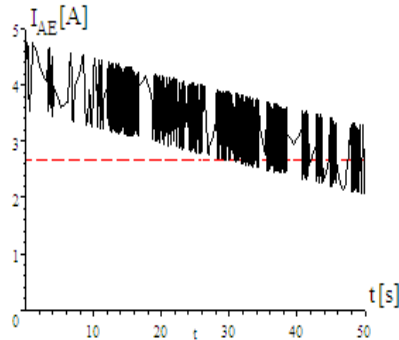
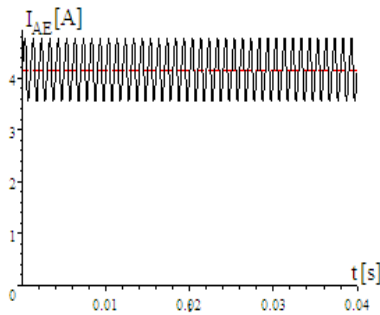
Pentru a trece din **P<sub>1</sub>** în **P<sub>2</sub>** într-un interval de timp, de exemplu **150 [s]**, pentru tensiunea **-U-**, dată de **-BS-**, se poate scrie :

$$U = 200 - 0.8t$$

Considerând pentru convertorul **DC-DC** o inductivitate de valoarea  $L_{DC-DC}=2.02[H]$  și perioada de conducție  $T_C= 0.00064 [s]$ , calculată anterior, și luând în calcul numai armonicile semnificative 1 și 2, rezultă  $I_1=0.56828 [A]$  și  $I_2=0.11968[A]$ , și variația curentului  $I_{AE}$  de forma:

$$I_{AE}(t) = 4.1667 - 0.03t + 0.56828 \sin 6280t - 0.11968 \sin(2 \cdot 6280t)$$

Variația în timp a acestui curent este dată în figurile 5.8 și 5.9.

Fig.5.8. Variația în timp a curentului  $I_{AE}$ Fig.5.9. Variația în timp a curentului  $I_{AE}$  -detaliu

Din simulările prezentate se observă variația în timp a curentului în **AE**, la modificarea gradului de insolație. Prin modificarea insolației se modifică puterea dată de **BS** și deci valoarea curentului de încărcare a **AE**.

Armonicile curentului prin **AE** au valori reduse, cele mai semnificative fiind armonicile 1 și 2.

Amplasarea **BS** pe navă se poate face într-un sistem fix, când se pierde 37% din energia radiantă, sau mobil, situație în care se obține maximum de energie, respectiv putere (aproximativ  $1kW/m^2$ ).

Dimensionarea bateriei de **AE** se face având în vedere suprafața disponibilă de amplasare pe navă a **BS**.

Cele două forme ale energiei: eoliene și solare se completează reciproc, în sensul că la o radiație solară maximă (cer senin), viteza vântului este în general redusă și invers: la viteze ale vântului ridicate și la insolație redusă (nori), energia semnificativă se obține de la vânt. În acest fel se poate obține energie pe toată perioada zilei: nocturn de la vânt și diurn de la Soare și/sau de la vânt.

### 5.3. Concluzii

Funcționarea sistemului **BS+DC+DC+AE** în punctul de putere maximă se poate realiza printr-o comandă potrivită a elementelor de comutație din convertorul **DC-DC**. Armonicile curentului prin **AE** au valori reduse, cele mai semnificative fiind armonicile 1 și 2.

Amplasarea **BS** pe navă se poate face într-un sistem fix, când se pierde 37% din energia radiantă, sau mobil, situație în care se obține maximum de energie, respectiv putere (aproximativ  $1kW/m^2$ ).

Dimensionarea bateriei de **AE** se face având în vedere suprafața disponibilă de amplasare pe navă a **BS**.



Cele două forme ale energiei: eoliene și solare se completează reciproc, în sensul că la o radiație solară maximă (cer senin), viteza vântului este în general redusă și invers: la viteze ale vântului ridicate și la insolație redusă (nori), energia semnificativă se obține de la vânt. În acest fel se poate obține energie pe toată perioada zilei: nocturn de la vânt și diurn de la Soare și/sau de la vânt.

Principalele contribuții aduse acestui capitol sunt:

- identificarea punctelor de putere maximă prin măsurarea momentană a insolației;
- analiza armonică a curentului debitat în **AE** pentru a se estima pierderile de putere suplimentare ce apar în acestea.

## 6. ANALIZA FENOMENELOR TRANZITORII ÎN SUBSISTEMUL MD+GSMP

În capitolul 6 se abordează subsistemul **MD+GSMP**, care completează energia necesară la consumatorii de pe navă astfel încât tensiunea și frecvența să fie mereu în limitele valorilor nominale.

Problemele esențiale ale acestui capitol se referă la acordarea reguletoarelor, deoarece sistemul analizat fiind neliniar nu se pot aplica criteriile cunoscute. Se analizează în acest capitol reguletoarele de tip P, PI, PID. Oscilațiile cunoscute care apar la reguletoarele folosite pot să scoată subsistemul din funcționare.

### 6.1. Analiza subsistemului (MD+GSMP+AE) la funcționarea MD în punctul de putere maximă

Generatorul sincron este de tipul **GSMP**, cu excitația dată de magneți permanenți **MP**.

Funcționarea **MD** în punctul de putere maximă  $P_{max}$  impune valoarea cuplului:

$$M_{MD} = 14.574 [N \cdot m] \text{ și a turației (pulsăției: } \omega = 252 [rad / s] \text{ )}$$

#### Datele MD și GSMP

##### MD:

Caracteristica nominală mecanică a **MD**

$$M_{MD} = -1.5 \cdot 10^{-3} \omega^2 + 0.7 \omega - 66.57$$

coordonatele punctului de putere maximă sunt:

$$M_{MD}^* = 14.6 [N \cdot m] , \omega^* = 252 [rad / s]$$

##### GSMP:

$L_d = 0.07 [H]$  - reactanța sincronă din axa d;  $L_q = 0.08 [H]$  - reactanța sincronă din axa q;  $\Psi_{MP} = 1.3 [Wb]$  - fluxul magnetului permanent.

Factorul de putere al **GSMP**:

$$\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (P\text{-putere activă; } Q\text{-putere reactivă}).$$

Cunoscând ecuațiile **GSMP** (capitolul III) :

$$\begin{cases} U_d = 1.6I_d - \omega 0.08I_q \\ U_q = 1.6I_q + \omega 0.07I_d + \Psi_{MP} , \\ M = -0.01I_qI_d + \Psi_{MP}I_q \end{cases}$$

și valorile pentru cuplul **MD**,  $M_{MD} = 14.574 [N \cdot m]$ , turația /pulsăția fiind  $\omega = 252 [rad / s]$ , se obține sistemul:

$$\begin{cases}
 U_d = 1.6I_d - \omega 0.08I_q \\
 U_q = 1.6I_q + \omega 0.07I_d + \omega \Psi_{MP} \\
 -14.574 = -0.01I_qI_d + \Psi_{MP}I_q \\
 U_d = -RI_d; \quad U_q = -RI_q \\
 P = U_dI_d + U_qI_q \\
 Q = -U_dI_q + U_qI_d \\
 \cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \\
 \omega = 252; \Psi_{MP} = 1.6 \\
 I_R = \frac{\sqrt{I_d^2 + I_q^2}}{\sqrt{3}}; U_R = \frac{\sqrt{U_d^2 + U_q^2}}{\sqrt{3}} \\
 \Psi_S^2 = (0.08I_q)^2 + (\Psi_{MP} + 0.07I_d)^2
 \end{cases} \quad (6.1)$$

Sistem, a cărui rezolvare ne conduce la două seturi de soluții; unul pentru zona de stabilitate statică, iar cel de al doilea pentru zona instabilă.

Pentru zona instabilă corespunzătoare punctului  $P_1$  se obțin următoarele soluții:  $Q = 0$  [VAR];  $\cos \varphi = 1$ ;  $\Psi_{MP} = 1.6$  [Wb];  $I_d = -18.825$  [A];

$I_q = -8.1499$  [A];  $I_R = 11.843$  [A];  $\Psi_S = 0.71047$  [Wb];  $U_q = 58.092$  [V];

$U_d = 134.18$  [V];  $R = 7.1289$  [ $\Omega$ ];  $U_R = 84.419$  [V];  $P = -2999.4$  [W].

Funcționarea stabilă are loc în punctul  $P_2$ , soluțiile sistemului pentru zona de stabilitate statică fiind următoarele:  $Q = 0$  [VAR];  $\cos \varphi = 1$ ;  $\Psi_{MP} = 1.6$  [Wb];

$I_d = -4.9912$  [A];  $I_q = -8.8332$  [A];  $I_R = 5.8577$  [A];  $\Psi_S = 1.4365$  [Wb];

$U_q = 301.02$  [V];  $U_d = 170.09$  [V];  $R = 34.079$  [ $\Omega$ ];  $U_R = 199.62$  [V];

$P = -3507.9$  [W]

Funcționarea stabilă are loc în punctul  $P_2$  la  $R_{\text{sarcină}} = 34.079$  [ $\Omega$ ], așa cum s-a demonstrat la modelul matematic al **GSMP**. Punctele de funcționare  $P_1$  și  $P_2$  sunt reprezentate în figura 6.1 [Deliu2010a].

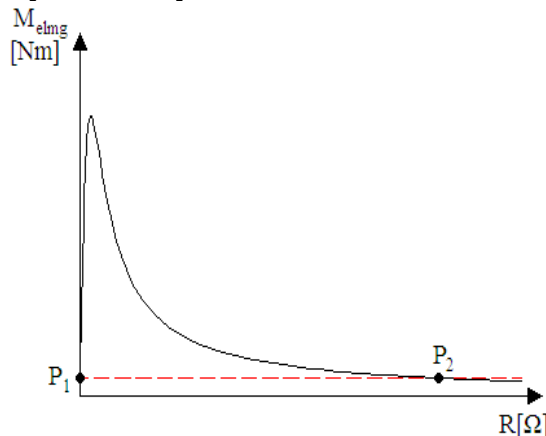


Fig.6.1. Dependența cuplului de rezistența de sarcină

**La cuplu și turație date rezultă tensiunea și curentul la GSMP**

Sistemul de conducere presupune cunoașterea turației optime  $n^*$  ( $\omega^* = 252 = 2\pi n^*$ ) la cuplul  $M_{MD}^* = 14.574 [Nm]$ , iar comanda redresorului interpus între **GSMP** și **AE** trebuie astfel făcută încât să se realizeze coordonatele punctului de putere maximă:  $n^*$ ,  $M_{MD}^*$ .

La un **MD** dat funcționând în punctul de putere maximă, **GSMP** va debita în bateria de **AE** o putere activă:

$$P^* = 3507.9 [W]$$

iar curentul, tensiunea și frecvența, în trifazat, au valorile:

$$I_R^* = 5.8577 [A], U_R^* = 199.62 [V], f^* = \frac{252}{2\pi} = 40.127 [Hz]$$

Reglările în subsistemul (**MD+GSMP+AE**) se fac doar la **GSMP**, care va avea cuplul  $M_{GSMP} = M_{MD}^*$ , debitul de motorină la MD fiind cel nominal  $q_N$  (figura 6.2) [Deliu2010a].

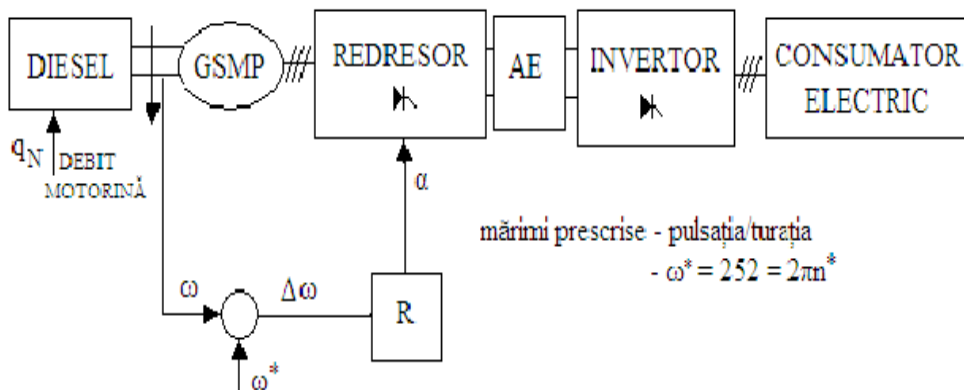


Fig.6.2. Schema bloc a subsistemului MD+GSMP

În concluzie având dat cuplul unui MD putem calcula mărimile specifice punctului de putere maximă:  $U$ ,  $I$ ,  $f$ .

### 6.1.1. Dinamica subsistemului (MD+GSMP) cu reglatoare de tip P

Regulatorul  $R$ , de tip **P**, are pentru viteza unghiulară mecanică  $\omega$  următoarea ecuație:

$$\Delta R = k \Delta \omega$$

unde:  $\Delta R$  - variația rezistenței;  $\Delta \omega$  - variația vitezei unghiulare mecanice, iar  $k$  constanta regulatorului.

Se analizează, în cele ce urmează, dinamica subsistemului (**MD+GSMP+AE**) cu reglatoare de tip **P** la modificarea pulsației  $\omega$ , cu valoarea  $\Delta \omega = 10 [rad / s]$ .

Pentru o anumită valoare a debitului de motorină, (de exemplu  $q=5[\text{g/s}]$ ), caracteristica mecanică a **MD** este:

$$M_{MD} = -1.5 \cdot 10^{-3} \omega^2 + 0.7\omega - 66.57$$

În zona de funcționare caracteristica mecanică liniarizată este sub forma:

$$M_{MD} = -0.5\omega - 28.686$$

deoarece derivata funcției  $M_{MD}(\omega)$  pentru  $\omega = 252 [\text{rad/s}]$  are valoarea 0.056 iar dreapta  $M_{MD}(\omega) = a\omega + b$  trece prin punctul de coordonate  $M_{MD} = 14.574$  și  $\omega = 252$ .

La o sarcină electrică de valoare  $R$ , tensiunile  $U_d$  și  $U_q$  se scriu sub forma:

$$\underline{U} = U_d + jU_q = -R(I_d + jI_q)$$

unde:

$$U_d = -RI_d, U_q = -RI_q$$

Rezultă sistemul de ecuații algebrice 6.2 ce definește funcționarea subsistemului (**MD+GSMP**) în regim staționar.

$$\left\{ \begin{array}{l} U_d = 1.6I_d - \omega 0.08I_q \\ U_q = 1.6I_q + \omega 0.07I_d + \omega \psi_{MP} \\ 0 = -0.01I_q I_d + \psi_{MP} I_q - 0.056\omega + 28.686 \\ U_d = -RI_d; \quad U_q = -RI_q \\ P = U_d I_d + U_q I_q \\ Q = -U_d I_q + U_q I_d \\ \cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \\ \omega = 262; \psi_{MP} = 1.6 \\ I_R = \frac{\sqrt{I_d^2 + I_q^2}}{\sqrt{3}}; U_R = \frac{\sqrt{U_d^2 + U_q^2}}{\sqrt{3}} \\ \psi_S^2 = (0.08I_q)^2 + (\psi_{MP} + 0.07I_d)^2 \end{array} \right. \quad (6.2)$$

$$Q = 0 [\text{VAR}]; \cos \varphi = 1; \psi_{MP} = 1.6 [\text{Wb}]; I_d = -4.5227 [\text{A}]; I_q = -8.5180 [\text{A}];$$

$$I_R = 5.5681 [\text{A}]; \psi_S = 1.4531 [\text{Wb}]; U_q = 322.63 [\text{V}]; U_d = 171.3 [\text{V}];$$

$$R = 37.876 [\Omega]; U_R = 210.90 [\text{V}]; P = -3522.9 [\text{W}].$$

Sarcina conectată la bornele **GS** are valoarea  $R = 37.876 [\Omega]$ .

Aceste valori constituie **condițiile inițiale** din sistemul de ecuații diferențiale ce definesc regimul tranzitoriu de trecere de la  $\omega = 262 [\text{rad/s}]$ , la  $\omega = 252 [\text{rad/s}]$ , în condițiile în care regulatoarele sunt de tip **P**.

Determinarea constantei de proporționalitate **K** a regulatorului se face astfel încât pulsația/frecvența în sistem trebuie să revină la valoarea inițială și deci  $\omega = 252 [\text{rad/s}]$ .

În concluzie, valorile finale se obțin din sistemul:

$$\begin{cases}
 U_d = 1.6I_d - \omega 0.08I_q \\
 U_q = 1.6I_q + \omega 0.07I_d + \omega \Psi_{MP} \\
 -14.574 = -0.01I_qI_d + \Psi_{MP}I_q \\
 U_d = -RI_d \\
 U_q = -RI_q \\
 P = U_dI_d + U_qI_q \\
 Q = -U_dI_q + U_qI_d \\
 \cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \\
 \omega = 252 \\
 \Psi_{MP} = 1.6
 \end{cases} \quad (6.3)$$

ale cărei soluții sunt:

$$\begin{aligned}
 Q &= 0 \text{ [VAR]}; \cos \varphi = 1; \Psi_{MP} = 1.6 \text{ [Wb]}; I_d = -4.9912 \text{ [A]}; I_q = -8.8332 \text{ [A]}; \\
 \Psi_S &= 1.4365 \text{ [Wb]}; U_q = 301.02 \text{ [V]}; U_d = 170.09 \text{ [V]}; P = -3507.9 \text{ [W]}; \\
 \omega &= 252 \text{ [rad/s]}; R = 34.079 \text{ [\Omega]}
 \end{aligned}$$

#### Determinarea valorilor inițiale și finale

Regulatorul de tip **P**, pentru viteza unghiulară mecanică  $\omega$ , are ecuația:

$$\Delta R = k \Delta \omega \quad (6.4)$$

sau  
și cu  $\Delta R = 34.079 - 37.876$  rezultă:

$$K = \frac{\Delta R}{\Delta \omega} = \frac{34.079 - 37.876}{252 - 262} = 0.3797$$

de unde  $\Delta R = 0.3797(\omega - 262)$  și se obține:

$$U_d = (37.876 - 0.3797(\omega - 252))I_d; U_q = (37.876 - 0.3797(\omega - 252))I_q$$

Cu valorile lui  $U_d$  și  $U_q$  astfel determinate se obține sistemul de ecuații diferențiale care stă la baza simulărilor prezentate în continuare.

$$\begin{cases}
 0 = (37.876 - 0.3797(\omega - 252) + 1.6)I_d + 0.07 \frac{dI_d}{dt} - \omega 0.08I_q \\
 0 = (37.876 - 0.3797(\omega - 252) + 1.6)I_q + \omega(0.07I_d + 1.6) + 0.08 \frac{dI_q}{dt} \\
 5 \frac{d\omega}{dt} = -0.01I_qI_d + 1.6I_q - 0.056\omega + 28.686 \\
 I_d(0) = -4.5227 \\
 I_q(0) = -8.518 \\
 \omega(0) = 262
 \end{cases} \quad (6.5)$$

**Evoluția în timp a mărimilor  $U$ ,  $\omega$ ,  $M_{GSMP}$ ,  $M_{MD}$ ,  $I$  pentru regulatorul de tip **P** sunt prezentate în figurile 6.3; 6.4; 6.5; 6.6; 6.7., [Deliu2010b].**

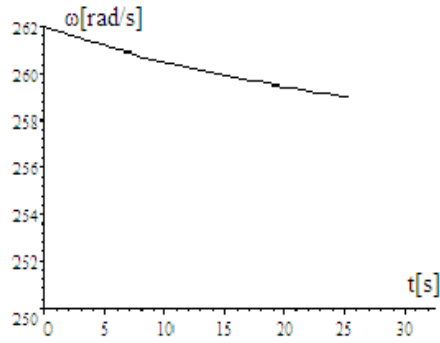


Fig.6.3. Variația în timp a lui  $\omega$

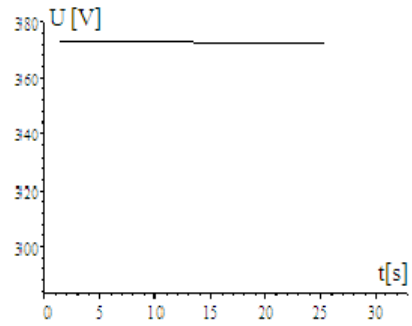


Fig.6.4. Variația în timp tensiunii statorice

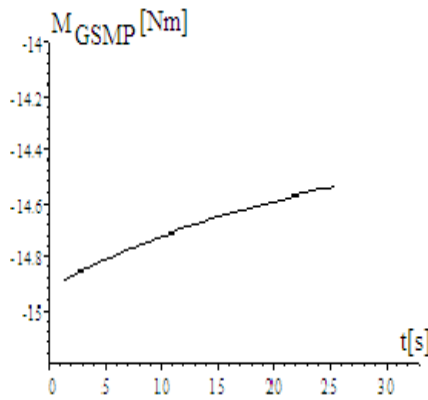


Fig.6.5. Variația în timp a cuplului GSMP

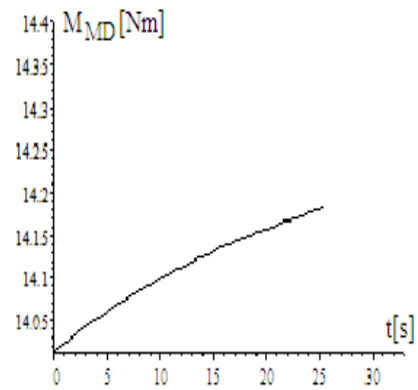


Fig.6.6. Variația în timp a cuplului MD

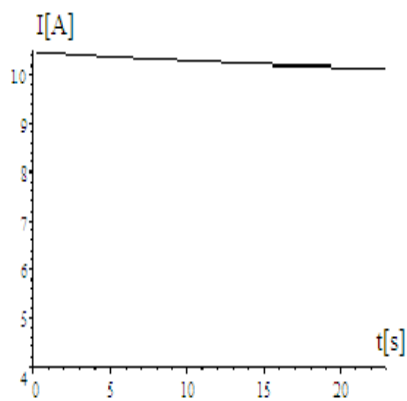


Fig.6.7. Variația în timp a curentului

### 6.1.2. Dinamica subsistemului (MD+GSMP+AE) cu reglatoare de tip PI

Din ecuația regulatorului:

$$\Delta R = K_1 \Delta \omega + K_2 \int \Delta \omega dt \quad (6.6)$$

prin derivare rezultă:

$$-\frac{dR}{dt} = -K_1 \frac{d\omega}{dt} + K_2(252 - \omega) \quad (6.7)$$

Pentru constanta  $K_1$  se alege valoarea anterioară de la regulatorul **-P-**:  $K_1=0.3797$  și deci rezultă:

$$-\frac{dR}{dt} = -0.3797 \frac{d\omega}{dt} + K_2(252 - \omega) \quad (6.8)$$

#### Acordarea regulatorului

Alegerea constantelor  $K_1$ ,  $K_2$  ale regulatorului **PI** este o problemă complicată, în sistemele neliniare, unde nu se mai pot aplica metodele de la sistemele liniare. Pentru  $K_1$ , se poate alege valoarea de la regulatorul **P**.

Pentru constanta  $K_2$  se pot alege diverse valori [Preitl2001].

Alegând  $K_2=11$ , sunt prezentate în continuare rezultatele simulărilor:

Introducând  $K_2 = 11$  în expresia 6.8 se obține:

$$\frac{dR}{dt} = 0.3797 \frac{d\omega}{dt} - 11(252 - \omega) \quad (6.9)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 = (R + 1.6)I_d + 0.07 \frac{dI_d}{dt} - \omega 0.08 I_q \\ 0 = (R + 1.6)I_q + \omega(0.07 I_d + 1.6) + 0.08 \frac{dI_q}{dt} \\ 5 \frac{d\omega}{dt} = -0.01 I_q I_d + 1.6 I_q - 0.056 \omega + 28.686 \\ I_d(0) = -4.5227 \\ I_q(0) = -8.518 \\ \omega(0) = 262 \\ R(0) = 37.876 \end{array} \right. \quad (6.10)$$

**Sistemul de ecuații diferențiale 6.10, împreună cu relația 6.9, determină evoluția în timp a mărimilor  $U$ ,  $\omega$ ,  $M_{GSMP}$ ,  $M_{MD}$ ,  $I$  pentru un regulator de tip PI:**



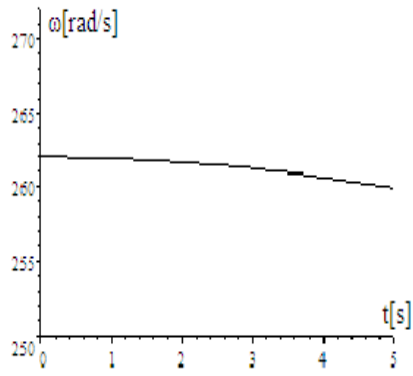


Fig.6.8. Variația în timp a lui  $\omega$

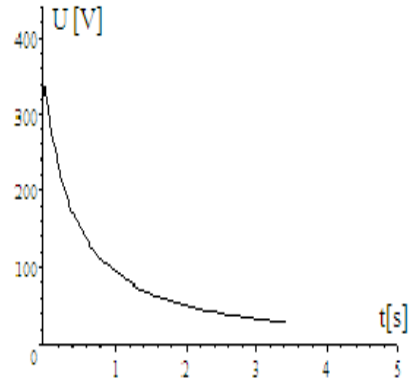


Fig.6.9. Variația în timp lui  $U$

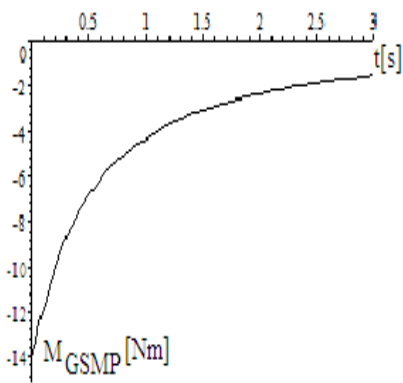


Fig.6.10. Variația în timp cuplului GSMP

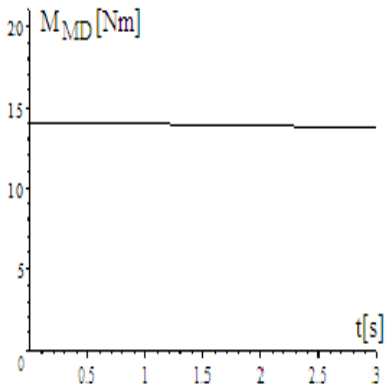


Fig.6.11. Variația în timp a cuplului MD

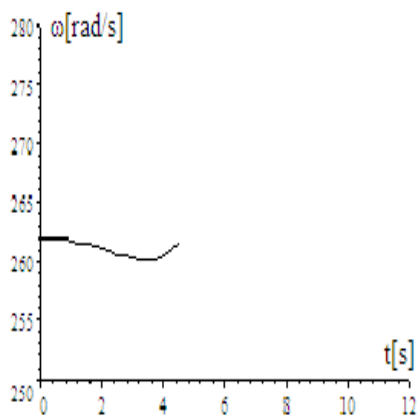


Fig.6.12. Variația în timp lui  $\omega$  detaliu

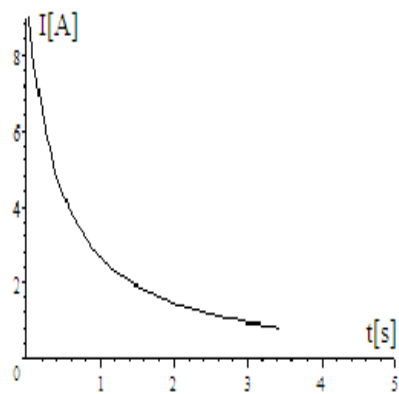


Fig.6.13. Variația în timp curentului

Din evoluția în timp a principalelor mărimi: cuplu, tensiune statorică, viteza unghiulară  $\omega$ , dar mai ales observând evoluția în timp a lui  $R$  se poate afirma că sistemul este **instabil**, rezistența de sarcină scăzând la zero după 36[s] și probabil devenind negativă dacă estimarea evoluției în timp ar fi continuată. Așa cum s-a precizat și în alte cazuri, dificultățile matematice nu permit estimări într-un timp mai mare, pentru a se putea concluziona asupra stabilității sistemului la diferite valori ale constantei de integrare  $K_2$ .

Din simulările de mai sus se observă variația în timp a vitezei unghiulare  $\omega$  care la  $t=0$  are valoarea  $\omega(0)=262[\text{rad/s}]$  și care ar trebui să se stabilizeze la  $\omega(\infty)=252[\text{rad/s}]$ . În timpul estimat, (sub 32[s]),  $\omega$  nu se stabilizează la valoarea de regim  $\omega(\infty)=252[\text{rad/s}]$ , și deci, în toate cazurile, sistemele sunt instabile, cu toate că în toate cazurile trece prin valoarea de regim. Din acest motiv regulatorul PI nu este indicat pentru o asemenea aplicație.

### 6.1.3. Dinamica subsistemului (MD+GSMP+AE) cu regulatoare de tip PID

Ecuția regulatorului fiind:

$$\Delta R = K_1 \Delta \omega + K_2 \int \Delta \omega dt + K_3 \frac{d\Delta \omega}{dt} \quad (6.11)$$

prin derivare rezultă:

$$-\frac{dR}{dt} = -K_1 \frac{d\omega}{dt} + K_2(252 - \omega) - K_3 \frac{d^2\omega}{dt^2} \quad (6.12)$$

Pentru constanta  $K_1$  se alege valoarea anterioară de la regulatorul de tip **P**:  
 $K_1=0.3797$

și deci rezultă:

$$-\frac{dR}{dt} = -0.3797 \frac{d\omega}{dt} + K_2(252 - \omega) - K_3 \frac{d^2\omega}{dt^2} \quad (6.13)$$

Notând  $b = \frac{d\omega}{dt}$  se obține:

$$-\frac{dR}{dt} = -0.3797 \frac{db}{dt} + K_2(252 - \omega) - K_3 \frac{db}{dt} \quad (6.14)$$

**Problema 1:** Cu notația  $b = \frac{d\omega}{dt}$ , ecuația diferențială a mișcării

$$J \frac{db}{dt} = -0.01 I_q I_d + 1.6 I_q - 0.056 \omega + 28.686 \quad (6.15)$$

devine o ecuație algebrică:  $Jb = -0.01 I_q I_d + 1.6 I_q - 0.056 \omega + 28.686$

și deci sistemul 6.10 nu este rezolvabil, prin metode numerice. Pentru a rezolva problema se calculează  $b = \frac{d\omega}{dt}$  din ecuația mișcării 6.15, știind că

$$J=5[\text{kgm}^2], \text{ rezultând: } b = \frac{d\omega}{dt} = \frac{-0.01 I_q I_d + 1.6 I_q - 0.056 \omega + 28.686}{5}$$

Derivând expresia de mai sus se obține:

$$\frac{db}{dt} = \left( -0.002 I_d \frac{dI_q}{dt} - 0.002 \frac{dI_d}{dt} I_q + 0.32 \frac{dI_q}{dt} - 0.0112 \frac{d\omega}{dt} \right) \quad (6.16)$$

Introducând expresia 6.16 în ecuația regulatorului se obține:

$$-\frac{dR}{dt} = -0.3797 \frac{d\omega}{dt} + K_2(252 - \omega) - K_3 \frac{db}{dt} = -0.3797 \frac{d\omega}{dt} + K_2(252 - \omega) - K_3 \left( -0.002I_d \frac{dI_q}{dt} - 0.002 \frac{dI_d}{dt} I_q + 0.32 \frac{dI_q}{dt} - 0.0112 \frac{d\omega}{dt} \right) \quad (6.17)$$

sau:

$$\frac{dR}{dt} = 0.3797 \frac{d\omega}{dt} - K_2(252 - \omega) + K_3 \frac{db}{dt} = 0.3797 \frac{d\omega}{dt} - K_2(252 - \omega) + K_3 \left( -0.002I_d \frac{dI_q}{dt} - 0.002 \frac{dI_d}{dt} I_q + 0.32 \frac{dI_q}{dt} - 0.0112 \frac{d\omega}{dt} \right) \quad (6.18)$$

### Implementarea regulatorului PID în model

1) Cunoscând:  $K_2 = -0.27$ ,  $K_3 = 5$  și expresia 6.18, se obține sistemul diferențial complet cu regulatorul de tip **PID**[Proștean2003]:

$$\left. \begin{aligned} 0 &= (R + 1.6)I_d + 0.07 \frac{dI_d}{dt} - \omega 0.08I_q \\ 0 &= (R + 1.6)I_q + \omega(0.07I_d + 1.6) + 0.08 \frac{dI_q}{dt} \\ 5 \frac{d\omega}{dt} &= -0.01I_q I_d + 1.6I_q - 0.056\omega + 28.686 \\ \frac{dR}{dt} &= 0.3797 \frac{d\omega}{dt} + 0.27(252 - \omega) + \\ &+ 5 \left( -0.002I_d \frac{dI_q}{dt} - 0.002 \frac{dI_d}{dt} I_q + 0.32 \frac{dI_q}{dt} - 0.0112 \frac{d\omega}{dt} \right) \end{aligned} \right\} \quad (6.19)$$

$$\begin{aligned} I_d(0) &= -4.5227 \\ I_q(0) &= -8.518 \\ \omega(0) &= 262 \\ R(0) &= 37.876 \end{aligned}$$

cu ajutorul căruia pot fi urmărite evoluțiile în timp a principalelor mărimi:  $U$ ,  $\omega$ ,  $M_{GSMP}$ ,  $R$ .

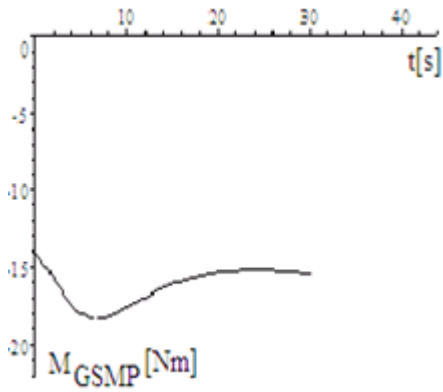


Fig.6.14. Variația în timp a cuplului GSMP

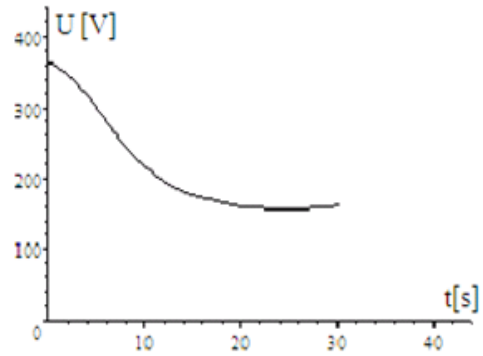


Fig.6.15. Variația în timp a tensiunii

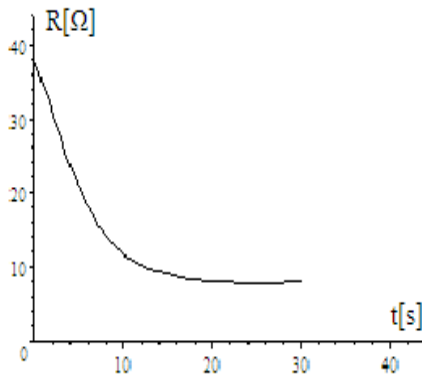


Fig.6.16. Variația în timp a lui R

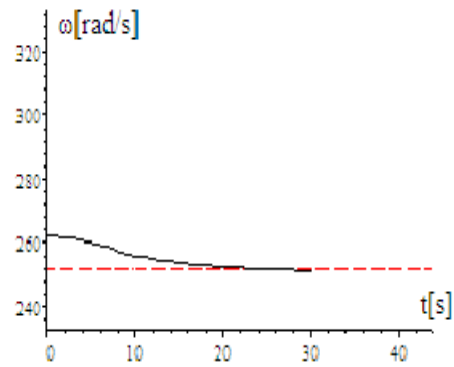


Fig.6.17. Variația în timp a lui \$\omega\$

2) Pentru \$K\_2=-0.27\$, \$K\_3=9\$, expresia 6.18 devine:

$$\frac{dR}{dt} = 0.3797 \frac{d\omega}{dt} + 0.27(252 - \omega) + 9 \left( -0.002I_d \frac{dI_q}{dt} - 0.002 \frac{dI_d}{dt} I_q + 0.32 \frac{dI_q}{dt} - 0.0112 \frac{d\omega}{dt} \right),$$

obținându-se următoarele evoluții în timp ale mărimilor principale:

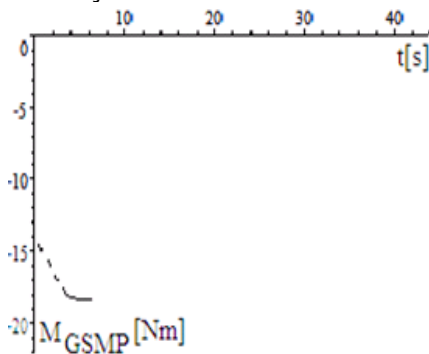


Fig.6.18. Variația în timp a cuplului GSMP

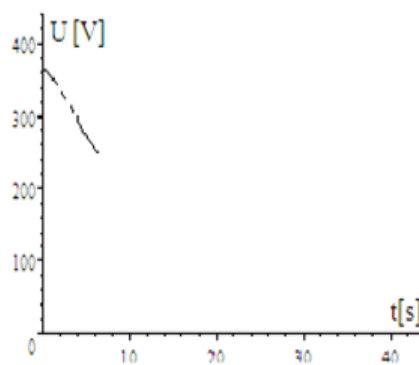


Fig.6.19. Variația în timp a tensiunii

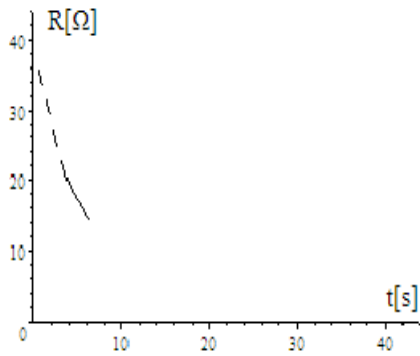


Fig.6.20. Variația în timp a lui R

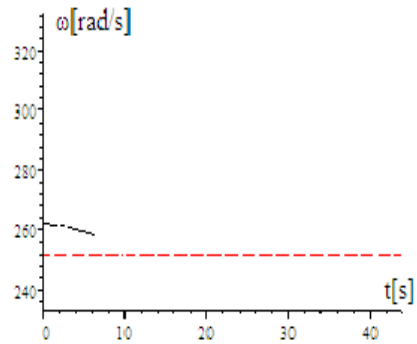


Fig.6.21. Variația în timp a lui ω

3) Pentru  $K_2=-0.27$ ,  $K_3=4.5$ , expresia 6.18 devine:

$$\frac{dR}{dt} = 0.3797 \frac{d\omega}{dt} + 0.27(252 - \omega) + 4.5 \left( -0.002 I_d \frac{dI_q}{dt} - 0.002 \frac{dI_d}{dt} I_q + 0.32 \frac{dI_q}{dt} - 0.0112 \frac{d\omega}{dt} \right),$$

obținându-se următoarele evoluții in timp ale mărimilor principale:

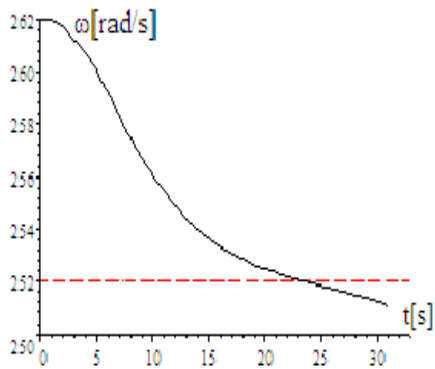


Fig.6.22. Variația în timp a lui ω

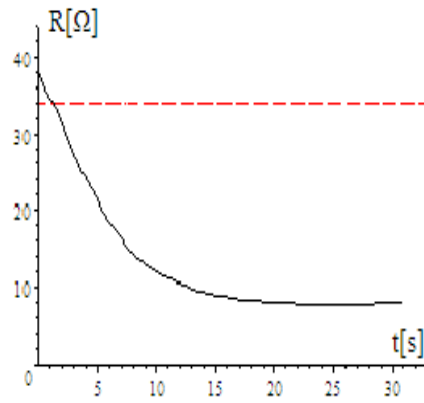
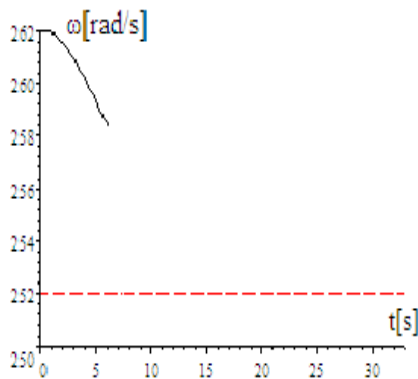
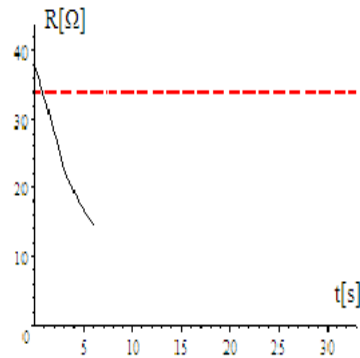


Fig.6.23. Variația în timp a lui R

4) Pentru  $K_2=-0.27$ ,  $K_3=9.5$ , expresia 6.18 devine:

$$\frac{dR}{dt} = 0.3797 \frac{d\omega}{dt} + 0.27(252 - \omega) + 9.5 \left( -0.002 I_d \frac{dI_q}{dt} - 0.002 \frac{dI_d}{dt} I_q + 0.32 \frac{dI_q}{dt} - 0.0112 \frac{d\omega}{dt} \right),$$

obținându-se următoarele evoluții in timp ale mărimilor principale:

Fig.6.24. Variația în timp a lui  $\omega$ Fig.6.25. Variația în timp a lui  $R$ 

Asemeni ca la regulatorul **PI** și la regulatorul **PID** pentru cele 4 cazuri **subsistemul este instabil**, așa cum se observă din variațiile în timp ale lui  $\omega$  și  $R$ .

Valorile finale  $\omega(\infty)=252[\text{rad/s}]$  și  $R(\infty)=34[\Omega]$  sunt atinse, dar în toate cazurile scăderea continuă a acestora, prin estimările în timp, nu pot evidenția stabilitatea sistemului (**MD+GSMP+AE**), deoarece, din cauza limitării programului **SWP**, observarea sistemului se poate face doar sub 10[s], timp insuficient pentru a se ajunge la regim staționar. Acest fapt este datorat valorii mari a momentului de inerție  $J=5[\text{kgm}^2]$ .

În concluzie, problematica reguletoarelor **PID** rămâne deschisă, mai ales că realizarea unei conduceri a sistemului prin estimarea turației/vitezei unghiulare  $\omega$  este probabil o metodă ineficientă [Deliu2010b].

## 6.2. Conducerea subsistemului (MD+GS) în scopul obținerii tensiunii și frecvenței nominale

Subsistemul (**MD+GS**) a cărei schemă bloc de conducere este prezentată în figura 5.40, completează necesarul de putere al consumatorilor electrici de pe navă prin puterea generată de motorul Diesel (**MD**).

**GS** generează atât putere activă, prin cuplul  $M_{elmg}$  primit de la (**MD**), cât și putere reactivă, prin curentul de excitație  $I_E$ .

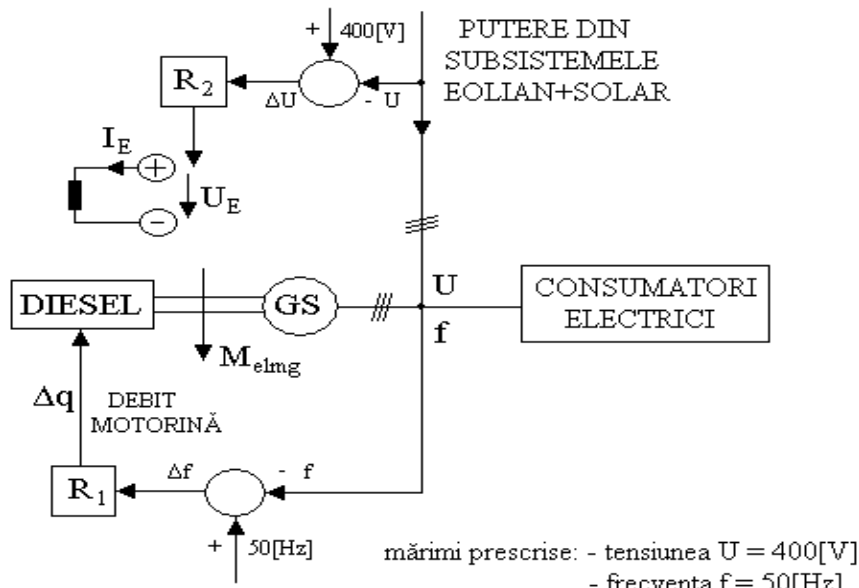


Fig.6.26. Schema bloc de conducerea a subsistemului (MD+GS)

Modificarea puterii active se face prin regulatorul  $R_1$ , ce are la intrare diferența de frecvență  $\Delta f = 50 - f$ , unde  $f$  este valoarea curentă a frecvenței.

Mărimea de ieșire a regulatorului  $R_1$  este debitul de motorină al **MD**.

Modificarea puterii reactive se face prin regulatorul  $R_2$  care are la intrare diferența de tensiune:  $\Delta U = 200 - U$ , unde  $U$  este valoarea curentă a tensiunii.

**Regulatele sunt pe debit  $R_1$  și pe excitație  $R_2$ .**

Mărimea de ieșire a regulatorului  $R_2$  este tensiunea  $U_E$ , aplicată la bornele înfășurării de excitație a **GS**. Prin creșterea sarcinii electrice active, frecvența scade și deci regulatorul  $R_1$  intră în funcțiune, mărind debitul de motorină și rezultând un cuplu motor mai mare, turația la **GS** va crește și frecvența revine la valoarea nominală de 50[Hz]. Se demonstrează, în continuare, că la conectarea unor consumatori de putere reactivă, (bobine, motoare asincrone, sisteme de iluminat cu bobine starter), apare o scădere a tensiunii  $U$  în sistem, deoarece puterea reactivă  $Q_{(U)}$  dată de un **GS** trifazat este:

$$Q_{(U)} = \frac{3(U \cdot U_{eE} \cos \theta - U^2)}{X_S} \quad (6.20)$$

unde:

$U_{eE}$  - t.e.m. polară, proporțională cu  $I_E$ ;

$\theta$  - unghiul de sarcină, proporțional cu valoarea cuplului;

$X_S$  - reactanța sincronă.

Pe baza relației 6.20 rezultă dependența puterii reactive de tensiune. La funcționarea în punctul  $P_1$ , (figura.6.27.), necesarul de putere reactivă este  $Q_1$ .

Prin conectarea unor consumatori inductivi, necesarul de putere reactivă crește,  $Q_2 > Q_1$ , punctul de funcționare trece în  $P_2$ , iar tensiunea în sistem devine  $U_2 < U_1$ .

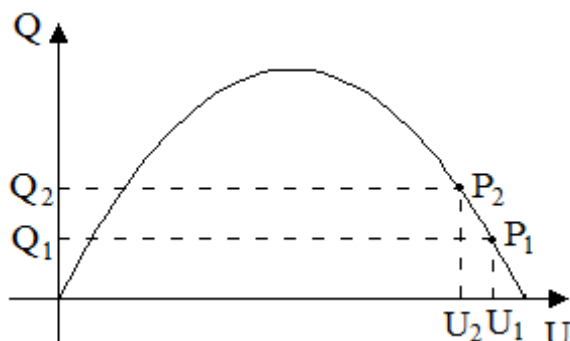


Fig.6.27. Dependența puterii reactive de tensiune

În concluzie, aducerea tensiunii la valoarea nominală  $U_N$  se poate face prin reglarea puterii reactive dată de **GS**, adică prin modificarea tensiunii  $U_E$ .

#### Ecuțiile regloarelor de tip P, PI și PID

##### Reglatoarele de tip -P- (proporțional)

Regulatorul  $R_1$ , pe frecvență de tip -P- are ecuația:

$$\Delta q = k \Delta f \quad (6.21)$$

unde: -  $\Delta q$  - variația debitului de motorină;  
-  $\Delta f$  - variația frecvenței.

Regulatorul  $R_2$ , pe tensiunea  $U_E$ , are ecuația:

$$\Delta U_E = k \Delta U \quad (6.22)$$

unde: -  $\Delta U_E$  - variația tensiunii pe înfășurarea de excitație;  
-  $\Delta U$  - variația tensiunii în sistem.

##### Reglatoarele de tip -PI- proporțional-integrator

Regulatorul  $R_1$ , pe frecvență are ecuația:

$$\Delta q = k_1 \Delta f + k_2 \int \Delta f dt \quad (6.23)$$

Regulatorul  $R_2$ , pe tensiunea  $U_E$ , are ecuația:

$$\Delta U_E = k_1 \Delta U + k_2 \int \Delta U dt \quad (6.24)$$

##### Reglatoarele de tip -PID- proporțional-integrator-derivativ

Regulatorul  $R_1$ , pe frecvență, are ecuația:

$$\Delta q = k_1 \Delta f + k_2 \int \Delta f dt + k_3 \frac{d\Delta f}{dt} \quad (6.25)$$

și analog  $R_2$ , pe tensiunea  $U_E$ , este definit prin relația:

$$\Delta U_E = k_1 \Delta U + k_2 \int \Delta U dt + k_3 \frac{d\Delta U}{dt} \quad (6.26)$$

#### 6.2.1. Dinamica subsistemului (MD+GS) cu reglatoare de tip P

Se analizează, în cele ce urmează, dinamica subsistemului **(MD+GS+R)** cu reglatoare de tip P, la modificarea sarcinii active, deci a frecvenței, cu valoarea:

$$\Delta f = 1 [\text{Hz}], \omega(0) = 307.72 [\text{rad} / \text{s}]$$



și a sarcinii reactive, deci a tensiunii, cu valoarea:

$$\Delta U = 10 [V], U(0) = 390 [V]$$

Pentru o anumită valoare a debitului de motorină, (de exemplu  $q=5$ [g/s]), caracteristica mecanică a **MD** este:

$$M_{MD} = -1.5 \cdot 10^{-3} \omega^2 + 0.7\omega - 66.57$$

În zona de funcționare caracteristica mecanică liniarizată este sub forma:

$$M_{MD} = -0.28\omega + 93.52$$

sau pentru un debit oarecare  $q$  rezultă:

$$M_{MD} = -0.28\omega + 93.52 \frac{q}{5} \quad (6.27)$$

La o sarcină electrică de valoare  $R, L$ , tensiunile  $U_d$  și  $U_q$  se scriu sub

$$\underline{U} = U_d + jU_q = -(R + j\omega L)(I_d + jI_q) \quad (6.28)$$

sau:

$$U_d = -RI_d + \omega LI_q; U_q = -\omega LI_d - RI_q$$

La un debit de  $q=5$ [g/s] și  $U=390$ [V],  $f=49$ [Hz],  $\omega=307.72$ [rad/s], rezultă sistemul de ecuații algebrice ce definește funcționarea subsistemului (**MD+GS**) în regim staționar la un curent de excitație  $I_E=1.4$ [A].

$$\left\{ \begin{array}{l} \sqrt{U_d^2 + U_q^2} = 390 \\ U_d = 1.6I_d - \omega 0.07I_q; U_q = \omega 0.08I_d + 1.6I_q + \omega I_E \\ U_d = RI_d + \omega LI_q; U_q = -\omega LI_d + RI_q \\ P = U_d I_d + U_q I_q; Q = -U_d I_q + U_q I_d \\ \cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}; f = \frac{\omega}{6.28} \\ I_R = \frac{\sqrt{I_d^2 + I_q^2}}{\sqrt{3}}; U_R = \frac{\sqrt{U_d^2 + U_q^2}}{\sqrt{3}} \\ \psi_S = (0.08I_q)^2 + (I_E + 0.07I_d)^2 \\ 0 = 0.01I_d I_q + I_q I_E - 0.28\omega + 93.52 \frac{q}{5} \end{array} \right. \quad (6.29)$$

ale cărui soluții sunt:

$$I_d = -1.9746 [A]; L = 1.4325 \times 10^{-2} [H]; U_R = 225.17 [V]; Q = -142.47 [VAR];$$

$$U_q = 373.67 [V]; P = -2212.6 [W]; \psi_S = -1.3319 [Wb] I_q = -5.3312 [A];$$

$$\cos \varphi = 0.99793; I_R = 3.2823 [A]; U_d = 111.68 [V]; R = 68.458 [\Omega]$$

Deci sarcina conectată la bornele **GS** are valoarea:

$$R = 68.458 [\Omega]$$

$$L = 0.014 [H]$$

Aceste valori constituie **condițiile inițiale** din sistemul de ecuații diferențiale ce definesc regimul tranzitoriu de trecere de la frecvența  $f=49$ [Hz] și tensiunea  $U=390$ [V], la frecvența și tensiunea nominală, în condițiile în care regulatoarele sunt de tip **P**.

Determinarea constantelor de proporționalitate **K** pentru cele două regulatoare  $R_1$  și  $R_2$  se face în modul următor:

1) frecvența în sistem trebuie să revină la valoarea nominală și deci  $f=50[\text{Hz}]$ ;

2) tensiunea în sistem, la fel, trebuie să revină la valoarea nominală și deci

$$\sqrt{U_d^2 + U_q^2} = 400 ;$$

3) cunoscând sarcina electrică R, L, (soluții ale sistemului 6.29), care nu se modifică, se formează sistemul algebric în necunoscute principale:

- q - debitul de motorină;
- $U_E$  - tensiunea pe înfășurarea de excitație.

$$\begin{cases} -68.458I_d + \omega 1.4325 \times 10^{-2} I_q = 1.6I_d - \omega 0.07I_q \\ -68.458I_q - \omega 1.4325 \times 10^{-2} I_d = \omega 0.08I_d + 1.6I_q + \omega I_E \\ U_E = 40I_E \\ 0 = 0.01I_d I_q + I_q I_E - 0.28\omega + 93.52 \frac{q}{5} \\ \omega = 314 \\ \sqrt{(1.6I_d - \omega 0.07I_q)^2 + (\omega 0.08I_d + 1.6I_q + \omega I_E)^2} = 400 \end{cases} \quad (6.30)$$

Se obțin valorile finale cu care se vor calcula constatele reguletoarelor  $R_1$  și

$R_2$ :

$$q_f = 5.1061[g/s]; I_E = 1.4113[A]; I_d = -2.0613[A]; I_q = -5.4539[A]; \\ U_E = 56.451[V].$$

#### Calculul constatele reguletoarelor $R_1$ și $R_2$

Ecuția regulatorului de tip **P** pe debitul de motorină q este:

$$\Delta q = K \Delta f = K_1 \Delta f = K_1(\omega - 307.72)$$

Cunoscând valorile inițiale și finale rezultă:

$$K_1 = \frac{\Delta q}{\Delta \omega} = \frac{5.1061 - 5}{314 - 307.72} = 1.6895 \times 10^{-2}$$

Ecuția regulatorului de tip **P** pe tensiunea de excitație  $U_E$  este:

$$\Delta U_E = K_2 \Delta U = K_2(400 - U)$$

Știind că tensiunea U este  $U = \sqrt{U_d^2 + U_q^2}$ , rezultă:

$$U = \sqrt{(-68.458I_d + \omega 1.4325 \times 10^{-2} I_q)^2 + (-68.458I_q - \omega 1.4325 \times 10^{-2} I_d)^2}$$

$$U_E(0) = R_E I_E = 40 \cdot 1.4 = 56 [V]$$

$$U_E = U_E(0) + \Delta U_E = 56 + K_2(400 - U)$$

$$K_2 = \frac{56.451 - 56}{10} = 0.0451$$

#### Variațiile mărimilor principale folosind regulatorul de tip **P**

Cunoscând valorile debitului de motorină și a tensiunii pe înfășurarea de excitație, determinate anterior, se obține sistemul de ecuații diferențiale 6.31 care stă la baza simulărilor prezentate în continuare[Deliu2010a].

$$\left. \begin{aligned}
 &1) -68.458I_d + \omega 1.4325 \times 10^{-2} I_q = 1.6I_d + 0.08 \frac{dI_d}{dt} - \\
 &\quad - \omega 0.07I_q + \frac{dI_E}{dt} + 0.05 \frac{dI_D}{dt} - \omega 0.053I_Q \\
 &2) -68.458I_q + \omega 1.4325 \times 10^{-2} I_d = \omega 0.08I_d + 1.6I_q + \\
 &\quad + 0.07 \frac{dI_q}{dt} + \omega I_E + \omega 0.05I_D + 0.053 \frac{dI_Q}{dt} \\
 &3) 56 + 0.0451(400 - \\
 &\quad - \sqrt{(-68.458I_d + \omega 1.4325 \times 10^{-2} I_q)^2 + (-68.458I_q - \omega 1.4325 \times 10^{-2} I_d)^2} = \\
 &\quad = \frac{dI_d}{dt} + 40I_E + 18.51 \frac{dI_E}{dt} + 0.56 \frac{dI_D}{dt} \\
 &4) 0 = 0.05 \frac{dI_d}{dt} + 7.95I_D + 0.07 \frac{dI_D}{dt} + 0.56 \frac{dI_E}{dt} \\
 &5) 0 = 0.053 \frac{dI_q}{dt} + 30.22I_Q + 0.25 \frac{dI_Q}{dt} \\
 &6) 5 \frac{d\omega}{dt} = 0.01I_dI_q + I_qI_E - 0.053I_dI_Q + 0.05I_qI_D - \\
 &\quad - 0.28\omega + 93.52 \frac{5 + 1.6895 \times 10^{-2} (314 - \omega)}{5} \\
 &\quad I_E(0) = 1.4 \\
 &\quad I_d(0) = -1.9746 \\
 &\quad I_q(0) = -5.3312 \\
 &\quad I_Q(0) = 0 \\
 &\quad I_D(0) = 0 \\
 &\quad \omega(0) = 307.72
 \end{aligned} \right\} \quad (6.31)$$

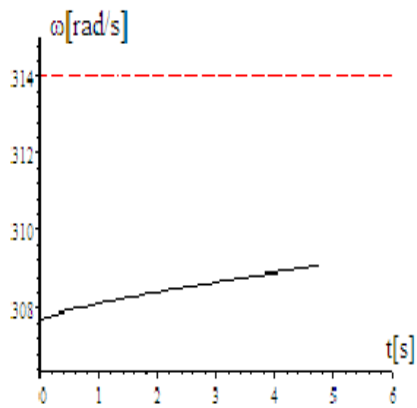


Fig.6.28. Variația în timp a lui  $\omega$

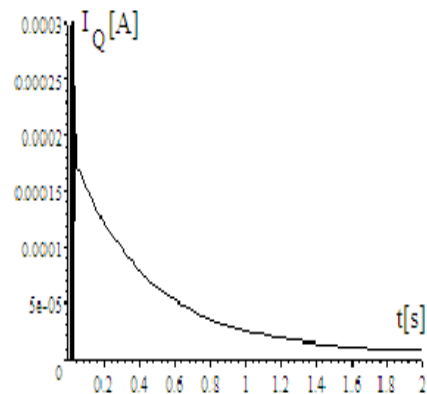


Fig.6.29. Variația în timp a lui  $I_Q$

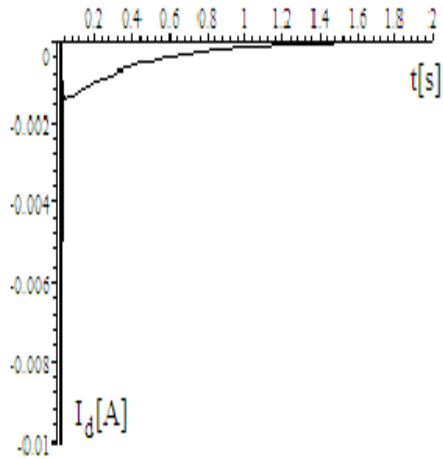
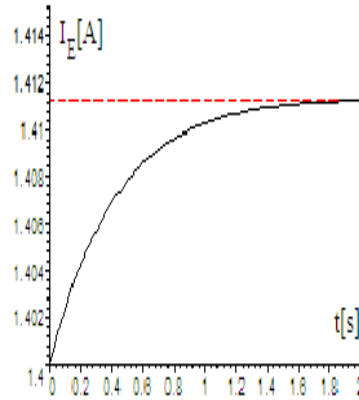
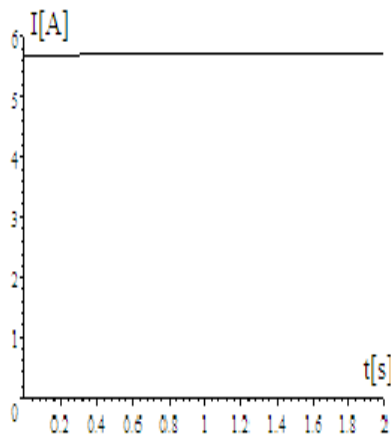
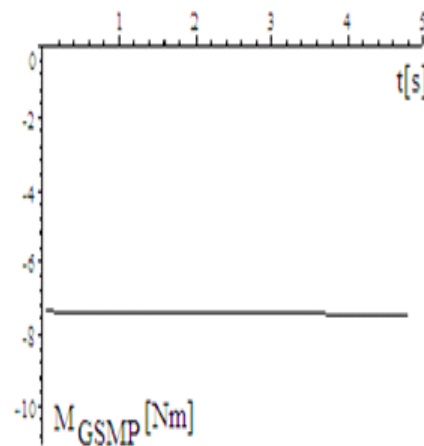
Fig.6.30. Variația în timp a lui  $I_d$ Fig.6.31. Variația în timp a lui  $I_E$ Fig.6.32. Variația în timp a lui  $\sqrt{I_d^2 + I_q^2}$ 

Fig.6.33. Variația în timp a cuplului GSMP

### 6.2.2. Dinamica subsistemului (MD+GS) cu regatoare de tip PI. Modelul matematic al GS cu înfășurări de amortizare

În cele de mai jos se abordează două variante:

- 1) **PI** - pe debit și **P** - pe excitație;
- 2) **PI** - pe debit și excitație.

Valoarea constantei de proporționalitate de la regulatorul **PI** este aceeași cu cea de la regulatorul **P**.

#### 1) **PI** debit + **P** excitație

Din ecuația regulatorului  $R_1$  pe debit:

$$\Delta q = K_1 \Delta \omega + K_2 \int \Delta \omega dt$$

sau

$$q - q(0) = K_1(314 - \omega) + K_2 \int (314 - \omega) dt$$

prin derivare rezultă:

$$\frac{dq}{dt} = -K_1 \frac{d\omega}{dt} + K_2(314 - \omega)$$

Pentru constanta  $K_1$  se alege valoarea anterioară de la regulatorul de tip **P**:

$$K_1 = 1.6895 \times 10^{-2}$$

și deci rezultă:

$$\frac{dq}{dt} = -1.6895 \times 10^{-2} \frac{d\omega}{dt} + K_2(314 - \omega)$$

**Precizare:** În programul de calcul s-a înlocuit variabila **q** cu **a** deoarece, pentru variabila **q** programul de calcul nu funcționează.

#### Acordarea reguletoarelor

Alegerea constantelor  $K_1$ ,  $K_2$ , ale regulatorului **PI** este o problemă complicată, în sistemele neliniare, unde nu se mai pot aplica metodele de la sistemele liniare. Pentru  $K_1$  se poate alege valoarea de la regulatorul **P**. Alegerea lui  $K_2$  este mai complicată.

În cazul de față apar două probleme:

- 1) alegerea lui  $K_2$  pentru excitație și
- 2) alegerea lui  $K_2$  pentru debit.

Pentru constanta  $K_2$  se aleg diverse valori:  $K_2 = \frac{0.01}{6.28}; \frac{0.1}{6.28}; \frac{1}{6.28}; \frac{10}{6.28}; \frac{100}{6.28}$  iar

rezultatele simulărilor se dau în continuare.

La regulatorul  $R_2$ , datorită complexităților de calcul ce apar la **PI**, (tensiunea  $U$  fiind:

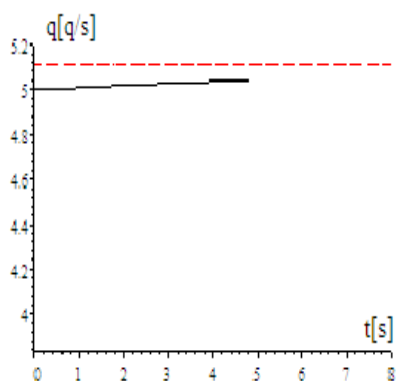
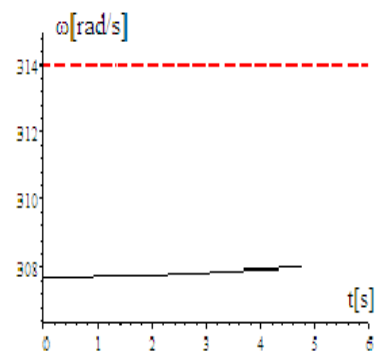
$$U = \sqrt{U_d^2 + U_q^2} = \sqrt{(-68.458I_d + \omega 1.4325 \times 10^{-2} I_q)^2 + (-68.458I_q - \omega 1.4325 \times 10^{-2} I_d)^2}$$

s-a lucrat tot cu un regulator de tip **P**.

#### Sistemul diferențial complet al regulatorului de tip **PI**

$$1) K_2 = \frac{0.01}{6.28}$$

$$\begin{aligned}
 & 1) -68.458I_d + \omega 1.4325 \times 10^{-2} I_q = 1.6I_d + 0.08 \frac{dI_d}{dt} - \\
 & \quad - \omega 0.07I_q + \frac{dI_E}{dt} + 0.05 \frac{dI_D}{dt} - \omega 0.053I_Q \\
 & 2) -68.458I_q + \omega 1.4325 \times 10^{-2} I_d = \omega 0.08I_d + 1.6I_q + \\
 & \quad + 0.07 \frac{dI_q}{dt} + \omega I_E + \omega 0.05I_D + 0.053 \frac{dI_Q}{dt} \\
 & 3) 56 + 0.0451(400 - \\
 & \quad - \sqrt{(-68.458I_d + \omega 1.4325 \times 10^{-2} I_q)^2 + (-68.458I_q - \omega 1.4325 \times 10^{-2} I_d)^2}) = \\
 & \quad = \frac{dI_d}{dt} + 40I_E + 18.51 \frac{dI_E}{dt} + 0.56 \frac{dI_D}{dt} \\
 & 4) 0 = 0.05 \frac{dI_d}{dt} + 7.95I_D + 0.07 \frac{dI_D}{dt} + 0.56 \frac{dI_E}{dt} \\
 & 5) 0 = 0.053 \frac{dI_q}{dt} + 30.22I_Q + 0.25 \frac{dI_Q}{dt} \\
 & 6) 5 \frac{d\omega}{dt} = 0.01I_d I_q + I_q I_E - 0.053I_d I_Q + 0.05I_q I_D - \\
 & \quad - 0.28\omega + 18.704a \\
 & 7) \quad 6.28 \frac{da}{dt} = -0.1061 \frac{d\omega}{dt} + 0.01(314 - \omega) \\
 & \quad a(0) = 5; I_E(0) = 1.4 \\
 & \quad I_d(0) = -1.9746; I_q(0) = -5.3312 \\
 & \quad I_Q(0) = 0; I_D(0) = 0 \\
 & \quad \omega(0) = 307.72
 \end{aligned} \tag{6.32}$$

Fig.6.34. Variația lui  $\dot{q}$  în timp a lui  $q$ Fig.6.35. Variația lui  $\dot{\omega}$  în timp a lui  $\omega$

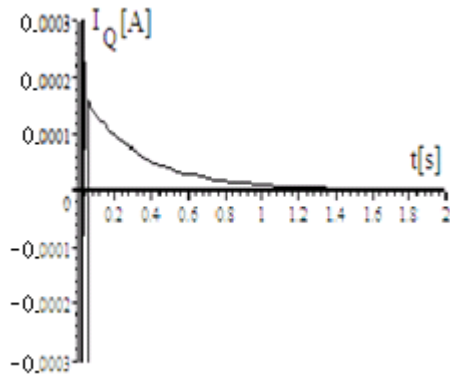


Fig.6.36. Variația în timp a lui  $I_Q$

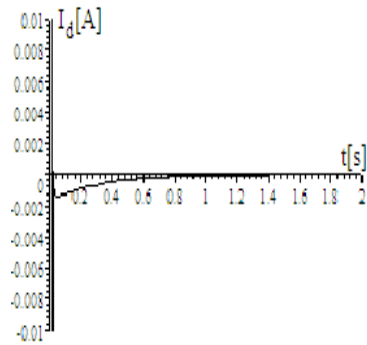


Fig.6.37. Variația în timp a lui  $I_d$

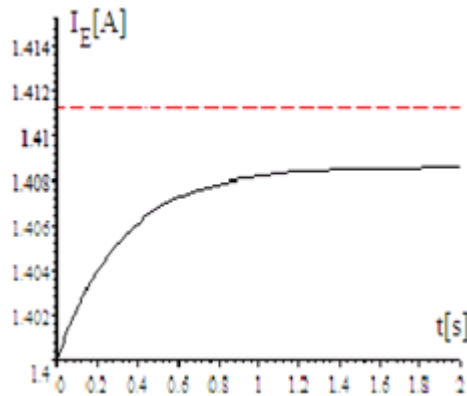


Fig.6.38. Variația în timp a lui  $I_E$

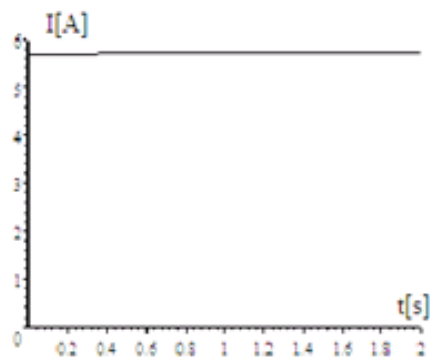


Fig.6.39. Variația în timp a lui  $\sqrt{I_d^2 + I_q^2}$

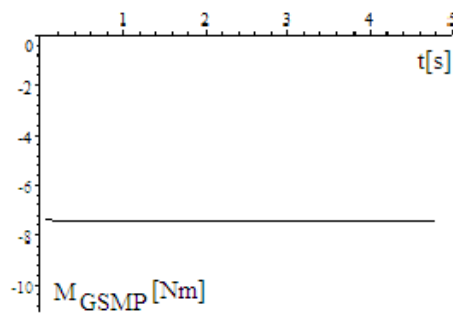


Fig.6.40. Variația în timp a cuplului GSMP

**2)Regulatoare de tip PI pe debit și pe excitație[Proștean2003]**

Din ecuația regulatorului  $R_1$  pe **debit**:

$$\Delta q = K_1 \Delta f + K_2 \int \Delta f dt \quad (6.33)$$

sau

$$\Delta q = K_1(50 - f) + K_2 \int (50 - f) dt \quad (6.34)$$

prin derivare rezultă:

$$\frac{d\Delta q}{dt} = -K_1 \frac{df}{dt} + K_2(50 - f) \quad (6.35)$$

sau cu

$$\Delta q = a$$

se obține:

$$\frac{da}{dt} = \frac{-0.0168}{6.28} \frac{d\omega}{dt} + K_2 \left( 50 - \frac{\omega}{6.28} \right) \quad (6.36)$$

Pentru constanta  $K_1$  s-a ales valoarea anterioară de la regulatorul de tip **P**:

$$K_1 = 1.6895 \cdot 10^{-2}$$

Din ecuația regulatorului  $R_2$  pe tensiunea de **excitație**  $U_E$ :

$$\Delta U_E = K_1 \Delta U + K_2 \int \Delta U dt \quad (6.37)$$

sau cu

$$\Delta U_E = b$$

prin derivare rezultă:

$$\frac{db}{dt} = -K_1 \frac{dU}{dt} + K_2(400 - U) \quad (6.38)$$

Cunoscând că:

$$U = \sqrt{\left( -68.458 I_d + \omega 1.4325 \times 10^{-2} I_q \right)^2 + \left( -68.458 I_q - \omega 1.4325 \times 10^{-2} I_d \right)^2},$$

aceasta se înlocuiește în relația 6.39, obținându-se:

$$\begin{aligned} \frac{db}{dt} = & -0.0451 \left[ \frac{(-68.458 I_d + \omega 1.4325 \times 10^{-2} I_q) \left( -68.458 \frac{dI_d}{dt} + \frac{d\omega}{dt} 1.4325 \times 10^{-2} I_q + \omega 1.4325 \times 10^{-2} \frac{dI_q}{dt} \right)}{\sqrt{\left( -68.458 I_d + \omega 1.4325 \times 10^{-2} I_q \right)^2 + \left( -68.458 I_q - \omega 1.4325 \times 10^{-2} I_d \right)^2}} + \right. \\ & \left. + \frac{(-68.458 I_q - \omega 1.4325 \times 10^{-2} I_d) \left( -68.458 \frac{dI_q}{dt} - \frac{d\omega}{dt} 1.4325 \times 10^{-2} I_d - \omega 1.4325 \times 10^{-2} \frac{dI_d}{dt} \right)}{\sqrt{\left( -68.458 I_d + \omega 1.4325 \times 10^{-2} I_q \right)^2 + \left( -68.458 I_q - \omega 1.4325 \times 10^{-2} I_d \right)^2}} \right] + \\ & + K_2 \left( 400 - \sqrt{\left( -68.458 I_d + \omega 1.4325 \times 10^{-2} I_q \right)^2 + \left( -68.458 I_q - \omega 1.4325 \times 10^{-2} I_d \right)^2} \right) \end{aligned} \quad (6.39)$$

Considerând  $K_2$  cunoscut sistemul de ecuații diferențiale 6.40 va sta la baza simulărilor prezentate în continuare.1)  $K_2 = 0.001$



$$\begin{aligned}
 &1) -68.458I_d + \omega 1.4325 \times 10^{-2} I_q = 1.6I_d + 0.08 \frac{dI_d}{dt} - \omega 0.07I_q + \frac{dI_E}{dt} + 0.05 \frac{dI_D}{dt} - \omega 0.053I_Q \\
 &2) -68.458I_q + \omega 1.4325 \times 10^{-2} I_d = \omega 0.08I_d + 1.6I_q + 0.07 \frac{dI_q}{dt} + \omega I_E + \omega 0.05I_D + 0.053 \frac{dI_Q}{dt} \\
 &3) 56 + b = \frac{dI_d}{dt} + 40I_E + 18.51 \frac{dI_E}{dt} + 0.56 \frac{dI_D}{dt} \\
 &4) 0 = 0.05 \frac{dI_d}{dt} + 7.95I_D + 0.07 \frac{dI_D}{dt} + 0.56 \frac{dI_E}{dt} \\
 &5) 0 = 0.053 \frac{dI_q}{dt} + 30.22I_Q + 0.25 \frac{dI_Q}{dt} \\
 &6) 5 \frac{d\omega}{dt} = 0.01I_d I_q + I_q I_E - 0.053I_d I_Q + 0.05I_q I_D - 0.28\omega + 93.52 \frac{5+a}{5} \quad (6.40) \\
 &7) \frac{da}{dt} = \frac{-0.0168}{6.28} \frac{d\omega}{dt} + 0.01(50 - \frac{\omega}{6.28}) \\
 &8) \frac{db}{dt} = -0.0451 \left[ \frac{(-68.458I_d + \omega 1.4325 \times 10^{-2} I_q)(-68.458 \frac{dI_d}{dt} + \frac{d\omega}{dt} 1.4325 \times 10^{-2} I_q + \omega 1.4325 \times 10^{-2} \frac{dI_q}{dt})}{\sqrt{(-68.458I_d + \omega 1.4325 \times 10^{-2} I_q)^2 + (-68.458I_q - \omega 1.4325 \times 10^{-2} I_d)^2}} + \right. \\
 &\quad \left. \frac{(-68.458I_q - \omega 1.4325 \times 10^{-2} I_d)(-68.458 \frac{dI_q}{dt} - \frac{d\omega}{dt} 1.4325 \times 10^{-2} I_d - \omega 1.4325 \times 10^{-2} \frac{dI_d}{dt})}{\sqrt{(-68.458I_d + \omega 1.4325 \times 10^{-2} I_q)^2 + (-68.458I_q - \omega 1.4325 \times 10^{-2} I_d)^2}} \right] + \\
 &\quad + K_2(400 - \sqrt{(-68.458I_d + \omega 1.4325 \times 10^{-2} I_q)^2 + (-68.458I_q - \omega 1.4325 \times 10^{-2} I_d)^2}) \\
 &a(0) = 0; b(0) = 0; I_E(0) = 1.4; I_d(0) = -1.9746; I_q(0) = -5.3312; I_Q(0) = 0; I_D(0) = 0; \omega(0) = 307.72
 \end{aligned}$$

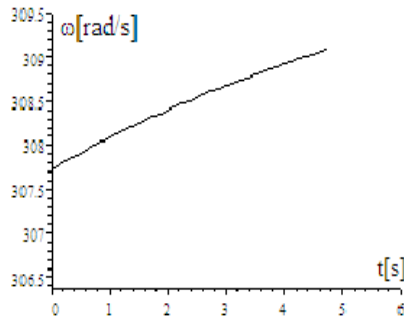


Fig.6.41. Variația lui în timp a lui  $\omega$ , la regulatorul de tip P

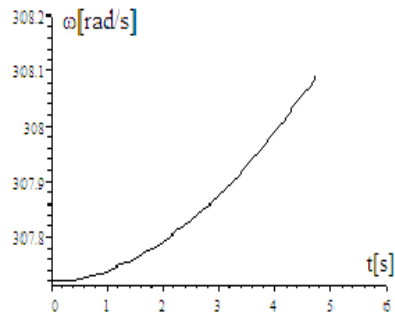


Fig.6.42. Variația lui în timp a lui  $\omega$ , la regulatorul de tip PI

2) Pentru  $K_2=0.01$ , relația 6.39 devine:

$$\frac{db}{dt} = -0.0451 \left[ \frac{(-68.458I_d + \omega 1.4325 \times 10^{-2} I_q) \left( -68.458 \frac{dI_d}{dt} + \frac{d\omega}{dt} 1.4325 \times 10^{-2} I_q + \omega 1.4325 \times 10^{-2} \frac{dI_q}{dt} \right)}{\sqrt{(-68.458I_d + \omega 1.4325 \times 10^{-2} I_q)^2 + (-68.458I_q - \omega 1.4325 \times 10^{-2} I_d)^2}} + \right. \\ \left. + \frac{(-68.458I_q - \omega 1.4325 \times 10^{-2} I_d) \left( -68.458 \frac{dI_q}{dt} - \frac{d\omega}{dt} 1.4325 \times 10^{-2} I_d - \omega 1.4325 \times 10^{-2} \frac{dI_d}{dt} \right)}{\sqrt{(-68.458I_d + \omega 1.4325 \times 10^{-2} I_q)^2 + (-68.458I_q - \omega 1.4325 \times 10^{-2} I_d)^2}} \right] + \\ + 0.01(400 - \sqrt{(-68.458I_d + \omega 1.4325 \times 10^{-2} I_q)^2 + (-68.458I_q - \omega 1.4325 \times 10^{-2} I_d)^2})$$

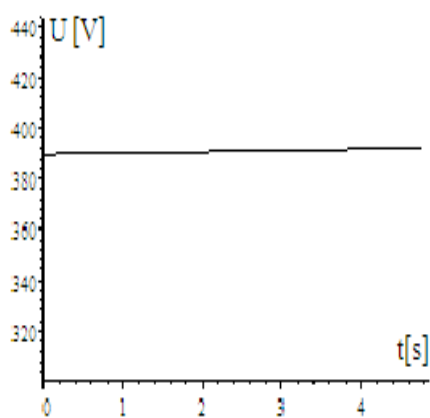


Fig.6.43. Variația în timp a tensiunii

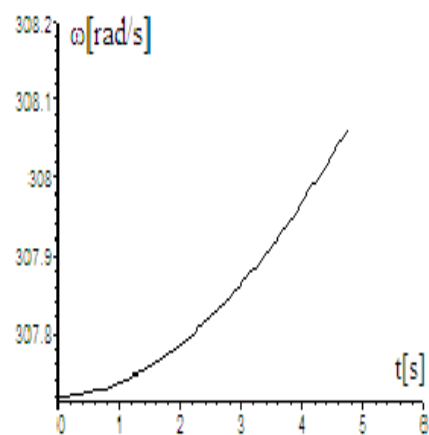


Fig.6.44. Variația lui în timp a lui ω

**Observarea este limitată din cauza dificultăților matematice**

3)  $K_2=0.1$

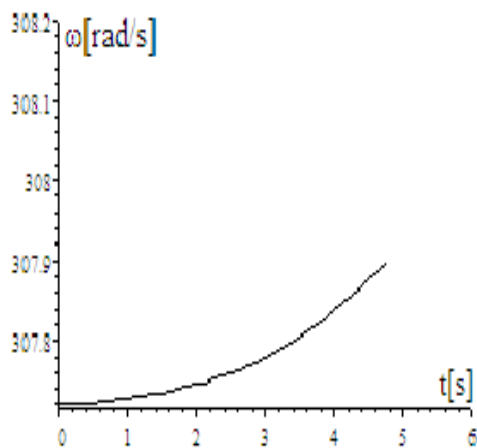


Fig.6.45. Variația în timp a lui ω

În urma rezultatelor obținute prin simulare numerică, pe un model

matematic ce conține înfășurările de amortizare ale **GS**, se pot trage următoarele concluzii[Deliu2010b]:

1. subsistemul (**MD+GS**) este stabil la orice variații ale sarcinii electrice ce nu depășesc puterea maximă a **MD**;
2. regulatorul de tip **P** nu introduce oscilații, dar valorile finale ale variabilelor pot fi diferite de valorile prescrise, fapt ce la regulatorul de tip **PI** nu se întâmplă;
3. valorile constantelor reguletoarelor influențează variația în timp a diverselor mărimi, în sensul că pentru valori mari a constantei  $K_2$ , de la regulatorul de tip **PI**, apar oscilații semnificative, suprareglaj și deci solicitări electrice și mecanice suplimentare;
4. alegerea constantelor reguletoarelor trebuie făcută astfel încât să fie eliminate oscilațiile în timp ale funcțiilor importante: viteza unghiulară, cuplu electromagnetic, curent de excitație, curent statoric s.a.;
5. părțile reglate cu regulatorul de tip **P** nu ating valorile finale, pe când cele reglate cu regulatorul de tip **PI** ating valorile finale.

### **6.2.3. Dinamica subsistemului (MD+GS) cu reguletoare de tip PI. Modelul matematic al GS fără înfășurări de amortizare.**

Așa cum s-a putut observa din cele analizate anterior, din cauza complexităților de calcul, procesul a putut fi observat pe o perioadă scurtă de timp (sub 5[s]), perioadă în care evoluția mărimilor în timp nu s-a stabilizat.

Pentru a observa evoluția procesului pe o perioadă mai lungă de timp se folosește, în continuare, modelul matematic simplificat, fără înfășurări de amortizare.

Pentru constantele de timp  $K_2$  se aleg mai multe valori astfel încât să se evidențieze zona optimală din punct de vedere al oscilațiilor mărimilor de bază: curenți, cupluri, tensiuni.

Pentru  $K_2=0.01$  la debit,  $K_2=0.01$  la excitație, modelul matematic simplificat este următorul:

$$\begin{aligned}
 & -68.458I_d + \omega 1.4325 \times 10^{-2} I_q = 1.6I_d + 0.08 \frac{dI_d}{dt} - \omega 0.07I_q + \frac{dI_E}{dt} \\
 & -68.458I_q + \omega 1.4325 \times 10^{-2} I_d = \omega 0.08I_d + 1.6I_q + 0.07 \frac{dI_q}{dt} + \omega I_E \\
 & 56 + b = \frac{dI_d}{dt} + 40I_E + 18.51 \frac{dI_E}{dt} \\
 & 5 \frac{d\omega}{dt} = 0.01I_d I_q + I_q I_E - 0.28\omega + 93.52 \frac{5+a}{5} \\
 & \frac{da}{dt} = \frac{-0.0168}{6.28} \frac{d\omega}{dt} + 0.01(50 - \frac{\omega}{6.28})
 \end{aligned}$$

$$\frac{db}{dt} = -0.0451 \left[ \frac{(-68.458I_d + \omega 1.4325 \times 10^{-2} I_q) \left( -68.458 \frac{dI_d}{dt} + \frac{d\omega}{dt} 1.4325 \times 10^{-2} I_q + \omega 1.4325 \times 10^{-2} \frac{dI_q}{dt} \right)}{\sqrt{(-68.458I_d + \omega 1.4325 \times 10^{-2} I_q)^2 + (-68.458I_q - \omega 1.4325 \times 10^{-2} I_d)^2}} + \right.$$

$$\left. \frac{(-68.458I_q - \omega 1.4325 \times 10^{-2} I_d) \left( -68.458 \frac{dI_q}{dt} - \frac{d\omega}{dt} 1.4325 \times 10^{-2} I_d - \omega 1.4325 \times 10^{-2} \frac{dI_d}{dt} \right)}{\sqrt{(-68.458I_d + \omega 1.4325 \times 10^{-2} I_q)^2 + (-68.458I_q - \omega 1.4325 \times 10^{-2} I_d)^2}} \right] +$$

$$+ 0.01(400 - \sqrt{(-68.458I_d + \omega 1.4325 \times 10^{-2} I_q)^2 + (-68.458I_q - \omega 1.4325 \times 10^{-2} I_d)^2})$$

$$\begin{aligned}
 & a(0) = 0 \\
 & b(0) = 0 \\
 & I_E(0) = 1.4 \\
 & I_d(0) = -1.9746 \\
 & I_q(0) = -5.3312 \\
 & \omega(0) = 307.72
 \end{aligned}$$

Rezultatele simulărilor sunt prezentate în continuare:

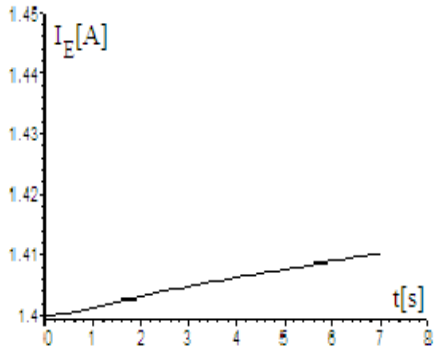


Fig.6.46. Variația în timp a lui \$I\_E\$

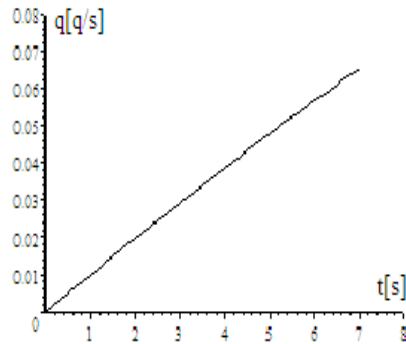


Fig.6.47. Variația în timp a lui \$q\$

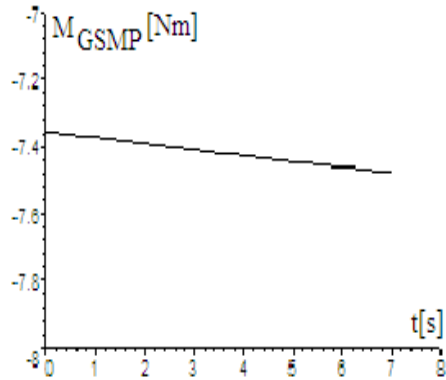


Fig.6.48. Variația în timp a cuplului GSMP

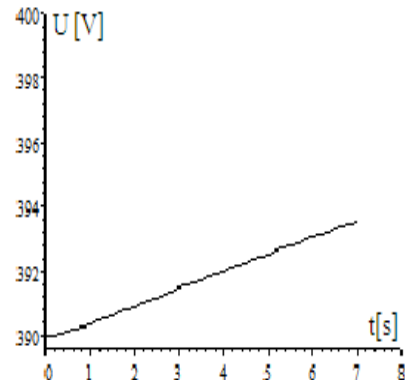
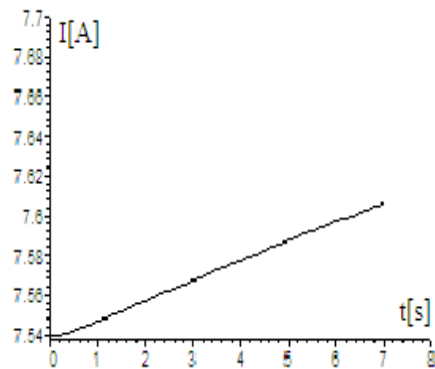
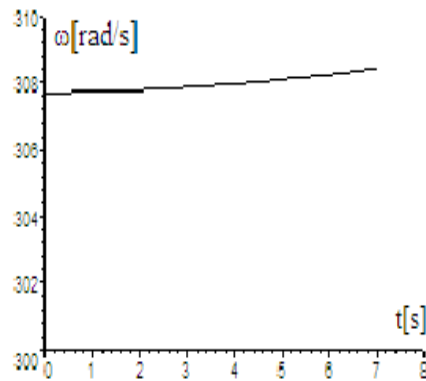


Fig.6.49. Variația în timp a tensiunii

Fig.6.50. Variația în timp a lui  $\sqrt{I_d^2 + I_q^2}$ Fig.6.51. Variația în timp a lui  $\omega$ 

Modelul matematic al **GS** fără înfășurări de amortizare nu extinde semnificativ domeniul de observare, rămânând sub 7[s]. Din acest motiv este necesară o simplificare mai accentuată a modelului în scopul extinderii intervalului de observare.

#### 6.2.4. Dinamica subsistemului (MD+GS) cu reglatoare de tip PID. Modelul matematic al GS cu înfășurări de amortizare.

##### 1) Reglatoare de tip PID debit și reglatoare de tip P excitație

Din ecuația regulatorului  $R_1$  pe debit:

$$\Delta q = K_1 \Delta \omega + K_2 \int \Delta \omega dt + K_3 \frac{d\Delta \omega}{dt}$$

Sau: 
$$q - q(0) = K_1(314 - \omega) + K_2 \int \Delta \omega dt + K_3 \frac{d\Delta \omega}{dt}$$

prin derivare rezultă: 
$$\frac{dq}{dt} = -K_1 \frac{d\omega}{dt} + K_2(314 - \omega) - K_3 \frac{d^2\omega}{dt^2}$$

Pentru constanta  $K_1$  se alege valoarea anterioară de la regulatorul de tip **P**:

$K_1 = 1.6895 \cdot 10^{-2}$  și deci rezultă:  $\frac{dq}{dt} = -1.6895 \cdot 10^{-2} \frac{d\omega}{dt} + K_2(314 - \omega) - K_3 \frac{d^2\omega}{dt^2}$

**Precizare:** În programul de calcul s-a înlocuit variabila  $q$ , cu  $a$ , deoarece pentru variabila  $q$  programul de calcul nu funcționează.

$$\frac{da}{dt} = -1.6895 \cdot 10^{-2} \frac{d\omega}{dt} + K_2(314 - \omega) - K_3 \frac{d^2\omega}{dt^2}$$

Cu notațiile:  $\frac{d\omega}{dt} = b$  ;  $\frac{d^2\omega}{dt^2} = \frac{db}{dt}$ , ecuația regulatorului de tip **PID**, devine:

$$\frac{da}{dt} = -1.6895 \cdot 10^{-2} \frac{d\omega}{dt} + K_2(314 - \omega) - K_3 \frac{db}{dt} \quad (6.42)$$

**Problema 1.** Calculul constantei  $K_3$ :

Cu notația  $\frac{d\omega}{dt} = b$ , ecuația diferențială a mișcării:

$$J \frac{d\omega}{dt} = 0.01I_d I_q + I_q I_E - 0.053I_d I_Q + 0.05I_q I_D - 0.28\omega + 18.704a$$

devine o ecuație algebrică:

$$Jb = 0.01I_d I_q + I_q I_E - 0.053I_d I_Q + 0.05I_q I_D - 0.28\omega + 18.704a,$$

și deci modelul matematic complet dat de sistemul 6.43,

$$\left\{ \begin{array}{l} -68.458I_d + \omega 1.4325 \times 10^{-2} I_q = 1.6I_d + 0.08 \frac{dI_d}{dt} - \\ \quad - \omega 0.07I_q + \frac{dI_E}{dt} + 0.05 \frac{dI_D}{dt} - \omega 0.053I_Q \\ -68.458I_q + \omega 1.4325 \times 10^{-2} I_d = \omega 0.08I_d + 1.6I_q + \\ \quad + 0.07 \frac{dI_q}{dt} + \omega I_E + \omega 0.05I_D + 0.053 \frac{dI_Q}{dt} \\ 56 + 0.0451(400 - \\ - \sqrt{(-68.458I_d + \omega 1.4325 \times 10^{-2} I_q)^2 + (-68.458I_q - \omega 1.4325 \times 10^{-2} I_d)^2} ) = \\ = \frac{dI_d}{dt} + 40I_E + 18.51 \frac{dI_E}{dt} + 0.56 \frac{dI_D}{dt} \\ 0 = 0.05 \frac{dI_d}{dt} + 7.95I_D + 0.07 \frac{dI_D}{dt} + 0.56 \frac{dI_E}{dt} \\ 0 = 0.053 \frac{dI_q}{dt} + 30.22I_Q + 0.25 \frac{dI_Q}{dt} \\ 5 \frac{d\omega}{dt} = 0.01I_d I_q + I_q I_E - 0.053I_d I_Q + 0.05I_q I_D - 0.28\omega + 18.704a \\ \frac{da}{dt} = -K_1 \frac{d\omega}{dt} + K_2(314 - \omega) - K_3 \frac{db}{dt} \\ a(0) = 5; b(0) = 0.001; I_E(0) = 1.4; I_d(0) = -1.9746; I_q(0) = -5.3312 \\ I_Q(0) = 0; I_D(0) = 0; \omega(0) = 307.72 \end{array} \right. \quad (6.43)$$

nu este rezolvabil prin metode numerice.

Pentru a rezolva problema, se calculează  $\frac{d\omega}{dt} = b$  din ecuația mișcării

$$b = \frac{d\omega}{dt} = 0.002I_d I_q + 0.2I_q I_E - 0.01I_d I_Q + 0.01I_q I_D - 0.06\omega + 3.704a$$

și se înlocuiește  $\frac{db}{dt}$  :

$$\begin{aligned} \frac{db}{dt} = & 0.002I_d \frac{dI_q}{dt} + 0.002 \frac{dI_d}{dt} I_q + 0.2I_q \frac{dI_E}{dt} + 0.2 \frac{dI_q}{dt} I_E - 0.01I_d \frac{dI_Q}{dt} - \\ & - 0.01 \frac{dI_d}{dt} I_Q + 0.01I_q \frac{dI_D}{dt} + 0.01 \frac{dI_q}{dt} I_D - 0.06 \frac{d\omega}{dt} + 3.704 \frac{da}{dt} \end{aligned}$$

în ecuația regulatorului

$$\begin{aligned} \frac{da}{dt} = & -1.6895 \cdot 10^{-2} \frac{d\omega}{dt} + 0.01(314 - \omega) - K_3 \frac{db}{dt} = \\ & -1.6895 \cdot 10^{-2} \frac{d\omega}{dt} + 0.01(314 - \omega) - K_3(0.002I_d \frac{dI_q}{dt} + 0.002 \frac{dI_d}{dt} I_q + \\ & + 0.2I_q \frac{dI_E}{dt} + 0.2 \frac{dI_q}{dt} I_E - 0.01I_d \frac{dI_Q}{dt} - 0.01 \frac{dI_d}{dt} I_Q + \\ & + 0.01I_q \frac{dI_D}{dt} + 0.01 \frac{dI_q}{dt} I_D - 0.06 \frac{d\omega}{dt} + 3.704 \frac{da}{dt}) \end{aligned}$$

Se obține  $K_3 = 2.6895 \cdot 10^{-2}$  .

Cunoscând  $K_1$ ,  $K_2$ , din simulările anterioare și  $K_3$  (calculat din ecuația regulatorului de tip **PID**), obținem sistemul diferențial complet, (cu înfășurări de amortizare), cu regulator de tip **PID**:

$$\left\{ \begin{aligned} -68.458 I_d + \omega 1.4325 \times 10^{-2} I_q &= 1.6 I_d + 0.08 \frac{dI_d}{dt} - \\ & - \omega 0.07 I_q + \frac{dI_E}{dt} + 0.05 \frac{dI_D}{dt} - \omega 0.053 I_Q \\ -68.458 I_q + \omega 1.4325 \times 10^{-2} I_d &= \omega 0.08 I_d + 1.6 I_q + \\ & + 0.07 \frac{dI_q}{dt} + \omega I_E + \omega 0.05 I_D + 0.053 \frac{dI_Q}{dt} \\ 56 + 0.0451 (400 - \\ & - \sqrt{(-68.458 I_d + \omega 1.4325 \times 10^{-2} I_q)^2 + (-68.458 I_q - \omega 1.4325 \times 10^{-2} I_d)^2}) = \\ & = \frac{dI_d}{dt} + 40 I_E + 18.51 \frac{dI_E}{dt} + 0.56 \frac{dI_D}{dt} \\ & 0 = 0.05 \frac{dI_d}{dt} + 7.95 I_D + 0.07 \frac{dI_D}{dt} + 0.56 \frac{dI_E}{dt} \\ & 0 = 0.053 \frac{dI_q}{dt} + 30.22 I_Q + 0.25 \frac{dI_Q}{dt} \\ 5 \frac{d\omega}{dt} &= 0.01 I_d I_q + I_q I_E - 0.053 I_d I_Q + 0.05 I_q I_D - 0.28 \omega + 18.704 a \\ \frac{da}{dt} &= -1.6895 \times 10^{-2} \frac{d\omega}{dt} + 0.01(314 - \omega) - 2.6895 \times 10^{-2} \frac{db}{dt} \\ a(0) &= 5 ; I_E(0) = 1.4 ; I_d(0) = -1.9746 ; I_q(0) = -5.3312 ; I_Q(0) = 0 \\ I_D(0) &= 0 ; \omega(0) = 307.72 \end{aligned} \right. \quad (6.44)$$

care conduce la următoarele simulări:

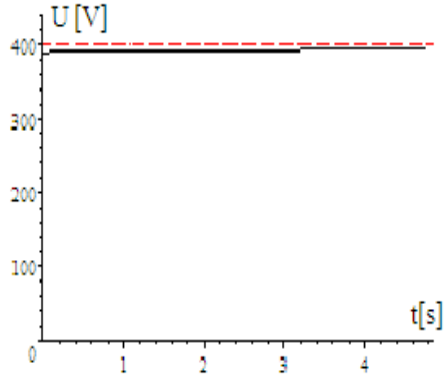


Fig. 6.52. Variația în timp a tensiunii

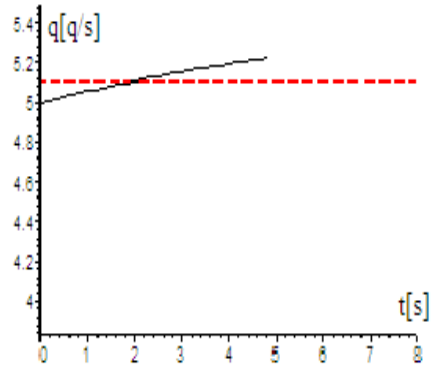


Fig. 6.53. Variația în timp a lui  $q$

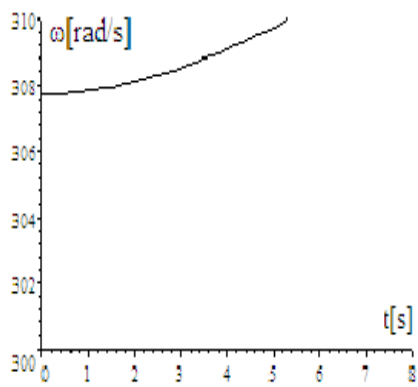


Fig. 6.54. Variația în timp a lui  $\omega$

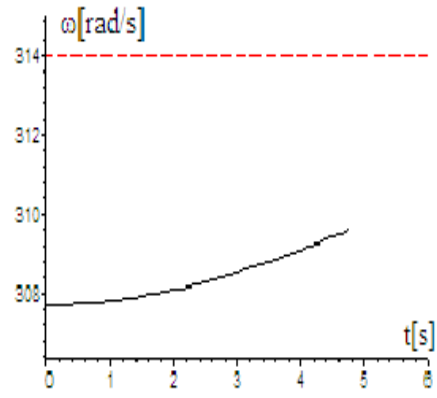


Fig.6.55. Variația în timp a lui  $\omega$  (detaliu)

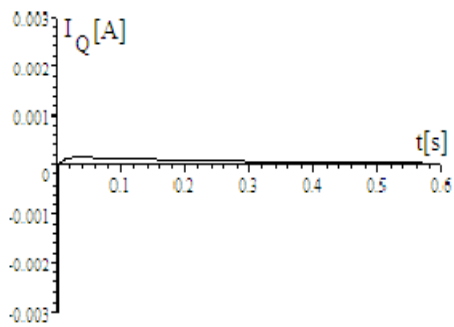


Fig.6.56. Variația în timp a lui  $I_Q$

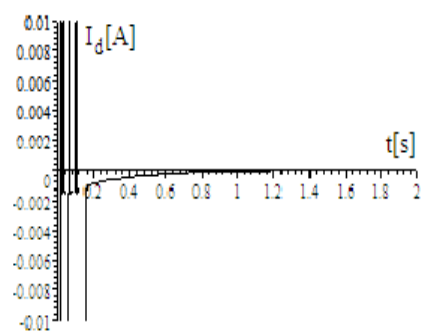


Fig.6.57. Variația în timp a lui  $I_d$



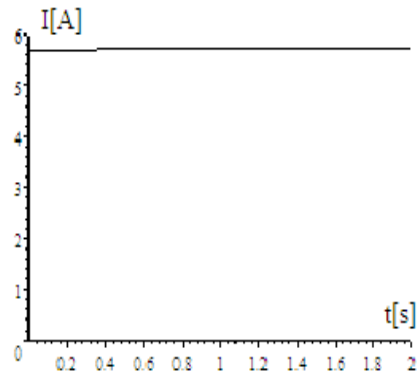
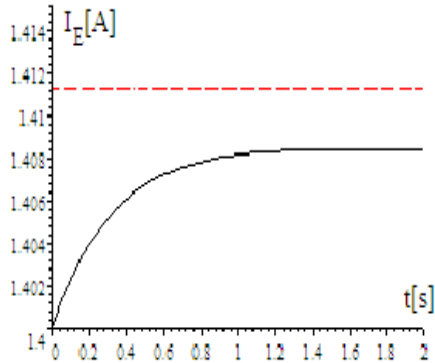


Fig.6.58. Variația în timp a lui  $I_E$  Fig.6.59. Variația în timp a lui  $\sqrt{I_d^2 + I_q^2}$

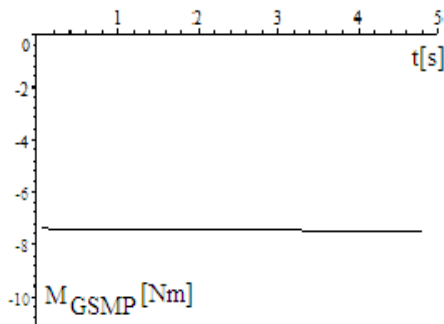


Fig. 6.60. Variația în timp a cuplului GSMP

### Problema 2: Importanța înfășurărilor de amortizare

În cazul funcționării **GS** în paralel cu o rețea de tensiune și frecvență date, și de putere mare, teoretic infinită, rolul înfășurărilor de amortizare este esențial, în sensul că ele pot atenua oscilațiile, (pendulările), procesului tranzitoriu și deci în toate modelele matematice trebuie să se țină seama de ele.

### 6.2.5. Dinamica subsistemului (MD+GS) cu regatoare de tip PID. Modelul matematic al GS fără înfășurări de amortizare

În cazul în care **GS** funcționează în regim autonom, cazul navelor, fiind deci singura sursă de energie electrică din rețea, tensiunea și frecvența nu mai sunt fixe și impuse de rețeaua de putere infinită, înfășurările de amortizare au un rol redus .

Având în vedere rolul redus al înfășurărilor de amortizare, modelul matematic al **GS** se simplifică și devine doar cu 3 ecuații (2 înfășurări statorice **d+q** și înfășurarea de excitație). Astfel sistemul 6.44 devine:

$$\begin{aligned}
 & -68.458I_d + \omega 1.4325 \times 10^{-2} I_q = 1.6I_d + 0.08 \frac{dI_d}{dt} - \omega 0.07I_q + \frac{dI_E}{dt} \\
 & -68.458I_q + \omega 1.4325 \times 10^{-2} I_d = \omega 0.08I_d + 1.6I_q + 0.07 \frac{dI_q}{dt} + \omega I_E \\
 & 56 + 0.0451(400 - \\
 & - \sqrt{(-68.458I_d + \omega 1.4325 \times 10^{-2} I_q)^2 + (-68.458I_q - \omega 1.4325 \times 10^{-2} I_d)^2} = \\
 & = \frac{dI_d}{dt} + 40I_E + 18.51 \frac{dI_E}{dt} \\
 & \qquad \qquad \qquad 5 \frac{d\omega}{dt} = 0.01I_d I_q + I_q I_E - 0.28\omega + 18.704a \qquad (6.45) \\
 & \frac{da}{dt} = -1.6895 \times 10^{-2} \frac{d\omega}{dt} + 0.01(314 - \omega) - 2.6895 \times 10^{-2} (0.002I_d \frac{dI_q}{dt} + \\
 & \quad + 0.002 \frac{dI_d}{dt} I_q + 0.2I_q \frac{dI_E}{dt} + 0.2 \frac{dI_q}{dt} I_E - 0.06 \frac{d\omega}{dt} + 3.704 \frac{da}{dt} ) \\
 & \qquad \qquad \qquad a(0) = 5 \\
 & \qquad \qquad \qquad I_E(0) = 1.4 \\
 & \qquad \qquad \qquad I_d(0) = -1.9746 \\
 & \qquad \qquad \qquad I_q(0) = -5.3312 \\
 & \qquad \qquad \qquad \omega(0) = 307.72
 \end{aligned}$$

pe baza căruia se va observa variația în timp a lui  $\omega$ .

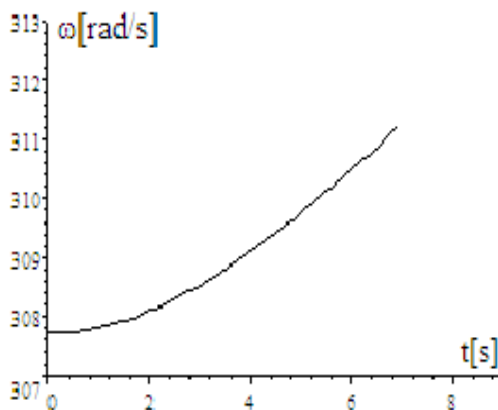


Fig.6.61. Variația în timp a lui  $\omega$

#### Concluzie:

Se observă că pentru estimările făcute la  $t=4.7[s]$ , pentru **GSMP cu înfășurări de amortizare**,  $\omega(4.7)=309.55[\text{rad/s}]$ , urmând ca aceasta să se stabilizeze, pe când pentru **GSMP fără înfășurări de amortizare**, la  $t=4.7[s]$ ,  $\omega(4.7)=309.55[\text{rad/s}]$ , după care pentru  $t=6[s]$  rezultă  $\omega(6)=310.49[\text{rad/s}]$ , deci aceasta crește.

### 6.3. Modelul matematic simplificat pentru tratarea problemelor dinamice ale subsistemului MD+GS

Pentru a putea extinde domeniul de observare în timp a procesului și deci pentru a se putea realiza o acordare corectă a regulatorului, se propune un model matematic al **GS** simplificat semnificativ, ajungându-se doar la 2 ecuații diferențiale: ecuația mișcării și ecuația înfășurării de excitație.

Simplificările modelului constau în:

- neglijarea înfășurărilor de amortizare;
- neglijarea componentei  $U_d$  a tensiunii statorice;

Având în vedere durata procesului, (zeci de secunde), aceste simplificări nu influențează semnificativ calitatea reglajului, oferind o posibilitate rezonabilă de aplicat în acordarea reglatoarelor.

Se analizează modificarea sarcinii active, deci a frecvenței, cu valoarea:

$$\Delta f = 1 [\text{Hz}]; \omega(0) = 307.72 [\text{rad} / \text{s}]$$

și a sarcinii reactive, deci a tensiunii cu valoarea:

$$\Delta U = 10 [\text{V}]; U(0) = 390 [\text{V}]$$

Pentru o anumită valoare a debitului de motorină, (de exemplu  $q=5[\text{g/s}]$ ), caracteristica mecanică a **MD** este:

$$M_{MD} = -1.5 \cdot 10^{-3} \omega^2 + 0.7\omega - 66.57$$

În zona de funcționare caracteristica mecanică liniarizată este sub forma:

$$M_{MD} = -0.28\omega + 93.52$$

sau pentru un debit oarecare  $q$  rezultă:

$$M_{MD} = -0.28\omega + 93.52 \frac{q}{5}$$

La o sarcină electrică de valoare  $R, L$ , , tensiunile  $U_d$  și  $U_q$  se scriu sub forma:

$$\underline{U} = U_d + jU_q = -(R + j\omega L)(I_d + jI_q)$$

sau:

$$U_d = -RI_d + \omega LI_q; U_q = -\omega LI_d - RI_q$$

La un debit  $q=5[\text{g/s}]$  și  $U=390[\text{V}]$ ,  $I_E=1.4[\text{A}]$ ,  $f=49[\text{Hz}]$ ,  $\omega=307.72[\text{rad/s}]$  rezultă sistemul de ecuații algebrice ce definește funcționarea subsistemului (**MD+GS**) în regim staționar. Se fac următoarele simplificări  $L_d = L_q = 0.08 [\text{H}]$ ,  $R_d = R_q = 0 [\Omega]$

și pentru  $I_E = 1.4 [\text{A}]$ , fluxul statoric fiind cel nominal, rezultă sistemul:

$$\begin{cases} q = 5; \sqrt{U_d^2 + U_q^2} = 390 \\ U_d = -\omega 0.08 I_q; U_q = \omega 0.08 I_d + \omega I_E \\ U_d = -RI_d + \omega LI_q; U_q = -\omega LI_d - RI_q \\ f = \frac{\omega}{6.28} \\ \psi_S = (0.08 I_q)^2 + (I_E + 0.07 I_d)^2 \\ 0 = I_q I_E - 0.28 \omega + 93.52 \frac{q}{5} \end{cases} \quad (6.46)$$

Soluția stabilă are datele:

$$L = 2.4732 \times 10^{-2} [H]; I_d = -2.5550 [A]; U_q = 367.91 [V]; \psi_S = 1.2915 [Wb];$$

$$I_q = -5.256 [A]; U_d = 129.39 [V]; R = 66.299 [\Omega]$$

Sarcina conectată la bornele **-GS-** are valoarea:

$$R = 66.299 [\Omega]$$

$$L = 2.4732 \times 10^{-2} [H]$$

Aceste valori constituie **condițiile inițiale** din sistemul de ecuații diferențiale ce definesc regimul tranzitoriu de trecere de la frecvența  $f=49[\text{Hz}]$  și tensiunea  $U=390[\text{V}]$ , la frecvența și tensiunea nominală.

Frecvența în sistem trebuie să revină la valoarea nominală și deci  $f=50[\text{Hz}]$ , iar tensiunea, la fel, trebuie să revină la valoarea nominală și deci

$$\sqrt{U_d^2 + U_q^2} = 400 [V]. \text{ Se formează sistemul algebric în necunoscute principale:}$$

$q$  - debitul de motorină;

$U_E$  - tensiunea pe înfășurarea de excitație.

$$\begin{cases} -66.299I_d + \omega 2.4732 \times 10^{-2} I_q = -\omega 0.08I_q \\ -66.299I_q - \omega 2.4732 \times 10^{-2} I_d = \omega 0.08I_d + \omega I_E \\ U_E = 40I_E \\ 0 = I_q I_E - 0.28\omega + 93.52 \frac{q}{5} \\ \omega = 314 \\ \sqrt{(\omega 0.07I_q)^2 + (\omega 0.08I_d + \omega I_E)^2} = 400 \end{cases} \quad (6.47)$$

Se obțin **valorile finale**:

$$I_d = -2.6989 [A]; U_E = 57.261 [V]; I_q = -5.4412 [A]; I_E = 1.4315 [A];$$

$$q = 5.117 [g/s].$$

Reglatoarele folosite sunt de tip: **P**, **PI** și **PID** și în cele ce urmează se dau evoluțiile în timp a principalelor mărimi:

- viteză unghiulară, curent de excitație, debit, pentru cele 3 tipuri de reglatoare.

### 6.3.1. Dinamica subsistemului (MD+GS) cu reglatoare de tip P

Se prezintă în continuare ecuațiile diferențiale ce definesc regimul tranzitoriu de trecere de la frecvența  $f=49[\text{Hz}]$  și tensiunea  $U=390[\text{V}]$ , la frecvența și tensiunea nominală, în condițiile în care reglatoarele sunt de tip **P**.

Determinarea constantelor de proporționalitate **K** pentru cele două reglatoare  $R_1$  și  $R_2$  se face în modul următor:

1) frecvența în sistem trebuie să revină la valoarea nominală și deci :

$$q = 5.117 [g/s]; \Delta q = 0.117 [g/s] \text{ și rezultă}$$

$$K_1 = \frac{\Delta q}{\Delta \omega} = \frac{5.117 - 5}{314 - 307.72} = 1.8631 \times 10^{-2} \text{ constanta regulatorului } R_1 ;$$

Ecuția regulatorului de tip **P** pe debitul de motorină  $q$  este:

$$\Delta q = K \Delta f = K_1 \Delta \omega = 1.8631 \times 10^{-2} (\omega - 307.72)$$

2) tensiunea în sistem, la fel, trebuie să revină la valoarea nominală de 400 V:

$$U_E = 57.261 [V]; \Delta U_E = 1.261 [V] \text{ și rezultă:}$$

$$K_2 = \frac{57.261 - 56}{10} = 0.1261 \text{ constanta regulatorului } R_2$$

Ecuția regulatorului de tip **P** pe tensiunea de excitație  $U_E$  este:

$$\Delta U_E = K_2 \Delta U = 0.1261(400 - U)$$

Cu valorile lui  $q$  și  $U_E$  astfel determinate se obține sistemul de ecuații diferențiale care stă la baza simulărilor prezentate în continuare:

$$\left\{ \begin{array}{l} -66.299I_d + \omega 2.4732 \times 10^{-2} I_q = 0.08 \frac{dI_d}{dt} - \omega 0.08 I_q + \frac{dI_E}{dt} \\ -66.299I_q - \omega 2.4732 \times 10^{-2} I_d = \omega 0.08 I_d + 0.08 \frac{dI_q}{dt} + \omega I_E \\ 56 + 0.1261(400 - \\ - \sqrt{(-66.229I_d + \omega 2.4732 \times 10^{-2} I_q)^2 + (-66.299I_q - \omega 2.4732 \times 10^{-2} I_d)^2} \\ = \frac{dI_d}{dt} + 40I_E + 18.51 \frac{dI_E}{dt} \\ 5 \frac{d\omega}{dt} = I_q I_E - 0.28\omega + 93.52 \frac{5 + 1.8631 \times 10^{-2} (314 - \omega)}{5} \end{array} \right. \quad (6.48)$$

$$\begin{array}{l} I_E(0) = 1.4 \\ I_d(0) = -2.555 \\ I_q(0) = -5.256 \\ \omega(0) = 307.72 \end{array}$$

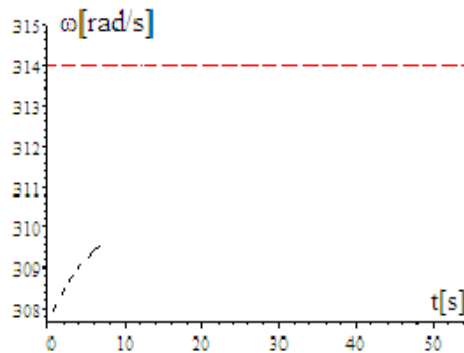


Fig.6.62. Variația în timp a lui  $\omega$

Procesul este observabil doar până la  $t=7[s]$ , din cauza dificultăților matematice din programul **Scientific WorkPlace**. Pentru a mări intervalul de timp se fac unele simplificări în sensul că se neglijează componenta  $U_d = -\omega 0.08 I_q$  și

$I_q$  se calculează din ecuația:

$$-66.299I_q - \omega 2.4732 \times 10^{-2} I_d = \omega 0.08 I_d + 0.08 \frac{dI_q}{dt} + \omega I_E$$

care prin simplificare devine:

$$-66.299I_q = \omega I_E \text{ sau } I_q = -\frac{\omega I_E}{66.299};$$

deoarece procesele sunt lente se pot neglija termenii ce conțin derivate din cele două ecuații statorice, obținându-se sistemul:

$$\begin{cases} 56 + 0.1261(400 - \omega I_E) = 40I_E + 18.51 \frac{dI_E}{dt} \\ 5 \frac{d\omega}{dt} = -\frac{\omega I_E^2}{66.299} - 0.28\omega + 93.52 \frac{5 + 1.8631 \times 10^{-2} (314 - \omega)}{5} \end{cases} \quad (6.49)$$

$$I_E(0) = 1.4$$

$$\omega(0) = 307.72$$

Înlocuind variabila  $I_E = a$ , (deoarece sistemul de operare se blochează la graficul lui  $I_E$ ), se obține sistemul:

$$\begin{cases} 56 + 0.1261(400 - \omega a) = 40a + 18.51 \frac{da}{dt} \\ 5 \frac{d\omega}{dt} = -\frac{\omega \cdot a^2}{66.299} - 0.28\omega + 93.52 \frac{5 + 1.8631 \times 10^{-2} (314 - \omega)}{5} \end{cases} \quad (6.50)$$

$$a(0) = 1.4$$

$$\omega(0) = 307.72$$

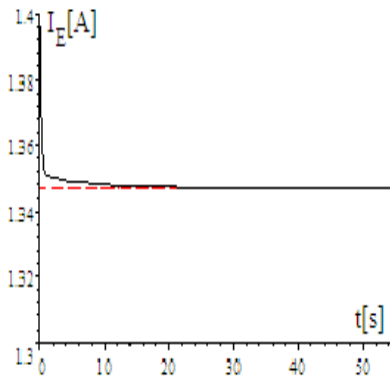


Fig.6.63. Variația în timp a lui  $I_E$

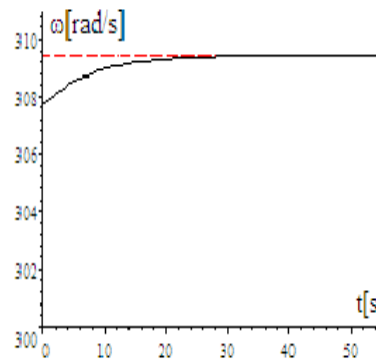


Fig.6.64. Variația în timp a lui  $\omega$

### 6.3.2. Dinamica subsistemului (MD+GS) cu reglare de tip PI

Din ecuația regulatorului  $R_1$  pe **debit**:

$$\Delta q = K_1 \Delta \omega + K_2 \int \Delta \omega dt$$

sau

$$\Delta q = K_1(314 - \omega) + K_2 \int (314 - \omega) dt$$

prin derivare rezultă:

$$-\frac{dq}{dt} = -K_1 \frac{d\omega}{dt} + K_2(314 - \omega)$$

Pentru constanta  $K_1$  se obține :

$$K_1 = \frac{0.1062}{314 - 307.72} = 1.6911 \times 10^{-2}$$

și deci rezultă:

$$-\frac{dq}{dt} = -1.6911 \times 10^{-2} \frac{d\omega}{dt} + K_2(314 - \omega)$$

Din ecuația regulatorului  $R_2$  pe tensiunea de **excitație**  $U_E$  :

$$\Delta U_E = K_1 \Delta U + K_2 \int \Delta U dt$$

prin derivare rezultă:

$$-\frac{dU_E}{dt} = -K_1 \frac{dU}{dt} + K_2(400 - U)$$

iar  $U = \omega I_E$ , obținându-se:

$$-\frac{dU_E}{dt} = -K_1 \frac{d\omega}{dt} I_E - K_1 \frac{dI_E}{dt} \omega + K_2(400 - \omega I_E)$$

Pentru constanta  $K_1$  se obține :

$$K_1 = \frac{\Delta U_E}{\Delta U} = \frac{85.569 - 85.134}{400 - 390} = 0.0435$$

și deci rezultă:

$$-\frac{dU_E}{dt} = -0.0435 \frac{d\omega}{dt} I_E - 0.0435 \frac{dI_E}{dt} \omega + K_2(400 - \omega I_E)$$

Cu valorile lui  $q$  și  $U_E$  astfel determinate se obține sistemul de ecuații diferențiale care stă la baza simulărilor prezentate în continuare:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_E = 40I_E + 18.51 \frac{dI_E}{dt} \\ 5 \frac{d\omega}{dt} = \frac{\omega I_E^2}{-67.172} - 0.28\omega + 93.52 \frac{q}{5} \\ -\frac{dq}{dt} = -1.6911 \times 10^{-2} \frac{d\omega}{dt} + K_2 q(314 - \omega) \\ -\frac{dU_E}{dt} = -0.0435 \frac{d\omega}{dt} I_E - 0.0435 \frac{dI_E}{dt} \omega + K_2 U_E (400 - \omega I_E) \\ U_E(0) = 85.134 \\ q(0) = 5 \\ I_E(0) = 1.2674 \\ \omega(0) = 307.72 \end{array} \right. \quad (6.51)$$

sau cu notațiile  $I_E = a$  ;  $U_E = V$  se obține :

$$\left. \begin{aligned}
 V &= 40a + 18.51 \frac{da}{dt} \\
 5 \frac{d\omega}{dt} &= \frac{\omega a^2}{-67.172} - 0.28\omega + 93.52 \frac{q}{5} \\
 -\frac{dq}{dt} &= -1.6911 \times 10^{-2} \frac{d\omega}{dt} + K_{2q}(314 - \omega) \\
 -\frac{dV}{dt} &= -0.0435 \frac{d\omega}{dt} a - 0.0435 \frac{da}{dt} \omega + K_{2U_E}(400 - \omega a) \\
 V(0) &= 85.134 \\
 q(0) &= 5 \\
 a(0) &= 1.2674 \\
 \omega(0) &= 307.72
 \end{aligned} \right\} \quad (6.52)$$

1) Pentru  $K_{2q} = 0.1$ ;  $K_{2U_E} = 0.2$ , se obțin următoarele variații în timp ale mărimilor  $I_E$  și  $\omega$ :

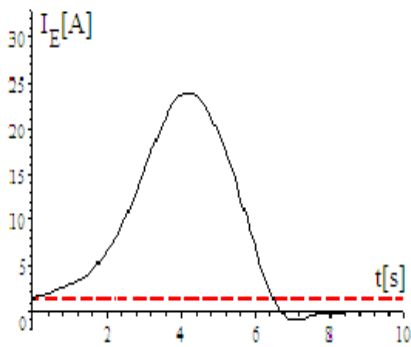


Fig.6.65. Variația în timp a lui  $I_E$

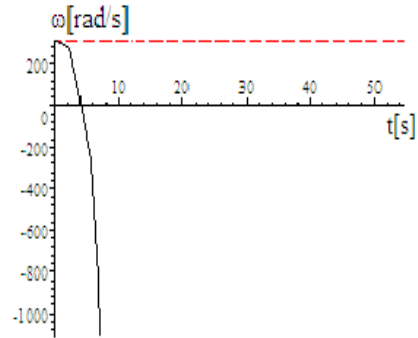


Fig.6.66. Variația în timp a lui  $\omega$

### 6.3.3. Dinamica subsistemului (MD+GS) cu reglatoare de tip PID

Din ecuația regulatorului  $R_1$  pe **debit**:

$$\Delta q = K_1 \Delta \omega + K_2 \int \Delta \omega dt + K_3 \frac{d\Delta \omega}{dt}$$

sau

$$\Delta q = K_1(314 - \omega) + K_2 \int (314 - \omega) dt + K_3 \frac{d(314 - \omega)}{dt}$$

prin derivare rezultă:

$$-\frac{dq}{dt} = -K_1 \frac{d\omega}{dt} + K_2(314 - \omega) - K_3 \frac{d^2\omega}{dt^2}$$

Pentru constanta  $K_1$  se obține:

$$K_1 = \frac{0.1062}{314 - 307.72} = 1.6911 \times 10^{-2} \text{ și deci rezultă:}$$



$$-\frac{dq}{dt} = -1.6911 \times 10^{-2} \frac{d\omega}{dt} + K_2(314 - \omega) - K_3 \frac{d^2\omega}{dt^2}$$

Din ecuația regulatorului  $R_2$  pe tensiunea de **excitație**  $U_E$ :

$$\Delta U_E = K_1 \Delta U + K_2 \int \Delta U dt + K_3 \frac{d\Delta U}{dt}$$

prin derivare rezultă:

$$-\frac{dU_E}{dt} = -K_1 \frac{dU}{dt} + K_2(400 - U) - K_3 \frac{d^2U}{dt^2}$$

Înlocuind  $U$  cu  $\omega I_E$  se obține:

$$-\frac{dU_E}{dt} = -K_1 \left( \frac{d\omega}{dt} I_E + \frac{dI_E}{dt} \omega \right) + K_2(400 - \omega I_E) - K_3 \left( \omega \frac{d^2 I_E}{dt^2} + 2 \frac{d\omega}{dt} \frac{dI_E}{dt} + I_E \frac{d^2 \omega}{dt^2} \right)$$

Pentru constanta  $K_1$  se obține:

$$K_1 = \frac{\Delta U_E}{\Delta U} = \frac{85.569 - 85.134}{400 - 390} = 0.0435 \text{ și deci rezultă:}$$

$$-\frac{dU_E}{dt} = -0.0435 \left( \frac{d\omega}{dt} I_E + \frac{dI_E}{dt} \omega \right) + K_2(400 - \omega I_E) - K_3 \left( \omega \frac{d^2 I_E}{dt^2} + 2 \frac{d\omega}{dt} \frac{dI_E}{dt} + I_E \frac{d^2 \omega}{dt^2} \right)$$

Cu valorile lui  $q$  și  $U_E$  astfel determinate se obține sistemul de ecuații diferențiale care stă la baza simulărilor prezentate în continuare.

$$\left. \begin{aligned} U_E &= 40I_E + 18.51 \frac{dI_E}{dt} \\ 5 \frac{d\omega}{dt} &= \frac{\omega I_E^2}{-67.172} - 0.28\omega + 93.52 \frac{q}{5} \\ -\frac{dq}{dt} &= -1.6911 \times 10^{-2} \frac{d\omega}{dt} + K_2 q(314 - \omega) - K_3 q \frac{d^2\omega}{dt^2} \\ -\frac{dU_E}{dt} &= -0.0435 \left( \frac{d\omega}{dt} I_E + \frac{dI_E}{dt} \omega \right) + K_2 U_E (400 - \omega I_E) - \\ &\quad - K_3 q \left( \omega \frac{d^2 I_E}{dt^2} + 2 \frac{d\omega}{dt} \frac{dI_E}{dt} + I_E \frac{d^2 \omega}{dt^2} \right) \\ U_E(0) &= 85.134 \\ q(0) &= 5 \\ I_E(0) &= 1.2674 \\ \omega(0) &= 307.72 \end{aligned} \right\} \quad (6.53)$$

Cu notațiile:  $b = \frac{d\omega}{dt}$  și  $c = \frac{dI_E}{dt}$  se obțin derivatele de ordinul al doilea:

$$\frac{d^2\omega}{dt^2} = \frac{db}{dt} \text{ și } \frac{d^2 I_E}{dt^2} = \frac{dc}{dt} \text{ și astfel rezultă:}$$

$$-\frac{dq}{dt} = -1.6911 \times 10^{-2} \frac{d\omega}{dt} + K_2(314 - \omega) - K_3 \frac{db}{dt}$$

$$-\frac{dU_E}{dt} = -0.0435 \left( \frac{d\omega}{dt} I_E + \frac{dI_E}{dt} \omega \right) + K_2(400 - \omega I_E) - K_3 \left( \omega \frac{dc}{dt} + 2 \frac{d\omega}{dt} \frac{dI_E}{dt} + I_E \frac{db}{dt} \right)$$

iar cu notațiile  $I_E = a$ ,  $U_E = V$  se obține :

$$-\frac{dV}{dt} = -0.0435 \left( \frac{d\omega}{dt} a + \frac{da}{dt} \omega \right) + K_2(400 - \omega a) - K_3 \left( \omega \frac{dc}{dt} + 2 \frac{d\omega}{dt} \frac{da}{dt} + a \frac{db}{dt} \right)$$

**Problema 1:** Cu notația  $b = \frac{d\omega}{dt}$ , ecuația diferențială a mișcării devine:

$$5 \frac{d\omega}{dt} = \frac{\omega I_E^2}{-67.172} - 0.28\omega + 93.52 \frac{q}{5}$$

devine o ecuație algebrică

$$5b = \frac{\omega I_E^2}{-67.172} - 0.28\omega + 93.52 \frac{q}{5}$$

și deci sistemul 6.53 nu este rezolvabil, prin metode numerice. Pentru a rezolva problema se calculează  $b = \frac{d\omega}{dt}$  din ecuația mișcării:

$$b = \frac{\omega a^2}{-335.86} - 0.056\omega + 18.704 \frac{q}{5}$$

și astfel se obține:

$$\frac{db}{dt} = \frac{a^2}{-335.86} \frac{d\omega}{dt} + \frac{2\omega}{-335.86} \frac{da}{dt} - 0.056 \frac{d\omega}{dt} + \frac{18.704}{5} \frac{dq}{dt} =$$

$$= - \left( \frac{a^2}{335.86} + 0.056 \right) \frac{d\omega}{dt} - \frac{2\omega}{335.86} \frac{da}{dt} + \frac{18.704}{5} \frac{dq}{dt}$$

Cu aceste precizări se obțin ecuațiile reguletoarelor:

$$-\frac{dq}{dt} = -1.6911 \times 10^{-2} \frac{d\omega}{dt} + K_{2q}(314 - \omega) -$$

$$- K_{3q} \left[ - \left( \frac{a^2}{335.86} + 0.056 \right) \frac{d\omega}{dt} - \frac{2\omega}{335.86} \frac{da}{dt} + \frac{18.704}{5} \frac{dq}{dt} \right] \quad (6.54)$$

$$-\frac{dV}{dt} = -0.0435 \left( \frac{d\omega}{dt} a + \frac{da}{dt} \omega \right) + K_{2V}(400 - \omega a) - K_{3V} \left( \omega \frac{dc}{dt} + 2 \frac{d\omega}{dt} \frac{da}{dt} + a \frac{db}{dt} \right) \quad (6.55)$$

Derivata  $\frac{dc}{dt}$  se elimină din ecuația înfășurării de excitație

$$V = 40a + 18.51 \frac{da}{dt} \text{ și se obține } \frac{dc}{dt} = \frac{1}{18.51} \frac{dV}{dt} - 2.161 \frac{da}{dt} \text{ și rezultă:}$$

$$-\frac{dV}{dt} = -0.0435 \left( \frac{d\omega}{dt} a + \frac{da}{dt} \omega \right) + K_{2V}(400 - \omega a) - K_{3V} \left[ \omega \left( \frac{1}{18.51} \frac{dV}{dt} - 2.161 \frac{da}{dt} \right) + 2 \frac{d\omega}{dt} \frac{da}{dt} + a \frac{db}{dt} \right]$$

Valorile de regim permanent pentru  $V$ ,  $\omega$ ,  $a$ ,  $q$  se obțin din sistemul algebric:

$$\begin{cases} V = 40a \\ 0 = -\frac{a^2\omega}{67.172} - 0.28\omega + 93.52\frac{q}{5} \\ 0 = 0.1(314 - \omega) \\ 0 = 0.2(400 - \omega a) \end{cases} \quad (6.56)$$

ale cărui soluții sunt:  $\omega = 314$  ;  $a = 1.2739$  ;  $V = 50.955$  ;  $q = 5.1062$

Se obține sistemul diferențial complet, cu regulator de tip PID:

1)  $K_{2q} = 0.1$  ;  $K_{2V} = 0.2$  ;  $K_{3q} = 0.15$  ;  $K_{3V} = 0.25$

$$\begin{cases} U_E = 40I_E + 18.51\frac{dI_E}{dt} \\ 5\frac{d\omega}{dt} = \frac{\omega I_E^2}{-67.172} - 0.28\omega + 93.52\frac{q}{5} \\ -\frac{dq}{dt} = -1.6911 \times 10^{-2} \frac{d\omega}{dt} + 0.1(314 - \omega) - \\ -0.15 \left[ -\left( \frac{a^2}{335.86} + 0.056 \right) \frac{d\omega}{dt} - \frac{2\omega}{335.86} \frac{da}{dt} + \frac{18.704}{5} \frac{dq}{dt} \right] \\ V(0) = 85.134; q(0) = 5; a(0) = 1.2674; \omega(0) = 307.72 \end{cases} \quad (6.57)$$

$$-\frac{dV}{dt} = -0.0435 \left( \frac{d\omega}{dt} a + \frac{da}{dt} \omega \right) + 0.2(400 - \omega a) - 0.25\omega \left\{ \left( \frac{1}{18.51} \frac{dV}{dt} - 2.161 \frac{da}{dt} \right) + 2 \frac{d\omega}{dt} \frac{da}{dt} + \right. \\ \left. + a \left[ -\left( \frac{a^2}{335.86} + 0.056 \right) \frac{d\omega}{dt} - \frac{2\omega}{335.86} \frac{da}{dt} + \frac{18.704}{5} \frac{dq}{dt} \right] \right\}$$

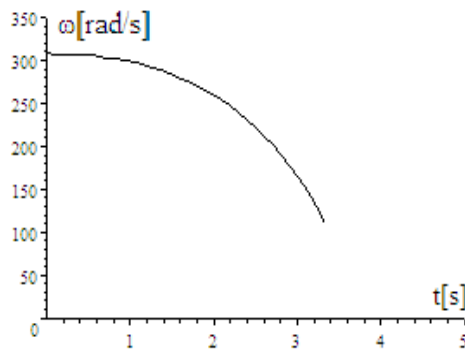


Fig.6.67. Variația în timp a lui  $\omega$

În procesele tranzitorii la subsistemul (**MD+GSMP**) reglatoarele au un rol esențial.

1. **Regulatorul P**, bine reglat, realizează o stabilitate foarte bună fără oscilații la  $\omega$  și la  $I_E$ . Constanta de proporționalitate **K** se determină simplu din valorile finale și cele inițiale, atât pentru regulatorul pe excitație, cât și pentru regulatorul pe debit.

2. **Regulatorul PI** introduce oscilații în sistem. Regimuri stabile de funcționare se obțin la valori foarte mici pentru constantele integratoare, de exemplu la  $K_{2q} = -0.001$ , (la debit), și  $K_{2U_E} = -0.002$ , (la tensiunea  $U_E$ ). Prin micșorarea constantelor integratoare se elimină oscilațiile, dar nu și suprareglajul, ca de exemplu la  $K_{2q} = -0.0001$  și  $K_{2U_E} = -0.0002$ .

La valori foarte mici:  $K_{2q} = -0.00001$  și  $K_{2U_E} = -0.00002$  se elimină suprareglajul la turaj/viteză unghiulară.

La valori pentru  $K_{2q}$  sub  $-0.001$  și sub  $-0.002$  pentru  $K_{2U_E}$  funcționarea devine instabilă.

3. **Regulatorul PID**, la valori mici pentru constantele integratoare și derivate, stabilizează procesul de cinci ori mai repede (în 200[s]) decât regulatorul PI (la care durează 1000[s]).

La PID, partea matematică este de o mare complexitate prin apariția derivatelor de ordinul al doilea și din această cauză se impun o seamă de prelucrări, în sensul aducerii sistemului de ecuații diferențiale la o formă compatibilă în **Scientific WorkPlace**.

## 6.4. Concluzii

Datorită faptului că energia solară este fluctuantă în timp se impune ca sistemul energetic de pe navă să fie dotat și cu unul sau mai multe grupuri DIESEL generator care pe baza motorinei consumate să furnizeze energie electrică necesară în condiții date, acestea fiind: funcționarea la randament maxim, sistemul fiind dotat cu **AE** sau funcționarea după necesitățile impuse de consumatorii electrici, caz în care nu se mai impune folosirea **AE**. S-au analizat toate cele trei tipuri de regulatoare folosite: P, PI, PID, la care s-au dedus constantele specifice funcționării stabile. Implementarea ecuațiilor diferențiale ale regulatorului alături de ecuațiile modelului ortogonal al generatorului și de ecuațiile caracteristice mecanice ale motorului DIESEL. Prin simulări s-au putut vedea cazurile stabile sau instabile. Principalele contribuții personale din acest capitol sunt:

- implementarea ecuațiilor reguletoarelor în ansamblul sistemului de ecuații diferențiale ce conține motorul DIESEL și GS;
- transformarea ecuațiilor regulatorului PID astfel încât să fie posibilă o rezolvare numerică, deoarece în faza inițială existau atât ecuații diferențiale, cât și algebrice care făcea imposibilă rezolvarea pe cale numerică;
- acordarea prin simulări numerice a reguletoarelor folosite astfel încât să se poată elimina cazurile de instabilitate;
- analiza ponderii de înfășurare în procesele tranzitorii cu observarea importantă că acestea în sistemele inerțiale mari au o pondere redusă;
- estimarea șocurilor de sarcină ce apar în procesele tranzitorii, șocuri de natură electrică (curenți, tensiuni, frecvență) precum și șocuri de natură mecanică (cupluri, turații);
- rezolvarea ecuațiilor diferențiale cu nucleul Maple (SWP).

## 7. Aplicații numerice și verificări experimentale

Capitolul de față este consacrat aplicațiilor numerice și analizării rezultatelor experimentale pe o turbină de vânt aparținând firmei MONSSON ALMA, testată în zona litoralului Mării Negre și pe un grup Diesel – Generator aparținând unei nave militare.

În prima parte a capitolului se prezintă o turbină eoliană având puterea  $P=5\text{KW}$ , montată în zona litoralului românesc al Mării Negre. A doua parte cuprinde înregistrările vitezei vântului pe o perioadă de timp de 3 luni de zile. Puterea activă debitată de sistemul (TV+GSMP) a fost măsurată experimental și s-a prezentat evoluția ei în timp. S-au determinat caracteristicile mecanice ale TV pentru diverse viteze ale vântului și s-au verificat cu cele din modelul matematic al TVN.

În partea a doua a capitolului s-au efectuat verificări experimentale a dependenței puterii maxime de cubul vitezei vântului.

La finalul capitolului se prezintă comportarea sistemului Diesel-Generator prin înregistrarea în timp a turației și tensiunii la generatorul electric reglat cu un regulator de tip P.

La sfârșitul capitolului sunt prezentate concluziile cu privire la analiza rezultatelor experimentale.

### 7.1. Aplicații numerice

Aplicațiile numerice au la bază modelul ortogonal al generatorului și se bazează pe o anumită variație a vitezei vântului în timp.

#### 7.1.1. Calculul rezistenței de sarcină

**Aplicația 1.** Determinarea dependenței rezistenței de sarcină față de viteza vântului, în regim dinamic, cunoscându-se  $V = 5 + t$ ,  $V(0) = 5[m/s]$  și  $V' = 1$ .

Pentru  $V = 5 + t$  și  $V(0) = 5[m/s]$  rezultă  $V' = 1$  și se analizează dependența lui **R** de **V**:

$$1) R = \frac{R(0) \cdot \sqrt{V(0)}}{\sqrt{V}} = \frac{831 \cdot \sqrt{5}}{\sqrt{V}} = \frac{1858.2}{\sqrt{V}}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 = \left( 1.6 + \frac{1858.2}{\sqrt{V}} \right) a + 0.08 \frac{da}{dV} - \omega 0.08 b \\ 0 = \left( 1.6 + \frac{1858.2}{\sqrt{V}} \right) b + 0.08 \frac{db}{dV} + \omega 0.08 a + \omega 1.3 \\ 5 \frac{d\omega}{dV} = 1.3b + \left( -\frac{10}{314} \omega + 20 \left( \frac{V}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} \\ \frac{dW}{dV} = (a^2 + b^2) \frac{1858.2}{\sqrt{V}} \\ a(5) = -1.4782 \times 10^{-2} \\ b(5) = -0.48989 \\ \omega(5) = 314.04 \\ W(5) = 0. \end{array} \right.$$

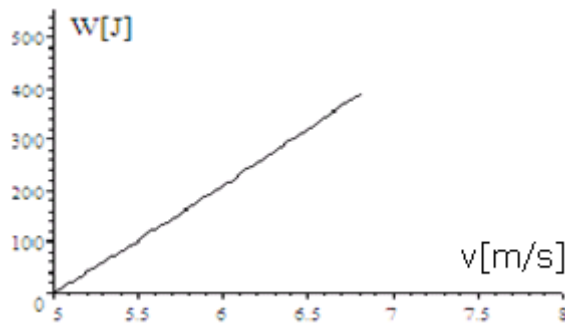


Fig.7.1. Dependența în timp a energiei de viteza vântului

$$2) R = \frac{R(0) \cdot V(0)^2}{V^2} = \frac{831 \cdot 25}{V^2} = \frac{20775}{V^2}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 = \left( 1.6 + \frac{20775}{V^2} \right) a + 0.08 \frac{da}{dV} - \omega 0.08 b \\ 0 = \left( 1.6 + \frac{20775}{V^2} \right) b + 0.08 \frac{db}{dV} + \omega 0.08 a + \omega 1.3 \\ 5 \frac{d\omega}{dV} = 1.3b + \left( -\frac{10}{314} \omega + 20 \left( \frac{V}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} \\ \frac{dW}{dV} = (a^2 + b^2) \frac{20775}{V^2} \\ a(5) = -1.4782 \times 10^{-2} \\ b(5) = -0.48989 \\ \omega(5) = 314.04 \\ W(5) = 0. \end{array} \right.$$

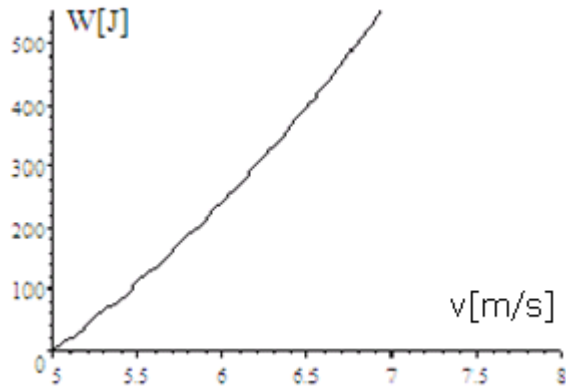


Fig.7.2. Dependența în timp a energiei de viteza vântului

$$3) R = \frac{R(0) \cdot V(0)^4}{V^4} = \frac{831 \cdot 25 \cdot 25}{V^4} = \frac{519380}{V^4}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 = \left( 1.6 + \frac{519380}{V^4} \right) a + 0.08 \frac{da}{dV} - \omega 0.08 b \\ 0 = \left( 1.6 + \frac{519380}{V^4} \right) b + 0.08 \frac{db}{dV} + \omega 0.08 a + \omega 1.3 \\ 5 \frac{d\omega}{dV} = 1.3b + \left( -\frac{10}{314} \omega + 20 \left( \frac{V}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} \\ \frac{dW}{dV} = (a^2 + b^2) \frac{519380}{V^4} \\ a(5) = -1.4782 \times 10^{-2} \\ b(5) = -0.48989 \\ \omega(5) = 314.04 \\ W(5) = 0. \end{array} \right.$$

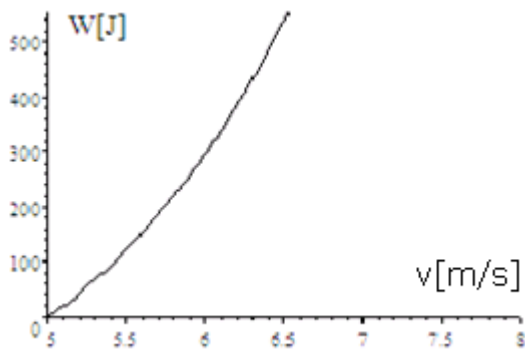


Fig.7.3. Dependența în timp a energiei de viteza vântului

$$4) R = \frac{R(0) \cdot V(0)^8}{V^8} = \frac{831 \cdot 25 \cdot 25 \cdot 625}{V^8} = \frac{3.2461 \times 10^8}{V^8}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 = \left( 1.6 + \frac{3.2461 \times 10^8}{V^8} \right) a + 0.08 \frac{da}{dV} - \omega 0.08 b \\ 0 = \left( 1.6 + \frac{3.2461 \times 10^8}{V^8} \right) b + 0.08 \frac{db}{dV} + \omega 0.08 a + \omega 1.3 \\ 5 \frac{d\omega}{dV} = 1.3b + \left( -\frac{10}{314} \omega + 20 \left( \frac{V}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} \\ \frac{dW}{dV} = (a^2 + b^2) \frac{3.2461 \times 10^8}{V^8} \\ a(5) = -1.4782 \times 10^{-2} \\ b(5) = -0.48989 \\ \omega(5) = 314.04 \\ W(5) = 0. \end{array} \right.$$

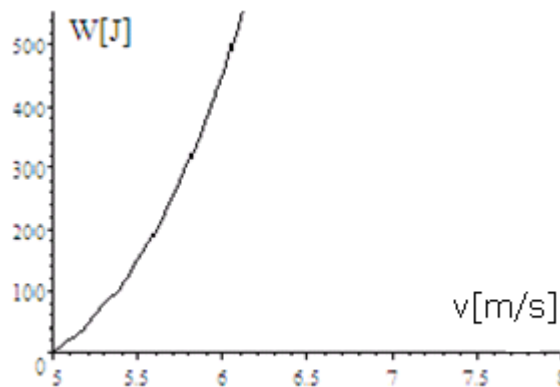


Fig.7.4. Dependența în timp a energiei de viteza vântului

**Aplicația 2.** Calculul dependenței rezistenței de sarcină față de viteza vântului, în regim dinamic- MAXIMUL ENERGIEI pentru  $R_{sarcină}$  - variabilă.

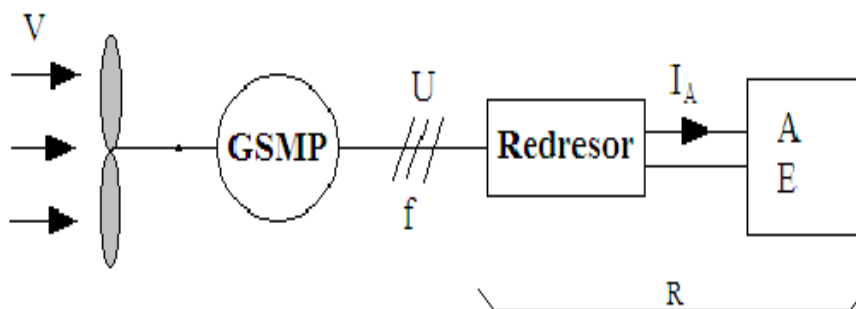


Fig.7.5. Schema bloc a sistemului TVN+GSMP cu R variabil

cazul 1:

**Energia  $W$  și viteza  $\omega$  la  $t = 5555[s]$**



- a)  $R = 831[\Omega]$ ;  $\omega(5555) = 323.08[\text{rad} / \text{s}]$ ,  $W(5555) = 1.1654 \times 10^6[\text{J}]$ ,
- b)  $R = 931[\Omega]$ ;  $\omega(5555) = 341.14[\text{rad} / \text{s}]$ ,  $W(5555) = 1.1334 \times 10^6[\text{J}]$ ,
- c)  $R = 531[\Omega]$ ;  $\omega(5555) = 252.2[\text{rad} / \text{s}]$ ,  $W(5555) = 1.2235 \times 10^6[\text{J}]$ ,
- d)  $R = 231[\Omega]$ ;  $\omega(5555) = 140.66[\text{rad} / \text{s}]$ ,  $W(5555) = 1.0536 \times 10^6[\text{J}]$ ,
- e)  $R = 31[\Omega]$ ;  $\omega(5555) = 23.249[\text{rad} / \text{s}]$ ,  $W(5555) = 4.3881 \times 10^5[\text{J}]$ ,
- f)  $R = 1531[\Omega]$ ;  $\omega(5555) = 415.77[\text{rad} / \text{s}]$ ,  $W(5555) = 9.3638 \times 10^5[\text{J}]$ .

S-a obținut astfel rezistența optimă de sarcină:

$$R_{sacina} = 531 - \beta \sin 0.3t$$

cazul 2:

În cazul de față se presupune o variație armonică pentru rezistența de sarcină:

a)  $R = (531 - 77 \sin 0.3t)[\Omega]$

$$\left\{ \begin{array}{l} 5 \frac{d\omega}{dt} = \left( -812.5\omega \frac{(531 - 77 \sin 0.3t)}{625 \cdot (531 - 77 \sin 0.3t)^2 + 4\omega^2} \right) 1.3 + \left( -\frac{10}{314} \omega + 20 \left( 1 + \frac{2 \sin 0.3t}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} \\ \frac{dW}{dt} = (531 - 77 \sin 0.3t) \left( \frac{1056.3 \omega^2}{625 \cdot (531 - 77 \sin 0.3t)^2 + 4\omega^2} \right) \\ \omega(0) = 314. \\ W(0) = 0. \end{array} \right.$$

**Variația armonică a rezistenței de sarcină**

b)  $R = (531 - 177 \sin 0.3t)[\Omega]$

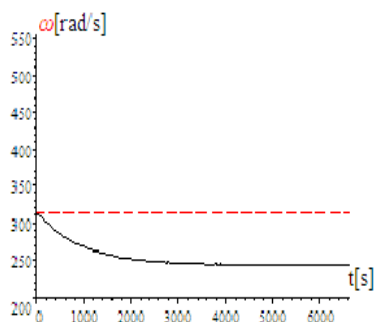


Fig. 7.6. Variația în timp a pulsației

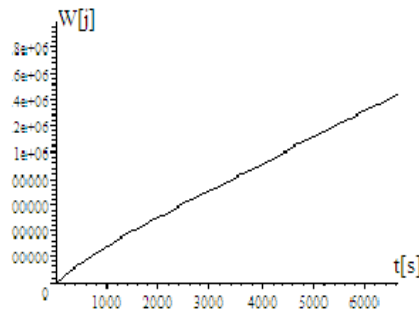


Fig. 7.7. Variația în timp a energiei

$$\omega(5555) = 243.26[\text{rad} / \text{s}], W(5555) = 1.2225 \times 10^6[\text{J}]$$

c)  $R = (531 - 277 \sin 0.3t)[\Omega]$

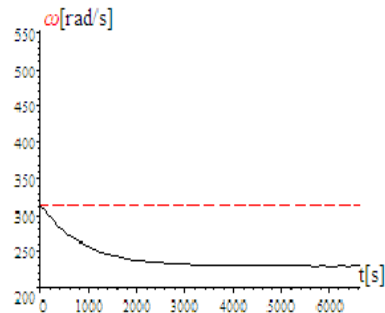


Fig. 7.8. Variația în timp a pulsației

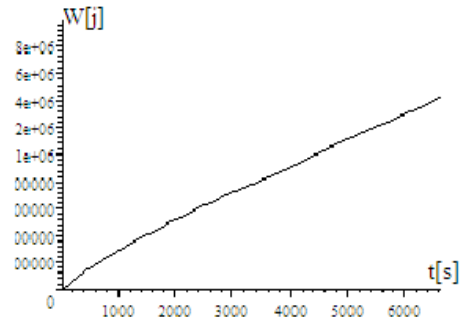


Fig. 7.9. Variația în timp a energiei

$$\omega(5555) = 228.40[\text{rad} / \text{s}], \quad W(5555.) = 1.2162 \times 10^6 [\text{J}]$$

$$\text{d) } R = (531 - 477 \sin 0.3t) [\Omega]$$

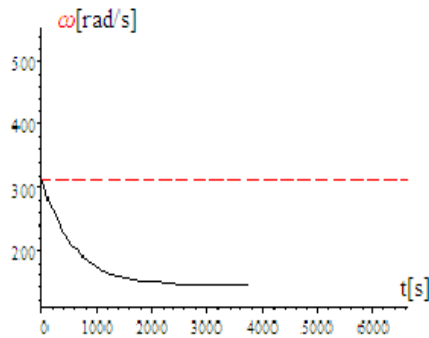


Fig. 7.10. Variația în timp a pulsației

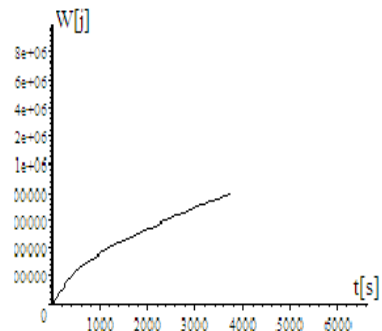


Fig. 7.11. Variația în timp a energiei

$$\omega(3666.) = 144.05[\text{rad} / \text{s}], \quad W(3666.) = 1.2235 \times 10^6 [\text{J}]$$

$$\text{e) } R = (531 + 77 \sin 0.3t) [\Omega]$$

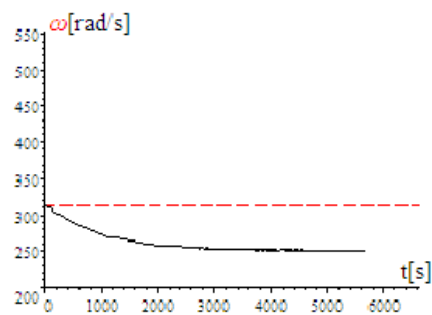


Fig. 7.12. Variația în timp a pulsației

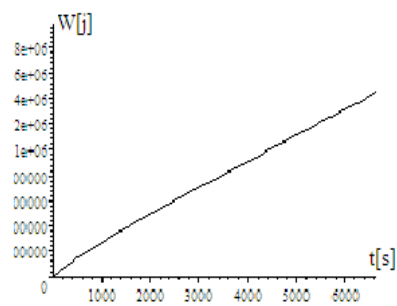


Fig. 7.13. Variația în timp a energiei

$$\omega(5555) = 250.57[\text{rad} / \text{s}], \quad W(5555) = 1.2235 \times 10^6 [\text{J}]$$

$$\text{f) } R = (531 + 477 \sin 0.3t) [\Omega]$$

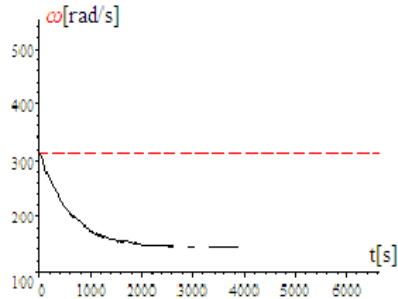


Fig. 7.14. Variația în timp a pulsației

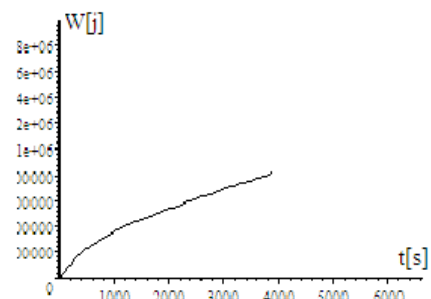


Fig. 7.15. Variația în timp a energiei

$$\omega(3777.) = 144.24[\text{rad} / \text{s}], \quad W(3777.) = 8.0399 \times 10^5 [\text{J}]$$

#### Intervalul de timp observabil este limitat din motive de calcul

Totalizând rezultatele de mai sus se obțin valorile vitezei unghiulare mecanice  $\omega(5555)$  și a energiei electrice  $W(5555.)$ , după un timp  $t=5555$ [s], (din motive de calcul, în anumite cazuri, la  $t=3777$ [s]).

- a)  $R = (531 - 77 \sin 0.3t) [\Omega]$ :  $\omega(5555) = 250.58[\text{rad} / \text{s}]$ ,  $W(5555) = 1.2235 \times 10^6 [\text{J}]$ ,  
 b)  $R = (531 - 177 \sin 0.3t) [\Omega]$ :  $\omega(5555) = 243.26[\text{rad} / \text{s}]$ ,  $W(5555) = 1.2225 \times 10^6 [\text{J}]$ ,  
 c)  $R = (531 - 277 \sin 0.3t) [\Omega]$ :  $\omega(5555) = 228.40[\text{rad} / \text{s}]$ ,  $W(5555) = 1.2162 \times 10^6 [\text{J}]$ ,  
 d)  $R = (531 - 477 \sin 0.3t) [\Omega]$ :  $\omega(3666) = 144.05[\text{rad} / \text{s}]$ ,  $W(3666) = 1.2235 \times 10^6 [\text{J}]$ ,  
 e)  $R = (531 + 77 \sin 0.3t) [\Omega]$ :  $\omega(5555) = 250.57[\text{rad} / \text{s}]$ ,  $W(5555) = 1.2235 \times 10^6 [\text{J}]$ ,  
 f)  $R = (531 + 477 \sin 0.3t) [\Omega]$ :  $\omega(3777) = 144.24[\text{rad} / \text{s}]$ ,  $W(3777) = 8.0399 \times 10^5 [\text{J}]$ .

În punctele de putere maximă se calculează  $R_{\text{sarcină}}$  pentru  $V=25;20;15;5;1$ [m/s].

Puterea electrică în rezistența  $R$  se calculează cu expresia:

$$P_e = RI^2 = R(I_d^2 + I_q^2)$$

1)  $V = 25[\text{m} / \text{s}]$

Rezolvând sistemul pentru  $V = 25[\text{m} / \text{s}]$ ,

$$\left\{ \begin{array}{l} V = 25 \\ \omega_{TVN} = 20 \left( \frac{V}{5} \right)^{1.5} \\ U_d = -\omega \cdot 0.08 I_q \\ U_q = \omega 0.08 I_d + \omega \Psi_{MP} \\ - \left( -0.5 \omega_{TVN} + 20 \left( \frac{V}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} = \Psi_{MP} I_q \\ U_d = -R I_d \\ U_q = -R I_q \\ \omega = 314 \left( \frac{V}{5} \right)^{1.5} \\ \Psi_{MP} = 1.3 \\ P_e = R (I_d^2 + I_q^2) \end{array} \right.$$

se obțin următoarele rezultate:

$$U_d = 1538.5 [V], \omega = 3510 [rad / s], \omega_{TVN} = 223.61 [rad / s],$$

$$I_q = -5.4779 [A], P_e = 25000.0 [W], R = 724.22 [\Omega],$$

$$I_d = -2.1243 [A], U_q = 3967.2 [V], \Psi_M = 1.3 [Wb].$$

Pentru  $R = 724.22 [\Omega]$  energia este maximă. Cu această valoare a lui  $R$  se obține în  $\frac{5555555}{3600 \cdot 24} = 64.3$  [zile], la  $V = 25 [m / s]$ , o energie electrică  $W$  a cărei valoare este  $W(5555555) = 1.3885 \times 10^{11} [J]$ .

Din sistemul:

$$\left\{ \begin{array}{l} 5 \frac{d\omega}{dt} = \left( -812.5 \omega \frac{724.22}{625.0 \cdot (724.22)^2 + 4.0 \omega^2} \right) 1.3 + \left( 10 \left( \frac{25}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} \\ \frac{dW}{dt} = 724.22 \left( 1056.3 \frac{\omega^2}{625.0 \cdot (724.22)^2 + 4.0 \omega^2} \right) \\ \omega(0) = 3510.6 \\ W(0) = 0 \end{array} \right.$$

Se obține expresia:

$$W(t) = R (I_d^2 + I_q^2) t = 25000 \cdot t = 25000 \cdot 5555555 = 1.3889 \times 10^{11} [J],$$

și următoarele rezultate în funcție de viteza vântului și rezistența  $R$ :

a) Pentru  $V = 25 [m / s]$  și  $R = 724.22 [\Omega]$ :

$$\omega(0) = 3510.6 [rad / s], \omega(5555555) = 3510.6 [rad / s],$$

$$W(5555555) = 1.38 \times 10^{11} [J], P_e = 25000 [W], K = 1.6$$

b) Pentru  $V = 20 [m / s]$  și  $R = 781.46 [\Omega]$ :

$$\omega(0) = 2512 [rad / s], \omega(5555555) = 2512.0 [rad / s],$$

$$W(555555) = 7.1 \times 10^{10} [J], P_e = 12800 [W], K = 1.6$$

c) Pentru  $V = 15 [m/s]$  și  $R = 812.16 [\Omega]$ :

$$\omega(0) = 1631.6 [rad/s], \omega(555555) = 1631.6 [rad/s],$$

$$W(555555) = 3.00 \times 10^{10} [J], P_e = 5400 [W], K = 1.6$$

d) Pentru  $V = 10 [m/s]$  și  $R = 827.03 [\Omega]$ :

$$\omega(0) = 888.13 [rad/s], \omega(555555) = 888.13 [rad/s],$$

$$W(555555) = 8.8 \times 10^9 [J], P_e = 1600 [W], K = 1.6$$

e) Pentru  $V = 1 [m/s]$  și  $R = 833.13 [\Omega]$ :

$$\omega(0) = 28.085 [rad/s], \omega(555555) = 28.085 [rad/s],$$

$$W(555555) = 8.888 \times 10^6 [J], P_e = 1.6 [W], K = 1.6$$

Pentru  $R=ct$  și pentru diverse valori ale vitezei vântului  $V$  s-au calculat energiile după  $t=555555[s]=74,3[zile]$ . Se poate observa că se verifică, indiferent de viteză, raportul dintre putere și cubul vitezei:

$$K = \frac{P}{V^3} = 1.6$$

#### Puterea depinde de viteza vântului la cub

Modificarea lui  $R$  de forma  $R = a + b \sin 0.3t$  nu ne conduce la mărirea energiei și deci nu se justifică adoptarea unei strategii de conducere pentru  $R$  variabil în timp.

Pentru  $R = 431 [\Omega]$  rezultă  $\omega(5555) = 220.9 [rad/s], W(5555) = 1.2111 \times 10^6 [J]$ ;

Pentru  $R = 501 [\Omega]$  rezultă  $\omega(5555) = 243.31 [rad/s], W(5555) = 1.2225 \times 10^6 [J]$ ;

Pentru  $R = 531 [\Omega]$  rezultă  $\omega(5555) = 252.2 [rad/s], W(5555) = 1.2235 \times 10^6 [J]$ ;

Pentru  $R = 561 [\Omega]$  rezultă  $\omega(5555) = 260.71 [rad/s], W(5555) = 1.2226 \times 10^6 [J]$ ;

Pentru  $R = 631 [\Omega]$  rezultă  $\omega(5555) = 279.16 [rad/s], W(5555) = 1.2148 \times 10^6 [J]$ .

#### CONCLUZII

1. Pentru  $R = 831 [\Omega]$  energia după 5555[s] este:  $W_1 = 1.1654 \times 10^6 [J]$ , iar

pentru  $R = 531 [\Omega]$  energia după 5555[s] este:  $W_2 = 1.2235 \times 10^6 [J]$

2. Diferența de energie pentru cele 2 valori de rezistență este:

$$\Delta W = W_2 - W_1 = 1.2235 \times 10^6 - 1.1654 \times 10^6 = 58100 [J], \text{adică cu}$$

$$\frac{\Delta W}{W_2} \times 100 = \frac{58100}{1.2235 \times 10^6} \times 100 = 4.748\%$$

mai multă energie se obține în condițiile folosirii unui  $R_{optim}$ , determinat din simulările de mai sus.

3. Din cele de mai sus se observă că **REZISTENȚA OPTIMĂ NU ESTE ESTIMATĂ PENTRU VITEZĂ MEDIE**, așa că va trebui estimată prin simulări dinamice valoarea rezistenței optime la o anumită viteză medie.

4. Rezultatele obținute motivează faptul că dependența puterii de viteza vântului nu este liniară, puterea depinzând de cubul vitezei.

5. Se cunoaște faptul că la turbina de vânt navală **-TVN-**, rezistențele de sarcină sunt dependente de vitezele medii ale vântului, în regim dinamic, astfel că la conducerea sistemului (**TVN+GSMP**) estimatorul de viteză (anemometru) trebuie să furnizeze valoarea medie a vitezei precum și valorile extreme [1].

6. Estimările la  $t = 5555[s] = 1.5[ore]$  **NU SUNT CONCLUDEnte**, deoarece o parte din energie provine din energia de frânare a maselor în mișcare de rotație, așa cum se poate observa din variația lui  $\omega(t)$  pentru cazul  $R=531[\Omega]$ , în sensul că scade semnificativ în timp deși viteza vântului se menține aceeași ( $V = 5 + 2 \sin 0.3t$ ).

7. Estimările la un timp foarte mare, (ordinul zecilor de ore) **SUNT CORECTE**.

### 7.1.2. Calculul lui R și $\omega$ la diverse constante ale componentei integratoare la PI

**Aplicația 1.** Cunoscându-se:

$$1) K_2 = -0.0014, J = 5 [Kgm^2], V = 7 + 2 \cdot \sin 0.3t [m/s]$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 5 \cdot \frac{d\omega}{dt} = 1.3 \left( -812.5\omega \frac{R}{625.0R^2 + 4.0\omega^2} \right) + \left( -\frac{10}{314} \omega + 20 \cdot \left( \frac{7+2 \cdot \sin 0.3t}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{200}{314} \\ -\frac{dR}{dt} = 0.14382 \frac{d\omega}{dt} - 0.0014 (521.66 - \omega) \\ \omega(0) = 314.92 \\ R(0) = 75.382 \end{array} \right.$$

se pot observa variațiile în timp ale lui R și  $\omega$ , pentru diferite constante ale componentei integratoare PI:

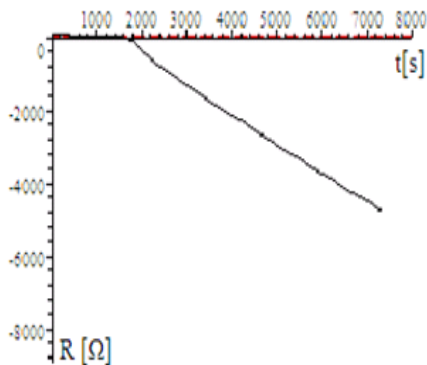


Fig. 7.16. Variația în timp a rezistenței R

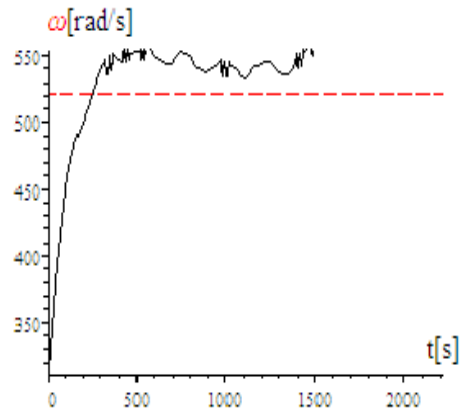


Fig. 7.17. Variația în timp a lui  $\omega$

$$2) K_2 = 0.0014, J = 5 [Kgm^2], V = 7 + 2 \cdot \sin 0.3t [m/s]$$

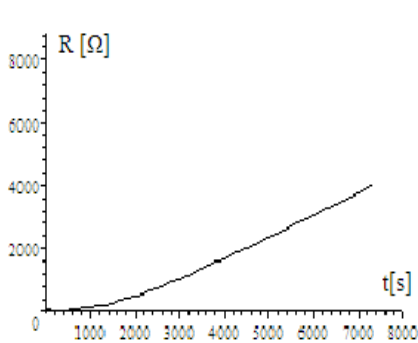


Fig. 7.18. Variația în timp a rezistenței R

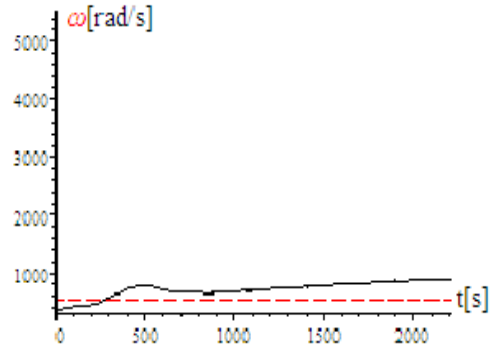


Fig. 7.19. Variația în timp a pulsației  $\omega$

$$3) K_2 = -0.014, J = 5 [Kgm^2], V = 7 + 2 \cdot \sin 0.3t [m/s]$$

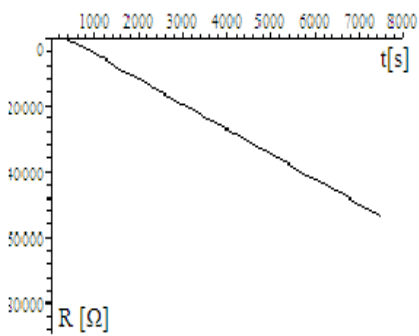


Fig. 7.20. Variația în timp a rezistenței R

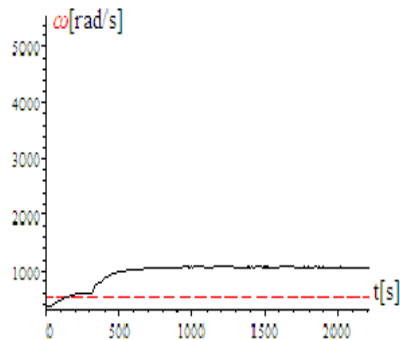


Fig. 7.21. Variația în timp a pulsației  $\omega$

$$4) K_2 = 0.014, J = 5 [Kgm^2], V = 7 + 2 \cdot \sin 0.3t [m/s]$$

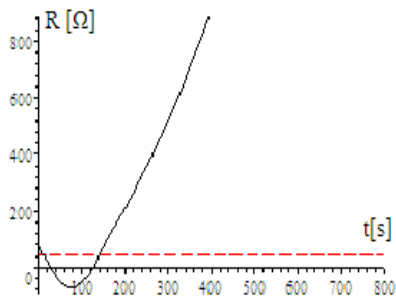


Fig. 7.22. Variația în timp a rezistenței R

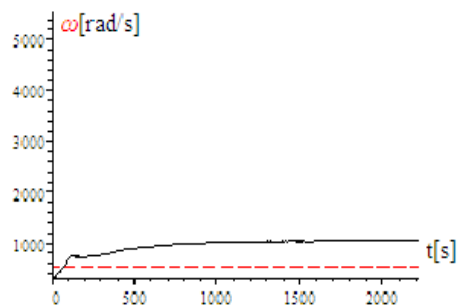


Fig. 7.23. Variația în timp a pulsației  $\omega$

**Se observă că variațiile lui  $-R$  – conduc către un sistem instabil**

$$5) K_2 = -0.00014, J = 5 [Kgm^2], V = 7 + 2 \cdot \sin 0.3t [m/s]$$

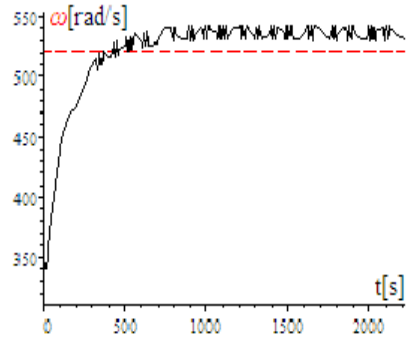
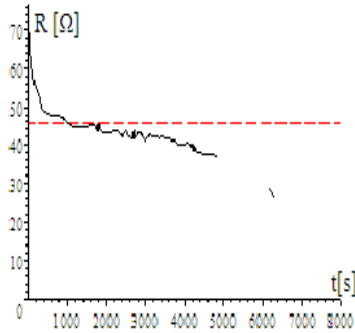


Fig.7.24. Variația în timp a rezistenței R Fig.7.25. Variația în timp a pulsației  $\omega$

Pentru  $K_1 = 0.14382$  și  $K_2 = 0.00014$  are loc o stabilizare a procesului în  $t=4000[s]$ . Se pot observa variațiile în timp ale lui  $\omega, R, I_d, I_q$  atât pe toată perioada procesului tranzitoriu cât și în detaliu. Curenții  $I_d$  și  $I_q$  au fost calculați din sistemul:

$$\begin{cases} -RI_d = -\omega 0.08 I_q \\ -RI_q = \omega 0.08 I_d + \omega 1.3 \end{cases}$$

și s-au obținut soluțiile :

$$I_d = -65 \frac{\omega^2}{625R^2 + 4\omega^2} = -65 \frac{\omega^2}{625(45.648 - 0.14382(\omega_r - 521.66))^2 + 4\omega^2};$$

$$I_q = -812.5\omega \frac{R}{625R^2 + 4\omega^2} = -812.5\omega \frac{45.648 - 0.14382(\omega_r - 521.66)}{625(45.648 - 0.14382(\omega_r - 521.66))^2 + 4\omega^2}$$

$$6) K_2 = 0.00014, J = 5 [Kgm^2], V = 7 + 2. \sin 0.3t [m/s]$$

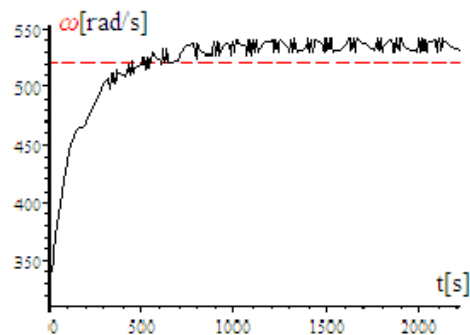
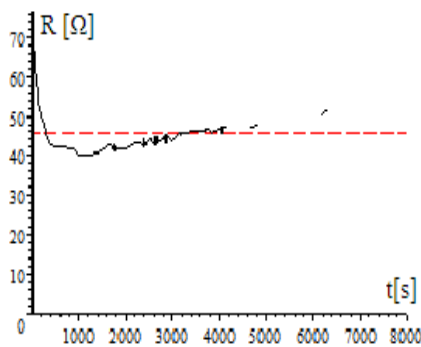


Fig.7.26. Variația în timp a rezistenței R

Fig.7.27. Variația în timp a pulsației  $\omega$

$$7) K_2 = -0.000014, J = 5 [Kgm^2], V = 7 + 2. \sin 0.3t [m/s]$$



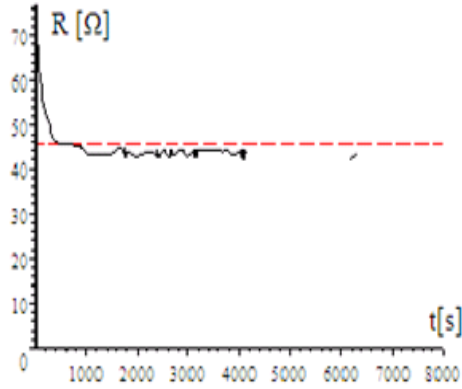


Fig.7.28. Variația în timp a rezistenței R

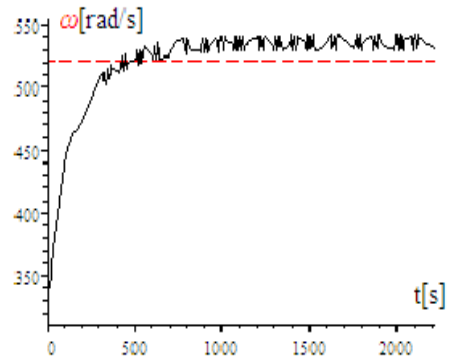


Fig.7.29. Variația în timp a pulsației  $\omega$

8)  $K_2 = 0, J = 5 [Kgm^2], V = 7 + 2 \cdot \sin 0.3t [m / s], R(4444) = 43.962$

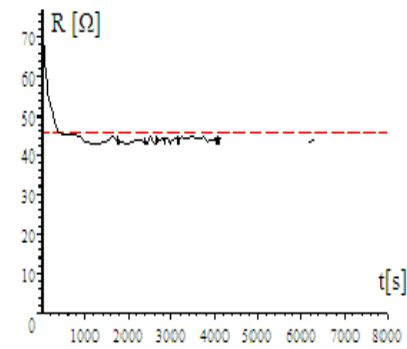


Fig.7.30. Variația în timp a rezistenței R

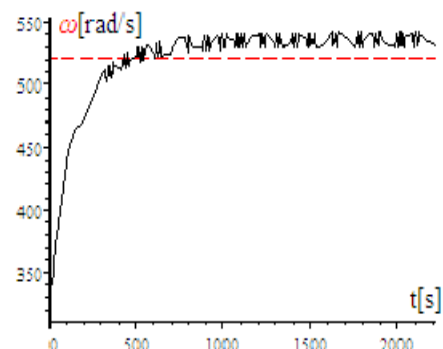


Fig.7.31. Variația în timp a pulsației  $\omega$

9)  $K_2 = 0.000014, J = 5 [Kgm^2], V = 7 + 2 \cdot \sin 0.3t [m / s]$

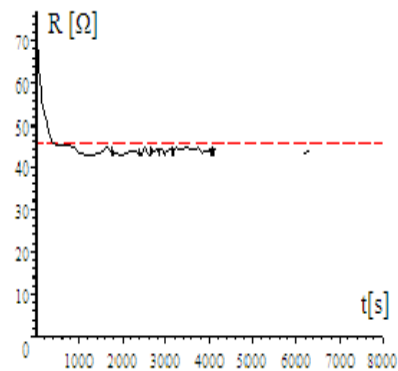


Fig.7.32. Variația în timp a rezistenței R

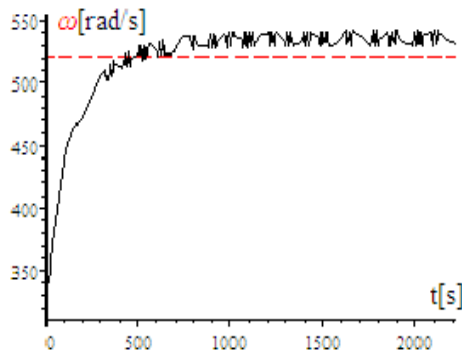


Fig.7.33. Variația în timp a pulsației  $\omega$

**Se observă variațiile lui R la sistem stabil**  
**CONCLUZII** privind rezultatele simulării :

1. Regulatorul de tip **PI**, prin constanta de integrare  $K_2$ , influențează sensibil stabilitatea procesului.
2. Acordarea regulatorului de tip **PI** este dependentă de valoarea momentului de inerție  $J$  și de variația în timp a vitezei vântului, în sensul că pentru  $K_2 = -0.014$ ;  $V = ct = 7 [m/s]$  și pentru  $J = 0.5 [kg \cdot m^2]$  procesul devine stabil cu  $R$  și  $\omega$  atingând valorile finale  $R_f = 45.648 [\Omega]$  și  $\omega_f = 521.66 [rad/s]$  (a se observa figura 3.99, cazul 5). Pentru,  $J = 5 [Kg \cdot m^2]$  și  $V = 7 [m/s]$  procesul se stabilizează după un timp de 2000 [s].
3. Pentru  $V = 7 + 2 \sin 0.3t$ , (deci viteza vântului variabilă), stabilizarea procesului se realizează la valori foarte mici pentru  $K_2$  la (cazul 5) cu  $K_2 = -0.00014$  la cazul -6- cu  $K_2 = -0.000014$  la -7- cu  $K_2 = 0$ ; la -8- cu  $K_2 = 0.000014$ . Aceste valori foarte mici pentru constanta componentei integratoare demonstrează faptul că această componentă are o pondere foarte mică. Trebuie remarcată și diferența foarte mare  $\Delta\omega(40\%)$  între  $\omega_f$  și  $\omega_i (\Delta\omega = 521.66 - 314.92 = 206.74 [rot/s])$ , diferență care este factor în componenta integratoare  $K_2 \cdot \Delta\omega$ .
4. La anumite valori ale lui  $K_2$ , (de exemplu  $K_2 = 0.014$ ), se comandă o scădere foarte dură a valorii rezistenței de sarcină  $R$ , rezistență care după 30[s] ar trebui să devină negativă, (a se vedea figurile 7.20, 7.21 și altele), deci generatorul trece în regim de motor și prin urmare modelul matematic nu mai este valabil.

**Aplicația 2.** Analizarea în detaliu a aplicațiilor stabile cu reglatoarele **PI**.

1)  $K_1 = 0.14382$ ;  $K_2 = 0.00014$

$$\left\{ \begin{array}{l} 5 \frac{d\omega}{dt} = 1.3 \left( -812.5\omega \frac{R}{625R^2 + 4\omega^2} \right) + \left( -\frac{10}{314}\omega + 20 \left( \frac{7 + 2 \sin 0.3t}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{200}{314} \\ -\frac{dR}{dt} = 0.14382 \frac{d\omega}{dt} + 0.00014(521.66 - \omega) \\ \omega(0) = 314.92 \\ R(0) = 75.382 \end{array} \right.$$

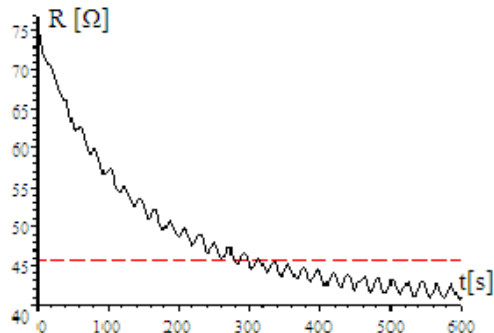
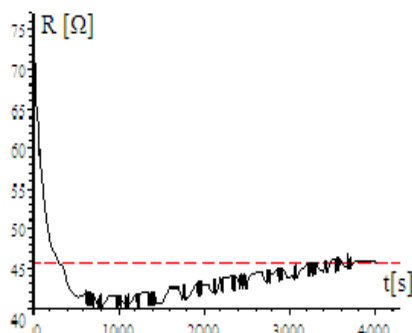


Fig.7.34. Variația în timp a rezistenței R Fig.7.35. Variația în timp a R- detaliu

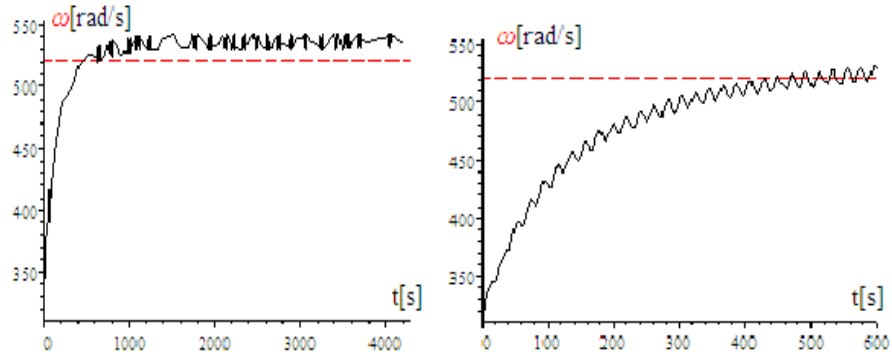


Fig.7.36 Variația în timp a pulsației  $\omega$  Fig.7.37. Variația în timp a pulsației  $\omega$  -  
- detaliu

Cu sistemul algebric următor:

$$\begin{cases} -RI_d = -\omega 0.08I_q \\ -RI_q = \omega 0.08I_d + \omega 1.3 \end{cases}$$

ale cărui soluții sunt:

$$I_d = -65 \frac{\omega^2}{625R^2 + 4\omega^2} = -65 \frac{\omega^2}{625(45.648 - 0.14382(\omega_r - 521.66))^2 + 4\omega^2};$$

$$I_q = -812.5\omega \frac{R}{625R^2 + 4\omega^2} = -812.5\omega \frac{45.648 - 0.14382(\omega_r - 521.66)}{625(45.648 - 0.14382(\omega_r - 521.66))^2 + 4\omega^2}$$

$$I_d = -65 \frac{\omega^2}{625R^2 + 4\omega^2}; \quad I_q = -812.5\omega \frac{R}{625R^2 + 4\omega^2}$$

Se pot observa variațiile în timp ale lui  $I_q$  și  $I_d$ :

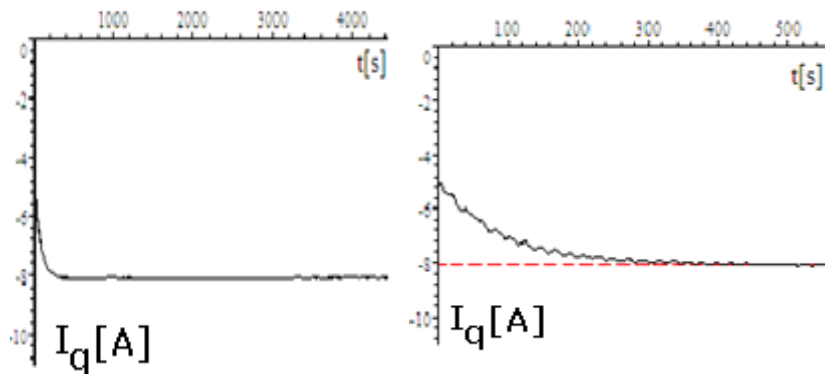
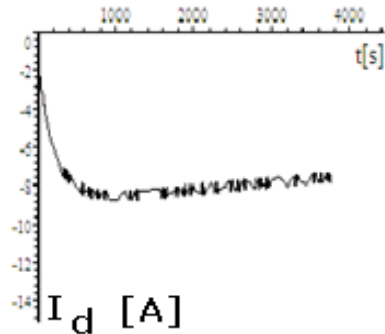
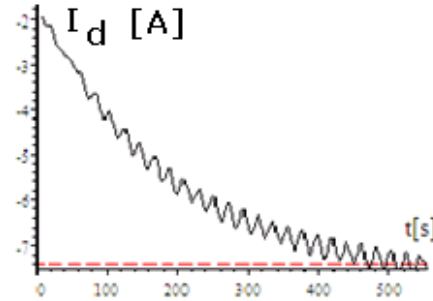


Fig.7.38. Variația în timp a lui  $I_q$  Fig.7.39. Variația în timp a lui  $I_q$  - detaliu

Fig.7.40. Variația în timp a lui  $I_d$ Fig.7.41. Variația în timp a lui  $I_d$  - detaliu

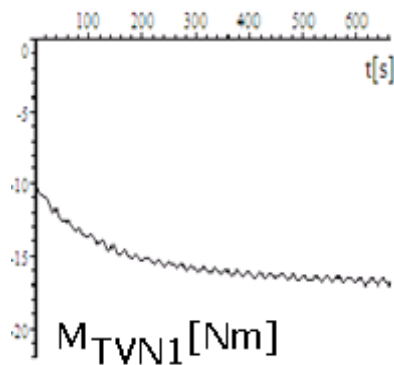
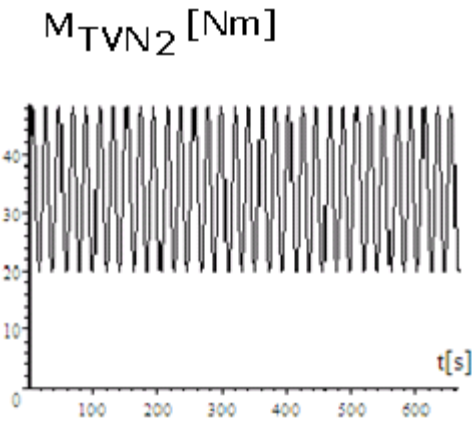
Cuplul turbinei **TVN** este :  $\left( -\frac{10}{314} \omega + 20 \left( \frac{7 + 2 \sin 0.3t}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{200}{314}$  și se

reprezintă mai jos termenii componenți :

$$, M_{TVN1} = -\frac{10}{314} \omega \quad M_{TVN2} = 20 \left( \frac{7 + 2 \sin 0.3t}{5} \right)^{1.5} \text{ iar cu aproximarea}$$

$$-\frac{10}{314} \omega = -15 \text{ se dă forma aproximativă a cuplului:}$$

$$M_{TVN} = 20 \left( \frac{7 + 2 \sin 0.3t}{5} \right)^{1.5} - 15$$

Fig.7.42. Variația în timp a lui  $M_{TVN1}$ Fig.7.43. Variația în timp lui  $M_{TVN2}$

$M_{TVN}[\text{Nm}]$

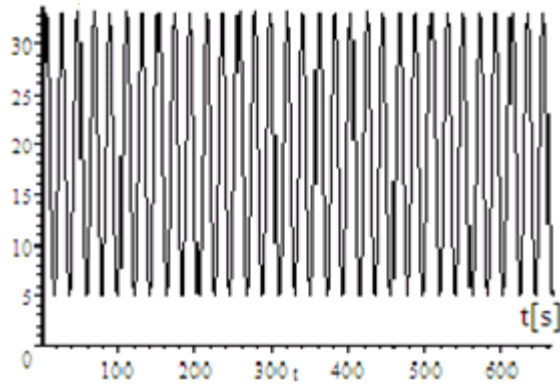


Fig.7.44. Variația lui  $M_{TVN}$

În figura 7.44. s-a făcut următoarea aproximație:  $-\left(\frac{10}{314}\right)\omega = -15$

2)  $K_1 = 0.14382; K_2 = 0.0001$

$$\left\{ \begin{aligned} 5 \frac{d\omega}{dt} &= 1.3 \left( -812.5\omega \frac{R}{625R^2 + 4\omega^2} \right) + \left( -\frac{10}{314}\omega + 20 \left( \frac{7 + 2 \sin 0.3t}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{200}{314} \\ -\frac{dR}{dt} &= 0.14382 \frac{d\omega}{dt} + 0.0001(521.66 - \omega) \\ \omega(0) &= 314.92 \\ R(0) &= 75.382 \end{aligned} \right.$$

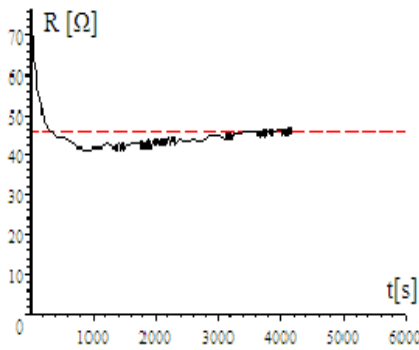


Fig.7.45. Variația în timp a lui R

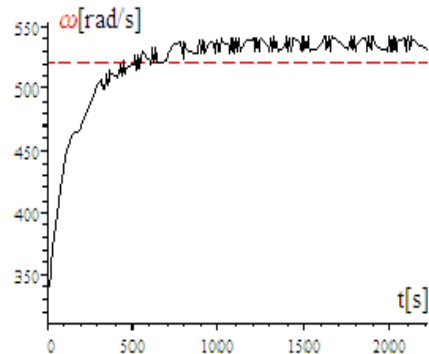


Fig.7.46. Variația în timp a lui  $\omega$

3)  $K_1 = 0.1; K_2 = 0.00001$

$$\left\{ \begin{aligned} 5 \frac{d\omega}{dt} &= 1.3 \left( -812.5\omega \frac{R}{625R^2 + 4\omega^2} \right) + \left( -\frac{10}{314}\omega + 20 \left( \frac{7 + 2 \sin 0.3t}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{200}{314} \\ -\frac{dR}{dt} &= 0.1 \frac{d\omega}{dt} + 0.00001(521.66 - \omega) \\ \omega(0) &= 314.92 \\ R(0) &= 75.382 \end{aligned} \right.$$

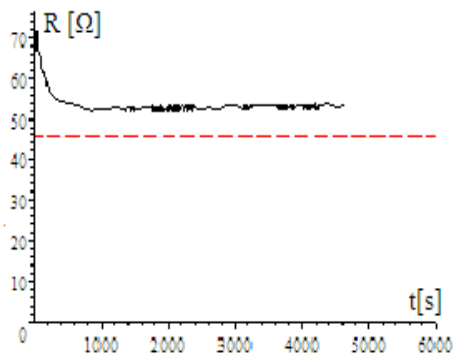


Fig.7.47. Variația în timp a lui R

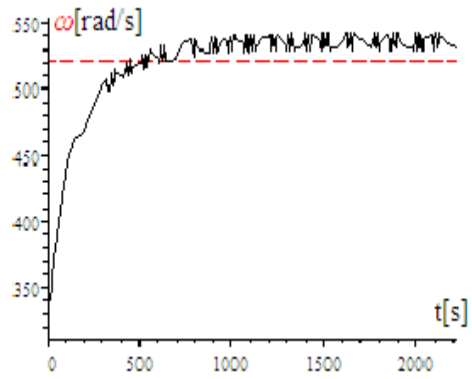


Fig.7.48. Variația în timp a lui ω

4)  $K_1 = 0.14; K_2 = 0.00001$

$$\left\{ \begin{aligned} 5 \frac{d\omega}{dt} &= 1.3 \left( -812.5\omega \frac{R}{625R^2 + 4\omega^2} \right) + \left( -\frac{10}{314}\omega + 20 \left( \frac{7 + 2 \sin 0.3t}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{200}{314} \\ -\frac{dR}{dt} &= 0.14 \frac{d\omega}{dt} + 0.00001(521.66 - \omega) \\ \omega(0) &= 314.92 \\ R(0) &= 75.382 \end{aligned} \right.$$

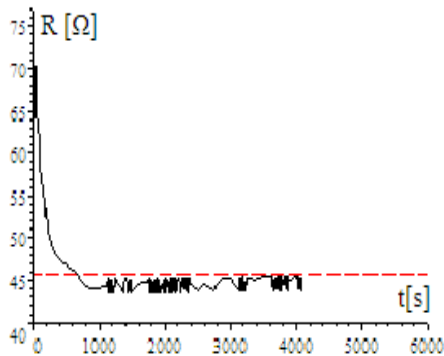


Fig.7.49. Variația în timp a lui R

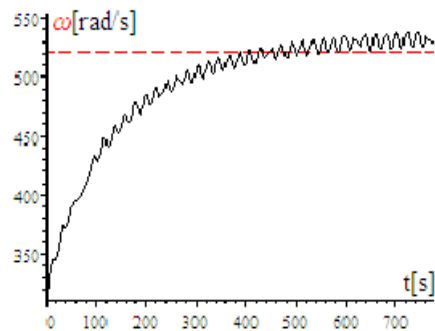


Fig.7.50. Variația în timp a lui ω

5)  $K_1 = 0.14; K_2 = 0.000005$

$$\left\{ \begin{array}{l} 5 \frac{d\omega}{dt} = 1.3 \left( -812.5\omega \frac{R}{625R^2 + 4\omega^2} \right) + \left( -\frac{10}{314}\omega + 20 \left( \frac{7 + 2 \sin 0.3t}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{200}{314} \\ -\frac{dR}{dt} = 0.14 \frac{d\omega}{dt} + 0.000005 (521.66 - \omega) \\ \omega(0) = 314.92 \\ R(0) = 75.382 \end{array} \right.$$

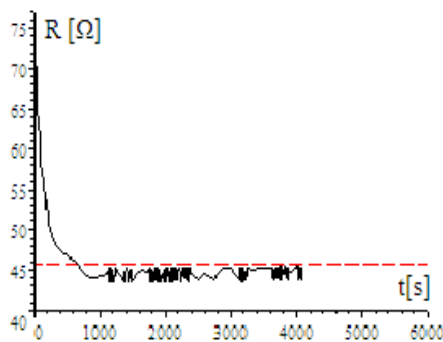


Fig.7.51. Variația în timp a lui R

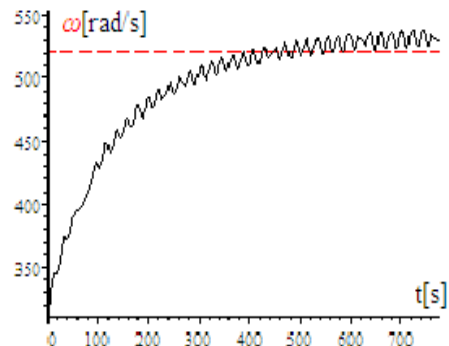


Fig.7.52. Variația în timp a lui ω

6)  $K_1 = 0.14; K_2 = 0$

$$\left\{ \begin{array}{l} 5 \frac{d\omega}{dt} = 1.3 \left( -812.5\omega \frac{R}{625R^2 + 4\omega^2} \right) + \left( -\frac{10}{314}\omega + 20 \left( \frac{7 + 2 \sin 0.3t}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{200}{314} \\ -\frac{dR}{dt} = 0.14 \frac{d\omega}{dt} \\ \omega(0) = 314.92 \\ R(0) = 75.382 \end{array} \right.$$

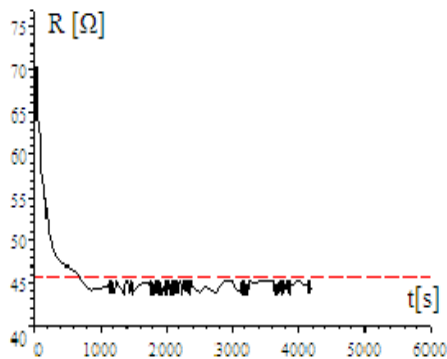


Fig.7.53. Variația în timp a lui R

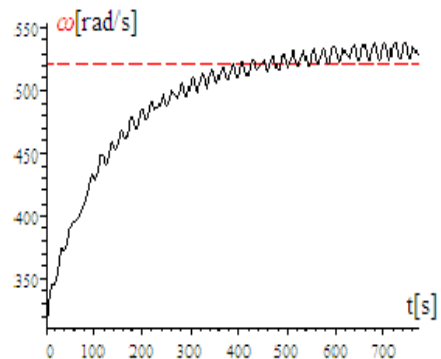


Fig.7.54. Variația în timp a lui ω

7)  $K_1 = 0.14382; K_2 = 0.000005$

$$\left\{ \begin{array}{l} 5 \frac{d\omega}{dt} = 1.3 \left( -812.5\omega \frac{R}{625R^2 + 4\omega^2} \right) + \left( -\frac{10}{314}\omega + 20 \left( \frac{7 + 2 \sin 0.3t}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{200}{314} \\ -\frac{dR}{dt} = 0.14382 \frac{d\omega}{dt} + 0.000005 (521.66 - \omega) \\ \omega(0) = 314.92 \\ R(0) = 75.382 \end{array} \right.$$

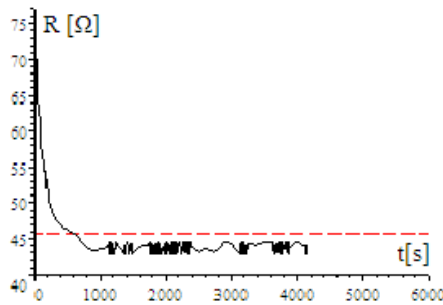


Fig.7.55. Variația în timp a lui R

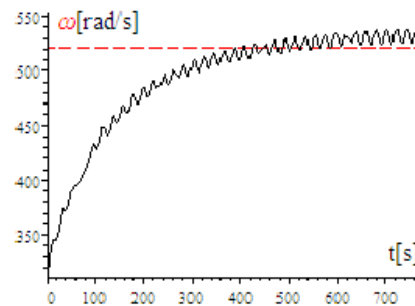


Fig.7.56. Variația în timp a lui ω

**Ponderea componentelor regulatorului PID** se poate observa din simulările anterioare, cu următoarele precizări:

- 1) valorile componentelor integratoare și derivative sunt foarte importante, observându-se că la valori mici sistemul este stabil
- 2) menținând redusă valoarea componentei integratoare și mărirind valoarea componentei derivative se pierde stabilitatea sistemului;
- 3) în cazurile în care se pierde stabilitatea, variația în timp a rezistenței este pronunțată, aceasta atingând și valori negative, zonă în care modelul matematic nu mai este valabil, deoarece funcționarea nu mai este în regim de generator;

## CONCLUZII

### Probleme matematice

1. Intervalul de timp trebuie să fie foarte mare, la analiza dependenței sarcinii de viteza vântului, altfel energia obținută este într-o proporție mare din energia maselor în mișcare și astfel rezultatele optimizării rezistenței de sarcină sunt eronate.

2. **Intervalul de timp T de valoare  $t=5555[s]=1.5[ore]$ , la momentul de inerție J de valoare  $J = 5[kg \cdot m^2]$ , este insuficient** pentru a estima corect valoarea optimă a rezistenței de sarcină și sunt necesare analize la  $T > 15[ore]$ ;

Programul de calcul cu nucleul MAPLE Scientific Workplace nu a permis o extindere a perioadei de calcul și de aceea sunt necesare simplificări în modelul matematic al sistemului. Evident că aceste simplificări fac ca rezultatele obținute să aibă erori.

3. Acordarea reguletoarelor necesită la fel intervale de timp mari.



### 7.1.3. Aplicații numerice pentru acordarea reguletoarelor

Acordarea reguletoarelor se face prin simulări numerice în sensul că se deduc constantele reguletoarelor și se observă sistemul în care apar suprareglări.

**Aplicația 1.** Acordarea reguletoarelor de tip **PI**.

Cunoscând faptul că oscilațiile care apar la reguletoarele de tip **PI** pot să scoată din funcționare subsistemul **MD+GSMP**.

Se vizualizează regimurile tranzitorii care apar la diferite valori ale constantelor reguletoarelor.

Din ecuația reguletoarelor:

$$\Delta R = K_1 \Delta \omega + K_2 \int \Delta \omega dt$$

prin derivare rezultă:

$$-\frac{dR}{dt} = -K_1 \frac{d\omega}{dt} + K_2(252 - \omega)$$

Pentru constanta  $K_1$  se alege valoarea anterioară de la reguletorul **-P-**:  
 $K_1 = 0.3797$  și deci rezultă:

$$-\frac{dR}{dt} = -0.3797 \frac{d\omega}{dt} + K_2(252 - \omega)$$

#### Acordarea reguletoarelor

Alegerea constantelor  $K_1$ ,  $K_2$  ale reguletoarelor **PI** este o problemă complicată, în sistemele neliniare, unde nu se mai pot aplica metodele de la sistemele liniare. Pentru  $K_1$ , se poate alege valoarea de la reguletorul **P**.

Pentru constanta  $K_2$  se aleg diverse valori:

- 1)  $K_2 = 1$ ;
- 2)  $K_2 = 0.01$ ;
- 3)  $K_2 = -0.27; -0.275; -0.28; -0.3; -0.25; -0.2; -0.4; -0.5; +0.3$

și rezultatele simulărilor sunt prezentate în continuare:

- 1) Introducând  $K_2 = 11$  în expresia de mai sus se obține:

$$\frac{dR}{dt} = 0.3797 \frac{d\omega}{dt} - 11(252 - \omega)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 = (R + 1.6)I_d + 0.07 \frac{dI_d}{dt} - \omega 0.08 I_q \\ 0 = (R + 1.6)I_q + \omega(0.07 I_d + 1.6) + 0.08 \frac{dI_q}{dt} \\ 5 \frac{d\omega}{dt} = -0.01 I_q I_d + 1.6 I_q - 0.056 \omega + 28.686 \\ I_d(0) = -4.5227 \\ I_q(0) = -8.518 \\ \omega(0) = 262 \\ R(0) = 37.876 \end{array} \right.$$

Determinarea evoluției în timp a mărimilor  $U$ ,  $\omega$ ,  $M_{GSMP}$ ,  $M_{MD}$ ,  $I$  pentru un reguletor de tip **PI**:

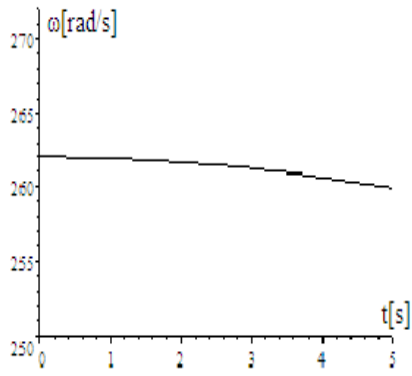


Fig.7.57. Variația în timp a lui  $\omega$

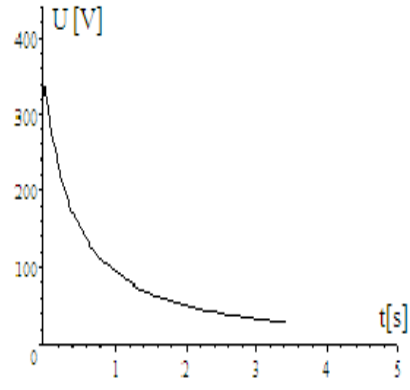


Fig.7.58. Variația în timp lui  $U$

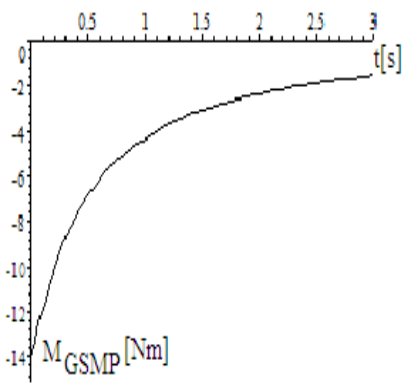


Fig.7.59. Variația în timp cuplului GSMP

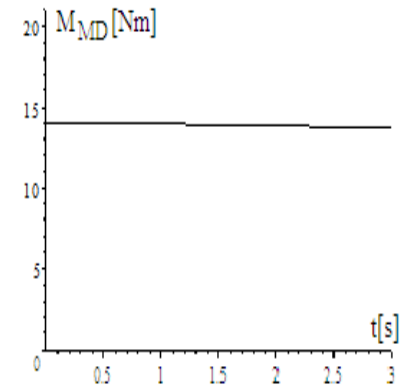


Fig.7.60. Variația în timp a cuplului MD

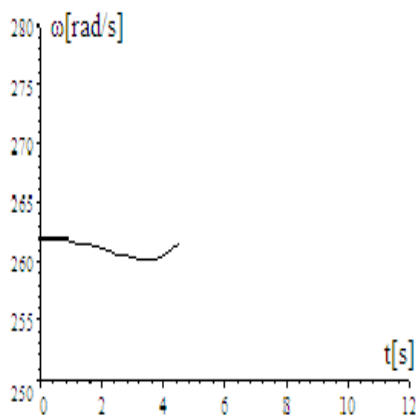


Fig.7.61. Variația în timp lui  $\omega$  detaliu

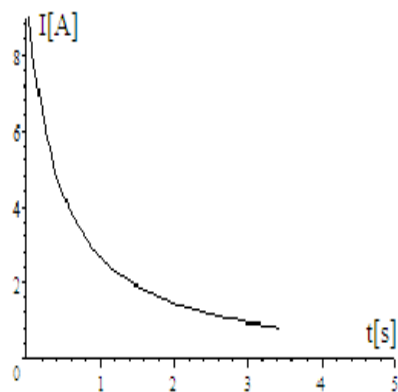


Fig.7.62. Variația în timp curentului

Pentru cazurile 1 și 2,  $K_2=1$  și  $K_2=0.01$ , se obțin expresiile:

$$\frac{dR}{dt} = 0.3797 \frac{d\omega}{dt} - (252 - \omega); \quad \frac{dR}{dt} = 0.3797 \frac{d\omega}{dt} - 0.01(252 - \omega)$$

care determina evoluția în timp a lui  $\omega$ :

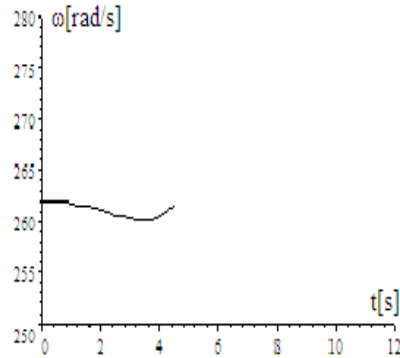


Fig.7.63. Variația în timp a lui  $\omega$

2)  $K_2=-0.27; -0.275; -0.28; -0.3; -0.25; -0.2; -0.4; -0.5; +0.3$

**$K_2=-0.27$**

Introducând  $K_2=-0.27$  în sistemul următor putem determina evoluția în timp a principalelor mărimi  $M_{GSMP}$ ,  $U$ ,  $R$ ,  $\omega$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dR}{dt} = 0.3797 \frac{d\omega}{dt} + 0.27(252 - \omega) \\ 0 = (R + 1.6)I_d + 0.07 \frac{dI_d}{dt} - \omega 0.08I_q \\ 0 = (R + 1.6)I_q + \omega(0.07I_d + 1.6) + 0.08 \frac{dI_q}{dt} \\ 5 \frac{d\omega}{dt} = -0.01I_q I_d + 1.6I_q - 0.056\omega + 28.686 \\ I_d(0) = -4.5227; I_q(0) = -8.518 \\ \omega(0) = 262; R(0) = 37.876 \end{array} \right.$$

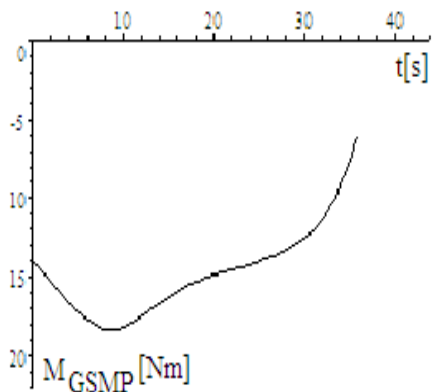


Fig.7.64. Variația în timp a cuplului GSMP

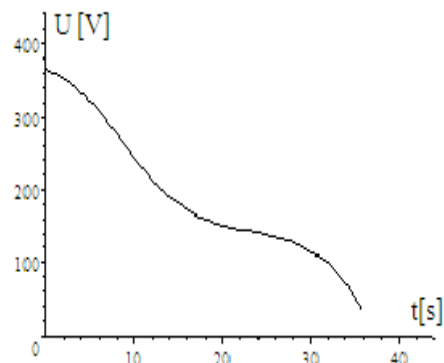


Fig.7.65. Variația în timp a lui  $U$

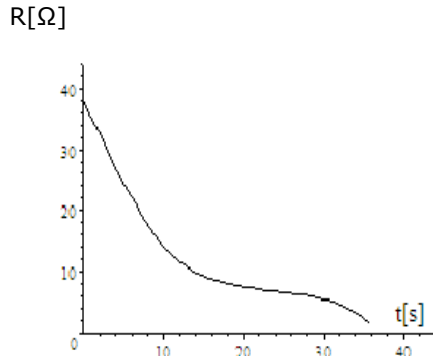


Fig.7.66. Variația în timp a rezistenței

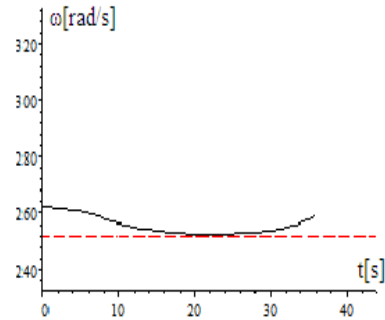


Fig.7.67. Variația în timp a lui ω

Din evoluția în timp a principalelor mărimi: cuplu, tensiune statorică, viteza unghiulară  $\omega$ , dar mai ales observând evoluția în timp a lui  $R$  se poate afirma că sistemul este **instabil**, rezistența de sarcină scăzând la zero după 37[s] și probabil devenind negativă dacă estimarea evoluției în timp ar fi continuată. Așa cum s-a precizat și în alte cazuri, dificultățile matematice nu permit estimări într-un timp mai mare, pentru a se putea concluziona asupra stabilității sistemului la diferite valori ale constantei de integrare  $K_2$ .

Pentru a putea distinge regimurile stabile, se observă în continuare evoluția în timp a lui  $\omega$  pentru celelalte valori ale lui  $K_2$  de la punctul 4.

$$\frac{dR}{dt} = 0.3797 \frac{d\omega}{dt} + 0.265(252 - \omega)$$

$$\frac{dR}{dt} = 0.3797 \frac{d\omega}{dt} + 0.28(252 - \omega)$$

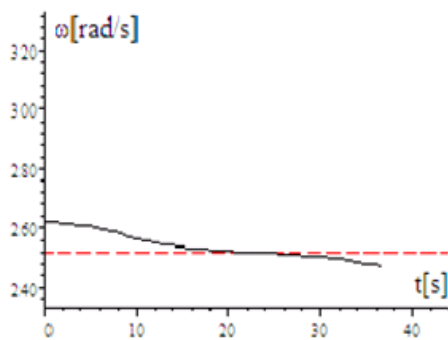


Fig.7.68. Variația în timp a lui ω

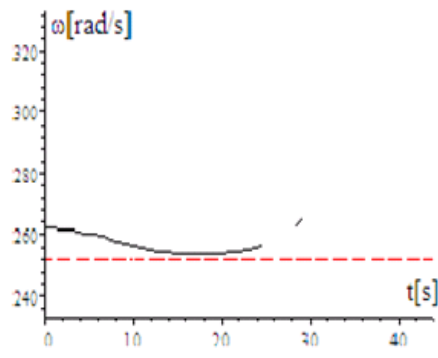


Fig.7.69. Variația în timp a lui ω

$$\frac{dR}{dt} = 0.3797 \frac{d\omega}{dt} + 0.3(252 - \omega)$$

$$\frac{dR}{dt} = 0.3797 \frac{d\omega}{dt} + 0.25(252 - \omega)$$

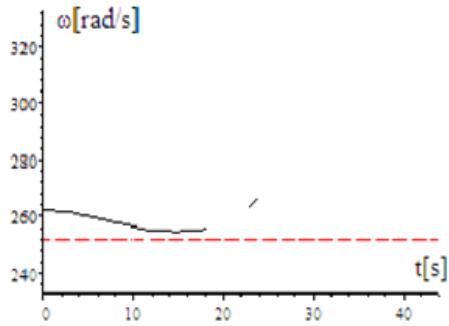


Fig.7.70. Variația în timp a lui  $\omega$

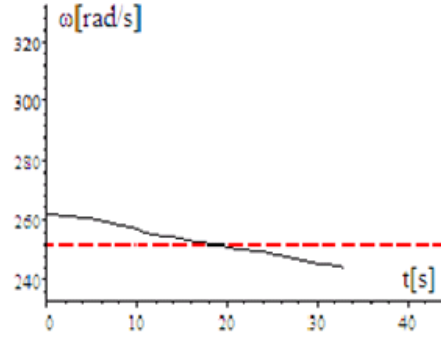


Fig.7.71. Variația în timp a lui  $\omega$

$$\frac{dR}{dt} = 0.3797 \frac{d\omega}{dt} + 0.2(252 - \omega)$$

$$\frac{dR}{dt} = 0.3797 \frac{d\omega}{dt} + 0.4(252 - \omega)$$

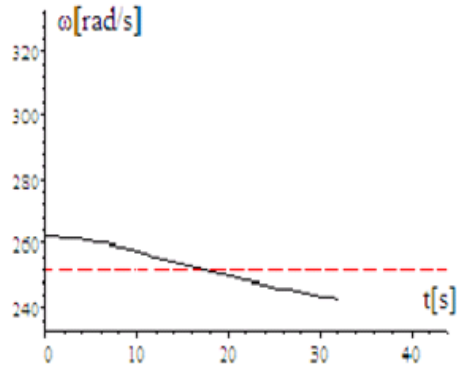


Fig.7.72. Variația în timp a lui  $\omega$

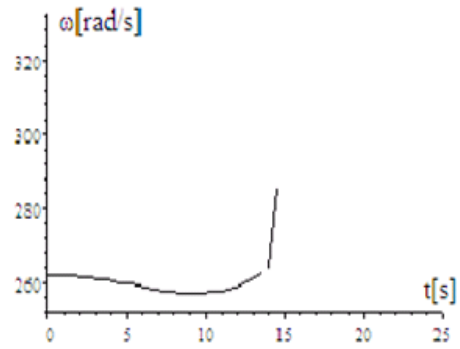


Fig.7.73. Variația în timp a lui  $\omega$

$$\frac{dR}{dt} = 0.3797 \frac{d\omega}{dt} + 0.5(252 - \omega)$$

$$\frac{dR}{dt} = 0.3797 \frac{d\omega}{dt} - 0.3(252 - \omega)$$

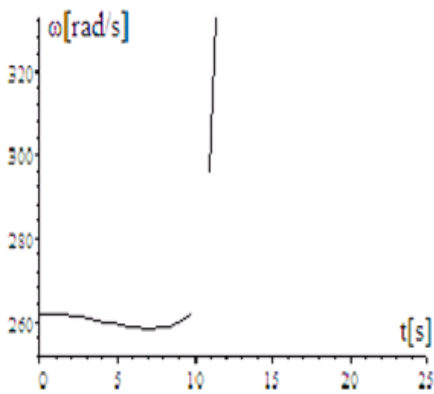


Fig.7.74. Variația în timp a lui  $\omega$

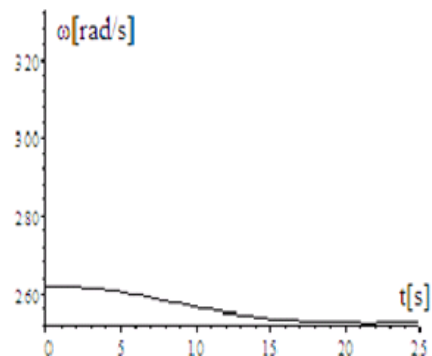


Fig.7.75. Variația în timp a lui  $\omega$

Din simulările de mai sus se observă variația în timp a vitezei unghiulare  $\omega$  care la  $t=0$  are valoarea  $\omega(0)=272[\text{rad/s}]$  și care ar trebui să se stabilizeze la  $\omega(\infty)=252[\text{rad/s}]$ . În timpul estimat, (sub  $32[\text{s}]$ ),  $\omega$  nu se stabilizează la valoarea de regim  $\omega(\infty)=252[\text{rad/s}]$ , și deci, în toate cazurile, sistemele sunt instabile, cu toate că în toate cazurile trece prin valoarea de regim. Din acest motiv regulatorul PI nu este indicat pentru o asemenea aplicație.

**Aplicația 2.** Studiul dinamicii subsistemului (MD+GS) cu regulatoare de tip P și PI.

Se abordează două variante:

- 1) **PI** - pe debit și **P** - pe excitație;
- 2) **PI** - pe debit și excitație.

Valoarea constantei de proporționalitate de la regulatorul **PI** este aceeași cu cea de la regulatorul **P**.

**1)PI debit+P excitație**

Din ecuația regulatorului  $R_1$  pe debit:

$$\Delta q = K_1 \Delta \omega + K_2 \int \Delta \omega dt$$

sau

$$q - q(0) = K_1(314 - \omega) + K_2 \int (314 - \omega) dt$$

prin derivare rezultă:

$$\frac{dq}{dt} = -K_1 \frac{d\omega}{dt} + K_2(314 - \omega)$$

Pentru constanta  $K_1$  se alege valoarea anterioară de la regulatorul de tip **P**:

$$K_1 = 1.6895 \times 10^{-2}$$

și deci rezultă:

$$\frac{dq}{dt} = -1.6895 \times 10^{-2} \frac{d\omega}{dt} + K_2(314 - \omega)$$

**Precizare:** În programul de calcul s-a înlocuit variabila  $q$  cu  $a$  deoarece, pentru variabila  $q$  programul de calcul nu funcționează.

**Acordarea reguletoarelor**

Alegerea constantelor  $K_1$ ,  $K_2$ , ale regulatorului **PI** este o problemă complicată, în sistemele neliniare, unde nu se mai pot aplica metodele de la sistemele liniare. Pentru  $K_1$  se poate alege valoarea de la regulatorul **P**. Alegerea lui  $K_2$  este mai complicată.

În cazul de față apar două probleme:

- 1) alegerea lui  $K_2$  pentru excitație și
- 2) alegerea lui  $K_2$  pentru debit.

Pentru constanta  $K_2$  se aleg diverse valori:  $K_2 = \frac{0.01}{6.28}; \frac{0.1}{6.28}; \frac{1}{6.28}; \frac{10}{6.28}; \frac{100}{6.28}$  iar

rezultatele simulărilor se dau în continuare.

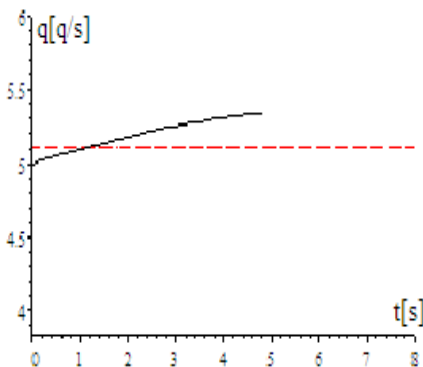
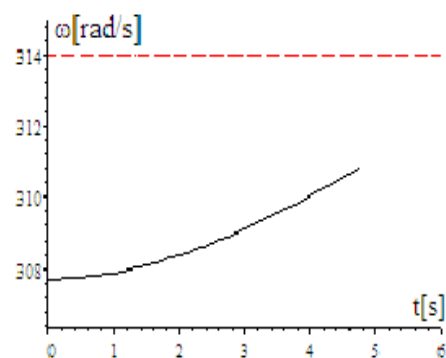
La regulatorul  $R_2$ , datorită complexităților de calcul ce apar la **PI**, (tensiunea  $U$  fiind:

$$U = \sqrt{U_d^2 + U_q^2} = \sqrt{(-68.458I_d + \omega 1.4325 \times 10^{-2} I_q)^2 + (-68.458I_q - \omega 1.4325 \times 10^{-2} I_d)^2}$$

s-a lucrat tot cu un regulator de tip **P**.

Sistemul diferențial complet al regulatorului de tip PI este de forma:

$$\begin{aligned}
 &1) -68.458I_d + \omega 1.4325 \times 10^{-2} I_q = 1.6I_d + 0.08 \frac{dI_d}{dt} - \\
 &\quad - \omega 0.07I_q + \frac{dI_E}{dt} + 0.05 \frac{dI_D}{dt} - \omega 0.053I_Q \\
 &2) -68.458I_q + \omega 1.4325 \times 10^{-2} I_d = \omega 0.08I_d + 1.6I_q + \\
 &\quad + 0.07 \frac{dI_q}{dt} + \omega I_E + \omega 0.05I_D + 0.053 \frac{dI_Q}{dt} \\
 &3) 56 + 0.0451(400 - \\
 &\quad - \sqrt{(-68.458I_d + \omega 1.4325 \times 10^{-2} I_q)^2 + (-68.458I_q - \omega 1.4325 \times 10^{-2} I_d)^2} = \\
 &\quad = \frac{dI_d}{dt} + 40I_E + 18.51 \frac{dI_E}{dt} + 0.56 \frac{dI_D}{dt} \\
 &4) 0 = 0.05 \frac{dI_d}{dt} + 7.95I_D + 0.07 \frac{dI_D}{dt} + 0.56 \frac{dI_E}{dt} \\
 &5) 0 = 0.053 \frac{dI_q}{dt} + 30.22I_Q + 0.25 \frac{dI_Q}{dt} \\
 &6) 5 \frac{d\omega}{dt} = 0.01I_d I_q + I_q I_E - 0.053I_d I_Q + 0.05I_q I_D - \\
 &\quad - 0.28\omega + 18.704a \\
 &7) \quad 6.28 \frac{da}{dt} = -0.1061 \frac{d\omega}{dt} + 0.01(314 - \omega) \\
 &\quad a(0) = 5; I_E(0) = 1.4 \\
 &\quad I_d(0) = -1.9746; I_q(0) = -5.3312 \\
 &\quad I_Q(0) = 0; I_D(0) = 0 \\
 &\quad \omega(0) = 307.72 \\
 &1) \text{Pentru } K_2 = \frac{0.1}{6.28}; \quad 6.28 \frac{da}{dt} = -0.1061 \frac{d\omega}{dt} + 0.1(314 - \omega) \\
 &\text{se obțin următoarele variații în timp ale următoarelor mărimi:}
 \end{aligned}$$

Fig.7.76. Variația în timp a lui  $q$ Fig. 7.77. Variația în timp a lui  $\omega$

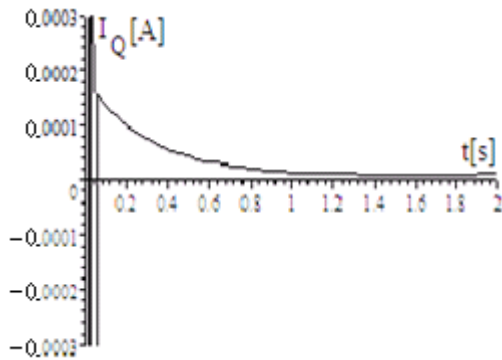


Fig.7.78. Variația în timp a lui  $I_Q$

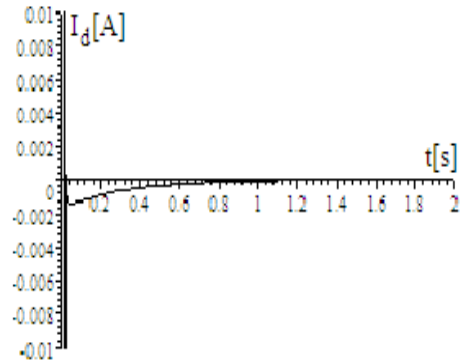


Fig.7.79. Variația în timp a lui  $I_d$

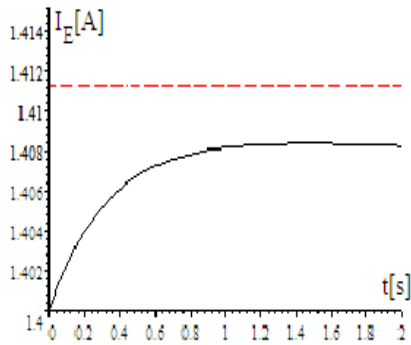


Fig.7.80. Variația în timp a lui  $I_E$

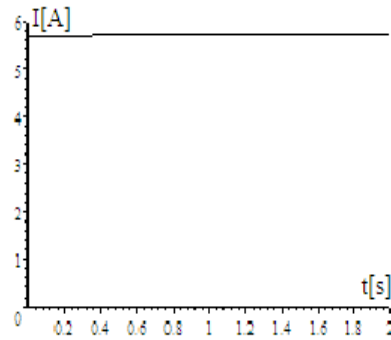


Fig.7.81. Variația în timp a lui  $\sqrt{I_d^2 + I_q^2}$

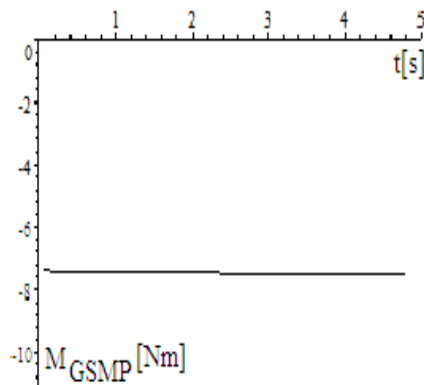


Fig.7.82. Variația în timp a cuplului GSMP

2) Pentru  $K_2 = \frac{1}{6.28}$ ;  $6.28 \frac{da}{dt} = -0.1061 \frac{d\omega}{dt} + (314 - \omega)$

se obțin următoarele variații în timp ale următoarelor mărimi:



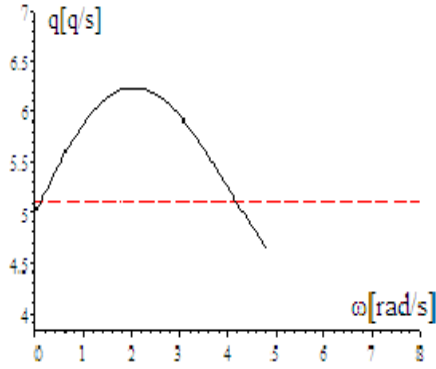


Fig.7.83. Variația în timp a lui  $q$

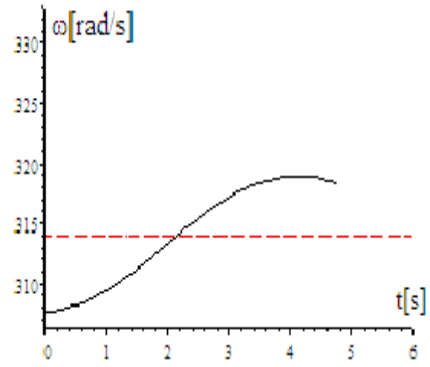


Fig.7.84. Variația în timp a lui  $\omega$

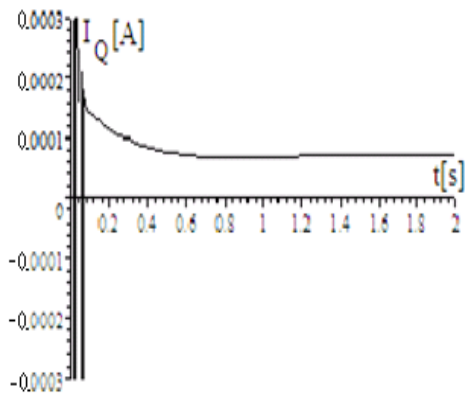


Fig.7.85. Variația în timp a lui  $I_Q$

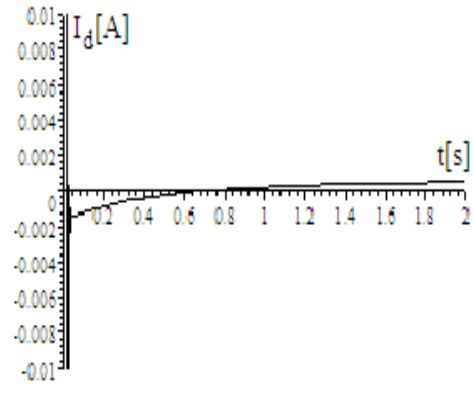


Fig.7.86. Variația în timp a lui  $I_d$

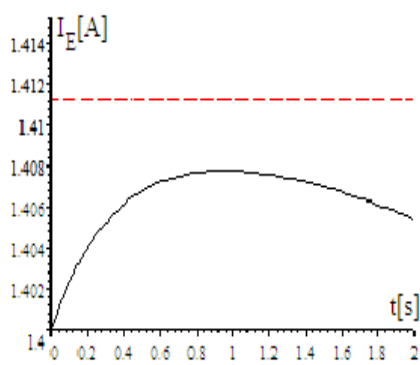


Fig.7.87. Variația în timp a lui  $I_E$

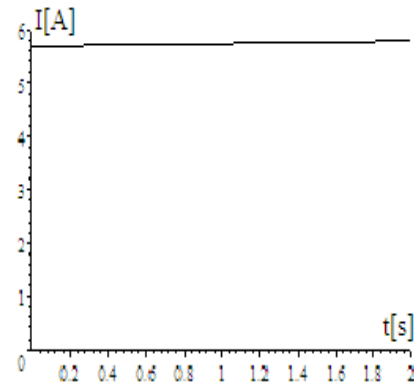


Fig.7.88. Variația în timp a lui  $\sqrt{I_d^2 + I_q^2}$

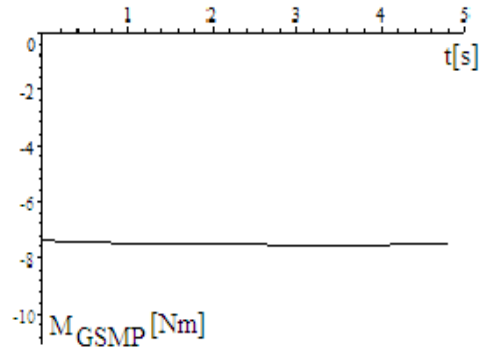


Fig.7.89. Variația în timp a cuplului GSMP

3) Pentru  $K_2 = \frac{10}{6.28}$ ;  $6.28 \frac{da}{dt} = -0.1061 \frac{d\omega}{dt} + 10(314 - \omega)$   
 se obțin următoarele variații în timp ale următoarelor mărimi:

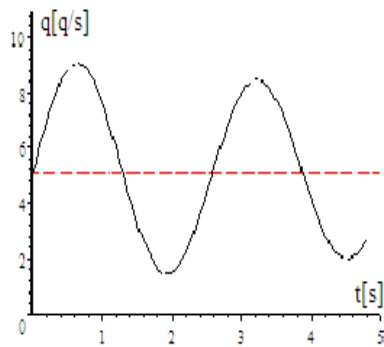


Fig.7.90. Variația în timp a lui q

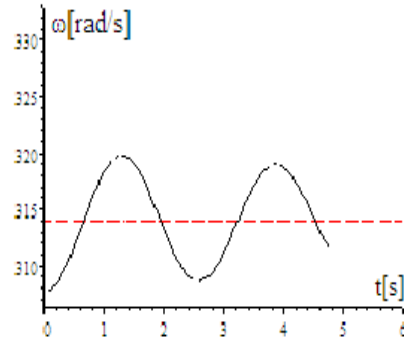


Fig.7.91. Variația în timp a lui  $\omega$

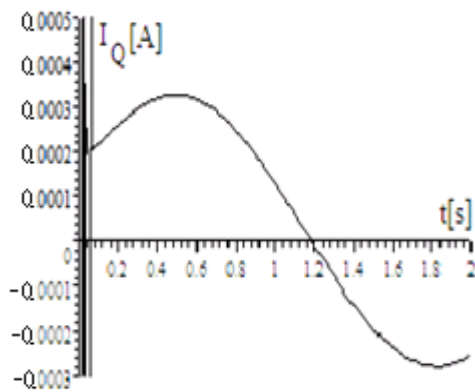


Fig.7.92. Variația în timp a lui  $I_Q$

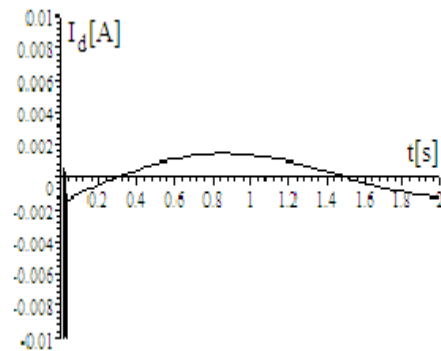


Fig.7.93. Variația în timp a lui  $I_d$

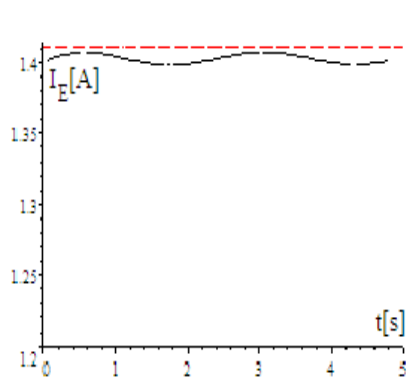


Fig.7.94. Variația în timp a lui  $I_E$

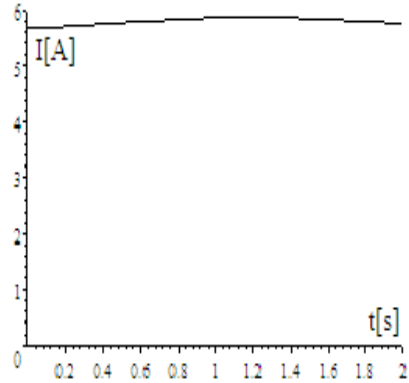


Fig.7.95. Variația în timp a lui  $\sqrt{I_d^2 + I_q^2}$

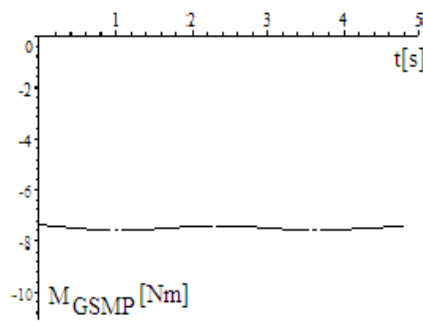


Fig.7.96. Variația în timp a cuplului GSMP

4) Pentru  $K_2 = \frac{100}{6.28}$  ;  $6.28 \frac{da}{dt} = -0.1061 \frac{d\omega}{dt} + 100(314 - \omega)$

se obțin următoarele variații în timp ale următoarelor mărimi:

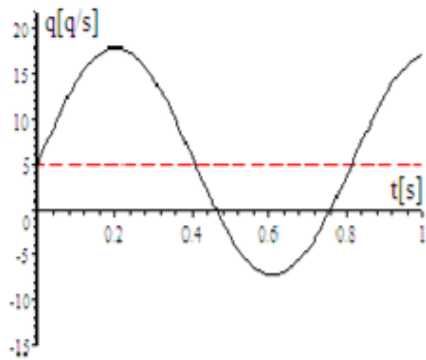


Fig.7.97. Variația în timp a lui  $q$

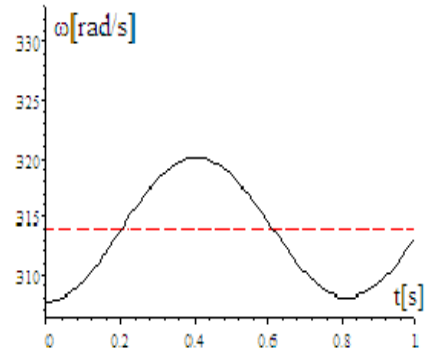


Fig.7.98. Variația în timp a lui  $\omega$

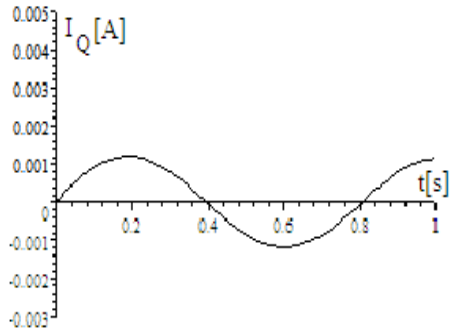


Fig.7.99. Variația în timp a lui  $I_Q$

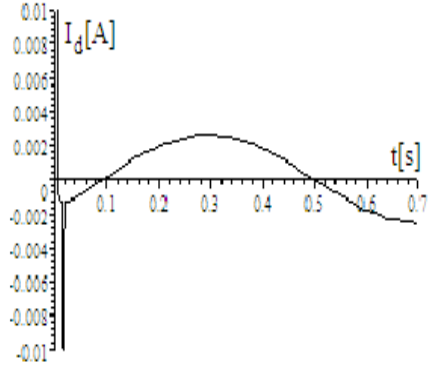


Fig.7.100. Variația în timp a lui  $I_d$

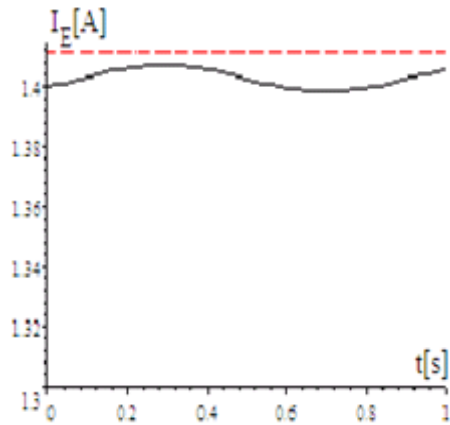


Fig.7.101. Variația în timp a lui  $I_E$

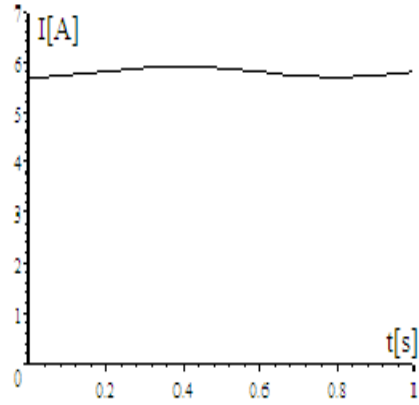


Fig.7.102. Variația în timp a lui  $\sqrt{I_d^2 + I_q^2}$

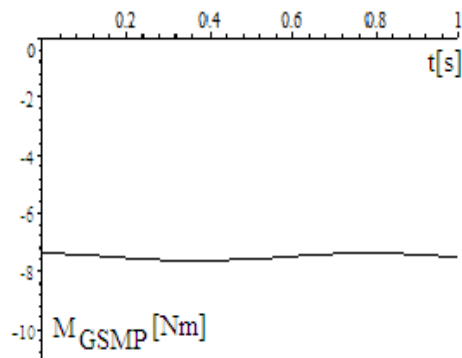


Fig.7.103. Variația în timp a cuplului GSMP

În urma rezultatelor obținute prin simulare numerică, pe un model

matematic ce conține înfășurările de amortizare ale **GS**, se pot trage următoarele concluzii[Deliu2010b]:

1. subsistemul (**MD+GS**) este stabil la orice variații ale sarcinii electrice ce nu depășesc puterea maximă a **MD**;
2. regulatorul de tip **P** nu introduce oscilații, dar valorile finale ale variabilelor pot fi diferite de valorile prescrise, fapt ce la regulatorul de tip **PI** nu se întâmplă;
3. valorile constantelor reguletoarelor influențează variația în timp a diverselor mărimi, în sensul că pentru valori mari a constantei  $K_2$ , la regulatorul de tip **PI**, apar oscilații semnificative, suprareglaj și deci solicitări electrice și mecanice suplimentare;
4. alegerea constantelor reguletoarelor trebuie făcută astfel încât să fie eliminate oscilațiile în timp ale funcțiilor importante: viteza unghiulară, cuplu electromagnetic, curent de excitație, curent statoric s.a.;
5. părțile reglate cu regulatorul de tip **P** nu ating valorile finale, pe când cele reglate cu regulatorul de tip **PI** ating valorile finale.

## 2) PI - pe debit și excitație.

Din ecuația regulatorului  $R_1$  pe **debit**:

$$\Delta q = K_1 \Delta \omega + K_2 \int \Delta \omega dt$$

sau

$$\Delta q = K_1(314 - \omega) + K_2 \int (314 - \omega) dt$$

prin derivare rezultă:

$$-\frac{dq}{dt} = -K_1 \frac{d\omega}{dt} + K_2(314 - \omega)$$

Pentru constanta  $K_1$  se obține :

$$K_1 = \frac{0.1062}{314 - 307.72} = 1.6911 \times 10^{-2}$$

și deci rezultă:

$$-\frac{dq}{dt} = -1.6911 \times 10^{-2} \frac{d\omega}{dt} + K_2(314 - \omega)$$

Din ecuația regulatorului  $R_2$  pe tensiunea de **excitație**  $U_E$  :

$$\Delta U_E = K_1 \Delta U + K_2 \int \Delta U dt$$

prin derivare rezultă:

$$-\frac{dU_E}{dt} = -K_1 \frac{dU}{dt} + K_2(400 - U)$$

iar  $U = \omega I_E$ , obținându-se:

$$-\frac{dU_E}{dt} = -K_1 \frac{d\omega}{dt} I_E - K_1 \frac{dI_E}{dt} \omega + K_2(400 - \omega I_E)$$

Pentru constanta  $K_1$  se obține :

$$K_1 = \frac{\Delta U_E}{\Delta U} = \frac{85.569 - 85.134}{400 - 390} = 0.0435$$

și deci rezultă:

$$-\frac{dU_E}{dt} = -0.0435 \frac{d\omega}{dt} I_E - 0.0435 \frac{dI_E}{dt} \omega + K_2(400 - \omega I_E)$$

Cu valorile lui  $q$  și  $U_E$  astfel determinate se obține sistemul de ecuații diferențiale care stă la baza simulărilor prezentate în continuare:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_E = 40I_E + 18.51 \frac{dI_E}{dt} \\ 5 \frac{d\omega}{dt} = \frac{\omega I_E^2}{-67.172} - 0.28\omega + 93.52 \frac{q}{5} \\ -\frac{dq}{dt} = -1.6911 \times 10^{-2} \frac{d\omega}{dt} + K_{2q}(314 - \omega) \\ -\frac{dU_E}{dt} = -0.0435 \frac{d\omega}{dt} I_E - 0.0435 \frac{dI_E}{dt} \omega + K_{2U_E}(400 - \omega I_E) \\ U_E(0) = 85.134 \\ q(0) = 5 \\ I_E(0) = 1.2674 \\ \omega(0) = 307.72 \end{array} \right.$$

sau cu notațiile  $I_E = a$ ;  $U_E = V$  se obține :

$$\left\{ \begin{array}{l} V = 40a + 18.51 \frac{da}{dt} \\ 5 \frac{d\omega}{dt} = \frac{\omega a^2}{-67.172} - 0.28\omega + 93.52 \frac{q}{5} \\ -\frac{dq}{dt} = -1.6911 \times 10^{-2} \frac{d\omega}{dt} + K_{2q}(314 - \omega) \\ -\frac{dV}{dt} = -0.0435 \frac{d\omega}{dt} a - 0.0435 \frac{da}{dt} \omega + K_{2U_E}(400 - \omega a) \\ V(0) = 85.134 \\ q(0) = 5 \\ a(0) = 1.2674 \\ \omega(0) = 307.72 \end{array} \right.$$

1) Pentru  $K_{2q} = 0.01$ ;  $K_{2U_E} = 0.02$ ,

se obțin următoarele variații în timp ale următoarelor mărimi:

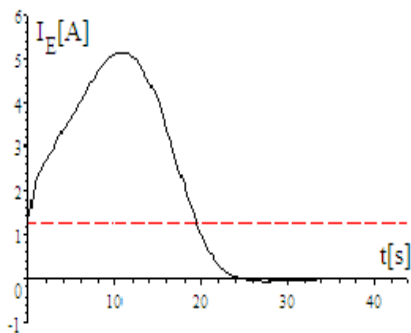


Fig.7.104. Variația în timp a lui  $I_E$

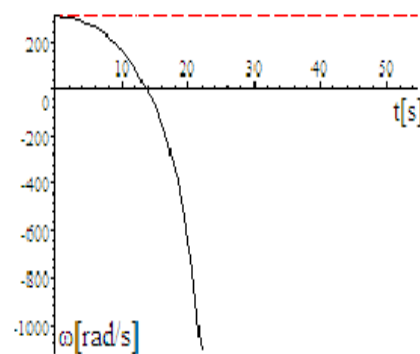


Fig.7.105. Variația în timp a lui  $\omega$

2) Pentru  $K_{2q} = 0.001$ ;  $K_{2U_E} = 0.002$

se obțin următoarele variații în timp ale următoarelor mărimi:

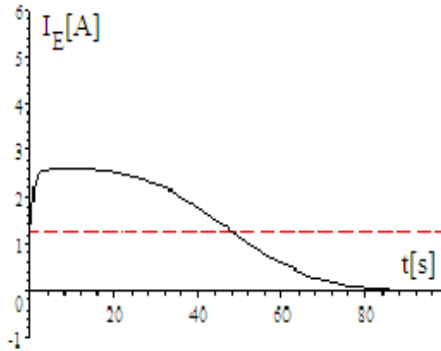


Fig.7.106. Variația în timp a lui  $I_E$

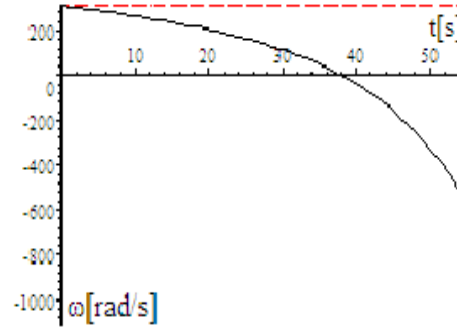


Fig.7.107. Variația în timp a lui  $\omega$

3) Pentru  $K_{2q} = 0.0001$ ;  $K_{2U_E} = 0.0002$

se obțin următoarele variații în timp ale următoarelor mărimi:

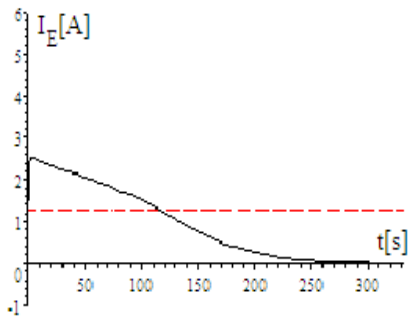


Fig.7.108. Variația în timp a lui  $I_E$

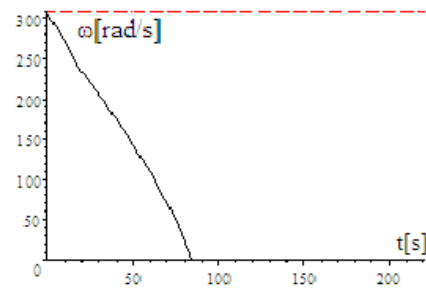


Fig.7.109. Variația în timp a lui  $\omega$

4) Pentru  $K_{2q} = 0.000$ ;  $K_{2U_E} = 0.0000$ ,

se obțin următoarele variații în timp ale următoarelor mărimi:

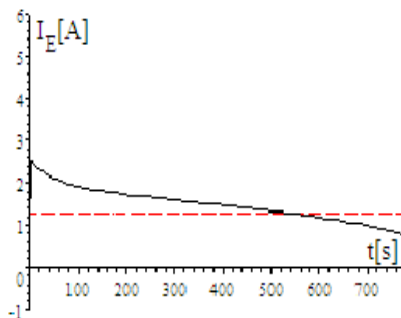


Fig.7.110. Variația în timp a lui  $I_E$

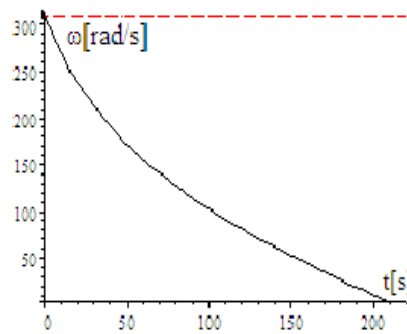
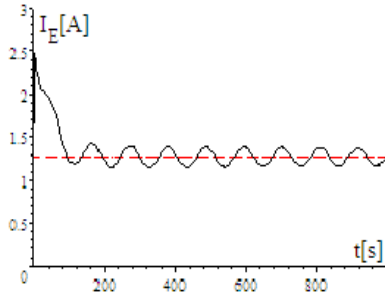
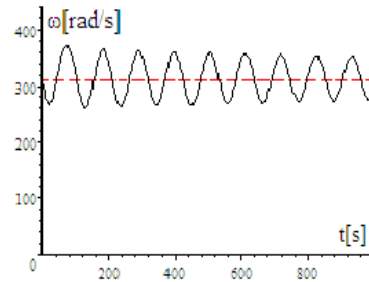
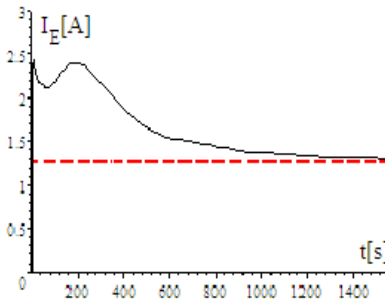
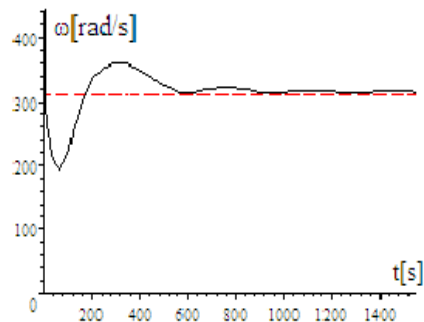


Fig.7.111. Variația în timp a lui  $\omega$

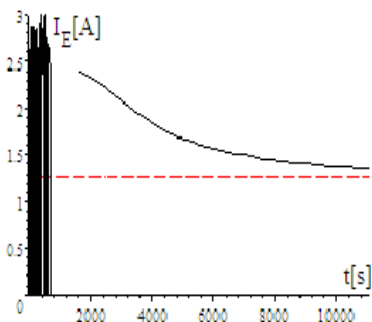
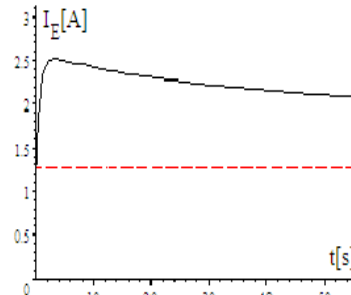
5) Pentru  $K_{2q} = -0.001$ ;  $K_{2U_E} = -0.002$ ,  
se obțin următoarele variații în timp ale următoarelor mărimi:

Fig.7.112. Variația în timp a lui  $I_E$ Fig.7.113. Variația în timp a lui  $\omega$ 

6) Pentru  $K_{2q} = -0.0001$ ;  $K_{2U_E} = -0.0002$ ,  
se obțin următoarele variații în timp ale următoarelor mărimi:

Fig.7.114. Variația în timp a lui  $I_E$ Fig.7.115. Variația în timp a lui  $\omega$ 

7) Pentru  $K_{2q} = -0.00001$ ;  $K_{2U_E} = -0.00002$ ,  
se obțin următoarele variații în timp ale următoarelor mărimi:

Fig.7.116. Variația în timp a lui  $I_E$ Fig.7.117. Variația în timp a lui  $I_E$  (detaliu)



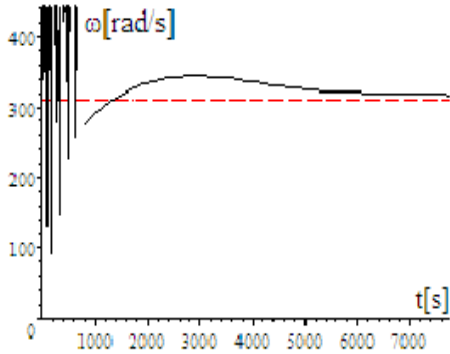


Fig.7.118. Variația în timp a lui  $\omega$

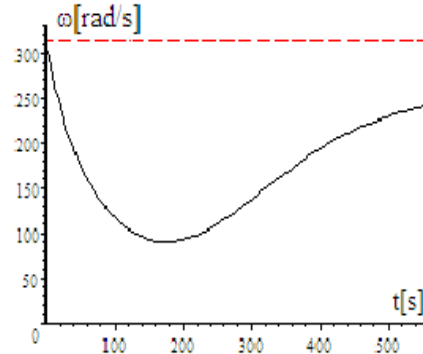


Fig.7.119. Variația în timp a lui  $\omega$  (detaliu)

8) Pentru  $K_{2q} = -0.01$ ;  $K_{2UE} = -0.02$ ,  
se obțin următoarele variații în timp ale următoarelor mărimi:

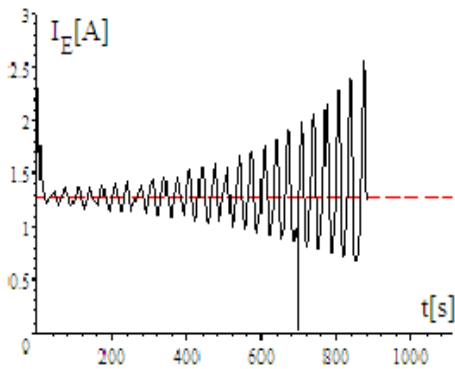


Fig.7.120. Variația în timp a lui  $I_E$

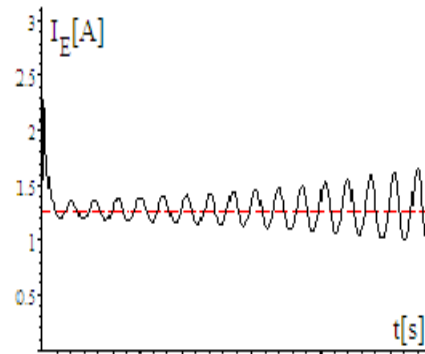


Fig.7.121. Variația în timp a lui  $I_E$  (detaliu)

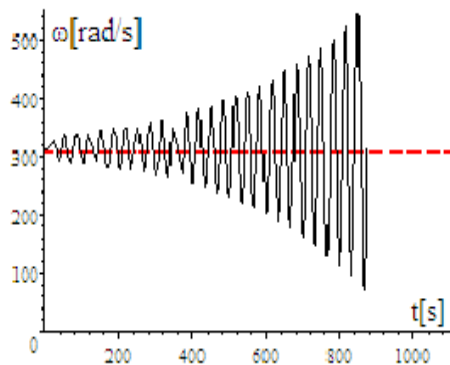


Fig.7.122. Variația în timp a lui  $\omega$

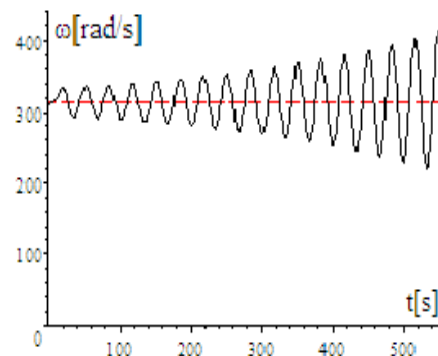


Fig.7.123. Variația în timp a lui  $\omega$  (detaliu)

9) Pentru  $K_{2q} = -0.1$ ;  $K_{2U_E} = -0.2$ ,

se obțin următoarele variații în timp ale următoarelor mărimi:

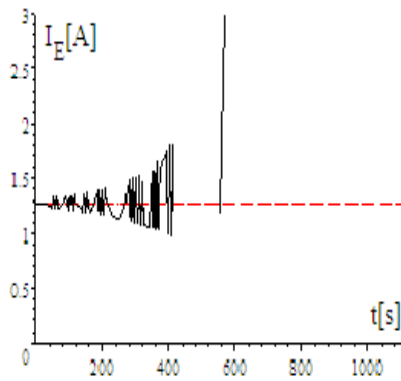


Fig.7.124. Variația în timp a lui  $I_E$

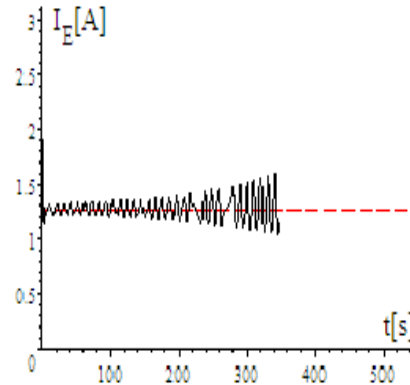


Fig.7.125. Variația în timp a lui  $I_E$  (detaliu)

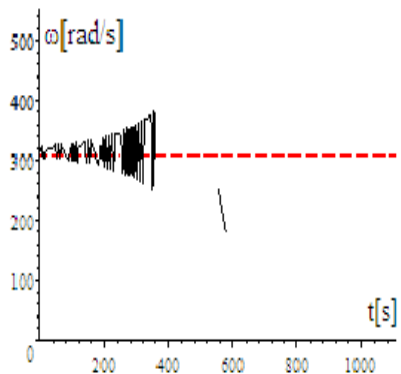


Fig.7.126. Variația în timp a lui  $\omega$

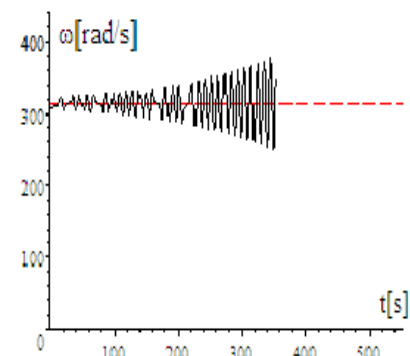


Fig.7.127. Variația în timp a lui  $\omega$  (detaliu)

**Aplicația 3.** Studiul dinamicii subsistemului (MD+GS) cu regatoare de tip PID

Din ecuația regulatorului  $R_1$  pe **debit**:

$$\Delta q = K_1 \Delta \omega + K_2 \int \Delta \omega dt + K_3 \frac{d\Delta \omega}{dt}$$

sau

$$\Delta q = K_1(314 - \omega) + K_2 \int (314 - \omega) dt + K_3 \frac{d(314 - \omega)}{dt}$$

prin derivare rezultă:

$$-\frac{dq}{dt} = -K_1 \frac{d\omega}{dt} + K_2(314 - \omega) - K_3 \frac{d^2\omega}{dt^2}$$

Pentru constanta  $K_1$  se obține:

$$K_1 = \frac{0.1062}{314 - 307.72} = 1.6911 \times 10^{-2} \text{ și deci rezultă:}$$

$$-\frac{dq}{dt} = -1.6911 \times 10^{-2} \frac{d\omega}{dt} + K_2(314 - \omega) - K_3 \frac{d^2\omega}{dt^2}$$

Din ecuația regulatorului  $R_2$  pe tensiunea de **excitație**  $U_E$ :

$$\Delta U_E = K_1 \Delta U + K_2 \int \Delta U dt + K_3 \frac{d\Delta U}{dt}$$

prin derivare rezultă:

$$-\frac{dU_E}{dt} = -K_1 \frac{dU}{dt} + K_2(400 - U) - K_3 \frac{d^2U}{dt^2}$$

Înlocuind  $U$  cu  $\omega I_E$  se obține:

$$-\frac{dU_E}{dt} = -K_1 \left( \frac{d\omega}{dt} I_E + \frac{dI_E}{dt} \omega \right) + K_2(400 - \omega I_E) - K_3 \left( \omega \frac{d^2 I_E}{dt^2} + 2 \frac{d\omega}{dt} \frac{dI_E}{dt} + I_E \frac{d^2 \omega}{dt^2} \right)$$

Pentru constanta  $K_1$  se obține:

$$K_1 = \frac{\Delta U_E}{\Delta U} = \frac{85.569 - 85.134}{400 - 390} = 0.0435 \text{ și deci rezultă:}$$

$$-\frac{dU_E}{dt} = -0.0435 \left( \frac{d\omega}{dt} I_E + \frac{dI_E}{dt} \omega \right) + K_2(400 - \omega I_E) - K_3 \left( \omega \frac{d^2 I_E}{dt^2} + 2 \frac{d\omega}{dt} \frac{dI_E}{dt} + I_E \frac{d^2 \omega}{dt^2} \right)$$

Cu valorile lui  $q$  și  $U_E$  astfel determinate se obține sistemul de ecuații diferențiale care stă la baza simulărilor prezentate în continuare.

$$\left\{ \begin{array}{l} U_E = 40I_E + 18.51 \frac{dI_E}{dt} \\ 5 \frac{d\omega}{dt} = \frac{\omega I_E^2}{-67.172} - 0.28\omega + 93.52 \frac{q}{5} \\ -\frac{dq}{dt} = -1.6911 \times 10^{-2} \frac{d\omega}{dt} + K_2 q(314 - \omega) - K_3 q \frac{d^2\omega}{dt^2} \\ -\frac{dU_E}{dt} = -0.0435 \left( \frac{d\omega}{dt} I_E + \frac{dI_E}{dt} \omega \right) + K_2 U_E (400 - \omega I_E) - \\ - K_3 q \left( \omega \frac{d^2 I_E}{dt^2} + 2 \frac{d\omega}{dt} \frac{dI_E}{dt} + I_E \frac{d^2 \omega}{dt^2} \right) \\ U_E(0) = 85.134 \\ q(0) = 5 \\ I_E(0) = 1.2674 \\ \omega(0) = 307.72 \end{array} \right.$$

Cu notațiile:  $b = \frac{d\omega}{dt}$  și  $c = \frac{dI_E}{dt}$  se obțin derivatele de ordinul al doilea:

$$\frac{d^2\omega}{dt^2} = \frac{db}{dt} \text{ și } \frac{d^2 I_E}{dt^2} = \frac{dc}{dt} \text{ și astfel rezultă:}$$

$$-\frac{dq}{dt} = -1.6911 \times 10^{-2} \frac{d\omega}{dt} + K_2(314 - \omega) - K_3 \frac{db}{dt}$$

$$-\frac{dU_E}{dt} = -0.0435 \left( \frac{d\omega}{dt} I_E + \frac{dI_E}{dt} \omega \right) + K_2(400 - \omega I_E) - K_3 \left( \omega \frac{dc}{dt} + 2 \frac{d\omega}{dt} \frac{dI_E}{dt} + I_E \frac{db}{dt} \right)$$

iar cu notațiile  $I_E = a$ ,  $U_E = V$  se obține :

$$-\frac{dV}{dt} = -0.0435 \left( \frac{d\omega}{dt} a + \frac{da}{dt} \omega \right) + K_2(400 - \omega a) - K_3 \left( \omega \frac{dc}{dt} + 2 \frac{d\omega}{dt} \frac{da}{dt} + a \frac{db}{dt} \right)$$

Cu notația  $b = \frac{d\omega}{dt}$ , ecuația diferențială a mișcării devine:

$$5 \frac{d\omega}{dt} = \frac{\omega I_E^2}{-67.172} - 0.28\omega + 93.52 \frac{q}{5}$$

devine o ecuație algebrică

$$5b = \frac{\omega I_E^2}{-67.172} - 0.28\omega + 93.52 \frac{q}{5}$$

și deci sistemul nu este rezolvabil, prin metode numerice. Pentru a rezolva problema se calculează  $b = \frac{d\omega}{dt}$  din ecuația mișcării:

$$b = \frac{\omega a^2}{-335.86} - 0.056\omega + 18.704 \frac{q}{5}$$

și astfel se obține:

$$\frac{db}{dt} = \frac{a^2}{-335.86} \frac{d\omega}{dt} + \frac{2\omega}{-335.86} \frac{da}{dt} - 0.056 \frac{d\omega}{dt} + \frac{18.704}{5} \frac{dq}{dt} =$$

$$= - \left( \frac{a^2}{335.86} + 0.056 \right) \frac{d\omega}{dt} - \frac{2\omega}{335.86} \frac{da}{dt} + \frac{18.704}{5} \frac{dq}{dt}$$

Cu aceste precizări se obțin ecuațiile reguletoarelor:

$$-\frac{dq}{dt} = -1.6911 \times 10^{-2} \frac{d\omega}{dt} + K_{2q}(314 - \omega) -$$

$$- K_{3q} \left[ - \left( \frac{a^2}{335.86} + 0.056 \right) \frac{d\omega}{dt} - \frac{2\omega}{335.86} \frac{da}{dt} + \frac{18.704}{5} \frac{dq}{dt} \right]$$

$$-\frac{dV}{dt} = -0.0435 \left( \frac{d\omega}{dt} a + \frac{da}{dt} \omega \right) + K_{2V}(400 - \omega a) - K_{3V} \left( \omega \frac{dc}{dt} + 2 \frac{d\omega}{dt} \frac{da}{dt} + a \frac{db}{dt} \right)$$

Derivata  $\frac{dc}{dt}$  se elimină din ecuația înfășurării de excitație

$$V = 40a + 18.51 \frac{da}{dt} \text{ și se obține } \frac{dc}{dt} = \frac{1}{18.51} \frac{dV}{dt} - 2.161 \frac{da}{dt} \text{ și rezultă:}$$

$$-\frac{dV}{dt} = -0.0435 \left( \frac{d\omega}{dt} a + \frac{da}{dt} \omega \right) + K_{2V}(400 - \omega a) - K_{3V} \left[ \omega \left( \frac{1}{18.51} \frac{dV}{dt} - 2.161 \frac{da}{dt} \right) + 2 \frac{d\omega}{dt} \frac{da}{dt} + a \frac{db}{dt} \right]$$

Valorile de regim permanent pentru  $V$ ,  $\omega$ ,  $a$ ,  $q$  se obțin din sistemul algebric:

$$\begin{cases} V = 40a \\ 0 = -\frac{a^2 \omega}{67.172} - 0.28\omega + 93.52 \frac{q}{5} \\ 0 = 0.1(314 - \omega) \\ 0 = 0.2(400 - \omega a) \end{cases}$$

ale cărui soluții sunt:  $\omega = 314$  ;  $a = 1.2739$  ;  $V = 50.955$  ;  $q = 5.1062$   
 Se obține sistemul diferențial complet, cu regulator de tip PID:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_E = 40I_E + 18.51 \frac{dI_E}{dt} \\ 5 \frac{d\omega}{dt} = \frac{\omega I_E^2}{-67.172} - 0.28\omega + 93.52 \frac{q}{5} \\ -\frac{dq}{dt} = -1.6911 \times 10^{-2} \frac{d\omega}{dt} + 0.1(314 - \omega) - \\ -0.15 \left[ -\left( \frac{a^2}{335.86} + 0.056 \right) \frac{d\omega}{dt} - \frac{2\omega}{335.86} \frac{da}{dt} + \frac{18.704}{5} \frac{dq}{dt} \right] \\ V(0) = 85.134; q(0) = 5; a(0) = 1.2674; \omega(0) = 307.72 \\ -\frac{dV}{dt} = -0.0435 \left( \frac{d\omega}{dt} a + \frac{da}{dt} \omega \right) + 0.2(400 - \omega a) - 0.25\omega \left\{ \left( \frac{1}{18.51} \frac{dV}{dt} - 2.161 \frac{da}{dt} \right) + 2 \frac{d\omega}{dt} \frac{da}{dt} + \right. \\ \left. + a \left[ -\left( \frac{a^2}{335.86} + 0.056 \right) \frac{d\omega}{dt} - \frac{2\omega}{335.86} \frac{da}{dt} + \frac{18.704}{5} \frac{dq}{dt} \right] \right\} \end{array} \right.$$

2)  $K_{2q} = 0.00001$  ;  $K_{2V} = 0.00002$  ;  $K_{3q} = 0.000015$  ;  $K_{3V} = 0.000025$

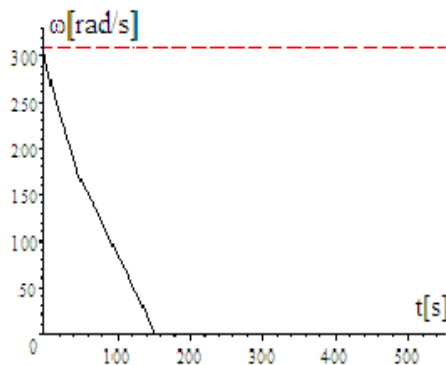


Fig.7.128. Variația în timp a lui  $\omega$

3)  $K_{2q} = -0.00001$  ;  $K_{2V} = -0.00002$  ;  $K_{3q} = 0.000015$  ;  $K_{3V} = 0.000025$

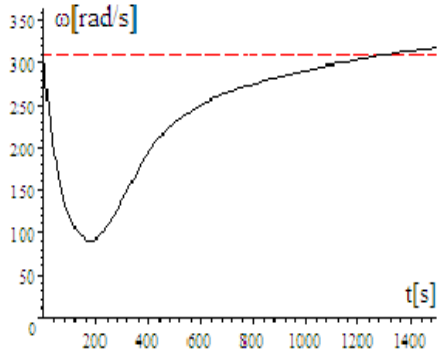


Fig.7.129. Variația în timp a lui  $\omega$  (detaliu)

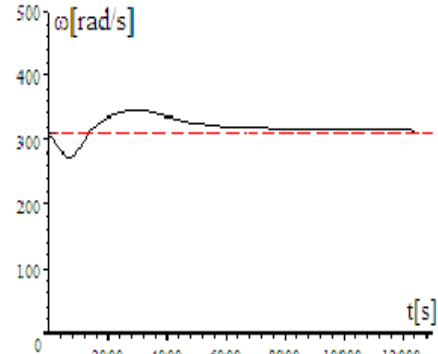


Fig.7.130. Variația în timp a lui  $\omega$

4)  $K_{2q} = -0.001$ ;  $K_{2V} = -0.00002$ ;  $K_{3q} = 0.000015$ ;  $K_{3V} = 0.000025$

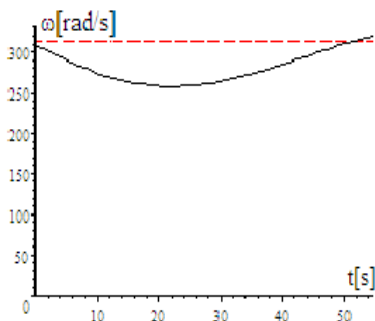


Fig.7.131. Variația în timp a lui  $\omega$  (detaliu)

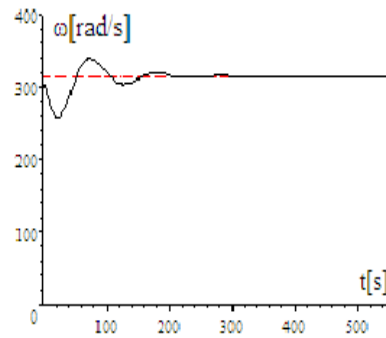


Fig.7.132. Variația în timp a lui  $\omega$

5)  $K_{2q} = -0.01$ ;  $K_{2V} = -0.00002$ ;  $K_{3q} = 0.000015$ ;  $K_{3V} = 0.000025$

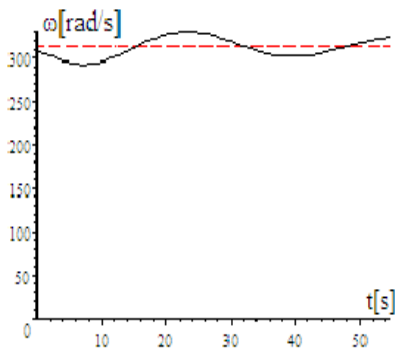


Fig.7.133. Variația în timp a lui  $\omega$  (detaliu)

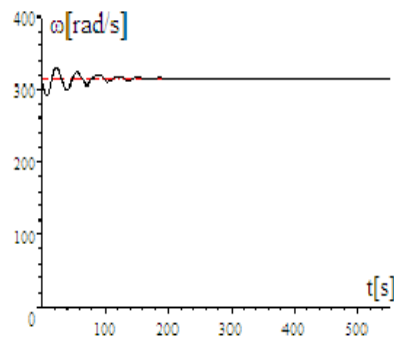


Fig.7.134. Variația în timp a lui  $\omega$

6)  $K_{2q} = -0.1$ ;  $K_{2V} = -0.00002$ ;  $K_{3q} = 0.000015$ ;  $K_{3V} = 0.000025$

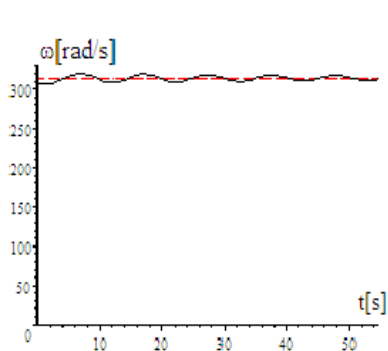


Fig.7.135. Variația în timp a lui  $\omega$  (detaliu)

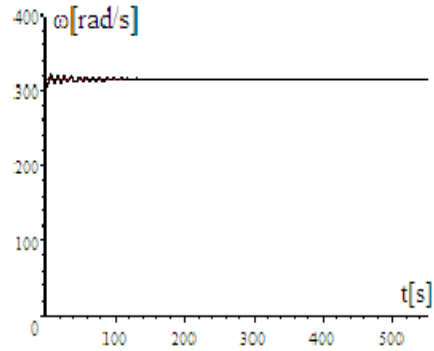


Fig.7.136. Variația în timp a lui  $\omega$

7)  $K_{2q} = -1$ ;  $K_{2V} = -0.00002$ ;  $K_{3q} = 0.000015$ ;  $K_{3V} = 0.000025$

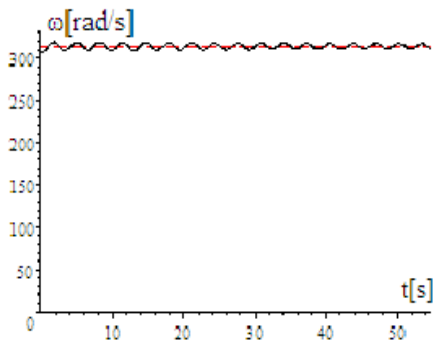


Fig.7.137. Variația în timp a lui  $\omega$  (detaliu)

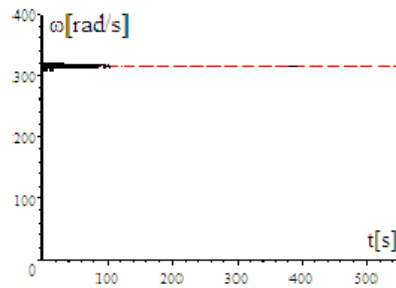


Fig.7.138. Variația în timp a lui  $\omega$

8)  $K_{2q} = -10$ ;  $K_{2V} = -0.00002$ ;  $K_{3q} = 0.000015$ ;  $K_{3V} = 0.000025$

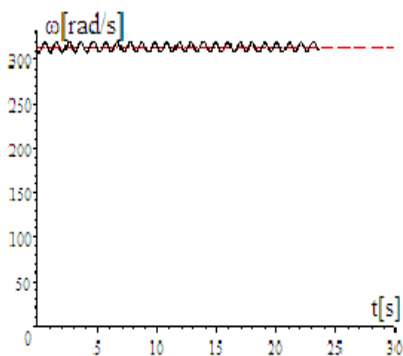


Fig.7.139. Variația în timp a lui  $\omega$  (detaliu)

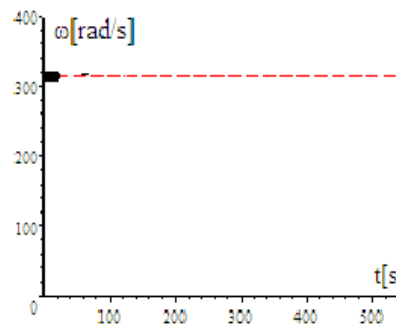
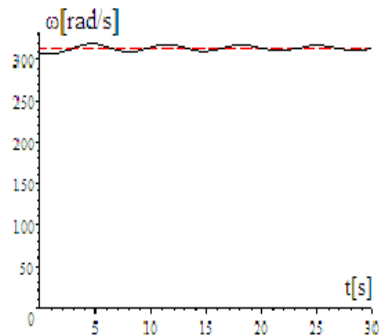
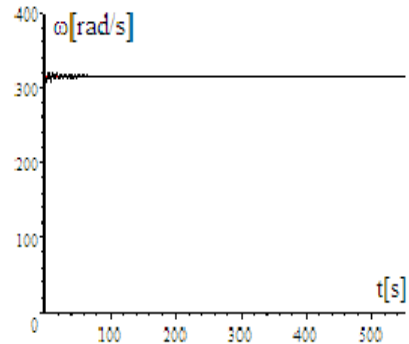
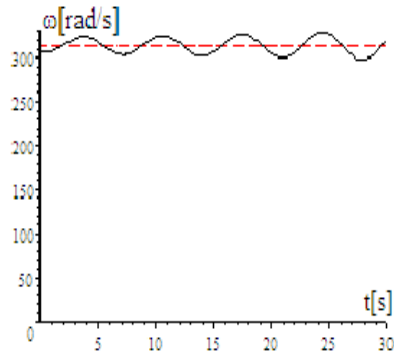
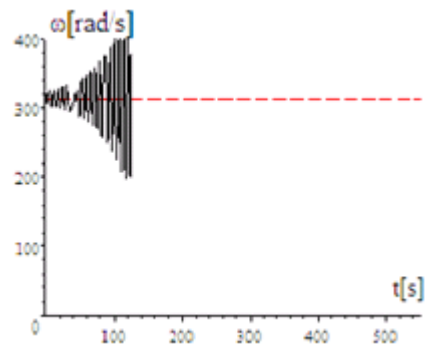


Fig.7.140. Variația în timp a lui  $\omega$

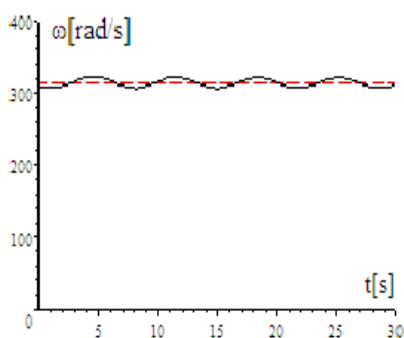
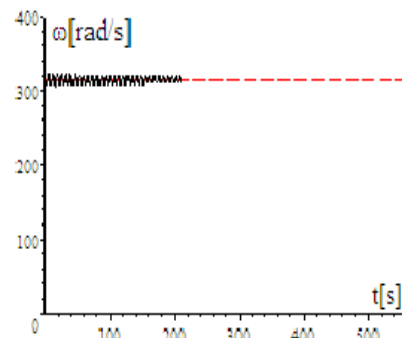
9)  $K_{2q} = -0.1$ ;  $K_{2V} = -0.00002$ ;  $K_{3q} = 0.15$ ;  $K_{3V} = 0.000025$

Fig.7.141. Variația în timp a lui  $\omega$  (detaliu)Fig.7.142. Variația în timp a lui  $\omega$ 

$$10) K_{2q} = -0.1; K_{2V} = -0.2; K_{3q} = 0.15; K_{3V} = 0.25$$

Fig.7.143. Variația în timp a lui  $\omega$  (detaliu)Fig.7.144. Variația în timp a lui  $\omega$ 

$$11) K_{2q} = -0.1; K_{2V} = -0.02; K_{3q} = 0.15; K_{3V} = 0.025$$

Fig.7.145. Variația în timp a lui  $\omega$  (detaliu)Fig.7.146. Variația în timp a lui  $\omega$ 

În procesele tranzitorii la subsistemul (**MD+GSMP**) regulatoarele au un rol esențial.

1. **Regulatorul P**, bine reglat, realizează o stabilitate foarte bună fără



oscilații la  $\omega$  și la  $I_E$ . Constanta de proporționalitate  $K$  se determină simplu din valorile finale și cele inițiale, atât pentru regulatorul pe excitație, cât și pentru regulatorul pe debit.

2. **Regulatorul PI** introduce oscilații în sistem. Regimuri stabile de funcționare se obțin la valori foarte mici pentru constantele integratoare, de exemplu la  $K_{2q} = -0.001$ , (la debit), și  $K_{2U_E} = -0.002$ , (la tensiunea  $U_E$ ). Prin micșorarea constantelor integratoare se elimină oscilațiile, dar nu și suprareglajul, ca de exemplu la  $K_{2q} = -0.0001$  și  $K_{2U_E} = -0.0002$ .

La valori foarte mici:  $K_{2q} = -0.00001$  și  $K_{2U_E} = -0.00002$  se elimină suprareglajul la turație/viteză unghiulară.

La valori pentru  $K_{2q}$  sub  $-0.001$  și sub  $-0.002$  pentru  $K_{2U_E}$  funcționarea devine instabilă.

3. **Regulatorul PID**, la valori mici pentru constantele integratoare și derivate, stabilizează procesul de cinci ori mai repede (în 200[s]) decât regulatorul PI (la care durează 1000[s]).

La PID, partea matematică este de o mare complexitate prin apariția derivatelor de ordinul al doilea și din această cauză se impun o seamă de prelucrări, în sensul aducerii sistemului de ecuații diferențiale la o formă compatibilă în **Scientific WorkPlace**.

## 7.2. Turbine de vânt în zona Mării Negre

Din multitudinea de turbine de vânt TV amplasate în Dobrogea de către firma MONSSON ALMA s-a analizat turbina cu ax orizontal de tip BWC XL.1 cu datele:

- puterea nominală  $P_n = 5$ [KW];
- $U_n = 230$ [V] la  $f = 50$ [Hz].



Fig.7.147.a) Eoliene mici pentru încărcat baterii.



Fig.7.147.b) Eoliene mici pentru încarcat baterii.

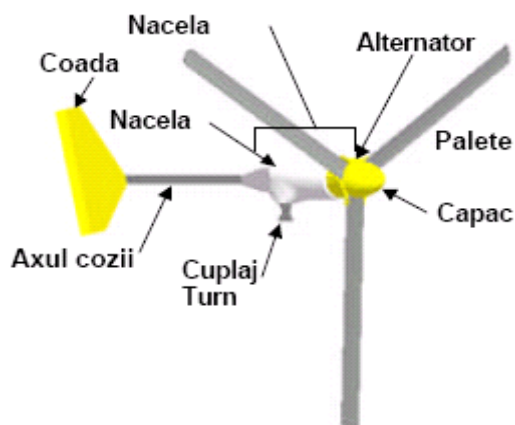


Fig.7.148. Componentele principale ale turbinei de vânt

### Descrierea sistemului BWC XL.1

Componentele principale sunt prezentate în figura 7.148.

#### A. Paletele și rotorul

Rotorul este alcătuit din butuc și trei palete. Palele din fibră de sticlă sunt super-rezistente deoarece au în structura lor fire din fibre de sticlă speciale, întărite, care se întind pe toată lungimea lor. Rotorul are trei palete deoarece acest tip funcționează mult mai bine decât cel cu 2 palete.

#### B. Alternatorul

Alternatorul convertește energia de rotație a rotorului în electricitate. Utilizează magneți permanenți, cu o configurație specială, diferită de normală, astfel carcasa exterioară cu magneți se rotește, în timp ce axul central cu înfășurarea este fixă. Aceasta conferă eficiența mai mare în cazul vitezelor de vânt mai mici.

Tensiunea de ieșire a alternatorului este trifazată –alternativă, AC, dar este redresată în curent continuu în redresorul din nacelă. Deoarece folosește magneți

permanenți, alternatorul generează tensiune oricând rotorul se rotește, nedepinzând de o excitație exterioară.

### C. Nacela

Nacela are o carcasă din fibra de sticlă ce înconjoară corpul principal al mașinii, compus din redresor, ansamblul inelelor colectoare, lagărul de rotire și cuplajul cu turnul. Lagărul de rotire permite turbinei să pivoteze liber în jurul turnului, rotorul fiind astfel tot timpul în vânt. Ansamblul inelelor colectoare, realizează legatura electrică între partea ce se rotește ( nacela ) și cablurile fixe de pe turn. Ansamblul inelelor colectoare și lagărul de rotire al nacellei sunt amplasate imediat deasupra cuplajului cu turnul.

### D. Ansamblul cozii și Operarea AutoFurl (protecția la furtună)

Ansamblul cozii este compus dintr-un ax și aripa cozii. Are rolul de a ține permanent nacela cu rotorul în vânt, la viteze ale vântului mai mici de 12,5 m/s ( 45 km/h ). La aproximativ 12,5 m/s, sistemul AutoFurl intră în acțiune și rotește nacela lateral de vânt, limitând astfel rotația rotorului. Pare că se pliază coada, dar în realitate coada stă în vânt și se rotește din vânt nacela. Oricum rotorul nu se deplasează în totalitate din vânt, permițând astfel turbinei să producă energie și în cazul vânturilor mari.

Atunci când vântul scade din intensitate, nacela se rotește din nou în vânt, în poziție dreaptă.

### E. Controlerul PowerCenter



Fig.7.149. Controler PowerCenter pentru BWC XL.1

Controlerul Power Center (fig.7.149.) servește ca punct central de conectare a componentelor electrice ale sistemului și îndeplinește funcții importante și necesare de control ale întregului sistem electric. Nu toate funcțiile vor fi utilizate în toate instalațiile. Controlerul are LED-uri de stare pentru sistem dar și o linie de lumini ce indică gradul de încărcare al grupului de baterii. Rotorul începe să se rotească la viteza vântului de aproximativ 3m/s ( 10, 8 km/ h ).

### Vânturi puternice- Protecția AutoFurl

În timpul vânturilor puternice sistemul AutoFurl va proteja în mod automat turbina. Când turbina se înclină lateral, puterea generată este redusă semnificativ. În cazul vânturilor de la 13 m/s ( 47 km/h ) până la 18 m/s ( 65 km/h ) este normal ca turbina să se încline lateral repetat , dar la tăria vântului de peste 18 m/s( 65

km/h), turbina va rămâne înclinată lateral continuu, până la scăderea intensității vântului sub 18 m/s.

Sistemul AutoFurl este o metodă simplă și eficientă de protecție la vânturi puternice. Sistemul se bazează pe forțele aerodinamice ale rotorului, gravitație și geometria turbinei aleasă cu grijă.

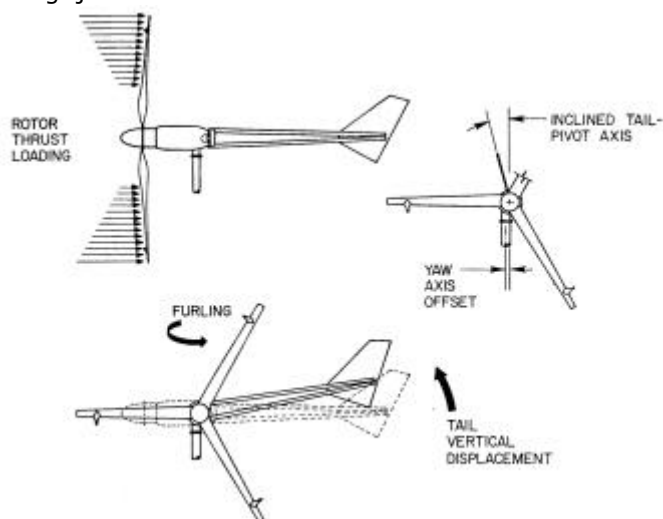


Fig.7.150. Forțele care acționează asupra palelor

Așa cum este prezentat în figura 7.150, forțele aerodinamice acționând asupra palelelor, cauzează o forță de împingere ce apasă pe rotor. Aceste forțe cresc odată cu creșterea vitezei vântului. Forța de împingere acționează prin linia centrală a rotorului, care este deplasată față de linia centrală a axei turnului centrată cu axa de rotire laterală a nacellei. De aceea forțele de împingere ce acționează asupra rotorului vor încerca să rotească rotorul lateral din calea vântului. Însă rotorul este menținut în direcția vântului până la viteze de aproximativ 12,5 m/s (45 km/h), de ansamblul cozii turbinei. Coda turbinei este menținută drept greutatea proprie, deoarece pivotul ei de la partea din spate a nacellei este înclinat. Astfel, greutatea cozii se sprijină pe un tampon de cauciuc și ține rotorul în vânt.

Geometriile sistemului sunt echilibrate cu grijă, în așa fel încât numai peste viteza vântului de 12,5 m/s (45 km/h), forțele rotorului acționând asupra sistemului de rotire laterală sunt suficient de mari pentru a înfrânge forța ce ține coada dreaptă. La acest punct, rotorul începe să se rotească lateral din vânt. În schimb, coada va rămâne tot timpul aliniată pe direcția vântului. Viteza cu care rotorul se deplasează lateral este determinată de viteza momentană a vântului.

Sistemul de protecție la vânt tare funcționează fie dacă turbina este încărcată sau nu. Sistemul AutoFurl este complet pasiv, fiind foarte sigur și robust, întrucât nu sunt părți în mișcare care s-ar putea uza, ca la sistemele clasice de frânare.

Acest sistem s-a utilizat din ani 1980 la turbinele Bergy, și de atunci la fiecare turbină produsă, fiind un element important de succes al turbinelor eoliene.

Sistemul de protecție la vânt tare AutoFurl nu funcționează corespunzător atunci când turbina se montează în vârful unei movile sau în apropierea de stânci ascuțite unde pot apare turbulențe.

#### A. Operarea Slow- Mode ( la turație redusă )

La momentul în care tensiunea bancului de baterii se apropie de tensiunea nominală, controlerul PowerCenter va încerca la început să reducă tensiunea de încărcare prin conectarea sarcinii electrice suplimentare. Funcția de extra sarcină deviază curentul de la încărcarea bateriilor către un încălzitor electric de aer sau apă atunci când bateriile sunt încărcate la tensiunea nominală. Dacă această măsură luată de controler nu este suficientă, sau nu există încălzitorul electric suplimentar de extra- sarcină, controlerul PowerCenter va reduce turația turbinei și va întrerupe parțial alimentarea cu energie de la panourile solare în așa fel încât bateriile să nu fie suprasolicitate.

Funcția de Slow-Mode ( turație redusă ) previne funcționarea turbinei fără consumatori de îndată ce bateriile sunt încărcate. Aceasta reduce zgomotul provocat de turbină și tendința de fluturare a palelor. Fluturarea palelor poate apărea în condiții de vânt foarte tare la turații foarte mari ale rotorului. Această fluturare nu periclitează sistemul.

În Slow-Mode ( turație redusă ), turbina este redusă la aproximativ 130 rot/ min la vânt slab, iar dacă vântul va crește în intensitate, turația de rotire a rotorului va scăde în continuare. Puterea maximă în acest mod de funcționare este de 120 W. Dacă va crește consumul de energie din baterii, controlerul PowerCenter va crește turația la turbină astfel încât curentul de încărcare al bateriilor să crească din nou.

Dacă nu este nici un consumator electric conectat și bateriile sunt pline, turbina de vânt este adusă la o turație foarte mică, aproximativ 20 rot/ min, iar panourile fotovoltaice sunt complet deconectate.

## B. Controlerul PowerCenter

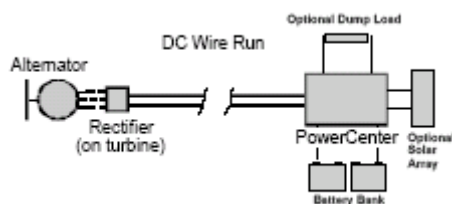


Fig.7.151. Schema bloc a turbinei XL.1

Schema electrică de bază a turbinei BWC XL.1 este prezentată în figura 7.151. Generatorul produce un curent alternativ trifazat AC, care variază în tensiune și frecvență cu viteza de rotație a rotorului. Curentul trifazat AC, este redresat în curent continuu DC într-un redresor aflat în nacelă. Astfel curentul ce pleacă de la turbina către PowerCenter este curent continuu, la 24 V.

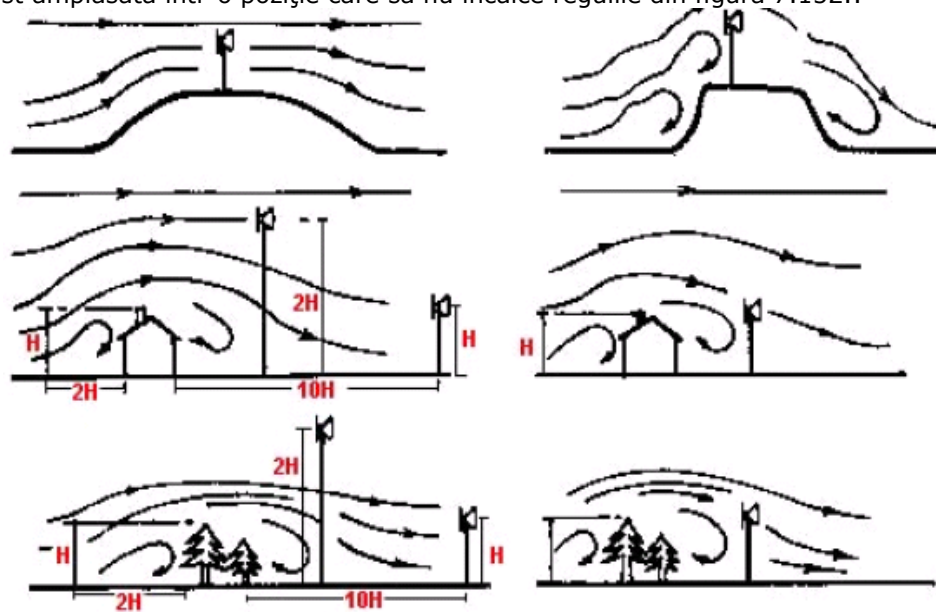
Controlerul PowerCenter are două seturi de diode luminoase pentru Controlul Sistemului în sine și pentru Controlul stării bancului de baterii.

## 7.3. Viteza vântului în zona litoralului Mării Negre

Înregistrările au fost făcute în zona litoralului Mării Negre în lunile august, septembrie și octombrie ale anului 2010, unde este amplasat un câmp de eoliene ale firmei MONSSON ALMA.

Cunoscând datele privind viteza medie multianuală a vântului de la observatorul meteo din zonă și efectuând măsurătorile cu aparatura proprie a firmei MONSSON ALMA Constanța (anexa 2), s-a putut estima, cu o eroare acceptabilă, viteza vântului în perioada august-septembrie-octombrie 2010.

Din cauza curenților turbionari creați de obstacole, turbina eoliană folosită a fost amplasată într-o poziție care să nu încalce regulile din figura 7.152.:



bine greșit  
Fig.7.152. Montarea turbinelor (bine/greșit)

Astfel s-au obținut următoarele variații ale vitezei vântului în perioada august - septembrie - octombrie 2010:

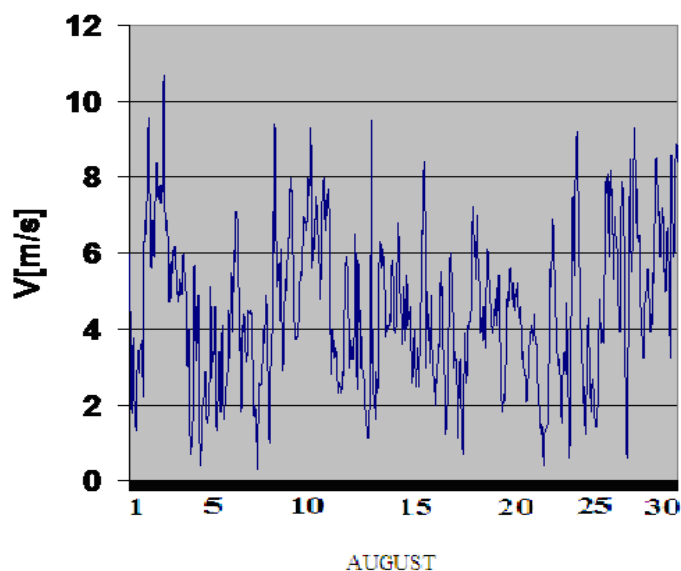


Fig.7.153. Viteza vântului în luna august 2010

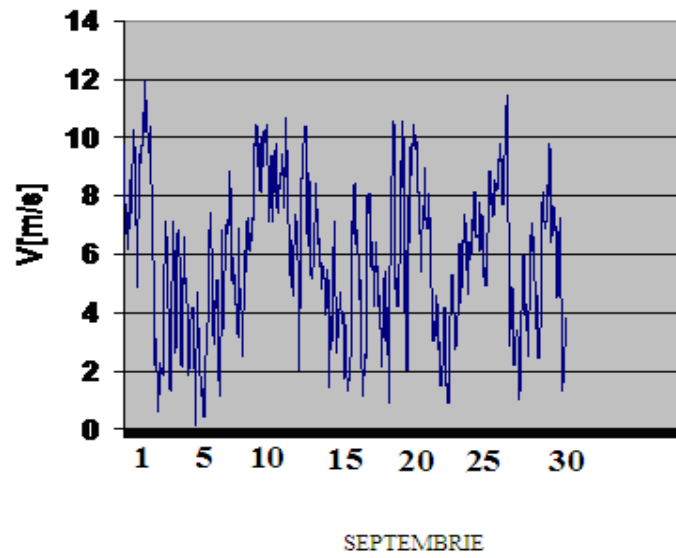


Fig.7.154. Viteza vântului în luna septembrie 2010

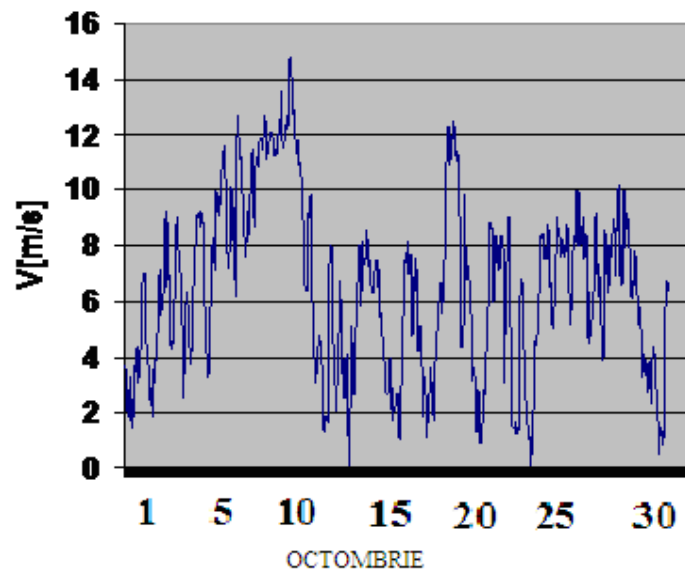


Fig.7.155. Viteza vântului în luna octombrie 2010

#### **7.4. Verificări experimentale a dependenței puterii maxime de cubul vitezei vântului.**

Puterea maximă ce o dezvoltă o turbină eoliană depinde de cubul vitezei:

$$P_{TV} = K_{TV} \cdot V^3$$

Diferențele au fost în estimarea puterilor maxime la care funcționează turbina de vânt.

Verificările experimentale privind funcționarea în punctele de putere maximă au scos în evidență faptul că la viteze ale vântului mici și la modificări rapide și importante ale vitezei vântului, sistemul eolian nu funcționează mereu în punctele de putere maximă, datorită inerției mecanice mari a sistemului (TV+GS). Aceste aspecte au fost amplu analizate pe parcursul tezei, unde se poate observa influența mare ce o are valoarea momentului de inerție echivalent al sistemului turbină-generator electric. Un rol important în asigurarea stabilității în funcționare o au reglatoarele a căror acordare se face după o atentă analiză a comportării sistemului.

Cunoscând valorile vitezei vântului în perioada august- septembrie- octombrie 2010 s-au determinat rapoartele dintre putere debitată de turbine eoliană și cubul vitezei vântului (anexa 2). S-a constatat că la o funcționare în punctele de putere maximă ale sistemului, ar trebui ca aceste rapoarte să se mențină constante indiferent de viteza vântului. Se observă că acest fapt nu este posibil pentru toată gama de viteze, datorită, așa cum s-a menționat în capitolele anterioare, inerției mecanice. O funcționare în punctul de putere maximă are loc doar la viteze ale vântului în zona  $V=6$  [m/s], (anexa 2).

De asemenea se observă că la modificări rapide ale vitezei vântului în timp, punctul de funcționare este departe de punctul de putere maximă și, de exemplu, de la  $V=3.5$  [m/s] la  $V=2.2$  [m/s], încărcarea se modifică de la 2,36 la 0,04. Folosirea unor turbine mici de inerție redusă poate să aducă funcționarea cât mai aproape de punctul de putere maximă.

#### **7.5. Determinarea caracteristicilor mecanice ale TV**

Din datele experimentale :puterea activă  $P$  debitată de generator și turația  $n$  la arborele TV se determină cuplul turbinei. Încercările experimentale s-au făcut la o viteză a vântului de valoare:  $V=4$  (m/s) și  $V=5$  (m/s) pentru vitezele unghiulare  $\omega$  ale TV în zona  $\omega=(2\div 10)$  (rad/s).



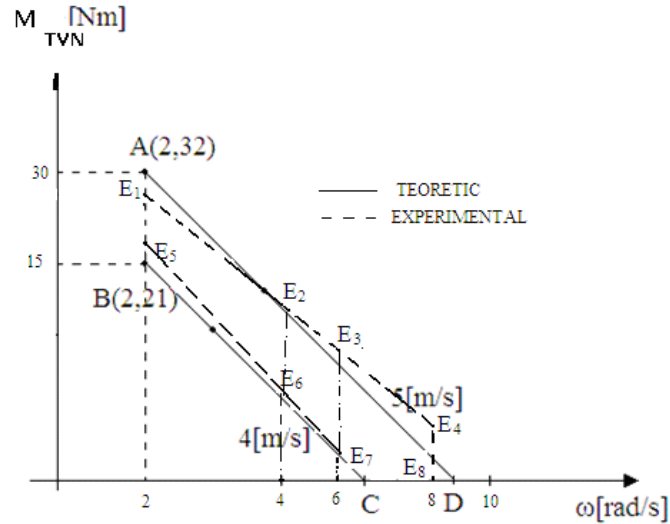


Fig.7.156. Caracteristicile mecanice ale TV

Cunoscând puterea  $P$  la care lucrează TV și turația  $n$  s-au calculat valorile cuplului în punctele:  $E_1, E_2, E_3, E_4$  pentru viteza  $V=5(\text{m/s})$  și  $E_5, E_6, E_7, E_8$  pentru  $V=4(\text{m/s})$ .

Pentru calculul cuplului s-a folosit relația:

$$M_{TV} = P / (2\pi n / 60)$$

unde:

- $p$  este puterea măsurată la generator și corectată cu valoarea randamentului sistemului (TV+GS);

- $n$  este turația la axul TV;

La viteza vântului  $V=4(\text{m/s})$  caracteristica mecanică a TV este dată de ecuația:

$$M_{TV-4} = -4.2 \omega + 29.4$$

care aproximează caracteristica mecanică experimentală cu o eroare sub 4%.

La viteza vântului de  $V=5(\text{m/s})$  mecanică a TV este dată prin ecuația:

$$M_{TV-5} = -4.5714 \omega + 41.143$$

care aproximează caracteristica mecanică experimentală cu o eroare de sub 3%.

Punctele de putere maximă sunt:

- $P_1$  pentru  $V=4(\text{m/s})$ ;

- $P_2$  pentru  $V=5(\text{m/s})$ .

și se caracterizează prin următoarele valori ale puterilor:

$P_1=51.45[\text{W}]$ -calculată;

$P_{1\text{exp}}=52.1[\text{W}]$ -măsurată;

$P_2=92.573[\text{W}]$ calculată;

$P_{2\text{exp}}=91.3[\text{W}]$ măsurată.

Diferențele între rezultatele teoretice și cele măsurate la cele două viteze ale vântului, având în vedere puterea mecanică captată de TV sunt:

$\varepsilon_1 = \Delta P / P_1 = 1.25\%$  pentru  $V=4(\text{m/s})$ ;

$\varepsilon_2 = \Delta P / P_2 = 1.39\%$  pentru  $V=5(\text{m/s})$ .

## 7.6. Determinarea experimentală a rezistenței de sarcină optime

Așa cum s-a menționat, în locațiile din zona litoralului, se folosesc turbine de vânt pentru încărcarea acumulatorilor electrice și din acest motiv ca și generatoare s-au folosit generatoare de curent continuu cu magneți permanenți care au marele avantaj că nu mai este necesară redresarea curentului alternativ și deci sistemul de conversie este mult mai simplu. Generatoarele de curent continuu având excitația cu magneți permanenți –GCMP- debitează direct pe acumulatorul electric simbolizat în figura de mai jos prin  $R_{sarcină}$ .

Funcționarea optimă a subsistemului(TVN+GCMP+AE) a fost realizată experimental prin încercări la diverse rezistențe de sarcină conectate la bornele generatorului, ca în figura 7.157.

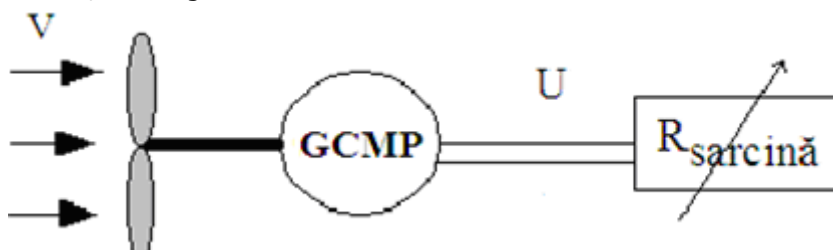


Fig.7.157. Sistem eolian cu sarcină rezistivă

Dependența rezistenței de sarcină  $R$  de viteza vântului astfel încât funcționarea să fie în punctele de putere maximă s-a dedus teoretic în capitolul 4.

Prin măsurarea directă a puterii la diferite valori ale lui  $R$  și  $V$  s-a obținut dependența rezistenței de sarcină față de viteza vântului, în condițiile în care puterea obținută de la turbină să fie maximă. Maximul de putere s-a obținut prin modificări mici ale rezistenței de sarcină în jurul valorilor obținute din calcul.

În continuare se pot observa rezultatele teoretice și cele experimentale obținute pe turbina de vânt.

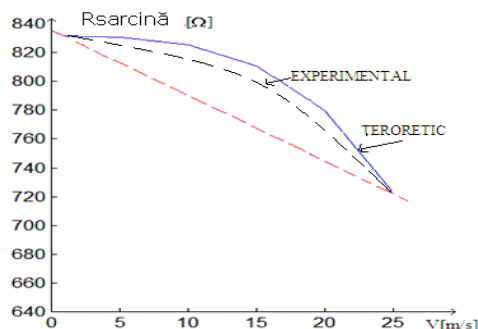


Fig.7.158. Dependența rezistenței de sarcină

Energia măsurată după un timp  $T=5555[s]$  este comparată cu cea calculată, în cele de mai jos:

a) Pentru  $R = 831[\Omega]$ :  $W_{exp} = 1.1654 \times 10^6 [J]$ ;  $W_{teoretică} = 1.156 \times 10^6 [J]$  ,

b) Pentru  $R = 931[\Omega]$ :  $W_{exp} = 1.1334 \times 10^6 [J]$ ;  $W_{teoretică} = 1.124 \times 10^6 [J]$  ,

c) Pentru  $R = 531[\Omega]$ :  $W_{exp} = 1.2235 \times 10^6 [J]$ ;  $W_{teoretică} = 1.217 \times 10^6 [J]$  ,

d) Pentru  $R = 231[\Omega]$ :  $W_{exp} = 1.0536 \times 10^6 [J]$ ;  $W_{teoretică} = 1.052 \times 10^6 [J]$  ,

e) Pentru  $R = 31[\Omega]$ :  $W_{exp} = 4.3881 \times 10^5 [J]$ ;  $W_{teoretică} = 4.351 \times 10^5 [J]$  ,

f) Pentru  $R = 1531\Omega$ :  $W_{exp} = 9.3638 \times 10^5 [J]$ ;  $W_{teoretică} = 9.359 \times 10^5 [J]$ .

Diferențele dintre rezultatele teoretice și cele experimentale sunt sub 1,5% ceea ce confirmă valabilitatea modelelor matematice ale turbinei de vânt navale.

### 7.7. Comportarea sistemului Diesel-Generator

La un grup Diesel-Generator de pe o navă din dotarea flotei maritime militare (de tip fregată) s-au făcut verificări experimentale ale comportării sistemului în regim tranzitoriu.

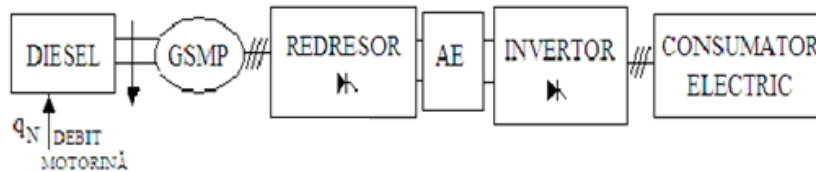


Fig.7.159. Grup Diesel-Generator

Din simulările prezentate în capitolul 6 a rezultat variația în timp a vitezei unghiulare mecanice -  $\omega$  - și a tensiunii -U- la generator la folosirea unui regulator de tip -P.

Rezultatele experimentale confirmă aceste variații așa cum rezultă din figurile 7.160. și 7.161.

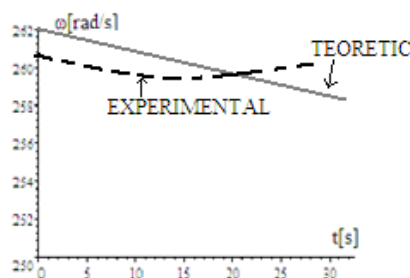


Fig.7.160. Variația în timp a lui  $\omega$

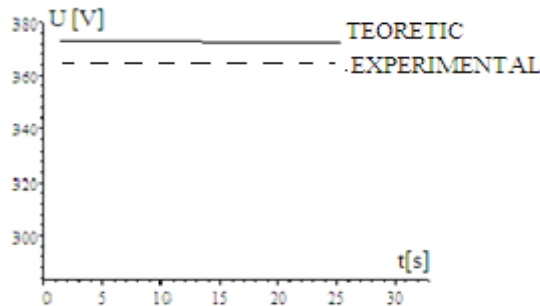


Fig.7.161. Variația în timp a tensiunii

Diferențele dintre rezultatele teoretice și cele experimentale sunt sub 3% ceea ce confirmă valabilitatea modelelor matematice ale Motorului Diesel și Generatorului.

## 7.8. Concluzii

Înregistrările făcute în zona litoralului românesc al Mării Negre au demonstrat faptul că potențialul eolian în această zonă este important și deci valorificarea lui este rentabilă economic atât pe uscat cât și pe mare .

Din datele experimentale luate de la o turbină de vânt funcțională în anul 2010 în zona Dobrogea, de la firma MONSSON ALMA, s-a verificat corectitudinea ecuațiilor ce modelează caracteristicile mecanice ale TV, caracteristici cu care s-a lucrat pe tot parcursul tezei. În urma analizei puterilor s-au calculat cuplurile și s-au comparat cu cele obținute din calcul. Diferențele au fost sub 2% în estimarea puterilor maxime la care funcționează turbina de vânt.

Verificările experimentale privind funcționarea în punctele de putere maximă au scos în evidență faptul că la viteze mici ale vântului și la modificări rapide și importante ale vitezei vântului, sistemul eolian nu funcționează mereu în punctele de putere maximă, datorită inerției mecanice mari a sistemului (TV+GS). Aceste aspecte au fost amplu analizate pe parcursul tezei, unde se poate observa influența mare ce o are valoarea momentului de inerție echivalent al sistemului turbină-generator electric. Un rol important în asigurarea stabilității în funcționarea sistemului o au reglatoarele a căror acordare se face după o atentă analiză a comportării sistemului.

În continuare se prezintă o sinteză a contribuțiilor personale din acest capitol:

- verificarea experimentală a caracteristicilor mecanice ale turbinei prin măsurători ale puterii și turației;
- verificarea experimentală a funcționării sistemului în punctele de putere maximă;
- analiza diverselor forme de variație în timp a vitezei vântului, astfel încât să se modeleze cât mai exact variația reală a vitezei vântului;
- determinarea unor dependențe a rezistenței de sarcină de viteza vântului astfel încât să se obțină maximul energetic;
- determinarea energiei electrice obținute pentru diverse configurații ale vitezei vântului și la diferite rezistențe de sarcină optimizate;

- acordarea reguletoarelor de tip P,PI și PID, astfel încât să se obțină reglaje optime, stabilitate în funcționare și timp de răspuns minim;
- demonstrarea faptului că în stabilirea punctelor optime de funcționare este necesară cunoașterea atât a vitezei medii a vântului cât și a valorilor extreme;
- s-a demonstrat teoretic și s-a verificat experimental că intervalele de analiză trebuie să se extindă pe zone de timp de ordinul zilelor, iar studiile care se bazează pe intervale mici de timp pot să fie eronate;
- s-a verificat experimental că un reglaj optim se poate face numai prin măsurarea directă a vitezei vântului și determinarea încărcării la generator, astfel încât pe o perioadă lungă de timp să se obțină maximul energetic;
- toate rezultatele aplicative permit utilizarea lor în cazul unor sisteme reale de mare putere 3-4[MW];
- determinarea experimentală a rezistenței de sarcină optime la sistemul izolat (TV+GS);
- verificarea experimentală a variației în timp a turației și tensiunii la încărcarea unui grup Diesel-generator reglat cu un regulator de tip P.

## **8. CONCLUZII FINALE ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE.PERSPECTIVE DE DEZVOLTARE**

În acest capitol se realizează o sinteză a concluziilor finale, a contribuțiilor generale aduse de autor, precum și a modului de valorificare a rezultatelor obținute, cu posibilitatea de continuare a cercetărilor în acest domeniu.

### **8.1. Concluzii finale și contribuții personale**

Din analiza tezei de doctorat rezultă următoarele concluzii :

- 1.Referitor la sistemul electroenergetic naval se pot afirma următoarele :
  - actualmente energia electrică se obține exclusiv la Diesel generatoarele navale fiind mereu mai scumpe, poluante și cu probleme în perioada crizelor petroliere;
  - utilizarea energiei solare și a celei eoliene poate completa necesarul de energie pe navă;
  - folosirea energiei solare și a celei eoliene mărește siguranța energetică a navei și rezolvă, în parte, problemele de protecția mediului;
  - folosirea acumulatorilor electrice în stocarea de energie electrică ridică eficiența în utilizarea motorinei prin faptul că motorul Diesel poate funcționa la randament maxim în toată perioada.
- 2.Referitor la aspectele tehnice ce privesc energia solară și cea eoliană rezultă următoarele concluzii:
  - se pune problema folosirii acestor tipuri de energie la nave, atât în regim de staționare cât și în marș;
  - din punct de vedere tehnico-economic utilizarea surselor regenerabile de energie:soare/vânt este avantajoasă atât prin economia de combustibil, cât și prin eliminarea emisiilor de CO<sub>2</sub>;
  - deoarece energia eoliană este semnificativ și rapid variabilă în timp, sistemele de reglare trebuie să poată controla fluctuațiile de putere într-un mod în care de la vânt și soare să se preia maximum de energie;
  - acordarea reguletoarelor(P, PI, PID) trebuie realizată corect pentru a se asigura stabilitatea în funcționare a sistemului electroenergetic de pe navă.
- 3.Referitor la aplicațiile software dezvoltate în lucrare și folosite la simulările numerice date cu sistemele eoliene și solare variabile aleator în timp, precum și cu sisteme Diesel, se pot evidenția următoarele concluzii:
  - modelele matematice, în parte originale, la turbina de vânt, generatorul electric și motorul Diesel, pot da o informație completă a modului cum se comportă sistemul în timpul proceselor tranzitorii prin rezolvarea unor sisteme de ecuații diferențiale, neliniare și neomogene și în general de grad mare;

- implementarea reguletoarelor de tip P, PI și PID în setul de ecuații diferențiale s-a analizat având în vedere diferite regiuni tranzitorii ce apar în sistemul electroenergetic de pe navă.

În continuare se prezintă sinteza principalelor contribuții originale, teoretice și aplicative, cuprinse în cadrul tezei de doctorat.

În cadrul capitolului 2 , având ca obiectiv prezentarea surselor regenerabile de energie, insistându-se în principal asupra energiei eoliene și solare , pot fi enumerate următoarele contribuții personale:

- analiza evolutivă a energiei eoliene cu posibilități la implementarea pe nave;
- analiza critică a posibilității folosirii energiei solare în sistemul electroenergetic al navei .

În capitolul 3 destinat stabilirii modelelor matematice ale turbinei de vânt navale, bateriei solare, acumulatorilor electrice, convertorului DC-DC și motorului DIESEL se pot evidenția următoarele contribuții personale:

- stabilirea modelelor matematice ale turbinei de vânt **TVN** dependent de viteza vântului ;
- stabilirea naturii punctului de funcționare (stabil/instabil) la **GSMP**;
- analiza variațiilor fluxului statoric la **GSMP** cu consecințe privind demagnetizarea **MP**.

În cadrul capitolului 4 s-a analizat conducerea subsistemului electroenergetic eolian precum și performanțele dinamice ale sistemului diverse funcții de variație a vitezei vântului, contribuțiile personale fiind:

- deducerea dependenței rezistenței de sarcină de viteza vântului în regim static și dinamic;
- analiza fenomenelor tranzitorii la modificarea vitezei vântului;
- maximizarea energiei electrice în condițiile în care viteza vântului variază;
- calculul turajiei de referință astfel încât energia preluată de la vânt să fie maximă;
- analiza ponderii înfășurărilor de amortizare.

Capitolului 5 s-a axat în principal pe analiza sistemului electroenergetic solar. S-au luat în considerare modificările insolației în timpul zilei și deci în permanență punctele de putere maximă își schimbă coordonatele. În acest sens este necesară asigurarea unui sistem de conducere astfel încât mereu sistemul să funcționeze în punctele de putere maximă. Principalele contribuții personale aduse acestui capitol sunt:

- identificarea punctelor de putere maximă prin măsurarea momentană a insolației;
- analiza armonică a curentului debitat în **AE** pentru a se estima pierderile de putere suplimentare ce apar în acestea.

În capitolul 6 se analizează subsistemul **MD+GSMP**, care completează energia necesară la consumatorii de pe navă astfel încât tensiunea și frecvența să fie mereu în limitele valorilor nominale. Problemele esențiale în acest capitol constă în acordarea reguletoarelor deoarece sistemul analizat fiind neliniar nu se pot aplica criteriile cunoscute. Se analizează în acest capitol reguletoarele de tip P, PI, PID. Oscilațiile cunoscute care apar la reguletoarele folosite pot să scoată subsistemul din funcționare. Se pot scoate în evidență următoarele contribuții personale:

- implementarea ecuațiilor reguletoarelor în ansamblul sistemului de ecuații diferențiale ce conține motorul DIESEL și GS;

- transformarea ecuațiilor regulatorului PID astfel încât să fie posibilă o rezolvare numerică, deoarece în faza inițială existau atât ecuații diferențiale, cât și algebrice care făcea imposibilă rezolvarea pe cale numerică;
- acordarea prin simulări numerice a reguletoarelor folosite astfel încât să se poată elimina cazurile de instabilitate;
- analiza ponderii de înfășurare în procesele tranzitorii cu observarea importantă că acestea în sistemele inerțiale mari au o pondere redusă;
- estimarea șocurilor de sarcină ce apar în procesele tranzitorii, șocuri de natură electrică (curenți, tensiuni, frecvență), precum și șocuri de natură mecanică (cupluri, turații);
- rezolvarea ecuațiilor diferențiale cu nucleul Maple (SWP).

Capitolul 7 este consacrat analizării rezultatelor experimentale pe o turbină de vânt aparținând firmei MONSSON ALMA, testată în zona litoralului Mării Negre și pe un grup Diesel – generator aparținând unei nave militare .

În prima parte a capitolului se prezintă o turbină eoliană având puterea  $P=5\text{KW}$  montată în zona litoralului românesc al Mării Negre. A doua parte cuprinde înregistrările vitezei vântului pe o perioadă de timp de 3 luni de zile. Puterea activă debitată de sistemul (TV+GSMP) a fost măsurată experimental și s-a prezentat evoluția ei în timp. S-au determinat caracteristicile mecanice ale TV pentru diverse viteze ale vântului și s-au verificat cu cele din modelul matematic al TVN.

În partea a doua a capitolului s-au efectuat verificări experimentale a dependenței puterii maxime de cubul vitezei vântului. La finalul capitolului se prezintă comportarea sistemului Diesel - Generator prin înregistrarea în timp a turației și tensiunii la generatorul electric reglat cu un regulator de tip P.

În final sunt prezentate concluziile cu privire la analiza rezultatelor experimentale.

Se pot scoate în evidență următoarele contribuții personale:

- verificarea caracteristicilor mecanice ale turbinei prin măsurători ale puterii și turației;
- verificarea experimentală a funcționării sistemului în punctele de putere maximă;
- toate rezultatele aplicative permit utilizarea lor în cazul unor sisteme reale de mare putere (3-4[MW]);
- determinarea experimentală a rezistenței de sarcină optime la sistemul izolat (TV+GS);
- verificarea experimentală a variației în timp a turației și tensiunii la încărcarea unui grup Diesel-generator reglat cu un regulator de tip P.

O parte a rezultatelor obținute în cadrul tezei au fost publicate, iar restul sunt în curs de publicare, în reviste de prestigiu și în volumele unor manifestări științifice recunoscute din străinătate sau din țară [Deliu2008a], [Deliu2008b], [Deliu2009a], [Deliu2009b], [Deliu2009c], [Deliu2009d], [Deliu2009e], [Deliu2009f], [Deliu2009g], [Dobref2009], [Deliu2010a], [Deliu2010b], [Deliu2010c], [Gheorghiu2010a].

Analizele teoretice și practice realizate în cadrul tezei de doctorat, precum și rezultatele obținute, deschid o serie de perspective și direcții de continuare și aprofundare ulterioară a cercetărilor în domeniu:

- realizarea în țară a modelului funcțional al navei ecologice speciale (ceea ce ar constitui o premieră);
- dezvoltarea capacității de a aborda în viitor și alte tematici referitoare la proiectarea și construcția unor nave speciale cu sisteme de propulsie electrică bazate pe utilizarea surselor de energie hibride regenerabile.



## 8.2. Perspective de dezvoltare

În prezent, pe plan internațional există o orientare importantă pentru dezvoltarea echipamentelor necesare realizării unor sisteme de propulsie și guvernare cât mai eficiente pentru navele maritime.

Pe plan mondial, referințele documentare arată interesul deosebit pentru realizarea unor nave ecologice, cu calități nautice și de manevrabilitate ridicate. Sistemul propus funcționează la un randament foarte ridicat datorită energiei provenite din radiația solară și vânt. Actualmente în literatura de specialitate se caută soluții cât mai eficiente pentru realizarea sistemelor solare și eoliene având în vedere și zona geografică în care funcționează asemenea nave.

În domeniul propulsiei și guvernării navelor, în ultimii ani se observă o preocupare accentuată a specialiștilor navali pentru dezvoltarea și perfecționarea unor sisteme, instalații de propulsie –guvernare, care să asigure atât performanțele necesare pentru propulsie( gamă largă de viteze, reversare rapidă, fiabilitate ridicată, mentenanță simplă, etc) cât și pentru manevrabilitate. Instalațiile de propulsie-guvernare existente sunt însă complicate constructiv, datorită, în special, mecanismelor de transmitere a mișcării, iar prețurile de cost sunt, în consecință, foarte ridicate.

Rezultatele activității de cercetare pot fi valorificate prin realizarea unei tehnologii noi, eficientă și rentabilă, de dezvoltare a unui sistem de propulsie-guvernare pentru nave ecologice, adaptabil la cerințele pieții și cu un preț de cost redus.

Realizarea unui model funcțional va constitui, la scară naturală, o navă cu destinație specială, alimentarea sistemului de propulsie realizându-se prin intermediul unor surse regenerabile ce pot fi încărcate parțial, de la celule fotovoltaice (în marș și staționare) și de la centralele eoliene. Energia provenită de la bateriile solare și turbina de vânt va fi înmagazinată în acumulatele electrice, care în acest fel pot furniza energia necesară în perioadele impuse de regimurile de funcționare.

Construcția unei nave ecologice cu surse regenerabile hibride presupune proiectarea unor sisteme energetice și de propulsie-guvernare, proiectare care se bazează pe cunoașterea într-un mod precis a modelelor matematice specifice fiecărui subsistem și folosirea unor algoritmi de conducere bazați pe realizarea optimului de putere.

Variantele constructive realizate în țară sunt, în marea lor majoritate propulsate cu motoare termice, utilizează pentru centrala electrică grupuri electrogene cu motoare diesel și nu dispun de surse regenerabile de energie la bord.

De asemenea rezultatele activității de cercetare pot sta la baza realizării unui model funcțional al unei navei ecologice speciale de dimensiuni mici (eliminând subsistemul Diesel), navă ce va fi propulsată cu un sistem de acționare electrică cu motor sincron cu magneti permanenți, comandat în frecvență la cuplu maxim prin intermediul unui inverter, fără mecanisme de transmisie, alimentat de la surse hibride regenerabile bazate pe utilizarea celulelor fotovoltaice și a centralelor eoliene. Energia acestor surse hibride regenerabile va fi înmagazinată într-o baterie de acumulatele electrice de ultimă generație Li-Ion, cu performanțe ridicate față de cele clasice(cele cu plumb). Nava ecologică poate fi utilizată pentru realizarea unor activități de cercetare-proiectare inginerească, precum și pentru derularea unor activități de observare, căutare, salvare sau cercetare hidrografică.

## BIBLIOGRAFIE

1. [Andea2010a] Andea P., Mnerie D., Cristian D., Pop O., Jigoria-Opria D.- Conventional vs. Alternative Energy Sources Overview. Part I. Energy and Environment ,2010.
2. [Andea2010b] Andea P., Mnerie A.V., Cristian D., Pop O., Solomonesc F. Conventional vs. Alternative Energy Sources Overview. Part II. European Strategies, 2010.
3. [Andea2010c] Andea P., Mnerie G.V., Pop O., Solomonesc, Simo A. Conventional vs. Alternative Energy Sources Overview. Part III. Perspectives in Romania, 2010.
4. [Ackermann2002] Ackermann, Soder L.-An overview of wind energy-status 2002, Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 6, no. ", pp. 67-128, 2002
5. [Andreescu1999] Andreescu D., Estimatoare în sisteme de conducere a acțiunilor electrice, Ed Politehnica Timișoara, 1999.
6. [Andreescu1996] Andreescu G.D., Observers for speed, acceleration and load torque in motion control of electrical drives, Proc. Automatic Control and Testing Conference A' 96 THETA 10, Cluj-Napoca, vol.1, pp. 307-312, May 1996.
7. [Babescu2001] Babescu M., Păunescu D., Mașini electrice -- analiza matematică a regimurilor tranzitorii, Ed. Politehnica, Timișoara, 2001
8. [Babescu2002] Babescu M., Mașina asincronă - modelare - identificare - simulare, Ed . Politehnica, Timișoara, 2002.
9. [Babescu2003] Babescu M., Mașina Sincronă -Modelare-Identificare-Simulare-, ISBN 973-625-021-0, Editura POLITEHNICA Timișoara, 2003.
10. [Bej2003] Bej A., Turbine de vânt-ISBN 973-625-098-9, Editura POLITEHNICA Timișoara, 2003.
11. [Biriescu1997] Biriescu M., Masini electrice-ISBN 973-36-0299-X, Editura de Vest, Timișoara, 1997
12. [Boldea1987] Boldea I., Unified treatment of core losses and saturation in the orthogonal axis model of electric machines, IEE Proceedings, Vol. 134, Pt.B., No.6, 1987.
13. [Boldea1988] Boldea I., Nasar S.A., Torque vector control (TVC) -- a class of fast and robust torque speed and position digital controllers of electric drives", Electric Machines and Power Systems, vol. 15, pp. 135-148, 1988.
14. [Boldea1992] Boldea I., Nasar S.A., Vector Control of AC Drives, CRC Press, Florida, 1992.
15. [Budișan2005] Budișan Nicolae, Problems of Induction Generator Systems, Ed . Politehnica, Timișoara, 2005.
16. [Barakati2005] 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, pp.705-713, September 2009.
17. [Cardenas2001] Cardenas, Pena R., Asher G. M., Clare J. C.--Experimental emulation of wind turbines and flywheel for wind energy applications, in Proc. EPE Conf., Graz, Austria, Sep. 2001, pp. 1-10.
18. [Celanovic2000] Celanovic N., Boroyevich D.--A comprehensive study of neutral-point voltage balancing problem in three-level neutral-point-clamped

- voltage source PWM inverters, IEEE Trans. Power Electron., vol. 15, no. 2, pp. 242-249, Mar. 2000.
19. [Celanovic2001] Celanovic N., Boroyevich D.--A fast space-vector modulation algorithm for multilevel three-phase converters, IEE Trans. Ind. Appl., vol. 37, no. 2, pp. 637-641, Mar. 2001.
  20. [Chakraborty2003] Chakraborty, Hori Y.--Fast efficiency optimization techniques for the indirect vector-controlled induction motor drives, IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 39, no. 4, pp. 1070-1076, Jul./Aug. 2003.
  21. [Chen2001] Chen Z., Spooner E.--Grid power with variable speed turbines, IEEE Trans. Power Electron., vol. 16, no. 2, pp. 148-154, Jun. 2001.
  22. [Chen2000] Chen Z., Gomez S., Mc Cornick M.--A fuzzy logic controlled power electronic system for a variable speed wind energy conversion systems, in Proc. IEE PEVD Conf., 2000, pp. 114-119.
  23. [Dordea1995] Dordea T.,- Beitrag zur Zweiachsentheorie der elektrischen Maschinen, Archiv fuer Elektrotechnik, 50, 6, 362 - 371, 1995.
  24. [Delesega2002] Delesega I., Andea.-Procese de comutație .Calitatea energiei electrice-Ed. orizonturi universitare, Timisoara 2002, 973-8391-80-6.
  25. [Deliu2008a] Deliu F., Dobref V., Gheorghiu S. - Acționări electrice, ISBN 987-973-1870-29-8, Editura Academia Navală "Mircea cel Bătrân", Constanța, 2008.
  26. [Deliu2008b] Deliu F.,- Proiectarea sistemului de acționare electrică pentru mecanismul de ridicarea unei macarale navale cu controlul vectorial al motorului asincron de acționare, de la o navă cargou de 7800 TDW, Constanța, referat CNCIS nr. 365, 2005-2007.
  27. [Deliu2009a] Deliu F., Gheorghiu S., *Exploatarea, întreținerea și repararea instalațiilor electrice navale*, ISBN 978-973-1870-44-1, Academia Navală "Mircea cel Bătrân", Constanța, 2009.
  28. [Deliu2009b] Deliu F.- Dobref V., Gheorghiu S., *Mașini electrice speciale*, ISBN 978-973-1870-55-7, Editura Academia Navală "Mircea cel Bătrân", Constanța, 2009.
  29. [Deliu2009c] Deliu F., Gheorghiu S.- Vector control of electric machines for naval mechanisms, Buletin științific, Academia Navală "Mircea cel Bătrân", Constanța, 2009.
  30. [Deliu2009d] Deliu F., Gheorghiu S.- Electromagnetic couple control of an asynchronous machine, The 21<sup>th</sup> International Conference NAV- MAR -EDU, pp. 95-105, Constanța, 2009.
  31. [Deliu2009e] Deliu F., Gheorghiu S.- Speed control at maximum torque, The 21<sup>th</sup> International Conference NAV- MAR -EDU, pp. 106-119, Constanța, 2009.
  32. [Deliu2009f] Deliu F.- Wind power naval system [subsystems motor diesel-synchronous generator (MD+GS)], PSC Timișoara, pp. 161-164, 2009.
  33. [Deliu2009g] Deliu F.- Wind power naval system [subsystems wind turbine + synchronous generator (TV+ GS)], PSC Timișoara, pp. 156-160, 2009.
  34. [Dobref2009] Dobref V., Constantinescu M., Gheorghiu S., Deliu F., - Magnetic flux compression simulation and testing of the generator of a high energy magnetic pulse, Proceedings of 20th DAAAM International Symposium, Viena, pp. 915-916, 2009.
  35. [Deliu2010a] Deliu F.- Transitory phenomena into naval electrical equipment, Journal of marine technology and environment, vol. 1, pp. 81-90, ISSN 1844-6116, Constanta, 2010.
  36. [Deliu2010b], Deliu F., Samoilescu G., Analysis of the transitional process into naval electrical equipment, Analele Universității Eftimie Murgu- Reșița, nr. 1, ISSN 1453-7394, pp. 117-126, 2010.

37. [Deliu2010c], **Deliu F.**, Samoilescu G. Stationary magnetic field of an electric circuit laid out on the floatation of a ship, *Analele Universității Eftimie Murgu-Reșița*, nr. 1, ISSN 1453-7394, pp. 275-284, 2010.
38. [El-Ibiary2003] El-Ibiary Y.--An accurate low-cost method for determining electric motors' efficiency for the purpose of plant energy management, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 39, no. 4, pp. 1205-1210, Jul./Aug. 2003.
39. [El Aimani2003] El Aimani S., Francois B., Minne F., Robyns B.--Comparativw analysis of control structures for variable speed wind turbine, in *Proc. CESA*, Lille, France, Jul. 9-11, 2003, CD-ROM.
40. [Eltra2000] Eltra--Specifications for connecting wind farms to the transmission network, *ELT1999-411a*, Apr. 2000 [Online].
41. [Escobar2004a] Escobar G., Leyva J., Carrasco J. M., Galvan E., Portillo R., Prats M. M., Franquelo L. G.--Modeling of a three level converter used in a synchronous rectifier application, in *Proc. PESC*, Aachen, Germany, 2004, vol. 6, pp. 4306-4311.
42. [Escobar2004b] Escobar G., Leyva-Ramos J., Carrasco J. M., Galvan E., Portillo R., Prats M. M., Franquelo L. G. Control of a three level converter used as a synchronous rectifier, in *Proc. 35th Annu. IEEE PESC*, Jun. 20-25, 2004, vol. 5, pp. 3458-3464.
43. [Fernandez-Bernal2000] Fernandez-Bernal F., Garcia-Cerrada A., Faure R.--Model-based loss minimization for DC and AC vector-controlled motors including core saturation, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 36, no. 3, pp. 755-763, May/Jun. 2000.
44. [Fadaeinedjad2009] Fadaeinedjad R., Moschopoulos G., and Moallem M., "The Impact of Tower Shadow, Yaw Error, and Wind Shears on Power Quality in a Wind-Diesel System", *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 24, no. 1, pp.102-111, March 2009.
45. [Gergaud2001] Gergaud O., Multon B., Ahmed H. B.--Modelisation d'une chaine de conversion eolienne de petite puissance, in *Proc Electrotehnicque Du Futur French Conf.*, Nancy, France, Nov 2001, pp. 17-22
46. [Gertmar2000] Gertmar-----Windturbines. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2000.
47. [Gheorghiu2010a] Gheorghiu S., **Deliu F.**- *Convertoare electromecanice*, ISBN 978-973-1870-70-0, Editura Academia Navală "Mircea cel Bătrân", Constanța, 2010.
48. [Gheorghiu2010b] Gheorghiu S., **Deliu F.**, Constantinescu M.- *Acțiunări electrice navale*, Editura Academia Navală "Mircea cel Bătrân", Constanța, 2010.
49. [Grantham2003] Grantham C., McKinnon D. J. Rapid parameter determination for induction motor analysis and control, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 39, no. 4, pp. 1014-1020, Jul./Aug. 2003.
50. [Hau2003] Hau E.--Power electronics and wind energy, in *Proc. EPE*, Toulouse, France, 2003.
51. [Hu1998] Hu J., Wu B. New integration algorithms for estimating motor flux over a wide speed range, *IEEE Trans Power Electr.*, vol. 13, no. 5, pp 969-977, sept. 1998.
52. [Hu2000] Hu Q., Rangaiah G.P., Antiwindup schemes for uncertain nonlinear systems, *IEE Proc. Control Theory Appl.*, Vol. 147, No.3, 2000.
53. [Huang2002] Huang H.P., Roan M.L, On-line adaptive tuning for PID controllers, *IEEE Proc. Control Theory Appl.*, Vol. 149, NO.1, 2002.
54. [Hurst1998] Hurst KD, Habetler T.H., Griva G., Zero-speed tachole torque control: simply a metter of stator voltage integration, *IEEE Trans Industry*

### 312 Bibliografie

---

- Applications, vol. 34, no 4, pp 790 -- 795, July / Aug. 1998.
55. [IEEE2004] IEEE Standards 112--Test procedure for Polyphase Induction Motors and Generators. NY:IEEE, 2004.
  56. [Jiao2001] 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.
  57. [Kana2001] Kana C. L.,Thamodharan M.,Wolf A.--System management of a wind energy converter, IEEE Trans. Power Electron., vol. 16, no. 3, pp. 375-381, May 2001.
  58. [Karlsson2002] Karlsson P.--DC distributed power systems-Analysis, design and control for a renewable energy system, Ph. D. dissertation, Lund Univ., Lund, Sweden, 2002.
  59. [Kundur1994] Kundur.P, Power System Stability and Control. USA : McGraw-Hill, 1994.
  60. [Lane2004] Lane N.,Boesch D. F.--Vision 2033, part 6: Energy, the environment, and global change. The American Association of the Advancement of Science [Online]. 2004.
  61. [Loschel2004] Loschel A.--Tehnological change, energy consumption and the cost of environmental policy in energy-economy-environment modeling, Int. J. Energy Technol. Policy, vol. 2, pp. 250-261, 2004.
  62. [Luca2001] Luca D.,Nichita C.,Diop A. P.,Dakyo B.,Ceanga E.-Load torque estimators for wind turbines simulators, in Proc. EPE Conf., Graz, Austria, Sep. 2001, CD-ROM.
  63. [Mathew1998] Mathew Andrew, Li A., Sensorless vector and direct torque control, Oxford University Press, 1998.
  64. [Moszynski2007] Mustschler P.,Hoffmann R--Comparison of wind turbines regarding their energy generation, in Proc. IEEE PESC, Vancouver, BC, Canada, Jun. 2001, pp. 6-11--2007.
  65. [Mauricio2008] Mauricio J.M., A.E.Leon, A.Gomez-Exposito, and J.A.Solsona, "An Adaptive Nonlinear Controller for DFIM-Based Wind Energy Conversion Systems", IEEE Trans.6 Energy Convers., vol. 23, no. 4,pp.1025-1035 December 2008.
  66. [Muhando2009] Muhando E.B, T.Senjyu, H.Kinjo, and T.Funabashi, "Extending the Modeling Framework for Wind Generation Systems: RLS-Based Paradigm for Performance Under High Turbulence Inflow", IEEE Trans. Energy Convers., vol. 24, no. 1, pp.211-221, March 2009
  67. [Muşuroi2008] Muşuroi S., Gheorghiu S.,Dobref V., **Deliu F.**, Sovoda M., Şorândaru C., Cornea O., Electric drives with field orientated control for naval mechanisms, CNAE, pp. 177-180, ISSN 1582-7194, Timișoara, 2008.
  68. [Nasar1993] Nasar S.A, Boldea I., Electric machine -- dynamic and control, CRC Press, Inc USA, 1993.
  69. [Nishikata2010] 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,p468-476, ISSN 0278-0046, feb.2010.
  70. [Ong1998] Ong C.M., Dynamic simulation of electric machines, Prentice Hall, New Jersey, 1998.
  71. [Palsson1984] Palsson M.P., Toftevaag T.,Uhlen K.--Control concepts to enable increased wind power penetration, in Proc. IEEE Power Eng. Soc. General Meeting, Toronto, ON, Canada, 2003, pp. 1984-1990.
  72. [Park2000] Park J.K., Control of state-constrained linear dynamical systems:

- Anti-reset windup approach, IEEE Proc. Control Theory Appl. Vol.147, No.2 February 2000.
73. [Păunescu2005] Păunescu D., Babescu M. Analiza matematică a dinamicii mașinilor electrice, Ed. Politehnica Timișoara 2005.
  74. [Petcu1997] Petcu D., MAPLE, un standard pentru matematică cu ajutorul calculatorului, Ed. Universitatea de Vest, Timișoara, 1997.
  75. [Perales2003] Perales M. A., Prats M. M., Portillo R., Mora J. L., Leon J. I., Franquelo L. G.--Three-dimensional space vector modulation in abc coordinates for four-leg voltage source converters, IEEE Power Electron., Lett., vol. 1, no. 4, pp. 104-109, Dec. 2003.
  76. [Petru2003] Petru T.--Modeling wind turbines for power system studies, Ph. D. dissertation, Chalmers, Goteborg, Sweden, Jun. 2003.
  77. [Prats2002] Prats M. M., Carrasco J. M., Franquelo L. G.--Effective algorithm for multilevel converter with very low computational cost, Electron Lett., vol. 38, no. 22, pp. 1398-1400, Oct. 2002.
  78. [Prats2003b] Prats M. M., Franquelo L. G., Portillo R., Leon J. I., Galvan E., Carrasco J. M.--A three-dimensional space-vector modulation generalized algorithm for multilevel converters, IEEE Power Electron. Lett., vol. 1, no. 4, pp. 110-114, Dec 2003.
  79. [Prats2004] Prats M. M., Leon J. I., Portillo R., Carrasco J. M., Franquelo L. G.--A novel space-vector algorithm for multilevel converters based on geometrical considerations using a new sequence control technique J. Circuits, Syst. Comput.-Special Jubilee Issue Power Electronics Circuits, vol. 13, no. 4, pp 845-861, Aug. 2004.
  80. [Preitl2001] Preitl Șt., Precup R., Introducere în ingineria reglării automate, Ed. Politehnica, Timișoara, 2001.
  81. [Proștean2003] Proștean O., Automatică, Ed Politehnica, Timișoara, 2003
  82. [Proștean2006] Proștean O., Filip I., Vașar C., Szeidert I., Modelare și simulare, Ed Orizonturi Universitare, Timișoara 2006
  83. [Puttonen2001] Puttonen P., Salo M., Tuusa H.--Wind power plant harmonics reduction using current source inverter with a controlled PWM rectifier, in Proc. EPE., Graz, Austria, Sep. 2001, CD-ROM.
  84. [Qiao2009] Qiao W., R.G.Harley, and G.K.Venayagamoorthy, "Coordinated Reactive Power Control of a Large Wind Farm and a STATCOM Using Heuristic Dynamic Programming", IEEE Trans. Energy Convers., vol. 24, no. 2, pp.493-503 June 2009.
  85. [Quaschnig2005] Quaschnig V.- Understanding Renewable Energy Systems, ISBN 1-84407-128-6 ,London Carl Hanser Verlag GmbH & Co KG, 2005.
  86. [Rafajlovski2005] Rafajlovski G., Marov D., Digital simulation of field orientated control, IEEE Electrotechnical Conference, Vol.3, 8th Mediterranean, 2005.
  87. [Rodriguez2002] Rodriguez J., Lai J. S., Peng F. Z.--Multilevel inverters: A survey of topologies, controls and applications, IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 49, no. 4, pp. 724-738, Aug. 2002.
  88. [Samoilescu2008a] Samoilescu G., **Deliu F.**, The effects of the far and near electromagnetic field on the human body, Academia Forțelor Terestre, 27-29 nov, The 14<sup>th</sup> International Conference, The Knowledge Based Organisation, ISSN 1843-6722, pp. 211-216, Sibiu, 2008.
  89. [Savii2000] Savii G., Milenco L., Modelare și simulare, Ed Eurostampa, Timișoara, 2000.
  90. [Shrestha2006] Shrestha G. B., Haque M. H.--AC Circuits and Machines.

- Education South Asia, Singapore: Pearson Prentice-Hall, 2006.
91. [Steiml2005] Steiml A., Direct Self Control, a stator flux orientated control strategy for high power traction applications, Journal of Bremen University, 2005.
  92. [Shahabi2009] Shahabi M, M.R.Haghifam, M.Mohamadian, and S.A.Nabavi-Niaki, "Microgrid Dynamic Performance Improvement Using a Doubly Fed Induction Wind Generator", IEEE Trans. Energy Convers., vol. 24, no. 1, pp.137-145, March 2009.
  93. [Teleke2009] Teleke S., M.E.Baran, A.Q.Huang, S.Bhattacharya, and L.Anderson, "Control Strategies for Battery Storage for wind Farm Dispatching ", IEEE Trans. Energy Convers., vol. 24, no. 3, pp.725-732, September 2009.
  94. [Trounce2005] Trounce J.C., S.D.Round, Evaluation of the Direct Torque Control using space vector modulation for electric vehicle applications, University of Canterbury, 2005.
  95. [Ullah2003] Ullah N.R., K.Bhattacharya, and T.Thiringer, "Wind Farms as Reactive Power Ancillary Service Providers-Technical and Economic Issues ", IEEE Trans. Energy Convers., vol. 24, no. 3, pp.661-672, September 2009.
  96. [Vas2003] Vas P., Sensorless vector and Direct Torque Control, Oxford University Press, 2003.
  97. [Veenstra2000] Veenstra M.,Ruffer A. --PWM-control of multilevel voltage-source invertors, in Proc. PESC, 2000, vol.3, pp. 1387-1393.
  98. [Xen1990] Xen Jouve , Rognon J.P., Roye D. Effective Current and Speed Controllers for Permanent Magnet Machines : A Survey, IEEE, 1990.
  99. [Youg2004] Youg G., Olarescu V., Muşuroi S., Enhanced simplified control algorithm for surface-mounted permanent magnet with sinusoidal excitation, IPENC 2004 China, Vol. 2, pag. 1049-1053.
  100. [Zhang2002] Zhang R. Prasad V., H.Boroyevich D.,Lee F. C.--Three-dimensional space vector modulation for four-leg voltage-source converters, IEEE Trans. Power Electron., vol. 17, no. 3, pp. 314-326, May 2002.
  101. [Westlake1995]Westlake A.J. and J.R.Bumby – „Design interactions of flexible stator mounting for a permanent magnet synchronous generators”, Electric machines and drives, 11-13 September 1995, Conference publication nc 412, pp 444-448.
  102. [Monsson2010a] Date de vânt, Monsson Alma SRL, Constanța.2010.
  103. [Monsson2010b] Catalog maşini electrice şi turbine de vânt, Monsson Alma, Constanța.2010.
  104. [\*\*\*2005] Contract UPT&ANMB, - Cercetări teoretice şi experimentale privind implementarea controlului vectorial pentru sistemele de acţiune electrice cu motoare de inducţie a mecanismelor navale, CNCSIS nr. 365, 2005-2007, Gheorghiu S., **Deliu F.**, Dovref V., ş.a.
  105. [\*\*\*2008] Contract PSCD- Sistem de comandă vectorială pentru alimentarea motoarelor asincrone trifazate destinate acţiunii mecanismelor navale, Ministerul Apărării Naţionale – Planul sectorial de cercetare-dezvoltare 2008-2010, Dobref V., **Deliu F.**, Gheorghiu S.

## SINTEZĂ PRIVIND LUCRĂRILE PROPRII

1. [Samoilescu2008a] Samoilescu G., **Deliu F.**, The effects of the far and near electromagnetic field on the human body, Academia Forțelor Terestre, 27-29 nov, The 14<sup>th</sup> International Conference, The Knowledge Based Organisation, ISSN 1843-6722, pp. 211-216, Sibiu,2008.
2. [Mușuroi2008] Mușuroi S., Gheorghiu S.,Dobref V., **Deliu F.**, Sovoda M., Șorândaru C., Cornea O., Electric drives with field orientated control for naval mechanisms, CNAE, pp. 177-180, ISSN 1582-7194, Timișoara, 2008.
3. [**Deliu2008a**] **Deliu F.**, Dobref.V,Gheorghiu.S - Acționări electrice, ISBN 987-973-1870-29-8, Editura Academia Navală "Mircea cel Bătrân", Constanța,2008.
4. [**Deliu2008b**] **Deliu F.**, - Proiectarea sistemului de acționare electrică pentru mecanismul de ridicarea unei macarale navale cu controlul vectorial al motorului asincron de acționare, de la o navă cargou de 7800 TDW, Constanța, referat CNCISIS nr. 365, 2005-2007.
5. [**Deliu2009a**] **Deliu F.**,Gheorghiu.S, Exploatarea,întreținerea și repararea instalațiilor electrice navale, ISBN 978-973-1870-44-1, Academia Navală „Mircea cel Bătrân” , Constanța ,2009.
6. [**Deliu2009b**] **Deliu F.**- Dobref.V,Gheorghiu.S, Mașini electrice speciale, ISBN 978-973-1870-55-7, Editura Academia Navală "Mircea cel Bătrân",Constanța,2009.
7. [**Deliu2009c**] **Deliu F.**, Gheorghiu.S- Vector control of electric machines for naval mechanisms, Buletin științific, Academia Navală "Mircea cel Bătrân",Constanța, 2009.
8. [**Deliu2009d**] **Deliu F.**, Gheorghiu.S- Electromagnetic couple control of an asynchronous machine,The 21<sup>th</sup> International Conference NAV- MAR -EDU , pp. 95-105, Constanța,2009.
9. [**Deliu2009e**] **Deliu F.**, Gheorghiu.S- Speed control at maximum torque, The 21<sup>th</sup> International Conference NAV- MAR -EDU , pp. 106-119, Constanța, 2009.
10. [**Deliu2009f**] **Deliu F.**- Wind power naval system [subsystems motor diesel-synchronous generator(MD+GS )], PSC Timișoara, pp. 161-164, 2009.
11. [**Deliu2009g**] **Deliu F.**- Wind power naval system [subsystems wind turbine + synchronous generator (TV+ GS)],PSC Timișoara, pp. 156-160, 2009.
12. [Dobref2009] Dobref V., Constantinescu M., Gheorghiu S., **Deliu F.**, - Magnetic flux compression simulation and testing of the generator of a high energy magnetic pulse, Proceedings of 20th DAAAM International Symposium, Viena, ISSN 1726-9679, ISBN 978-3-901-09-70-4, pp. 915-916,2009.
13. [**Deliu2010a**] **Deliu F.**- Transitory phenomenons into naval electrical equipment, Journal of marine technology and environment, vol.1, pp.81-90,ISSN 1844-6116, Constanta,2010
14. [**Deliu2010b**], **Deliu F.**, Samoilescu G., Analysis of the transitional process into naval electrical equipment , Analele Universității Eftimie Murgu- Reșița, nr. 1 , ISSN 1453-7394, pp. 117-126, 2010
15. [**Deliu2010c**], **Deliu F.**, Samoilescu G.Stationary magnetic field of an electric circuit laid out on the floatation of a ship, Analele Universității Eftimie Murgu- Reșița, nr. 1 , ISSN 1453-7394, pp. 275-284, 2010



16. [Gheorghiu2010a] Gheorghiu S., **Deliu F.**- Convertoare electromecanice, ISBN 978-973-1870-70-0, Editura Academia Navală "Mircea cel Bătrân",Constanța,2010.
17. [Gheorghiu2010b] Gheorghiu S., **Deliu F.**, Constantinescu M.- Acționări electrice navale, Editura Academia Navală "Mircea cel Bătrân",Constanța,2010.
18. [\*\*\*2005] Contract UPT&ANMB, - Cercetări teoretice și experimentale privind implementarea controlului vectorial pentru sistemele de acționare electrice cu motoare de inducție a mecanismelor navale, CNCSIS nr. 365, 2005-2007, Gheorghiu S., **Deliu F.**, Dovref V., ș.a.
19. [\*\*\*2008] Contract PSCD- Sistem de comandă vectorială pentru alimentarea motoarelor asincrone trifazate destinate acționării mecanismelor navale, Ministerul Apărării Naționale – Planul sectorial de cercetare-dezvoltare 2008-2010, Dobref V., **Deliu F.**, Gheorghiu S.

# ANEXA 1

## Programul Scientific WorkPlace

Scientific Workplace este un program folosit pentru crearea, citirea și rezolvarea problemelor matematice pe computer.

Versiunea folosită 5.5, este o versiune nouă, care are un motor de calcul MuPAD cu capacitatea de a crea animație 2D și 3D în coordonate polare, rectangulare, cilindrice și sferice precum și în câmpuri vectoriale, rata de cadre pentru animație începând de la o secundă. De asemenea programul conține și nucleul Maple cu care se pot edita și efectua calcule matematice

Versiunea 5.5 include un filtru pentru importul de documente create în mod direct în latex. Scientific Workplace poate fi utilizat pentru a publica, a comunica idei și pentru a spori experiența de învățare, precum și pentru a testa cunoștințele de algebră, fizică etc.

Cu ajutorul motorului de calcul MuPAD, Scientific Workplace poate efectua rapid calcule fundamentale de algebră, trigonometrie, calcul factorial, extinderea și simplificarea expresiilor care conțin numere întregi, fracții, numere reale și complexe. Se pot efectua, de asemenea, operații de integrare și diferențiere, operații cu matrice și vectori, abateri standard, și multe alte operații complexe (algebră liniară, ecuații diferențiale și statistici).

De asemenea programul poate converti valorile dintr-o unitate de măsură fizică în alta, și poate calcula sisteme de ecuații care conțin mai mult de trei variabile.

Sistemul include, de asemenea, o bibliotecă completă, cu instrucțiuni pentru efectuarea de calcule numerice, simbolistică și grafică.

În concluzie, Scientific Workplace este un program specializat pentru rezolvarea problemelor tehnico-științifice, în sensul că rezolvă ecuații algebrice pentru regimurile staționare și ecuații diferențiale pentru regimurile tranzitorii ale diferitelor echipamente electrice întâlnite în sistemul electroenergetic naval. De asemenea, poate fi utilizat cu ușurință în efectuarea simulărilor pentru acordarea diferitelor tipuri de regulatoare întâlnite în sistemul electroenergetic naval.

## ANEXA 2

**Măsurători experimentale privind viteza vântului/producție la o turbină eoliană de 5 KW, aparținând firmei MONSSON ALMA Constanța în perioada august-septembrie-octombrie 2010.**

<b>Data/ora</b>	<b>Viteza vântului [m/s]</b>	<b>Raportul Putere/V<sup>3</sup></b>
01.08.2010 00:00:00	5,969	2,7604
01.08.2010 01:00:00	4,130	2,7738
01.08.2010 02:00:00	2,324	0,3923
01.08.2010 03:00:00	2,692	0,9524
01.08.2010 04:00:00	3,766	2,2618
01.08.2010 05:00:00	2,879	1,2871
01.08.2010 06:00:00	1,939	0,3409
01.08.2010 07:00:00	3,225	2,5027
01.08.2010 08:00:00	3,447	2,7820
01.08.2010 09:00:00	2,207	1,6233
01.08.2010 10:00:00	6,990	2,3811
01.08.2010 11:00:00	7,567	1,6676
01.08.2010 12:00:00	7,499	2,8164
01.08.2010 13:00:00	9,568	2,1878
01.08.2010 14:00:00	9,362	2,2195
01.08.2010 15:00:00	7,252	2,8990
01.08.2010 16:00:00	5,825	2,8647
01.08.2010 17:00:00	5,642	2,9096
01.08.2010 18:00:00	6,866	3,0035
01.08.2010 19:00:00	6,931	3,0498
01.08.2010 20:00:00	6,009	3,1025
01.08.2010 21:00:00	5,884	2,8876
01.08.2010 22:00:00	6,383	2,9193
01.08.2010 23:00:00	7,502	2,8353
02.08.2010 00:00:00	8,356	2,5996
02.08.2010 01:00:00	8,395	2,5992
02.08.2010 02:00:00	8,084	2,6468
02.08.2010 03:00:00	7,418	2,7326
02.08.2010 04:00:00	7,831	2,6398
02.08.2010 05:00:00	7,365	2,5967
02.08.2010 06:00:00	7,347	2,5575
02.08.2010 07:00:00	7,805	2,3850
02.08.2010 08:00:00	7,650	2,1411
02.08.2010 09:00:00	9,394	2,0941
02.08.2010 10:00:00	10,751	1,8463
02.08.2010 11:00:00	7,589	0,6292
02.08.2010 12:00:00	4,876	0,0089

02.08.2010 13:00:00	5,533	1,4174
02.08.2010 14:00:00	6,192	1,7412
02.08.2010 15:00:00	6,229	2,8490
02.08.2010 16:00:00	5,509	2,9191
02.08.2010 17:00:00	4,905	2,8943
02.08.2010 18:00:00	5,013	2,8186
02.08.2010 19:00:00	4,696	2,8475
02.08.2010 20:00:00	4,891	2,7807
02.08.2010 21:00:00	5,373	2,6873
02.08.2010 22:00:00	5,233	2,5289
02.08.2010 23:00:00	4,855	2,4450
03.08.2010 00:00:00	5,001	2,0142
03.08.2010 01:00:00	6,082	2,0752
03.08.2010 02:00:00	5,524	2,0976
03.08.2010 03:00:00	5,501	1,9228
03.08.2010 04:00:00	5,317	1,9862
03.08.2010 05:00:00	5,085	2,0111
03.08.2010 06:00:00	3,735	1,7837
03.08.2010 07:00:00	3,014	1,1227
03.08.2010 08:00:00	3,545	1,8237
03.08.2010 09:00:00	4,241	1,8880
03.08.2010 09:00:02	3,999	1,3573
03.08.2010 09:00:42	2,771	0,2134
03.08.2010 10:00:00	1,674	5,5614
03.08.2010 10:00:02	5,141	2,7716
03.08.2010 11:00:00	5,735	2,9905
03.08.2010 12:00:00	3,697	2,0291
03.08.2010 13:00:00	3,756	2,0719
03.08.2010 14:00:00	3,439	0,9617
03.08.2010 15:00:00	3,152	0,9959
03.08.2010 16:00:00	4,614	2,1231
03.08.2010 17:00:00	3,616	2,7419
03.08.2010 18:00:00	4,970	2,8768
03.08.2010 19:00:00	2,268	1,9061
03.08.2010 20:00:00	2,818	0,5432
03.08.2010 21:00:00	2,952	0,3746
03.08.2010 22:00:00	2,332	0,7504
03.08.2010 23:00:00	5,189	2,6383
04.08.2010 00:00:00	4,656	3,1632
04.08.2010 01:00:00	3,172	1,4179
04.08.2010 02:00:00	3,462	1,7553
04.08.2010 03:00:00	3,300	1,4121
04.08.2010 04:00:00	4,677	1,9765
04.08.2010 05:00:00	3,589	1,8259
04.08.2010 06:00:00	3,942	1,9288
04.08.2010 07:00:00	4,102	2,5908
04.08.2010 08:00:00	2,011	0,2301
04.08.2010 09:00:00	3,919	2,0977
04.08.2010 10:00:00	4,599	2,7997

04.08.2010 11:00:00	3,258	0,1124
04.08.2010 12:00:00	4,451	1,5000
04.08.2010 13:00:00	4,640	0,0391
04.08.2010 14:00:00	5,537	2,1242
04.08.2010 15:00:00	3,937	2,4717
04.08.2010 16:00:00	4,956	2,4910
04.08.2010 17:00:00	6,122	2,2054
04.08.2010 18:00:00	5,790	2,1973
04.08.2010 19:00:00	6,582	2,1600
04.08.2010 20:00:00	7,109	2,1283
04.08.2010 21:00:00	6,983	2,0838
04.08.2010 22:00:00	5,994	2,0477
04.08.2010 23:00:00	5,191	1,9615
05.08.2010 00:00:00	3,497	1,2999
05.08.2010 01:00:00	2,968	1,2832
05.08.2010 02:00:00	3,250	1,9815
05.08.2010 03:00:00	4,154	2,6108
05.08.2010 04:00:00	3,968	2,7371
05.08.2010 05:00:00	4,391	2,7442
05.08.2010 06:00:00	3,700	1,4566
05.08.2010 07:00:00	2,575	0,4510
05.08.2010 08:00:00	3,513	2,1103
05.08.2010 09:00:00	2,923	1,3904
05.08.2010 10:00:00	3,054	1,9117
05.08.2010 11:00:00	3,903	2,4453
05.08.2010 12:00:00	4,073	2,5031
05.08.2010 13:00:00	3,580	2,3458
05.08.2010 14:00:00	4,043	2,2016
05.08.2010 15:00:00	4,952	2,4425
05.08.2010 16:00:00	4,849	2,2829
05.08.2010 17:00:00	3,803	1,5092
05.08.2010 18:00:00	3,103	1,4416
05.08.2010 19:00:00	3,013	1,1539
05.08.2010 20:00:00	3,438	4,6443
05.08.2010 21:00:00	7,173	2,3279
05.08.2010 22:00:00	5,777	2,7587
05.08.2010 23:00:00	7,945	1,7928
06.08.2010 00:00:00	3,565	2,4303
06.08.2010 01:00:00	5,354	0,7218
06.08.2010 02:00:00	3,050	1,4171
06.08.2010 03:00:00	3,294	1,5438
06.08.2010 04:00:00	3,351	2,0691
06.08.2010 05:00:00	2,879	2,8527
06.08.2010 06:00:00	4,776	3,0575
06.08.2010 07:00:00	3,891	2,6279
06.08.2010 08:00:00	3,183	1,9475
06.08.2010 09:00:00	2,035	0,9409
06.08.2010 10:00:00	5,117	3,2154
06.08.2010 11:00:00	7,294	2,7689

06.08.2010 12:00:00	7,547	0,5512
06.08.2010 13:00:00	5,423	0,9087
06.08.2010 14:00:00	4,417	2,9881
06.08.2010 15:00:00	3,994	1,4615
06.08.2010 16:00:00	2,866	2,5428
06.08.2010 17:00:00	4,292	1,9351
06.08.2010 18:00:00	4,818	2,9710
06.08.2010 19:00:00	4,121	3,1084
06.08.2010 20:00:00	3,657	2,9044
06.08.2010 21:00:00	3,786	2,9533
06.08.2010 22:00:00	4,009	2,6644
06.08.2010 23:00:00	3,663	2,1855
07.08.2010 00:00:00	5,767	2,6418
07.08.2010 01:00:00	7,827	1,6874
07.08.2010 02:00:00	7,957	2,6565
07.08.2010 03:00:00	7,903	2,7948
07.08.2010 04:00:00	7,490	2,9713
07.08.2010 05:00:00	8,128	2,5488
07.08.2010 06:00:00	6,352	1,0555
07.08.2010 07:00:00	5,982	3,0720
07.08.2010 08:00:00	8,268	2,6390
07.08.2010 09:00:00	7,585	0,0223
07.08.2010 10:00:00	6,156	1,6629
07.08.2010 11:00:00	4,739	2,8744
07.08.2010 12:00:00	4,612	3,0618
07.08.2010 13:00:00	4,028	2,9981
07.08.2010 14:00:00	3,937	2,8504
07.08.2010 15:00:00	6,092	3,2489
07.08.2010 16:00:00	7,316	2,7275
07.08.2010 17:00:00	7,925	2,5836
07.08.2010 18:00:00	7,770	2,6513
07.08.2010 19:00:00	7,494	2,6554
07.08.2010 20:00:00	6,728	2,7147
07.08.2010 21:00:00	4,970	2,4436
07.08.2010 22:00:00	2,687	1,5893
07.08.2010 23:00:00	2,309	0,0443
08.08.2010 00:00:00	3,787	4,0604
08.08.2010 01:00:00	6,085	2,5726
08.08.2010 02:00:00	7,669	1,7802
08.08.2010 03:00:00	8,517	1,4182
08.08.2010 04:00:00	9,301	1,2030
08.08.2010 05:00:00	8,416	1,3683
08.08.2010 06:00:00	6,823	2,3782
08.08.2010 07:00:00	4,145	2,9423
08.08.2010 08:00:00	4,828	3,5537
08.08.2010 09:00:00	5,538	3,1569
08.08.2010 10:00:00	5,286	3,1835
08.08.2010 11:00:00	6,812	3,0224
08.08.2010 12:00:00	7,496	2,9349

08.08.2010 13:00:00	8,585	2,4358
08.08.2010 14:00:00	8,527	2,3667
08.08.2010 15:00:00	7,818	2,6616
08.08.2010 16:00:00	7,043	2,8400
08.08.2010 17:00:00	7,168	2,6822
08.08.2010 18:00:00	6,888	2,6267
08.08.2010 19:00:00	5,953	2,5852
08.08.2010 20:00:00	6,867	2,6583
08.08.2010 21:00:00	7,237	2,6225
08.08.2010 22:00:00	7,052	2,5641
08.08.2010 23:00:00	5,969	2,8439
09.08.2010 00:00:00	5,493	2,6555
09.08.2010 01:00:00	5,648	2,9149
09.08.2010 02:00:00	5,033	2,7961
09.08.2010 03:00:00	5,104	2,9759
09.08.2010 04:00:00	6,678	2,9729
09.08.2010 05:00:00	6,790	3,0210
09.08.2010 06:00:00	5,885	1,5850
09.08.2010 07:00:00	8,623	2,0678
09.08.2010 08:00:00	6,815	0,5379
09.08.2010 09:00:00	6,756	2,4166
09.08.2010 10:00:00	8,599	1,4130
09.08.2010 11:00:00	8,313	2,4792
09.08.2010 12:00:00	7,405	3,0213
09.08.2010 13:00:00	7,437	2,9171
09.08.2010 14:00:00	7,813	2,3849
09.08.2010 15:00:00	9,722	1,7329
09.08.2010 16:00:00	9,946	1,5734
09.08.2010 17:00:00	10,323	1,3922
09.08.2010 18:00:00	9,413	1,6242
09.08.2010 19:00:00	9,433	1,3318
09.08.2010 20:00:00	9,526	1,9525
09.08.2010 21:00:00	5,921	0,1448
09.08.2010 22:00:00	11,449	0,8534
09.08.2010 23:00:00	12,067	0,8575
10.08.2010 00:00:00	10,241	1,3973
10.08.2010 01:00:00	10,986	1,0099
10.08.2010 02:00:00	11,318	1,4448
10.08.2010 03:00:00	10,574	1,3495
10.08.2010 04:00:00	10,091	0,7605
10.08.2010 05:00:00	9,896	1,4830
10.08.2010 06:00:00	9,490	0,5403
10.08.2010 07:00:00	10,467	1,1884
10.08.2010 08:00:00	9,317	1,9414
10.08.2010 09:00:00	8,457	2,4028
10.08.2010 10:00:00	8,489	2,4500
10.08.2010 11:00:00	8,373	2,4769
10.08.2010 12:00:00	8,037	2,5334
10.08.2010 13:00:00	4,857	3,3463

10.08.2010 14:00:00	2,210	2,3948
10.08.2010 15:00:00	2,638	0,8070
10.08.2010 16:00:00	2,703	1,9244
10.08.2010 17:00:00	3,132	2,0588
10.08.2010 18:00:00	2,548	0,8137
10.08.2010 19:00:00	4,682	3,3629
10.08.2010 20:00:00	6,245	2,8351
10.08.2010 21:00:00	6,701	2,4843
10.08.2010 22:00:00	7,159	2,3643
10.08.2010 23:00:00	6,402	2,4195
11.08.2010 00:00:00	5,904	2,4009
11.08.2010 01:00:00	5,091	2,3646
11.08.2010 02:00:00	3,772	2,0983
11.08.2010 03:00:00	3,179	1,6956
11.08.2010 04:00:00	2,529	1,8729
11.08.2010 05:00:00	6,344	2,5132
11.08.2010 06:00:00	6,625	2,4480
11.08.2010 07:00:00	7,143	2,4612
11.08.2010 08:00:00	5,788	2,8850
11.08.2010 09:00:00	4,774	3,1297
11.08.2010 10:00:00	2,673	0,9825
11.08.2010 11:00:00	2,822	1,7343
11.08.2010 12:00:00	5,448	3,2463
11.08.2010 13:00:00	6,788	2,9689
11.08.2010 14:00:00	6,681	3,0328
11.08.2010 15:00:00	6,841	2,8580
11.08.2010 16:00:00	6,673	2,6319
11.08.2010 17:00:00	5,691	2,4027
11.08.2010 18:00:00	3,841	1,8511
11.08.2010 19:00:00	2,540	1,0252
11.08.2010 20:00:00	2,197	0,9183
11.08.2010 21:00:00	4,136	2,5241
11.08.2010 22:00:00	5,291	2,1302
11.08.2010 23:00:00	5,088	2,1246
12.08.2010 00:00:00	5,796	1,5950
12.08.2010 01:00:00	6,661	2,2788
12.08.2010 02:00:00	4,613	2,7039
12.08.2010 03:00:00	5,112	2,5459
12.08.2010 04:00:00	5,244	2,3844
12.08.2010 05:00:00	4,029	2,2052
12.08.2010 06:00:00	2,806	2,0177
12.08.2010 07:00:00	3,068	2,4611
12.08.2010 08:00:00	3,394	2,8018
12.08.2010 09:00:00	3,977	3,1878
12.08.2010 10:00:00	4,246	3,0551
12.08.2010 11:00:00	4,014	2,9053
12.08.2010 12:00:00	3,990	3,0432
12.08.2010 13:00:00	4,270	3,2103
12.08.2010 14:00:00	3,829	2,8561



12.08.2010 15:00:00	3,168	2,7202
12.08.2010 16:00:00	3,245	1,9864
12.08.2010 17:00:00	3,547	2,3732
12.08.2010 18:00:00	4,694	2,4158
12.08.2010 19:00:00	3,145	2,9011
12.08.2010 20:00:00	2,826	1,2660
12.08.2010 21:00:00	2,642	0,8379
12.08.2010 22:00:00	3,358	2,5514
12.08.2010 23:00:00	2,748	2,1421
13.08.2010 00:00:00	4,011	3,0072
13.08.2010 01:00:00	5,426	2,9693
13.08.2010 02:00:00	6,861	2,7998
13.08.2010 03:00:00	6,877	2,7997
13.08.2010 04:00:00	7,137	2,7801
13.08.2010 05:00:00	7,393	2,6405
13.08.2010 06:00:00	5,687	2,9812
13.08.2010 07:00:00	3,257	2,0835
13.08.2010 08:00:00	3,307	2,1754
13.08.2010 09:00:00	3,228	2,0603
13.08.2010 10:00:00	2,896	1,8857
13.08.2010 11:00:00	4,399	2,7720
13.08.2010 12:00:00	4,240	2,5861
13.08.2010 13:00:00	4,895	2,7885
13.08.2010 14:00:00	5,172	2,7831
13.08.2010 15:00:00	5,167	2,6762
13.08.2010 16:00:00	4,533	2,6832
13.08.2010 17:00:00	2,787	2,5915
13.08.2010 18:00:00	3,784	2,4323
13.08.2010 19:00:00	6,829	3,2357
13.08.2010 20:00:00	6,193	3,0802
13.08.2010 21:00:00	3,700	3,1718
13.08.2010 22:00:00	3,525	2,1518
13.08.2010 23:00:00	4,286	2,4686
14.08.2010 00:00:00	5,950	2,4592
14.08.2010 01:00:00	7,066	2,3598
14.08.2010 02:00:00	7,043	2,3220
14.08.2010 03:00:00	6,851	2,3256
14.08.2010 04:00:00	6,725	2,3957
14.08.2010 05:00:00	7,271	2,3460
14.08.2010 06:00:00	7,002	2,5273
14.08.2010 07:00:00	8,219	2,4008
14.08.2010 08:00:00	8,885	2,2134
14.08.2010 09:00:00	8,291	2,3185
14.08.2010 10:00:00	8,310	1,1239
14.08.2010 11:00:00	4,407	0,6530
14.08.2010 12:00:00	4,352	3,1300
14.08.2010 13:00:00	4,383	3,2494
14.08.2010 14:00:00	4,160	3,3107
14.08.2010 15:00:00	3,927	3,0618

14.08.2010 16:00:00	3,140	3,1299
14.08.2010 17:00:00	6,872	0,0107
14.08.2010 18:00:00	7,253	2,1347
14.08.2010 19:00:00	6,467	3,0148
14.08.2010 20:00:00	6,246	3,1077
14.08.2010 21:00:00	6,116	3,0940
14.08.2010 22:00:00	6,189	3,0060
14.08.2010 23:00:00	6,676	3,0492
15.08.2010 00:00:00	6,630	2,9844
15.08.2010 01:00:00	6,493	3,1713
15.08.2010 02:00:00	7,346	2,6707
15.08.2010 03:00:00	7,203	2,9077
15.08.2010 04:00:00	8,018	2,6432
15.08.2010 05:00:00	8,956	2,4767
15.08.2010 06:00:00	10,298	2,1297
15.08.2010 07:00:00	9,700	2,3461
15.08.2010 08:00:00	10,520	2,0808
15.08.2010 09:00:00	10,415	2,1067
15.08.2010 10:00:00	9,665	2,2953
15.08.2010 11:00:00	8,997	2,4723
15.08.2010 12:00:00	9,864	2,2775
15.08.2010 13:00:00	8,818	2,5527
15.08.2010 14:00:00	8,318	2,6930
15.08.2010 15:00:00	8,179	2,8457
15.08.2010 16:00:00	8,879	2,6497
15.08.2010 17:00:00	10,408	2,1315
15.08.2010 18:00:00	9,420	2,4759
15.08.2010 19:00:00	9,068	2,5788
15.08.2010 20:00:00	10,156	2,1903
15.08.2010 21:00:00	10,367	2,1212
15.08.2010 22:00:00	10,016	2,2718
15.08.2010 23:00:00	9,806	2,3427
16.08.2010 00:00:00	10,043	2,2475
16.08.2010 01:00:00	9,938	2,2909
16.08.2010 02:00:00	10,558	2,0342
16.08.2010 03:00:00	9,830	2,1227
16.08.2010 04:00:00	8,996	2,1771
16.08.2010 05:00:00	7,614	1,4505
16.08.2010 06:00:00	7,136	2,8638
16.08.2010 07:00:00	7,774	2,9699
16.08.2010 08:00:00	7,835	3,0042
16.08.2010 09:00:00	9,342	1,9965
16.08.2010 10:00:00	9,402	1,7629
16.08.2010 11:00:00	7,149	3,0119
16.08.2010 12:00:00	7,926	2,6843
16.08.2010 13:00:00	8,239	2,8614
16.08.2010 14:00:00	9,108	2,5905
16.08.2010 15:00:00	9,231	2,5443
16.08.2010 16:00:00	9,697	2,4215

16.08.2010 17:00:00	9,759	2,1673
16.08.2010 18:00:00	8,215	2,9114
16.08.2010 19:00:00	7,341	3,1835
16.08.2010 20:00:00	8,419	2,7183
16.08.2010 21:00:00	7,903	2,9023
16.08.2010 22:00:00	8,235	2,7125
16.08.2010 23:00:00	8,713	2,5161
17.08.2010 00:00:00	8,826	2,3704
17.08.2010 01:00:00	8,705	2,7364
17.08.2010 02:00:00	9,207	2,2203
17.08.2010 03:00:00	9,491	2,0282
17.08.2010 04:00:00	8,929	2,2847
17.08.2010 05:00:00	7,836	2,8575
17.08.2010 06:00:00	7,597	2,8351
17.08.2010 07:00:00	8,903	2,0955
17.08.2010 08:00:00	10,340	1,3670
17.08.2010 09:00:00	10,744	1,2462
17.08.2010 10:00:00	9,291	1,8921
17.08.2010 11:00:00	8,887	2,2295
17.08.2010 12:00:00	9,346	1,8682
17.08.2010 13:00:00	4,903	1,8445
17.08.2010 14:00:00	5,266	3,3846
17.08.2010 15:00:00	4,608	3,2870
17.08.2010 16:00:00	5,882	3,3100
17.08.2010 17:00:00	6,485	3,2836
17.08.2010 18:00:00	7,425	2,2019
17.08.2010 19:00:00	7,332	1,1086
17.08.2010 20:00:00	8,854	2,1100
17.08.2010 21:00:00	8,589	2,3638
17.08.2010 22:00:00	6,654	3,1254
17.08.2010 23:00:00	6,070	3,0145
18.08.2010 00:00:00	5,208	3,1487
18.08.2010 01:00:00	5,247	2,8572
18.08.2010 02:00:00	5,374	2,8076
18.08.2010 03:00:00	5,630	2,8479
18.08.2010 04:00:00	7,187	2,4303
18.08.2010 05:00:00	5,834	2,5303
18.08.2010 06:00:00	7,396	2,3530
18.08.2010 07:00:00	8,474	2,2988
18.08.2010 08:00:00	8,514	2,2029
18.08.2010 09:00:00	7,146	2,7304
18.08.2010 10:00:00	7,491	2,6610
18.08.2010 11:00:00	7,620	2,3788
18.08.2010 12:00:00	6,214	2,2107
18.08.2010 13:00:00	5,668	2,1863
18.08.2010 14:00:00	6,613	2,2552
18.08.2010 15:00:00	5,680	2,2987
18.08.2010 16:00:00	5,544	2,4348
18.08.2010 17:00:00	4,887	2,9180

18.08.2010 18:00:00	5,285	3,1771
18.08.2010 19:00:00	5,681	3,1325
18.08.2010 20:00:00	5,450	3,2667
18.08.2010 21:00:00	5,202	3,3592
18.08.2010 22:00:00	3,993	3,3906
18.08.2010 23:00:00	4,047	3,0829
19.08.2010 00:00:00	4,296	2,9828
19.08.2010 01:00:00	5,519	2,7274
19.08.2010 02:00:00	5,139	2,3752
19.08.2010 03:00:00	5,104	2,7605
19.08.2010 04:00:00	2,857	1,2927
19.08.2010 05:00:00	3,839	1,8893
19.08.2010 06:00:00	3,947	1,9072
19.08.2010 07:00:00	3,033	1,7621
19.08.2010 08:00:00	3,595	2,4452
19.08.2010 09:00:00	5,217	2,2046
19.08.2010 10:00:00	6,467	2,3842
19.08.2010 11:00:00	7,283	2,4533
19.08.2010 12:00:00	6,662	2,3622
19.08.2010 13:00:00	5,147	2,4472
19.08.2010 14:00:00	4,518	2,3516
19.08.2010 15:00:00	2,683	0,7582
19.08.2010 16:00:00	2,274	0,7201
19.08.2010 17:00:00	2,400	0,9513
19.08.2010 18:00:00	2,502	2,5469
19.08.2010 19:00:00	3,021	3,3447
19.08.2010 20:00:00	7,227	2,9100
19.08.2010 21:00:00	7,013	2,7338
19.08.2010 22:00:00	6,731	2,6067
19.08.2010 23:00:00	7,410	2,3984
20.08.2010 00:00:00	8,525	2,2665
20.08.2010 01:00:00	7,835	2,5266
20.08.2010 02:00:00	6,989	2,5166
20.08.2010 03:00:00	6,352	2,6238
20.08.2010 04:00:00	6,967	2,5710
20.08.2010 05:00:00	6,046	2,5755
20.08.2010 06:00:00	6,068	2,4486
20.08.2010 07:00:00	4,492	2,5839
20.08.2010 08:00:00	4,491	2,7704
20.08.2010 09:00:00	5,168	2,3914
20.08.2010 10:00:00	2,815	3,6714
20.08.2010 11:00:00	3,258	1,8322
20.08.2010 12:00:00	2,098	0,4272
20.08.2010 13:00:00	2,687	1,8071
20.08.2010 14:00:00	2,633	2,1209
20.08.2010 14:00:44	2,401	1,6400
20.08.2010 15:00:00	2,779	2,9350
20.08.2010 16:00:00	6,823	3,2974
20.08.2010 17:00:00	8,197	2,5040

20.08.2010 18:00:00	7,457	2,7304
20.08.2010 19:00:00	7,722	2,7243
20.08.2010 20:00:00	7,450	2,8102
20.08.2010 21:00:00	7,312	2,7251
20.08.2010 22:00:00	8,134	2,5811
20.08.2010 23:00:00	7,164	2,8797
21.08.2010 00:00:00	5,516	2,9621
21.08.2010 01:00:00	6,114	3,1430
21.08.2010 02:00:00	6,500	2,9817
21.08.2010 03:00:00	5,667	2,8066
21.08.2010 04:00:00	4,322	2,8382
21.08.2010 05:00:00	4,202	2,5278
21.08.2010 06:00:00	4,649	1,8325
21.08.2010 07:00:00	4,344	2,2375
21.08.2010 08:00:00	3,494	2,4571
21.08.2010 09:00:00	3,514	2,4436
21.08.2010 10:00:00	2,713	1,9618
21.08.2010 11:00:00	3,946	3,4989
21.08.2010 12:00:00	5,261	3,1442
21.08.2010 13:00:00	5,074	3,2451
21.08.2010 14:00:00	3,648	2,7220
21.08.2010 15:00:00	4,875	3,3533
21.08.2010 16:00:00	5,478	2,9334
21.08.2010 17:00:00	4,142	2,3498
21.08.2010 18:00:00	3,568	1,7245
21.08.2010 19:00:00	3,878	1,7279
21.08.2010 20:00:00	2,575	1,1307
21.08.2010 21:00:00	2,591	8,4894
21.08.2010 22:00:00	5,889	2,6245
21.08.2010 23:00:00	7,175	2,4670
22.08.2010 00:00:00	8,404	2,4602
22.08.2010 01:00:00	8,709	2,3792
22.08.2010 02:00:00	8,862	2,1543
22.08.2010 03:00:00	10,675	1,2213
22.08.2010 04:00:00	10,170	1,4341
22.08.2010 05:00:00	10,563	1,2801
22.08.2010 06:00:00	10,056	1,5768
22.08.2010 07:00:00	4,415	3,8913
22.08.2010 08:00:00	5,275	2,9888
22.08.2010 09:00:00	4,642	2,9779
22.08.2010 10:00:00	4,271	3,0566
22.08.2010 11:00:00	5,380	3,0519
22.08.2010 12:00:00	5,464	3,1544
22.08.2010 13:00:00	5,738	3,0750
22.08.2010 14:00:00	7,245	2,8854
22.08.2010 15:00:00	8,158	2,4478
22.08.2010 16:00:00	9,360	1,9135
22.08.2010 17:00:00	10,684	1,2508
22.08.2010 18:00:00	9,630	1,8821

22.08.2010 19:00:00	8,241	2,4252
22.08.2010 20:00:00	9,016	2,1955
22.08.2010 21:00:00	10,248	1,5256
22.08.2010 22:00:00	9,892	1,6819
22.08.2010 23:00:00	5,595	3,4677
23.08.2010 00:00:00	4,076	2,9925
23.08.2010 01:00:00	4,962	3,1230
23.08.2010 02:00:00	6,269	2,7941
23.08.2010 03:00:00	2,051	0,4996
23.08.2010 04:00:00	5,192	3,2406
23.08.2010 05:00:00	8,156	2,4359
23.08.2010 06:00:00	6,425	2,9093
23.08.2010 07:00:00	7,082	3,1333
23.08.2010 08:00:00	8,495	2,2746
23.08.2010 09:00:00	9,733	1,6535
23.08.2010 10:00:00	9,521	1,7749
23.08.2010 11:00:00	8,799	2,1287
23.08.2010 12:00:00	9,872	1,5460
23.08.2010 13:00:00	9,765	1,6211
23.08.2010 14:00:00	10,574	1,3077
23.08.2010 15:00:00	10,180	1,5046
23.08.2010 16:00:00	9,674	1,6559
23.08.2010 17:00:00	9,712	1,6427
23.08.2010 18:00:00	9,901	1,5161
23.08.2010 19:00:00	9,229	1,8878
23.08.2010 20:00:00	8,794	2,0900
23.08.2010 21:00:00	8,175	2,7240
23.08.2010 22:00:00	8,270	2,6692
23.08.2010 23:00:00	7,217	3,0673
24.08.2010 00:00:00	6,712	3,1095
24.08.2010 01:00:00	5,412	3,1993
24.08.2010 02:00:00	6,566	3,1034
24.08.2010 03:00:00	6,982	3,0878
24.08.2010 04:00:00	7,614	2,8993
24.08.2010 05:00:00	7,387	3,0621
24.08.2010 06:00:00	7,697	3,0303
24.08.2010 07:00:00	9,004	2,0998
24.08.2010 08:00:00	8,598	2,3608
24.08.2010 09:00:00	7,255	1,7513
24.08.2010 10:00:00	7,287	2,4885
24.08.2010 11:00:00	7,319	3,0635
24.08.2010 12:00:00	6,950	3,1340
24.08.2010 13:00:00	7,104	1,6395
24.08.2010 14:00:00	8,162	2,4542
24.08.2010 15:00:00	7,321	2,6887
24.08.2010 16:00:00	5,756	2,7650
24.08.2010 17:00:00	5,018	2,7287
24.08.2010 18:00:00	4,854	2,7540
24.08.2010 19:00:00	4,206	2,8275

24.08.2010 20:00:00	3,441	2,2425
24.08.2010 21:00:00	3,035	2,3362
24.08.2010 22:00:00	3,101	2,1101
24.08.2010 23:00:00	3,367	2,0706
25.08.2010 00:00:00	3,772	2,1963
25.08.2010 01:00:00	4,260	2,7793
25.08.2010 02:00:00	4,634	2,6679
25.08.2010 03:00:00	4,378	2,3191
25.08.2010 04:00:00	3,412	2,3610
25.08.2010 05:00:00	3,032	1,1638
25.08.2010 06:00:00	3,063	2,0605
25.08.2010 07:00:00	2,737	0,4102
25.08.2010 08:00:00	2,527	0,4894
25.08.2010 09:00:00	1,965	0,0437
25.08.2010 10:00:00	2,279	2,2971
25.08.2010 11:00:00	3,209	1,9710
25.08.2010 12:00:00	3,699	2,3644
25.08.2010 13:00:00	4,233	2,7351
25.08.2010 14:00:00	3,188	1,9346
25.08.2010 15:00:00	2,160	0,2673
25.08.2010 16:00:00	2,623	1,7409
25.08.2010 17:00:00	3,901	2,5035
25.08.2010 18:00:00	4,339	2,7303
25.08.2010 19:00:00	4,700	2,8387
25.08.2010 20:00:00	5,337	2,7543
25.08.2010 21:00:00	5,351	2,8687
25.08.2010 22:00:00	4,382	2,9294
25.08.2010 23:00:00	4,036	2,4473
26.08.2010 00:00:00	2,720	0,0089
26.08.2010 01:00:00	2,840	1,5312
26.08.2010 02:00:00	3,236	0,5751
26.08.2010 03:00:00	3,905	3,6855
26.08.2010 04:00:00	6,356	3,2430
26.08.2010 05:00:00	6,111	2,9373
26.08.2010 06:00:00	6,475	2,8181
26.08.2010 07:00:00	5,531	3,0047
26.08.2010 08:00:00	4,353	2,7650
26.08.2010 09:00:00	4,881	2,8542
26.08.2010 10:00:00	4,882	2,8777
26.08.2010 11:00:00	6,005	2,9481
26.08.2010 12:00:00	6,540	2,9028
26.08.2010 13:00:00	6,805	2,9082
26.08.2010 14:00:00	7,466	2,8077
26.08.2010 15:00:00	6,561	2,9032
26.08.2010 16:00:00	5,570	2,8056
26.08.2010 17:00:00	6,143	2,7971
26.08.2010 18:00:00	6,469	2,6363
26.08.2010 19:00:00	6,278	2,8715
26.08.2010 20:00:00	4,663	3,3710

26.08.2010 21:00:00	6,511	3,3373
26.08.2010 22:00:00	6,497	3,3206
26.08.2010 23:00:00	5,827	3,3036
27.08.2010 00:00:00	6,015	3,4379
27.08.2010 01:00:00	6,268	3,3087
27.08.2010 02:00:00	6,782	3,2316
27.08.2010 03:00:00	7,203	3,1414
27.08.2010 04:00:00	8,198	2,6315
27.08.2010 05:00:00	6,881	2,9672
27.08.2010 06:00:00	6,818	2,8538
27.08.2010 07:00:00	8,295	2,4090
27.08.2010 08:00:00	8,108	2,4276
27.08.2010 09:00:00	6,636	2,9190
27.08.2010 10:00:00	6,755	2,7456
27.08.2010 11:00:00	6,636	2,8676
27.08.2010 12:00:00	7,794	2,5964
27.08.2010 13:00:00	6,933	2,7384
27.08.2010 14:00:00	6,160	2,6816
27.08.2010 15:00:00	6,206	2,7054
27.08.2010 16:00:00	7,423	1,7039
27.08.2010 17:00:00	7,422	2,7613
27.08.2010 18:00:00	5,848	2,9521
27.08.2010 19:00:00	5,286	2,8751
27.08.2010 20:00:00	5,612	2,8784
27.08.2010 21:00:00	5,437	3,3201
27.08.2010 22:00:00	5,594	3,3155
27.08.2010 23:00:00	4,933	3,4763
28.08.2010 00:00:00	5,479	3,2484
28.08.2010 01:00:00	5,575	3,3465
28.08.2010 02:00:00	6,703	3,1840
28.08.2010 03:00:00	7,465	2,8874
28.08.2010 04:00:00	8,063	2,5980
28.08.2010 05:00:00	8,967	1,9579
28.08.2010 06:00:00	8,651	2,2553
28.08.2010 07:00:00	7,786	2,6975
28.08.2010 08:00:00	8,064	2,5546
28.08.2010 09:00:00	8,089	2,5536
28.08.2010 10:00:00	7,808	2,6397
28.08.2010 11:00:00	7,324	2,7386
28.08.2010 12:00:00	7,798	2,6988
28.08.2010 13:00:00	8,698	2,2907
28.08.2010 14:00:00	8,513	2,4578
28.08.2010 15:00:00	8,230	2,5417
28.08.2010 16:00:00	8,347	2,5160
28.08.2010 17:00:00	8,294	2,4913
28.08.2010 18:00:00	9,381	1,8249
28.08.2010 19:00:00	8,730	2,2595
28.08.2010 20:00:00	9,228	1,8792
28.08.2010 21:00:00	9,566	1,7090



28.08.2010 22:00:00	9,805	1,5516
28.08.2010 23:00:00	9,373	1,7864
29.08.2010 00:00:00	8,992	1,9480
29.08.2010 01:00:00	8,121	2,7212
29.08.2010 02:00:00	7,737	1,1971
29.08.2010 03:00:00	7,798	0,0908
29.08.2010 04:00:00	8,919	2,0303
29.08.2010 05:00:00	9,379	1,7124
29.08.2010 06:00:00	10,971	1,0916
29.08.2010 07:00:00	10,691	1,1924
29.08.2010 08:00:00	11,138	1,0422
29.08.2010 09:00:00	11,588	0,9293
29.08.2010 10:00:00	10,867	1,1250
29.08.2010 11:00:00	7,278	2,7640
29.08.2010 12:00:00	5,779	3,4365
29.08.2010 13:00:00	2,820	2,1503
29.08.2010 14:00:00	4,423	3,2875
29.08.2010 15:00:00	5,073	2,2005
29.08.2010 16:00:00	3,497	1,8398
29.08.2010 17:00:00	4,134	2,2616
29.08.2010 18:00:00	4,856	2,4679
29.08.2010 19:00:00	4,838	2,5014
29.08.2010 20:00:00	3,427	1,1907
29.08.2010 21:00:00	3,379	2,6198
29.08.2010 22:00:00	2,380	0,7067
29.08.2010 23:00:00	2,414	0,1368
30.08.2010 00:00:00	3,737	2,0112
30.08.2010 01:00:00	3,962	2,0708
30.08.2010 02:00:00	5,503	2,6722
30.08.2010 03:00:00	5,601	2,6196
30.08.2010 04:00:00	6,078	2,5425
30.08.2010 05:00:00	5,627	2,6283
30.08.2010 06:00:00	4,764	2,4966
30.08.2010 07:00:00	3,908	2,5859
30.08.2010 08:00:00	4,145	2,5420
30.08.2010 09:00:00	4,373	2,3674
30.08.2010 10:00:00	3,580	2,1755
30.08.2010 11:00:00	2,508	1,6547
30.08.2010 12:00:00	3,948	2,6901
30.08.2010 13:00:00	3,960	2,7801
30.08.2010 14:00:00	5,671	3,0411
30.08.2010 15:00:00	6,312	3,1791
30.08.2010 16:00:00	6,718	3,0674
30.08.2010 17:00:00	6,168	3,1610
30.08.2010 18:00:00	7,113	2,8251
30.08.2010 19:00:00	6,708	2,8623
30.08.2010 20:00:00	5,890	2,4856
30.08.2010 21:00:00	5,713	2,4364
30.08.2010 22:00:00	5,205	2,4681

30.08.2010 23:00:00	4,470	2,2913
31.08.2010 00:00:00	3,532	1,9173
31.08.2010 01:00:00	3,424	1,7346
31.08.2010 02:00:00	4,314	2,1747
31.08.2010 03:00:00	4,651	1,8811
31.08.2010 04:00:00	2,434	3,2164
31.08.2010 05:00:00	2,563	0,6849
31.08.2010 06:00:00	3,172	1,2842
31.08.2010 07:00:00	3,280	2,2565
31.08.2010 08:00:00	5,778	2,9926
31.08.2010 09:00:00	7,276	2,9809
31.08.2010 10:00:00	7,890	2,6447
31.08.2010 11:00:00	7,170	2,9559
31.08.2010 12:00:00	7,543	2,8260
31.08.2010 13:00:00	8,261	2,6195
31.08.2010 14:00:00	7,162	2,8872
31.08.2010 15:00:00	7,213	2,9260
31.08.2010 16:00:00	6,964	3,1790
31.08.2010 17:00:00	6,946	2,8836
31.08.2010 18:00:00	8,424	2,4239
31.08.2010 19:00:00	7,679	2,7860
31.08.2010 20:00:00	7,957	1,0406
31.08.2010 21:00:00	8,769	2,1064
31.08.2010 22:00:00	8,116	2,6406
31.08.2010 23:00:00	9,812	1,5305
01.09.2010 00:00:00	8,604	2,1468
01.09.2010 01:00:00	6,404	3,6417
01.09.2010 02:00:00	6,667	3,3548
01.09.2010 03:00:00	6,681	3,1367
01.09.2010 04:00:00	7,301	2,9379
01.09.2010 05:00:00	7,742	2,7963
01.09.2010 06:00:00	7,201	2,9916
01.09.2010 07:00:00	7,115	3,0531
01.09.2010 08:00:00	6,849	3,0864
01.09.2010 09:00:00	6,722	3,3732
01.09.2010 10:00:00	7,066	3,1661
01.09.2010 11:00:00	4,561	3,3625
01.09.2010 12:00:00	4,931	3,4431
01.09.2010 13:00:00	5,624	3,6089
01.09.2010 14:00:00	6,705	3,2436
01.09.2010 15:00:00	7,364	2,9246
01.09.2010 16:00:00	7,064	3,0862
01.09.2010 17:00:00	5,203	3,2299
01.09.2010 18:00:00	4,758	2,9595
01.09.2010 19:00:00	3,046	2,1595
01.09.2010 20:00:00	2,083	7,7196
01.09.2010 21:00:00	1,815	2,7298
01.09.2010 22:00:00	2,733	1,6276
01.09.2010 23:00:00	3,831	2,7818

02.09.2010 00:00:00	3,766	3,1135
02.09.2010 01:00:00	3,450	2,3707
02.09.2010 02:00:00	2,026	1,4658
02.09.2010 03:00:00	2,497	1,4522
02.09.2010 04:00:00	2,348	1,3681
02.09.2010 05:00:00	1,820	1,0791
02.09.2010 06:00:00	3,325	2,7505
02.09.2010 07:00:00	3,125	2,0911
02.09.2010 08:00:00	2,285	2,3108
02.09.2010 09:00:00	2,059	0,8245
02.09.2010 10:00:00	2,883	3,2149
02.09.2010 11:00:00	3,724	3,6864
02.09.2010 12:00:00	3,513	3,3807
02.09.2010 13:00:00	4,250	3,2792
02.09.2010 14:00:00	4,445	3,0557
02.09.2010 15:00:00	3,167	1,7578
02.09.2010 16:00:00	3,354	2,1165
02.09.2010 17:00:00	3,377	2,1690
02.09.2010 18:00:00	4,286	2,3923
02.09.2010 19:00:00	4,361	2,5063
02.09.2010 20:00:00	5,306	2,6597
02.09.2010 21:00:00	6,610	2,4780
02.09.2010 22:00:00	6,780	2,6005
02.09.2010 23:00:00	7,031	2,5602
03.09.2010 00:00:00	7,030	2,4674
03.09.2010 01:00:00	6,704	2,3704
03.09.2010 02:00:00	5,376	2,3230
03.09.2010 03:00:00	4,178	2,5084
03.09.2010 04:00:00	4,352	2,6245
03.09.2010 05:00:00	3,552	2,3070
03.09.2010 06:00:00	2,928	2,0879
03.09.2010 07:00:00	2,817	1,9101
03.09.2010 08:00:00	2,238	1,2888
03.09.2010 09:00:00	2,932	2,5070
03.09.2010 10:00:00	1,914	0,7458
03.09.2010 11:00:00	3,409	2,4992
03.09.2010 12:00:00	3,623	2,6207
03.09.2010 13:00:00	3,177	2,6898
03.09.2010 14:00:00	4,366	2,5691
03.09.2010 15:00:00	3,949	2,3961
03.09.2010 16:00:00	4,427	2,4434
03.09.2010 17:00:00	5,156	2,6339
03.09.2010 18:00:00	6,555	2,6475
03.09.2010 19:00:00	7,196	2,4796
03.09.2010 20:00:00	6,553	2,6351
03.09.2010 21:00:00	5,526	2,6877
03.09.2010 22:00:00	5,847	2,6715
03.09.2010 23:00:00	5,752	2,7364
04.09.2010 00:00:00	6,625	2,7776

04.09.2010 01:00:00	8,390	2,5315
04.09.2010 02:00:00	9,260	2,3002
04.09.2010 03:00:00	6,568	2,9756
04.09.2010 04:00:00	9,236	2,4772
04.09.2010 05:00:00	8,787	2,5265
04.09.2010 06:00:00	6,823	3,3037
04.09.2010 07:00:00	6,969	3,1459
04.09.2010 08:00:00	5,744	3,3758
04.09.2010 09:00:00	4,573	3,6080
04.09.2010 10:00:00	4,334	3,1737
04.09.2010 11:00:00	4,616	3,4166
04.09.2010 12:00:00	4,581	3,4359
04.09.2010 13:00:00	4,594	3,1263
04.09.2010 14:00:00	5,451	2,9862
04.09.2010 15:00:00	6,498	2,8901
04.09.2010 16:00:00	7,902	2,5558
04.09.2010 17:00:00	9,141	1,9521
04.09.2010 18:00:00	8,850	2,1833
04.09.2010 19:00:00	8,376	2,4972
04.09.2010 20:00:00	7,772	2,7669
04.09.2010 21:00:00	7,294	2,8530
04.09.2010 22:00:00	6,907	2,8041
04.09.2010 23:00:00	5,989	3,0000
05.09.2010 00:00:00	6,228	2,8414
05.09.2010 01:00:00	4,838	3,5243
05.09.2010 02:00:00	2,532	0,3858
05.09.2010 03:00:00	3,779	2,8569
05.09.2010 04:00:00	4,482	2,9645
05.09.2010 05:00:00	5,454	3,6624
05.09.2010 06:00:00	6,150	3,2290
05.09.2010 07:00:00	6,310	3,2187
05.09.2010 08:00:00	5,711	3,1925
05.09.2010 09:00:00	5,700	2,5215
05.09.2010 10:00:00	5,006	3,5394
05.09.2010 11:00:00	4,167	3,4069
05.09.2010 12:00:00	3,797	3,2860
05.09.2010 13:00:00	4,424	2,9994
05.09.2010 14:00:00	4,885	3,0845
05.09.2010 15:00:00	5,488	3,0710
05.09.2010 16:00:00	7,097	2,8464
05.09.2010 17:00:00	7,610	2,8633
05.09.2010 18:00:00	8,122	2,7783
05.09.2010 19:00:00	8,008	2,7952
05.09.2010 20:00:00	8,919	2,5990
05.09.2010 21:00:00	9,257	2,5242
05.09.2010 22:00:00	8,990	2,6410
05.09.2010 23:00:00	8,999	2,6953
06.09.2010 00:00:00	9,310	2,5974
06.09.2010 01:00:00	8,762	2,7451

06.09.2010 02:00:00	9,286	2,5522
06.09.2010 03:00:00	8,828	2,7593
06.09.2010 04:00:00	8,891	2,6779
06.09.2010 05:00:00	8,189	2,8181
06.09.2010 06:00:00	6,699	3,1914
06.09.2010 07:00:00	5,579	3,3410
06.09.2010 08:00:00	4,799	3,5042
06.09.2010 09:00:00	3,982	3,5675
06.09.2010 10:00:00	3,493	3,0581
06.09.2010 11:00:00	3,206	3,6132
06.09.2010 12:00:00	3,450	3,0037
06.09.2010 13:00:00	4,375	3,0764
06.09.2010 14:00:00	6,354	3,0700
06.09.2010 15:00:00	7,171	2,9691
06.09.2010 16:00:00	8,049	2,9808
06.09.2010 17:00:00	7,485	3,2124
06.09.2010 18:00:00	8,337	2,9050
06.09.2010 19:00:00	7,177	3,1550
06.09.2010 20:00:00	9,148	2,6660
06.09.2010 21:00:00	10,074	2,4021
06.09.2010 22:00:00	9,904	2,4559
06.09.2010 23:00:00	9,790	2,4701
07.09.2010 00:00:00	9,141	2,6664
07.09.2010 01:00:00	9,379	2,6186
07.09.2010 02:00:00	9,866	2,4497
07.09.2010 03:00:00	9,554	2,5869
07.09.2010 04:00:00	9,872	2,4208
07.09.2010 05:00:00	11,181	1,8070
07.09.2010 06:00:00	11,000	1,8906
07.09.2010 07:00:00	11,355	1,7221
07.09.2010 08:00:00	11,538	1,6433
07.09.2010 09:00:00	11,571	1,6294
07.09.2010 10:00:00	10,079	2,3327
07.09.2010 11:00:00	9,020	2,7977
07.09.2010 12:00:00	8,674	2,9448
07.09.2010 13:00:00	7,432	3,2621
07.09.2010 14:00:00	7,192	3,2243
07.09.2010 15:00:00	7,991	2,9284
07.09.2010 16:00:00	9,913	2,3906
07.09.2010 17:00:00	10,822	1,9921
07.09.2010 18:00:00	10,941	1,9291
07.09.2010 19:00:00	9,994	2,4318
07.09.2010 20:00:00	7,704	3,2332
07.09.2010 21:00:00	8,547	2,9972
07.09.2010 22:00:00	9,439	2,6109
07.09.2010 23:00:00	6,236	4,1274
08.09.2010 00:00:00	10,451	2,0717
08.09.2010 01:00:00	12,361	1,3388
08.09.2010 02:00:00	12,542	1,2814

08.09.2010 03:00:00	12,706	1,2322
08.09.2010 04:00:00	11,709	1,5743
08.09.2010 05:00:00	11,129	1,8316
08.09.2010 06:00:00	11,242	1,7766
08.09.2010 07:00:00	11,175	1,8066
08.09.2010 08:00:00	10,084	2,3419
08.09.2010 09:00:00	9,893	2,4601
08.09.2010 10:00:00	8,897	2,8664
08.09.2010 11:00:00	8,258	3,1465
08.09.2010 12:00:00	7,601	3,3644
08.09.2010 13:00:00	8,315	3,0435
08.09.2010 14:00:00	8,906	2,8017
08.09.2010 15:00:00	9,317	2,6724
08.09.2010 16:00:00	9,253	2,6824
08.09.2010 17:00:00	8,452	3,0496
08.09.2010 18:00:00	10,226	2,2802
08.09.2010 19:00:00	10,659	2,0642
08.09.2010 20:00:00	10,775	2,0145
08.09.2010 21:00:00	11,508	1,6580
08.09.2010 22:00:00	10,529	2,1306
08.09.2010 23:00:00	8,729	2,9713
09.09.2010 00:00:00	9,586	2,5817
09.09.2010 01:00:00	10,134	2,2960
09.09.2010 02:00:00	11,026	1,8817
09.09.2010 03:00:00	11,073	1,8599
09.09.2010 04:00:00	11,326	1,7386
09.09.2010 05:00:00	10,826	1,9726
09.09.2010 06:00:00	11,616	1,6090
09.09.2010 07:00:00	11,820	1,5297
09.09.2010 08:00:00	11,872	1,5097
09.09.2010 09:00:00	11,962	1,4754
09.09.2010 10:00:00	11,411	1,6977
09.09.2010 11:00:00	11,622	1,6034
09.09.2010 12:00:00	12,077	1,4308
09.09.2010 13:00:00	12,781	1,2092
09.09.2010 14:00:00	12,154	1,4069
09.09.2010 15:00:00	11,919	1,4885
09.09.2010 16:00:00	11,156	1,8116
09.09.2010 17:00:00	11,637	1,6028
09.09.2010 18:00:00	11,311	1,7438
09.09.2010 19:00:00	11,839	1,5220
09.09.2010 20:00:00	11,818	1,5305
09.09.2010 21:00:00	12,154	1,4070
09.09.2010 22:00:00	12,021	1,4541
09.09.2010 23:00:00	12,132	1,4145
10.09.2010 00:00:00	11,790	1,5419
10.09.2010 01:00:00	11,330	1,7356
10.09.2010 02:00:00	11,232	1,7824
10.09.2010 03:00:00	11,262	1,7682

10.09.2010 04:00:00	11,517	1,6532
10.09.2010 05:00:00	11,342	1,7297
10.09.2010 06:00:00	11,761	1,5517
10.09.2010 07:00:00	11,843	1,5201
10.09.2010 08:00:00	12,183	1,3958
10.09.2010 09:00:00	12,682	1,2377
10.09.2010 10:00:00	11,871	1,5084
10.09.2010 11:00:00	13,632	0,9968
10.09.2010 12:00:00	12,976	1,1559
10.09.2010 13:00:00	12,599	1,2628
10.09.2010 14:00:00	11,620	1,6085
10.09.2010 15:00:00	11,525	1,6475
10.09.2010 16:00:00	11,833	1,5229
10.09.2010 17:00:00	12,460	1,3044
10.09.2010 18:00:00	12,479	1,2985
10.09.2010 19:00:00	12,270	1,3573
10.09.2010 20:00:00	12,700	1,2340
10.09.2010 21:00:00	13,859	0,9496
10.09.2010 22:00:00	14,689	0,7976
10.09.2010 23:00:00	14,811	0,7780
11.09.2010 00:00:00	14,430	0,8413
11.09.2010 01:00:00	14,018	0,9179
11.09.2010 02:00:00	13,526	1,0215
11.09.2010 03:00:00	12,776	1,2126
11.09.2010 04:00:00	12,907	1,1753
11.09.2010 05:00:00	12,838	1,1946
11.09.2010 06:00:00	11,781	1,5456
11.09.2010 07:00:00	11,353	1,7260
11.09.2010 08:00:00	11,760	1,5525
11.09.2010 09:00:00	11,855	1,5160
11.09.2010 10:00:00	11,166	1,8081
11.09.2010 11:00:00	10,861	1,9654
11.09.2010 12:00:00	10,859	1,9680
11.09.2010 13:00:00	11,017	1,8860
11.09.2010 14:00:00	10,490	2,1602
11.09.2010 15:00:00	9,562	2,6104
11.09.2010 16:00:00	8,957	2,8283
11.09.2010 17:00:00	8,172	3,0790
11.09.2010 18:00:00	7,079	3,4059
11.09.2010 19:00:00	6,569	3,6326
11.09.2010 20:00:00	6,353	3,7004
11.09.2010 21:00:00	6,410	3,6638
11.09.2010 22:00:00	7,859	3,2927
11.09.2010 23:00:00	9,203	2,8055
12.09.2010 00:00:00	9,015	2,7812
12.09.2010 01:00:00	9,440	2,6427
12.09.2010 02:00:00	9,993	2,4610
12.09.2010 03:00:00	8,473	3,1316
12.09.2010 04:00:00	7,748	3,1089

12.09.2010 05:00:00	5,701	3,4707
12.09.2010 06:00:00	4,502	3,6969
12.09.2010 07:00:00	3,898	3,4154
12.09.2010 08:00:00	3,780	3,4529
12.09.2010 09:00:00	3,013	2,9408
12.09.2010 10:00:00	3,444	3,4019
12.09.2010 11:00:00	3,618	2,2510
12.09.2010 12:00:00	4,510	3,4165
12.09.2010 13:00:00	4,859	3,2061
12.09.2010 14:00:00	4,512	2,9365
12.09.2010 15:00:00	4,547	2,8739
12.09.2010 16:00:00	4,629	2,9968
12.09.2010 17:00:00	3,660	2,5882
12.09.2010 18:00:00	2,796	1,7434
12.09.2010 19:00:00	2,042	0,6625
12.09.2010 20:00:00	1,859	0,0179
12.09.2010 21:00:00	1,940	0,3636
12.09.2010 22:00:00	4,907	3,2053
12.09.2010 23:00:00	7,742	2,8925
13.09.2010 00:00:00	8,016	2,9562
13.09.2010 01:00:00	8,046	2,6816
13.09.2010 02:00:00	7,816	2,6855
13.09.2010 03:00:00	5,398	3,0821
13.09.2010 04:00:00	4,437	3,3114
13.09.2010 05:00:00	3,486	2,7736
13.09.2010 06:00:00	2,900	3,1234
13.09.2010 07:00:00	2,728	1,5112
13.09.2010 08:00:00	4,306	2,4855
13.09.2010 09:00:00	4,930	2,5498
13.09.2010 10:00:00	6,114	2,5663
13.09.2010 11:00:00	6,741	2,5710
13.09.2010 12:00:00	6,032	2,5162
13.09.2010 13:00:00	5,601	2,7090
13.09.2010 14:00:00	2,964	3,2138
13.09.2010 15:00:00	2,514	1,6716
13.09.2010 16:00:00	3,412	1,9471
13.09.2010 17:00:00	4,022	1,8447
13.09.2010 18:00:00	2,960	1,6712
13.09.2010 19:00:00	2,483	1,3511
13.09.2010 20:00:00	4,180	1,8241
13.09.2010 21:00:00	3,481	1,8503
13.09.2010 22:00:00	2,386	5,7023
13.09.2010 23:00:00	3,962	3,0827
14.09.2010 00:00:00	5,136	3,3137
14.09.2010 01:00:00	4,526	3,4269
14.09.2010 02:00:00	3,254	2,8735
14.09.2010 03:00:00	2,692	2,2694
14.09.2010 04:00:00	3,450	2,8072
14.09.2010 05:00:00	4,171	3,0517



14.09.2010 06:00:00	5,180	2,9771
14.09.2010 07:00:00	5,775	2,9542
14.09.2010 08:00:00	6,886	3,0390
14.09.2010 09:00:00	7,291	2,9016
14.09.2010 10:00:00	7,577	2,7920
14.09.2010 11:00:00	8,121	2,7253
14.09.2010 12:00:00	5,884	2,9163
14.09.2010 13:00:00	6,453	2,8374
14.09.2010 14:00:00	8,036	2,8126
14.09.2010 15:00:00	8,268	2,8668
14.09.2010 16:00:00	7,330	3,0515
14.09.2010 17:00:00	7,417	2,9818
14.09.2010 18:00:00	7,605	3,0079
14.09.2010 19:00:00	7,545	3,0032
14.09.2010 20:00:00	8,662	2,7161
14.09.2010 21:00:00	8,092	2,8078
14.09.2010 22:00:00	8,304	2,7287
14.09.2010 23:00:00	7,245	3,1939
15.09.2010 00:00:00	7,501	3,1927
15.09.2010 01:00:00	7,227	3,3086
15.09.2010 02:00:00	6,508	3,4201
15.09.2010 03:00:00	6,341	3,3736
15.09.2010 04:00:00	6,308	3,2306
15.09.2010 05:00:00	6,440	3,1919
15.09.2010 06:00:00	6,541	3,0357
15.09.2010 07:00:00	7,181	2,8344
15.09.2010 08:00:00	7,205	2,7923
15.09.2010 09:00:00	7,530	2,7579
15.09.2010 10:00:00	6,572	2,7622
15.09.2010 11:00:00	7,374	2,7789
15.09.2010 12:00:00	7,130	2,8628
15.09.2010 19:00:00	6,270	2,9641
15.09.2010 20:00:00	5,417	3,2017
15.09.2010 21:00:00	5,253	3,4979
15.09.2010 22:00:00	5,665	2,9843
15.09.2010 23:00:00	4,747	2,9706
16.09.2010 00:00:00	4,122	2,6171
16.09.2010 01:00:00	3,884	2,4950
16.09.2010 02:00:00	3,857	2,2783
16.09.2010 03:00:00	3,548	2,2184
16.09.2010 04:00:00	2,681	1,3379
16.09.2010 05:00:00	2,907	1,3469
16.09.2010 06:00:00	2,013	0,5123
16.09.2010 07:00:00	2,064	0,5366
16.09.2010 08:00:00	2,771	1,3430
16.09.2010 09:00:00	3,113	3,3095
16.09.2010 10:00:00	5,251	3,2275
16.09.2010 11:00:00	5,570	3,2137
16.09.2010 12:00:00	5,651	3,1855

16.09.2010 13:00:00	6,793	3,0969
16.09.2010 14:00:00	7,514	2,9868
16.09.2010 15:00:00	7,474	3,1492
16.09.2010 16:00:00	7,746	2,9864
16.09.2010 17:00:00	7,788	2,9555
16.09.2010 18:00:00	8,227	2,8178
16.09.2010 19:00:00	7,582	2,9195
16.09.2010 20:00:00	6,918	3,0819
16.09.2010 21:00:00	7,124	2,9359
16.09.2010 22:00:00	6,949	2,9366
16.09.2010 23:00:00	6,989	2,8175
17.09.2010 00:00:00	7,766	2,7935
17.09.2010 01:00:00	5,975	3,0819
17.09.2010 02:00:00	4,781	3,1523
17.09.2010 03:00:00	4,858	3,1038
17.09.2010 04:00:00	6,462	2,8864
17.09.2010 05:00:00	7,642	2,8892
17.09.2010 06:00:00	7,207	2,8869
17.09.2010 07:00:00	5,507	3,0415
17.09.2010 08:00:00	4,234	3,2064
17.09.2010 09:00:00	5,144	3,2696
17.09.2010 10:00:00	5,008	3,0452
17.09.2010 11:00:00	5,167	3,2118
17.09.2010 12:00:00	4,802	3,1409
17.09.2010 13:00:00	3,676	2,9405
17.09.2010 14:00:00	2,562	2,1045
17.09.2010 15:00:00	1,830	0,0580
17.09.2010 16:00:00	2,958	2,0383
17.09.2010 17:00:00	3,321	2,5435
17.09.2010 18:00:00	2,925	2,1472
17.09.2010 19:00:00	3,607	2,8518
17.09.2010 20:00:00	2,620	2,9982
17.09.2010 21:00:00	2,731	1,8130
17.09.2010 22:00:00	3,653	2,5648
17.09.2010 23:00:00	2,760	2,0509
18.09.2010 00:00:00	1,927	0,7646
18.09.2010 01:00:00	3,138	2,2445
18.09.2010 02:00:00	2,918	2,2236
18.09.2010 03:00:00	3,850	3,0194
18.09.2010 04:00:00	4,194	3,2769
18.09.2010 05:00:00	4,918	3,5600
18.09.2010 06:00:00	5,256	3,6829
18.09.2010 07:00:00	4,945	3,1694
18.09.2010 08:00:00	6,046	3,2222
18.09.2010 09:00:00	6,117	2,9378
18.09.2010 10:00:00	6,702	3,0835
18.09.2010 11:00:00	6,207	3,2336
18.09.2010 12:00:00	5,526	3,2043
18.09.2010 13:00:00	5,975	3,1268

18.09.2010 14:00:00	6,448	3,1733
18.09.2010 15:00:00	7,566	3,0661
18.09.2010 16:00:00	8,460	1,8223
18.09.2010 17:00:00	8,200	0,1065
18.09.2010 18:00:00	11,000	1,2496
18.09.2010 19:00:00	12,134	1,1177
18.09.2010 20:00:00	12,379	1,0528
18.09.2010 21:00:00	11,545	1,2973
18.09.2010 22:00:00	10,978	1,5087
18.09.2010 23:00:00	11,347	1,3661
19.09.2010 00:00:00	11,146	1,4413
19.09.2010 01:00:00	12,025	1,1481
19.09.2010 02:00:00	12,048	1,1411
19.09.2010 03:00:00	12,506	1,0205
19.09.2010 04:00:00	11,860	1,1967
19.09.2010 05:00:00	12,331	1,0642
19.09.2010 06:00:00	11,277	1,3920
19.09.2010 07:00:00	11,433	1,3357
19.09.2010 08:00:00	11,028	1,4877
19.09.2010 09:00:00	11,173	1,4582
19.09.2010 10:00:00	11,381	1,7077
19.09.2010 11:00:00	9,157	2,5496
19.09.2010 12:00:00	7,177	3,0189
19.09.2010 13:00:00	5,573	3,0354
19.09.2010 14:00:00	4,347	2,9945
19.09.2010 15:00:00	4,780	3,2191
19.09.2010 16:00:00	4,996	3,3128
19.09.2010 17:00:00	8,584	2,7922
19.09.2010 18:00:00	9,972	2,3778
19.09.2010 19:00:00	7,647	3,0114
19.09.2010 20:00:00	8,074	2,9058
19.09.2010 21:00:00	6,846	2,9942
19.09.2010 22:00:00	7,353	3,1767
19.09.2010 23:00:00	6,863	3,2592
20.09.2010 00:00:00	6,897	2,9705
20.09.2010 01:00:00	6,149	2,7843
20.09.2010 02:00:00	5,736	2,9893
20.09.2010 03:00:00	3,318	2,9356
20.09.2010 04:00:00	3,196	1,9138
20.09.2010 05:00:00	3,746	4,2474
20.09.2010 06:00:00	3,361	2,5441
20.09.2010 07:00:00	3,319	2,4949
20.09.2010 08:00:00	3,324	2,8240
20.09.2010 09:00:00	2,872	2,0943
20.09.2010 10:00:00	1,901	0,2923
20.09.2010 11:00:00	2,858	3,5539
20.09.2010 12:00:00	2,768	2,4785
20.09.2010 13:00:00	2,753	2,4226
20.09.2010 14:00:00	4,152	3,0333

20.09.2010 15:00:00	5,619	3,0255
20.09.2010 16:00:00	5,820	3,3259
20.09.2010 17:00:00	6,647	3,3176
20.09.2010 18:00:00	6,835	3,4429
20.09.2010 19:00:00	8,934	2,4880
20.09.2010 20:00:00	8,697	2,5752
20.09.2010 21:00:00	8,784	2,6398
20.09.2010 22:00:00	8,243	2,9382
20.09.2010 23:00:00	7,335	3,1489
21.09.2010 00:00:00	5,931	3,2423
21.09.2010 01:00:00	7,297	3,1734
21.09.2010 02:00:00	8,494	2,7878
21.09.2010 03:00:00	8,121	2,8637
21.09.2010 04:00:00	7,445	3,0519
21.09.2010 05:00:00	7,674	3,0050
21.09.2010 06:00:00	8,107	2,8907
21.09.2010 07:00:00	7,159	3,0514
21.09.2010 08:00:00	7,639	2,8505
21.09.2010 09:00:00	7,968	1,3923
21.09.2010 10:00:00	8,042	2,7705
21.09.2010 11:00:00	6,637	3,1366
21.09.2010 12:00:00	3,052	2,4606
21.09.2010 13:00:00	4,874	3,2262
21.09.2010 14:00:00	5,452	3,6437
21.09.2010 15:00:00	7,473	2,8457
21.09.2010 16:00:00	8,430	2,9017
21.09.2010 17:00:00	8,444	2,8675
21.09.2010 18:00:00	9,117	2,6249
21.09.2010 19:00:00	8,373	2,8146
21.09.2010 20:00:00	5,222	3,1101
21.09.2010 21:00:00	3,325	2,6124
21.09.2010 22:00:00	2,234	0,5291
21.09.2010 23:00:00	2,844	4,7066
22.09.2010 00:00:00	5,634	3,0425
22.09.2010 01:00:00	6,201	3,0137
22.09.2010 02:00:00	6,825	2,9710
22.09.2010 03:00:00	6,804	2,9429
22.09.2010 04:00:00	5,862	0,6495
22.09.2010 05:00:00	4,614	1,3004
22.09.2010 06:00:00	4,472	3,5274
22.09.2010 07:00:00	4,793	3,1451
22.09.2010 08:00:00	5,238	3,1430
22.09.2010 09:00:00	5,291	3,1683
22.09.2010 10:00:00	6,170	3,0985
22.09.2010 11:00:00	7,524	2,9258
22.09.2010 12:00:00	8,475	2,7740
22.09.2010 13:00:00	8,307	2,8249
22.09.2010 14:00:00	8,453	2,7851
22.09.2010 15:00:00	8,567	2,7594

22.09.2010 16:00:00	8,254	2,7732
22.09.2010 17:00:00	7,545	2,7835
22.09.2010 18:00:00	7,831	2,7563
22.09.2010 19:00:00	8,045	2,6703
22.09.2010 20:00:00	7,505	2,7374
22.09.2010 21:00:00	7,556	2,7829
22.09.2010 22:00:00	8,832	2,5873
22.09.2010 23:00:00	7,002	3,2142
23.09.2010 00:00:00	6,509	3,3519
23.09.2010 01:00:00	6,792	3,3097
23.09.2010 02:00:00	6,526	3,3264
23.09.2010 03:00:00	5,219	3,4685
23.09.2010 04:00:00	5,036	3,3568
23.09.2010 05:00:00	5,194	3,3566
23.09.2010 06:00:00	5,827	1,3433
23.09.2010 07:00:00	7,643	1,7303
23.09.2010 08:00:00	8,642	2,7020
23.09.2010 09:00:00	9,195	2,6097
23.09.2010 10:00:00	8,697	2,7079
23.09.2010 11:00:00	8,632	2,7206
23.09.2010 12:00:00	8,455	2,7574
23.09.2010 13:00:00	8,012	2,7513
23.09.2010 14:00:00	7,884	2,8368
23.09.2010 15:00:00	8,168	2,8103
23.09.2010 16:00:00	7,690	2,8080
23.09.2010 17:00:00	8,375	2,6252
23.09.2010 18:00:00	8,158	2,7014
23.09.2010 19:00:00	7,825	2,7486
23.09.2010 20:00:00	7,637	2,8482
23.09.2010 21:00:00	7,790	2,8868
23.09.2010 22:00:00	7,814	2,7975
23.09.2010 23:00:00	8,800	2,5913
24.09.2010 00:00:00	7,528	3,0217
24.09.2010 01:00:00	6,382	3,2647
24.09.2010 02:00:00	6,248	3,1841
24.09.2010 03:00:00	5,170	3,3945
24.09.2010 04:00:00	5,523	3,5792
24.09.2010 05:00:00	6,803	3,0770
24.09.2010 06:00:00	7,864	2,8991
24.09.2010 07:00:00	8,432	2,7465
24.09.2010 08:00:00	8,355	2,7672
24.09.2010 09:00:00	7,940	2,8564
24.09.2010 10:00:00	9,627	2,4073
24.09.2010 11:00:00	10,330	2,2190
24.09.2010 12:00:00	9,668	2,4064
24.09.2010 13:00:00	8,037	2,7609
24.09.2010 14:00:00	8,110	2,8167
24.09.2010 15:00:00	8,433	2,7682
24.09.2010 16:00:00	8,650	2,6670

24.09.2010 17:00:00	9,120	1,9938
24.09.2010 18:00:00	4,512	1,4854
24.09.2010 19:00:00	6,338	1,8498
24.09.2010 20:00:00	5,017	3,5584
24.09.2010 21:00:00	4,836	2,2104
24.09.2010 22:00:00	5,190	3,5498
24.09.2010 23:00:00	6,192	3,3825
25.09.2010 00:00:00	6,274	0,0693
25.09.2010 01:00:00	6,604	1,7239
25.09.2010 02:00:00	9,031	2,6666
25.09.2010 03:00:00	9,198	2,6693
25.09.2010 04:00:00	8,642	2,8504
25.09.2010 05:00:00	7,191	3,3112
25.09.2010 06:00:00	6,238	3,3731
25.09.2010 07:00:00	7,321	3,2120
25.09.2010 08:00:00	5,208	3,5753
25.09.2010 09:00:00	5,605	3,3869
25.09.2010 10:00:00	5,317	3,4271
25.09.2010 11:00:00	4,512	3,2681
25.09.2010 12:00:00	7,004	0,4954
25.09.2010 13:00:00	8,039	3,0958
25.09.2010 14:00:00	6,361	0,3736
25.09.2010 15:00:00	8,447	0,0316
25.09.2010 16:00:00	7,662	0,0000
25.09.2010 17:00:00	9,023	1,2471
25.09.2010 18:00:00	8,865	2,9087
25.09.2010 19:00:00	7,687	3,2113
25.09.2010 20:00:00	6,792	3,1719
25.09.2010 21:00:00	7,721	3,0566
25.09.2010 22:00:00	8,370	2,9524
25.09.2010 23:00:00	8,920	2,8404
26.09.2010 00:00:00	7,125	3,4461
26.09.2010 01:00:00	6,932	3,4370
26.09.2010 02:00:00	8,300	3,1248
26.09.2010 03:00:00	9,762	2,6017
26.09.2010 04:00:00	10,133	2,3138
26.09.2010 05:00:00	10,215	2,2305
26.09.2010 06:00:00	7,458	3,2935
26.09.2010 07:00:00	6,974	3,4765
26.09.2010 08:00:00	8,093	3,1417
26.09.2010 09:00:00	6,669	2,9513
26.09.2010 10:00:00	6,799	3,5972
26.09.2010 11:00:00	10,015	2,2625
26.09.2010 12:00:00	7,424	3,1661
26.09.2010 13:00:00	10,105	2,2968
26.09.2010 14:00:00	8,573	3,0275
26.09.2010 15:00:00	9,272	2,7130
26.09.2010 16:00:00	8,768	2,8973
26.09.2010 17:00:00	8,683	2,8761

26.09.2010 18:00:00	9,066	2,7138
26.09.2010 19:00:00	8,339	2,8271
26.09.2010 20:00:00	6,468	2,9670
26.09.2010 21:00:00	6,285	2,9974
26.09.2010 22:00:00	6,598	3,1195
26.09.2010 23:00:00	6,132	3,1528
27.09.2010 00:00:00	6,749	3,1277
27.09.2010 01:00:00	6,603	3,2363
27.09.2010 02:00:00	7,152	2,9363
27.09.2010 03:00:00	7,885	2,9261
27.09.2010 04:00:00	7,142	3,0751
27.09.2010 05:00:00	6,511	3,1685
27.09.2010 06:00:00	5,318	3,5238
27.09.2010 07:00:00	5,258	3,4949
27.09.2010 08:00:00	5,325	3,2685
27.09.2010 09:00:00	5,833	3,2406
27.09.2010 10:00:00	5,659	3,0650
27.09.2010 11:00:00	3,405	1,3647
27.09.2010 12:00:00	3,760	3,5287
27.09.2010 13:00:00	3,332	3,5142
27.09.2010 15:00:00	3,636	3,1215
27.09.2010 16:00:00	3,424	3,2707
27.09.2010 17:00:00	2,735	2,3945
27.09.2010 18:00:00	3,279	2,8131
27.09.2010 19:00:00	3,888	3,1086
27.09.2010 20:00:00	3,644	3,0762
27.09.2010 21:00:00	2,901	2,6327
27.09.2010 22:00:00	2,792	2,4806
27.09.2010 23:00:00	3,859	2,9485
28.09.2010 00:00:00	4,404	2,5802
28.09.2010 01:00:00	4,351	2,5820
28.09.2010 02:00:00	3,518	2,3622
28.09.2010 03:00:00	2,974	0,6783
28.09.2010 04:00:00	3,097	0,8470
28.09.2010 05:00:00	2,217	0,0477
28.09.2010 06:00:00	5,559	2,9971
28.09.2010 07:00:00	6,770	2,8211
28.09.2010 08:00:00	6,613	2,7451
28.09.2010 09:00:00	6,342	2,5740
28.09.2010 10:00:00	6,588	2,7356
28.09.2010 11:00:00	5,969	2,7604
28.09.2010 12:00:00	4,130	2,7738
28.09.2010 13:00:00	2,324	0,3923
28.09.2010 14:00:00	2,692	0,9524
28.09.2010 15:00:00	3,766	2,2618
28.09.2010 16:00:00	2,879	1,2871
28.09.2010 17:00:00	1,939	0,3409
28.09.2010 18:00:00	3,225	2,5027
28.09.2010 19:00:00	3,447	2,7820

28.09.2010 20:00:00	2,207	1,6233
28.09.2010 21:00:00	6,990	2,3811
28.09.2010 22:00:00	7,567	1,6676
28.09.2010 23:00:00	7,499	2,8164
29.09.2010 00:00:00	9,568	2,1878
29.09.2010 01:00:00	9,362	2,2195
29.09.2010 02:00:00	7,252	2,8990
29.09.2010 03:00:00	5,825	2,8647
29.09.2010 04:00:00	5,642	2,9096
29.09.2010 05:00:00	6,866	3,0035
29.09.2010 06:00:00	6,931	3,0498
29.09.2010 07:00:00	6,009	3,1025
29.09.2010 08:00:00	5,884	2,8876
29.09.2010 09:00:00	6,383	2,9193
29.09.2010 10:00:00	7,502	2,8353
29.09.2010 11:00:00	8,356	2,5996
29.09.2010 12:00:00	8,395	2,5992
29.09.2010 13:00:00	8,084	2,6468
29.09.2010 14:00:00	7,418	2,7326
29.09.2010 15:00:00	7,831	2,6398
29.09.2010 16:00:00	7,365	2,5967
29.09.2010 17:00:00	7,347	2,5575
29.09.2010 18:00:00	7,805	2,3850
29.09.2010 19:00:00	7,650	2,1411
29.09.2010 20:00:00	9,394	2,0941
29.09.2010 21:00:00	10,751	1,8463
29.09.2010 22:00:00	7,589	0,6292
29.09.2010 23:00:00	4,876	0,0089
30.09.2010 00:00:00	5,533	1,4174
30.09.2010 01:00:00	6,192	1,7412
30.09.2010 02:00:00	6,229	2,8490
30.09.2010 03:00:00	5,509	2,9191
30.09.2010 04:00:00	4,905	2,8943
30.09.2010 05:00:00	5,013	2,8186
30.09.2010 06:00:00	4,696	2,8475
30.09.2010 07:00:00	4,891	2,7807
30.09.2010 08:00:00	5,373	2,6873
30.09.2010 09:00:00	5,233	2,5289
30.09.2010 10:00:00	4,855	2,4450
30.09.2010 11:00:00	5,001	2,0142
30.09.2010 12:00:00	6,082	2,0752
30.09.2010 13:00:00	5,524	2,0976
30.09.2010 14:00:00	5,501	1,9228
30.09.2010 15:00:00	5,317	1,9862
30.09.2010 16:00:00	5,085	2,0111
30.09.2010 17:00:00	3,735	1,7837
30.09.2010 18:00:00	3,014	1,1227
30.09.2010 19:00:00	3,545	1,8237
30.09.2010 20:00:00	4,241	1,8880



30.09.2010 21:00:00	3,999	1,3573
30.09.2010 22:00:00	2,771	0,2134
30.09.2010 23:00:00	1,674	5,5614
01.10.2010 00:00:00	5,141	2,7716
01.10.2010 01:00:00	5,735	2,9905
01.10.2010 02:00:00	3,697	2,0291
01.10.2010 03:00:00	3,756	2,0719
01.10.2010 04:00:00	3,439	0,9617
01.10.2010 05:00:00	3,152	0,9959
01.10.2010 06:00:00	4,614	2,1231
01.10.2010 07:00:00	3,616	2,7419
01.10.2010 08:00:00	4,970	2,8768
01.10.2010 09:00:00	2,268	1,9061
01.10.2010 10:00:00	2,818	0,5432
01.10.2010 11:00:00	2,952	0,3746
01.10.2010 12:00:00	2,332	0,7504
01.10.2010 13:00:00	5,189	2,6383
01.10.2010 14:00:00	4,656	3,1632
01.10.2010 15:00:00	3,172	1,4179
01.10.2010 16:00:00	3,462	1,7553
01.10.2010 17:00:00	3,300	1,4121
01.10.2010 18:00:00	4,677	1,9765
01.10.2010 19:00:00	3,589	1,8259
01.10.2010 20:00:00	3,942	1,9288
01.10.2010 21:00:00	4,102	2,5908
01.10.2010 22:00:00	2,011	0,2301
01.10.2010 23:00:00	3,919	2,0977
02.10.2010 00:00:00	4,599	2,7997
02.10.2010 01:00:00	3,258	0,1124
02.10.2010 02:00:00	4,451	1,5000
02.10.2010 03:00:00	4,640	0,0391
02.10.2010 04:00:00	5,537	2,1242
02.10.2010 05:00:00	3,937	2,4717
02.10.2010 06:00:00	4,956	2,4910
02.10.2010 07:00:00	6,122	2,2054
02.10.2010 08:00:00	5,790	2,1973
02.10.2010 09:00:00	6,582	2,1600
02.10.2010 10:00:00	7,109	2,1283
02.10.2010 11:00:00	6,983	2,0838
02.10.2010 12:00:00	5,994	2,0477
02.10.2010 13:00:00	5,191	1,9615
02.10.2010 14:00:00	3,497	1,2999
02.10.2010 15:00:00	2,968	1,2832
02.10.2010 16:00:00	3,250	1,9815
02.10.2010 17:00:00	4,154	2,6108
02.10.2010 18:00:00	3,968	2,7371
02.10.2010 19:00:00	4,391	2,7442
02.10.2010 20:00:00	3,700	1,4566
02.10.2010 21:00:00	2,575	0,4510

02.10.2010 22:00:00	3,513	2,1103
02.10.2010 23:00:00	2,923	1,3904
03.10.2010 00:00:00	3,054	1,9117
03.10.2010 01:00:00	3,903	2,4453
03.10.2010 02:00:00	4,073	2,5031
03.10.2010 03:00:00	3,580	2,3458
03.10.2010 04:00:00	4,043	2,2016
03.10.2010 05:00:00	4,952	2,4425
03.10.2010 06:00:00	4,849	2,2829
03.10.2010 07:00:00	3,803	1,5092
03.10.2010 08:00:00	3,103	1,4416
03.10.2010 09:00:00	3,013	1,1539
03.10.2010 10:00:00	3,438	4,6443
03.10.2010 11:00:00	7,173	2,3279
03.10.2010 12:00:00	5,777	2,7587
03.10.2010 13:00:00	7,945	1,7928
03.10.2010 14:00:00	3,565	2,4303
03.10.2010 15:00:00	5,354	0,7218
03.10.2010 16:00:00	3,050	1,4171
03.10.2010 17:00:00	3,294	1,5438
03.10.2010 18:00:00	3,351	2,0691
03.10.2010 19:00:00	2,879	2,8527
03.10.2010 20:00:00	4,776	3,0575
03.10.2010 21:00:00	3,891	2,6279
03.10.2010 22:00:00	3,183	1,9475
03.10.2010 23:00:00	2,035	0,9409
04.10.2010 00:00:00	5,117	3,2154
04.10.2010 01:00:00	7,294	2,7689
04.10.2010 02:00:00	7,547	0,5512
04.10.2010 03:00:00	5,423	0,9087
04.10.2010 04:00:00	4,417	2,9881
04.10.2010 05:00:00	3,994	1,4615
04.10.2010 06:00:00	2,866	2,5428
04.10.2010 07:00:00	4,292	1,9351
04.10.2010 08:00:00	4,818	2,9710
04.10.2010 09:00:00	4,121	3,1084
04.10.2010 10:00:00	3,657	2,9044
04.10.2010 11:00:00	3,786	2,9533
04.10.2010 12:00:00	4,009	2,6644
04.10.2010 13:00:00	3,663	2,1855
04.10.2010 14:00:00	5,767	2,6418
04.10.2010 15:00:00	7,827	1,6874
04.10.2010 16:00:00	7,957	2,6565
04.10.2010 17:00:00	7,903	2,7948
04.10.2010 18:00:00	7,490	2,9713
04.10.2010 19:00:00	8,128	2,5488
04.10.2010 20:00:00	6,352	1,0555
04.10.2010 21:00:00	5,982	3,0720
04.10.2010 22:00:00	8,268	2,6390

04.10.2010 23:00:00	7,585	0,0223
05.10.2010 00:00:00	6,156	1,6629
05.10.2010 01:00:00	4,739	2,8744
05.10.2010 02:00:00	4,612	3,0618
05.10.2010 03:00:00	4,028	2,9981
05.10.2010 04:00:00	3,937	2,8504
05.10.2010 05:00:00	6,092	3,2489
05.10.2010 06:00:00	7,316	2,7275
05.10.2010 07:00:00	7,925	2,5836
05.10.2010 08:00:00	7,770	2,6513
05.10.2010 09:00:00	7,494	2,6554
05.10.2010 10:00:00	6,728	2,7147
05.10.2010 11:00:00	4,970	2,4436
05.10.2010 12:00:00	2,687	1,5893
05.10.2010 13:00:00	2,309	0,0443
05.10.2010 14:00:00	3,787	4,0604
05.10.2010 15:00:00	6,085	2,5726
05.10.2010 16:00:00	7,669	1,7802
05.10.2010 17:00:00	8,517	1,4182
05.10.2010 18:00:00	9,301	1,2030
05.10.2010 19:00:00	8,416	1,3683
05.10.2010 20:00:00	6,823	2,3782
05.10.2010 21:00:00	4,145	2,9423
05.10.2010 22:00:00	4,828	3,5537
05.10.2010 23:00:00	5,538	3,1569
06.10.2010 00:00:00	5,286	3,1835
06.10.2010 01:00:00	6,812	3,0224
06.10.2010 02:00:00	7,496	2,9349
06.10.2010 03:00:00	8,585	2,4358
06.10.2010 04:00:00	8,527	2,3667
06.10.2010 05:00:00	7,818	2,6616
06.10.2010 06:00:00	7,043	2,8400
06.10.2010 07:00:00	7,168	2,6822
06.10.2010 08:00:00	6,888	2,6267
06.10.2010 09:00:00	5,953	2,5852
06.10.2010 10:00:00	6,867	2,6583
06.10.2010 11:00:00	7,237	2,6225
06.10.2010 12:00:00	7,052	2,5641
06.10.2010 13:00:00	5,969	2,8439
06.10.2010 14:00:00	5,493	2,6555
06.10.2010 15:00:00	5,648	2,9149
06.10.2010 16:00:00	5,033	2,7961
06.10.2010 17:00:00	5,104	2,9759
06.10.2010 18:00:00	6,678	2,9729
06.10.2010 19:00:00	6,790	3,0210
06.10.2010 20:00:00	5,885	1,5850
06.10.2010 21:00:00	8,623	2,0678
06.10.2010 22:00:00	6,815	0,5379
06.10.2010 23:00:00	6,756	2,4166

07.10.2010 00:00:00	8,599	1,4130
07.10.2010 01:00:00	8,313	2,4792
07.10.2010 02:00:00	7,405	3,0213
07.10.2010 03:00:00	7,437	2,9171
07.10.2010 04:00:00	7,813	2,3849
07.10.2010 05:00:00	9,722	1,7329
07.10.2010 06:00:00	9,946	1,5734
07.10.2010 07:00:00	10,323	1,3922
07.10.2010 08:00:00	9,413	1,6242
07.10.2010 09:00:00	9,433	1,3318
07.10.2010 10:00:00	9,526	1,9525
07.10.2010 11:00:00	5,921	0,1448
07.10.2010 12:00:00	11,449	0,8534
07.10.2010 13:00:00	12,067	0,8575
07.10.2010 14:00:00	10,241	1,3973
07.10.2010 15:00:00	10,986	1,0099
07.10.2010 16:00:00	11,318	1,4448
07.10.2010 17:00:00	10,574	1,3495
07.10.2010 18:00:00	10,091	0,7605
07.10.2010 19:00:00	9,896	1,4830
07.10.2010 20:00:00	9,490	0,5403
07.10.2010 21:00:00	10,467	1,1884
07.10.2010 22:00:00	9,317	1,9414
07.10.2010 23:00:00	8,457	2,4028
08.10.2010 00:00:00	8,489	2,4500
08.10.2010 01:00:00	8,373	2,4769
08.10.2010 02:00:00	8,037	2,5334
08.10.2010 03:00:00	4,857	3,3463
08.10.2010 04:00:00	2,210	2,3948
08.10.2010 05:00:00	2,638	0,8070
08.10.2010 06:00:00	2,703	1,9244
08.10.2010 07:00:00	3,132	2,0588
08.10.2010 08:00:00	2,548	0,8137
08.10.2010 09:00:00	4,682	3,3629
08.10.2010 10:00:00	6,245	2,8351
08.10.2010 11:00:00	6,701	2,4843
08.10.2010 12:00:00	7,159	2,3643
08.10.2010 13:00:00	6,402	2,4195
08.10.2010 14:00:00	5,904	2,4009
08.10.2010 15:00:00	5,091	2,3646
08.10.2010 16:00:00	3,772	2,0983
08.10.2010 17:00:00	3,179	1,6956
08.10.2010 18:00:00	2,529	1,8729
08.10.2010 19:00:00	6,344	2,5132
08.10.2010 20:00:00	6,625	2,4480
08.10.2010 21:00:00	7,143	2,4612
08.10.2010 22:00:00	5,788	2,8850
08.10.2010 23:00:00	4,774	3,1297
09.10.2010 00:00:00	2,673	0,9825

09.10.2010 01:00:00	2,822	1,7343
09.10.2010 02:00:00	5,448	3,2463
09.10.2010 03:00:00	6,788	2,9689
09.10.2010 04:00:00	6,681	3,0328
09.10.2010 05:00:00	6,841	2,8580
09.10.2010 06:00:00	6,673	2,6319
09.10.2010 07:00:00	5,691	2,4027
09.10.2010 08:00:00	3,841	1,8511
09.10.2010 09:00:00	2,540	1,0252
09.10.2010 10:00:00	2,197	0,9183
09.10.2010 11:00:00	4,136	2,5241
09.10.2010 12:00:00	5,291	2,1302
09.10.2010 13:00:00	5,088	2,1246
09.10.2010 14:00:00	5,796	1,5950
09.10.2010 15:00:00	6,661	2,2788
09.10.2010 16:00:00	4,613	2,7039
09.10.2010 17:00:00	5,112	2,5459
09.10.2010 18:00:00	5,244	2,3844
09.10.2010 19:00:00	4,029	2,2052
09.10.2010 20:00:00	2,806	2,0177
09.10.2010 21:00:00	3,068	2,4611
09.10.2010 22:00:00	3,394	2,8018
09.10.2010 23:00:00	3,977	3,1878
10.10.2010 00:00:00	4,246	3,0551
10.10.2010 01:00:00	4,014	2,9053
10.10.2010 02:00:00	3,990	3,0432
10.10.2010 03:00:00	4,270	3,2103
10.10.2010 04:00:00	3,829	2,8561
10.10.2010 05:00:00	3,168	2,7202
10.10.2010 06:00:00	3,245	1,9864
10.10.2010 07:00:00	3,547	2,3732
10.10.2010 08:00:00	4,694	2,4158
10.10.2010 09:00:00	3,145	2,9011
10.10.2010 10:00:00	2,826	1,2660
10.10.2010 11:00:00	2,642	0,8379
10.10.2010 12:00:00	3,358	2,5514
10.10.2010 13:00:00	2,748	2,1421
10.10.2010 14:00:00	4,011	3,0072
10.10.2010 15:00:00	5,426	2,9693
10.10.2010 16:00:00	6,861	2,7998
10.10.2010 17:00:00	6,877	2,7997
10.10.2010 18:00:00	7,137	2,7801
10.10.2010 19:00:00	7,393	2,6405
10.10.2010 20:00:00	5,687	2,9812
10.10.2010 21:00:00	3,257	2,0835
10.10.2010 22:00:00	3,307	2,1754
10.10.2010 23:00:00	3,228	2,0603
11.10.2010 00:00:00	2,896	1,8857
11.10.2010 01:00:00	4,399	2,7720

11.10.2010 02:00:00	4,240	2,5861
11.10.2010 03:00:00	4,895	2,7885
11.10.2010 04:00:00	5,172	2,7831
11.10.2010 05:00:00	5,167	2,6762
11.10.2010 06:00:00	4,533	2,6832
11.10.2010 07:00:00	2,787	2,5915
11.10.2010 08:00:00	3,784	2,4323
11.10.2010 09:00:00	6,829	3,2357
11.10.2010 10:00:00	6,193	3,0802
11.10.2010 11:00:00	3,700	3,1718
11.10.2010 12:00:00	3,525	2,1518
11.10.2010 13:00:00	4,286	2,4686
11.10.2010 14:00:00	5,950	2,4592
11.10.2010 15:00:00	7,066	2,3598
11.10.2010 16:00:00	7,043	2,3220
11.10.2010 17:00:00	6,851	2,3256
11.10.2010 18:00:00	6,725	2,3957
11.10.2010 19:00:00	7,271	2,3460
11.10.2010 20:00:00	7,002	2,5273
11.10.2010 21:00:00	8,219	2,4008
11.10.2010 22:00:00	8,885	2,2134
11.10.2010 23:00:00	8,291	2,3185
12.10.2010 00:00:00	8,310	1,1239
12.10.2010 01:00:00	4,407	0,6530
12.10.2010 02:00:00	4,352	3,1300
12.10.2010 03:00:00	4,383	3,2494
12.10.2010 04:00:00	4,160	3,3107
12.10.2010 05:00:00	3,927	3,0618
12.10.2010 06:00:00	3,140	3,1299
12.10.2010 07:00:00	6,872	0,0107
12.10.2010 08:00:00	7,253	2,1347
12.10.2010 09:00:00	6,467	3,0148
12.10.2010 10:00:00	6,246	3,1077
12.10.2010 11:00:00	6,116	3,0940
12.10.2010 12:00:00	6,189	3,0060
12.10.2010 13:00:00	6,676	3,0492
12.10.2010 14:00:00	6,630	2,9844
12.10.2010 15:00:00	6,493	3,1713
12.10.2010 16:00:00	7,346	2,6707
12.10.2010 17:00:00	7,203	2,9077
12.10.2010 18:00:00	8,018	2,6432
12.10.2010 19:00:00	8,956	2,4767
12.10.2010 20:00:00	10,298	2,1297
12.10.2010 21:00:00	9,700	2,3461
12.10.2010 22:00:00	10,520	2,0808
12.10.2010 23:00:00	10,415	2,1067
13.10.2010 00:00:00	9,665	2,2953
13.10.2010 01:00:00	8,997	2,4723
13.10.2010 02:00:00	9,864	2,2775

13.10.2010 03:00:00	8,818	2,5527
13.10.2010 04:00:00	8,318	2,6930
13.10.2010 05:00:00	8,179	2,8457
13.10.2010 06:00:00	8,879	2,6497
13.10.2010 07:00:00	10,408	2,1315
13.10.2010 08:00:00	9,420	2,4759
13.10.2010 09:00:00	9,068	2,5788
13.10.2010 10:00:00	10,156	2,1903
13.10.2010 11:00:00	10,367	2,1212
13.10.2010 12:00:00	10,016	2,2718
13.10.2010 13:00:00	9,806	2,3427
13.10.2010 14:00:00	10,043	2,2475
13.10.2010 15:00:00	9,938	2,2909
13.10.2010 16:00:00	10,558	2,0342
13.10.2010 17:00:00	9,830	2,1227
13.10.2010 18:00:00	8,996	2,1771
13.10.2010 19:00:00	7,614	1,4505
13.10.2010 20:00:00	7,136	2,8638
13.10.2010 21:00:00	7,774	2,9699
13.10.2010 22:00:00	7,835	3,0042
13.10.2010 23:00:00	9,342	1,9965
14.10.2010 00:00:00	9,402	1,7629
14.10.2010 01:00:00	7,149	3,0119
14.10.2010 02:00:00	7,926	2,6843
14.10.2010 03:00:00	8,239	2,8614
14.10.2010 04:00:00	9,108	2,5905
14.10.2010 05:00:00	9,231	2,5443
14.10.2010 06:00:00	9,697	2,4215
14.10.2010 07:00:00	9,759	2,1673
14.10.2010 08:00:00	8,215	2,9114
14.10.2010 09:00:00	7,341	3,1835
14.10.2010 10:00:00	8,419	2,7183
14.10.2010 11:00:00	7,903	2,9023
14.10.2010 12:00:00	8,235	2,7125
14.10.2010 13:00:00	8,713	2,5161
14.10.2010 14:00:00	8,826	2,3704
14.10.2010 15:00:00	8,705	2,7364
14.10.2010 16:00:00	9,207	2,2203
14.10.2010 17:00:00	9,491	2,0282
14.10.2010 18:00:00	8,929	2,2847
14.10.2010 19:00:00	7,836	2,8575
14.10.2010 20:00:00	7,597	2,8351
14.10.2010 21:00:00	8,903	2,0955
14.10.2010 22:00:00	10,340	1,3670
14.10.2010 23:00:00	10,744	1,2462
15.10.2010 00:00:00	9,291	1,8921
15.10.2010 01:00:00	8,887	2,2295
15.10.2010 02:00:00	9,346	1,8682
15.10.2010 03:00:00	4,903	1,8445

15.10.2010 04:00:00	5,266	3,3846
15.10.2010 05:00:00	4,608	3,2870
15.10.2010 06:00:00	5,882	3,3100
15.10.2010 07:00:00	6,485	3,2836
15.10.2010 08:00:00	7,425	2,2019
15.10.2010 09:00:00	7,332	1,1086
15.10.2010 10:00:00	8,854	2,1100
15.10.2010 11:00:00	8,589	2,3638
15.10.2010 12:00:00	6,654	3,1254
15.10.2010 18:00:00	6,070	3,0145
15.10.2010 18:00:29	5,208	3,1487
15.10.2010 19:00:00	5,247	2,8572
15.10.2010 20:00:00	5,374	2,8076
15.10.2010 21:00:00	5,630	2,8479
15.10.2010 22:00:00	7,187	2,4303
15.10.2010 23:00:00	5,834	2,5303
16.10.2010 00:00:00	7,396	2,3530
16.10.2010 01:00:00	8,474	2,2988
16.10.2010 02:00:00	8,514	2,2029
16.10.2010 03:00:00	7,146	2,7304
16.10.2010 04:00:00	7,491	2,6610
16.10.2010 05:00:00	7,620	2,3788
16.10.2010 06:00:00	6,214	2,2107
16.10.2010 07:00:00	5,668	2,1863
16.10.2010 08:00:00	6,613	2,2552
16.10.2010 09:00:00	5,680	2,2987
16.10.2010 10:00:00	5,544	2,4348
16.10.2010 11:00:00	4,887	2,9180
16.10.2010 12:00:00	5,285	3,1771
16.10.2010 13:00:00	5,681	3,1325
16.10.2010 14:00:00	5,450	3,2667
16.10.2010 15:00:00	5,202	3,3592
16.10.2010 16:00:00	3,993	3,3906
16.10.2010 17:00:00	4,047	3,0829
16.10.2010 18:00:00	4,296	2,9828
16.10.2010 19:00:00	5,519	2,7274
16.10.2010 20:00:00	5,139	2,3752
16.10.2010 21:00:00	5,104	2,7605
16.10.2010 22:00:00	2,857	1,2927
16.10.2010 23:00:00	3,839	1,8893
17.10.2010 00:00:00	3,947	1,9072
17.10.2010 01:00:00	3,033	1,7621
17.10.2010 02:00:00	3,595	2,4452
17.10.2010 03:00:00	5,217	2,2046
17.10.2010 04:00:00	6,467	2,3842
17.10.2010 05:00:00	7,283	2,4533
17.10.2010 06:00:00	6,662	2,3622
17.10.2010 07:00:00	5,147	2,4472
17.10.2010 08:00:00	4,518	2,3516



17.10.2010 09:00:00	2,683	0,7582
17.10.2010 10:00:00	2,274	0,7201
17.10.2010 11:00:00	2,400	0,9513
17.10.2010 12:00:00	2,502	2,5469
17.10.2010 13:00:00	3,021	3,3447
17.10.2010 14:00:00	7,227	2,9100
17.10.2010 15:00:00	7,013	2,7338
17.10.2010 16:00:00	6,731	2,6067
17.10.2010 17:00:00	7,410	2,3984
17.10.2010 18:00:00	8,525	2,2665
17.10.2010 19:00:00	7,835	2,5266
17.10.2010 20:00:00	6,989	2,5166
17.10.2010 21:00:00	6,352	2,6238
17.10.2010 22:00:00	6,967	2,5710
17.10.2010 23:00:00	6,046	2,5755
18.10.2010 00:00:00	6,068	2,4486
18.10.2010 01:00:00	4,492	2,5839
18.10.2010 02:00:00	4,491	2,7704
18.10.2010 03:00:00	5,168	2,3914
18.10.2010 04:00:00	2,815	3,6714
18.10.2010 05:00:00	3,258	1,8322
18.10.2010 06:00:00	2,098	0,4272
18.10.2010 07:00:00	2,687	1,8071
18.10.2010 08:00:00	2,633	2,1209
18.10.2010 09:00:00	2,401	1,6400
18.10.2010 10:00:00	2,779	2,9350
18.10.2010 11:00:00	6,823	3,2974
18.10.2010 12:00:00	8,197	2,5040
18.10.2010 13:00:00	7,457	2,7304
18.10.2010 14:00:00	7,722	2,7243
18.10.2010 15:00:00	7,450	2,8102
18.10.2010 16:00:00	7,312	2,7251
18.10.2010 17:00:00	8,134	2,5811
18.10.2010 18:00:00	7,164	2,8797
18.10.2010 19:00:00	5,516	2,9621
18.10.2010 20:00:00	6,114	3,1430
18.10.2010 21:00:00	6,500	2,9817
18.10.2010 22:00:00	5,667	2,8066
18.10.2010 23:00:00	4,322	2,8382
19.10.2010 00:00:00	4,202	2,5278
19.10.2010 01:00:00	4,649	1,8325
19.10.2010 02:00:00	4,344	2,2375
19.10.2010 03:00:00	3,494	2,4571
19.10.2010 04:00:00	3,514	2,4436
19.10.2010 05:00:00	2,713	1,9618
19.10.2010 06:00:00	3,946	3,4989
19.10.2010 07:00:00	5,261	3,1442
19.10.2010 08:00:00	5,074	3,2451
19.10.2010 09:00:00	3,648	2,7220

19.10.2010 10:00:00	4,875	3,3533
19.10.2010 11:00:00	5,478	2,9334
19.10.2010 12:00:00	4,142	2,3498
19.10.2010 13:00:00	3,568	1,7245
19.10.2010 14:00:00	3,878	1,7279
19.10.2010 15:00:00	2,575	1,1307
19.10.2010 16:00:00	2,591	8,4894
19.10.2010 17:00:00	5,889	2,6245
19.10.2010 18:00:00	7,175	2,4670
19.10.2010 19:00:00	8,404	2,4602
19.10.2010 20:00:00	8,709	2,3792
19.10.2010 21:00:00	8,862	2,1543
19.10.2010 22:00:00	10,675	1,2213
19.10.2010 23:00:00	10,170	1,4341
20.10.2010 00:00:00	10,563	1,2801
20.10.2010 01:00:00	10,056	1,5768
20.10.2010 02:00:00	4,415	3,8913
20.10.2010 03:00:00	5,275	2,9888
20.10.2010 04:00:00	4,642	2,9779
20.10.2010 05:00:00	4,271	3,0566
20.10.2010 06:00:00	5,380	3,0519
20.10.2010 07:00:00	5,464	3,1544
20.10.2010 08:00:00	5,738	3,0750
20.10.2010 09:00:00	7,245	2,8854
20.10.2010 10:00:00	8,158	2,4478
20.10.2010 11:00:00	9,360	1,9135
20.10.2010 12:00:00	10,684	1,2508
20.10.2010 13:00:00	9,630	1,8821
20.10.2010 14:00:00	8,241	2,4252
20.10.2010 15:00:00	9,016	2,1955
20.10.2010 16:00:00	10,248	1,5256
20.10.2010 17:00:00	9,892	1,6819
20.10.2010 18:00:00	5,595	3,4677
20.10.2010 19:00:00	4,076	2,9925
20.10.2010 20:00:00	4,962	3,1230
20.10.2010 21:00:00	6,269	2,7941
20.10.2010 22:00:00	2,051	0,4996
20.10.2010 23:00:00	5,192	3,2406
21.10.2010 00:00:00	8,156	2,4359
21.10.2010 01:00:00	6,425	2,9093
21.10.2010 02:00:00	7,082	3,1333
21.10.2010 03:00:00	8,495	2,2746
21.10.2010 04:00:00	9,733	1,6535
21.10.2010 05:00:00	9,521	1,7749
21.10.2010 06:00:00	8,799	2,1287
21.10.2010 07:00:00	9,872	1,5460
21.10.2010 08:00:00	9,765	1,6211
21.10.2010 09:00:00	10,574	1,3077
21.10.2010 10:00:00	10,180	1,5046

21.10.2010 11:00:00	9,674	1,6559
21.10.2010 12:00:00	9,712	1,6427
21.10.2010 13:00:00	9,901	1,5161
21.10.2010 14:00:00	9,229	1,8878
21.10.2010 15:00:00	8,794	2,0900
21.10.2010 16:00:00	8,175	2,7240
21.10.2010 17:00:00	8,270	2,6692
21.10.2010 18:00:00	7,217	3,0673
21.10.2010 19:00:00	6,712	3,1095
21.10.2010 20:00:00	5,412	3,1993
21.10.2010 21:00:00	6,566	3,1034
21.10.2010 22:00:00	6,982	3,0878
21.10.2010 23:00:00	7,614	2,8993
22.10.2010 00:00:00	7,387	3,0621
22.10.2010 01:00:00	7,697	3,0303
22.10.2010 02:00:00	9,004	2,0998
22.10.2010 03:00:00	8,598	2,3608
22.10.2010 04:00:00	7,255	1,7513
22.10.2010 05:00:00	7,287	2,4885
22.10.2010 06:00:00	7,319	3,0635
22.10.2010 07:00:00	6,950	3,1340
22.10.2010 08:00:00	7,104	1,6395
22.10.2010 09:00:00	8,162	2,4542
22.10.2010 10:00:00	7,321	2,6887
22.10.2010 11:00:00	5,756	2,7650
22.10.2010 12:00:00	5,018	2,7287
22.10.2010 13:00:00	4,854	2,7540
22.10.2010 14:00:00	4,206	2,8275
22.10.2010 15:00:00	3,441	2,2425
22.10.2010 16:00:00	3,035	2,3362
22.10.2010 17:00:00	3,101	2,1101
22.10.2010 18:00:00	3,367	2,0706
22.10.2010 19:00:00	3,772	2,1963
22.10.2010 20:00:00	4,260	2,7793
22.10.2010 21:00:00	4,634	2,6679
22.10.2010 22:00:00	4,378	2,3191
22.10.2010 23:00:00	3,412	2,3610
23.10.2010 00:00:00	3,032	1,1638
23.10.2010 01:00:00	3,063	2,0605
23.10.2010 02:00:00	2,737	0,4102
23.10.2010 03:00:00	2,527	0,4894
23.10.2010 04:00:00	1,965	0,0437
23.10.2010 05:00:00	2,279	2,2971
23.10.2010 06:00:00	3,209	1,9710
23.10.2010 07:00:00	3,699	2,3644
23.10.2010 08:00:00	4,233	2,7351
23.10.2010 09:00:00	3,188	1,9346
23.10.2010 10:00:00	2,160	0,2673
23.10.2010 11:00:00	2,623	1,7409

23.10.2010 12:00:00	3,901	2,5035
23.10.2010 13:00:00	4,339	2,7303
23.10.2010 14:00:00	4,700	2,8387
23.10.2010 15:00:00	5,337	2,7543
23.10.2010 16:00:00	5,351	2,8687
23.10.2010 17:00:00	4,382	2,9294
23.10.2010 18:00:00	4,036	2,4473
23.10.2010 19:00:00	2,720	0,0089
23.10.2010 20:00:00	2,840	1,5312
23.10.2010 21:00:00	3,236	0,5751
23.10.2010 22:00:00	3,905	3,6855
23.10.2010 23:00:00	6,356	3,2430
24.10.2010 00:00:00	6,111	2,9373
24.10.2010 01:00:00	6,475	2,8181
24.10.2010 02:00:00	5,531	3,0047
24.10.2010 03:00:00	4,353	2,7650
24.10.2010 04:00:00	4,881	2,8542
24.10.2010 05:00:00	4,882	2,8777
24.10.2010 06:00:00	6,005	2,9481
24.10.2010 07:00:00	6,540	2,9028
24.10.2010 08:00:00	6,805	2,9082
24.10.2010 09:00:00	7,466	2,8077
24.10.2010 10:00:00	6,561	2,9032
24.10.2010 11:00:00	5,570	2,8056
24.10.2010 12:00:00	6,143	2,7971
24.10.2010 13:00:00	6,469	2,6363
24.10.2010 14:00:00	6,278	2,8715
24.10.2010 15:00:00	4,663	3,3710
24.10.2010 16:00:00	6,511	3,3373
24.10.2010 17:00:00	6,497	3,3206
24.10.2010 18:00:00	5,827	3,3036
24.10.2010 18:00:48	6,015	3,4379
24.10.2010 19:00:00	6,268	3,3087
24.10.2010 20:00:00	6,782	3,2316
24.10.2010 21:00:00	7,203	3,1414
24.10.2010 22:00:00	8,198	2,6315
24.10.2010 23:00:00	6,881	2,9672
25.10.2010 00:00:00	6,818	2,8538
25.10.2010 01:00:00	8,295	2,4090
25.10.2010 02:00:00	8,108	2,4276
25.10.2010 03:00:00	6,636	2,9190
25.10.2010 04:00:00	6,755	2,7456
25.10.2010 05:00:00	6,636	2,8676
25.10.2010 06:00:00	7,794	2,5964
25.10.2010 07:00:00	6,933	2,7384
25.10.2010 08:00:00	6,160	2,6816
25.10.2010 09:00:00	6,206	2,7054
25.10.2010 10:00:00	7,423	1,7039
25.10.2010 11:00:00	7,422	2,7613

25.10.2010 12:00:00	5,848	2,9521
25.10.2010 13:00:00	5,286	2,8751
25.10.2010 14:00:00	5,612	2,8784
25.10.2010 15:00:00	5,437	3,3201
25.10.2010 16:00:00	5,594	3,3155
25.10.2010 17:00:00	4,933	3,4763
25.10.2010 18:00:00	5,479	3,2484
25.10.2010 19:00:00	5,575	3,3465
25.10.2010 20:00:00	6,703	3,1840
25.10.2010 21:00:00	7,465	2,8874
25.10.2010 22:00:00	8,063	2,5980
25.10.2010 23:00:00	8,967	1,9579
26.10.2010 00:00:00	8,651	2,2553
26.10.2010 01:00:00	7,786	2,6975
26.10.2010 02:00:00	8,064	2,5546
26.10.2010 03:00:00	8,089	2,5536
26.10.2010 04:00:00	7,808	2,6397
26.10.2010 05:00:00	7,324	2,7386
26.10.2010 06:00:00	7,798	2,6988
26.10.2010 07:00:00	8,698	2,2907
26.10.2010 08:00:00	8,513	2,4578
26.10.2010 09:00:00	8,230	2,5417
26.10.2010 10:00:00	8,347	2,5160
26.10.2010 11:00:00	8,294	2,4913
26.10.2010 12:00:00	9,381	1,8249
26.10.2010 13:00:00	8,730	2,2595
26.10.2010 14:00:00	9,228	1,8792
26.10.2010 15:00:00	9,566	1,7090
26.10.2010 16:00:00	9,805	1,5516
26.10.2010 17:00:00	9,373	1,7864
26.10.2010 18:00:00	8,992	1,9480
26.10.2010 19:00:00	8,121	2,7212
26.10.2010 20:00:00	7,737	1,1971
26.10.2010 21:00:00	7,798	0,0908
26.10.2010 22:00:00	8,919	2,0303
26.10.2010 23:00:00	9,379	1,7124
27.10.2010 00:00:00	10,971	1,0916
27.10.2010 01:00:00	10,691	1,1924
27.10.2010 02:00:00	11,138	1,0422
27.10.2010 03:00:00	11,588	0,9293
27.10.2010 04:00:00	10,867	1,1250
27.10.2010 05:00:00	7,278	2,7640
27.10.2010 06:00:00	5,779	3,4365
27.10.2010 07:00:00	2,820	2,1503
27.10.2010 08:00:00	4,423	3,2875
27.10.2010 09:00:00	5,073	2,2005
27.10.2010 10:00:00	3,497	1,8398
27.10.2010 11:00:00	4,134	2,2616
27.10.2010 12:00:00	4,856	2,4679

27.10.2010 13:00:00	4,838	2,5014
27.10.2010 14:00:00	3,427	1,1907
27.10.2010 15:00:00	3,379	2,6198
27.10.2010 16:00:00	2,380	0,7067
27.10.2010 16:00:05	2,414	0,1368
27.10.2010 16:00:07	3,737	2,0112
27.10.2010 16:00:23	3,962	2,0708
27.10.2010 17:00:00	5,503	2,6722
27.10.2010 18:00:00	5,601	2,6196
27.10.2010 19:00:00	6,078	2,5425
27.10.2010 20:00:00	5,627	2,6283
27.10.2010 21:00:00	4,764	2,4966
27.10.2010 22:00:00	3,908	2,5859
27.10.2010 23:00:00	4,145	2,5420
28.10.2010 00:00:00	4,373	2,3674
28.10.2010 01:00:00	3,580	2,1755
28.10.2010 02:00:00	2,508	1,6547
28.10.2010 03:00:00	3,948	2,6901
28.10.2010 04:00:00	3,960	2,7801
28.10.2010 05:00:00	5,671	3,0411
28.10.2010 06:00:00	6,312	3,1791
28.10.2010 07:00:00	6,718	3,0674
28.10.2010 08:00:00	6,168	3,1610
28.10.2010 09:00:00	7,113	2,8251
28.10.2010 10:00:00	6,708	2,8623
28.10.2010 11:00:00	5,890	2,4856
28.10.2010 11:00:45	5,713	2,4364
28.10.2010 12:00:00	5,205	2,4681
28.10.2010 13:00:00	4,470	2,2913
28.10.2010 14:00:00	3,532	1,9173
28.10.2010 15:00:00	3,424	1,7346
28.10.2010 16:00:00	4,314	2,1747
28.10.2010 17:00:00	4,651	1,8811
28.10.2010 18:00:00	2,434	3,2164
28.10.2010 19:00:00	2,563	0,6849
28.10.2010 20:00:00	3,172	1,2842
28.10.2010 21:00:00	3,280	2,2565
28.10.2010 22:00:00	5,778	2,9926
28.10.2010 23:00:00	7,276	2,9809
29.10.2010 00:00:00	7,890	2,6447
29.10.2010 01:00:00	7,170	2,9559
29.10.2010 02:00:00	7,543	2,8260
29.10.2010 03:00:00	8,261	2,6195
29.10.2010 04:00:00	7,162	2,8872
29.10.2010 05:00:00	7,213	2,9260
29.10.2010 06:00:00	6,964	3,1790
29.10.2010 07:00:00	6,946	2,8836
29.10.2010 08:00:00	8,424	2,4239
29.10.2010 09:00:00	7,679	2,7860

29.10.2010 10:00:00	7,957	1,0406
29.10.2010 11:00:00	8,769	2,1064
29.10.2010 12:00:00	8,116	2,6406
29.10.2010 13:00:00	9,812	1,5305
29.10.2010 14:00:00	8,604	2,1468
29.10.2010 15:00:00	6,404	3,6417
29.10.2010 16:00:00	6,667	3,3548
29.10.2010 17:00:00	6,681	3,1367
29.10.2010 18:00:00	7,301	2,9379
29.10.2010 19:00:00	7,742	2,7963
29.10.2010 20:00:00	7,201	2,9916
29.10.2010 21:00:00	7,115	3,0531
29.10.2010 22:00:00	6,849	3,0864
29.10.2010 23:00:00	6,722	3,3732
30.10.2010 00:00:00	7,066	3,1661
30.10.2010 01:00:00	4,561	3,3625
30.10.2010 02:00:00	4,931	3,4431
30.10.2010 03:00:00	5,624	3,6089
30.10.2010 04:00:00	6,705	3,2436
30.10.2010 05:00:00	7,364	2,9246
30.10.2010 06:00:00	7,064	3,0862
30.10.2010 07:00:00	5,203	3,2299
30.10.2010 08:00:00	4,758	2,9595
30.10.2010 09:00:00	3,046	2,1595
30.10.2010 10:00:00	2,083	7,7196
30.10.2010 11:00:00	1,815	2,7298
30.10.2010 12:00:00	2,733	1,6276
30.10.2010 13:00:00	3,831	2,7818
30.10.2010 14:00:00	3,766	3,1135
30.10.2010 15:00:00	3,450	2,3707
30.10.2010 16:00:00	2,026	1,4658
30.10.2010 17:00:00	2,497	1,4522
30.10.2010 18:00:00	2,348	1,3681
30.10.2010 19:00:00	1,820	1,0791
30.10.2010 20:00:00	3,325	2,7505
30.10.2010 21:00:00	3,125	2,0911
30.10.2010 22:00:00	2,285	2,3108
30.10.2010 23:00:00	2,059	0,8245
01.08.2010 00:00:00	2,883	3,2149
01.08.2010 01:00:00	3,724	3,6864
01.08.2010 02:00:00	3,513	3,3807
01.08.2010 03:00:00	4,250	3,2792
01.08.2010 04:00:00	4,445	3,0557
01.08.2010 05:00:00	3,167	1,7578
01.08.2010 06:00:00	3,354	2,1165
01.08.2010 07:00:00	3,377	2,1690
01.08.2010 08:00:00	4,286	2,3923
01.08.2010 09:00:00	4,361	2,5063
01.08.2010 10:00:00	5,306	2,6597

01.08.2010 11:00:00	6,610	2,4780
01.08.2010 12:00:00	6,780	2,6005
01.08.2010 13:00:00	7,031	2,5602
01.08.2010 14:00:00	7,030	2,4674
01.08.2010 15:00:00	6,704	2,3704
01.08.2010 16:00:00	5,376	2,3230
01.08.2010 17:00:00	4,178	2,5084
01.08.2010 18:00:00	4,352	2,6245
01.08.2010 19:00:00	3,552	2,3070
01.08.2010 20:00:00	2,928	2,0879
01.08.2010 21:00:00	2,817	1,9101
01.08.2010 22:00:00	2,238	1,2888
01.08.2010 23:00:00	2,932	2,5070
02.08.2010 00:00:00	1,914	0,7458
02.08.2010 01:00:00	3,409	2,4992
02.08.2010 02:00:00	3,623	2,6207
02.08.2010 03:00:00	3,177	2,6898
02.08.2010 04:00:00	4,366	2,5691
02.08.2010 05:00:00	3,949	2,3961
02.08.2010 06:00:00	4,427	2,4434
02.08.2010 07:00:00	5,156	2,6339
02.08.2010 08:00:00	6,555	2,6475
02.08.2010 09:00:00	7,196	2,4796
02.08.2010 10:00:00	6,553	2,6351
02.08.2010 11:00:00	5,526	2,6877
02.08.2010 12:00:00	5,847	2,6715
02.08.2010 13:00:00	5,752	2,7364
02.08.2010 14:00:00	6,625	2,7776
02.08.2010 15:00:00	8,390	2,5315
02.08.2010 16:00:00	9,260	2,3002
02.08.2010 17:00:00	6,568	2,9756
02.08.2010 18:00:00	9,236	2,4772
02.08.2010 19:00:00	8,787	2,5265
02.08.2010 20:00:00	6,823	3,3037
02.08.2010 21:00:00	6,969	3,1459
02.08.2010 22:00:00	5,744	3,3758
02.08.2010 23:00:00	4,573	3,6080
03.08.2010 00:00:00	4,334	3,1737
03.08.2010 01:00:00	4,616	3,4166
03.08.2010 02:00:00	4,581	3,4359
03.08.2010 03:00:00	4,594	3,1263
03.08.2010 04:00:00	5,451	2,9862
03.08.2010 05:00:00	6,498	2,8901
03.08.2010 06:00:00	7,902	2,5558
03.08.2010 07:00:00	9,141	1,9521
03.08.2010 08:00:00	8,850	2,1833
03.08.2010 09:00:00	8,376	2,4972
03.08.2010 09:00:02	7,772	2,7669
03.08.2010 09:00:42	7,294	2,8530



03.08.2010 10:00:00	6,907	2,8041
03.08.2010 10:00:02	5,989	3,0000
03.08.2010 11:00:00	6,228	2,8414
03.08.2010 12:00:00	4,838	3,5243
03.08.2010 13:00:00	2,532	0,3858
03.08.2010 14:00:00	3,779	2,8569
03.08.2010 15:00:00	4,482	2,9645
03.08.2010 16:00:00	5,454	3,6624
03.08.2010 17:00:00	6,150	3,2290
03.08.2010 18:00:00	6,310	3,2187
03.08.2010 19:00:00	5,711	3,1925
03.08.2010 20:00:00	5,700	2,5215
03.08.2010 21:00:00	5,006	3,5394
03.08.2010 22:00:00	4,167	3,4069
03.08.2010 23:00:00	3,797	3,2860
04.08.2010 00:00:00	4,424	2,9994
04.08.2010 01:00:00	4,885	3,0845
04.08.2010 02:00:00	5,488	3,0710
04.08.2010 03:00:00	7,097	2,8464
04.08.2010 04:00:00	7,610	2,8633
04.08.2010 05:00:00	8,122	2,7783
04.08.2010 06:00:00	8,008	2,7952
04.08.2010 07:00:00	8,919	2,5990
04.08.2010 08:00:00	9,257	2,5242
04.08.2010 09:00:00	8,990	2,6410
04.08.2010 10:00:00	8,999	2,6953
04.08.2010 11:00:00	9,310	2,5974
04.08.2010 12:00:00	8,762	2,7451
04.08.2010 13:00:00	9,286	2,5522
04.08.2010 14:00:00	8,828	2,7593
04.08.2010 15:00:00	8,891	2,6779
04.08.2010 16:00:00	8,189	2,8181
04.08.2010 17:00:00	6,699	3,1914
04.08.2010 18:00:00	5,579	3,3410
04.08.2010 19:00:00	4,799	3,5042
04.08.2010 20:00:00	3,982	3,5675
04.08.2010 21:00:00	3,493	3,0581
04.08.2010 22:00:00	3,206	3,6132
04.08.2010 23:00:00	3,450	3,0037
05.08.2010 00:00:00	4,375	3,0764
05.08.2010 01:00:00	6,354	3,0700
05.08.2010 02:00:00	7,171	2,9691
05.08.2010 03:00:00	8,049	2,9808
05.08.2010 04:00:00	7,485	3,2124
05.08.2010 05:00:00	8,337	2,9050
05.08.2010 06:00:00	7,177	3,1550
05.08.2010 07:00:00	9,148	2,6660
05.08.2010 08:00:00	10,074	2,4021
05.08.2010 09:00:00	9,904	2,4559

05.08.2010 10:00:00	9,790	2,4701
05.08.2010 11:00:00	9,141	2,6664
05.08.2010 12:00:00	9,379	2,6186
05.08.2010 13:00:00	9,866	2,4497
05.08.2010 14:00:00	9,554	2,5869
05.08.2010 15:00:00	9,872	2,4208
05.08.2010 16:00:00	11,181	1,8070
05.08.2010 17:00:00	11,000	1,8906
05.08.2010 18:00:00	11,355	1,7221
05.08.2010 19:00:00	11,538	1,6433
05.08.2010 20:00:00	11,571	1,6294
05.08.2010 21:00:00	10,079	2,3327
05.08.2010 22:00:00	9,020	2,7977
05.08.2010 23:00:00	8,674	2,9448
06.08.2010 00:00:00	7,432	3,2621
06.08.2010 01:00:00	7,192	3,2243
06.08.2010 02:00:00	7,991	2,9284
06.08.2010 03:00:00	9,913	2,3906
06.08.2010 04:00:00	10,822	1,9921
06.08.2010 05:00:00	10,941	1,9291
06.08.2010 06:00:00	9,994	2,4318
06.08.2010 07:00:00	7,704	3,2332
06.08.2010 08:00:00	8,547	2,9972
06.08.2010 09:00:00	9,439	2,6109
06.08.2010 10:00:00	6,236	4,1274
06.08.2010 11:00:00	10,451	2,0717
06.08.2010 12:00:00	12,361	1,3388
06.08.2010 13:00:00	12,542	1,2814
06.08.2010 14:00:00	12,706	1,2322
06.08.2010 15:00:00	11,709	1,5743
06.08.2010 16:00:00	11,129	1,8316
06.08.2010 17:00:00	11,242	1,7766
06.08.2010 18:00:00	11,175	1,8066
06.08.2010 19:00:00	10,084	2,3419
06.08.2010 20:00:00	9,893	2,4601
06.08.2010 21:00:00	8,897	2,8664
06.08.2010 22:00:00	8,258	3,1465
06.08.2010 23:00:00	7,601	3,3644
07.08.2010 00:00:00	8,315	3,0435
07.08.2010 01:00:00	8,906	2,8017
07.08.2010 02:00:00	9,317	2,6724
07.08.2010 03:00:00	9,253	2,6824
07.08.2010 04:00:00	8,452	3,0496
07.08.2010 05:00:00	10,226	2,2802
07.08.2010 06:00:00	10,659	2,0642
07.08.2010 07:00:00	10,775	2,0145
07.08.2010 08:00:00	11,508	1,6580
07.08.2010 09:00:00	10,529	2,1306
07.08.2010 10:00:00	8,729	2,9713

07.08.2010 11:00:00	9,586	2,5817
07.08.2010 12:00:00	10,134	2,2960
07.08.2010 13:00:00	11,026	1,8817
07.08.2010 14:00:00	11,073	1,8599
07.08.2010 15:00:00	11,326	1,7386
07.08.2010 16:00:00	10,826	1,9726
07.08.2010 17:00:00	11,616	1,6090
07.08.2010 18:00:00	11,820	1,5297
07.08.2010 19:00:00	11,872	1,5097
07.08.2010 20:00:00	11,962	1,4754
07.08.2010 21:00:00	11,411	1,6977
07.08.2010 22:00:00	11,622	1,6034
07.08.2010 23:00:00	12,077	1,4308
08.08.2010 00:00:00	12,781	1,2092
08.08.2010 01:00:00	12,154	1,4069
08.08.2010 02:00:00	11,919	1,4885
08.08.2010 03:00:00	11,156	1,8116
08.08.2010 04:00:00	11,637	1,6028
08.08.2010 05:00:00	11,311	1,7438
08.08.2010 06:00:00	11,839	1,5220
08.08.2010 07:00:00	11,818	1,5305
08.08.2010 08:00:00	12,154	1,4070
08.08.2010 09:00:00	12,021	1,4541
08.08.2010 10:00:00	12,132	1,4145
08.08.2010 11:00:00	11,790	1,5419
08.08.2010 12:00:00	11,330	1,7356
08.08.2010 13:00:00	11,232	1,7824
08.08.2010 14:00:00	11,262	1,7682
08.08.2010 15:00:00	11,517	1,6532
08.08.2010 16:00:00	11,342	1,7297
08.08.2010 17:00:00	11,761	1,5517
08.08.2010 18:00:00	11,843	1,5201
08.08.2010 19:00:00	12,183	1,3958
08.08.2010 20:00:00	12,682	1,2377
08.08.2010 21:00:00	11,871	1,5084
08.08.2010 22:00:00	13,632	0,9968
08.08.2010 23:00:00	12,976	1,1559
09.08.2010 00:00:00	12,599	1,2628
09.08.2010 01:00:00	11,620	1,6085
09.08.2010 02:00:00	11,525	1,6475
09.08.2010 03:00:00	11,833	1,5229
09.08.2010 04:00:00	12,460	1,3044
09.08.2010 05:00:00	12,479	1,2985
09.08.2010 06:00:00	12,270	1,3573
09.08.2010 07:00:00	12,700	1,2340
09.08.2010 08:00:00	13,859	0,9496
09.08.2010 09:00:00	14,689	0,7976
09.08.2010 10:00:00	14,811	0,7780
09.08.2010 11:00:00	14,430	0,8413

09.08.2010 12:00:00	14,018	0,9179
09.08.2010 13:00:00	13,526	1,0215
09.08.2010 14:00:00	12,776	1,2126
09.08.2010 15:00:00	12,907	1,1753
09.08.2010 16:00:00	12,838	1,1946
09.08.2010 17:00:00	11,781	1,5456
09.08.2010 18:00:00	11,353	1,7260
09.08.2010 19:00:00	11,760	1,5525
09.08.2010 20:00:00	11,855	1,5160
09.08.2010 21:00:00	11,166	1,8081
09.08.2010 22:00:00	10,861	1,9654
09.08.2010 23:00:00	10,859	1,9680
10.08.2010 00:00:00	11,017	1,8860
10.08.2010 01:00:00	10,490	2,1602
10.08.2010 02:00:00	9,562	2,6104
10.08.2010 03:00:00	8,957	2,8283
10.08.2010 04:00:00	8,172	3,0790
10.08.2010 05:00:00	7,079	3,4059
10.08.2010 06:00:00	6,569	3,6326
10.08.2010 07:00:00	6,353	3,7004
10.08.2010 08:00:00	6,410	3,6638
10.08.2010 09:00:00	7,859	3,2927
10.08.2010 10:00:00	9,203	2,8055
10.08.2010 11:00:00	9,015	2,7812
10.08.2010 12:00:00	9,440	2,6427
10.08.2010 13:00:00	9,993	2,4610
10.08.2010 14:00:00	8,473	3,1316
10.08.2010 15:00:00	7,748	3,1089
10.08.2010 16:00:00	5,701	3,4707
10.08.2010 17:00:00	4,502	3,6969
10.08.2010 18:00:00	3,898	3,4154
10.08.2010 19:00:00	3,780	3,4529
10.08.2010 20:00:00	3,013	2,9408
10.08.2010 21:00:00	3,444	3,4019
10.08.2010 22:00:00	3,618	2,2510
10.08.2010 23:00:00	4,510	3,4165
11.08.2010 00:00:00	4,859	3,2061
11.08.2010 01:00:00	4,512	2,9365
11.08.2010 02:00:00	4,547	2,8739
11.08.2010 03:00:00	4,629	2,9968
11.08.2010 04:00:00	3,660	2,5882
11.08.2010 05:00:00	2,796	1,7434
11.08.2010 06:00:00	2,042	0,6625
11.08.2010 07:00:00	1,859	0,0179
11.08.2010 08:00:00	1,940	0,3636
11.08.2010 09:00:00	4,907	3,2053
11.08.2010 10:00:00	7,742	2,8925
11.08.2010 11:00:00	8,016	2,9562
11.08.2010 12:00:00	8,046	2,6816

11.08.2010 13:00:00	7,816	2,6855
11.08.2010 14:00:00	5,398	3,0821
11.08.2010 15:00:00	4,437	3,3114
11.08.2010 16:00:00	3,486	2,7736
11.08.2010 17:00:00	2,900	3,1234
11.08.2010 18:00:00	2,728	1,5112
11.08.2010 19:00:00	4,306	2,4855
11.08.2010 20:00:00	4,930	2,5498
11.08.2010 21:00:00	6,114	2,5663
11.08.2010 22:00:00	6,741	2,5710
11.08.2010 23:00:00	6,032	2,5162
12.08.2010 00:00:00	5,601	2,7090
12.08.2010 01:00:00	2,964	3,2138
12.08.2010 02:00:00	2,514	1,6716
12.08.2010 03:00:00	3,412	1,9471
12.08.2010 04:00:00	4,022	1,8447
12.08.2010 05:00:00	2,960	1,6712
12.08.2010 06:00:00	2,483	1,3511
12.08.2010 07:00:00	4,180	1,8241
12.08.2010 08:00:00	3,481	1,8503
12.08.2010 09:00:00	2,386	5,7023
12.08.2010 10:00:00	3,962	3,0827
12.08.2010 11:00:00	5,136	3,3137
12.08.2010 12:00:00	4,526	3,4269
12.08.2010 13:00:00	3,254	2,8735
12.08.2010 14:00:00	2,692	2,2694
12.08.2010 15:00:00	3,450	2,8072
12.08.2010 16:00:00	4,171	3,0517
12.08.2010 17:00:00	5,180	2,9771
12.08.2010 18:00:00	5,775	2,9542
12.08.2010 19:00:00	6,886	3,0390
12.08.2010 20:00:00	7,291	2,9016
12.08.2010 21:00:00	7,577	2,7920
12.08.2010 22:00:00	8,121	2,7253
12.08.2010 23:00:00	5,884	2,9163
13.08.2010 00:00:00	6,453	2,8374
13.08.2010 01:00:00	8,036	2,8126
13.08.2010 02:00:00	8,268	2,8668
13.08.2010 03:00:00	7,330	3,0515
13.08.2010 04:00:00	7,417	2,9818
13.08.2010 05:00:00	7,605	3,0079
13.08.2010 06:00:00	7,545	3,0032
13.08.2010 07:00:00	8,662	2,7161
13.08.2010 08:00:00	8,092	2,8078
13.08.2010 09:00:00	8,304	2,7287
13.08.2010 10:00:00	7,245	3,1939
13.08.2010 11:00:00	7,501	3,1927
13.08.2010 12:00:00	7,227	3,3086
13.08.2010 13:00:00	6,508	3,4201

13.08.2010 14:00:00	6,341	3,3736
13.08.2010 15:00:00	6,308	3,2306
13.08.2010 16:00:00	6,440	3,1919
13.08.2010 17:00:00	6,541	3,0357
13.08.2010 18:00:00	7,181	2,8344
13.08.2010 19:00:00	7,205	2,7923
13.08.2010 20:00:00	7,530	2,7579
13.08.2010 21:00:00	6,572	2,7622
13.08.2010 22:00:00	7,374	2,7789
13.08.2010 23:00:00	7,130	2,8628
14.08.2010 00:00:00	6,270	2,9641
14.08.2010 01:00:00	5,417	3,2017
14.08.2010 02:00:00	5,253	3,4979
14.08.2010 03:00:00	5,665	2,9843
14.08.2010 04:00:00	4,747	2,9706
14.08.2010 05:00:00	4,122	2,6171
14.08.2010 06:00:00	3,884	2,4950
14.08.2010 07:00:00	3,857	2,2783
14.08.2010 08:00:00	3,548	2,2184
14.08.2010 09:00:00	2,681	1,3379
14.08.2010 10:00:00	2,907	1,3469
14.08.2010 11:00:00	2,013	0,5123
14.08.2010 12:00:00	2,064	0,5366
14.08.2010 13:00:00	2,771	1,3430
14.08.2010 14:00:00	3,113	3,3095
14.08.2010 15:00:00	5,251	3,2275
14.08.2010 16:00:00	5,570	3,2137
14.08.2010 17:00:00	5,651	3,1855
14.08.2010 18:00:00	6,793	3,0969
14.08.2010 19:00:00	7,514	2,9868
14.08.2010 20:00:00	7,474	3,1492
14.08.2010 21:00:00	7,746	2,9864
14.08.2010 22:00:00	7,788	2,9555
14.08.2010 23:00:00	8,227	2,8178
15.08.2010 00:00:00	7,582	2,9195
15.08.2010 01:00:00	6,918	3,0819
15.08.2010 02:00:00	7,124	2,9359
15.08.2010 03:00:00	6,949	2,9366
15.08.2010 04:00:00	6,989	2,8175
15.08.2010 05:00:00	7,766	2,7935
15.08.2010 06:00:00	5,975	3,0819
15.08.2010 07:00:00	4,781	3,1523
15.08.2010 08:00:00	4,858	3,1038
15.08.2010 09:00:00	6,462	2,8864
15.08.2010 10:00:00	7,642	2,8892
15.08.2010 11:00:00	7,207	2,8869
15.08.2010 12:00:00	5,507	3,0415
15.08.2010 13:00:00	4,234	3,2064
15.08.2010 14:00:00	5,144	3,2696

15.08.2010 15:00:00	5,008	3,0452
15.08.2010 16:00:00	5,167	3,2118
15.08.2010 17:00:00	4,802	3,1409
15.08.2010 18:00:00	3,676	2,9405
15.08.2010 19:00:00	2,562	2,1045
15.08.2010 20:00:00	1,830	0,0580
15.08.2010 21:00:00	2,958	2,0383
15.08.2010 22:00:00	3,321	2,5435
15.08.2010 23:00:00	2,925	2,1472
16.08.2010 00:00:00	3,607	2,8518
16.08.2010 01:00:00	2,620	2,9982
16.08.2010 02:00:00	2,731	1,8130
16.08.2010 03:00:00	3,653	2,5648
16.08.2010 04:00:00	2,760	2,0509
16.08.2010 05:00:00	1,927	0,7646
16.08.2010 06:00:00	3,138	2,2445
16.08.2010 07:00:00	2,918	2,2236
16.08.2010 08:00:00	3,850	3,0194
16.08.2010 09:00:00	4,194	3,2769
16.08.2010 10:00:00	4,918	3,5600
16.08.2010 11:00:00	5,256	3,6829
16.08.2010 12:00:00	4,945	3,1694
16.08.2010 13:00:00	6,046	3,2222
16.08.2010 14:00:00	6,117	2,9378
16.08.2010 15:00:00	6,702	3,0835
16.08.2010 16:00:00	6,207	3,2336
16.08.2010 17:00:00	5,526	3,2043
16.08.2010 18:00:00	5,975	3,1268
16.08.2010 19:00:00	6,448	3,1733
16.08.2010 20:00:00	7,566	3,0661
16.08.2010 21:00:00	8,460	1,8223
16.08.2010 22:00:00	8,200	0,1065
16.08.2010 23:00:00	11,000	1,2496
17.08.2010 00:00:00	12,134	1,1177
17.08.2010 01:00:00	12,379	1,0528
17.08.2010 02:00:00	11,545	1,2973
17.08.2010 03:00:00	10,978	1,5087
17.08.2010 04:00:00	11,347	1,3661
17.08.2010 05:00:00	11,146	1,4413
17.08.2010 06:00:00	12,025	1,1481
17.08.2010 07:00:00	12,048	1,1411
17.08.2010 08:00:00	12,506	1,0205
17.08.2010 09:00:00	11,860	1,1967
17.08.2010 10:00:00	12,331	1,0642
17.08.2010 11:00:00	11,277	1,3920
17.08.2010 12:00:00	11,433	1,3357
17.08.2010 13:00:00	11,028	1,4877
17.08.2010 14:00:00	11,173	1,4582
17.08.2010 15:00:00	11,381	1,7077

17.08.2010 16:00:00	9,157	2,5496
17.08.2010 17:00:00	7,177	3,0189
17.08.2010 18:00:00	5,573	3,0354
17.08.2010 19:00:00	4,347	2,9945
17.08.2010 20:00:00	4,780	3,2191
17.08.2010 21:00:00	4,996	3,3128
17.08.2010 22:00:00	8,584	2,7922
17.08.2010 23:00:00	9,972	2,3778
18.08.2010 00:00:00	7,647	3,0114
18.08.2010 01:00:00	8,074	2,9058
18.08.2010 02:00:00	6,846	2,9942
18.08.2010 03:00:00	7,353	3,1767
18.08.2010 04:00:00	6,863	3,2592
18.08.2010 05:00:00	6,897	2,9705
18.08.2010 06:00:00	6,149	2,7843
18.08.2010 07:00:00	5,736	2,9893
18.08.2010 08:00:00	3,318	2,9356
18.08.2010 09:00:00	3,196	1,9138
18.08.2010 10:00:00	3,746	4,2474
18.08.2010 11:00:00	3,361	2,5441
18.08.2010 12:00:00	3,319	2,4949
18.08.2010 13:00:00	3,324	2,8240
18.08.2010 14:00:00	2,872	2,0943
18.08.2010 15:00:00	1,901	0,2923
18.08.2010 16:00:00	2,858	3,5539
18.08.2010 17:00:00	2,768	2,4785
18.08.2010 18:00:00	2,753	2,4226
18.08.2010 19:00:00	4,152	3,0333
18.08.2010 20:00:00	5,619	3,0255
18.08.2010 21:00:00	5,820	3,3259
18.08.2010 22:00:00	6,647	3,3176
18.08.2010 23:00:00	6,835	3,4429
19.08.2010 00:00:00	8,934	2,4880
19.08.2010 01:00:00	8,697	2,5752
19.08.2010 02:00:00	8,784	2,6398
19.08.2010 03:00:00	8,243	2,9382
19.08.2010 04:00:00	7,335	3,1489
19.08.2010 05:00:00	5,931	3,2423
19.08.2010 06:00:00	7,297	3,1734
19.08.2010 07:00:00	8,494	2,7878
19.08.2010 08:00:00	8,121	2,8637
19.08.2010 09:00:00	7,445	3,0519
19.08.2010 10:00:00	7,674	3,0050
19.08.2010 11:00:00	8,107	2,8907
19.08.2010 12:00:00	7,159	3,0514
19.08.2010 13:00:00	7,639	2,8505
19.08.2010 14:00:00	7,968	1,3923
19.08.2010 15:00:00	8,042	2,7705
19.08.2010 16:00:00	6,637	3,1366



19.08.2010 17:00:00	3,052	2,4606
19.08.2010 18:00:00	4,874	3,2262
19.08.2010 19:00:00	5,452	3,6437
19.08.2010 20:00:00	7,473	2,8457
19.08.2010 21:00:00	8,430	2,9017
19.08.2010 22:00:00	8,444	2,8675
19.08.2010 23:00:00	9,117	2,6249
20.08.2010 00:00:00	8,373	2,8146
20.08.2010 01:00:00	5,222	3,1101
20.08.2010 02:00:00	3,325	2,6124
20.08.2010 03:00:00	2,234	0,5291
20.08.2010 04:00:00	2,844	4,7066
20.08.2010 05:00:00	5,634	3,0425
20.08.2010 06:00:00	6,201	3,0137
20.08.2010 07:00:00	6,825	2,9710
20.08.2010 08:00:00	6,804	2,9429
20.08.2010 09:00:00	5,862	0,6495
20.08.2010 10:00:00	4,614	1,3004
20.08.2010 11:00:00	4,472	3,5274
20.08.2010 12:00:00	4,793	3,1451
20.08.2010 13:00:00	5,238	3,1430
20.08.2010 14:00:00	5,291	3,1683
20.08.2010 14:00:44	6,170	3,0985
20.08.2010 15:00:00	7,524	2,9258
20.08.2010 16:00:00	8,475	2,7740
20.08.2010 17:00:00	8,307	2,8249
20.08.2010 18:00:00	8,453	2,7851
20.08.2010 19:00:00	8,567	2,7594
20.08.2010 20:00:00	8,254	2,7732
20.08.2010 21:00:00	7,545	2,7835
20.08.2010 22:00:00	7,831	2,7563
20.08.2010 23:00:00	8,045	2,6703
21.08.2010 00:00:00	7,505	2,7374
21.08.2010 01:00:00	7,556	2,7829
21.08.2010 02:00:00	8,832	2,5873
21.08.2010 03:00:00	7,002	3,2142
21.08.2010 04:00:00	6,509	3,3519
21.08.2010 05:00:00	6,792	3,3097
21.08.2010 06:00:00	6,526	3,3264
21.08.2010 07:00:00	5,219	3,4685
21.08.2010 08:00:00	5,036	3,3568
21.08.2010 09:00:00	5,194	3,3566
21.08.2010 10:00:00	5,827	1,3433
21.08.2010 11:00:00	7,643	1,7303
21.08.2010 12:00:00	8,642	2,7020
21.08.2010 13:00:00	9,195	2,6097
21.08.2010 14:00:00	8,697	2,7079
21.08.2010 15:00:00	8,632	2,7206
21.08.2010 16:00:00	8,455	2,7574

21.08.2010 17:00:00	8,012	2,7513
21.08.2010 18:00:00	7,884	2,8368
21.08.2010 19:00:00	8,168	2,8103
21.08.2010 20:00:00	7,690	2,8080
21.08.2010 21:00:00	8,375	2,6252
21.08.2010 22:00:00	8,158	2,7014
21.08.2010 23:00:00	7,825	2,7486
22.08.2010 00:00:00	7,637	2,8482
22.08.2010 01:00:00	7,790	2,8868
22.08.2010 02:00:00	7,814	2,7975
22.08.2010 03:00:00	8,800	2,5913
22.08.2010 04:00:00	7,528	3,0217
22.08.2010 05:00:00	6,382	3,2647
22.08.2010 06:00:00	6,248	3,1841
22.08.2010 07:00:00	5,170	3,3945
22.08.2010 08:00:00	5,523	3,5792
22.08.2010 09:00:00	6,803	3,0770
22.08.2010 10:00:00	7,864	2,8991
22.08.2010 11:00:00	8,432	2,7465
22.08.2010 12:00:00	8,355	2,7672
22.08.2010 13:00:00	7,940	2,8564
22.08.2010 14:00:00	9,627	2,4073
22.08.2010 15:00:00	10,330	2,2190
22.08.2010 16:00:00	9,668	2,4064
22.08.2010 17:00:00	8,037	2,7609
22.08.2010 18:00:00	8,110	2,8167
22.08.2010 19:00:00	8,433	2,7682
22.08.2010 20:00:00	8,650	2,6670
22.08.2010 21:00:00	9,120	1,9938
22.08.2010 22:00:00	4,512	1,4854
22.08.2010 23:00:00	6,338	1,8498
23.08.2010 00:00:00	5,017	3,5584
23.08.2010 01:00:00	4,836	2,2104
23.08.2010 02:00:00	5,190	3,5498
23.08.2010 03:00:00	6,192	3,3825
23.08.2010 04:00:00	6,274	0,0693
23.08.2010 05:00:00	6,604	1,7239
23.08.2010 06:00:00	9,031	2,6666
23.08.2010 07:00:00	9,198	2,6693
23.08.2010 08:00:00	8,642	2,8504
23.08.2010 09:00:00	7,191	3,3112
23.08.2010 10:00:00	6,238	3,3731
23.08.2010 11:00:00	7,321	3,2120
23.08.2010 12:00:00	5,208	3,5753
23.08.2010 13:00:00	5,605	3,3869
23.08.2010 14:00:00	5,317	3,4271
23.08.2010 15:00:00	4,512	3,2681
23.08.2010 16:00:00	7,004	0,4954
23.08.2010 17:00:00	8,039	3,0958

23.08.2010 18:00:00	6,361	0,3736
23.08.2010 19:00:00	8,447	0,0316
23.08.2010 20:00:00	7,662	0,0000
23.08.2010 21:00:00	9,023	1,2471
23.08.2010 22:00:00	8,865	2,9087
23.08.2010 23:00:00	7,687	3,2113
24.08.2010 00:00:00	6,792	3,1719
24.08.2010 01:00:00	7,721	3,0566
24.08.2010 02:00:00	8,370	2,9524
24.08.2010 03:00:00	8,920	2,8404
24.08.2010 04:00:00	7,125	3,4461
24.08.2010 05:00:00	6,932	3,4370
24.08.2010 06:00:00	8,300	3,1248
24.08.2010 07:00:00	9,762	2,6017
24.08.2010 08:00:00	10,133	2,3138
24.08.2010 09:00:00	10,215	2,2305
24.08.2010 10:00:00	7,458	3,2935
24.08.2010 11:00:00	6,974	3,4765
24.08.2010 12:00:00	8,093	3,1417
24.08.2010 13:00:00	6,669	2,9513
24.08.2010 14:00:00	6,799	3,5972
24.08.2010 15:00:00	10,015	2,2625
24.08.2010 16:00:00	7,424	3,1661
24.08.2010 17:00:00	10,105	2,2968
24.08.2010 18:00:00	8,573	3,0275
24.08.2010 19:00:00	9,272	2,7130
24.08.2010 20:00:00	8,768	2,8973
24.08.2010 21:00:00	8,683	2,8761
24.08.2010 22:00:00	9,066	2,7138
24.08.2010 23:00:00	8,339	2,8271
25.08.2010 00:00:00	6,468	2,9670
25.08.2010 01:00:00	6,285	2,9974
25.08.2010 02:00:00	6,598	3,1195
25.08.2010 03:00:00	6,132	3,1528
25.08.2010 04:00:00	6,749	3,1277
25.08.2010 05:00:00	6,603	3,2363
25.08.2010 06:00:00	7,152	2,9363
25.08.2010 07:00:00	7,885	2,9261
25.08.2010 08:00:00	7,142	3,0751
25.08.2010 09:00:00	6,511	3,1685
25.08.2010 10:00:00	5,318	3,5238
25.08.2010 11:00:00	5,258	3,4949
25.08.2010 12:00:00	5,325	3,2685
25.08.2010 13:00:00	5,833	3,2406
25.08.2010 14:00:00	5,659	3,0650
25.08.2010 15:00:00	3,405	1,3647
25.08.2010 16:00:00	3,760	3,5287
25.08.2010 17:00:00	3,332	3,5142
25.08.2010 18:00:00	3,636	3,1215

25.08.2010 19:00:00	3,424	3,2707
25.08.2010 20:00:00	2,735	2,3945
25.08.2010 21:00:00	3,279	2,8131
25.08.2010 22:00:00	3,888	3,1086
25.08.2010 23:00:00	3,644	3,0762
26.08.2010 00:00:00	2,901	2,6327
26.08.2010 01:00:00	2,792	2,4806
26.08.2010 02:00:00	3,859	2,9485
26.08.2010 03:00:00	4,404	2,5802
26.08.2010 04:00:00	4,351	2,5820
26.08.2010 05:00:00	3,518	2,3622
26.08.2010 06:00:00	2,974	0,6783
26.08.2010 07:00:00	3,097	0,8470
26.08.2010 08:00:00	2,217	0,0477
26.08.2010 09:00:00	5,559	2,9971
26.08.2010 10:00:00	6,770	2,8211
26.08.2010 11:00:00	6,613	2,7451
26.08.2010 12:00:00	6,342	2,5740
26.08.2010 13:00:00	6,588	2,7356
26.08.2010 14:00:00	5,969	2,7604
26.08.2010 15:00:00	4,130	2,7738
26.08.2010 16:00:00	2,324	0,3923
26.08.2010 17:00:00	2,692	0,9524
26.08.2010 18:00:00	3,766	2,2618
26.08.2010 19:00:00	2,879	1,2871
26.08.2010 20:00:00	1,939	0,3409
26.08.2010 21:00:00	3,225	2,5027
26.08.2010 22:00:00	3,447	2,7820
26.08.2010 23:00:00	2,207	1,6233
27.08.2010 00:00:00	6,990	2,3811
27.08.2010 01:00:00	7,567	1,6676
27.08.2010 02:00:00	7,499	2,8164
27.08.2010 03:00:00	9,568	2,1878
27.08.2010 04:00:00	9,362	2,2195
27.08.2010 05:00:00	7,252	2,8990
27.08.2010 06:00:00	5,825	2,8647
27.08.2010 07:00:00	5,642	2,9096
27.08.2010 08:00:00	6,866	3,0035
27.08.2010 09:00:00	6,931	3,0498
27.08.2010 10:00:00	6,009	3,1025
27.08.2010 11:00:00	5,884	2,8876
27.08.2010 12:00:00	6,383	2,9193
27.08.2010 13:00:00	7,502	2,8353
27.08.2010 14:00:00	8,356	2,5996
27.08.2010 15:00:00	8,395	2,5992
27.08.2010 16:00:00	8,084	2,6468
27.08.2010 17:00:00	7,418	2,7326
27.08.2010 18:00:00	7,831	2,6398
27.08.2010 19:00:00	7,365	2,5967

27.08.2010 20:00:00	7,347	2,5575
27.08.2010 21:00:00	7,805	2,3850
27.08.2010 22:00:00	7,650	2,1411
27.08.2010 23:00:00	9,394	2,0941
28.08.2010 00:00:00	10,751	1,8463
28.08.2010 01:00:00	7,589	0,6292
28.08.2010 02:00:00	4,876	0,0089
28.08.2010 03:00:00	5,533	1,4174
28.08.2010 04:00:00	6,192	1,7412
28.08.2010 05:00:00	6,229	2,8490
28.08.2010 06:00:00	5,509	2,9191
28.08.2010 07:00:00	4,905	2,8943
28.08.2010 08:00:00	5,013	2,8186
28.08.2010 09:00:00	4,696	2,8475
28.08.2010 10:00:00	4,891	2,7807
28.08.2010 11:00:00	5,373	2,6873
28.08.2010 12:00:00	5,233	2,5289
28.08.2010 13:00:00	4,855	2,4450
28.08.2010 14:00:00	5,001	2,0142
28.08.2010 15:00:00	6,082	2,0752
28.08.2010 16:00:00	5,524	2,0976
28.08.2010 17:00:00	5,501	1,9228
28.08.2010 18:00:00	5,317	1,9862
28.08.2010 19:00:00	5,085	2,0111
28.08.2010 20:00:00	3,735	1,7837
28.08.2010 21:00:00	3,014	1,1227
28.08.2010 22:00:00	3,545	1,8237
28.08.2010 23:00:00	4,241	1,8880
29.08.2010 00:00:00	3,999	1,3573
29.08.2010 01:00:00	2,771	0,2134
29.08.2010 02:00:00	1,674	5,5614
29.08.2010 03:00:00	5,141	2,7716
29.08.2010 04:00:00	5,735	2,9905
29.08.2010 05:00:00	3,697	2,0291
29.08.2010 06:00:00	3,756	2,0719
29.08.2010 07:00:00	3,439	0,9617
29.08.2010 08:00:00	3,152	0,9959
29.08.2010 09:00:00	4,614	2,1231
29.08.2010 10:00:00	3,616	2,7419
29.08.2010 11:00:00	4,970	2,8768
29.08.2010 12:00:00	2,268	1,9061
29.08.2010 13:00:00	2,818	0,5432
29.08.2010 14:00:00	2,952	0,3746
29.08.2010 15:00:00	2,332	0,7504
29.08.2010 16:00:00	5,189	2,6383
29.08.2010 17:00:00	4,656	3,1632
29.08.2010 18:00:00	3,172	1,4179
29.08.2010 19:00:00	3,462	1,7553
29.08.2010 20:00:00	3,300	1,4121

29.08.2010 21:00:00	4,677	1,9765
29.08.2010 22:00:00	3,589	1,8259
29.08.2010 23:00:00	3,942	1,9288
30.08.2010 00:00:00	4,102	2,5908
30.08.2010 01:00:00	2,011	0,2301
30.08.2010 02:00:00	3,919	2,0977
30.08.2010 03:00:00	4,599	2,7997
30.08.2010 04:00:00	3,258	0,1124
30.08.2010 05:00:00	4,451	1,5000
30.08.2010 06:00:00	4,640	0,0391
30.08.2010 07:00:00	5,537	2,1242
30.08.2010 08:00:00	3,937	2,4717
30.08.2010 09:00:00	4,956	2,4910
30.08.2010 10:00:00	6,122	2,2054
30.08.2010 11:00:00	5,790	2,1973
30.08.2010 12:00:00	6,582	2,1600
30.08.2010 13:00:00	7,109	2,1283
30.08.2010 14:00:00	6,983	2,0838
30.08.2010 15:00:00	5,994	2,0477
30.08.2010 16:00:00	5,191	1,9615