

**CERCETĂRI ÎN DINAMICA AGREGATELOR  
AEROELECTRICE**

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

**Ing. Geza-Mihai ERDŐDI**

Conducător științific:	Prof.univ.dr.ing. Liviu BERETEU
Referenți științifici:	Prof.univ.dr.ing. Ioan-Adrian VIOREL
	Prof.univ.dr.ing. Tiberiu VESSELENYI
	Prof.univ.dr.fiz. Ioan BICA

Data susținerii tezei: 05.05.2017

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, 2017

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

Lucrarea de doctorat este făcută în cadrul *Catedrei de Mecanică a Facultății de Mecanică din Timișoara*, sub îndrumarea continuă și de înaltă ținută a conducătorului științific, Prof.dr.ing Liviu BERETEU . În acest sens îi mulțumesc în mod deosebit pentru formarea mea profesională.

Lucrarea de doctorat se bazează pe rezultatele de cercetare ale autorului, în perioada octombrie 2013 – august 2016, în cadrul studiilor doctorale făcute în domeniul *Inginerie Mecanică* la *Universitatea „Politehnica” din Timișoara*. În această perioadă am elaborat mai multe lucrări științifice în domeniul energiilor regenerabile.

Activitatea de cercetare m-a format profesional în mod deosebit și aceasta datorită Domnului Prof.dr.ing. Liviu BERETEU, care întotdeauna a analizat cu maximă exigență rezultatele cercetării.

Apreciez ca deosebit de utile cursurile de la Școala Doctorală de la Universitatea Politehnica Timișoara.

Mulțumiri doresc să adresez tuturor acelor care în partea teoretică și practică a tezei au oferit soluții interesante din punct de vedere științific și tehnic, cu precădere Prof.dr.ing. Liviu BERETEU.

Mulțumesc și cercetătorilor din cadrul Universității „Politehnica” din Timișoara, care au studiat lucrările mele și au făcut observații constructive.

Colegiilor mei, le mulțumesc pentru sprijinul oferit în finalizarea lucrării de doctorat.

Membrilor comisiei de recenzie a tezei de doctorat, Prof.dr.ing. Ioan Adrian VIOREL (Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca), Prof.dr.ing. Tiberiu VESSELENYI (Universitatea din Oradea) și Prof.dr.fiz. Marius Babescu (Universitatea de Vest din Timișoara), le mulțumesc pentru sfaturile primite.

Adresez călduroase mulțumiri soției și fiicei mele, pentru tot ce au făcut și înțelegerea de care au dat dovadă în acești ani și de asemenea, întregii mele familii.

Timișoara, Februarie 2017

Ing. Geza-Mihai ERDODI

## **CERCETĂRI ÎN DINAMICA SISTEMELOR ELECTROENERGETICE EOLIENE**

Teze de doctorat ale UPT, Seria //, Nr. //, Editura Politehnica, 2017, 221 pagini, 151 figuri, 7 tabele.

ISSN: //

ISBN//

Cuvinte cheie: sisteme eoliene, viteza vântului, energie mecanică, energie electrică, optimizări, stabilitate, conducere.

Rezumat: Tematica tezei se încadrează în preocupările actuale din domeniul energiilor regenerabile cu precădere energia eoliană. Teza tratează o serie de aspecte esențiale privind sistemele eoliene de mare putere care trebuie să funcționeze în condiții optime la viteze ale vântului variabile în timp. Abordarea funcționării sistemelor eoliene se face folosind modele matematice avansate pentru turbina de vânt și generatorul electric cuplat cu ea.

Metodologiile elaborate au la bază o abordare teoretică riguroasă și completă, finalizându-se prin realizarea unor instrumente soft de aplicabilitate generală, utile celor ce exploatează sistemele eoliene în condiții meteo date: viteze ale vântului variabile în timp.

Aplicațiile numerice concrete din cadrul tezei se referă la sistemele electroenergetice eoliene reale de putere medie și mare cu turbine cu ax orizontal cuplate cu generatoare sincrone cu magneți permanenți.

## CUPRINS

<b>1.Introducere.....</b>	<b>15</b>
1.1 Oportunitatea și obiectivele tezei.....	15
1.2. Prezentarea conținutului tezei de doctorat.....	16
<b>2. Evoluția surselor de energie regenerabile în balanța electroenergetică globală.....</b>	<b>19</b>
2.1. Considerații preliminare.....	19
2.2. Producerea energiei din surse neconvenționale.....	20
2.2.1. Potențialul surselor regenerabile de energie din România.Energia eoliană....	21
2.2.2. Politici privind sursele regenerabile de energie și valorificarea acestora.....	22
2.2.3. Strategia în domeniul SRE în România.....	25
2.3. Sisteme electroenergetice eoliene.....	27
2.4. Analiza soluțiilor existente în domeniul sistemelor electroenergetice eoliene...29	29
2.5. Concluzii.....	30
<b>3. Problematika integrării surselor regenerabile de energie .....</b>	<b>31</b>
3.1. Considerații preliminare.....	31
3.2. Aspecte legislative.....	31
3.3. Aspecte economice.....	36
3.4. Aspecte tehnice.....	40
3.5. Concluzii.....	45
<b>4.Dinamica sistemului eolian cu stocare în acumulatori electrice.....</b>	<b>46</b>
4.1. Considerații preliminare.....	46
4.2.Modele matematice.....	47
4.2.1.Modelul matematic al TV,(MM-TV).....	47
4.2.2. Modelul matematic al GSMP,(MM-GSMP).....	48
4.3.Studiu de caz.....	49
4.3.1.Redresor necomandat.....	51
4.3.2.Redresor comandat.....	52
4.4. Concluzii.....	57
<b>5.Dinamica sistemului eolian condus prin măsurarea vitezei vântului.....</b>	<b>58</b>
5.1. Considerații preliminare.....	58
5.2.Studiu de caz.....	59
5.2.1.Modificarea sarcinii astfel încât să se atingă optimul în minimum de timp.....	61
5.2.2.Algoritmul de conducere.....	71
5.3. Concluzii.....	78
<b>6. Maximizarea energiei captate la un sistem eolian .....</b>	<b>79</b>
6.1. Considerații preliminare.....	79
6.2. Modelul matematic al TV,(MM-TV).....	79
6.3.Determinarea maximului energetic prin anularea derivatei energiei.....	81
6.3.1.Determinarea optimului prin alegerea succesivă a unor valori pentru $\omega$ .....	82
6.3.2.Determinarea simplificată a optimului energetic.....	85
6.3.2.1.Liniarizarea caracteristicilor mecanice.....	85
6.3.2.2.Aproximarea funcției exponențiale.....	87
6.4. Determinarea maximului energetic prin calcularea valorii energiei obținute....	88

6.5. Determinarea maximului energetic prin măsuratori la funcționarea în gol.....	91
6.5.1.Determinarea maximului funcției energiei mecanice.....	91
6.5.2.Determinarea maximului funcției puterii mecanice.....	96
6.6.Determinarea maximului energetic prin încărcări succesive a GSMP.....	100
6.7. Dinamica sistemului la încărcarea optimă.....	103
6.8. Concluzii.....	111
<b>7. Dinamica sistemului eolian funcționând la viteze ale vântului variabile în timp și determinarea zonei optime din punct de vedere energetic.....</b>	<b>113</b>
7.1. Prezentarea sistemelor de conducere performante ce asigură maximul de energie eoliană captată.....	113
7.2. Studiul de caz.....	114
7.2.1.Modelele matematice ale TV+GSMP.....	114
7.2.2. Viteza vântului variabilă în timp.....	115
7.2.3. Determinarea vitezei unghiulare mecanice optime.....	117
7.2.4.Viteza și puterea echivalentă.....	119
7.2.5.Determinarea experimentală a zonei optime energetic.....	126
7.2.6.Dinamica sistemului la diferite încărcări.....	127
7.2.7. Variațiile în timp ale puterilor.....	128
7.2.8. Conducerea optimă a sistemului eolian funcționând la viteze ale vântului variabile în timp.....	130
7.3.Determinarea puterii maxime prin măsurători de turație și putere la GSMP la viteze ale vântului variabile în timp.....	131
7.3. 1.Studiu de caz.....	131
7.4. Concluzii.....	141
<b>8.Dinamica sistemului eolian funcționând în gol.....</b>	<b>143</b>
8.1.Considerații preliminare .....	143
8.2.Viteza corespunzătoare puterii echivalente.....	144
8.2.1.Puterea echivalentă și viteza echivalentă.....	145
8.2.1.1.Determinarea vitezei și puterii echivalente printr-o probă la funcționarea în gol.....	145
8.2.1.2.Determinarea vitezei echivalente din $\omega_{FINAL}$ .....	148
8.3.Considerarea momentului de frecări .....	150
8.4. Determinarea modelului matematic al TV printr-o probă la funcționarea în gol.. ..	151
8.4.1.Modelul matematic simplificat al TV (MMS-TV).....	153
8.5.Conducerea optimă a sistemului TV+GSMP.....	155
8.5.1.Determinarea aproximativă a funcției puterii. ....	155
8.6. Concluzii.....	157
<b>9.Puterea echivalentă și funcționarea sistemului eolian cu stocare în acumulatori electrice.....</b>	<b>158</b>
9.1.Considerații preliminare.....	158
9.2. Modelele matematice ale TV,GSMP și AE.....	159
9.3.Puterea echivalentă.....	162
9.4.Puterea echivalentă și viteza echivalentă.....	163
9.5.Determinarea puterii echivalente printr-o probă la funcționarea în gol.....	165
9.6.Conducerea optimă a sistemului TV+GSMP.....	167
9.7.Determinarea aproximativă a $P_{ECH}$ .....	169
9.8.Sistem eolian cu stocare în acumulatori electrice.....	171
9.8.1.Studiu de caz.....	171

9.8.2.Redresor necomandat.....	173
9.8.3. Calculul bateriei de acumuloare.....	174
9.9. Concluzii.....	177
<b>10. Determinarea modelelor matematice ale turbinei eoliene printr-o probă de gol.....</b>	<b>179</b>
10.1 Considerații preliminare.....	179
10.2.Studiu de caz –determinarea modelului matematic al TV.....	181
10.2.1 Viteza vântului este constantă în timp.....	181
10.2.2 Viteza vântului este variabilă în timp.....	183
10.2.3 Simplificarea modelului matematic.....	188
10.3.Modelul matematic bazat pe funcția SINUS.....	195
10.3.1.Studiu de caz.....	196
10.4.Conducerea optimă a sistemului TV+GSMP.....	200
10.5 Concluzii.....	201
<b>11 Determinarea experimentală a caracteristicii puterii la o turbina de vânt printr-o probă de funcționare în gol.....</b>	<b>202</b>
11.1 Modelul matematic al TV,(MM-TV).....	206
<b>12. Concluzii generale și contribuții personale.....</b>	<b>210</b>
<b>Bibliografie.....</b>	<b>214</b>
<b>Sinteza privind lucrările propri</b>	





**ACRONIME**

AE	- Acumulatori electrice
AN	- Anemometru
ANRE	- Agenția Națională de Reglementare în domeniul Energiei
ARCE	- Agenția Română pentru Conservarea Energiei
BS	- Baterii solare
CEE	- Centrală electrică eoliană
CV	- Certificat Verde
E-SRE	- energie electrică produsă din surse regenerabile de energie
GSMP	- Generator sincron cu magneți permanenți
HG	- Hotărâre de Guvern
I	- Moment de inerție
IEA	- Agenția Internațională a Energiei (International Energy Agency)
IEEE	- Institute of Electrical and Electronics Engineers
LEA	- Linie Electrică Aeriană
MG	- Cuplul la GSMP
MM	- Model matematic
MM-AE	- Modelul matematic al AE
MM-GSMP	- Model matematic al GSMP
MM-TV	- Model matematic al TV
MPP	- Punctul de putere maximă
MTV	- Cuplul turbinei de vânt
OECD	- Organizația pentru Cooperare și Dezvoltare Economică
PECH	- Puterea echivalentă a TV
PG	- Puterea la GSMP
PS	- Puterea la sarcină
PTV	- Puterea turbinei de vânt
PTV-MAX	- Valoarea maximă a puterii turbinei
PTV-SIMP	- Puterea TV calculată cu modelul simplificat
SC	- Supercondensatoare
SEE	- Sistem electroenergetic
SEN	- Sistemul Electroenergetic Național
SOC	- Stare de încărcare a AE
SRE	- Surse regenerabile de energie
TV	- Turbină de vânt
UE	- Uniunea Europeană
V	- Viteza vântului
VECH	- Viteza echivalentă a vântului
VUM	- Viteza unghiulară mecanică
WEC	- Consiliul Mondial al Energiei (World Energy Council)

### Listă de figuri

Nr. Figură	Descriere
2.1	Sistem electroenergetic cu baterii solare si turbină de vânt
2.2	Energia solară anuală
3.1	Sistem electorenergetic mixt
3.2	Evoluția în timp a ponderii energiei eoliene
3.3	Sistem eolian cu generator sincron cu magnet permanent
3.4	Costul unui kWh în funcție de viteza vântului
3.5	Evoluția costului kWh în funcție de puterea instalată
3.6	Costul energiei electrice generate în funcție de orele de funcționare anuală
3.7	Comparația între diferitele surse de zgomot
3.8	Variația vitezei vântului în timp în locația A
3.9	Variația vitezei vântului în timp în locația B
3.10	Variația vitezei vântului în timp în locația C
3.11	Variația puterii în timp în locația C
3.12	Structura de bază la un sistem eolian
3.13	Centrală eoliană marină
3.14	Variația puterii vântului cu altitudinea
3.15	Centrală eoliană la altitudine
4.1	Sistem eolian cu stocare în AE
4.2	Dependența puterii de VUM, $\omega$
4.3	Variația în timp a lui $\omega$
4.4	Variația în timp a lui $\omega$
4.5	Variația în timp a curentului
4.6	Variația în timp a curentului (detaliu)
4.7	Variația curentului la $k_2 = 0.0000001$
4.8	Variația VUM la $k_2 = 0.0000001$
4.9	Variația curentului la $k_2 = 0.000001$
4.10	Variația VUM la $k_2 = 0.000001$
4.11	Variația curentului la $k_2 = 0.00001$
4.12	Variația VUM la $k_2 = 0.00001$
4.13	Variația curentului la $k_2 = 0.0001$
4.14	Variația VUM la $k_2 = 0.0001$
4.15	Variația curentului la $k_2 = 0.001$

10

- 4.16 Variația VUM la  $k_2 = 0.001$
- 5.1 Sistem eolian cu stocare în AE
- 5.2 Variația în timp a vitezei vântului
- 5.3 Dependența cuplului  $M_G$  de  $\omega$
- 5.4 Variația în timp a VUM la gol
- 5.5 Evoluția în timp a VUM pe intervalul 35-65[s]
- 5.6 Evoluția în timp a VUM pe intervalul 0-1500[s]
- 5.7 Variația vitezei vântului în timp
- 5.8 Variația VUM în timp
- 5.9 Variația VUM în timp pe intervalul 0-40[s]
- 5.10 Variația VUM în timp pe intervalul 0-110[s]
- 5.11 Variația VUM în timp pe intervalul 65-110[s] la  $R = 425.61[\Omega]$  și  $327.32[\Omega]$
- 5.12 Variația VUM în timp pe intervalul 65-110[s] la  $R = 425.61[\Omega]$  și  $227.32[\Omega]$
- 5.13 Variația VUM în timp pe intervalul 65-110[s] la  $R = 425.61[\Omega]$  și  $277.32[\Omega]$
- 5.14 Variația VUM în timp pe intervalul  $\Delta t = 35 \div 1165[s]$  la  $R = 425.61[\Omega]$  și  $277.32[\Omega]$
- 5.15 Variația VUM în timp pe intervalul  $\Delta t = 35 \div 1165[s]$  la  $R = 277.32[\Omega]$
- 5.16 Variația VUM în timp pe intervalul  $\Delta t = 35 \div 1165[s]$  la  $R = 377.32[\Omega]$
- 5.17 Variația VUM în timp pe intervalul  $\Delta t = 135 \div 235[s]$  la  $R = 366.13[\Omega]$
- 5.18 Variația VUM în timp pe intervalul  $\Delta t = 135 \div 235[s]$  la  $R = 344.54[\Omega]$
- 5.19 Variația VUM în timp pe intervalul  $\Delta t = 535 \div 635[s]$  la  $R = 308.28[\Omega]$
- 5.20 Variația VUM și a sarcinii în timp folosind un regulator de tip PI  
 $\frac{dR}{dt} = 3.5942 \times 10^{-5} \frac{d\omega}{dt} + 0.001(\omega - 547.13)$
- 6.1 Dependența puterii de VUM,  $\omega$
- 6.2 Variația în timp a vitezei vântului
- 6.3 Caracteristicile mecanice ale turbinei

11

- 6.4 Graficul funcției exponențiale la trei valori pentru  $\omega$   
6.5 Variația în timp a VUM  
6.6 Dependența energiei de VUM
- 6.7.a Variația lui  $\omega$  la viteza vântului variabilă în timp și  
 $\omega(0) = 500. [rad/s]$
- 6.7.b Variația lui  $\omega$ , (detaliu).
- 6.8 Variația lui  $\omega$  la viteza vântului variabilă în timp și  
 $\omega(0) = 243. [rad/s]$
- 6.9 Caracteristicile puterii  
6.10 Variația în timp a VUM  
6.11 Variația în timp a puterii  $P_{GSMP}$
- 6.12 Variația în timp a lui R și  $\omega$  la  
 $\frac{dR}{dt} = 4.5064 \times 10^{-2} \frac{d\omega}{dt} + 0.01(\omega - 550.07)$
- 6.13 Variația în timp a lui R și  $\omega$  la  
 $\frac{dR}{dt} = 4.5064 \times 10^{-2} \frac{d\omega}{dt} + 0.1(\omega - 550.07)$
- 6.14 Variația în timp a lui R și  $\omega$  la  
 $\frac{dR}{dt} = 4.5064 \times 10^{-2} \frac{d\omega}{dt} + 0.001(\omega - 550.07)$
- 6.15 Variația în timp a lui R și  $\omega$  la  
 $\frac{dR}{dt} = 4.5064 \times 10^{-2} \frac{d\omega}{dt} + 0.0001(\omega - 550.07)$
- 6.16 Variația în timp a lui R și  $\omega$  la  
 $\frac{dR}{dt} = 4.5064 \times 10^{-2} \frac{d\omega}{dt} - 0.0001(\omega - 550.07)$
- 6.17 Variația în timp a lui R și  $\omega$  la  
 $\frac{dR}{dt} = 4.5064 \times 10^{-2} \frac{d\omega}{dt} - 0.001(\omega - 550.07)$
- 6.18 Variația în timp a lui R și  $\omega$  la  
 $\frac{dR}{dt} = 4.5064 \times 10^{-2} \frac{d\omega}{dt} - 0.01(\omega - 550.07)$
- 6.19 Variația în timp a lui R și  $\omega$  la  
 $\frac{dR}{dt} = 4.5064 \times 10^{-2} \frac{d\omega}{dt} - 0.1(\omega - 550.07)$
- 6.20 Conducerea sistemului TV+GSMP  
7.1 Variația vitezei vântului în timp  
7.2.a Variația puterii în timp  
7.2.b Dependența puterii de VUM,  $\omega$   
7.3 Variația în timp a VUM  
7.4 Variațiile în timp a vitezelor  $V(t), V_{ECH}$  și  $V_{MEDIU}$

- 7.5 Variația în timp a lui  $\omega_{OPTIM}$
- 7.6.a Variația în timp a puterii
- 7.6.b Variația în timp a puterii (detaliu)
- 7.7.a Variația în timp a rezistenței de sarcină (detaliu)
- 7.7.b Variația în timp a rezistenței de sarcină
- 7.8 Variația în timp a lui  $\omega$
- 7.9 Variația puterilor în timp
- 7.10.a Variația în timp a lui  $\omega$  la  $V_{MEDIU}$  și  $V_{REAL}$
- 7.10.b Variația în timp a lui  $\omega$  la  $V_{MEDIU}$  și  $V_{REAL}$  (detaliu)
- 7.11 Variația în timp a lui  $\omega$  și zona de optim
- 7.12 Variația în timp a lui  $\omega$
- 7.13 Variația în timp a lui  $\omega$  la  $R_t = 364.55[\Omega]$
- 7.14 Variația în timp a puterilor
- 7.15 Conducerea optimală a sistemului
- 7.16 Caracteristicile puterii la  $V=ct$
- 7.17 Variația în timp a VUM la pasul 2
- 7.18 Variația în timp a VUM la pasul 3
- 7.19 Variația în timp a VUM la pasul 4
- 7.20 Variația în timp a VUM la rezistențe de sarcină mici
- 7.21 Caracteristicile puterilor la TV
- 7.22 Puterea echivalentă a turbinei
- 7.23 Variația în timp a VUM la pasul 1
- 7.24 Variația în timp a VUM la pasul 2
- 7.25 Variația în timp a VUM la pasul 3
- 7.26 Variația în timp a VUM la pasul 4
- 8.1 Caracteristicile puterilor la TV
- 8.2 Variația în timp a VUM
- 8.3 Puterea echivalentă la TV
- 8.4 Variația în timp a VUM(DETALIU)
- 8.5 Variația în timp a VUM
- 8.6 Caracteristicile puterilor
- 8.7 Modelele matematice ale TV
- 8.8 Sistemul de conducere
- 8.9 Zona lui  $\omega_{OPTIM}$
- 8.10 VUM reală și echivalentă
- 9.1 Caracteristicile puterilor la TV
- 9.2 Dependențele puterilor de VUM,  $\omega$
- 9.3 Schema electrică a AE
- 9.4 Variația în timp a VUM pentru 3 viteze ale vântului
- 9.5 Variația în timp a VUM (detaliu)
- 9.6 Variația în timp a VUM
- 9.7 Puterea echivalentă la TV
- 9.8 Sistemul de conducere
- 9.9 Variația în timp a VUM
- 9.10 Zona lui  $\omega_{OPTIM}$
- 9.11 VUM reală și echivalentă

- 9.12 Sistem eolian cu stocare în AE
- 9.13 Variația în timp a lui  $\omega$  cu  $R_s = 0.5[\Omega]$
- 9.14 Variația în timp a curentului cu  $R_s = 0.5[\Omega]$
- 9.15.a Variația în timp a lui  $\omega$  fără  $R_s$
- 9.15.b Variația în timp a VUM fără RS și la  $E=ct$
- 9.16 Variația în timp a curentului fără RS
- 9.17 Dependența puterilor de  $\omega$
- 9.18 Caracteristicile puterii
- 9.19 Variația în timp a lui  $\omega$
- 9.20 Zona optimă a puterii
- 9.21 Caracteristicile puterii și punctul de funcționare
- 10.1.a Variația în timp a VUM
- 10.1.b Variația în timp a VUM(detaliu)
- 10.2 Caracteristica puterii
- 10.3 Variația în timp a VUM
- 10.4 Variația vitezei vântului în timp
- 10.5 Variația în timp a VUM
- 10.6 Variația în timp vitezei vântului
- 10.7 Variația în timp a VUM
- 10.8 Modelele matematice ale TV
- 10.9.a Modele matematice simplificate ale TV
- 10.9.b Modele matematice simplificate ale TV (detaliu)
- 10.10 Variația în timp a VUM
- 10.11 Caracteristica puterii
- 10.12 Variația în timp a VUM
- 10.13 Variația în timp a vitezei vântului
- 10.14 Variația în timp a VUM
- 10.15 Variația în timp a VUM (detaliu)
- 10.16 Variația în timp a vitezei vântului (detaliu)
- 10.17 Caracteristica puterii la TV
- 10.18 Variația în timp a VUM
- 10.19 Variația în timp a VUM
- 10.20 Caracteristica puterii la  $V=22$  [m/s]
- 10.21 Sistemul de conducere

## Listă de tabele

<b>Nr. Tabel</b>	<b>Denumire</b>
2.1	Elemente tehnico-economice de exploatare a potențialului energetic al zonelor eoliene din România
2.2	Potențialul energetic național al SRE
3.1	Scheme de promovare a SRE
3.2	CV tranzacționate în perioada 2007-2009
3.3	Evoluția costurilor pentru diferite tipuri de turbine eoliene
3.4	Evoluția costului unui kWh produs în CEE
3.5	Prețul prognozat al energiei la nivelul anilor 2015 - 2030 IEA2008

## INTRODUCERE

Creșterea consumului energetic global și reducerea permanentă a rezervelor energetice, în special cele fosile : cărbuni, petrol, gaze naturale, necesită atragerea unor noi surse alternative, regenerabile cum ar fi : energia vântului și energia solară.

Problematika abordată de autor, în prezenta teză de doctorat, se referă la problemele ce le ridică dinamica sistemelor electroenergetice eoliene.

Studii complete [1,2,11,38] și recente arată că peste 3[m/s], viteza anuală a vântului, sistemele electroenergetice eoliene sunt rentabile.

Se pot menționa și Directivele Comunității Europene care impun o anumită cantitate de energie electrică să fie obținută din energii regenerabile (vânt, apă, soare).

Se poate, deci, afirma că domeniul analizat se va dezvolta și în continuare, fiind în atenția specialiștilor, mai ales că se estimează consumarea combustibililor fosili (cărbune, petrol, gaze) în următorii zeci de ani (50 de ani petrol, gaze, 200 ani cărbune).

Analiza dinamicii acestor sisteme se impune în mărirea fiabilității în funcționare și reducerea avariilor, făcând oportună și necesară această lucrare.

### 1.1. Oportunitatea și obiectivele tezei

Cunoașterea comportării acestor sisteme electroenergetice eoliene este esențială în :

- estimarea valorilor de șoc permise pentru sarcină ;
- aprecierea comportării dinamice a sistemului ;
- alegerea corectă a punctelor de funcționare având în vedere faptul că la aceeași sarcină sistemul poate funcționa, uneori , în 2 puncte ;
- stabilirea caracterului : stabil sau instabil a punctelor de funcționare ;
- conceperea unor algoritmi de conducere pentru diverse situații, dar cu precădere pentru asigurarea funcționării în punctul de putere maximă a turbinei de vânt ;
- analizarea structurilor de conducere propuse(și originale), în regim staționar și dinamic.

În elaborarea tezei de doctorat s-au avut în vedere următoarele obiective fundamentale:

- elaborarea modelelor matematice ale sistemelor electroenergetice eoliene ;
- stabilirea limitelor de funcționare statice și dinamice la modificări ale sarcinii ;
- stabilirea naturii ,stabil sau instabil, a punctului (sau punctelor) de funcționare ;
- realizarea unor sisteme de reglaj static și dinamic stabile, astfel încât tensiunea și frecvența să fie în limitele impuse ;
- simularea sistemelor electroenergetice eoliene la variații ale sarcinii;
- analizarea unor sisteme electroenergetice eoliene existente în literatură și pe baza lor conceperea unor sisteme noi ;



- conceperea unor scheme de conducere astfel încât să se realizeze funcționarea în punctul de putere maximă a TV ;
- simulări ale sistemului electroenergetice eoliene la modificări ale vitezei vântului și ale sarcinii la generator ;
- prezentarea contribuțiilor autorului în problematica teoretică de modelare, simulare și estimare a stabilității dinamice a sistemelor electroenergetice eoliene.

Contribuțiile de ordin teoretic : modelarea și simularea sistemelor electroenergetice eoliene și analiza stabilității dinamice a acestor sisteme, corelarea rezultatelor de regim staționar cu cele de regim tranzitoriu, conferă lucrării un caracter de originalitate și aplicabilitate practică în energetica resurselor regenerabile.

## 1.2. Prezentarea conținutului tezei de doctorat

Obiectivele propuse au condus la structurarea lucrării pe 12 capitole al căror conținut este , sumar, dat în cele ce urmează.

În capitolul 1 se ilustrează oportunitatea și obiectivele lucrării și s-a menționat importanța obținerii de energie electrică din energie eoliană, sursă regenerabilă și cu potențial ridicat în România.

În capitolul 2 se prezintă stadiul actual al cercetărilor din acest domeniu . Sunt analizate cele mai importante lucrări, pe baza cărora autorul își va construi modelele matematice pentru analiza sistemelor electroenergetice eoliene. Modelele matematice ale turbinelor și generatoarelor sunt concepute de autor pentru cazul general -regimuri tranzitorii,pe baza lucrărilor din domeniu.

În capitolul 3 se realizează o sinteză a principalelor aspecte ce privesc integrarea surselor regenerabile de energie de putere mare în sistemele electroenergetice actuale. Se analizează energia eoliană și implicit centralele electrice eoliene (CEE).

Scopul capitolului 3 constă în a realiza o sinteză a principalelor aspecte ce privesc integrarea surselor regenerabile de energie de putere mare în sistemele electroenergetice actuale. Se analizează energia eoliană și implicit centralele electrice eoliene (CEE). Sunt prezentate atât problemele legate de legislație cât și aspectele economice și tehnice. În condițiile în care cererea de energie este în continuă creștere utilizarea surselor regenerabile de energie,(SRE), este soluția pentru a asigura necesarul de energie și funcționarea în condiții de siguranță și eficiență ridicată a sistemelor electroenergetice. Se analizează aspectele tehnice, economice și cele legislative specifice României.

În capitolul 4 se analizează dinamica unui sistem eolian și energia înmagazinată în acumulatori electrice la viteze ale vântului variabile în timp. La puteri mici și în zone izolate energia eoliană înmagazinată în acumulatori electrice este o soluție optimă din punct de vedere economic. Energia mecanică captată de turbina de vânt se transformă în energie electrică de către generatorul sincron cu magneți permanenți. Generatorul sincron cu magneți permanenți debitează, prin intermediul unui redresor, energie într-o baterie de AE, în două variante: varianta 1-redresor necomandat și varianta 2-redresor comandat și sarcină adaptată. Prin simulare se determină diferențele între cele două variante.

În capitolul 5 se analizează procesele dinamice și se dau metode de conducere originale a sistemelor electroenergetice eoliene, SEE, bazate pe măsurarea vitezei vântului și a turației de la generator. Prin determinarea unei viteze echivalente a vântului se poate determina turația optimă din punct de vedere energetic și astfel se modifică sarcina la generator pentru a asigura o funcționare în zona optimă.

În capitolul 6, se realizează o estimare a maximului energetic la sisteme eoliene funcționând la viteze ale vântului variabile în timp. Se determină turația la care energia captată este maximă. Aceasta impune controlul turației și cuplului la turbină și adaptarea sarcinii generatorului la viteza vântului. Determinarea turației corespunzătoare energiei maxime date de turbina de vânt este obiectivul principal al acestei lucrări.

Capitolul 7 este consacrat dinamicii sistemelor eoliene funcționând la viteze ale vântului variabile în timp. Această analiză se bazează pe simulări numerice ce au la bază ecuația mișcării. Pe baza măsurării vitezei vântului și a turației la generator se definesc două mărimi fundamentale: viteza echivalentă a vântului și viteza unghiulară mecanică optimă, aceasta din urmă fiind o funcție de viteza echivalentă a vântului. Se dau studiile efectuate pentru captarea unei energii maxime pe o durată lungă de timp la variații mari ale vitezei vântului.

În capitolul 8 se pun bazele unor noțiuni fundamentale privind dinamica unui sistem eolian, în sensul introducerii conceptului de putere echivalentă a turbinei, asociată cu viteza vântului variabilă în timp. Din proba la funcționarea în gol se pot obține informații deosebit de utile privind caracteristicile puterii turbinei de vânt și se pot determina zonelor de maxim energetic la viteze ale vântului variabile în timp prin cunoșterea turației optime.

În capitolul 9 se determină energia înmagazinată în acumulatori electrice, la un sistem eolian funcționând la viteze ale vântului variabile în timp. Energia mecanică captată de turbina de vânt se transformă în energie electrică și se stochează într-o baterie de AE, în două variante: varianta 1-redresor necomandat și varianta 2-redresor comandat și sarcină adaptată. Prin simulare se determină diferențele între cele două variante.

Capitolul 10 este consacrat determinării VUM optime din VUM stabilizată la funcționarea în gol, obținută din măsurători de turație. Cunoscând VUM de la funcționarea în gol, în regim stabilizat, se definește o viteză echivalentă, constantă, pe baza vitezei reale a vântului.

În capitolul 11 se determină experimental caracteristica puterii la o turbină de vânt.

Ultimul capitol cuprinde concluziile generale ale tezei de doctorat 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. Se dau în acest capitol, cele mai importante contribuții originale aduse de autor în prezenta lucrare. Cu excepția primelor două capitole, care prezintă oportunitatea și obiectivele lucrării și sunt o sinteză a literaturii din acest domeniu, toate celelalte capitole sunt originale în întregime prin contribuțiile aduse în analiza dinamicii sistemelor eoliene funcționând la viteze ale vântului variabile în timp.

Rezultatele cercetării au fost valorificate în cadrul unor contracte de cercetare științifică încheiate între Universitatea „Politehnica” din Timișoara și cotate ISI Thomson și 3 în alte BDI.

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 prin:

- implementarea metodelor de optimizare din punct de vedere energetic și la centralelor eoliene ce funcționează în prezent la randamente scăzute;
- extinderea instrumentului software pentru analiza dinamici sistemelor eoliene atât în faza de proiectare cât și în faza de exploatare.
- folosirea rezultatelor obținute la conceperea sistemelor de conducere optimale din punct de vedere energetic;
- implementarea soluțiilor date simple și deosebit de economice la sistemele cu stocarea energiei în acumulatele electrice.

## 2. EVOLUȚIA SURSELOR DE ENERGIE REGENERABILE ÎN BALANȚA ELECTROENERGETICĂ GLOBALĂ

Capitolul al 2-lea este consacrat analizei pe plan internațional și național a ponderilor energiilor regenerabile. Evoluția energiei electrice în timp demonstrează faptul că fără atragerea unor surse de energii regenerabile nu mai este posibilă realizarea creșterii energetice ca până în prezent [69]. În principal se are în vedere energia eoliană și cea solară într-un sistem electroenergetic integrat ce se poate implementa cu tehnologia actuală în multe aplicații. Deoarece în general energiile regenerabile, preponderent la sistemele eoliene și solare, sunt dependente de condițiile meteo, care sunt aleatorii, se impune folosirea unui sistem de stocare pentru a exista o disponibilitate pe tot parcursul timpului.

### 2.1. Considerații preliminare

În contextul actual al crizei energetice mondiale, problematica analizării unor surse regenerabile de energie este oportună, necesară și cu un deosebit impact economic [2,5,8]. Desigur, apar o serie de probleme ridicate de fluctuația energiei, în sensul că: energia solară poate varia de la valoarea maximă  $1\text{KW}/\text{m}^2$  (cer senin), până la valori foarte mici, iar energia eoliană depinde semnificativ de viteza vântului la puterea a 3-a.

Având în vedere fluctuația energiei eoliene și solare, se impune a fi analizate soluțiile de stocare a energiei și de diminuare a fluctuațiilor de putere [3,4].

În ultimii ani, sursele de energie regenerabile, pentru alimentarea cu energie electrică, au primit o atenție considerabilă, ca urmare a preocupărilor globale asociate cu penuria de energie la nivel mondial[1-8]. În contextul unei expansiuni rapide a pieței, pentru energie distribuită, un interes major este reprezentat de sistemele de energie eoliană. O problemă majoră de conversie a energiei eoliene în ceea ce privește integrarea în sistemul energetic, este dependența directă a energiei de variațiile vitezei vântului în timp[6].

De asemenea, o problemă importantă este controlabilitatea sistemului, luând în considerare faptul că energia eoliană este fluctuantă. În general, majoritatea comunităților izolate în lume sunt alimentate cu energie electrică produsă de generatoare Diesel care nu sunt destul de avantajoase, din cauza consumului de carburant și de preț. În scopul de a reduce costurile consumului de energie, investigarea surselor regenerabile de energie reprezintă o alternativă interesantă[9]. În acest caz, necesitatea de depozitare a energiei devine și mai importantă în special în ceea ce privește costurile mari cu energia în timpul perioadei de sarcină maximă și ridicarea constantă a sarcinii de bază în rețele[10]. Datele statistice referitoare la potențialele energiilor regenerabile din România demonstrează faptul că într-un viitor apropiat se impun și la noi investiții importante în acest domeniu din ce în ce mai important în balanța economică[4].

## 2.2. Producerea energiei din surse neconvenționale

În etapa actuală omenirea beneficiază, de trei categorii de surse de energie electrică, bazate pe:

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

*Sursele regenerabile* sunt sursele care se regenerează pe măsură ce sunt consumate[11].

O clasificare a surselor regenerabile de energie , SRE, se poate face în funcție de tipul energiei primare utilizate:

- energia solară ;
- energia eoliană ;
- hidroenergia ;
- biomasa și biogazul ;
- energia geotermală ;
- gazele rezultate din fermentarea deșeurilor (gazul de depozit) ;
- energia valurilor ;
- energia curenților marini;
- energia mareelor .

La nivel global, cea mai mare utilizare o au primele 4 energii enumerate mai sus, ponderea celorlalte fiind mai mică, dar în creștere.

*Energia geotermală* provine din energia stocată în depozite și zăcăminte hidrogeotermale subterane. La nivel mondial, această energie este utilizată atât pentru producere de energie electrică cât și termică, centralele de acest tip fiind prezente în peste 20 de țări. Puterea instalată la nivel mondial este de 10 [GW], producția anuală fiind de peste 60 [TWh].

*Biogazul și gazele de fermentare a deșeurilor* sunt produse din resturi vegetale și/sau animale sau din reziduuri și pot fi utilizate pentru producerea de energie termică sau electrică.

*Energia valurilor* este strâns legată de energia eoliană, potențialul acestui tip de energie fiind determinat de frecvența și intensitatea vânturilor care pun în mișcare stratul superficial de apă al Oceanului Planetar. Prima fermă generatoare de energie electrică care utilizează energia valurilor a fost inaugurată în 2008 în Portugalia, având o putere instalată de 2,25 [MW].

*Energia curenților marini* rezultă din mișcările orizontale ale unor mase mari de apă, sub influența vântului, a diferențelor de densitate, de temperatură sau salinitate dintre două puncte.

*Energia mareelor* este determinată de atracția exercitată de Soare și Lună asupra apei mărilor și oceanelor. Valorificarea economică a mareelor este posibilă numai acolo unde diferența de nivel dintre flux și reflux depășește 8 m, fenomen întâlnit cel mai adesea în golfuri și strâmțori. Centrala cu cea mai mare putere instalată se găsește în Coreea de Sud [254 MW], urmată de prima centrală construită în 1966 în Franța de 240 [MW].

În anul 2009 sursele de energie regenerabilă reprezentau 25% din capacitățile de producție a energiei electrice din piața globală (1,23 GW din totalul

de 4,8 GW), respectiv 50% din noile investiții în sectorul energetic global[69]. Toate prognozele și programele guvernamentale prevăd că energia produsă pe bază de surse regenerabile cunoscute azi și surse viitoare noi, inovative, va fi cea care va furniza lumii cea mai mare parte din nevoile de energie până în anul 2050 [IEA / OECD; 2003; EC-WETO, 2006; EREC & Greenpeace, 2007; WEC, 2007; SHELL, 2008; EREC, 2010; EREC & Greenpeace, 2010].

Criteriile principale care determină perspectivele exploataării surselor de energie regenerabile sunt[22]:

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

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[15].

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.

Dezavantajele care au reținut un timp îndelungat implementarea pe scară largă a acestora sunt[17]:

- 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.

### **2.2.1. Potențialul surselor regenerabile de energie din România. Energia eoliană**

Turbina eoliană împreună cu generatorul electric realizează conversia energiei eoliene în energie electrică. Există două configurații generale de bază în funcție de axa de rotație a paletelor rotorului turbinei[4,5,8]:

- 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.

Elementele principale ale unui sistem de conversie a energiei eoliene sunt: rotorul turbinei cu paletelile 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[32,31]. De asemenea, turbinele de vânt sunt sau nu echipate cu un sistem de reglare a pasului paletelor și cu un echipament de monitorizare și control. Turbina eoliană extrage continuu energia cinetică din vânt cu o decelerare a masei de aer și o introduce la generator ca putere mecanică.

În România s-au identificat cinci zone eoliene distincte în funcție de potențialul energetic existent, de condițiile de mediu și topografice. Harta eoliană a României s-a elaborat luând în considerare potențialul energetic a resurselor eoliene la înălțimea medie de 50 metri, pe baza datelor și informațiilor meteogeografice colectate începând din anul 1990, până în prezent[5].

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")[5]. În regiuni cu potențial eolian relativ bun s-au localizat amplasamente favorabile, dacă se urmărește "exploatarea energetică a efectului de curgere peste vârful 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[8].

Tabelul 2.1. Elemente tehnico-economice de exploatare a potențialului energetic al zonelor eoliene din România

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

Valorificarea potențialului energetic eolian, în aceste condiții de eficiență economică, impune folosirea unor tehnologii și echipamente adecvate (grupuri aerogeneratoare cu putere nominală de la 750 kW până la 6000 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.

### 2.2.2. 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 două modele de bază:

- 1) Prețul energiei produse din surse regenerabile este stabilit administrativ;
- 2) Prețul certificatelor de energie verde este stabilit pe piața energiei.

CertIFICATELE VERZI sunt emise pentru producători[17], pentru fiecare unitate de 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.

În anul 2010, cifra de afaceri cu comerțul din Certificate Verzi în Europa a fost de 20 miliarde euro.

#### **Premise de valorificare a surselor regenerabile de energie în România**

Obiectivele generale ale Strategiei de valorificare a surselor regenerabile de energie constau în[16]:

- 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.

Varianta optimală este combinarea într-un sistem a instalațiilor eoliene și solare. Asemenea sisteme 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 elicei și viteza vântului la puterea a treia.

Parametrul tehnic 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 statică 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[33].

Cu toate că energia eoliană este considerată o opțiune energetică ecologică, ea are unele influențe negative asupra mediului legate de utilizarea sa[34]. 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 mult mai silențioase. Impactul asupra vieții păsărilor pare să fie o problemă relativ minoră. În afara faptului că sunt competitive ca și cost și ecologice, energia eoliană are unele avantaje față de instalațiile de 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[77,78].

Energiile regenerabile sunt în prezent unele dintre primele preocupări ale societății umane moderne, din întreaga lume. În urma protocolului de la Kyoto, și a summitului de la Copenhaga din 2009, marea majoritate a țărilor au convenit să reducă gradul de poluare a agenților responsabili pentru schimbările climatice. Această decizie presupune reducerea utilizării de cărbune, petrol și gaze naturale în procesele de producție energetice, înlocuirea lor cu sisteme regenerabile de conversie a energiei ca, de exemplu, hidrocentrale mici sau energia eoliană. Aceste două surse de energie au un mare potențial de dezvoltare, fiind capabile să concureze cu centralele termice clasice[78,79].

Industria producătoare de tehnologii și echipamente pentru energiile regenerabile a fost într-o explozie continuă privind capacitățile și multitudinea de locații de producție.

Industria producătoare de turbine eoliene are cel mai proeminent reprezentant în China, prin aproape 70 de companii producătoare de turbine și alte echipamente. Cu toate acestea, principalii producători de turbine la nivel mondial sunt Vestas (Danemarca), GE Wind (SUA) și Gamesa (Spania). Primii 10 producători sunt responsabili pentru circa 80 % din totalul de turbine produse în lume.

Interesul mare cu privire la utilizarea SRE pentru producerea energiei electrice s-a datorat în mare parte reglementărilor cu privire la protecția mediului, reducerea emisiilor de carbon și politicilor utilizării SRE, adoptate atât la nivel regional cât și global.

Primul pas pentru atingerea obiectivelor legate de limitarea poluării mediului ambiant a fost făcut prin semnarea Protocolului de la Kyoto, în 1995 [Kyoto1995]. Conform acestuia, țările industrializate sunt obligate să limiteze sau să reducă emisiile de gaze cu efect de seră (CO<sub>2</sub>, metan, gaze industriale etc.). Micșorarea emisiilor trebuie făcută cu 5 % sub valoarea nivelului din anul de referință (1990), în decursul primei perioade de angajament, și anume 2008-2012. Aceste prevederi legate de emisii nu se aplică țărilor în curs de dezvoltare.

Protocolul a intrat în vigoare abia în 16 februarie 2005, fiind ratificat de 187 de state, inclusiv de membrii Uniunii Europene. Prin ratificarea acestui tratat, Uniunea Europeană face dovada abordării cu maximă responsabilitate a problemelor de mediu și devine lider mondial în promovarea tehnologiilor curate.

În vederea atingerii acestor ținte, guvernele trebuie să aibă în vedere un orizont larg și să sprijine noile surse de combustibil sau opțiuni tehnologice. Atât energia nucleară, energia hidro la puteri mari dar și captarea și stocarea carbonului trebuie să rămână în atenție, împreună cu tehnologiile disponibile pentru energiile regenerabile. Nu trebuie lăsată la o parte nicio sursă sau formă de energie pentru a nu prejudicia

obiectivele politice privind securitatea, competitivitatea energiei și combaterea modificării climatului. În plus, trebuie pus accentul pe utilizarea tehnologiilor de stocare a energiei, atașate surselor regenerabile, astfel încât să se asigure echilibrarea cantității de energie electrică între perioadele de vârf de sarcină și cele de gol de sarcină: apa acumulată prin pompaj, hidrogen, baterii de condensatoare de generații viitoare, volanți.

Odată cu anul 2007, s-au operat modificări cu privire la țintele impuse de UE. Astfel, pentru anul 2020 se dorește ca aportul SRE la consumul total de energie să fie de 20 %. Pentru aceasta, energia electrică produsă din SRE trebuie să reprezinte 34 %.

Pentru atingerea obiectivelor, Directiva impune statelor membre o serie de măsuri de încurajare a producției de energie electrică din SRE și crearea de facilități pentru agenții economici care valorifică astfel de resurse:

- stabilirea unei cote țintă pentru fiecare țară, privind consumul de energie electrică produsă din SRE ;
- introducerea unor scheme financiare de suport pentru producția din SRE ;
- simplificarea procedurilor administrative pentru proiectele care valorifică SRE ;
- acces garantat și prioritar la rețelele de transport și distribuție pentru energia electrică provenită din SRE ;
- garantarea originii energiei electrice produse din SRE .

Mecanismele de promovare a SRE sunt:

- ajutorul acordat pentru investiții ;
- sprijinul direct prin prețurile practicate pentru fiecare tip de SRE ;
- sprijinul pentru activitatea de cercetare-dezvoltare ;
- ajutorul indirect pentru dezvoltarea diferențiată pe fiecare tip de SRE ;
- adoptarea unor măsuri fiscale de promovare.

### **2.2.3. Strategia în domeniul SRE în România**

România dispune de o gamă diversificată de resurse de energie primară: țigăi, gaze naturale, cărbune, minereu de uraniu, precum și de un potențial valorificabil de resurse regenerabile important.

Conform studiilor de specialitate, potențialul energetic al SRE din România, este redat în tabelul 2.2.

În ultimii ani, importurile de resurse primare de energie au înregistrat o creștere continuă, reprezentând circa o treime din totalul resurselor de energie primară. Mai mult, prognozele pentru perioada următoare nu sunt prea optimiste. Se estimează că la nivelul anului 2015 dependența de importurile de resurse primare de energie va ajunge la aproximativ 50 % din total, cu o creștere de 3 % pe an.

Tabelul 2.2. Potențialul energetic național al SRE

SRE	Potențialul energetic anual	Tipul energiei
Biomasă	318 x 10 <sup>6</sup> GJ	energie termică
Energie eoliană	23.000 GWh	energie electrică
Energia geotermală	7 x 10 <sup>6</sup> GJ	energie termică
Energie hidro din care: < 10 MW	40.000 GWh 6.000 GWh	energie electrică
Energie solară:		
• termică	60 x 10 <sup>6</sup> GJ	energie termică
• fotovoltaică	1.200 GWh	energie electrică

Accelerarea ritmului de exploatare a SRE din România, se justifică prin beneficiile pe care acestea le conferă:

- creșterea securității în alimentarea cu energie;
- promovarea dezvoltării regionale;
- asigurarea normelor de protecție a mediului;
- diminuarea emisiilor de gaze cu efect de seră;
- asigurarea, după caz, a alimentării cu energie a comunităților izolate, prin valorificarea potențialului SRE locale.

Susținerea proiectelor de investiții și identificarea surselor de finanțare în domeniul SRE, se vor realiza prin următoarele acțiuni:

- inițierea unor acțiuni legislative și instituirea cooperării instituționale directe între autoritatea centrală și autoritățile executive locale ;
- atragerea de fonduri directe pentru exploatarea SRE, inclusiv prin mecanisme aplicate conform Protocolului de la Kyoto ;
- susținerea implementării proiectelor în domeniul gestiunii și valorificării deșeurilor (producere de biogaz, utilizare deșeuri forestiere la producerea energiei termice, incinerare deșeuri urbane cu recuperarea căldurii etc.);
- valorificarea potențialului energetic al râurilor interioare, prin construirea de centrale hidroelectrice de mică putere (max. 10 MW).

Odată cu aderarea României la Uniunea Europeană, s-au stabilit anumite ținte care trebuie atinse pentru a se alinia la efortul comun al statelor membre în a promova și utiliza SRE. Astfel, prevederile Directivei Europene 77/2001/CE s-au transpus pentru Romania prin Hotărârea de Guvern nr. 443 din 2003 [HG443/2003]:

- ținta națională de 33 % energie electrică produsă din SRE în consumul național brut de energie electrică, pentru anul 2010 ;
- termene și responsabilități clare pentru ministerul de resort și autoritățile compe-tente, respectiv Autoritatea Națională de Reglementare în Domeniul Energiei (ANRE) și Agenția Română pentru Conservarea Energiei (ARCE) ;
- obligativitatea introducerii de scheme de sprijin a energiei produse din SRE, compatibile cu principiile mecanismelor de piață ;
- necesitatea eliminării eventualelor bariere administrative sau de reglementare în promovarea energiei produse din SRE ;
- obligativitatea certificării originii energiei electrice produse din SRE .

Beneficiarii sistemului de promovare a producerii de E-SRE sunt producătorii de energie electrică din sursele regenerabile: eoliană, solară, geotermală, biomasă, a valurilor, hidrogen, precum și energia electrică produsă în centralele hidroelectrice cu o putere instalată mai mică sau egală cu 10 MW, puse în funcțiune sau modernizate începând cu anul 2004.

În contextul ultimilor ani, analizând evoluția piețelor energetice precum și factorii de natură economică, politică și de mediu care influențează această evoluție, principalele cerințe cu privire la energie pot fi sintetizate astfel: energia să fie curată, sigură, disponibilă pentru toți și prețul ei să fie competitiv.

Sub aceste aspecte, asigurarea securității energetice și continuarea procesului de dezvoltare a societății, presupune urmărirea a două direcții: fie creșterea eficienței în utilizarea combustibililor fosili (în condițiile în care cărbunele rămâne combustibilul principal), fie utilizarea pe scară largă a energiei obținute din surse regenerabile.

Utilizarea pe scară largă a SRE reprezintă principala direcție ce este urmată deoarece determină creșterea gradului de siguranță energetică atât pentru prezent, cât mai ales pentru viitor.

Din multitudinea de SRE, chiar și în condițiile unor costuri inițiale destul de mari, energia eoliană prezintă cea mai mare rată de integrare și utilizare în SEE actuale, după hidroenergia, atât la nivel global cât și în România.

### **2.3. Sisteme electroenergetice eoliene**

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

Datorită fluctuațiilor de putere cauzate de factorii meteo energia eoliană și cea solară se modifică semnificativ chiar și pe intervale de timp de ordinul orelor, ceea ce face necesar să se implementeze în locațiile respective sisteme de stocare a energiei care să poată oferi consumatorilor energia necesară la valorile și momentele de timp impuse de aceștia[73,74].

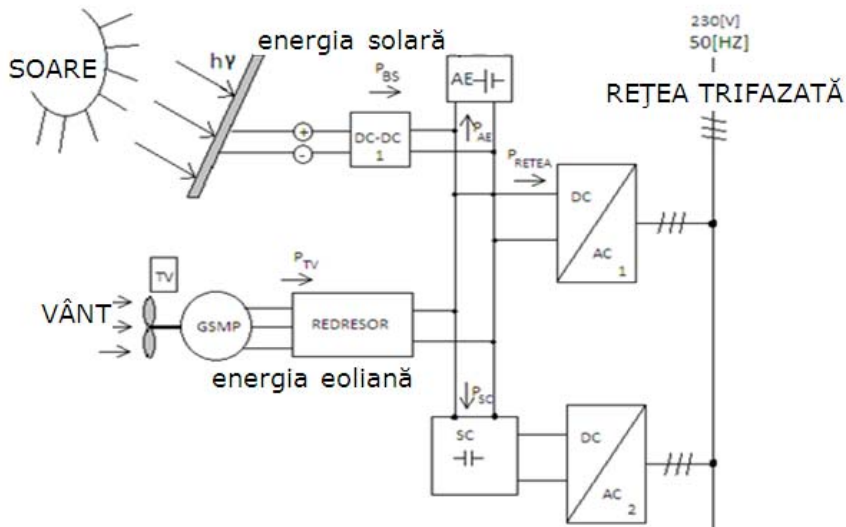


Fig.2.1.Sistem electroenergetic cu baterii solare și turbină de vânt

Sistemele de stocare trebuie să preia fluctuațiile de putere ce apar datorită variației vitezei vântului în timp și a modificării nivelului de radiații solare. Se transferă astfel, în sistemul electroenergetic național (SEN) o putere constantă pe un anumit interval de timp, fapt deosebit de pozitiv în ceea ce privește stabilitatea dinamică a Sistemului Electroenergetic Național (SEN).

Preluarea surplusului de putere de la (TV+GSMP) și BS în acumuloarele electrice(AE) se realizează până la atingerea unei stări de încărcare (SOC) de 100%, stare estimată prin valoarea tensiunii la bornele AE,. Transferul de putere din AE în rețea se face prin intermediul convertorului DC-AC1. Tensiunea la AE este în jurul tensiunii nominale ( $12.24[-V-]$  sau  $k \cdot 12$ ).

Preluarea surplusului de putere (de la GSMP și BS) în supercondensatoarele SC se face prin încărcarea succesivă acestora la tensiunea  $U_{cc}$ . Transferul de putere de la SC în rețea se face prin convertorul DC-AC2 într-un timp mult mai scurt. În acest mod AE și SC funcționează în mod separat. Supercondensatoarele SC se folosesc la puteri mici, unde și momentele de inerție mecanice sunt mici și deci rafalele de vânt influențează semnificativ valorile vârfurilor de putere. La puteri de ordinul MW folosirea SC nu se justifică și deci sistemul de stocare conține numai AE[75].

Sistemul electroenergetic reprezentat în figura 2.1 pe baza bateriilor solare și a turbinei de vânt poate oferi o soluție completă la o funcționare insulară, în sensul că atunci când nu este vânt energia electrică se obține de la soare și invers. Iar în perioadele fără vânt și soare, energia necesară consumatorilor se obține din sistemul de stocare.

Stocarea de energie în acumuloarele electrice(AE),poate fi considerată ca un suport pentru energia eoliană.

Energia anuală primită de la SOARE este cu mult mai mare decât energia globală consumată de populație, așa cum se poate observa din figura alăturată[16].

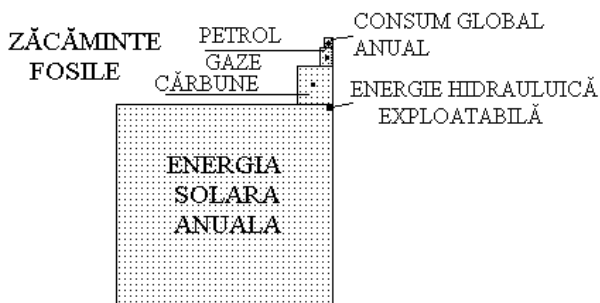


Fig.2.2.Energia solară anuală

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 hidroelectrică exploatabilă este o cotă extrem de redusă din energia solară anuală ajunsă pe Pământ.

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

## 2.4. Analiza soluțiilor existente în domeniul sistemelor electroenergetice eoliene

Analizând literatura de specialitate s-a constatat faptul ca în mai toate lucrările se preconizează captarea unei energii maxime de la vânt [70,72].

Se tinde, deci, a se funcționa cu sistemele electroenergetice eoliene la putere maximă.

Problema funcționării sistemului turbină de vânt + generator sincron, (TV+GSMP), este complexă sub următoarele aspecte:

1. Variația vitezei vântului în timp este imprevizibilă[10,14,16];
2. Valorile maxime și minime ale vitezei vântului sunt semnificative, deci domeniul de reglaj este mare[2,3] ;
3. Captarea unei energii eoliene maxime impune un efort suplimentar tehnic și economic[5,6] ;
4. Funcționarea în zona optimă din punct de vedere al energiei este imposibilă din cauza momentelor de inerție mari,[8,9], ceea ce face ca turația grupului TV+ GSMP să nu poată urmări valorile optime prescrise (punctele de putere maximă). Pentru a funcționa în punctele de putere maximă este necesar să fie îndeplinite cel puțin una din cele două condiții:
  - viteza vântului să nu se modifice rapid în timp,
 sau
  - momentul de inerție echivalent să fie de valoare redusă. În practica curentă la instalațiile eoliene care au atins ordinul MW și în condițiile reale în care viteza vântului variază semnificativ în timp, condițiile de mai sus nu pot fi realizabile [10,15].

5. La funcționarea la viteze ale vântului variabile în timp, generatorul GSMP fiind conectat la rețeaua de tensiune și frecvență date, problemele se complică prin oscilațiile de putere ce pot să apară, oscilații ce pun în pericol stabilitatea sistemului electroenergetic[11,13];
6. Acordarea reguletoarelor este mult diferită de aplicațiile industriale uzuale repetabile [12,14], (reglări ale mișcării, puterii, etc.), deoarece viteza vântului are o variație în timp imprevizibilă și deci constantele reguletoarelor trebuie să fie adaptate la noile condiții meteo de variație a vitezei vântului în timp.

Având în vedere cele de mai sus se pune problema: *LA CE TURAJIE SĂ FUNCȚIONEZE SISTEMUL (TV+ GSMP) PENTRU A SE OBȚINE O VALOARE MAXIMĂ A ENERGIEI ELECTRICE PE UN INTERVAL DE TIMP DE ORDINUL ORELOR, ZILELOR - până când viteza vântului a scăzut sub limita funcțională admisă: 3 [m/s].*

Din bibliografia consultată [ 1-79 ] nu s-a putut găsi rezolvarea la această problemă și din acest motiv, în prezenta lucrare s-a acordat o atenție deosebită acestui domeniu.

## 2.5. Concluzii

Analizând evoluția ultimilor ani se poate trage concluzia că pe plan mondial dezvoltarea energetică s-a făcut și prin atragerea surselor regenerabile de energie și în principal energia eoliană și cea solară. Acestea având, însă, un caracter oscilant se impune stocarea energiei obținute de la soare și vânt pentru perioadele în care captarea acestor energii este foarte mică sau chiar deloc: noaptea, sau la viteze mici ale vântului. După hidroenergie, energia eoliană și cea solară prezintă cea mai mare rată de integrare, atât în România cât și la nivel mondial.

Contribuția personală se referă la realizarea unei documentații la zi privind sursele regenerabile cu specificarea aspectelor particulare ce definesc fiecare sursă în parte. Stadiul actual al utilizării surselor regenerabile soare-vânt pe plan mondial și în România demonstrează interesul pentru abordarea acestui aspect.

Contribuțiile personale ale autorului în acest capitol sunt:

- analiza integrării surselor regenerabile de energie în România și pe plan mondial ;
- s-au evidențiat principalele aspecte care definesc energia eoliană ca principala sursă regenerabilă de energie din punct de vedere al investițiilor ;
- studiu bibliografic sistematizat referitor la sursele regenerabile de energie, în principal eoliene.

### 3. PROBLEMATICA INTEGRĂRII SURSELOR REGENERABILE DE ENERGIE

Scopul capitolului 3 constă în a realiza o sinteză a principalelor aspecte ce privesc integrarea surselor regenerabile de energie de putere mare în sistemele electroenergetice actuale. Se analizează energia eoliană și implicit centralele electrice eoliene (CEE). Sunt prezentate atât problemele legate de legislație cât și aspectele economice și tehnice.

#### 3.1. Considerații preliminare

În condițiile în care cererea de energie este în continuă creștere utilizarea surselor regenerabile de energie,(SRE), este soluția pentru a asigura necesarul de energie și funcționarea în condiții de siguranță și eficiență ridicată a sistemelor electroenergetice.

Se analizează aspectele tehnice,economice și cele legislative specifice României.

#### 3.2. Aspecte legislative

Aspectele legislative și economice stabilesc cadrul integrării și funcționării SRE, în funcție de tehnologia utilizată.

Sistemele electroenergetice actuale,[32] conțin atât centrale termice clasice cât și centrale bazate pe energii regenerabile,centrale care devin din ce în ce mai importante în balanța energetică actuală,figura 3.1.

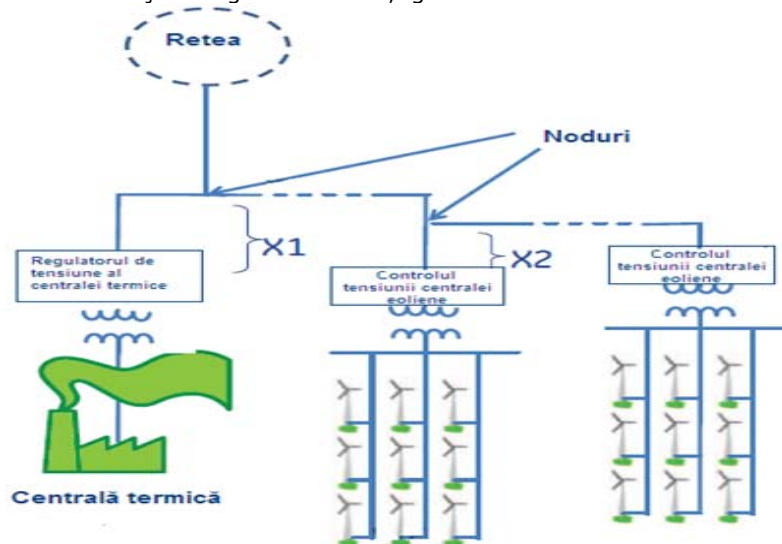


Fig. 3.1.Sistem electrenergetic mixt



Pe baza datelor din [39] se observă evoluția ascendentă a energiei eoliene, pe palan mondial, figura 3.2.

#### 40 de ani de tehnologie de dezvoltare în energetică eoliană

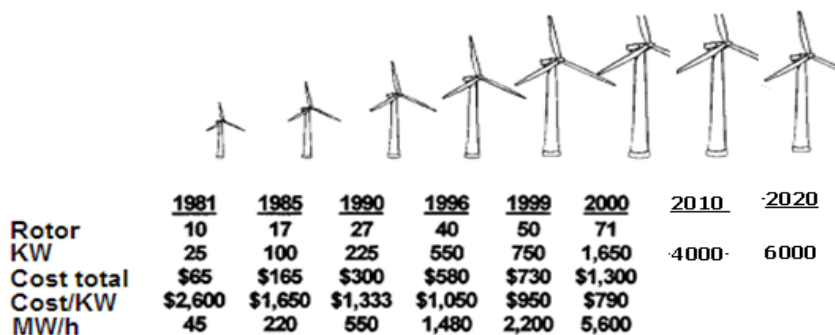


Fig. 3.2. Evoluția în timp a ponderii energiei eoliene

Sistemul eolian de conversie a energiei cuprinde turbina de vânt, TV, generatorul electric, de regulă generator sincron cu magnet permanent, GSMP și electronica de putere interpusă între generator și rețea, figura 3.3.

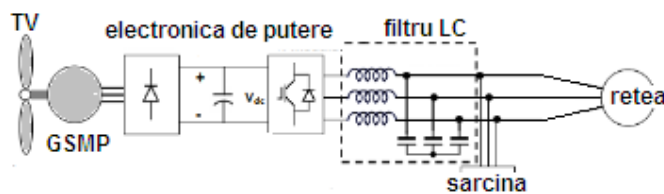


Fig. 3.3. Sistem eolian cu generator sincron cu magnet permanent

Utilizarea SRE se bazează pe motive: economice, de mediu și sociale [42]. Cele economice se referă la securitatea alimentării cu energie și dezvoltarea industriilor specifice utilizării SRE. Odată cu ratificarea Protocolului de la Kyoto preocupările legate de mediu sunt prioritare: reducerea efectului de seră, scăderea nivelului de poluare, reducerea factorilor care contribuie la schimbările climatice. Legislația română se bazează pe „Directiva privind promovarea energiei electrice produse din surse regenerabile”, [48], obiectivul acesteia reprezentându-l creșterea contribuției SRE de la 14% la 22% din consumul brut de energie electrică al statelor membre în 2010-2014.

La nivel național a apărut necesitatea elaborării unei legislații care să asigure un cadru de reglementare stabil. Prima lege care a transpus în legislația națională prevederile europene a fost HG nr. 443/2003 privind promovarea producției de energie electrică din surse regenerabile de energie. Legislația națională din domeniul SRE cuprinde atât legislația primară, cât și cea secundară.

*Legislația primară* cuprinde:

- HG nr. 443/2003 privind promovarea producției de energie electrică din surse regenerabile de energie;
- HG nr. 1429/2004 pentru aprobarea Regulamentului de certificare a originii energiei electrice produse din surse regenerabile de energie;
- HG nr. 1892/2004 pentru stabilirea sistemului de promovare a producerii energiei electrice din surse regenerabile de energie; HG nr. 958/2005 pentru modificarea HG nr. 443/2003 privind promovarea producției de energie electrică din surse regenerabile de energie și pentru modificarea și completarea HG nr. 1892/2004 pentru stabilirea sistemului de promovare a producerii energiei electrice din surse regenerabile de energie;
- Legea energiei electrice nr. 13/2007, cu modificările și completările ulterioare;
- HG nr. 1069/2007 privind aprobarea Strategiei Energetice a României pentru perioada 2007-2020;
- HG nr. 750/2008 pentru aprobarea Schemei de ajutor de stat regional pentru valorificarea resurselor regenerabile de energie;
- HG nr. 1661/2008 privind aprobarea Programului național pentru creșterea eficienței energetice și utilizarea surselor regenerabile de energie în sectorul public pentru anii 2009-2010;
- Legea nr. 220/2008 pentru stabilirea sistemului de promovare a producerii energiei din surse regenerabile de energie.

*Legislația secundară* cuprinde:

- Procedura de supraveghere a emiterii garanțiilor de origine pentru energia electrică produsă din surse regenerabile, aprobată prin Ordinul ANRE nr. 23/2004;
- Regulamentul de organizare și funcționare a pieței de certificate verzi, aprobat prin Ordinul ANRE nr. 22/2006;
- Procedura pentru monitorizarea pieței de certificate verzi, aprobată prin Ordinul ANRE nr. 38/2006;
- Regulamentul pentru calificarea producției prioritare de energie electrică din surse regenerabile de energie, aprobat prin Ordinul ANRE nr. 39/2006;
- Ordinul ANRE nr. 44/2007 pentru stabilirea modului de comercializare a energiei electrice produse din surse regenerabile de energie în unități calificate pentru producție prioritară;
- Procedura de alocare a sumei bănești rezultate din neîndeplinirea de către furnizorii de energie electrică a cotelor obligatorii de achiziție de certificate verzi, aprobată prin Ordinul ANRE nr. 62/2009; Mecanismele de suport sunt necesare în condițiile interesului mare pentru integrarea în sistem a unităților de putere mare. Schemele de promovare a SRE sunt grupate în două categorii: obligatorii și voluntare. Acestea sunt prezentate în Tabelul 3.1.

Tabelul 3.1. Scheme de promovare a SRE

Scheme de promovare	Mod de acțiune	Directe		Indirecte
		Efect asupra prețurilor	Efect asupra cantităților/capacităților	
obligatorii	Investiții	Subvenții	Cote obligatorii: • licitații • tranzații, certIFICATE VERZI	Taxe de mediu
		Taxe stimulative		
	Producere	Tarif feed-in, Prime		
voluntare	Investiții	Programe de cumpărare acțiuni		Acorduri voluntare
		Programe de susținere		
	Producere	Tarife verzi, etichetare		

Etapile parcurse de producător sunt:

- obținerea avizelor și autorizațiilor necesare construirii;
- construirea obiectivului;
- obținerea licenței de producere a energiei electrice;
- obținerea calificării pentru producție prioritară de energie electrică a capacității de producție;
- înscrierea la Operatorul Pieței de Energie Electrică pentru a tranzacționa SRE pe Piața pentru Ziua Următoare ;
- înscrierea la Operatorul de Transport și Sistem pentru a obține certificatul verde (CV);
- înscrierea la Operatorul Pieței de Certificate Verzi pentru înscriere în Registrul CV și pentru a participa la Piața de CV.

Producătorul poate tranzacționa energia pe piața de energie electrică prin mai multe căi:

- prin contracte bilaterale, la prețuri negociate;
- prin contracte bilaterale, în conformitate cu prevederile art. 3 din Ordinul ANRE nr. 44/2007;
- pe piața centralizată de energie electrică pentru ziua următoare (PZU), la prețul de închidere a pieței (PIP).

Sistemul de promovare cuprinde : energie eoliană, energie solară, geotermală, biomasă, energia valurilor, hidrogen, precum și energia electrică produsă în centrale hidroelectrice cu o putere instalată mai mică sau egală cu 10 MW, puse în funcțiune sau modernizate începând cu anul 2004. Reglementările au rolul de a compensa costurile suplimentare de dezvoltare a acestor tehnologii față de cele convenționale.

Schemele de promovare cu efect direct asupra prețului îl reprezintă *tariful feed-in*. Această schemă constă în achiziția la un tarif fix a E-SRE de către producători, furnizori și consumatori. Reglementarea tarifului determină o distribuție uniformă a investițiilor și beneficiarii pot fi ușor identificați.

**Sistemul de cote** este realizat prin stabilirea cotelor obligatorii pe care furnizorii trebuie să o achiziționeze.

Începând cu 2005 și până în 2020, sunt stabilite aceste valori obligatorii. Pentru perioada 2021-2030 valorile se vor stabili de către Ministerul Economiei, Comerțului și Mediului de Afaceri. Sistemul cotelor a determinat apariția unei noi piețe (Piața Certificatelor Verzi), care funcționează paralel cu piața de energie electrică.

**Certificatul verde** este un document care atestă o cantitate de 1 MWh de energie electrică produs din surse regenerabile de energie electrică. Fiecare furnizor de energie electrică din energie eoliană este obligat să achiziționeze în fiecare an un număr de CV egal cu produsul dintre valoarea cotei obligatorii și cantitatea de energie electrică furnizată în acel an de acesta consumatorilor finali, exprimată în MWh. Producătorul de energie verde din energie eoliană își vinde energia pe piață. Diferența pentru acoperirea costurilor de producție este recuperată prin vânzarea certificatelor verzi.

Certificatul verde se vinde separat de cantitatea de energie electrică. Acesta se vinde pe o piață paralelă, diferită de piața fizică a energiei electrice, formată din piața CV.

Posesorii de CV sunt liberi să se angajeze în tranzacții bilaterale cu CV, pe piața contractelor bilaterale de CV, beneficiind de anumite drepturi și obligații. Aceste tranzacții sunt realizate în baza Contractului Cadru de vânzare-cumpărare de CV emis de Autoritatea Competentă.

**Piața centralizată de CV** reprezintă cadrul centralizat pentru vânzarea și cumpărarea de CV. Pe această piață participă atât producătorii de E-SRE cât și consumatorii.

**Garanția de origine** reprezintă măsura utilizată pentru a încuraja producerea de energie electrică din energie eoliană [55]. Este un document care specifică sursa de energie eoliană din care a fost produsă energia electrică, indicând data, locul de producere și puterea instalată a capacității de producere. Producătorii de energie electrică din energie eoliană demonstrează că energia electrică pe care o vând este produsă din SRE.

În tabelul 3.2 este dat numărul de certificate verzi tranzacționate în perioada 2007-2013 [55] în România.

Tabelul 3.2. CV tranzacționate în perioada 2007-2009

Anul	Hidro (fără Hidroelectrică)	Eolian	Biomasă	Total
2007	28.444	7.186	-	<b>46.299</b>
2008	97.878	10.995	-	<b>132.455</b>
2009	78.622	14.155	30.192	<b>241.520</b>
2010	88.756	16.925	11.272	<b>251.620</b>
2011	91.786	18.732	12.375	<b>281.902</b>
2012	92.875	19.826	10.351	<b>291.850</b>
2013	98.725	21.852	11.741	<b>298.866</b>

### 3.3. Aspecte economice

Analiza implicațiilor pe care le generează SRE trebuie făcută considerând aspectele economice și cele tehnice. Sistemele eoliene sunt caracterizate de costuri totale mai mari decât cele clasice. Sistemele eoliene determină asigurarea securității energetice a unei țări și scăderea importurilor de purtători de energie. Se elimină instabilitatea prețurilor combustibililor fosili pe piață.

Integrarea sistemelor eoliene de putere mare reduce costurile cu combustibilii fosili, reduce costul total al energiei electrice și elimină CO<sub>2</sub>.

Analiza din punct de vedere economic a integrării sistemelor eoliene trebuie privită pe toată durata vieții instalațiilor (cel puțin 20-25 de ani). Energia eoliană înlocuiește în medie circa 690 g CO<sub>2</sub>/kWh produs.

În anul 2007 economia obținută prin eliminarea emisiilor de CO<sub>2</sub>, la o putere instalată la nivelul UE de 8.554 MW, a fost de 6,6 miliarde euro,[45], iar cea de combustibil de 16 miliarde euro. Nivelul economiilor păstrează tendința ascendentă, pentru perioada 2008-2030.

Costul energiei/kWh/ este în scădere la creșterea vitezei vântului, conform [39], figura 3.4 .

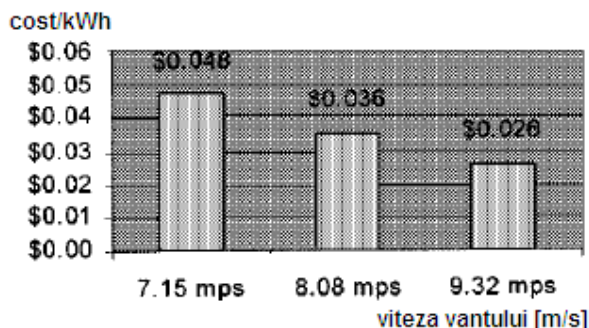


Fig. 3.4. Costul unui kWh în funcție de viteza vântului

Valorile costurilor legate de funcționare și mentenanță sunt de 1,2-1,5 eurocenți/kWh de energie produsă pe durata de viață a sistemelor eoliene.

Costul pe kW instalat scade, conform Tabelului 3.3.

Energia produsă pe 1 m<sup>2</sup> din suprafața rotorului a scăzut de la 1100 euro/m<sup>2</sup> în 1989, la sub 800 de euro în perioada 2004-2005, conform [50], însă în perioada 2005-2006 costurile au crescut.

Datorită nivelului mare al cererii la nivel global și creșterii costurilor materiilor prime.

Tabelul 3.3. Evoluția costurilor pentru diferite tipuri de turbine eoliene

Anul instalării	P <sub>nom</sub> turbină [kW]	Cost per kW instalat [euro/kW]	Cost per m <sup>2</sup> rotor [euro/m <sup>2</sup> ]	Alte costuri [euro/kW]
1989	150	1100	1050	410
1991	225	980	1020	350
1993	300	900	950	300
1995	500	820	850	180
1997	600	800	920	170
2001	1000	900	780	170
2004	2000	810	770	150
2006	3000	950	900	210

Anul instalării	$P_{nom}$ turbină [kW]	Cost per kW instalat [euro/kW]	Cost per m <sup>2</sup> rotor [euro/m <sup>2</sup> ]	Alte costuri [euro/kW]
2010	4000	960	910	220
2020	6000	970	920	230

Prețul turbinelor a scăzut la sfârșitul anului 2008,[51] și variază între 1000 euro/kW (Danemarca) și 1350 euro/kW (Canada) . Costul energiei electrice produse în sistemele eoliene, comparat cu cel al energiei electrice produse în centrale clasice, este în scădere conform [51] și diferă între sistemele eoliene continentale (on-shore) și sistemele eoliene marine situate în larg (off-shore).

Cu mărirea puterii instalate costul scade, figura 3.5, conform [39].

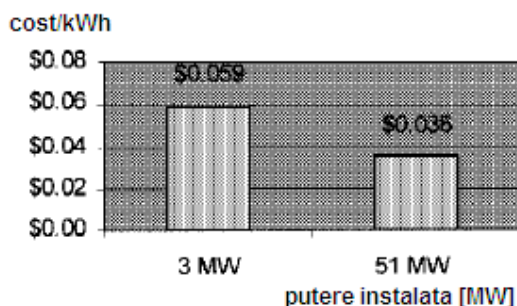


Fig. 3.5 Evoluția costului kWh în funcție de puterea instalată

Începând cu sfârșitul anilor '80 costul unui kWh produs într-un sistem eolian continental s-a micșorat cu aproximativ 40-50% la nivelul anului 2006 față de anul de referință (1987), [48], având o valoare de 4 eurocent/kWh la nivelul anului 2015.

Tabelul 3.4. Evoluția costului unui kWh produs în CEE

Anul	$P_{nom}$ [kW]	Preț unitar [eurocent/kWh]
1987	95	11,5
1989	150	9
1991	225	8,5
1993	300	8,3
1995	500	6,5
1997	600	5,5
2001	1000	5
2004	2000	5
2006	2000	6
2015	4500	4

Tendența prețului unitar, eurocent/kWh, este în scădere și se estimează o valoare de 4 eurocent/kWh la nivelul anului 2015.

Costul energiei electrice generate de sistemele eoliene în funcție de durata de funcționare anuală este în continuă scădere, figura 3.

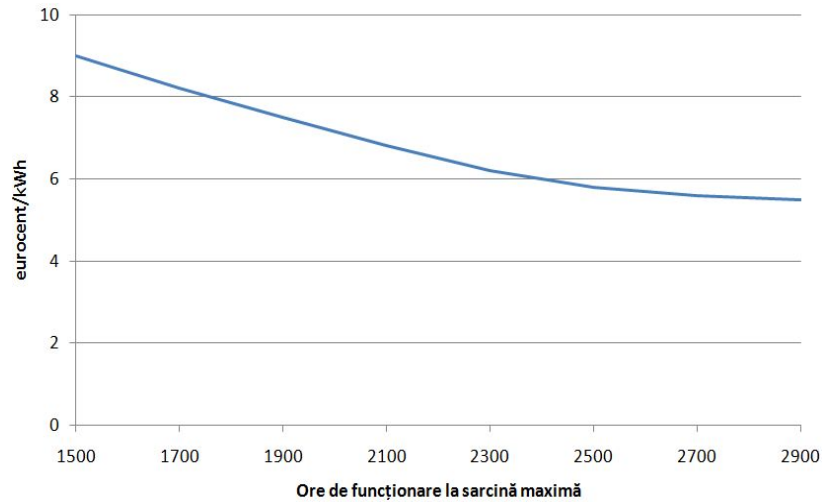


Fig. 3.6. Costul energiei electrice generate în funcție de orele de funcționare anuală

Costurile inițiale sunt cuprinse între 1,2 milioane de euro/MW și 2,7 milioane de euro/MW instalat[43] și au început să se stabilizeze, ajungând la aproximativ 2 milioane de euro/MW instalat.

Costurile producției de energie se face pe patru componente:

- 1) costul combustibilului,
- 2) costul emisiei de CO<sub>2</sub>,
- 3) costuri de mentenanță și
- 4) costuri de capital.

Un sistem eolian beneficiază de eliminarea costurilor combustibilului și a emisiilor de CO<sub>2</sub>.

Din punct de vedere a poluării fonice sistemele eoliene sunt net superioare sistemelor clasice, așa cum se observă din rezultatele date în [39].

Comparația între diferitele surse de zgomot se dă în figura 3.7, conform [39].

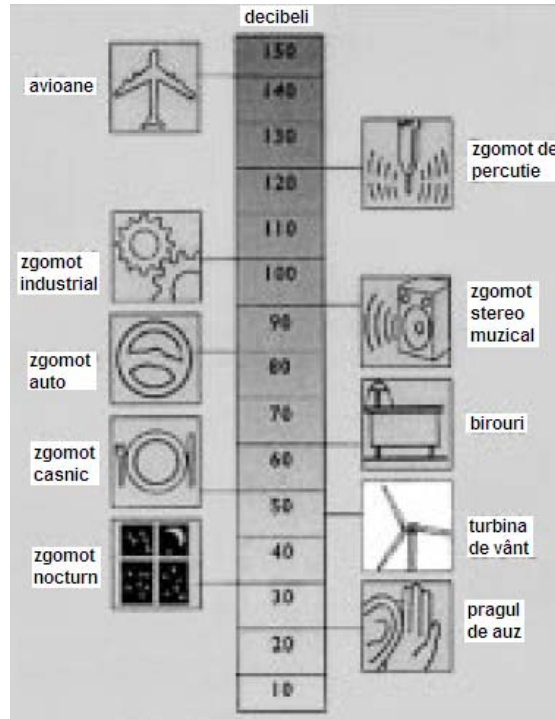


Fig. 3.7 Comparația între diferitele surse de zgomot

La o valoare de 30 \$/t pentru CO<sub>2</sub>, estimările pentru anii 2015 și 2030 dau o creștere a costului producerii unui MWh pentru centralele pe gaz și cele cu cărbune[49]. În sistemele eoliene costul este diminuat (tabelul 3.5)

Tabelul 3.5. Prețul prognozat al energiei la nivelul anilor 2015, 2030 , IEA2008

Combustibil	2015 [euro/MWh]	2030 [euro/MWh]
Cărbune	82	79
Gaze naturale	101	113
Vânt	75	68

Valorile costurilor cu noua infrastructură sunt cuprinse între 1 și 5 euro/MWh [46].



### 3.4. Aspecte tehnice

Problema esențială în sistemele eoliene este valoarea vitezei vântului, care pe lângă aspectele economice pune și probleme tehnice importante în dimensionarea sistemului.

Datorită variațiilor semnificative ale vitezei vântului în timp,[20],problemele tehnice sunt complexe, mai ales că puterea turbinei depinde de viteza vântului la cub așa cum rezultă din cele de mai jos.

Energia cinetică,  $W$ , a unei mase  $m$  de aer, (energia eoliană), la viteza  $V$  este:

$$W = mV^2/2$$

La un volum de aer,  $VOL = A \cdot X$ ,  $A$ -suprafața circulară a paletelor turbinei,  $X$  - distanța parcursă de masa de aer, energia are valoarea:

$$W = \rho \cdot VOL \cdot V^2/2$$

unde  $\rho$ - este densitatea aerului.

Puterea turbinei,  $P$ ,se obține prin derivarea energiei :

$$P = dW/dt = \rho \cdot A \cdot V^2 \cdot dX/dt = \rho \cdot A \cdot V^3$$

relație fundamentală ce demonstrează *dependența puterii turbinei de cubul vitezei*.

Acest fapt are implicații atât economice cât și tehnice în structura de rezistentă a sistemului în sensul că este de dorit ca să se realizeze sisteme de conversie la viteze ale vântului mari. De exemplu un sistem eolian care funcționează la 25[m/s] este de  $(25/5)^3 = 125$  ori mai eficient decât un sistem care funcționează la 5[m/s]. Așa cum se observă din figura 3.8,preluată din [20], în 5 [s] viteza vântului se modifică de la 19.5[m/s], la 9.8 [m/s].

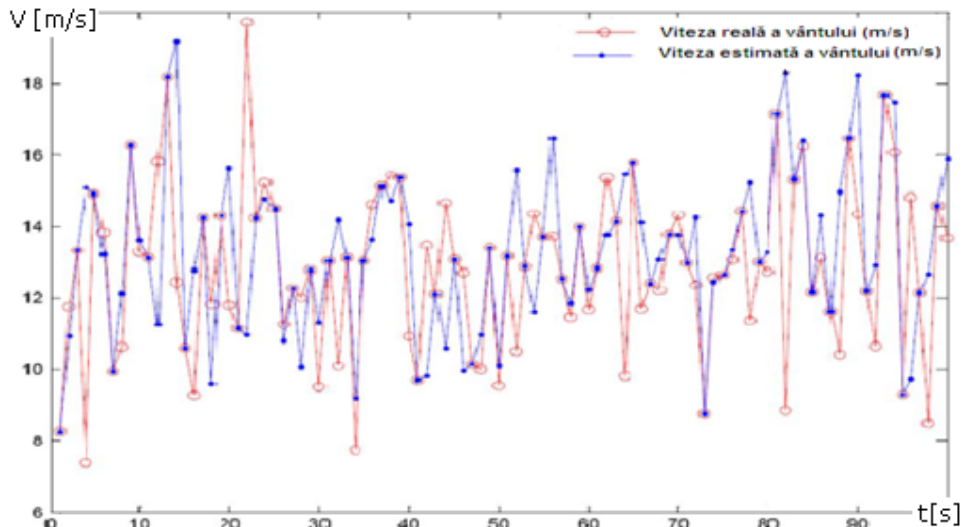


Fig. 3.8.Variația vitezei vântului în timp în locația A

În unele zone,[30], variațiile vitezei vântului în timp sunt și mai pronunțate putând atinge maxime de 24 [m/s] și minime de 2 [m/s] în intervale scurt de timp, de ordinul minutelor așa ca în figura 3.9.

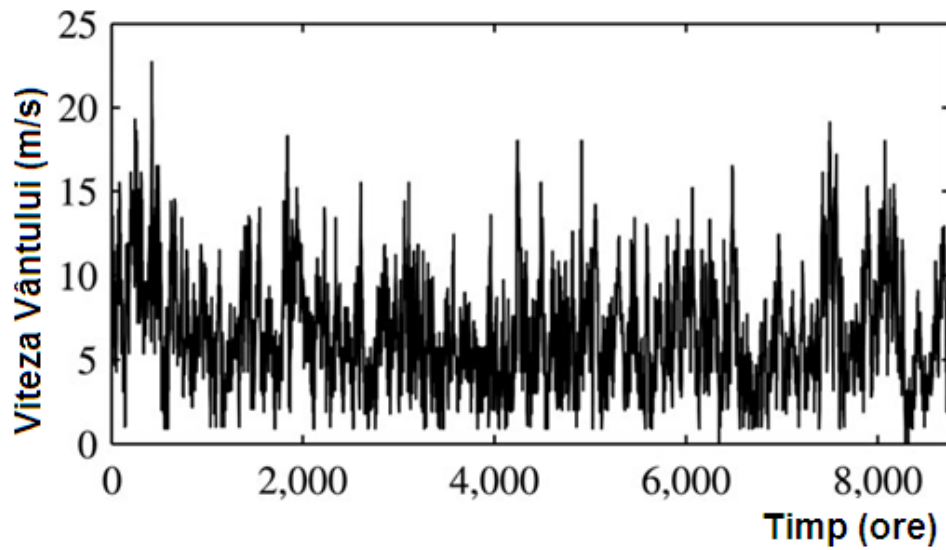


Fig. 3.9.Variația vitezei vântului în timp în locația B

Variațiile mari ale vitezei vântului, figura 3.10, implică și variații mari ale puterii, figura 3.11, rezultate preluate din [27].

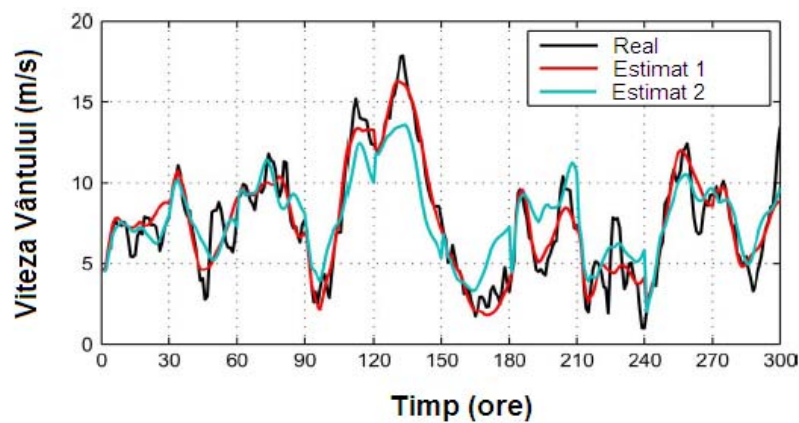


Fig. 3.10.Variația vitezei vântului în timp în locația C

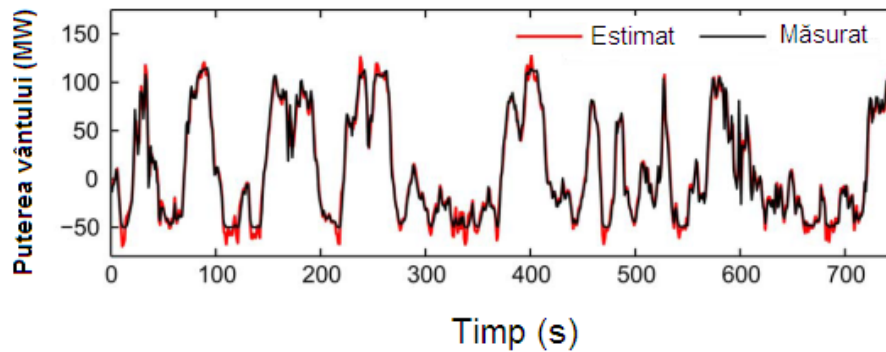


Fig. 3.11.Variația puterii în timp în locația C

Integrarea sistemelor eoliene determină aspecte de natură tehnică diverse. Progresele semnificative în tehnologia electronicii de putere, interpușe între generator și rețea, figura 3.12, au determinat implementare unor soluții tehnice performante, de mare randament [1].

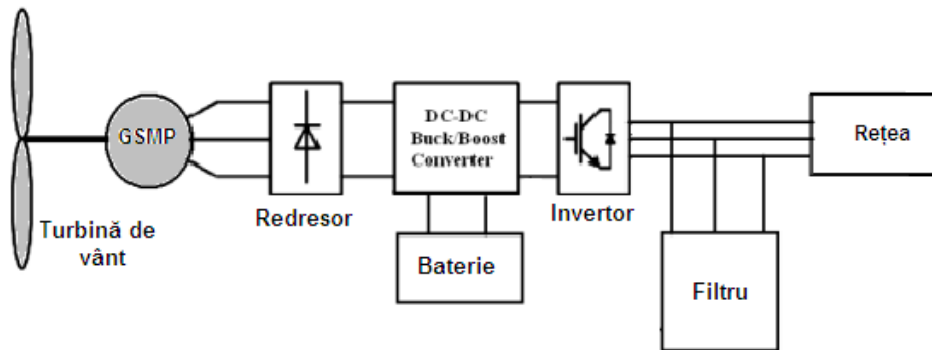


Fig. 3.12.Structura de bază la un sistem eolian

Amplasarea turbinelor eoliene se face începând de la nivelul mării, [26], figura 3.13 și până la altitudini mari, figura 3.14.

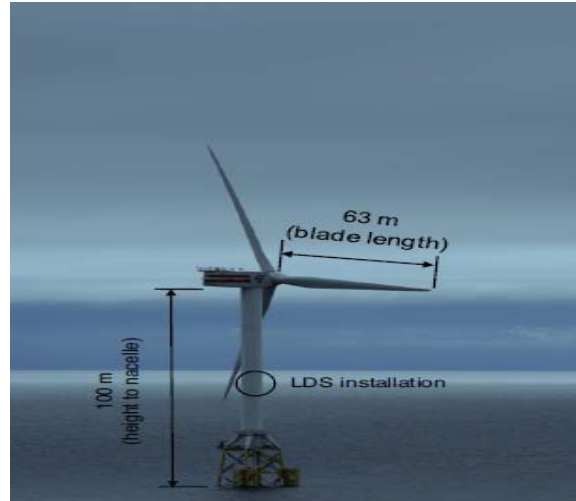


Fig. 3.13. Centrală eoliană marină

Densitatea puterii eoliene crește cu altitudinea, [25], așa ca în figura 3.14.

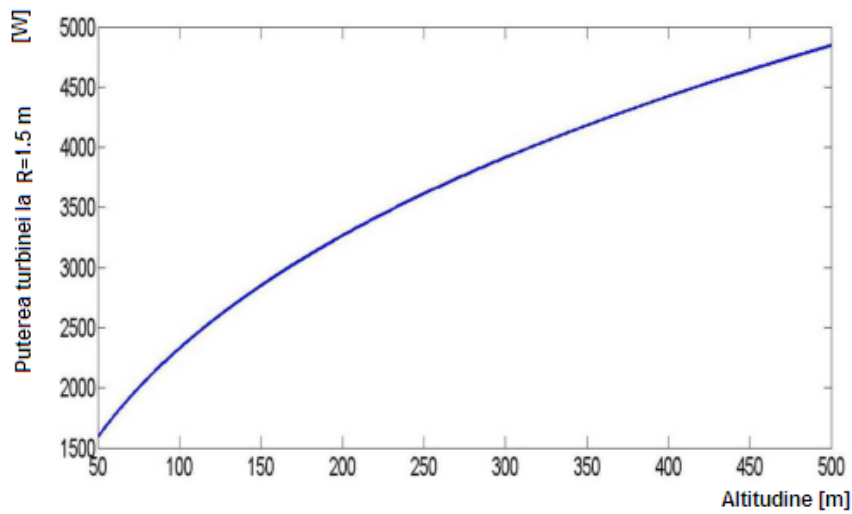


Fig. 3.14. Variația puterii vântului cu altitudinea

Plasarea turbinelor deasupra solului devine o soluție tehnică foarte atractivă din punct de vedere tehnico-economic, [25]. Pentru susținerea turbinei se poate folosi un balon, [25], așa ca în figura 3.15.



Fig. 3.15 Centrală eoliană la altitudine

Probleme tehnice deosebite apar datorită caracterului variabil al energiei eoliene, atât în sistemul de stocare, de regulă sistemul electroenergetic național, cât și în structura sistemului eolian.

Modul în care sunt amplasate centralele și variabilitatea pe termen scurt a energiei eoliene afectează variația puterii totale generate .

Sistemele eoliene prezintă un nivel de fiabilitate mult mai mare față de o centrală clasică ,deoarece ieșirea din funcționare pentru un sistem eolian se face lent și se pot lua măsuri pentru a compensa puterea generată de acesta.

Producerea energiei electrice din sisteme eoliene poate determina economie de capital prin exportul transfrontalier al energiei electrice obținute din sisteme eoliene .

### 3.5. Concluzii

Integrarea sistemelor eoliene este determinată de factori legislativi, economici și tehnici. Prin factorii legislativi se promovează utilizarea sistemelor eoliene.

În România se asigură promovarea sistemelor eoliene prin:

- certificate verzi;
- garanția de origine;
- sisteme de cote obligatorii.

Factorii economici trebuie să țină cont și de economia obținută prin eliminarea CO<sub>2</sub> și a costurilor cu combustibilii fosili pe toată durata de viață a sistemelor eoliene.

Factorii de natură tehnică sunt caracterizați de tehnologii noi care să permită apariția sistemelor eoliene de ultimă generație, care au randamente și fiabilitate ridicată.

În continuare se prezintă o sinteză a contribuțiilor personale:

- efectuarea unui studiu bibliografic privind integrarea sistemelor eoliene de mare putere în sistemele actuale;
- analiza aspectelor legislative specifice României;
- analiza aspectelor economice specifice României;
- analiza aspectelor tehnice specifice centralelor eoliene;
- identificarea unor centrale eoliene de ultimă generație, anul 2014;
- identificarea implicațiilor ce rezultă din variația semnificativă în timp a vitezei vântului.

## 4. DINAMICA SISTEMULUI EOLIAN CU STOCARE ÎN ACUMULATOARE ELECTRICE

Se analizează, în prezentul capitol, dinamica unui sistem eolian și energia înmagazinată în acumuloare electrice, AE, la viteze ale vântului variabile în timp.

Energia mecanică captată de turbina de vânt, (TV), se transformă în energie electrică de către generatorul sincron cu magneți permanenți, GSMP. Generatorul sincron cu magneți permanenți debitează, prin intermediul unui redresor, energie într-o baterie de AE, în două variante: varianta 1-redresor necomandat și varianta 2-redresor comandat și sarcină adaptată. Prin simulare se determină diferențele între cele două variante.

### 4.1. Considerații preliminare

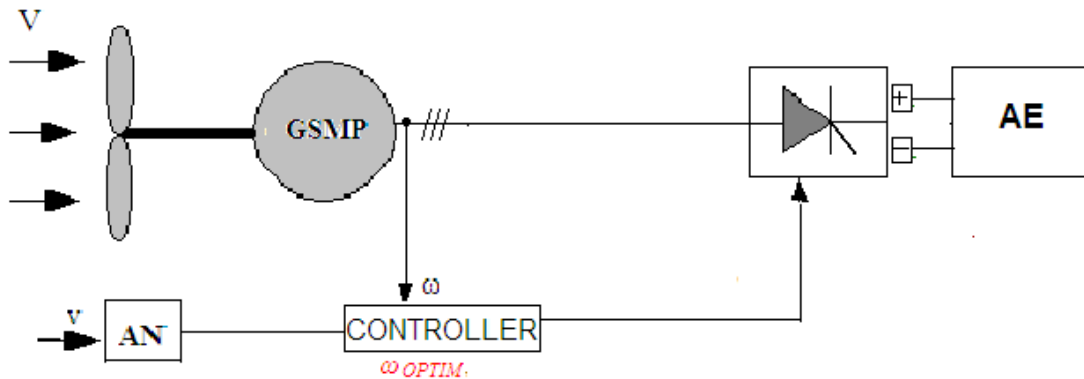
La puteri mici și în zone izolate energia eoliană înmagazinată în acumuloare electrice este o soluție optimă din punct de vedere economic [1-6]. În variantele în care se folosește o comandă pe partea de redresare se poate realiza o funcționare optimă din punct de vedere energetic [7,8], adaptându-se încărcarea la viteze ale vântului variabile în timp. Pentru aceasta se determină, în prealabil, dependența dintre valoarea optimă a vitezei unghiulare mecanice,  $\omega_{OPTIM}$  și viteza vântului măsurată cu anemometrul AN, figura 1. În conducerea sistemului, VUM  $\omega_{OPTIM}$  este mărime de referință :  $\omega_{ref} = \omega_{OPTIM}$ .

Obținerea energiei electrice maxime, în condițiile meteo date, viteza vântului fiind variabilă semnificativ în timp, este scopul conducerii sistemului TV+GSMP, figura 1, [7-16].

Mărimi principale măsurabile în proces sunt:

- viteza vântului, măsurată cu anemometrul AN, figura 1;
- viteza unghiulară mecanică,  $\omega$ , măsurată la arborele GSMP.

Pe baza acestor mărimi se asigură controlul încărcării la GSMP.



Prin măsurarea vitezei vântului se poate cunoaște VUM optimă,  $\omega_{OPTIM}$  și prin comanda unghiului dăprindere la tiristoarele redresorului comandat se poate controla VUM,  $\omega$ , astfel încât să se realizeze  $\omega = \omega_{OPTIM}$ .

## 4.2. Modele matematice

Simulările prezentate în lucrare se bazează pe modelele matematice clasice ale TV și GSMP, preluate din [14] și pe baza lor se deduc VUM optime,  $\omega_{OPTIM}$ .

### 4.2.1 Modelul matematic al TV, (MM-TV)

Se are în vedere un model clasic, [14], pentru turbină, model ce permite estimarea vitezei unghiulare de referință -  $\omega_{ref}$ . Modelul matematic al TV permite determinarea, orientativă a turației optime de funcționare, astfel că energia captată să fie maximă.

Puterea dată de TV se calculează cu relația:

$$P_{TV} = \rho \pi R_p^2 C_p(\lambda) V^3$$

unde :

$\rho$  – densitatea aerului;

$R_p$  – raza paletelor;

$C_p(\lambda)$  – coeficient de conversie al puterii;

$\lambda = \omega R_p / V$ ;

$V$  – viteza vântului;

$\omega$  – viteza unghiulară mecanică, VUM.

Coeficientul de conversie al puterii,  $C_p(\lambda)$ , se determină cu relația:

$$C_p(\lambda) = c_1 \left( \frac{c_2}{\lambda} - c_3 \right) e^{-\frac{c_4}{\lambda}}, \quad \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda} - 0.035, \quad c_1 - c_4 \text{ sunt constante date în catalog.}$$

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda} - 0.035 = \frac{V}{R_p \omega} - 0.035 = (V / (1.5\omega) - 0.035)$$

Prin înlocuire, coeficientul de conversie al puterii,  $C_p(\lambda)$ , se obține sub forma

$$C_p(\lambda) = c_1 \left( \frac{c_2}{\lambda} - c_3 \right) e^{-\frac{c_4}{\lambda}} = c_1 (c_2 (V / (1.5\omega) - 0.035) - c_3) e^{-c_4 \cdot (V / (1.5\omega) - 0.035)}$$

și puterea dată de TV se calculează cu relația:

$$P_{TV}(\omega, V) = \rho \pi R_p^2 C_p(\lambda) V^3 = 1.225 \pi 1.5^2 c_1 (c_2 (V / (1.5\omega) - 0.035) - c_3) e^{-c_4 \cdot (V / (1.5\omega) - 0.035)} V^3 =$$

$$k_1 \cdot (c_2 (V / (1.5\omega) - 0.035) - c_3) e^{-c_4 \cdot (V / (1.5\omega) - 0.035)} V^3$$

sau

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

unde:  $k_1 = 1.225 \pi 1.5^2 c_1$ ;  $k_2 = c_2 / 1.5$ ;  $k_3 = c_4 / 1.5$

Pentru turbina de vânt, TV, se dau de către firma constructoare, [14], caracteristicile experimentale ale puterii,  $P_{TV}(\omega, V)$ , sau ale cuplului,  $M_{TV}(\omega, V)$ , acestea din urmă denumite și caracteristici mecanice experimentale:

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

Valoarea maximă a funcției  $P_{TV}(\omega)$  se obține pentru VUM de referință  $\omega_{ref}$ , prin derivare :

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

obținându-se:



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

Rezultatul obținut demonstrează legătura directă dintre  $\omega_{ref}$  și viteza vântului. În cazurile în care viteza vântului variază semnificativ în timp rezultatul obținut trebuie reanalizat.

La două viteze ale vântului,  $V_1 > V_2$ , se dau în figura 2 caracteristicile puterii  $P_{TV-V_1}$  - la viteza  $V_1$  și  $P_{TV-V_2}$  - la viteza  $V_2$ .

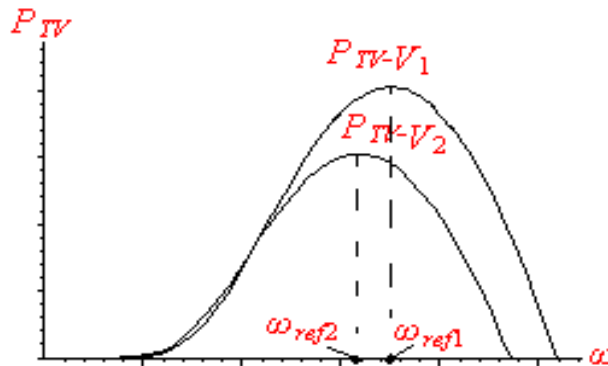


Fig.4.2 Dependența puterii de VUM,  $\omega$

La viteze ale vântului,  $V(t)$ , variabile în timp, puterea variază între o valoare minimă și o valoare maximă în funcție de valoarea VUM  $\omega$ .

#### 4.2.2. Modelul matematic al GSMP, (MM-GSMP)

Pentru a analiza funcționarea sistemului (TV+GSMP), la viteze ale vântului variabile în timp, se folosește modelul matematic ortogonal pentru generatorul sincron cu magneți permanenți, (GSMP), dat în continuare prin ecuațiile[5]:

$$\begin{cases} -U\sqrt{3}\sin\theta = R_1 I_d - \omega L_q I_q \\ U\sqrt{3}\cos\theta = R_1 I_q + \omega L_d I_d + \omega \Psi_{MP} \\ M_{GSMP} = p_1(L_d - L_q)I_d I_q + I_q \Psi_{MP} \end{cases}$$

unde:

$U$  – tensiunea statorică;

$I_d, I_q$  – curenții statorici;

$M_{GSMP}$  – cuplul electromagnetic;

$\theta$  – unghiul de sarcină.

$R_1$  – rezistența înfășurării statorice;

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

$L_q$  – inductanța proprie a înfășurării rotorice din axa q;

$p_1$  – numărul perechilor de poli;

$\Psi_{MP}$  - fluxul magnetului permanent.

Din sistemul de ecuații ale GSMP se obțin: puterea-  $P_G$  și momentul-  $M_{GSMP}$ . Cele două

funcții:  $P_G(R, \omega)$  și  $M_{GSMP}(R, \omega)$  depind de :  $R$  – rezistența echivalentă de sarcină și  $\omega$  – VUM. Rezistența echivalentă de sarcină depinde de caracteristicile AE.

Determinarea încărcării optime a sistemului TV+GSMP presupune cunoașterea turației la generator, astfel că energia captată să fie maximă, la viteze ale vântului variabile semnificativ în timp.

La o viteză a vântului variabilă în timp, de forma  $V(t) = b + a \sin \omega t$ , încărcarea optimă se obține la  $\omega = \omega_{ref}$ , prin adaptarea sarcinii generatorului, controlând valoarea puterii debitate în AE.

### 4.3. Studiu de caz

În simulări se folosește o viteză a vântului variabilă în timp de forma

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

Pentru turbina de vânt, TV, se dau de către firma constructoare, [14], caracteristicile experimentale ale puterii,  $P_{TV}(\omega, V)$  :

$$P_{TV}(\omega, V) = 23.584 \cdot ((V/\omega - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06(V/\omega - 0.0525)} \cdot V^3$$

unde :

$V$  – viteza vântului;

$\omega$  – viteza unghiulară mecanică, VUM

**VUM de referință**  $\omega_{ref}$

Valoarea maximă a funcției  $P_{TV}(\omega)$  se obține pentru VUM de referință  $\omega_{ref}$ , prin derivare :

$$\frac{dP_{TV}}{d\omega} = \frac{d}{d\omega} (23.584 \cdot ((V/\omega - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06(V/\omega - 0.0525)} \cdot V^3) = 0,$$

obținându-se:

$$\omega_{ref} = 31.817 \cdot V$$

### Modelul matematic al GSMP, (MM-GSMP)

Din datele de catalog [1] ale GSMP de putere:  $P_N = 5 [kW]$  se obțin valorile:

$$R_1 = 1.6 [\Omega], L_d = 0.07 [H], L_q = 0.08 [H], \Psi_{MP} = 3.3 [Wb]$$

Din sistemul de ecuații ale GSMP

$$\left\{ \begin{array}{l} -RI_d = 1.6I_d - \omega \cdot 0.08I_q \\ -RI_q = 1.6I_q + \omega \cdot 0.07I_d + \omega\Psi_M \\ M_G = -0.01I_dI_q + \Psi_M I_q \\ \Psi_M = 3.3 \\ P = R(I_d^2 + I_q^2) \end{array} \right.$$

se obțin:

$$\text{puterea - } P_G = 27225 \cdot R \omega^2 \frac{4.0\omega^2 + 625.0R^2 + 2000.0R + 1600.0}{(1250.0R^2 + 4000.0R + 3200.0 + 7.0\omega^2)^2} \text{ și}$$

$$\text{momentul - } M_G = -5445.0\omega(5.0R + 8.0) \frac{4.0\omega^2 + 625.0R^2 + 2000.0R + 1600.0}{(1250.0R^2 + 4000.0R + 3200.0 + 7.0\omega^2)^2}$$

Rezistența echivalentă de sarcină,  $R$  definește acumulatorul electric racordat la bornele generatorului. Puterea fiind derivata energiei, energia electrică,  $W_e$ , se calculează din putere, astfel:

$$\frac{dW_e}{dt} = P_G$$

sau

$$\frac{dW_e}{dt} = M_G \cdot \omega$$

### Modelul matematic al AE

Caracteristica externă la acumulatorul electric este funcția  $U(I)$  care la un acumulator acid cu plumb are forma

$$U = E + R_{AE} \cdot I$$

unde:

$E$  - tensiunea electromotoare;

$R_{AE}$  - rezistența internă a acumulatorului;

În simulările prezentate valorile pentru  $E$  și  $R_{AE}$  sunt:

$$E = 12.4[V], R_{AE} = 0.11[\Omega].$$

Puterea dată de generator se regăsește în puterea de la bornele acumulatorului,  $P_{AE}$ , dacă se neglijează pierderile și, deci, rezultă:

$$P_G = P_{AE} = U \cdot I = (E + R_{AE} \cdot I) \cdot I = (12.4 + 0.11 \cdot I) \cdot I$$

Momentul-  $M_G$  depinde liniar de  $\omega$  și, deci, are forma:

$$M_G = 6.3782 \times 10^{-2} (6.3782 \times 10^{-2} \omega - 12.4) / 0.11 = 3.6983 \times 10^{-2} \omega - 7.19$$

Curentul la încărcare se calculează din egalitatea puterilor

$$M_G \cdot \omega = U \cdot I = k \cdot \omega \cdot I$$

sau

$$I = (3.6983 \times 10^{-2} \omega - 7.19) / (6.3782 \times 10^{-2})$$

Se obține variația lui  $\omega$  din ecuația mișcării:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{TV} - M_G$$

Unde:

$J$  – momentul de inerție echivalent

$M_{GSMP}$  – momentul la GSMP

$M_{GSMP}$  – momentul la TV

### 4.3.1.Redresor necomandat

Ecuția mișcării și ecuația energiei formează sistemul de ecuații diferențiale de mai jos:

$$\left\{ \begin{array}{l} 50 \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left( \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) / \omega - 0.0525 \right) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot \\ e^{-98.06 \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) / \omega - 0.0525 \right)} \\ (16 - 6 \sin(0.17943t))^3 / \omega - (3.6983 \times 10^{-2} \omega - 7.19) - \text{ecuația mișcării} \\ \frac{dW_e}{dt} = (3.6983 \times 10^{-2} \omega - 7.19) \cdot \omega - \text{ecuația energiei} \\ \omega(0) = 535.66 \\ W_e(0) = 0 \end{array} \right.$$

sau

$$\left\{ \begin{array}{l} 50 \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left( \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) / \omega - 0.0525 \right) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06 \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) / \omega - 0.0525 \right)} \\ (16 - 6 \sin(0.17943t))^3 / \omega - (3.6983 \times 10^{-2} \omega - 7.19) \\ \frac{dW_e}{dt} = (3.6983 \times 10^{-2} \omega - 7.19) \cdot \omega \\ \omega(0) = 535.66 \\ W_e(0) = 0 \end{array} \right.$$

La  $t=3333[s]$  energia captată are valoarea  $W_e(3333) = 2.3604 \times 10^7 [J]$

Variațiile în timp ale VUM,  $\omega$  și ale curentului de încărcare a AE sunt date în figurile 4.3 - 4.6.

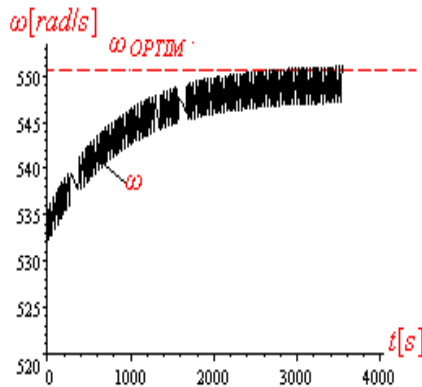


Fig.4.3 Variația în timp a lui  $\omega$

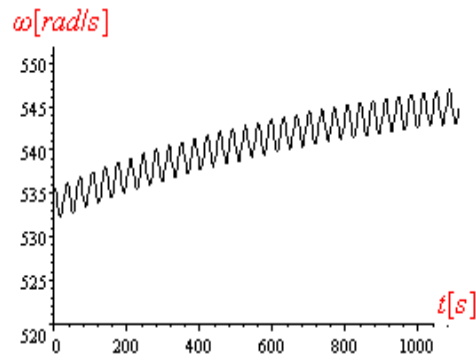


Fig.4.4 Variația în timp a lui  $\omega$  (detaliu)

Curentul de încărcare:

$$I = (3.6983 \times 10^{-2} \omega - 7.19) / (6.3782 \times 10^{-2}) = 0.57983 \omega - 112.73$$

are o variație în timp așa ca în figurile 5 și 6.

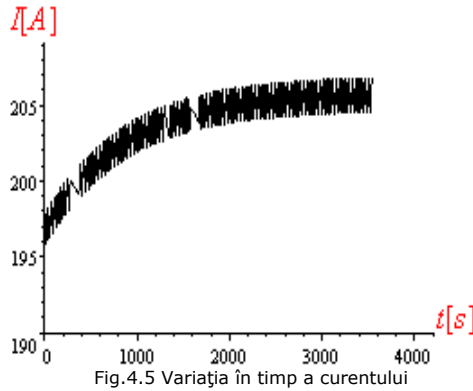


Fig.4.5 Variația în timp a curentului

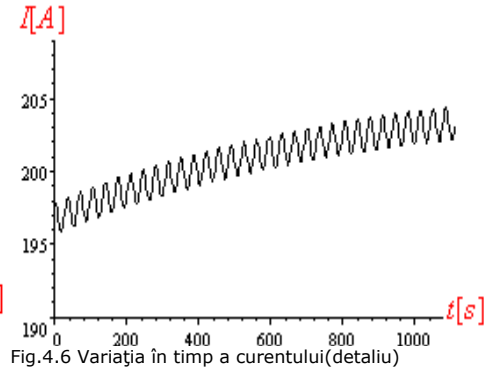


Fig.4.6 Variația în timp a curentului (detaliu)

### 4.3.2. Redresor comandat

La sarcină adaptată, realizată prin redresorul comandat, funcționarea sistemului se realizează la  $\omega = \omega_{OPTIM} = 31.817 \cdot V_{ECH}$ .

Cunoașterea dependenței VUM optime de viteza vântului de forma

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

impune determinarea lui  $k$  și  $V_{ECH}$ . Coeficientul  $k = 31.458$  este specific turbinei și se dă de firma constructoare sau se poate determina experimental. Pentru viteza echivalentă a vântului,  $V_{ECH}$ , se propune o relație bazată pe integrală vitezei reale:  $V(t)$ , aceasta deoarece viteza reală are o variație în timp mai complicată decât o sinusoidă, cu mai multe maxime și minime, pe durata unei perioade:  $T=35[s]$ . Prin integrala vitezei se poate ține seama de forma reală a variației vitezei vântului în timp. În acest sens, se propune o relație de forma:

$$V_{ECH} = \sqrt[n]{\frac{1}{35} \int_0^{35} (V(t))^n dt}$$

Se obține, prin încercări, pentru  $n$  valoarea:  $n = 3.56$  și deci, la:

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

rezultă la  $t=35[s]$ .

$$V_{ECH} = \sqrt[3.56]{\frac{1}{35} \int_0^{35} (16 - 6 \cdot \sin(0.17943t))^{3.56} dt} = 17.309 [m/s],$$

Se obține pentru  $\omega_{OPTIM}$ , la  $t=35[s]$ , valoarea:

$$\omega_{OPTIM} = 31.817 \cdot V_{ECH} = 31.817 \cdot 17.309 = 550.72 [rad / s]$$

Cunoscând VUM pentru care energia captată este maximă, prin comanda redresorului interpus între GSMP și AE, figura 1, se asigură captarea unei energii maxime. Algoritmul de conducere este următorul:

- 1) se măsoară viteza vântului și se determină  $V_{ECH} = \sqrt[n]{\frac{1}{T} \int_0^T (V(t))^n dt}$  ;
- 2) se determină  $\omega_{OPTIM}$  din  $\omega_{OPTIM} = k \cdot V_{ECH}$  ;
- 3) se menține, prin sarcina la GSMP, VUM în jurul lui  $\omega_{OPTIM}$  .

Curentul debitat se calculează din:

$$I = \frac{U-E}{R_{AE}} = \frac{k\omega - 12.4}{0.11}$$

Folosind un regulator de tip PI, de ecuație:

$$\frac{da}{dt} = k_1 \frac{d\omega}{dt} + k_2(\omega - \omega_{OPTIM})$$

se modifică panta caracteristicii mecanice a generatorului, dată sub forma:

$$M_G = a \cdot \omega - 7.19$$

unde  $a$  are valoarea minimă  $a_1 = 3.8921 \times 10^{-2}$ , la  $V=4.5$  [m/s] cu  $M_{G1} = 0.37668$  [Nm] și  $\omega_1 = 194.41$  [rad/s] și valoarea maximă  $a_2 = 5.5871 \times 10^{-2}$  cu  $M_{G2} = 30$  [Nm] și  $\omega_2 = 666$  [rad/s] la  $V=22$  [m/s].

În aceste condiții pentru constanta de proporționalitate a regulatorului se obține valoarea:

$$k_1 = \frac{\Delta a}{\Delta \omega} = \frac{a_2 - a_1}{\omega_2 - \omega_1} = \frac{5.5871 \times 10^{-2} - 3.8921 \times 10^{-2}}{666 - 194.41} = 3.5942 \times 10^{-5}$$

Pentru constanta integratoare a regulatorului se iau mai multe valori și se obțin rezultatele de mai jos:

$$a) k_2 = 0.0000001$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 50 \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) / \omega - 2.1231 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06((16 - 6 \sin(0.17943t)) / \omega - 0.0525)} \\ (16 - 6 \sin(0.17943t))^3 / \omega - (a \cdot \omega - 7.19) \\ \frac{dW_e}{dt} = (a \cdot \omega - 7.19) \cdot \omega \\ \frac{da}{dt} = 3.5942 \times 10^{-5} \frac{d\omega}{dt} + 0.0000001(\omega - 550.72) \\ \omega(0) = 535.66 \\ W_e(0) = 0 \\ a(0) = 3.6983 \times 10^{-2} \end{array} \right.$$

Energia obținută la  $t=3333$ [s] are valoarea  $W_e(3333) = 2.3529 \times 10^7$  [J]

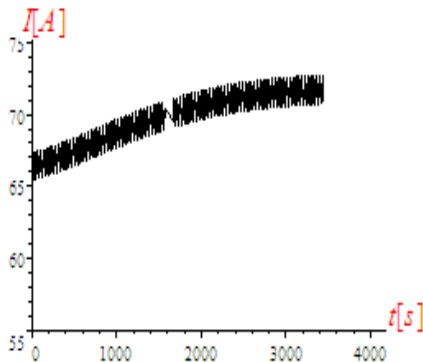


Fig.4.7 Variatia curentului la  $k_2 = 0.0000001$

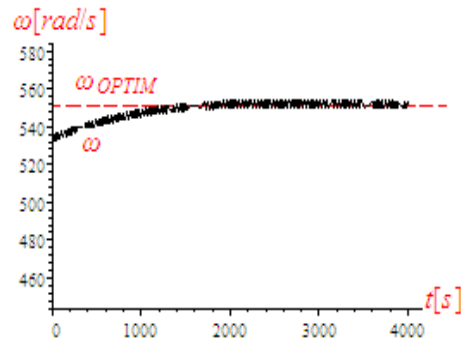


Fig.4.8 Variatia VUM la  $k_2 = 0.0000001$

$$b) k_2 = 0.000001$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 50 \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) / \omega - 2.1231 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06 \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) / \omega - 0.0525 \right)} \\ (16 - 6 \sin(0.17943t))^3 / \omega - (a \cdot \omega - 7.19) \\ \frac{dW_e}{dt} = (a \cdot \omega - 7.19) \cdot \omega \\ \frac{da}{dt} = 3.5942 \times 10^{-5} \frac{d\omega}{dt} + 0.000001(\omega - 550.72) \\ \omega(0) = 535.66 \\ W_e(0) = 0 \\ a(0) = 3.6983 \times 10^{-2} \end{array} \right.$$

Energia obținută la  $t=3333[s]$  are valoarea  $W_e(3333) = 2.3561 \times 10^7 [J]$ .

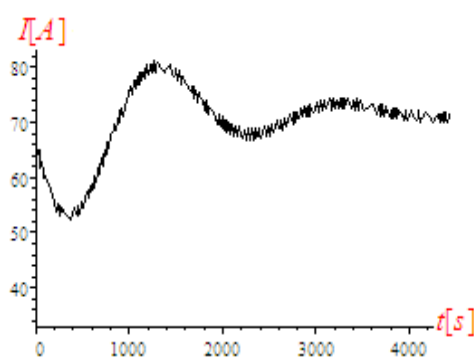


Fig.4.9 Variatia curentului la  $k_2 = 0.000001$

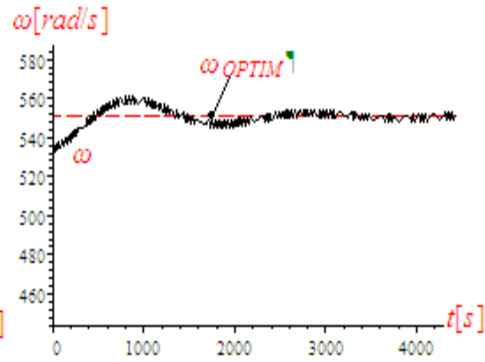


Fig.4.10 Variatia VUM la  $k_2 = 0.000001$

$$c) k_2 = 0.00001$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 50 \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) / \omega - 2.1231 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06 \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) / \omega - 0.0525 \right)} \\ (16 - 6 \sin(0.17943t))^3 / \omega - (a \cdot \omega - 7.19) \\ \frac{dW_e}{dt} = (a \cdot \omega - 7.19) \cdot \omega \\ \frac{da}{dt} = 3.5942 \times 10^{-5} \frac{d\omega}{dt} + 0.00001(\omega - 550.72) \\ \omega(0) = 535.66 \\ W_e(0) = 0 \\ a(0) = 3.6983 \times 10^{-2} \end{array} \right.$$

Energia obținută la  $t=3333[s]$  are valoarea  $W_e(3333) = 2.3535 \times 10^7 [J]$ .

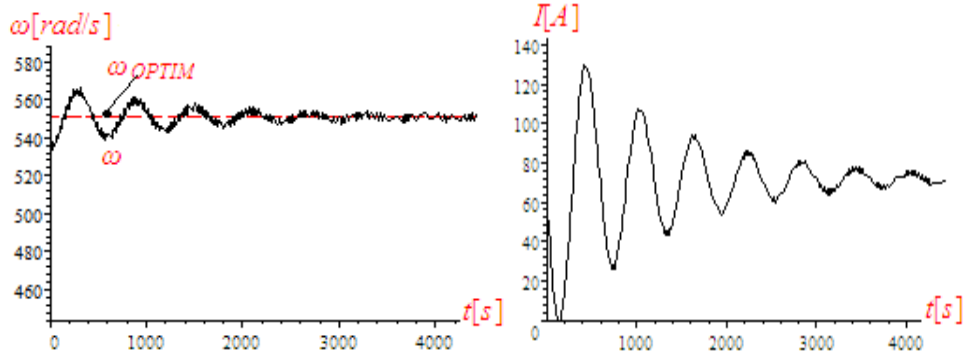


Fig.4.11 Variația curentului la  $k_2 = 0.00001$  Fig.4.12 Variația VUM la  $k_2 = 0.00001$

d)  $k_2 = 0.0001$

$$50 \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) / \omega - 2.1231 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06 \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) / \omega - 0.0525 \right)}$$

$$(16 - 6 \sin(0.17943t))^3 / \omega - (a \cdot \omega - 7.19)$$

$$\frac{dW_e}{dt} = (a \cdot \omega - 7.19) \cdot \omega$$

$$\frac{da}{dt} = 3.5942 \times 10^{-5} \frac{d\omega}{dt} + 0.0001(\omega - 550.72)$$

$$\omega(0) = 535.66$$

$$W_e(0) = 0$$

$$a(0) = 3.6983 \times 10^{-2}$$

Energia obținută la  $t=3333[s]$  are valoarea  $W_e(3333) = 2.3539 \times 10^7 [J]$

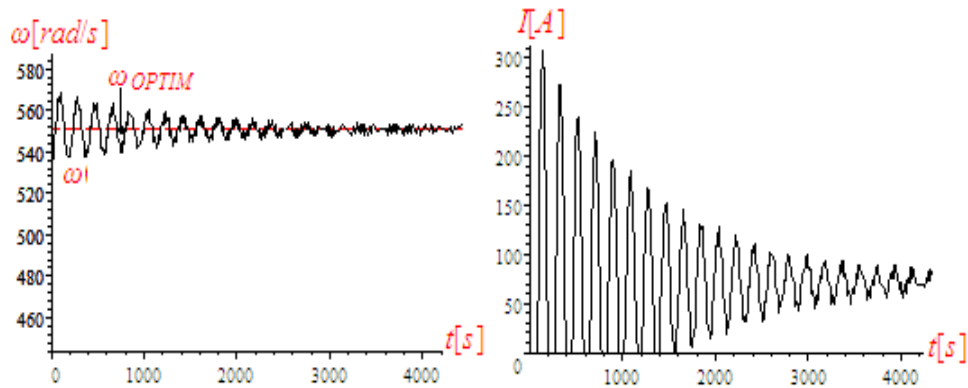


Fig.4.13 Variația curentului la  $k_2 = 0.0001$

Fig.4.14 Variația VUM la  $k_2 = 0.0001$

e)  $k_2 = 0.001$



$$\left\{ \begin{array}{l}
 50 \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) / \omega - 2.1231 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06 \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) / \omega - 0.0525 \right)} \\
 (16 - 6 \sin(0.17943t))^3 / \omega - (a \cdot \omega - 7.19) \\
 \frac{dW_e}{dt} = (a \cdot \omega - 7.19) \cdot \omega \\
 \frac{da}{dt} = 3.5942 \times 10^{-5} \frac{d\omega}{dt} + 0.001(\omega - 550.72) \\
 \omega(0) = 535.66 \\
 W_e(0) = 0 \\
 a(0) = 3.6983 \times 10^{-2}
 \end{array} \right.$$

Energia obținută la  $t=3333[s]$  are valoarea  $W_e(3333) = 2.3541 \times 10^7 [J]$

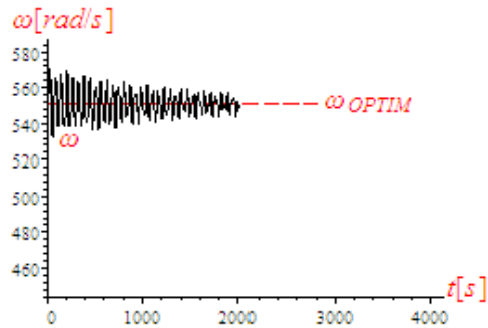


Fig.4.15 Variația curentului la  $k_2 = 0.001$

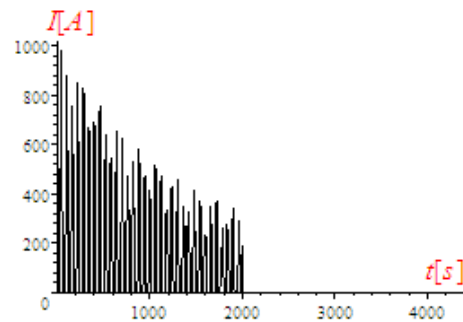


Fig.4.16 Variația VUM la  $k_2 = 0.001$

Pe baza rezultatelor de mai sus se pot face următoarele observații :

#### Observația 1

La valorile foarte mici ale lui  $k_2$  ,(ex:  $k_2 = 0.0000001$  ) nu apar suprareglări și  $\omega$  atinge valoarea  $\omega_{OPTIM}$  după aproximativ 2000[s].

#### Observația 2

La valorile foarte mari ale lui  $k_2$  ,(ex:  $k_2 = 0.001$  ) apar suprareglări de 3.6364% față de valoarea lui  $\omega_{OPTIM}$  .

#### Observația 3

Energia captată este maximă :  $W_e(3333) = 2.3561 \times 10^7 [J]$  la  $k_2 = 0.000001$  și minimă :  $W_e(3333) = 2.3529 \times 10^7 [J]$  la  $k_2 = 0.0000001$  ,diferențele fiind mici: 0.136% .

#### Observația 4

Energia captată în varianta redresorului necomandat :  $W_e(3333) = 2.3604 \times 10^7 [J]$ , este mai mare decât în varianta redresorului comandat cu 0.18275% .

#### Observația 5

Curentul debitat în acumulator are oscilații pronunțate la creșterea lui  $k_2$  așa cum se observă din figurile de mai sus.

#### 4.4. CONCLUZII

S-a analizat, în prezentul capitol, funcționarea sistemului eolian cu stocare în acumulatori electrice, la viteze ale vântului variabile semnificativ în timp.

Încărcarea, optimală din punct de vedere energetic, a sistemului se face fie electronic, fie alegând potrivit caracteristicilor acumulatorilor electrice ce stochează energia.

În continuare se prezintă o sinteză a contribuțiilor personale:

- prin analiza mai multor cazuri s-au putut stabili mărimile de bază ce conduc la o funcționare optimă;
- prin simulările prezentate s-a putut observa diferența dintre cele două variante: redresor comandat și redresor necomandat;
- în varianta redresor comandat energia captată este mai mică și oscilațiile curentului sunt, în multe cazuri, foarte mari și ,deci, varianta mai simplă : redresor necomandat este mai avantajoasă decât cea cu redresor comandat;
- s-a determinat legătura dintre viteza vântului și turația optimă la care trebuie să funcționeze sistemul, astfel încât energia eoliană captată să fie maximă;
- prin cunoașterea valorii turației optime se poate regla încărcarea la generator astfel încât să se realizeze o funcționare la maximum energetic;
- s-a demonstrat cât de importantă este acordarea reguletoarelor în dinamica procesului.

## 5. DINAMICA SISTEMULUI EOLIAN CONDUS PRIN MĂSURAREA VITEZEI VÂNTULUI

Se dă, în prezentul capitol, o metodă de conducere originală a sistemelor electroenergetice eoliene, SEE, bazată pe măsurarea vitezei vântului și a turației de la generator. Prin determinarea unei viteze echivalente a vântului se poate determina turația optimă din punct de vedere energetic și astfel se modifică sarcina la generator pentru a asigura o funcționare în zona optimă.

### 5.1. Considerații preliminare

Datorită variației rapide în timp a vitezei vântului se impune ca să se realizeze o metodă de conducere, astfel încât să se atingă viteza unghiulară mecanică, VUM, optimă:

$$\omega = \omega_{ref} = \omega_{OPTIM}$$

, în cel mai scurt timp posibil.

Prin deconectarea sarcinii de la GSMP se poate realiza această cerință, toată energia eoliană disponibilă fiind folosită la accelerarea maselor în mișcare de rotație. Se asigură, astfel, funcționarea în zona optimă din punct de vedere energetic, la viteze ale vântului variabile semnificativ în timp.

În conducerea sistemului, VUM  $\omega_{OPTIM}$  este mărime de referință  $\omega_{ref} = \omega_{OPTIM}$ .

Obținerea energiei electrice maxime, în condițiile meteo date, viteza vântului fiind variabilă semnificativ în timp, este scopul conducerii sistemului TV+GSMP, Figura 5.1, [7-16].

Mărimile principale măsurabile în proces sunt:

- viteza vântului, măsurată cu anemometrul AN, figura 5.1 ;
- viteza unghiulară mecanică,  $\omega$ , măsurată la arborele GSMP.

Pe baza acestor mărimi se asigură controlul încărcării la GSMP.

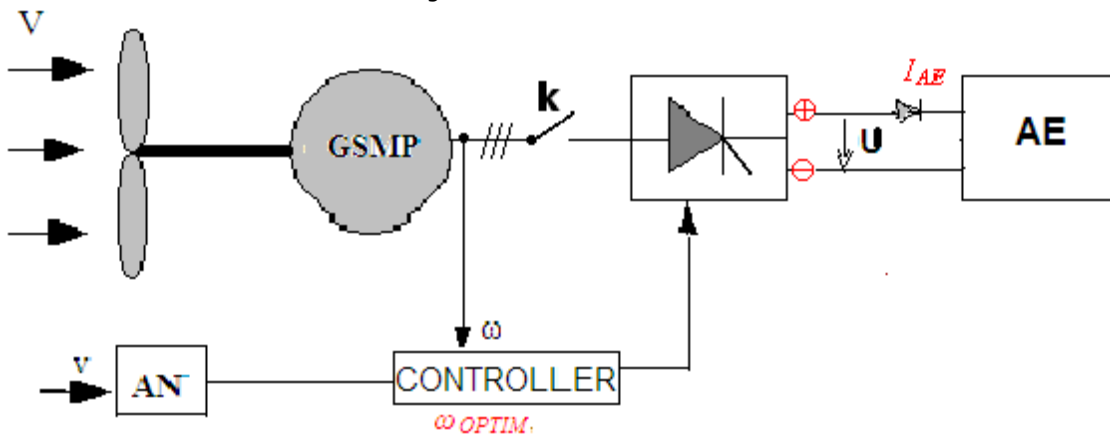


Fig.5.1. Sistem eolian cu stocare în AE

Prin măsurarea vitezei vântului se poate cunoaște VUM optimă,  $\omega_{OPTIM}$  și prin comanda unghiului de aprindere la tiristoarele redresorului comandat se poate controla VUM,  $\omega$ , astfel încât să se realizeze  $\omega = \omega_{OPTIM}$ .

La viteze mici ale vântului tensiunea U de la bornele bateriei de AE, Figura 5.1, poate să fie sub valoarea tensiunii electromotoare a AE și, în acest caz, AE se descarcă peste GSMP. Pentru a se evita descărcarea AE la borna  $\oplus$  se pune o diodă.

Determinarea încărcării optime a sistemului TV+GSMP presupune cunoașterea turației la generator, astfel că energia captată să fie maximă, la viteze ale vântului variabile semnificativ în timp.

## 5.2. Studiu de caz

La o viteză a vântului,  $V(t)$ , descrescătoare în timp, Figura 5.2, de formă sinusoidală de perioadă  $T=35[s]$ , se obține:

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

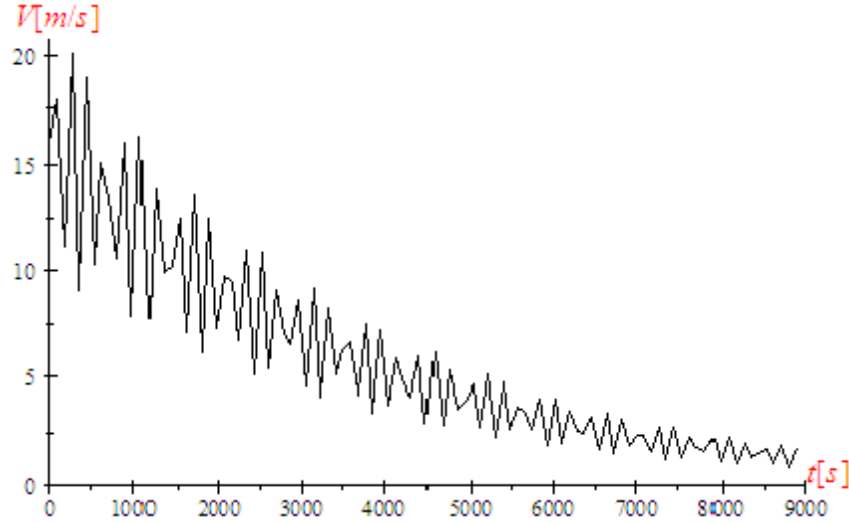


Fig.5.2.Variația în timp a vitezei vântului

Pentru turbina de vânt, TV, se dau de către firma constructoare, [14], caracteristicile experimentale ale puterii,  $P_{TV}(\omega, V)$  :

$$P_{TV}(\omega, V) = 23.584 \cdot (V/\omega - 2.1231 \times 10^{-2})e^{-98.06(V/\omega - 0.0525)} \cdot V^3$$

unde :

$V$  – viteza vântului;

$\omega$  – viteza unghiulară mecanică, VUM

**VUM de referință**  $\omega_{ref}$

Valoarea maximă a funcției  $P_{TV}(\omega)$  se obține pentru VUM de referință  $\omega_{ref}$ , prin derivare:

$$\frac{dP_{TV}}{d\omega} = \frac{d}{d\omega} (23.584 \cdot (V/\omega - 2.1231 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06(V/\omega - 0.0525)} \cdot V^3) = 0,$$

obținându-se:

$$\omega_{ref} = 31.817 \cdot V$$

La această valoare a VUM  $\omega_{ref}$  se obține valoarea maximă a puterii turbinei:

$$P_{TV-MAX} = 1.8988V^3$$

La sarcină adaptată, realizată prin redresorul comandat, funcționarea sistemului se realizează la :

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

Cunoașterea dependenței VUM optime de viteza vântului de forma:

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

, impune determinarea lui  $k$  și  $V_{ECH}$ . Coeficientul  $k = 31.458$  este specific turbinei și se dă de firma constructoare sau se poate determina experimental.

Pentru viteza echivalentă a vântului,  $V_{ECH}$ , se propune o relație bazată pe integrala vitezei reale:  $V(t)$ , aceasta deoarece viteza reală are o variație în timp mai complicată decât o sinusoidă, cu mai multe maxime și minime, pe durata unei perioade:  $T=35[s]$ . Prin integrala vitezei se poate ține seama de forma reală a variației vitezei vântului în timp. În acest sens, se propune o relație de forma:

$$V_{ECH} = \sqrt[3.56]{\frac{1}{35} \int_0^{35} (V(t))^n dt}$$

Se obține, din[3], pentru  $n$  valoarea:  $n = 3.56$  și deci, la  $V(t) = V(t) = (16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600}$ , rezultă, la  $t=0$ ,  $V_{ECH}$  de valoare

$$V_{ECH} = \sqrt[3.56]{\frac{1}{35} \int_0^{35} ((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600})^{3.56} dt} = 17.196[m/s],$$

La  $t=0$  se obține pentru  $\omega_{OPTIM}$  valoarea:

$$\omega_{OPTIM} = 31.817 \cdot V_{ECH} = 31.817 \cdot 17.196 = 547.13[rad/s]$$

### Modelul matematic al GSMP, (MM-GSMP)

Din datele de catalog [1] ale GSMP de putere:  $P_N = 5[kW]$  se obțin valorile:

$$R_1 = 1.6[\Omega], L_d = 0.07[H], L_q = 0.08[H], \Psi_{MP} = 3.3[Wb].$$

Din sistemul de ecuații ale GSMP

$$\left\{ \begin{array}{l} -RI_d = 1.6I_d - \omega \cdot 0.08I_q \\ -RI_q = 1.6I_q + \omega \cdot 0.07I_d + \omega\Psi_M \\ M_G = -0.01I_dI_q + \Psi_M I_q \\ \Psi_M = 3.3 \\ P = R(I_d^2 + I_q^2) \end{array} \right.$$

se obțin:

$$\text{puterea-} \quad P_G = 27225.0R\omega^2 \frac{4.0\omega^2 + 625.0R^2 + 2000.0R + 1600.0}{(1250.0R^2 + 4000.0R + 3200.0 + 7.0\omega^2)^2} \quad \text{și}$$

$$\text{momentul-} \quad M_G = -5445.0\omega(5.0R + 8.0) \frac{4.0\omega^2 + 625.0R^2 + 2000.0R + 1600.0}{(1250.0R^2 + 4000.0R + 3200.0 + 7.0\omega^2)^2}$$

### Determinarea încărcării la curentul limită admis

Sarcina maxim admisă din punct de vedere termic,  $R_{adm}(\omega)$ , la GSMP, se determină prin limitarea curentului la valoarea maxim admisă:

$$I_{adm} = \sqrt{I_d^2 + I_q^2} = 20[A]$$

La această valoare a curentului se obține rezistența de sarcină,  $R$ , din sistemul algebric:

$$\left\{ \begin{array}{l} -RI_d = 1.6I_d - \omega \cdot 0.08I_q \\ -RI_q = 1.6I_q + \omega \cdot 0.07I_d + \omega\Psi_M \\ M_G = -0.01I_dI_q + \Psi_M I_q \\ \Psi_M = 3.3 \\ P = R(I_d^2 + I_q^2) \\ I_d^2 + I_q^2 = 400. \end{array} \right.$$

cu soluția  $R = -1.6 + 0.14968\omega$ .

Se cunoaște, astfel, dependența rezistenței de sarcină,  $R_{adm}$ , de VUM,  $\omega$ , adică funcția:

$$R_{adm}(\omega) = -1.6 + 0.14968\omega$$

Rezistența echivalentă de sarcină,  $R$  definește acumulatorul electric racordat la bornele generatorului.

Puterea fiind derivata energiei, energia electrică,  $W_e$ , se calculează din putere, astfel:

$$\frac{dW_e}{dt} = P_G$$

sau

$$\frac{dW_e}{dt} = M_G \cdot \omega$$

### 5.2.1. Modificarea sarcinii astfel încât să se atingă $\omega = \omega_{ref}$ în minimum de timp

La  $t=0$  și la  $\omega = \omega_{OPTIM} = 547.13[\text{rad/s}]$  cuplul la turbina de vânt are valoarea:

$$M_{TV} = 23.584 \cdot ((16)/547.13 - 2.1231 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06((16)/547.13 - 0.0525)} \cdot (16)^3/547.13 = 13.838[\text{Nm}]$$

a egalitatea cuplurilor  $M_{TV} = M_G$  și la  $\omega = 547.13[\text{rad/s}]$  rezultă rezistența de sarcină din sistemul algebric

$$\left\{ \begin{array}{l} 13.838 = 5445 \cdot \omega(5 \cdot R + 8) \cdot \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot R^2 + 2000 \cdot R + 1600}{(1250 \cdot R^2 + 4000 \cdot R + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2} \\ \omega = 547.13 \end{array} \right.$$

cu soluțiile:  $\{\omega = 547.13, R = 1.8336\}$ ,  $\{\omega = 547.13, R = 425.61\}$

Pentru rezistența de sarcină au rezultat două valori reale  $R_1 = 1.8336[\Omega]$  și  $R_2 = 425.61[\Omega]$ . Pentru  $R = R_2 = 425.61[\Omega]$  funcționarea este în zona stabilă deoarece cuplul la generator,  $M_G(\omega)$ , are o variație așa ca în Figura 5.3.

$$R_1 = 1.8336[\Omega]$$

$$M_{G-1} = 5445 \cdot \omega(5 \cdot 1.8336 + 8) \cdot \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot 1.8336^2 + 2000 \cdot 1.8336 + 1600}{(1250 \cdot 1.8336^2 + 4000 \cdot 1.8336 + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2} = 93480 \cdot \omega \frac{4 \cdot \omega^2 + 7368.5}{(14737 + 7 \cdot \omega^2)^2}$$

$$R_2 = 425.61[\Omega]$$

$$M_{G-2} = 5445 \cdot \omega(5 \cdot 425.61 + 8) \cdot \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot 425.61^2 + 2000 \cdot 425.61 + 1600}{(1250 \cdot 425.61^2 + 4000 \cdot 425.61 + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2} = 1.1631 \times 10^7 \omega \frac{4 \cdot \omega^2 + 1.1407 \times 10^8}{(2.2814 \times 10^8 + 7 \cdot \omega^2)^2}$$

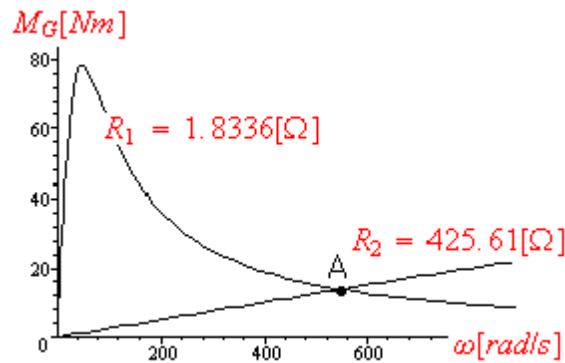


Fig.5.3. Dependența cuplului  $M_G$  de  $\omega$

La  $M_{TV} = M_G = 13.838[\text{Nm}]$  sistemul funcționează în punctul A, Figura 5.3. Pe caracteristica cuplului,  $M_G(\omega)$ , la  $R_2 = 425.61[\Omega]$  funcționarea este stabilă deoarece la modificări ale cuplului motor,  $M_{TV}$ , punctul de funcționare rămâne în zona inițială.

La  $t=0$  din  $V_{ECH}$  de valoare  $V_{ECH} = 17.196[\text{m/s}]$ , se obține  $\omega_{OPTIM} = 547.13[\text{rad/s}]$ . Pentru  $\omega(0) = 535.66[\text{rad/s}]$  se ajunge la  $\omega_{OPTIM} = 547.13[\text{rad/s}]$  în cel mai scurt timp prin deconectarea sarcinii de la GSMP, deschizând întreruptorul **K**, Figura 5.3.

Se obține variația în timp a VUM,  $\omega$ , Figura 5.4, din ecuația mișcării:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{TV} - M_G$$

unde  $J = 40[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$  – momentul de inerție echivalent,  $M_{GSMP}$  – momentul la GSMP,  $M_{TV}$  – momentul la T sau

$$\left\{ \begin{array}{l} 40 \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) e^{-t/3600} / \omega - 2.1231 \times 10^{-2} \right) \cdot \\ e^{-98.06 \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) e^{-t/3600} / \omega - 0.0525 \right)} \cdot \\ \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) e^{-t/3600} \right)^3 / \omega - \\ 5445.0 \omega (5.0R + 8.0) \frac{4.0\omega^2 + 625.0R^2 + 2000.0R + 1600.0}{(1250.0R^2 + 4000.0R + 3200.0 + 7.0\omega^2)^2} - \text{ecuația miscării} \end{array} \right.$$

sau

$$\left\{ \begin{array}{l} 40 \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) e^{-t/3600} / \omega - 2.1231 \times 10^{-2} \right) \cdot \\ e^{-98.06 \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) e^{-t/3600} / \omega - 0.0525 \right)} \cdot \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) e^{-t/3600} \right)^3 / \omega \\ \omega(0) = 535.66 \end{array} \right.$$

După un timp  $t = 34.68[\text{s}]$ , așa cum se observă din Figura 5.4, se atinge  $\omega_{ref} = \omega_{OPTIM} = 547.13[\text{rad/s}]$ , deoarece  $\omega(34.68) = 547.13[\text{rad/s}] = \omega_{OPTIM}$ .

La  $t = 35[\text{s}]$  VUM are valoarea  $\omega(35) = 547.25[\text{rad/s}]$ .

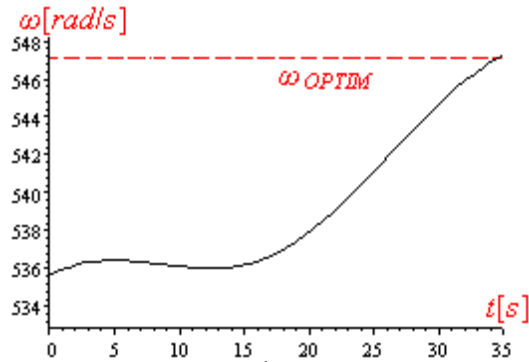


Fig.5.4.Variația în timp a VUM la gol

Se măsoară viteza vântului și se calculează, la intervale de timp  $\Delta t = 5 \div 5 + 35 [\text{s}]$ , viteza echivalentă  $V_{ECH}$  și  $\omega_{OPTIM}$ .

Viteza unghiulară mecanică,  $\omega$ , se monitorizează și ea în timp și în funcție de eroarea:

$$\Delta\omega = \omega - \omega_{OPTIM}$$

,se modifică valoarea rezistenței de sarcină  $R$ .

Conducerea sistemului se realizează, deci pe baza celor două măsurători:

- 1) viteza vântului
- și
- 2) VUM la arborele generatorului.

Preluând informațiile din 5 în 5 secunde, se cunosc VUM optime,  $\omega_{OPTIM}$ , la momentele de timp  $t = 35, 40, 45[\text{s}]$  și așa mai departe.

1) Pe intervalul  $\Delta t = 5 \div 40[s]$ ,  $V_{ECH}$  are valoarea:

$$V_{ECH-1} = \sqrt[3.56]{\frac{1}{35} \int_5^{40} ((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600})^{3.56} dt} = 17.187[m/s],$$

Se obține pentru  $\omega_{OPTIM}$  valoarea:

$$\omega_{OPTIM-1} = 31.817 \cdot V_{ECH} = 31.817 \cdot 17.187 = 546.84[rad/s]$$

2) Pe intervalul  $\Delta t = 10 \div 45[s]$ ,  $V_{ECH}$  are valoarea

$$V_{ECH-2} = \sqrt[3.56]{\frac{1}{35} \int_{10}^{45} ((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600})^{3.56} dt} = 17.184[m/s],$$

Se obține pentru  $\omega_{OPTIM}$  valoarea:

$$\omega_{OPTIM-2} = 31.817 \cdot V_{ECH} = 31.817 \cdot 17.184 = 546.74[rad/s]$$

3) Pe intervalul  $\Delta t = 15 \div 50[s]$   $V_{ECH}$  are valoarea:

$$V_{ECH-3} = \sqrt[3.56]{\frac{1}{35} \int_{15}^{50} ((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600})^{3.56} dt} = 17.178[m/s],$$

Se obține pentru  $\omega_{OPTIM}$  valoarea:

$$\omega_{OPTIM-3} = 31.817 \cdot V_{ECH} = 31.817 \cdot 17.178 = 546.55[rad/s]$$

4) Pe intervalul  $\Delta t = 20 \div 55[s]$ ,  $V_{ECH}$  are valoarea:

$$V_{ECH-4} = \sqrt[3.56]{\frac{1}{35} \int_{20}^{55} ((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600})^{3.56} dt} = 17.157[m/s],$$

Se obține pentru  $\omega_{OPTIM}$  valoarea:

$$\omega_{OPTIM-4} = 31.817 \cdot V_{ECH} = 31.817 \cdot 17.157 = 545.88[rad/s]$$

5) Pe intervalul  $\Delta t = 25 \div 60[s]$ ,  $V_{ECH}$  are valoarea:

$$V_{ECH-5} = \sqrt[3.56]{\frac{1}{35} \int_{25}^{60} ((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600})^{3.56} dt} = 17.11[m/s],$$

Se obține pentru  $\omega_{OPTIM}$  valoarea:

$$\omega_{OPTIM-5} = 31.817 \cdot V_{ECH} = 31.817 \cdot 17.11 = 544.39[rad/s]$$

6) Pe intervalul  $\Delta t = 30 \div 65[s]$ ,  $V_{ECH}$  are valoarea:

$$V_{ECH-6} = \sqrt[3.56]{\frac{1}{35} \int_{30}^{65} ((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600})^{3.56} dt} = 17.059[m/s],$$

Se obține pentru  $\omega_{OPTIM}$  valoarea:

$$\omega_{OPTIM-6} = 31.817 \cdot V_{ECH} = 31.817 \cdot 17.059 = 542.77[rad/s]$$

7) Pe intervalul  $\Delta t = 1130 \div 1165[s]$ ,  $V_{ECH}$  are valoarea:

$$V_{ECH-k} = \sqrt[3.56]{\frac{1}{35} \int_{1130}^{1165} ((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600})^{3.56} dt} = 12.588[m/s],$$

Se obține pentru  $\omega_{OPTIM}$  valoarea:

$$\omega_{OPTIM-k} = 31.817 \cdot V_{ECH} = 31.817 \cdot 12.588 = 400.51[rad/s]$$

## EVOLUȚIA ÎN TIMP A PROCESULUI

La atingerea VUM optime,  $\omega_{OPTIM}$ , se conectează sarcina  $R = 425.61[\Omega]$  și ecuația mișcării devine:



$$\left\{ \begin{array}{l}
 40 \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left( (16 - 6 \sin(0.17943(t+35))) e^{-(t+35)/3600} / \omega - 2.1231 \times 10^{-2} \right) \cdot \\
 e^{-98.06 \left( (16 - 6 \sin(0.17943(t+35))) e^{-(t+35)/3600} / \omega - 0.0525 \right)} \cdot \\
 \left( (16 - 6 \sin(0.17943(t+35))) e^{-(t+35)/3600} \right)^3 / \omega - \\
 5445 \cdot \omega \left( 5 \cdot (425.61) + 8 \right) \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot (425.61)^2 + 2000 \cdot (425.61) + 1600}{(1250 \cdot (425.61)^2 + 4000 \cdot (425.61) + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2} \\
 \omega(0) = 547.25
 \end{array} \right. ,$$

Așa cum se observă din Figura 5.5, VUM nu atinge valorile optime

$$\omega_{OPTIM-1} = 546.84[\text{rad/s}], \omega_{OPTIM-2} = 546.74[\text{rad/s}], \omega_{OPTIM-3} = 546.55[\text{rad/s}],$$

$$\omega_{OPTIM-4} = 545.88[\text{rad/s}], \omega_{OPTIM-5} = 544.39[\text{rad/s}],$$

la momentele de timp  $t=40, 45, 50, 55, 60$ [s].

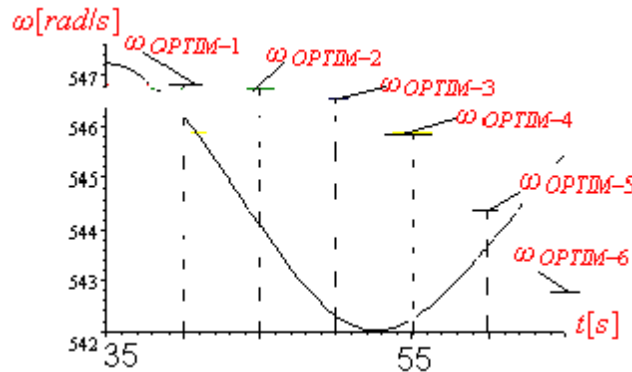


Fig.5.5.Evoluția în timp a VUM pe intervalul 35-65[s]

Așa cum se observă din Figura 5.6, la începutul procesului, VUM optime  $\omega_{OPTIM-1}, \omega_{OPTIM-2}, \omega_{OPTIM-3}, \omega_{OPTIM-4}, \omega_{OPTIM-5}, \omega_{OPTIM-6}$  sunt în zona valorilor momentane ale VUM, dar nu sunt identice cu acestea.

Din cauza inerției mecanice,  $J = 40[\text{kgm}^2]$ , VUM momentane nu pot fi egale cu cele optime.

La sfârșitul intervalului  $\Delta t = 1130 \div 1165$ [s] VUM optimă,  $\omega_{OPTIM-k}$  și cea măsurată,  $\omega(1165)$ , au valorile:  $\omega_{OPTIM-k} = 400.51[\text{rad/s}]$  și  $\omega(1165) = 435.24[\text{rad/s}]$ . fiind, deci, mult diferite și, prin urmare se impune modificarea rezistenței de sarcină astfel ca VUM să devină egale  $\omega(1165) = \omega_{OPTIM-k}$

Modificarea rezistenței de sarcină trebuie realizată încă în faza de început a procesului și în funcție de 2 elemente esențiale:

- 1) valoarea momentului de inerție  $J$   
și
- 2) eroarea de VUM  $\Delta\omega = \omega_{OPTIM} - \omega_{MOMENTAN}$

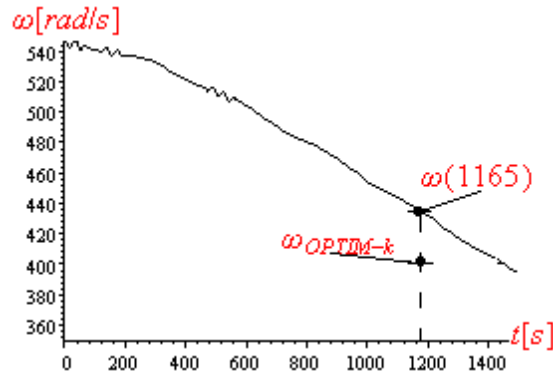


Fig.5.6.Evoluția în timp a VUM pe intervalul 0-1500[s]

### Modificarea sarcinii

Se consideră o variație a vitezei vântului, pe intervalul  $\Delta t = 0 \div 265[s]$ , de forma:

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

dată în Figura 5.7:

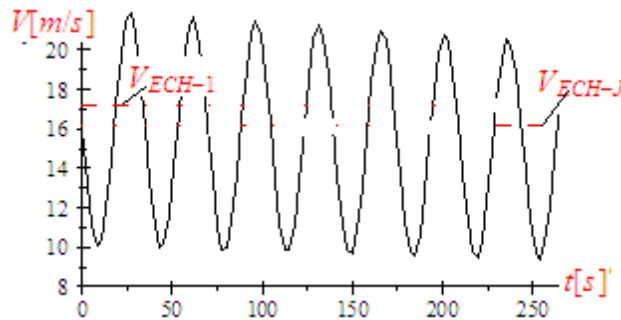


Fig.5.7.Variația vitezei vântului în timp

Pe intervalul  $\Delta t = 230 \div 265[s]$  viteza echivalentă,  $V_{ECH}$ , are valoarea:

$$V_{ECH-J} = \sqrt[3.56]{\frac{1}{35} \int_{230}^{265} ((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600})^{3.56} dt} = 16.185[m/s],$$

Se obține pentru  $\omega_{OPTIM}$  valoarea:

$$\omega_{OPTIM-J} = 31.817 \cdot V_{ECH} = 31.817 \cdot 16.185 = 514.96[rad/s]$$

Variația în timp a VUM,  $\omega$ , se obține prin rezolvarea ecuației mișcării:

$$\left\{ \begin{array}{l} 40 \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot ((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600} / \omega - 2.1231 \times 10^{-2}) \cdot \\ e^{-98.06((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600} / \omega - 0.0525)} \cdot \\ ((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600})^3 / \omega - \\ 5445 \cdot \omega (5 \cdot (425.61) + 8) \cdot \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot (425.61)^2 + 2000 \cdot (425.61) + 1600}{(1250 \cdot (425.61)^2 + 4000 \cdot (425.61) + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2} \\ \omega(0) = 535.66 \end{array} \right.$$

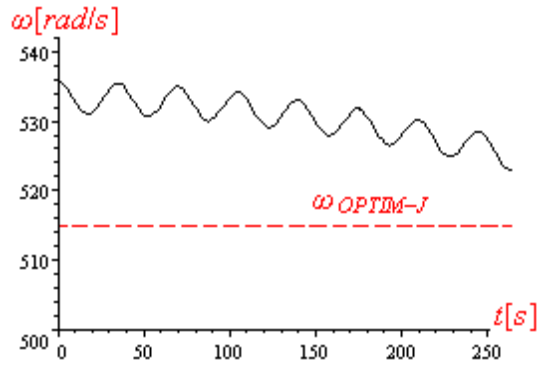


Fig. 5.8. Variația VUM în timp

Așa cum se observă din figura 5.8, VUM nu atinge valoarea optimă  $\omega_{OPTIM-J}$ . Pentru a se atinge valoarea optimă se propune o modificare a rezistenței de sarcină de forma:

$$R_{FINAL} = R_{INITIAL} \sqrt[3]{\omega_{OPTIM-INITIAL} / \omega_{OPTIM-FINAL}}$$

sau

$$R_{FINAL} = R_{INITIAL} \sqrt[3]{\omega_{OPTIM-INITIAL} / \omega_{OPTIM-FINAL}} = 425.61 \sqrt[3]{547.13 / 514.96}$$

Această modificare a sarcinii trebuie făcută, însă, de la începutul procesului. La o funcționare în gol și monitorizând viteza vântului se poate considera că se atinge  $\omega_{OPTIM}$  corespunzătoare momentului de timp respectiv, de exemplu  $\omega_{OPTIM} = 547.13 [rad/s]$ .

Pe intervalul  $\Delta t = 5 \div 40 [s]$  VUM optimă,  $\omega_{OPTIM}$ , are valoarea

$$\omega_{OPTIM-1} = 546.84 [rad/s]$$

Cu ecuația mișcării la  $R = 425.61 [\Omega]$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} 40 \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) e^{-t/3600} / \omega - 2.1231 \times 10^{-2} \right) \cdot \\ e^{-98.06 \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) e^{-t/3600} / \omega - 0.0525 \right)} \cdot \\ \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) e^{-t/3600} \right)^3 / \omega - \\ 5445 \cdot \omega \left( 5 \cdot (425.61) + 8 \right) \cdot \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot (425.61)^2 + 2000 \cdot (425.61) + 1600}{(1250 \cdot (425.61)^2 + 4000 \cdot (425.61) + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2} \\ \omega(0) = 547.13 \end{array} \right.$$

se obține variația în timp a VUM, dată în Figura 5.9.

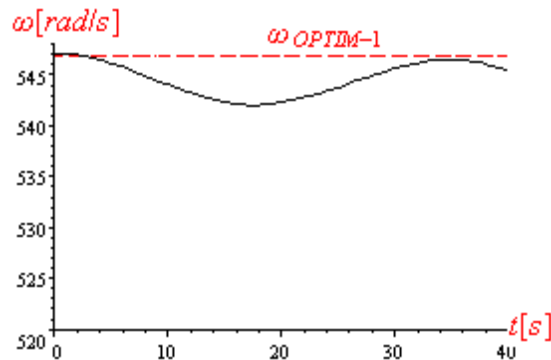


Fig. 5.9. Variația VUM în timp pe intervalul 0-40[s]

După un timp  $t=35 [s]$  VUM atinge valoarea  $\omega(35) = 546.48 [rad/s]$ , apropiată de cea

optimă  $\omega_{OPTIM-1} = 546.84[rad/s]$  și deci, nu se impune o modificare a sarcinii.

La  $t=40[s]$  VUM atinge valoarea  $\omega(40) = 545.43[rad/s]$ , la  $t=45[s]$  VUM are valoarea  $\omega(45) = 543.33[rad/s]$ , iar la  $t=65[s]$  are valoarea  $\omega(65) = 544.71[rad/s]$ .

La  $t = 45[s]$  VUM,  $\omega_{OPTIM}$ , are valoarea  $\omega_{OPTIM-2} = 546.74[rad/s]$ .

### Observația 1

Datorită variației vitezei vântului în timp VUM oscilează, pe intervalul  $\Delta t = 0 \div 110[s]$ , între o valoare minimă  $\omega_{MIN} = 540.4[rad/s]$  și o valoare maximă  $\omega_{MAX} = 547.4[rad/s]$ , așa cum se poate observa din Figura 5.10 și, deci valoarea lui  $\omega_{OPTIM}$  se compară cu valoarea medie a VUM.

La  $t = 65[s]$  s-a obținut valoarea  $\omega_{OPTIM-6} = 542.77[rad/s]$ , față de valoarea medie  $\omega_{MEDIU} = 543[rad/s]$  și, prin urmare, se impune modificarea sarcinii cu valoarea  $R_{FINAL} = 327.32[\Omega]$ .

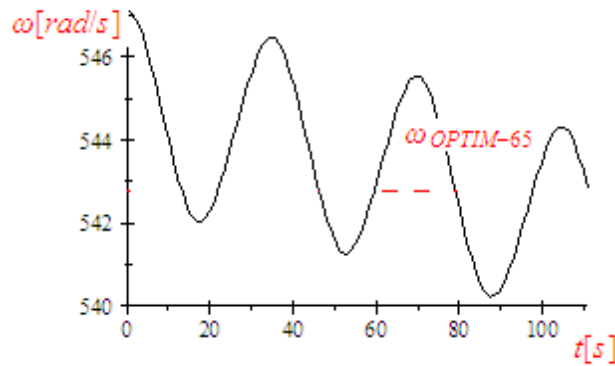


Fig.5.10.Variația VUM în timp pe intervalul 0-110[s]

Pe intervalul  $\Delta t = 75 \div 110[s]$ ,  $V_{ECH}$  are valoarea:

$$V_{ECH-6} = \sqrt[3.56]{\frac{1}{35} \int_{75}^{110} ((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600})^{3.56} dt} = 16.856[m/s],$$

Se obține pentru  $\omega_{OPTIM}$  valoarea:

$$\omega_{OPTIM-110} = 31.817 \cdot V_{ECH} = 31.817 \cdot 16.856 = 536.31[rad/s],$$

La  $R = 425.61[\Omega]$  și  $R = 327.32[\Omega]$  ecuațiile mișcării

$$\left. \begin{aligned}
 & 40 \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left( (16 - 6 \sin(0.17943(t+65))) e^{-(t+65)/3600} / \omega - 2.1231 \times 10^{-2} \right) \cdot \\
 & e^{-98.06 \left( (16 - 6 \sin(0.17943(t+65))) e^{-(t+65)/3600} / \omega - 0.0525 \right)} \cdot \\
 & \left( (16 - 6 \sin(0.17943(t+65))) e^{-(t+65)/3600} \right)^3 / \omega - \\
 & 5445 \cdot \omega (5 \cdot (425.61) + 8) \cdot \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot (425.61)^2 + 2000 \cdot (425.61) + 1600}{(1250 \cdot (425.61)^2 + 4000 \cdot (425.61) + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2} \\
 & 40 \cdot \frac{d\Omega}{dt} = 23.584 \cdot \left( (16 - 6 \sin(0.17943(t+65))) e^{-(t+65)/3600} / \Omega - 2.1231 \times 10^{-2} \right) \cdot \\
 & e^{-98.06 \left( (16 - 6 \sin(0.17943(t+65))) e^{-(t+65)/3600} / \Omega - 0.0525 \right)} \cdot \\
 & \left( (16 - 6 \sin(0.17943(t+65))) e^{-(t+65)/3600} \right)^3 / \Omega - \\
 & 5445 \cdot \Omega (5 \cdot (327.32) + 8) \cdot \frac{4 \cdot \Omega^2 + 625 \cdot (327.32)^2 + 2000 \cdot (327.32) + 1600}{(1250 \cdot (327.32)^2 + 4000 \cdot (327.32) + 3200 + 7 \cdot \Omega^2)^2} \\
 & \omega(0) = 544.71 \\
 & \Omega(0) = 544.71
 \end{aligned} \right\} \text{sunt}$$

Se obține variația în timp a VUM, dată în Figura 5.11:

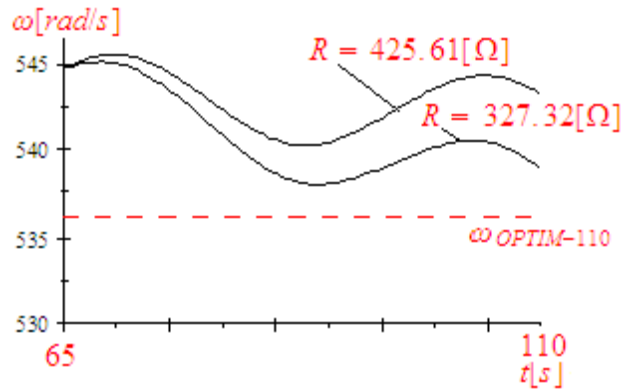


Fig.5.11. Variația VUM în timp pe intervalul 65-110[s] la  $R = 425.61[\Omega]$  și  $327.32[\Omega]$ ,

Așa cum se observă din figura 5.11, la  $R = 327.32[\Omega]$  nu se atinge  $\omega_{OPTIM-110}$ .

Pentru  $R = 425.61[\Omega]$  și  $R = 227.32[\Omega]$  se obțin ecuațiile mișcării:

$$\left. \begin{aligned}
 &40 \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left( (16 - 6\sin(0.17943(t+65))) e^{-(t+65)/3600} / \omega - 2.1231 \times 10^{-2} \right) \cdot \\
 &e^{-98.06 \left( (16 - 6\sin(0.17943(t+65))) e^{-(t+65)/3600} / \omega - 0.0525 \right)} \cdot \\
 &\quad \left( (16 - 6\sin(0.17943(t+65))) e^{-(t+65)/3600} \right)^3 / \omega - \\
 &\quad 5445 \cdot \omega \left( 5 \cdot (425.61) + 8 \right) \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot (425.61)^2 + 2000 \cdot (425.61) + 1600}{(1250 \cdot (425.61)^2 + 4000 \cdot (425.61) + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2} \\
 &40 \cdot \frac{d\Omega}{dt} = 23.584 \cdot \left( (16 - 6\sin(0.17943(t+65))) e^{-(t+65)/3600} / \Omega - 2.1231 \times 10^{-2} \right) \cdot \\
 &e^{-98.06 \left( (16 - 6\sin(0.17943(t+65))) e^{-(t+65)/3600} / \Omega - 0.0525 \right)} \cdot \\
 &\quad \left( (16 - 6\sin(0.17943(t+65))) e^{-(t+65)/3600} \right)^3 / \Omega - \\
 &\quad 5445 \cdot \Omega \left( 5 \cdot (227.32) + 8 \right) \frac{4 \cdot \Omega^2 + 625 \cdot (227.32)^2 + 2000 \cdot (227.32) + 1600}{(1250 \cdot (227.32)^2 + 4000 \cdot (227.32) + 3200 + 7 \cdot \Omega^2)^2} \\
 &\quad \omega(0) = 544.71 \\
 &\quad \Omega(0) = 544.71
 \end{aligned} \right\}$$

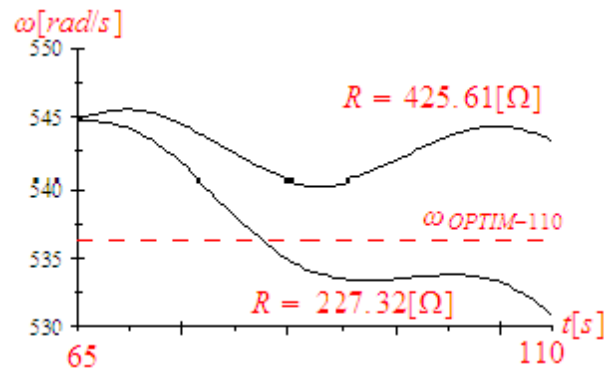


Fig.5.12.Variația VUM în timp pe intervalul 65-110[s] la  $R = 425.61[\Omega]$  și  $227.32[\Omega]$

La  $R = 227.32[\Omega]$  se atinge  $\omega_{OPTIM-110} = 536.31[\text{rad/s}]$  la  $t=65+17=82[\text{s}]$  și, deci, rezistența de sarcină este prea mică.

Cu  $R = 425.61[\Omega]$  și  $R = 277.32[\Omega]$  ecuațiile mișcării sunt:

$$\left. \begin{aligned}
 40 \cdot \frac{d\omega}{dt} &= 23.584 \cdot \left( (16 - 6\sin(0.17943(t+65))) e^{-(t+65)/3600} / \omega - 2.1231 \times 10^{-2} \right) \cdot \\
 &e^{-98.06 \left( (16 - 6\sin(0.17943(t+65))) e^{-(t+65)/3600} / \omega - 0.0525 \right)} \cdot \\
 &\left( (16 - 6\sin(0.17943(t+65))) e^{-(t+65)/3600} \right)^3 / \omega - \\
 &5445 \cdot \omega \left( 5 \cdot (425.61) + 8 \right) \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot (425.61)^2 + 2000 \cdot (425.61) + 1600}{(1250 \cdot (425.61)^2 + 4000 \cdot (425.61) + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2} \\
 40 \cdot \frac{d\Omega}{dt} &= 23.584 \cdot \left( (16 - 6\sin(0.17943(t+65))) e^{-(t+65)/3600} / \Omega - 2.1231 \times 10^{-2} \right) \cdot \\
 &e^{-98.06 \left( (16 - 6\sin(0.17943(t+65))) e^{-(t+65)/3600} / \Omega - 0.0525 \right)} \cdot \\
 &\left( (16 - 6\sin(0.17943(t+65))) e^{-(t+65)/3600} \right)^3 / \Omega - \\
 &5445 \cdot \Omega \left( 5 \cdot (277.32) + 8 \right) \frac{4 \cdot \Omega^2 + 625 \cdot (277.32)^2 + 2000 \cdot (277.32) + 1600}{(1250 \cdot (277.32)^2 + 4000 \cdot (277.32) + 3200 + 7 \cdot \Omega^2)^2} \\
 \omega(0) &= 544.71 \\
 \Omega(0) &= 544.71
 \end{aligned} \right\}$$

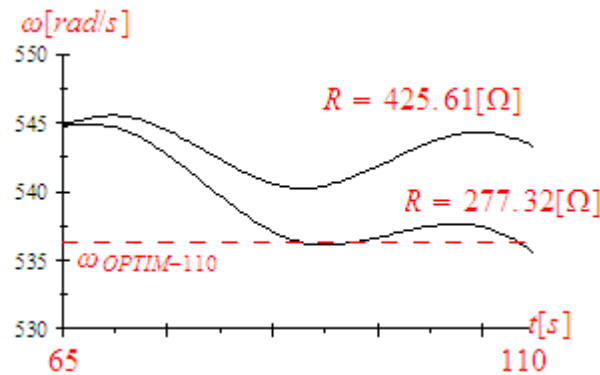


Fig.5.13. Variația VUM în timp pe intervalul 65-110[s] la  $R = 425.61[\Omega]$  și  $277.32[\Omega]$

La  $R = 277.32[\Omega]$  se atinge  $\omega_{OPTIM-110}$  în timp util și deci, pentru a se atinge valoarea optimă se propune o modificare a rezistenței de sarcină de forma

$$R_{FINAL} = R_{INITIAL} \sqrt[0.15]{\omega_{OPTIM-INITIAL} / \omega_{OPTIM-FINAL}}$$

sau

$$277.32 = 425.61 \sqrt[0.15]{547.13 / 514.96}$$

sau

$$(277.32 / 425.61)^x = 547.13 / 514.96 = 1.0625$$

cu soluția  $x = -0.15$ .

Prin urmare rezistența de sarcină trebuie modificată astfel:

$$R_{FINAL} = R_{INITIAL}^{-0.15} \sqrt[0.15]{\omega_{OPTIM-INITIAL} / \omega_{OPTIM-FINAL}}$$

sau

$$R_{FINAL} = \frac{R_{INITIAL}}{0.15 \sqrt[0.15]{\omega_{OPTIM-INITIAL} / \omega_{OPTIM-FINAL}}}$$

Pe intervalul  $\Delta t = 1130 \div 1165[s]$  pentru  $\omega_{OPTIM}$  s-a obținut valoarea

$$\omega_{OPTIM-k} = 31.817 \cdot V_{ECH} = 31.817 \cdot 12.588 = 400.51[rad/s]$$

Cu valorile  $R = 425.61[\Omega]$  și  $R = 277.32[\Omega]$  evoluția procesului, pe o perioadă mai lungă de timp,  $\Delta t = 35 \div 1165[s]$ , este dată în Figura 5.14, de unde se observă că la  $R = 277.32[\Omega]$  se atinge  $\omega_{OPTIM}$  la  $t=800[s]$ , deci mai repede decât ar fi de dorit, adică la  $t=1165[s]$ .

$$\left\{ \begin{array}{l} 40 \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left( (16 - 6 \sin(0.17943(t+65))) e^{-(t+65)/3600} / \omega - 2.1231 \times 10^{-2} \right) \cdot \\ e^{-98.06 \left( (16 - 6 \sin(0.17943(t+65))) e^{-(t+65)/3600} / \omega - 0.0525 \right)} \cdot \\ \left( (16 - 6 \sin(0.17943(t+65))) e^{-(t+65)/3600} \right)^3 / \omega - \\ 5445 \cdot \omega \left( 5 \cdot (425.61) + 8 \right) \cdot \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot (425.61)^2 + 2000 \cdot (425.61) + 1600}{(1250 \cdot (425.61)^2 + 4000 \cdot (425.61) + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2} \\ 40 \cdot \frac{d\Omega}{dt} = 23.584 \cdot \left( (16 - 6 \sin(0.17943(t+65))) e^{-(t+65)/3600} / \Omega - 2.1231 \times 10^{-2} \right) \cdot \\ e^{-98.06 \left( (16 - 6 \sin(0.17943(t+65))) e^{-(t+65)/3600} / \Omega - 0.0525 \right)} \cdot \\ \left( (16 - 6 \sin(0.17943(t+65))) e^{-(t+65)/3600} \right)^3 / \Omega - \\ 5445 \cdot \Omega \left( 5 \cdot (277.32) + 8 \right) \cdot \frac{4 \cdot \Omega^2 + 625 \cdot (277.32)^2 + 2000 \cdot (277.32) + 1600}{(1250 \cdot (277.32)^2 + 4000 \cdot (277.32) + 3200 + 7 \cdot \Omega^2)^2} \\ \omega(0) = 544.71 \\ \Omega(0) = 544.71 \end{array} \right.$$

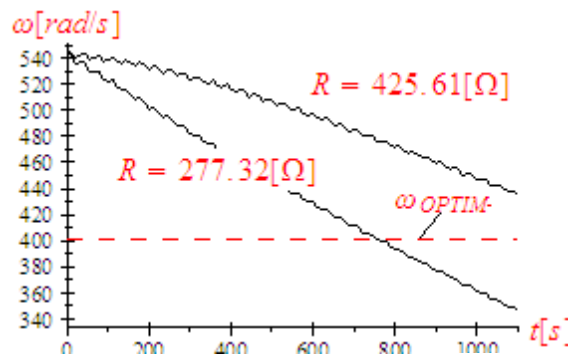


Fig.5.14.Variația VUM în timp pe intervalul  $\Delta t = 35 \div 1165[s]$  la  $R = 425.61[\Omega]$  și  $277.32[\Omega]$

## 5.2.2.Algoritmul de conducere

Cumulând informațiile de mai sus și monitorizând VUM la momentele de timp  $t=135,235,335,435,535,635,735,835,935,1035,1135[s]$  se compară VUM  $\omega$  și  $\omega_{OPTIM}$  la  $R = 277.32[\Omega]$ .

Vitezele unghiulare optime  $\omega_{OPTIM-k}$ , pe intervalele asociate timpilor menționați, au valorile:

1) Pe intervalul  $\Delta t = 100 \div 135[s]$ ,  $V_{ECH}$  are valoarea:

$$V_{ECH-1} = \sqrt[3.56]{\frac{1}{35} \int_{100}^{135} \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) e^{-t/3600} \right)^{3.56} dt} = 16.73[m/s],$$

Se obține pentru  $\omega_{OPTIM}$  valoarea:

$$\omega_{OPTIM-1} = 31.817 \cdot V_{ECH} = 31.817 \cdot 16.73 = 532.3[rad/s]$$



2) Pe intervalul  $\Delta t = 200 \div 235[s]$ ,  $V_{ECH}$  are valoarea:

$$V_{ECH-2} = \sqrt[3.56]{\frac{1}{35} \int_{200}^{235} ((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600})^{3.56} dt} = 16.299[m/s],$$

Se obține pentru  $\omega_{OPTIM}$  valoarea:

$$\omega_{OPTIM-2} = 31.817 \cdot V_{ECH} = 31.817 \cdot 16.299 = 518.59[rad/s]$$

3) Pe intervalul  $\Delta t = 300 \div 335[s]$ ,  $V_{ECH}$  are valoarea:

$$V_{ECH-3} = \sqrt[3.56]{\frac{1}{35} \int_{300}^{335} ((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600})^{3.56} dt} = 15.873[m/s],$$

Se obține pentru  $\omega_{OPTIM}$  valoarea

$$\omega_{OPTIM-3} = 31.817 \cdot V_{ECH} = 31.817 \cdot 15.873 = 505.03[rad/s]$$

4) Pe intervalul  $\Delta t = 400 \div 435[s]$ ,  $V_{ECH}$  are valoarea:

$$V_{ECH-4} = \sqrt[3.56]{\frac{1}{35} \int_{400}^{435} ((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600})^{3.56} dt} = 15.435[m/s],$$

Se obține pentru  $\omega_{OPTIM}$  valoarea:

$$\omega_{OPTIM-4} = 31.817 \cdot V_{ECH} = 31.817 \cdot 15.435 = 491.1[rad/s]$$

5) Pe intervalul  $\Delta t = 500 \div 535[s]$ ,  $V_{ECH}$  are valoarea:

$$V_{ECH-5} = \sqrt[3.56]{\frac{1}{35} \int_{500}^{535} ((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600})^{3.56} dt} = 14.996[m/s],$$

Se obține pentru  $\omega_{OPTIM}$  valoarea:

$$\omega_{OPTIM-5} = 31.817 \cdot V_{ECH} = 31.817 \cdot 14.996 = 477.13[rad/s]$$

6) Pe intervalul  $\Delta t = 600 \div 635[s]$ ,  $V_{ECH}$  are valoarea:

$$V_{ECH-6} = \sqrt[3.56]{\frac{1}{35} \int_{600}^{635} ((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600})^{3.56} dt} = 14.568[m/s],$$

Se obține pentru  $\omega_{OPTIM}$ , valoarea:

$$\omega_{OPTIM-6} = 31.817 \cdot V_{ECH} = 31.817 \cdot 14.568 = 463.51[rad/s]$$

7) Pe intervalul  $\Delta t = 700 \div 735[s]$ ,  $V_{ECH}$  are valoarea:

$$V_{ECH-7} = \sqrt[3.56]{\frac{1}{35} \int_{700}^{735} ((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600})^{3.56} dt} = 14.157[m/s],$$

Se obține pentru  $\omega_{OPTIM}$ , valoarea:

$$\omega_{OPTIM-7} = 31.817 \cdot V_{ECH} = 31.817 \cdot 14.157 = 450.43[rad/s]$$

8) Pe intervalul  $\Delta t = 800 \div 835[s]$ ,  $V_{ECH}$  are valoarea:

$$V_{ECH-8} = \sqrt[3.56]{\frac{1}{35} \int_{800}^{835} ((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600})^{3.56} dt} = 13.775[m/s],$$

Se obține pentru  $\omega_{OPTIM}$  valoarea:

$$\omega_{OPTIM-8} = 31.817 \cdot V_{ECH} = 31.817 \cdot 13.775 = 438.28[rad/s]$$

9) Pe intervalul  $\Delta t = 900 \div 935[s]$ ,  $V_{ECH}$  are valoarea:

$$V_{ECH-9} = \sqrt[3.56]{\frac{1}{35} \int_{900}^{935} ((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600})^{3.56} dt} = 13.421[m/s],$$

Se obține pentru  $\omega_{OPTIM}$  valoarea:

$$\omega_{OPTIM-9} = 31.817 \cdot V_{ECH} = 31.817 \cdot 13.421 = 427.02[rad/s]$$

10) Pe intervalul  $\Delta t = 1000 \div 1035[s]$ ,  $V_{ECH}$  are valoarea:

$$V_{ECH-10} = \sqrt[3.56]{\frac{1}{35} \int_{1000}^{1035} ((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600})^{3.56} dt} = 13.069[m/s],$$

Se obține pentru  $\omega_{OPTIM}$  valoarea:

$$\omega_{OPTIM-10} = 31.817 \cdot V_{ECH} = 31.817 \cdot 13.069 = 415.82[rad/s]$$

11) Pe intervalul  $\Delta t = 1100 \div 1135[s]$ ,  $V_{ECH}$  are valoarea:

$$V_{ECH-11} = \sqrt[3.56]{\frac{1}{35} \int_{1100}^{1135} ((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600})^{3.56} dt} = 12.707[m/s],$$

Se obține pentru  $\omega_{OPTIM}$  valoarea:

$$\omega_{OPTIM-11} = 31.817 \cdot V_{ECH} = 31.817 \cdot 12.707 = 404.30[rad/s]$$

Prin rezolvarea ecuației mișcării:

$$\left\{ \begin{array}{l} 40 \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot ((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600} / \omega - 2.1231 \times 10^{-2}) \cdot \\ e^{-98.06((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600} / \omega - 0.0525)} \cdot \\ ((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600})^3 / \omega - \\ 5445 \cdot \omega (5 \cdot (277.32) + 8) \cdot \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot (277.32)^2 + 2000 \cdot (277.32) + 1600}{(1250 \cdot (277.32)^2 + 4000 \cdot (277.32) + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2} \\ \omega(0) = 544.71 \end{array} \right.$$

se obțin VUM,  $\omega$ , la momentele de timp  $t=135,235,335,435,535,635,735,835,935,1035,1135[s]$ .

$$\omega(135) = 518.31[rad/s], \omega(235) = 498.14[rad/s], \omega(335) = 478.69[rad/s], \omega(435) = 460.84[rad/s], \omega(535) = 444.53[rad/s], \omega(635) = 428.62[rad/s], \\ \omega(735) = 412.10[rad/s], \omega(835) = 394.86[rad/s], \omega(935) = 377.84[rad/s]$$

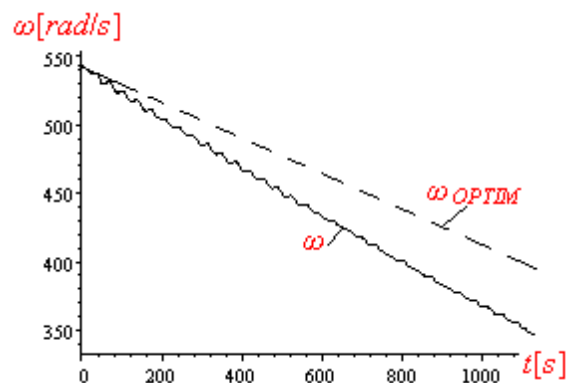


Fig.5.15.Variația VUM în timp pe intervalul  $\Delta t = 35 \div 1165[s]$  la  $R = 277.32[\Omega]$

Se observă că la  $R = 277.32[\Omega]$  VUM scade sub valoarea lui  $\omega_{OPTIM}$ .

La  $R = 377.32[\Omega]$  ecuația mișcării devine:

$$\left\{ \begin{array}{l} 40 \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) e^{-t/3600} / \omega - 2.1231 \times 10^{-2} \right) \cdot \\ e^{-98.06 \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) e^{-t/3600} / \omega - 0.0525 \right)} \cdot \\ \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) e^{-t/3600} \right)^3 / \omega - \\ 5445 \cdot \omega \left( 5 \cdot (277.32) + 8 \right) \cdot \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot (277.32)^2 + 2000 \cdot (277.32) + 1600}{(1250 \cdot (277.32)^2 + 4000 \cdot (277.32) + 3200 + 7 \cdot \omega^2)} \\ \omega(0) = 544.71 \end{array} \right.$$

și se obțin valorile:

$$\omega(135) = 534.71[\text{rad/s}], \omega(235) = 524.40[\text{rad/s}], \omega(335) = 513.24[\text{rad/s}], \omega(435) = 502.61[\text{rad/s}], \omega(535) = 492.51[\text{rad/s}], \omega(635) = 481.88[\text{rad/s}], \omega(735) = 469.9[\text{rad/s}], \omega(835) = 456.26[\text{rad/s}], \omega(935) = 441.95[\text{rad/s}]$$

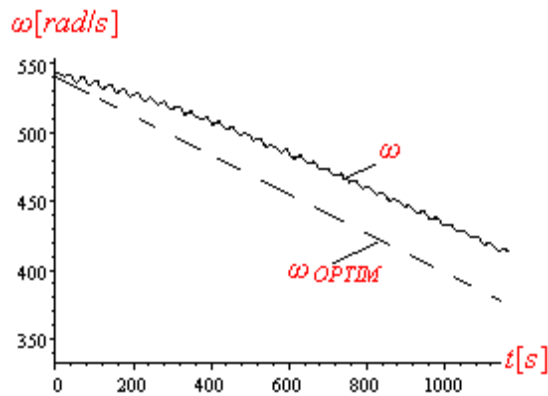


Fig.5.16. Variația VUM în timp pe intervalul  $\Delta t = 35 \div 1165[\text{s}]$  la  $R = 377.32[\Omega]$

În acest caz valorile  $\omega_{OPTIM}$  sunt sub valorile lui  $\omega$ .

La  $t=135[\text{s}]$  valoarea lui  $\omega_{OPTIM}$  este:

$$\omega_{OPTIM-135} = 532.3[\text{rad/s}]$$

La timpul  $t=135[\text{s}]$  și la  $R = 377.32[\Omega]$  valoarea lui  $\omega$  este  $\omega(135) = 534.71[\text{rad/s}]$ , deci mai mare decât  $\omega_{OPTIM-135}$  și, prin urmare, rezistența de sarcină trebuie modificată la valoarea:

$$R_{FINAL} = R_{INITIAL} \sqrt[0.15]{\omega_{OPTIM-135}/\omega} = 377.32 \sqrt[0.15]{532.3/534.71} = 366.13[\Omega]$$

Cu această valoare a rezistenței de sarcină ecuația mișcării devine:

$$\left. \begin{aligned}
 40 \cdot \frac{d\omega}{dt} &= 23.584 \cdot \left( (16 - 6 \sin(0.17943(t+135))) e^{-(t+135)/3600} / \omega - 2.1231 \times 10^{-2} \right) \cdot \\
 e^{-98.06 \left( (16 - 6 \sin(0.17943(t+135))) e^{-(t+135)/3600} / \omega - 0.0525 \right)} & \\
 \left( (16 - 6 \sin(0.17943(t+135))) e^{-(t+135)/3600} \right)^3 / \omega - & \\
 5445 \cdot \omega \left( 5 \cdot (366.13) + 8 \right) \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot (366.13)^2 + 2000 \cdot (366.13) + 1600}{(1250 \cdot (366.13)^2 + 4000 \cdot (366.13) + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2} & \\
 \omega(0) &= 534.71
 \end{aligned} \right\}$$

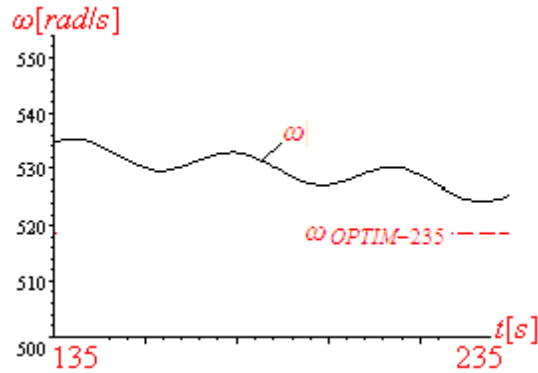


Fig.5.17.Variația VUM în timp pe intervalul  $\Delta t = 135 \div 235[s]$  la  $R = 366.13[\Omega]$

La timpul  $t=235[s]$  și la  $R = 366.13[\Omega]$  valoarea lui  $\omega$  este  $\omega(235) = 523.34[rad/s]$  față de  $\omega_{OPTIM-235} = 518.59[rad/s]$  și, deci, rezistența de sarcină se modifică la valoarea:

$$R_{FINAL} = R_{INITIAL} \sqrt[0.15]{\omega_{OPTIM}/\omega} = 366.13 \sqrt[0.15]{518.59/523.34} = 344.54[\Omega]$$

Se obține ecuația mișcării sub forma:

$$\left. \begin{aligned}
 40 \cdot \frac{d\omega}{dt} &= 23.584 \cdot \left( (16 - 6 \sin(0.17943(t+235))) e^{-(t+235)/3600} / \omega - 2.1231 \times 10^{-2} \right) \cdot \\
 e^{-98.06 \left( (16 - 6 \sin(0.17943(t+235))) e^{-(t+235)/3600} / \omega - 0.0525 \right)} & \\
 \left( (16 - 6 \sin(0.17943(t+235))) e^{-(t+235)/3600} \right)^3 / \omega - & \\
 5445 \cdot \omega \left( 5 \cdot (344.54) + 8 \right) \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot (344.54)^2 + 2000 \cdot (344.54) + 1600}{(1250 \cdot (344.54)^2 + 4000 \cdot (344.54) + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2} & \\
 \omega(0) &= 523.34
 \end{aligned} \right\}$$

$$\omega(100) = 509.14[rad/s]$$

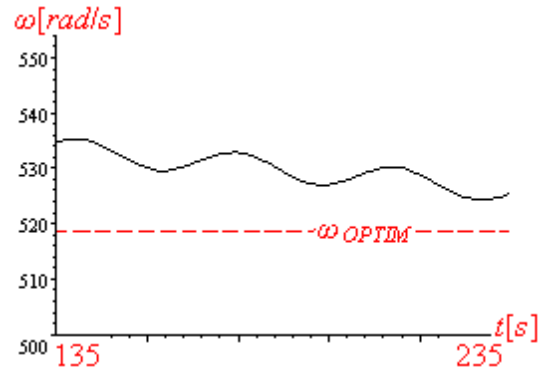


Fig.5.18. Variația VUM în timp pe intervalul  $\Delta t = 135 \div 235[s]$  la  $R = 344.54[\Omega]$

La timpul  $t=335[s]$  și la  $R = 344.54[\Omega]$  valoarea lui  $\omega$  este  $\omega(335) = 509.14[rad/s]$  față de valoarea optimă,  $\omega_{OPTIM-335} = 505.03[rad/s]$ . Se impune deci, în continuare, modificarea sarcinii la valoarea:

$$R_{FINAL} = R_{INITIAL} \cdot 0.15 \sqrt{\omega_{OPTIM}/\omega} = 344.54 \cdot 0.15 \sqrt{505.03/509.14} = 326.42[\Omega]$$

Cu această valoare a rezistenței de sarcină ecuația mișcării devine:

$$\left\{ \begin{array}{l} 40 \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left( (16 - 6 \sin(0.17943(t+335))) e^{-(t+335)/3600} / \omega - 2.1231 \times 10^{-2} \right) \cdot \\ e^{-98.06 \left( (16 - 6 \sin(0.17943(t+335))) e^{-(t+335)/3600} / \omega - 0.0525 \right)} \cdot \\ \left( (16 - 6 \sin(0.17943(t+335))) e^{-(t+335)/3600} \right)^3 / \omega - \\ 5445 \cdot \omega \left( 5 \cdot (326.42) + 8 \right) \cdot \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot (326.42)^2 + 2000 \cdot (326.42) + 1600}{(1250 \cdot (326.42)^2 + 4000 \cdot (326.42) + 3200 + 7 \cdot \omega^2)} \\ \omega(0) = 509.14 \end{array} \right.$$

La timpul  $t=435[s]$  și la  $R = 326.42[\Omega]$  valoarea lui  $\omega$  este  $\omega(435) = 493.92[rad/s]$ , tot peste valoarea optimă,  $\omega_{OPTIM-435} = 491.1[rad/s]$ , rezultând, astfel, valoarea rezistenței de sarcină:

$$R_{FINAL} = R_{INITIAL} \cdot 0.15 \sqrt{\omega_{OPTIM}/\omega} = 326.42 \cdot 0.15 \sqrt{491.1/493.92} = 314.19[\Omega]$$

și se obține ecuația mișcării:

$$\left\{ \begin{array}{l} 40 \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left( (16 - 6 \sin(0.17943(t+435))) e^{-(t+435)/3600} / \omega - 2.1231 \times 10^{-2} \right) \cdot \\ e^{-98.06 \left( (16 - 6 \sin(0.17943(t+435))) e^{-(t+435)/3600} / \omega - 0.0525 \right)} \cdot \\ \left( (16 - 6 \sin(0.17943(t+435))) e^{-(t+435)/3600} \right)^3 / \omega - \\ 5445 \cdot \omega \left( 5 \cdot (314.19) + 8 \right) \cdot \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot (314.19)^2 + 2000 \cdot (314.19) + 1600}{(1250 \cdot (314.19)^2 + 4000 \cdot (314.19) + 3200 + 7 \cdot \omega^2)} \\ \omega(0) = 493.92 \end{array} \right.$$

La timpul  $t=535[s]$  și la  $R = 314.19[\Omega]$  valoarea lui  $\omega$  este  $\omega(535) = 478.49[rad/s]$  foarte apropiată de  $\omega_{OPTIM-535} = 477.13[rad/s]$ , rezultând rezistența de sarcină de valoare:

$$R_{FINAL} = R_{INITIAL} \cdot \sqrt[0.15]{\omega_{OPTIM}/\omega} = 314.19 \cdot \sqrt[0.15]{477.13/478.49} = 308.28[\Omega]$$

și se obține ecuația mișcării:

$$\left\{ \begin{array}{l} 40 \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left( (16 - 6 \sin(0.17943(t+535))) e^{-(t+535)/3600} / \omega - 2.1231 \times 10^{-2} \right) \cdot \\ e^{-98.06 \left( (16 - 6 \sin(0.17943(t+535))) e^{-(t+535)/3600} / \omega - 0.0525 \right)} \cdot \\ \left( (16 - 6 \sin(0.17943(t+535))) e^{-(t+535)/3600} \right)^3 / \omega - \\ 5445 \cdot \omega \left( 5 \cdot (308.28) + 8 \right) \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot (308.28)^2 + 2000 \cdot (308.28) + 1600}{(1250 \cdot (308.28)^2 + 4000 \cdot (308.28) + 3200 + 7 \cdot \omega^2)} \\ \omega(0) = 478.49 \end{array} \right.$$

La timpul  $t=635[s]$  și la  $R = 308.28[\Omega]$  valoarea lui  $\omega$  este  $\omega(635) = 462.64[rad/s]$  mai mică decât  $\omega_{OPTIM-635} = 463.51[rad/s]$ .

Evoluția procesului, pe acest interval de reglare, este dată în Figura 5.19.

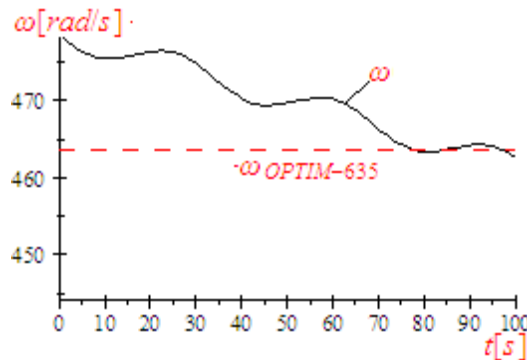


Fig.5.19.Variația VUM în timp pe intervalul  $\Delta t = 535 \div 635[s]$  la  $R = 308.28[\Omega]$

În concluzie algoritmul de conducere este următorul:

- 1) se măsoară viteza vântului și se determină  $V_{ECH} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (V(t))^n dt}$ ;
- 2) se determină  $\omega_{OPTIM}$  din  $\omega_{OPTIM} = k \cdot V_{ECH}$ ;
- 3) se menține, prin sarcină la GSMP, VUM în jurul lui  $\omega_{OPTIM}$ .

#### Precizare

Metoda de reglare prezentată este net superioară cazurilor cu reglatoare de tip PI de ecuație:

$$\frac{dR}{dt} = k_1 \frac{d\omega}{dt} + k_2 (\omega - \omega_{OPTIM})$$

Rezultatele obținute cu ecuația mișcării și a regulatorului sub formă:

$$\left\{ \begin{array}{l} 40. \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot ((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600} / \omega - 2.1231 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06((16-6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600} / \omega - 0.0525)} \cdot \\ ((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600})^3 / \omega - 5445.0\omega(5.0R + 8.0) \frac{4.0\omega^2 + 625.0R^2 + 2000.0R + 1600.0}{(1250.0R^2 + 4000.0R + 3200.0 + 7.0\omega^2)^2} - \text{ecuatia miscarii} \\ \frac{dR}{dt} = k_1 \frac{d\omega}{dt} + k_2(\omega - \omega_{OPTIM}) - \text{ecuatia regulatorului} \end{array} \right.$$

se dau în figura 5.20.

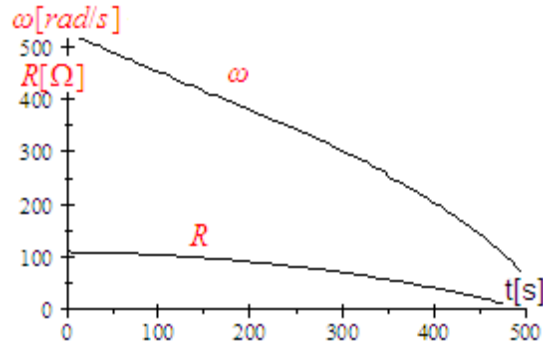


Fig.5.20.Variația VUM și a sarcinii în timp folosind un regulator de tip PI

$$\frac{dR}{dt} = 3.5942 \times 10^{-5} \frac{d\omega}{dt} + 0.001(\omega - 547.13)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 40. \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot ((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600} / \omega - 2.1231 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06((16-6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600} / \omega - 0.0525)} \cdot \\ ((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600})^3 / \omega - 5445.0\omega(5.0R + 8.0) \frac{4.0\omega^2 + 625.0R^2 + 2000.0R + 1600.0}{(1250.0R^2 + 4000.0R + 3200.0 + 7.0\omega^2)^2} \\ \frac{dR}{dt} = 3.5942 \times 10^{-5} \frac{d\omega}{dt} - 0.00001(\omega - 547.13) \\ \omega(0) = 530. \\ R(0) = 111. \end{array} \right.$$

Se observă din Figura 22 că procesul, condus cu un regulator de tip PI, este instabil.

### 5.3. Concluzii

Prin simulările prezentate s-a putut observa calitatea reglajului prin cunoașterea VUM optime,  $\omega_{OPTIM}$ , calculată prin măsurarea vitezei vântului și măsurarea turației la generator.

Prin cunoașterea valorii turației optime se poate regla încărcarea la generator astfel încât să se realizeze o funcționare la maximul energetic. Prin analiza mai multor cazuri s-au putut stabili mărimile de bază ce conduc la o funcționare optimă.

În continuare se prezintă o sinteză a contribuțiilor personale:

- realizarea unor studii de caz la viteze ale vântului variabile în timp ;
- determinarea încărcării la curentul limită admis ;
- analiza evoluției în timp a procesului ;
- determinarea unei relații originale pentru modificarea rezistenței de sarcină ;
- crearea unui algoritm de conducere optimal din punct de vedere energetic, bazat pe măsurarea vitezei vântului în timp ;
- comparație cu sistemele de reglare clasice cu regulatoare de tip PI;
- modificarea sarcinii astfel încât să se atingă  $\omega = \omega_{ref}$  în minimum de timp;
- determinarea unei viteze echivalente din viteza reală a vântului, rezultat original și deosebit de important în practică ;
- perfecționarea sistemului de conducere prin prescrierea vitezei unghiulare mecanice optime în funcție de variația reală în timp a vitezei vântului ;
- completarea corespunzătoare a instrumentelor software proprii, în concordanță cu modelul matematic și tehnicile elaborate.

## 6. MAXIMIZAREA ENERGIEI CAPTATE LA UN SISTEM EOLIAN

În capitolul de față se prezintă metode originale de estimare a maximului energetic la sisteme eoliene funcționând la viteze ale vântului variabile în timp. Cunoașterea valorii turației, la care energia captată este maximă, constituie problema fundamentală în orice sistem de conducere performant. Conducerea optimă a unui sistem eolian presupune extragerea, (captarea), unei energii maxime la o viteză a vântului variabilă semnificativ în timp. Aceasta impune controlul turației și cuplului la turbină și adaptarea sarcinii generatorului la viteza vântului. Determinarea turației corespunzătoare energiei maxime date de turbina de vânt, (TV), este obiectivul principal al acestei lucrări. Prin simulare se determină viteza unghiulară mecanică,  $\omega_{OPTIM}$ , la care energia este maximă, considerând viteza vântului variabilă în timp.

### 6.1. Considerații preliminare

Funcționarea sistemului eolian în punctul de putere maxim, MPP, este obiectivul principal al celor mai multe lucrări din domeniu [1-23]. Majoritatea, însă, iau în considerare o viteză a vântului constantă în timp [5-24]. La viteze ale vântului variabile semnificativ în timp [4], cum este cazul real al României [1], determinarea MPP este o problemă complexă cu implicații majore în calitatea reglajului. [2,4].

Viteza vântului în domeniul exploatabil tehnico-economic este:  $V = 4 \div 25$  [m/s] cu cele mai bune rezultate în intervalul:  $V = 12 \div 15$  [m/s], [9]. Din cauza momentelor de inerție -  $J$  - foarte mari ale TV modificarea turației la generatorul sincron cu magneți permanenți, GSMP, este lentă și deci nu poate urmări variația rapidă în timp a vitezei vântului, așa cum ar fi necesar pentru a funcționa în MPP, [7], [1], [15]. Cum vitezele vântului sunt semnificativ variabile în timp se pune problema determinării turației corespunzătoare energiei maxime, astfel încât economic să se obțină un profit maxim pe locația unde se vor instala turbinele de vânt [2].

Sistemele de conducere performante trebuie să asigure maximul de energie eoliană captată pe un interval lung de timp. Conducerea sistemului, TV+GSMP, la putere maximă obținută de la generatorul electric duce la frânarea turbinei și mărirea artificială, pe moment, a puterii electrice din variațiile energiilor cinetice a maselor în mișcare de rotație, dar, în final, pe o perioadă lungă de timp, energia obținută este mai mică decât în cazul funcționării sistemului eolian la energiei maxime [4]. Din acest motiv conducerea optimă a unui sistem eolian trebuie concepută în sensul obținerii energiei maxime la o viteză a vântului variabilă semnificativ în timp. Aceasta impune controlul  $VUM$  prin impunerea vitezei de referință -  $\omega_{ref}$  - , pe intervalul -  $\Delta t$  - și, astfel, se extrage energia eoliană maximă disponibilă, la viteza vântului  $V(t)$  . Sistemul eolian funcționează optimal la maximul energetic, dacă TV captează o energie maxim posibilă pe un interval de timp dat, de ordinul zilelor [7].

Datorită inerțiilor mecanice mari, simulările și toate celelalte rezultate teoretice și practice trebuie să aibe la bază intervale de timp de minimum câteva ore, (de regulă peste 10[h]). Sistemele electroenergetice eoliene de mare putere sunt conduse având în vedere viteza medie a vântului [8 ÷ 17], dar acestea nu realizează maximul energetic. Recent s-au propus și structuri de conducere bazate pe măsurarea vitezei momentane a vântului [1 ÷ 5]. și folosind un model matematic adecvat pentru TV. Literatura de specialitate abundă în lucrări ce tratează funcționarea în MPP [1-17], viteza vântului fiind constantă în timp. Funcționarea la viteze ale vântului variabile semnificativ în timp și în condiții energetice optime este foarte puțin tratată în literatură [1].

În lucrarea de față se tratează tocmai acest aspect: optimul energetic la viteze ale vântului variabile semnificativ în timp. Se determină valoarea vitezei unghiulare mecanice optime:  $\omega_{OPTIM}$ , la o viteză a vântului măsurată, [1-6], astfel încât energia obținută să fie maximă.

### 6.2. Modelul matematic al TV, (MM-TV)

Se are în vedere un model clasic, [14], pentru turbină, model ce permite estimarea cuplului la viteza unghiulară  $\omega$  .

Pentru TV, se dau de către firma constructoare, [14], caracteristicile experimentale ale



puterii, figura 6.1. adică funcția  $P_{TV}(\omega)$ :

$$P_{TV} = 23.584 \cdot ((V/\omega - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06(V/\omega - 0.0525)} \cdot V^3$$

unde :

$V$  – viteza vântului;

$\omega$  – viteza unghiulară mecanică, VUM.

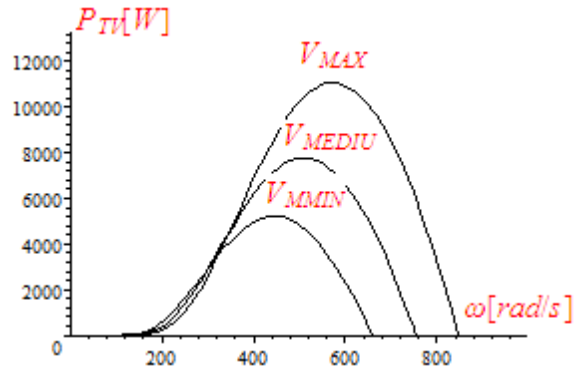


Fig.6.1. Dependenta puterii de VUM,  $\omega$

La viteze ale vântului,  $V(t)$ , variabile în timp cu perioada  $T=35[s]$ , așa ca în figura 6.2, de forma:

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

puterea variază între o valoare minimă, la viteza minimă,  $V_{MIN}$  și o valoare maximă, la viteza maximă,  $V_{MAX}$ , figura 6.1.

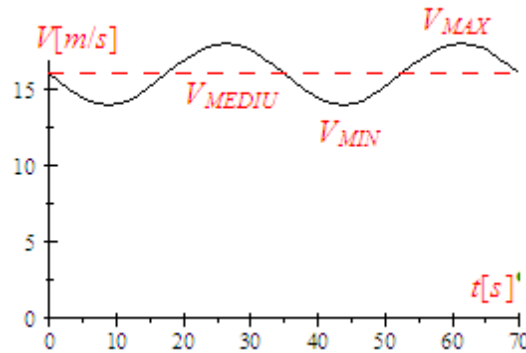


Fig.6.2. Variația în timp a vitezei vântului

Valorile maxime ale puterii sunt definite de VUM,  $\omega_{ref}$ , denumite de referință, deoarece în sistemele de conducere sunt mărimi de referință. Valorile acestor mărimi se determină din anularea derivatei puterii:  $d(P_{TV})/d\omega = 0$  și se obțin rezultatele:

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

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

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

Pentru a funcționa la putere maximă este necesar ca VUM să se modifice de la valoarea minimă:  $\omega_{ref3} = 445.46[rad/s]$ , la valoarea maximă:  $\omega_{ref1} = 572.74[rad/s]$ , într-un timp foarte mic,  $t=35[s]$ , timp dictat de variația în timp a vitezei vântului, care are perioada  $T=35[s]$ . Datorită inerțiilor mecanice foarte mari modificarea VUM, în acest interval de timp, nu este posibilă.

Determinarea valorii VUM la care energia captată este maximă este problema

fundamentală în orice sistem energetic care funcționează în condiții optime.

### 6.3 Determinarea maximului energetic prin anularea derivatei energiei

Puterea fiind derivată energiei, energia mecanică,  $W_m$ , captată de TV se calculează din putere, astfel:

$$\frac{dW_m}{dt} = P_{TV}$$

sau

$$\frac{dW_m}{dt} = 23.584 \cdot ((V/\omega - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06(V/\omega - 0.0525)} \cdot V^3$$

Energia captată,  $W(\omega)$ , depinde semnificativ de valoarea VUM. Valoarea maximă a funcției  $W(\omega)$  se obține pentru VUM,  $\omega_{OPTIM}$ , valoare obținută prin anularea derivatei:

$$\frac{dW}{d\omega} = \frac{d}{d\omega} \int_0^T P_{TV} \cdot dt = \frac{d}{d\omega} \int_0^T (23.584 \cdot ((V/\omega - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06(V/\omega - 0.0525)} \cdot V^3) dt = 0$$

Prin derivarea expresiei din interiorul integralei:

$$\begin{aligned} & \frac{d}{d\omega} \left( 23.584 \cdot ((V/\omega - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06(V/\omega - 0.0525)} \cdot V^3 \right) = \\ & \left( -1.0 \times 10^{-8} V^4 \exp\left(0.24515 \frac{-400.0V + 21.0\omega}{\omega}\right) \frac{7.2684 \times 10^9 \omega - 2.3126 \times 10^{11} V}{\omega^3} \right) \end{aligned}$$

se obține:

$$\frac{dW}{d\omega} = \int_0^T \left( -1.0 \times 10^{-8} V^4 \exp\left(0.24515 \frac{-400.0V + 21.0\omega}{\omega}\right) \frac{7.2684 \times 10^9 \omega - 2.3126 \times 10^{11} V}{\omega^3} \right) \cdot dt = 0$$

Considerând  $\omega = ct$  pe durata perioadei T se obține:

$$\int_0^T \left( V^4 \exp\left(0.24515 \frac{-400.0V + 21.0\omega}{\omega}\right) (7.2684\omega - 2.3126 \times 10^2 V) \right) \cdot dt = 0$$

Din cauza funcției exponențiale:  $\exp\left(0.24515 \frac{-400.0V + 21.0\omega}{\omega}\right)$ , rezolvarea ecuației de mai sus este foarte dificilă.

Descompunând în serie funcția exponențială sub forma:

$$\exp x = 1 + x$$

sau

$$\exp\left(0.24515 \frac{-400.0V + 21.0\omega}{\omega}\right) = 1 + 0.24515(-400.0V/\omega + 21.) = (6.1482 - 98.06 \frac{V}{\omega}) \quad \text{se}$$

obține ecuația în necunoscuta  $\omega$  :

$$\begin{aligned} & \int_0^T \left( V^4 \exp\left(0.24515 \frac{-400.0V + 21.0\omega}{\omega}\right) (7.2684\omega - 2.3126 \times 10^2 V) \right) \cdot dt = \\ & \int_0^T \left( V^4 (6.1482 - 98.06 \frac{V}{\omega}) (7.2684\omega - 2.3126 \times 10^2 V) \right) \cdot dt = \\ & = \int_0^T (V^4 (44.688\omega^2 - 2134.5V\omega + 22677.V^2)) \cdot dt = 0 \end{aligned}$$

sau

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

Relația obținută are o semnificație deosebită în sensul că arată cum influențează viteza vântului valoarea lui  $\omega_{OPTIM}$ . Valoarea VUM optime depinde de integralele vitezei vântului la puterea 4, 5 și 6.

Rezolvarea acestei ecuații în necunoscuta  $\omega$  se face în cele două cazuri posibile:

- 1) viteza vântului constantă în timp;
- 2) viteza vântului variabilă în timp.

### 1) Viteza vântului constantă în timp ( $V=ct$ )

Acesta este un caz ideal. Problema se rezolvă foarte simplu, dar în realitate sunt foarte rare cazurile în care  $V=ct$ .

La  $V=ct$  se obține  $\omega$  din ecuația:

$$\frac{dW}{d\omega} = \int_0^T \left( V^4 \exp\left(0.24515 \frac{-400.0V+21.0\omega}{\omega}\right) (7.2684\omega - 2.3126 \times 10^2 V) \right) \cdot dt = 0$$

sau

$$7.2684\omega - 2.3126 \times 10^2 V = 0, \text{ cu soluția: } \{\omega_{OPTIM} = 31.817V\}$$

### 2) Viteza vântului variabilă în timp ( $V \neq ct$ )

Acesta este cazul real. Se presupune o viteză  $V(t)$  variabilă în timp, de formă sinusoidală de perioadă  $T = 35.[s]$ , modelată matematic astfel:

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

La  $V(t) = (16 - 6 \sin(0.17943t))$  și la  $T = 6.28/0.17943 = 35.[s]$ , problema devine complexă prin faptul că ecuația integrală în necunoscuta  $\omega$ :

$$\frac{dW}{d\omega} = \int_0^T \left( -1.0 \times 10^{-8} V^4 \exp\left(0.24515 \frac{-400.0V+21.0\omega}{\omega}\right) \frac{7.2684 \times 10^9 \omega - 2.3126 \times 10^{11} V}{\omega^3} \right) \cdot dt = 0$$

nu este rezolvabilă nici prin metode numerice. Pentru rezolvarea ei se propun următoarele metode:

- 1) Rezolvarea prin alegerea succesivă a unor valori pentru  $\omega$
- 2) Rezolvarea prin descompunerea în serie a funcției exponențiale

## 6.3.1. Determinarea optimului prin alegerea succesivă a unor valori pentru $\omega$

Rezolvarea ecuației  $dW/d\omega = I = 0$  se face prin alegerea succesivă a unor valori pentru  $\omega$  și se dă în continuare.

$$\mathbf{1) \omega = 550.[rad/s]}$$

$$I = \int_0^{35} \left( \frac{(16 - 6 \sin(0.17943t))^4 \exp\left(0.24515 \frac{-400.0(16 - 6 \sin(0.17943t)) + 21.0 \times 550}{550}\right)}{(7.2684 \times 550 - 2.3126 \times 10^2 (16 - 6 \sin(0.17943t)))} \right) dt = -1.4035 \times 10^8$$

$$\mathbf{2) \omega = 551.[rad/s]}$$

$$I = \int_0^{35} \left( \frac{(16 - 6 \sin(0.17943t))^4 \exp\left(0.24515 \frac{-400.0(16 - 6 \sin(0.17943t)) + 21.0 \times 551}{551}\right)}{(7.2684 \times 551 - 2.3126 \times 10^2 (16 - 6 \sin(0.17943t)))} \right) dt = -1.31 \times 10^7$$

$$\mathbf{3) \omega = 551.1[rad/s]}$$

$$I = \int_0^{35} \left( \frac{(16 - 6 \sin(0.17943t))^4 \exp\left(0.24515 \frac{-400.0(16 - 6 \sin(0.17943t)) + 21.0 \times 551.1}{551.1}\right)}{(7.2684 \times 551.1 - 2.3126 \times 10^2 (16 - 6 \sin(0.17943t)))} \right) dt = -2.9105 \times 10^5$$

$$\mathbf{4) \omega = 551.101[rad/s]}$$

$$I = \int_0^{35} \left( \frac{(16 - 6 \sin(0.17943t))^4 \exp\left(0.24515 \frac{-400.0(16 - 6 \sin(0.17943t)) + 21.0 \times 551.101}{551.101}\right)}{(7.2684 \times 551.101 - 2.3126 \times 10^2 (16 - 6 \sin(0.17943t)))} \right) dt = -1.6288 \times 10^5$$

$$\mathbf{5) \omega = 551.102[rad/s]}$$

$$I = \int_0^{35} \left( \frac{(16 - 6 \sin(0.17943t))^4 \exp\left(0.24515 \frac{-400.0(16 - 6 \sin(0.17943t)) + 21.0 \times 551.102}{551.102}\right)}{(7.2684 \times 551.102 - 2.3126 \times 10^2 (16 - 6 \sin(0.17943t)))} \right) dt = -34726.$$

$$\mathbf{6) \omega = 551.1022[rad/s]}$$

$$I = \int_0^{35} \left( \frac{(16 - 6 \sin(0.17943t))^4 \exp\left(0.24515 \frac{-400.0(16 - 6 \sin(0.17943t)) + 21.0 \times 551.1022}{551.1022}\right)}{(7.2684 \times 551.1022 - 2.3126 \times 10^2 (16 - 6 \sin(0.17943t)))} \right) dt = -9103.1$$

$$\mathbf{7) \omega = 551.10225[rad/s]}$$

$$I = \int_0^{35} \left( \frac{(16 - 6 \sin(0.17943t))^4 \exp\left(0.24515 \frac{-400.0(16 - 6 \sin(0.17943t)) + 21.0 \times 551.10225}{551.10225}\right)}{(7.2684 \times 551.10225 - 2.3126 \times 10^2 (16 - 6 \sin(0.17943t)))} \right) dt = -2691.4$$

$$\mathbf{8) \omega = 551.10226[rad/s]}$$

$$I = \int_0^{35} \left( \frac{(16 - 6 \sin(0.17943t))^4 \exp\left(0.24515 \frac{-400.0(16 - 6 \sin(0.17943t)) + 21.0 \times 551.10226}{551.10226}\right)}{(7.2684 \times 551.10226 - 2.3126 \times 10^2 (16 - 6 \sin(0.17943t)))} \right) dt = -1405.0$$

$$\mathbf{9) \omega = 551.10227[rad/s]}$$

$$I = \int_0^{35} \left( \frac{(16 - 6 \sin(0.17943t))^4 \exp\left(0.24515 \frac{-400.0(16 - 6 \sin(0.17943t)) + 21.0 \times 551.10227}{551.10227}\right)}{(7.2684 \times 551.10227 - 2.3126 \times 10^2 (16 - 6 \sin(0.17943t)))} \right) dt = -140.35$$

$$\mathbf{10) \omega = 551.10228[rad/s]}$$

$$I = \int_0^{35} \left( \frac{(16 - 6 \sin(0.17943t))^4 \exp\left(0.24515 \frac{-400.0(16 - 6 \sin(0.17943t)) + 21.0 \times 551.10228}{551.10228}\right)}{(7.2684 \times 551.10228 - 2.3126 \times 10^2 (16 - 6 \sin(0.17943t)))} \right) dt = 1179.5$$

$$\mathbf{11) \omega = 551.1023[rad/s]}$$

$$I = \int_0^{35} \left( \frac{(16 - 6 \sin(0.17943t))^4 \exp\left(0.24515 \frac{-400.0(16 - 6 \sin(0.17943t)) + 21.0 \times 551.1023}{551.1023}\right)}{(7.2684 \times 551.1023 - 2.3126 \times 10^2 (16 - 6 \sin(0.17943t)))} \right) dt = 3752.7$$

$$\mathbf{12) } \omega = 551.1025[\text{rad/s}]$$

$$I = \int_0^{35} \left( \frac{(16 - 6 \sin(0.17943t))^4 \exp\left(0.24515 \frac{-400.0(16 - 6 \sin(0.17943t)) + 21.0 \times 551.1025}{551.1025}\right)}{(7.2684 \times 551.1025 - 2.3126 \times 10^2 (16 - 6 \sin(0.17943t)))} \right) dt = 29378.$$

$$\mathbf{13) } \omega = 551.104[\text{rad/s}]$$

$$I = \int_0^{35} \left( \frac{(16 - 6 \sin(0.17943t))^4 \exp\left(0.24515 \frac{-400.0(16 - 6 \sin(0.17943t)) + 21.0 \times 551.104}{551.104}\right)}{(7.2684 \times 551.104 - 2.3126 \times 10^2 (16 - 6 \sin(0.17943t)))} \right) dt = 2.2161 \times 10^5$$

$$\mathbf{14) } \omega = 551.11[\text{rad/s}]$$

$$I = \int_0^{35} \left( \frac{(16 - 6 \sin(0.17943t))^4 \exp\left(0.24515 \frac{-400.0(16 - 6 \sin(0.17943t)) + 21.0 \times 551.11}{551.11}\right)}{(7.2684 \times 551.11 - 2.3126 \times 10^2 (16 - 6 \sin(0.17943t)))} \right) dt = 9.907 \times 10^5$$

$$\mathbf{15) } \omega = 551.14[\text{rad/s}]$$

$$I = \int_0^{35} \left( \frac{(16 - 6 \sin(0.17943t))^4 \exp\left(0.24515 \frac{-400.0(16 - 6 \sin(0.17943t)) + 21.0 \times 551.14}{551.14}\right)}{(7.2684 \times 551.14 - 2.3126 \times 10^2 (16 - 6 \sin(0.17943t)))} \right) dt = 4.8369 \times 10^6$$

$$\mathbf{16) } \omega = 551.2[\text{rad/s}]$$

$$I = \int_0^{35} \left( \frac{(16 - 6 \sin(0.17943t))^4 \exp\left(0.24515 \frac{-400.0(16 - 6 \sin(0.17943t)) + 21.0 \times 551.2}{551.2}\right)}{(7.2684 \times 551.2 - 2.3126 \times 10^2 (16 - 6 \sin(0.17943t)))} \right) dt = 1.2533 \times 10^7$$

$$\mathbf{17) } \omega = 552. [\text{rad/s}]$$

$$I = \int_0^{35} \left( \frac{(16 - 6 \sin(0.17943t))^4 \exp\left(0.24515 \frac{-400.0(16 - 6 \sin(0.17943t)) + 21.0 \times 552.}{552.}\right)}{(7.2684 \times 552. - 2.3126 \times 10^2 (16 - 6 \sin(0.17943t)))} \right) dt = 1.1568 \times 10^8$$

$$\mathbf{18) } \omega = 555. [\text{rad/s}]$$

$$I = \int_0^{35} \left( \frac{(16 - 6 \sin(0.17943t))^4 \exp\left(0.24515 \frac{-400.0(16 - 6 \sin(0.17943t)) + 21.0 \times 555.}{555.}\right)}{(7.2684 \times 555. - 2.3126 \times 10^2 (16 - 6 \sin(0.17943t)))} \right) dt = 5.113 \times 10^8$$

$$\mathbf{19) } \omega = 560. [\text{rad/s}]$$

$$I = \int_0^{35} \left( \frac{(16 - 6 \sin(0.17943t))^4 \exp\left(0.24515 \frac{-400.0(16 - 6 \sin(0.17943t)) + 21.0 \times 560.}{560.}\right)}{(7.2684 \times 560. - 2.3126 \times 10^2 (16 - 6 \sin(0.17943t)))} \right) dt = 1.2019 \times 10^9$$

$$\mathbf{20) } \omega = 580. [\text{rad/s}]$$

$$I = \int_0^{35} \left( \frac{(16 - 6 \sin(0.17943t))^4 \exp\left(0.24515 \frac{-400.0(16 - 6 \sin(0.17943t)) + 21.0 \times 580.}{580.}\right)}{(7.2684 \times 580. - 2.3126 \times 10^2 (16 - 6 \sin(0.17943t)))} \right) dt = 4.3683 \times 10^9$$

$$\mathbf{21) \omega = 480. [rad/s]}$$

$$I = \int_0^{35} \left( \frac{(16 - 6 \sin(0.17943t))^4 \exp\left(0.24515 \frac{-400.0(16 - 6 \sin(0.17943t)) + 21.0 \times 480.}{480.}\right)}{(7.2684 \times 480. - 2.3126 \times 10^2 (16 - 6 \sin(0.17943t)))} \right) dt = -5.6148 \times 10^9$$

$$\mathbf{22) \omega = 380. [rad/s]}$$

$$I = \int_0^{35} \left( \frac{(16 - 6 \sin(0.17943t))^4 \exp\left(0.24515 \frac{-400.0(16 - 6 \sin(0.17943t)) + 21.0 \times 380.}{380.}\right)}{(7.2684 \times 380. - 2.3126 \times 10^2 (16 - 6 \sin(0.17943t)))} \right) dt = -5.1938 \times 10^9 = -5.1938 \times 10^9$$

$$\mathbf{23) \omega = 780. [rad/s]}$$

$$I = \int_0^{35} \left( \frac{(16 - 6 \sin(0.17943t))^4 \exp\left(0.24515 \frac{-400.0(16 - 6 \sin(0.17943t)) + 21.0 \times 780.}{780.}\right)}{(7.2684 \times 780. - 2.3126 \times 10^2 (16 - 6 \sin(0.17943t)))} \right) dt = 7.8608 \times 10^{10}$$

În acest caz maximul energetic se obține la  $\omega \simeq 551.10227 [rad/s]$ .

### 6.3.2. Determinarea simplificată a optimului energetic

Pentru simplificarea calculelor se propun două variante aproximative pentru determinarea optimului energetic:

- 1) liniarizarea caracteristicilor mecanice;
- 2) aproximarea funcției exponențiale.

#### 6.3.2.1. Liniarizarea caracteristicilor mecanice

Modelul matematic al caracteristicilor mecanice experimentale ale turbinei de vânt, adică funcția :

$$M_{TV}(\omega) = 23.584 \cdot \left( (V/\omega - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06(V/\omega - 0.0525)} \cdot V^3 / \omega$$

se liniarizează considerând două valori ale vitezei vântului:  $V = 22 [m/s]$  și  $11 [m/s]$ .

$$\mathbf{cazul 1) V = 22 [m/s]}$$

La funcționare în gol și la  $V = 22 [m/s]$  rezultă:

$$M_{TV} = 23.584 \cdot \left( (22/\omega - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06(22/\omega - 0.0525)} \cdot 22^3 / \omega = 0 \text{ cu soluția:}$$

$$\{\omega = 1036.2 [rad / s]\}$$

La funcționare la  $\omega = 700 [rad / s]$  și la  $V = 22 [m/s]$  rezultă

$$\begin{cases} M_T = 23.584 \cdot ((22/\omega - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06(22/\omega - 0.0525)} \cdot 22^3 / \omega \\ \omega = 700 \end{cases},$$

cu soluția:  $\{\omega = 28.884, \omega = 700.0\}$

**cazul 2)**  $V = 11[m/s]$

La funcționare în gol și la  $V = 11[m/s]$  rezultă:

$$M_{TV} = 23.584 \cdot ((11/\omega - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06(11/\omega - 0.0525)} \cdot 11^3 / \omega = 0 \text{ cu soluția: } \{\omega = 518.11\}$$

La funcționare la  $\omega = 333[rad/s]$  și la  $V = 11[m/s]$  rezultă:

$$\begin{cases} M_T = 23.584 \cdot ((11/\omega - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06(11/\omega - 0.0525)} \cdot 11^3 / \omega \\ \omega = 333 \end{cases},$$

cu soluția:  $\{\omega = 333.0, M_T = 7.5049\}$

Liniazând caracteristica mecanică  $M_{TV}(\omega)$  sub forma

$$M_{TV}(\omega) = aV^b \omega + cV^d$$

se obține:

$$\begin{cases} 0 = a22^b 1036.2 + c22^d \text{ -la funcționare în gol cu } V=22[m/s] \\ 28.884 = a22^b 700 + c22^d \text{ -la funcționare cu } \omega = 700[rad/s] \text{ și cu } V=22[m/s] \\ 0 = a11^b 518.11 + c11^d \text{ -la funcționare în gol cu } V=11[m/s] \\ 7.5 = a11^b 333 + c11^d \text{ -la funcționare cu } \omega = 333[rad/s] \text{ și cu } V=11[m/s] \end{cases},$$

cu soluțiile:  $\{a = -3.0087 \times 10^{-3}, b = 1.0844, c = 0.14172, d = 2.0843\}$ , și în final rezultă pentru caracteristica mecanică expresia:

$$M_{TV} = -3.0087 \cdot 10^{-3} V^{1.0844} \omega + 0.14172 \cdot V^{2.0843}$$

cu reprezentarea ei în figura 6.3.

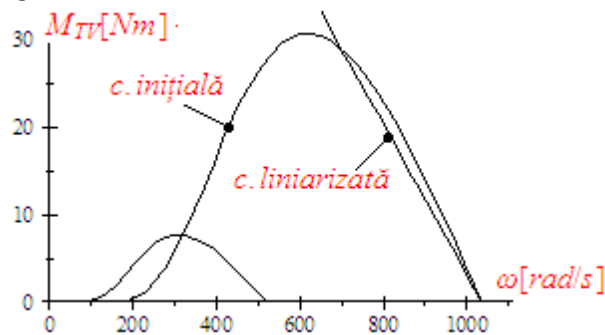


Fig.6.3.Caracteristicile mecanice ale turbinei

Din anularea derivatei energiei se obține:

$$\frac{dW}{d\omega} = \frac{d}{d\omega} \int_0^T M_{TV} \cdot \omega dt = \int_0^T \left( -6.0174 \times 10^{-3} V^{\frac{2711}{2500}} \omega + 0.14172 V^{\frac{20843}{10000}} \right) dt = 0$$

sau

$$\omega_{OPTIM} = \frac{\int_0^T 0.14172 V^{\frac{20843}{10000}} dt}{\int_0^T 6.0174 \times 10^{-3} V^{\frac{2711}{2500}} dt} = 23.552 \frac{\int_0^{35} (16.-6.\sin(0.17943t))^{2.084} dt}{\int_0^{35} (16.-6.\sin(0.17943t))^{1.0844} dt} = 403.34[rad/s]$$

rezultat mult diferit de cele reale:  $\omega_{OPTIM-REAL} = 551.10227[rad/s]$

În concluzie prin liniarizarea caracteristicilor mecanice se obțin rezultate mult diferite de cele reale.

### 6.3.2.2. Aproximarea funcției exponențiale

Ecuția derivatei energiei obținută în forma:

$$\frac{dW}{d\omega} = \int_0^T \left( -1.0 \times 10^{-8} V^4 \exp\left(0.24515 \frac{-400.0V+21.0\omega}{\omega}\right) \frac{7.2684 \times 10^9 \omega - 2.3126 \times 10^{11} V}{\omega^3} \right) \cdot dt = 0$$

s-ar putea rezolva dacă se aproximează funcția exponențială:

$$\exp\left(0.24515 \frac{-400.0(16-6\sin(0.17943t))+21.0 \times \omega}{\omega}\right) = \exp(f(t, \omega))$$

Aproximarea funcției exponențiale se face în două variante:

- 1) varianta grafică și
- 2) varianta descompunerii în serie

#### Varianta grafică

La  $\omega_1 = 551[\text{rad/s}]$ ,  $\omega_2 = 555[\text{rad/s}]$ ,  $\omega_3 = 455[\text{rad/s}]$ , funcțiile exponențiale:

$$\exp\left(0.24515 \frac{-400.0(16-6\sin(0.17943t))+21.0 \times 551}{551}\right), \exp\left(0.24515 \frac{-400.0(16-6\sin(0.17943t))+21.0 \times 555}{555}\right),$$

$$\exp\left(0.24515 \frac{-400.0(16-6\sin(0.17943t))+21.0 \times 455}{455}\right)$$

se pot aproxima prin relația:  $(17. + 13 \sin(0.17943t))$ , deoarece au o variație în timp așa ca în figura 6.4.

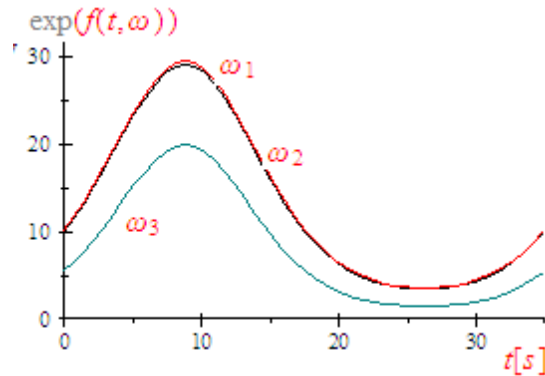


Fig.6.4. Graficul funcției exponențiale la trei valori pentru  $\omega$

În aceste condiții se obține ecuația în  $\omega$  :

$$\frac{dW}{d\omega} = \int_0^{35} \left( \frac{(16 - 6 \sin(0.17943t))^4 (17. + 13 \sin(0.17943t))}{(7.2684 \times \omega - 2.3126 \times 10^2 (16 - 6 \sin(0.17943t)))} \right) dt =$$

$$2.2537 \times 10^8 \omega - 1.2556 \times 10^{11} = 0, \text{ cu soluția: } \{\omega = 557.13[\text{rad/s}]\}$$

S-a obținut un rezultat foarte apropiat de cel real :

$$\omega_{\text{OPTIM-REAL}} = 551.10227[\text{rad/s}]$$



**Varianta descompunerii în serie**

Din ecuația derivatei energiei:

$$\int_0^T \left( V^4 \exp\left(0.24515 \frac{-400.0V+21.0\omega}{\omega}\right) (7.2684\omega - 2.3126 \times 10^2 V) \right) \cdot dt = 0$$

descompunând în serie funcția exponențială sub forma:

$$\exp x = 1 + x$$

sau

$$\exp\left(0.24515 \frac{-400.0V+21.0\omega}{\omega}\right) = 1 + 0.24515(-400.0V/\omega + 21.) = (6.1482 - 98.06 \frac{V}{\omega})$$

se obține ecuația în necunoscuta  $\omega$ :

$$\begin{aligned} \int_0^T \left( V^4 \exp\left(0.24515 \frac{-400.0V+21.0\omega}{\omega}\right) (7.2684\omega - 2.3126 \times 10^2 V) \right) \cdot dt &= \\ \int_0^T \left( V^4 (6.1482 - 98.06 \frac{V}{\omega}) (7.2684\omega - 2.3126 \times 10^2 V) \right) \cdot dt &= \\ = \int_0^T (V^4 (44.688\omega^2 - 2134.5V\omega + 22677.V^2)) \cdot dt &= 0 \end{aligned}$$

sau

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

La  $V(t) = (16 - 6 \sin(0.17943t))$  integralele de mai sus au valorile:

$$\begin{aligned} \int_0^T V^4 \cdot dt &= \int_0^{35} (16 - 6 \sin(0.17943t))^4 dt = 3.2789 \times 10^6 \\ \int_0^T V^5 \cdot dt &= \int_0^{35} (16 - 6 \sin(0.17943t))^5 dt = 6.3879 \times 10^7 \\ \int_0^T V^6 \cdot dt &= \int_0^{35} (16 - 6 \sin(0.17943t))^6 dt = 1.2727 \times 10^9 \end{aligned}$$

și astfel ecuația în  $\omega$  devine:

$$44.688\omega^2 \cdot 3.2789 - 2134.5\omega \cdot 63.879 + 22677. \cdot 1272.7 = 0$$

sau:

$$146.53\omega^2 - 1.3635 \times 10^5 \omega + 2.8861 \times 10^7 = 0, \text{ cu soluțiile:}$$

$$\{\omega = 325.60[\text{rad/s}]\}, \{\omega = 604.93[\text{rad/s}]\}$$

Valoarea:  $\omega_{OPTIM} = 604.93[\text{rad/s}]$  este puțin diferită de cea reală:

$$\omega_{OPTIM-REAL} = 551.10227[\text{rad/s}] .$$

**6.4. Determinarea maximului energetic prin calcularea valorii energiei obținute**

Calculând energia prin integrarea puterii, la viteza vântului variabilă în timp,  $V \# ct$ , pentru mai multe valori ale lui  $\omega$ , se poate determina maximul energetic.

La funcționarea în gol ecuația mișcării are forma :

$$\begin{cases} 50 \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left( \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) / \omega - 0.0525 \right) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot \\ \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) \right)^3 \cdot e^{-98.06 \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) / \omega - 0.0525 \right)} \\ \omega(0) = 243. \end{cases}$$

și prin rezolvarea ei se obține variația lui  $\omega$  în timp, dată în figura 6.5.

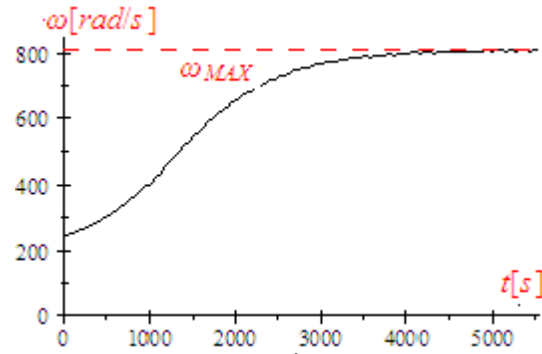


Fig.6.5. Variația în timp a VUM

La  $t=5555[s]$  VUM are valoarea maximă:  $\omega(5555) = 812.8[rad/s]$ . Prin urmare, VUM poate lua valori în intervalul:  $\omega(0) = 243.[rad/s]$  și  $\omega(5555) = 812.8[rad/s]$ .

La VUM,  $\omega$ , energia mecanică captată, în intervalul de timp  $T$ , are valoarea:

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

și depinde numai de  $\omega$ . Considerând mai multe valori pentru VUM,  $\omega$ , în intervalul de timp precizat, energiile mecanice captate au valorile:

**1)**  $\omega = 243.[rad/s]$

$$W = \int_0^{35} 23.584 \cdot \left( \frac{(16 - 6 \sin(0.17943t))}{243. - 2.1231 \times 10^{-2}} \right) \cdot e^{-98.06 \left( \frac{(16 - 6 \sin(0.17943t))}{243. - 0.0525} \right)} \cdot (16 - 6 \sin(0.17943t))^3 dt = 37087.[J]$$

**2)**  $\omega = 343.[rad/s]$

$$W = \int_0^{35} 23.584 \cdot \left( \frac{(16 - 6 \sin(0.17943t))}{343. - 2.1231 \times 10^{-2}} \right) \cdot e^{-98.06 \left( \frac{(16 - 6 \sin(0.17943t))}{343. - 0.0525} \right)} \cdot (16 - 6 \sin(0.17943t))^3 dt = 1.2151 \times 10^5 [J]$$

**3)**  $\omega = 443.[rad/s]$

$$W = \int_0^{35} 23.584 \cdot \left( \frac{(16 - 6 \sin(0.17943t))}{443. - 2.1231 \times 10^{-2}} \right) \cdot e^{-98.06 \left( \frac{(16 - 6 \sin(0.17943t))}{443. - 0.0525} \right)} \cdot (16 - 6 \sin(0.17943t))^3 dt = 2.1090 \times 10^5 [J]$$

**4)**  $\omega = 550.[rad/s]$

$$W = \int_0^{35} 23.584 \cdot \left( \frac{(16 - 6 \sin(0.17943t))}{550. - 2.1231 \times 10^{-2}} \right) \cdot e^{-98.06 \left( \frac{(16 - 6 \sin(0.17943t))}{550. - 0.0525} \right)} \cdot (16 - 6 \sin(0.17943t))^3 dt = 2.5237 \times 10^5 [J]$$

**5)**  $\omega = 555.[rad/s]$

$$W = \int_0^{35} 23.584 \cdot \left( \frac{(16 - 6 \sin(0.17943t))}{555. - 2.1231 \times 10^{-2}} \right) \cdot e^{-98.06 \left( \frac{(16 - 6 \sin(0.17943t))}{555. - 0.0525} \right)} \cdot (16 - 6 \sin(0.17943t))^3 dt = 2.5232 \times 10^5 [J]$$

**6)**  $\omega = 560.[rad/s]$

$$W = \int_0^{35} 23.584 \cdot \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) / 560 - 2.1231 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06 \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) / 560 - 0.0525 \right)} \cdot (16 - 6 \sin(0.17943t))^3 dt = 2.5207 \times 10^5 [J]$$

$$\mathbf{7)} \omega = 565. [rad/s]$$

$$W = \int_0^{35} 23.584 \cdot \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) / 565 - 2.1231 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06 \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) / 565 - 0.0525 \right)} \cdot (16 - 6 \sin(0.17943t))^3 dt = 2.5164 \times 10^5 [J]$$

$$\mathbf{8)} \omega = 665. [rad/s]$$

$$W = \int_0^{35} 23.584 \cdot \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) / 665 - 2.1231 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06 \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) / 665 - 0.0525 \right)} \cdot (16 - 6 \sin(0.17943t))^3 dt = 2.0207 \times 10^5 [J]$$

$$\mathbf{9)} \omega = 765. [rad/s]$$

$$W = \int_0^{35} 23.584 \cdot \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) / 765 - 2.1231 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06 \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) / 765 - 0.0525 \right)} \cdot (16 - 6 \sin(0.17943t))^3 dt = 78833. [J]$$

$$\mathbf{10)} \omega = 800. [rad/s]$$

$$W = \int_0^{35} 23.584 \cdot \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) / 800 - 2.1231 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06 \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) / 800 - 0.0525 \right)} \cdot (16 - 6 \sin(0.17943t))^3 dt = 20365. [J]$$

$$\mathbf{11)} \omega = 812. [rad/s]$$

$$W = \int_0^{35} 23.584 \cdot \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) / 812 - 2.1231 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06 \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) / 812 - 0.0525 \right)} \cdot (16 - 6 \sin(0.17943t))^3 dt = -1318.7 [J]$$

Din rezultatele de mai sus se poate determina dependența energiei de VUM, adică funcția  $W(\omega)$ , al cărei grafic este dat în figura 6.6.

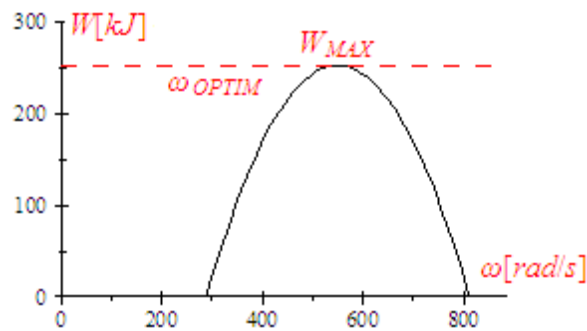


Fig.6.6. Dependența energiei de VUM

Cunoașterea cât mai exactă a VUM optime:  $\omega_{OPTIM}$ , este esențială în orice sistem de conducere, așa cum se observă foarte bine și din figura 6.6, în sensul că în intervalul  $\omega_{MIN} \div \omega_{MAXIM}$  valoarea energiei obținute poate lua valori de la zero la  $W_{MAX}$ .

La  $\omega = 550. [rad / s]$  se obține maximul energetic de valoare :

$$W_{MAX} = 2.5237 \times 10^5 [J]$$

## 6.5. Determinarea maximului energetic prin masuratori la funcționarea în gol

Folosind ecuația mișcării se determină maximul funcției energiei mecanice,  $W_{MEC}$ , și a puterii TV,  $P_{TV}$ .

### 6.5.1. Determinarea maximului funcției energiei mecanice

Din ecuația mișcării :

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{TV}$$

prin înmulțire cu  $\omega$  se obține puterea dată de turbină

$$J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega = \omega \cdot M_{TV} = P_{TV}$$

Prin integrare se obține energia mecanică captată în intervalul de timp T sub forma:

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

unde:

$J$  – momentul de inerție echivalent;

$\omega_k$  VUM la momentul  $t_k$  ;

$k-1$  - VUM la momentul  $t_{k-1}$  .

La  $V(t) = (16 - 6 \sin(0.17943t))$  și la funcționarea în gol ecuația mișcării are forma :

$$\begin{cases} 50 \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left( \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) / \omega - 0.0525 \right) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot \\ \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) \right)^3 \cdot e^{-98.06 \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) / \omega - 0.0525 \right)} \\ \omega(0) = 500. \end{cases}$$

și se obține variația în timp a VUM, dată în figura 6.7.a.

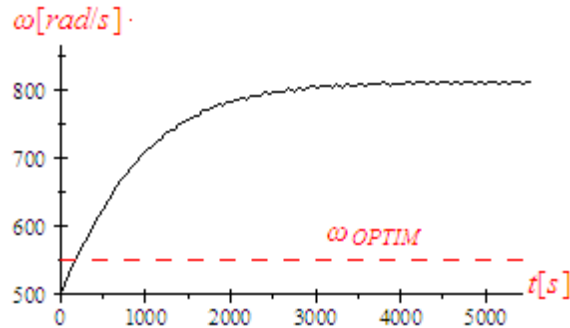


Fig.6.7.a. Variația lui  $\omega$  la viteza vântului variabilă în timp și  $\omega(0) = 500$ . [rad/s]

Datorită variației în timp a vitezei vântului și VUM variază în timp, așa cum se poate observa din figura 6.7.b.

În intervalele de timp:  $\Delta t_1 = 5 \div 10$  [s] - zona AB și  $\Delta t_3 = 38 \div 44$  [s] - zona EF,  $\omega$  are o valoare aproape constantă, deci  $d\omega/dt \approx 0$ , iar în intervalele de timp:  $\Delta t_2 = 17.5 \div 35$  [s] - zona CD și  $\Delta t_4 = 55 \div 70$  [s] - zona GH,  $\omega$  se modifică semnificativ, deci  $d\omega/dt \neq 0$ .

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

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

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

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

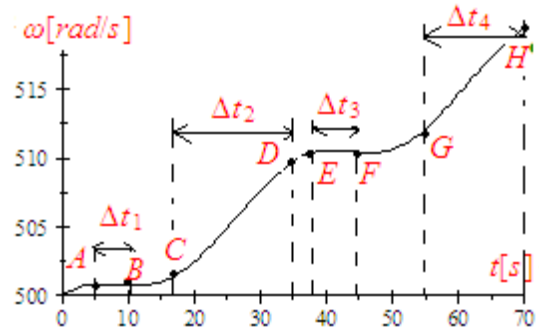


Fig.6.7.b.Variația lui  $\omega$  ,(detaliu).

Prin urmare este foarte importantă alegerea valorii intervalelor de timp între care se măsoară VUM.

Viteza vântului variind în timp sinusoidal cu perioada  $T$  este util a considera intervalele  $\Delta t > T$ . Rezultatele obținute sunt în funcție de valorile lui  $\Delta t$ , așa cum s-a demonstrat prin simularile date.

### 1) perioada de eșantionare $\Delta t = 35[s] = T$

Prin rezolvarea ecuației mișcării se obține variația în timp a VUM și valorile ei la momentele de timp  $t=83,118,153,\dots,363[s]$ :

$$\omega(153 - 70) = 519.98[\text{rad/s}]$$

$$\omega(153 - 35) = 529.46[\text{rad/s}]$$

$$\omega(153) = 538.83[\text{rad/s}]$$

$$\omega(188) = 548.07[\text{rad/s}]$$

$$\omega(188 + 35) = 557.17[\text{rad/s}]$$

$$\omega(188 + 70) = 566.1[\text{rad/s}]$$

$$\omega(188 + 105) = 574.86[\text{rad/s}]$$

$$\omega(188 + 140) = 583.43[\text{rad/s}]$$

$$\omega(188 + 175) = 591.81[\text{rad/s}]$$

Cu aceste valori pentru VUM se obțin energiile:

$$J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2)/2 = 50(529.46^2 - 519.98^2)/2 = 2.4872 \times 10^5 [J]$$

$$J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2)/2 = 50(538.83^2 - 529.46^2)/2 = 2.5025 \times 10^5 [J]$$

$$J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2)/2 = 50(548.07^2 - 538.83^2)/2 = 2.5107 \times 10^5 [J]$$

$$J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2)/2 = 50(557.17^2 - 548.07^2)/2 = \mathbf{2.5144 \times 10^5 [J]} - \mathbf{valoare\ maximă.}$$

$$J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2)/2 = 50(566.1^2 - 557.17^2)/2 = 2.5077 \times 10^5 [J]$$

$$J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2)/2 = 50(574.86^2 - 566.1^2)/2 = 2.4987 \times 10^5 [J]$$

$$J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2)/2 = 50(583.43^2 - 574.86^2)/2 = 2.4816 \times 10^5 [J]$$

$$J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2)/2 = 50(591.81^2 - 583.43^2)/2 = 2.4621 \times 10^5 [J]$$

Valoarea energiei maxime:  $W_{MEC-MAX}$  se obține pentru VUM în intervalul:

$$\omega(188) = 548.07[\text{rad/s}] \div \omega(188 + 35) = 557.17[\text{rad/s}]$$

Prin urmare, VUM optimă,  $\omega_{OPTIM}$ , este în intervalul:

$$\Delta t = 188[s] \div (223)[s], \text{ având valoarea:}$$

$$\omega_{OPTIM} = (548.07 + 557.17)/2 = 552.62[rad/s]$$

## 2) perioada de eșantionare $\Delta t = 100[s]$

La funcționarea în gol, cu  $\omega(0) = 400.[rad/s]$ , ecuația mișcării are forma :

$$\begin{cases} 50 \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left( \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) / \omega - 0.0525 \right) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot \\ \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) \right)^3 \cdot e^{-98.06 \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) / \omega - 0.0525 \right)} \\ \omega(0) = 400. \end{cases}$$

și se obțin valorile:

$$\omega(100) = 425.54[rad/s]$$

$$\omega(200) = 451.88[rad/s]$$

$$\omega(300) = 478.55[rad/s]$$

$$\omega(400) = 506.02[rad/s]$$

$$\omega(500) = \mathbf{534.5[rad/s]}$$

$$\omega(600) = \mathbf{562.43[rad/s]}$$

$$\omega(700) = 588.18[rad/s]$$

$$\omega(800) = 610.61[rad/s]$$

$$J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2)/2 = 50(451.88^2 - 425.54^2)/2 = 5.7778 \times 10^5 [J]$$

$$J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2)/2 = 50(478.55^2 - 451.88^2)/2 = 6.2036 \times 10^5 [J]$$

$$J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2)/2 = 50(506.02^2 - 478.55^2)/2 = 6.7615 \times 10^5 [J]$$

$$J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2)/2 = 50(534.5^2 - 506.02^2)/2 = 7.4085 \times 10^5 [J]$$

$$J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2)/2 = 50(562.43^2 - 534.5^2)/2 = \mathbf{7.6593 \times 10^5 [J]} - \text{valoare maximă}$$

$$J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2)/2 = 50(588.18^2 - 562.43^2)/2 = 7.4071 \times 10^5 [J]$$

$$J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2)/2 = 50(610.61^2 - 588.18^2)/2 = 6.7222 \times 10^5 [J]$$

Valoarea energiei maxime:  $W_{MEC-MAX}$  se obține pentru VUM în intervalul:

$$\omega(500) = 534.5[rad/s] \div \omega(600) = 562.43[rad/s]$$

Prin urmare, VUM optimă,  $\omega_{OPTIM}$ , este în intervalul:

$$\Delta t = 500[s] \div 600[s], \text{ având valoarea:}$$

$$\omega_{OPTIM} = (534.5 + 562.43)/2 = 548.47[rad/s]$$

## 3) perioada de eșantionare $\Delta t = 200[s]$

$$\omega(200) = 451.88[rad/s]$$

$$\omega(400) = \mathbf{506.02[rad/s]}$$

$$\omega(600) = \mathbf{562.43[rad/s]}$$

$$\omega(800) = 610.61[rad/s]$$

$$\omega(1000) = 648.43[rad/s]$$

$$J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2)/2 = 50(506.02^2 - 451.88^2)/2 = 1.2965 \times 10^6 [J]$$

$$J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2)/2 = 50(562.43^2 - 506.02^2)/2 = \mathbf{1.5068 \times 10^6 [J]} - \text{valoare maximă}$$

$$J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2)/2 = 50(610.61^2 - 562.43^2)/2 = 1.4129 \times 10^6 [J]$$

$$J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2)/2 = 50(648.43^2 - 610.61^2)/2 = 1.1904 \times 10^6 [J]$$

Prin urmare, VUM optimă,  $\omega_{OPTIM}$ , are valoarea:

$$\omega_{OPTIM} = (506.02 + 562.43)/2 = 534.23 [rad/s]$$

**4) perioada de eşantionare**  $\Delta t = 300 [s], \omega(0) = 200.$

$$\left\{ \begin{array}{l} 50 \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left( \frac{(16 - 6 \sin(0.17943t))}{\omega - 0.0525} \right) + 3.1269 \times 10^{-2} \cdot \\ (16 - 6 \sin(0.17943t))^3 \cdot e^{-98.06((16 - 6 \sin(0.17943t))/\omega - 0.0525)} \end{array} \right. ,$$

$$\omega(0) = 200.$$

$$\omega(300) = 215.74 [rad/s]$$

$$\omega(600) = 235.79 [rad/s]$$

$$\omega(900) = 264.37 [rad/s]$$

$$\omega(1200) = 304.57 [rad/s]$$

$$\omega(1500) = 361.6 [rad/s]$$

$$\omega(1800) = \mathbf{434.79 [rad/s]}$$

$$\omega(2100) = \mathbf{520.34 [rad/s]}$$

$$\omega(2400) = 593.54 [rad/s]$$

$$\omega(2700) = 659.66 [rad/s]$$

$$\omega(3000) = 703.37 [rad/s]$$

$$\omega(3300) = 737.85 [rad/s]$$

$$\omega(3600) = 761.80 [rad/s]$$

$$J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2)/2 = 50(235.79^2 - 215.74^2)/2 = 2.2633 \times 10^5 [J]$$

$$J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2)/2 = 50(264.37^2 - 235.79^2)/2 = 3.5736 \times 10^5 [J]$$

$$J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2)/2 = 50(304.57^2 - 264.37^2)/2 = 5.7178 \times 10^5 [J]$$

$$J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2)/2 = 50(361.6^2 - 304.57^2)/2 = 9.4979 \times 10^5 [J]$$

$$J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2)/2 = 50(434.79^2 - 361.6^2)/2 = 1.4572 \times 10^6 [J]$$

$$J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2)/2 = 50(520.34^2 - 434.79^2)/2 = \mathbf{2.0428 \times 10^6 [J]} - \text{valoare maximă}$$

$$J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2)/2 = 50(593.54^2 - 520.34^2)/2 = 2.0384 \times 10^6 [J]$$

$$J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2)/2 = 50(659.66^2 - 593.54^2)/2 = 2.0715 \times 10^6 [J]$$

$$J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2)/2 = 50(703.37^2 - 659.66^2)/2 = 1.4895 \times 10^6 [J]$$

$$J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2)/2 = 50(737.85^2 - 703.37^2)/2 = 1.2423 \times 10^6 [J]$$

$$J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2)/2 = 50(761.8^2 - 737.85^2)/2 = 8.9792 \times 10^5 [J]$$

VUM optimă,  $\omega_{OPTIM}$ , are valoarea:

$$\omega_{OPTIM} = (520.34 + 434.79)/2 = 477.57 [rad/s]$$

5) perioada de eșantionare  $\Delta t = 400[s]$ ,  $\omega(0) = 200$ .

$$\left\{ \begin{array}{l} 50 \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left( \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) / \omega - 0.0525 \right) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \\ \cdot (16 - 6 \sin(0.17943t))^3 \cdot e^{-98.06 \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) / \omega - 0.0525 \right)} \\ \omega(0) = 200. \end{array} \right.$$

$$\omega(400) = 221.87[\text{rad/s}]$$

$$\omega(800) = 253.57[\text{rad/s}]$$

$$\omega(1200) = 304.57[\text{rad/s}]$$

$$\omega(1600) = 384.46[\text{rad/s}]$$

$$\omega(2000) = 492.23[\text{rad/s}]$$

$$\omega(2400) = 593.54[\text{rad/s}]$$

$$\omega(2800) = 677.46[\text{rad/s}]$$

$$\omega(3200) = 726.47[\text{rad/s}]$$

$$\omega(3600) = 761.8[\text{rad/s}]$$

$$\omega(5555) = 805.61[\text{rad/s}]$$

$$\omega(5955) = 810.56[\text{rad/s}]$$

$$J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2) / 2 = 50(253.57^2 - 221.87^2) / 2 = 3.7679 \times 10^5 [J]$$

$$J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2) / 2 = 50(304.57^2 - 253.57^2) / 2 = 7.1163 \times 10^5 [J]$$

$$J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2) / 2 = 50(384.46^2 - 304.57^2) / 2 = 1.3762 \times 10^6 [J]$$

$$J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2) / 2 = 50(492.23^2 - 384.46^2) / 2 = 2.362 \times 10^6 [J]$$

$$J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2) / 2 = 50(593.54^2 - 492.23^2) / 2 = \mathbf{2.75 \times 10^6 [J]} - \text{valoare maximă}$$

$$J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2) / 2 = 50(677.46^2 - 593.54^2) / 2 = 2.6666 \times 10^6 [J]$$

$$J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2) / 2 = 50(726.47^2 - 677.46^2) / 2 = 1.7202 \times 10^6 [J]$$

$$J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2) / 2 = 50(761.8^2 - 726.47^2) / 2 = 1.3145 \times 10^6 [J]$$

$$J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2) / 2 = 50(810.56^2 - 805.61^2) / 2 = 2.0 \times 10^5 [J]$$

Prin urmare, VUM optimă,  $\omega_{OPTIM}$ , are valoarea:

$$\omega_{OPTIM} = (593.54 + 492.23) / 2 = 542.89[\text{rad/s}]$$

6) perioada de eșantionare  $\Delta t = 800[s]$ ,  $\omega(0) = 200$ .

$$\omega(800) = 253.57[\text{rad/s}]$$

$$\omega(1600) = \mathbf{384.46}[\text{rad/s}]$$

$$\omega(2400) = \mathbf{593.54}[\text{rad/s}]$$

$$\omega(3200) = 726.47[\text{rad/s}]$$

$$\omega(4000) = 781.24[\text{rad/s}]$$

$$\omega(4800) = 802.09[\text{rad/s}]$$

$$\omega(5600) = 809.41[\text{rad/s}]$$



$$\omega(6400) = 810.14[\text{rad/s}]$$

$$J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2)/2 = 50(384.46^2 - 253.57^2)/2 = 2.0878 \times 10^6 [J]$$

$$J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2)/2 = 50(593.54^2 - 384.46^2)/2 = \mathbf{5.112 \times 10^6 [J]} - \text{valoare maximă}$$

$$J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2)/2 = 50(726.47^2 - 593.54^2)/2 = 4.3867 \times 10^6 [J]$$

$$J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2)/2 = 50(781.24^2 - 726.47^2)/2 = 2.0644 \times 10^6 [J]$$

$$J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2)/2 = 50(802.09^2 - 781.24^2)/2 = 8.2531 \times 10^5 [J]$$

$$J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2)/2 = 50(809.41^2 - 802.09^2)/2 = 2.949 \times 10^5 [J]$$

$$J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2)/2 = 50(810.56^2 - 809.41^2)/2 = 46574. [J]$$

VUM optimă,  $\omega_{OPTIM}$ , are valoarea:

$$\omega_{OPTIM} = (593.54 + 384.46)/2 = 489.0[\text{rad/s}]$$

**7) perioada de eșantionare**  $\Delta t = 1600[s], \omega(0) = 200.$

$$\omega(1600) = \mathbf{384.46}$$

$$\omega(3200) = \mathbf{726.47}$$

$$\omega(4800) = 802.09$$

$$\omega(6400) = 810.14$$

$$J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2)/2 = 50(384.46^2 - 200^2)/2 = 2.6952 \times 10^6$$

$$J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2)/2 = 50(726.47^2 - 384.46^2)/2 = \mathbf{9.4987 \times 10^6} - \text{valoare maximă}$$

$$J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2)/2 = 50(802.09^2 - 726.47^2)/2 = 2.8897 \times 10^6$$

$$J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2)/2 = 50(810.14^2 - 802.09^2)/2 = 3.2446 \times 10^5$$

Prin urmare, VUM optimă,  $\omega_{OPTIM}$ , are valoarea:

$$\omega_{OPTIM} = (726.47 + 384.46)/2 = 555.47[\text{rad/s}]$$

### 6.5.2. Determinarea maximului funcției puterii mecanice

Din ecuația mișcării :

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{TV}$$

prin înmulțire cu  $\omega$  se obține puterea dată de turbină:

$$J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega = \omega \cdot M_{TV} = P_{TV}$$

La  $V(t) = (16 - 6 \sin(0.17943t))$  și la funcționarea în gol ecuația mișcării are forma :

$$\left\{ \begin{array}{l} 50 \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left( \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) / \omega - 0.0525 \right) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \\ \cdot (16 - 6 \sin(0.17943t))^3 \cdot e^{-98.06((16 - 6 \sin(0.17943t)) / \omega - 0.0525)} \\ \omega(0) = 243. \end{array} \right.$$

și prin rezolvarea ei se obține variația lui  $\omega$  în timp, dată în figura 6.8. Pe baza acestei variații în timp a VUM,  $\omega$ , se poate defini o putere echivalentă a turbinei la viteza vântului de forma  $V(t) = (16 - 6 \sin(0.17943t))$ .

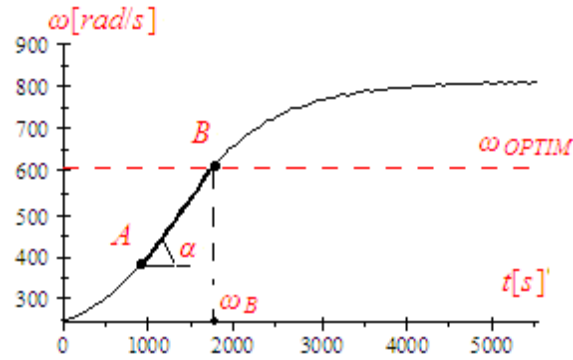


Fig.6.8.Variația lui  $\omega$  la viteza vântului variabilă în timp și  $\omega(0) = 243$ . [rad/s]

Puterea echivalentă a turbinei  $P_{ECH}(\omega)$ , generează aceeași formă de variație în timp a VUM ca și puterea reală,  $P_{TV}$ , putere care oscilează ca și valoare între puterea maximă dată de TV la  $V_{MAX} = 22$ [m/s] :

$$P_{TV-MAX} = 23.584 \cdot (((22)/\omega - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06((22)/\omega - 0.0525)} \cdot (22)^3$$

și puterea minimă dată de TV la  $V_{MIN} = 10$ [m/s] :

$$P_{TV-MIN} = 23.584 \cdot (((10)/\omega - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06((10)/\omega - 0.0525)} \cdot (10)^3$$

La  $dt = \Delta t = 500$ [s] și la  $d\omega = \Delta\omega = \omega_k - \omega_{k-1}$ , se obține  $P_{TV}$  sub forma:

$$P_{TV} = J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega = 50 \frac{\omega_k - \omega_{k-1}}{500} \cdot \omega_k^* = P_{ECH}, \text{ unde:}$$

$J$  – momentul de inerție echivalent;

$\omega_k$  – VUM la momentul  $t_k$  ;

$\omega_{k-1}$  – VUM la momentul  $t_{k-1}$  ,

$\omega_k^*$  – VUM la momentul  $(t_{k-1} + t_k) / 2$  .

### 1) perioada de eșantionare $\Delta t = 250$ [s] $\omega(0) = 243$ . [rad/s]

Măsurând , în exploatare și din ecuația mișcării, în simulare, se determină VUM la momentele de timp  $t = 250, 500, \dots, 8000$ [s] și apoi se calculează puterea echivalentă la gol, cu relația :

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

Se obțin rezultatele

$$\omega(250) = 268.56[\text{rad/s}]$$

$$\omega(500) = 302.66[\text{rad/s}]$$

$$J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega = 50 \frac{302.66 - 243}{500} \cdot 268.56 = 1602.2[\text{W}]$$

$$\omega(1000) = 405.73[\text{rad/s}]$$

$$\omega(750) = 347.87[\text{rad/s}]$$

$$J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega = 50 \frac{405.73 - 302.66}{500} \cdot 347.87 = 3585.5[\text{W}]$$

$$\omega(1500) = 543.31[\text{rad/s}]$$

$$\omega(1250) = 473.37[\text{rad/s}]$$

$$J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega = 50 \frac{543.31 - 405.73}{500} \cdot 473.37 = 6512.6[\text{W}]$$

$$\omega(2000) = 657.39[\text{rad/s}]$$

$$\begin{aligned} \omega(1750) &= 606.61[\text{rad/s}] = \omega_{OPTIM} \text{ -valoare optimă} \\ J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega &= 50 \frac{657.39-543.31}{500} \cdot 606.61 = 6920.2[\text{W}] - \text{valoare maximă} \\ \omega(2500) &= 725.12[\text{rad/s}] \\ \omega(2250) &= 696.06[\text{rad/s}] \\ J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega &= 50 \frac{725.12-657.39}{500} \cdot 696.06 = 4714.4[\text{W}] \\ \omega(3000) &= 765.1[\text{rad/s}] \\ \omega(2750) &= 747.22[\text{rad/s}] \\ J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega &= 50 \frac{765.1-725.12}{500} = 3.998 \cdot 747.22 = 2987.4[\text{W}] \\ \omega(3500) &= 789.67[\text{rad/s}] \\ \omega(3250) &= 779.49[\text{rad/s}] \\ J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega &= 50 \frac{789.67-765.1}{500} \cdot 779.49 = 1915.2[\text{W}] \\ \omega(4000) &= 798.97[\text{rad/s}] \\ \omega(3750) &= 795.58[\text{rad/s}] \\ J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega &= 50 \frac{798.97-789.67}{500} \cdot 795.58 = 739.89[\text{W}] \\ \omega(4500) &= 802.61[\text{rad/s}] \\ \omega(4250) &= 801.06[\text{rad/s}] \\ J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega &= 50 \frac{802.61-798.97}{500} \cdot 801.06 = 291.59[\text{W}] \\ \omega(5000) &= 808.38[\text{rad/s}] \\ \omega(4750) &= 805.07[\text{rad/s}] \\ J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega &= 50 \frac{808.38-802.61}{500} \cdot 805.07 = 464.53[\text{W}] \\ \omega(5500) &= 811.14[\text{rad/s}] \\ \omega(5250) &= 810.79[\text{rad/s}] \\ J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega &= 50 \frac{811.14-808.38}{500} = 0.276 \cdot 810.79 = 223.78[\text{W}] \\ \omega(6000) &= 809.41[\text{rad/s}] \\ \omega(5750) &= 810.36[\text{rad/s}] \\ J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega &= 50 \frac{809.41-811.14}{500} \cdot 810.36 = -140.19[\text{W}] \\ \omega(7000) &= 812.87[\text{rad/s}] \\ \omega(6500) &= 809.07[\text{rad/s}] \\ J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega &= 50 \frac{812.87-809.41}{1000} \cdot 809.07 = 139.97 \\ \omega(8000) &= 809.32[\text{rad/s}] \\ \omega(7500) &= 811.76[\text{rad/s}] \\ J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega &= 50 \frac{809.32-812.87}{1000} \cdot 811.76 = -144.09[\text{W}] \end{aligned}$$

Valoarea optimă a VUM, obținută din puterea calculată din înregistrarea în timp a VUM, se poate deduce și direct din observarea evoluției în timp a VUM, la funcționarea în gol, figura 6. 8, obținută din ecuația mișcării.

La  $t=1000[\text{s}]$  se obține  $\omega_{OPTIM}$ , deoarece :

1. la  $t > 1000[s]$  panta derivatei VUM,  $\frac{d\omega}{dt}$ , scade;
2. puterea echivalentă:  $P_{ECH} = J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega$ , devine maximă la VUM pentru care produsul :  $\frac{d\omega}{dt} \cdot \omega$  este maxim.

În zona AB panta este constantă:

$$\tan \alpha = \frac{d\omega}{dt} = ct$$

În punctul B produsul  $\frac{d\omega}{dt} \cdot \omega$  este maxim deoarece  $\omega_B$  este maxim. La  $\omega \gg \omega_B$  panta începe să scadă și puterea echivalentă se micorează devenind nulă la  $\frac{d\omega}{dt} \rightarrow 0$ .

VUM corespunzătoare maximului puterii echivalente:  $\omega_B$  este diferită de valoarea  $\omega_{OPTIM}$  corespunzătoare energiei maxime, energiei obținute prin integrarea puterii în timp.

La  $\omega_{OPTIM} = 606.61[rad/s]$  și cu  $\omega_{OPTIM} = 31.817 \cdot V$ , rezultat obținut din maximizarea funcției  $P_{TV}(\omega)$ , se obține viteza vântului echivalentă, sub forma

$$V_{ECH} = \omega_{OPTIM}/31.817 = 606.61/31.817 = 19.066[m/s]$$

La această valoare a vitezei rezultă caracteristica puterii echivalente,  $P_{ECH}(\omega)$  dată în figura 6.9.

$$P_{ECH}(\omega) = 23.584 \cdot ((19.066/\omega - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06(19.066/\omega - 0.0525)} \cdot 19.066^3$$

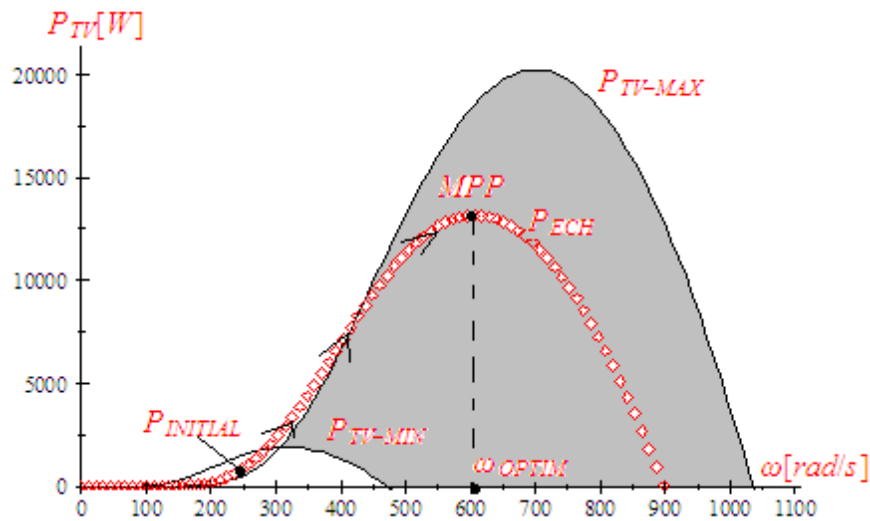


Fig.6.9.Caracteristicile puterii

Punctele de funcționare sunt în zona hașurată, între caracteristica puterii la viteza maximă,  $V_{MAX}$ , și cea minimă,  $V_{MIN}$ . Punctul inițial de funcționare,  $P_{INITIAL}$ , se deplasează pe caracteristica echivalentă a puterii și atinge  $MPP$  în aproximativ 1750[s].

Maximul energetic corespunde lângă maximul puterii echivalente, la  $\omega(1750) = 606.61[rad/s] = \omega_{OPTIM}$ .

**2) perioada de eșantionare**  $\Delta t = 800[s]$   $\omega(0) = 243.[rad/s]$

$$\omega(800) = 358.98[rad/s]$$

$$\omega(1600) = 567.65[rad/s]$$

$$\omega(2400) = 713.23[rad/s]$$

$$\omega(3200) = 775.03[rad/s]$$

$$J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega = 50 \cdot 463.32 \cdot (567.65 - 358.98)/800 = \mathbf{6042.6} - \text{valoare maximă}$$

$$J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega = 50 \cdot 640.44 \cdot (713.23 - 567.65)/800 = 5827.2$$

$$J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega = 50 \cdot 744.13 \cdot (775.03 - 713.23)/800 = 2874.2$$

$$\omega_{OPTIM2} = (567.65 + 358.98)/2 = 463.32[\text{rad/s}]$$

**3) perioada de eșantionare**  $\Delta t = 400[s]$   $\omega(0) = 243. [\text{rad/s}]$

$$\omega(400) = 287.89[\text{rad/s}]$$

$$\omega(800) = 358.98[\text{rad/s}]$$

$$\omega(1200) = \mathbf{459.7}[\text{rad/s}]$$

$$\omega(1600) = \mathbf{567.65}[\text{rad/s}]$$

$$\omega(2000) = 657.39[\text{rad/s}]$$

$$\omega(2400) = 713.23[\text{rad/s}]$$

$$J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega = 50 \cdot 323.44 \cdot (358.98 - 287.89)/800 = 1437.1$$

$$J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega = 50 \cdot 409.34 \cdot (459.7 - 358.98)/800 = 2576.8$$

$$J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega = 50 \cdot 513.68 \cdot (567.65 - 459.7)/800 = \mathbf{3465.7} - \text{valoare maximă}$$

$$J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega = 50 \cdot 612.52 \cdot (657.39 - 567.65)/800 = 3435.5$$

$$J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega = 50 \cdot 685.31 \cdot (713.23 - 657.39)/800 = 2391.7$$

$$\omega_{OPTIM3} = (567.65 + 459.7)/2 = 513.68[\text{rad/s}]$$

Prin urmare, din funcționarea în gol a TV se poate deduce variația în timp a VUM și zona de optim: la  $\omega < 600[\text{rad/s}]$ .

Așa cum se observă maximul puterii se obține la:

$$\omega_{OPTIM-P_{ECH}} = 606.61[\text{rad/s}], 463.32[\text{rad/s}], 513.68[\text{rad/s}]$$

,iar cel al energiei la:

$\omega_{OPTIM-W_{MEC}} = 552.62[\text{rad/s}], 548.47[\text{rad/s}], 534.23[\text{rad/s}], 477.57[\text{rad/s}], 542.89[\text{rad/s}]$ , valorile cele mai apropiate de realitate fiind cele calculate cu o perioadă de eșantionare egală cu perioada de oscilație a vitezei vântului.

Din rezultatele de mai sus se observă influența semnificativă ce o are valoarea intervalului de eșantionare.

Cele mai bune rezultate se obțin la valori ale intervalului de eșantionare apropiate de perioada de oscilație a vitezei vântului, T, în cazul de față T=35[s].

## 6.6. Determinarea maximului energetic prin încărcări succesive a GSMP

La rezistența de sarcină R și VUM,  $\omega$ , momentul la GSMP este [1]:

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

Puterea dată de GSMP,  $P_{GSMP}$ , se calculează cu relația [1]:

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

Din ecuația mișcării

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{TV} - M_{GSMP}$$

și a energiei electrice  $W_e$  :

$$P_{GSMP} = \frac{dW_e}{dt}$$

la  $V(t) = 16 - 6 \sin(0.17943t)$  și  $R = 451.84[\Omega]$  se obține sistemul diferențial în necunoscutele  $W_e$  și  $\omega$  :

$$\left\{ \begin{array}{l} 50 \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left( \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) / \omega - 0.0525 \right) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot \\ e^{-98.06 \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) / \omega - 0.0525 \right)} \cdot (16 - 6 \sin(0.17943t))^3 - \\ 5445 \cdot \omega^2 (5 \cdot 451.84 + 8) \cdot \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot (451.84)^2 + 2000 \cdot (451.84) + 1600}{(1250 \cdot (451.84)^2 + 4000 \cdot (451.84) + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2} \\ 27225 \cdot 451.84 \cdot \omega^2 \cdot \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot 451.84^2 + 2000 \cdot 451.84 + 1600}{(1250 \cdot 451.84^2 + 4000 \cdot 451.84 + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2} = \frac{dW_e}{dt} \\ \omega(0) = 550.07 \\ W_e(0) = 0 \end{array} \right.$$

Se aleg valori ale rezistenței de sarcină în domeniul  $R = 349.84[\Omega] \div 491.84[\Omega]$

1. La  $R = 349.84[\Omega]$  se obține :  
 $\omega(4000.) = 441.27[\text{rad/s}], W_e(4000) = 2.3783 \times 10^7 [J]$
2. La  $R = 369.84[\Omega]$  se obține :  
 $W_e(4000) = 2.6446 \times 10^7 [J], \omega(4000.) = 478.41[\text{rad/s}]$
3. La  $R = 379.84[\Omega]$  se obține :  
 $W_e(4000) = 2.7139 \times 10^7 [J], \omega(4000.) = 491.08[\text{rad/s}]$
4. La  $R = 389.84[\Omega]$  se obține :  
 $W_e(4000) = 2.7639 \times 10^7 [J], \omega(4000.) = 501.99[\text{rad/s}]$
5. La  $R = 399.84[\Omega]$  se obține :  
 $W_e(4000) = 2.8004 \times 10^7 [J], \omega(4000.) = 511.65[\text{rad/s}]$
6. La  $R = 411.84[\Omega]$  se obține :  
 $W_e(4000) = 2.8312 \times 10^7 [J], \omega(4000.) = 522.01[\text{rad/s}]$
7. La  $R = 421.84[\Omega]$  se obține :  
 $W_e(4000) = 2.8485 \times 10^7 [J], \omega(4000.) = 529.83[\text{rad/s}]$
8. La  $R = 441.84[\Omega]$  se obține :  
 $W_e(4000) = 2.8667 \times 10^7 [J], \omega(4000.) = 543.78[\text{rad/s}]$
9. La  $R = 450.84[\Omega]$  se obține :  
 $W_e(4000) = 2.8698 \times 10^7 [J], \omega(5000.) = 549.66[\text{rad/s}]$
10. La  $R = 451.84[\Omega]$  se obține :  $W_e(4000) = 2.87 \times 10^7 [J], \omega(5000.) = 550.27[\text{rad/s}]$
11. La  $R = 452.84[\Omega]$  se obține :  $W_e(4000) = 2.87 \times 10^7 [J], \omega(5000.) = 550.88[\text{rad/s}]$
12. La  $R = 441.84[\Omega]$  se obține :  
 $W_e(4000) = 2.8701 \times 10^7 [J], \omega(5000.) = 551.48[\text{rad/s}]$

13. La  $R = 453.84[\Omega]$  se obține :

$$W_e(4000) = 2.8701 \times 10^7 [J], \omega(5000.) = 552.08 [rad/s]$$

14. La  $R = 441.84[\Omega]$  se obține :

$$W_e(4000) = 2.8701 \times 10^7 [J], \omega(5000.) = 552.68 [rad/s]$$

15. La  $R = 456.84[\Omega]$  se obține :  $W_e(4000) = 2.87 \times 10^7 [J], \omega(5000.) = 553.27 [rad/s]$

16. La  $R = 457.84[\Omega]$  se obține :  $W_e(4000) = 2.87 \times 10^7 [J], \omega(5000.) = 553.86 [rad/s]$

17. La  $R = 458.84[\Omega]$  se obține :

$$W_e(4000) = 2.8699 \times 10^7 [J], \omega(5000.) = 554.45 [rad/s]$$

18. La  $R = 461.84[\Omega]$  se obține :

$$W_e(4000) = 2.8689 \times 10^7 [J], \omega(4000.) = 555.98 [rad/s]$$

19. La  $R = 471.84[\Omega]$  se obține:

$$W_e(4000) = 2.8655 \times 10^7 [J], \omega(4000.) = 561.55 [rad/s]$$

20. La  $R = 481.84[\Omega]$  se obține:

$$W_e(4000) = 2.8598 \times 10^7 [J], \omega(4000.) = 566.81 [rad/s]$$

21. La  $R = 491.84[\Omega]$  se obține:

$$W_e(4000) = 2.8522 \times 10^7 [J], \omega(4000.) = 571.81 [rad/s]$$

22. La  $R = 453.84[\Omega], 454.84[\Omega], 455.84[\Omega]$

se obține energia maximă :  $W_e(4000) = 2.8701 \times 10^7 [J]$  și  
 $\omega_{OPTIM} = 551.48 \div 552.68 [rad/s]$ .

### PUTEREA ELECTRICĂ GENERATĂ

La  $R = 451.84[\Omega]$  din ecuația mișcării:

$$\left\{ \begin{array}{l} 50 \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left( \frac{(16 - 6 \sin(0.17943t))}{\omega - 0.0525} + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06 \left( \frac{16 - 6 \sin(0.17943t)}{\omega - 0.0525} \right)} \\ \cdot (16 - 6 \sin(0.17943t))^3 - 5445 \cdot \omega^2 (5 \cdot 451.84 + 8) \cdot \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot (451.84)^2 + 2000 \cdot (451.84) + 1600}{(1250 \cdot (451.84)^2 + 4000 \cdot (451.84) + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2} \\ \omega(0) = 551. \end{array} \right.$$

se obține variația în timp a lui  $\omega$ , figura 6.10.

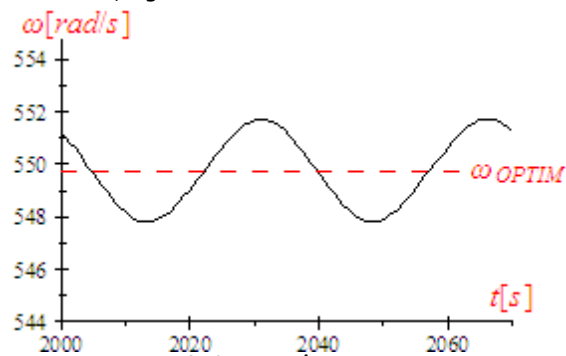


Fig.6.10.Variația în timp a VUM

Punând variația în timp a VUM sub forma :

$$\omega(t) = (549.74 + 1.94 \sin(0.17943t))$$

puterea dată de generator devine:

$$P_{GSMP} = 27225 \cdot 451.84 \cdot \omega^2 \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot 451.84^2 + 2000 \cdot 451.84 + 1600}{(1250 \cdot 451.84^2 + 4000 \cdot 451.84 + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2} =$$

$$27225 \cdot 451.84 \cdot (549.74 + 1.94 \sin(0.17943t))^2 \frac{4 \cdot (549.74 + 1.94 \sin(0.17943t))^2 + 625 \cdot 451.84^2 + 2000 \cdot 451.84 + 1600}{(1250 \cdot 451.84^2 + 4000 \cdot 451.84 + 3200 + 7 \cdot (549.74 + 1.94 \sin(0.17943t))^2)^2}$$

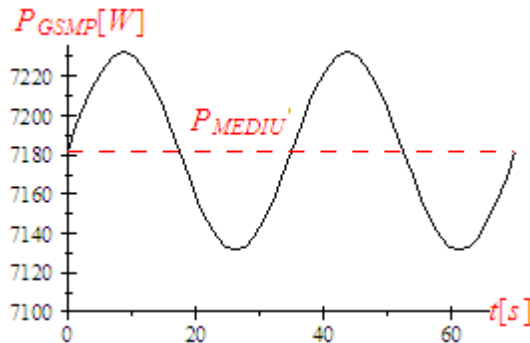


Fig.6.11.Variația în timp a puterii  $P_{GSMP}$

Puterea dată de generator oscilează între :  $P_{MAX} = 7232.2[W]$  și  $P_{MIN} = 7131.6[W]$  , figura 6.11, putând fi pusă sub forma :

$$P_{GSMP}(t) = 7181.9 + 50.3 \sin(0.17943t)$$

Oscilațiile puterii sunt de  $\pm 0.7\%$  .

## 6.7. Dinamica sistemului la încărcarea optimă

Cunoașterea VUM optime:  $\omega_{OPTIM}$  , este o problemă fundamentală în orice sistem de conducere performant deoarece asigură captarea unei energii maxime.

Mărimea  $\omega_{OPTIM}$  devine marime de referință în sistemul de reglare:  $\omega_{ref} = \omega_{OPTIM}$  .

Nu este necesară cunoașterea rezistenței optime:  $R_{OPTIM} = 451.84[\Omega]$  , deoarece ea se poate impune cu ajutorul regloatoarelor, de exemplu de tip PI de ecuație:

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

sau

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

ce are la intrare eroarea  $\Delta \omega$  , iar la ieșire unghiul de aprindere al tiristoarelor convertorului interpus între generator și rețea, figura 11. Mărimea de referință a regulatorului este  $\omega_{ref}$  . Acordarea regulatorului este o problemă mai dificilă deoarece sistemul este neliniar și acordarea se poate face doar prin simulări succesive cu ajutorul ecuației mișcării:

$$\begin{cases} 50 \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_{TV} - M_{GSMP} \text{ -ecuația mișcării} \\ \frac{dR}{dt} = K_1 \frac{d\omega}{dt} + K_2 (\omega - \omega_{ref}) \text{ -ecuația regulatorului} \end{cases}$$

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

Pentru regulatorul  $-PI-$  se obține în final ecuația:

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



$$\omega_{ref} = \omega_{OPTIM} = 550.07[\text{rad/s}]$$

Determinarea constantelor regulatorului,  $K_1$  și  $K_2$ , se face în urma analizei simulărilor de mai jos:

Ecuția mișcării și a regulatorului  $-PI$  formează sistemul de ecuații diferențiale ce modelează comportarea ansamblului (TV+GSMP).

$$\left\{ \begin{array}{l} 50 \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left( \frac{(16 - 6\sin(0.17943t))}{\omega - 0.0525} + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06 \left( \frac{16 - 6\sin(0.17943t)}{\omega - 0.0525} \right)} \\ (16 - 6\sin(0.17943t))^3 - 5445 \cdot \omega^2 (5R + 8) \cdot \frac{4\omega^2 + 625 \cdot (R)^2 + 2000 \cdot (R) + 1600}{(1250 \cdot (R)^2 + 4000 \cdot (R) + 3200 + 7\omega^2)^2} \\ \frac{dR}{dt} = 4.5064 \times 10^{-2} \frac{d\omega}{dt} + 0.01(\omega - 550.07) \\ \omega(0) = 500 \\ R(0) = 555 \end{array} \right.$$

În figurile următoare se dau mai multe variante de valori pentru constanta  $K_2$ .

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

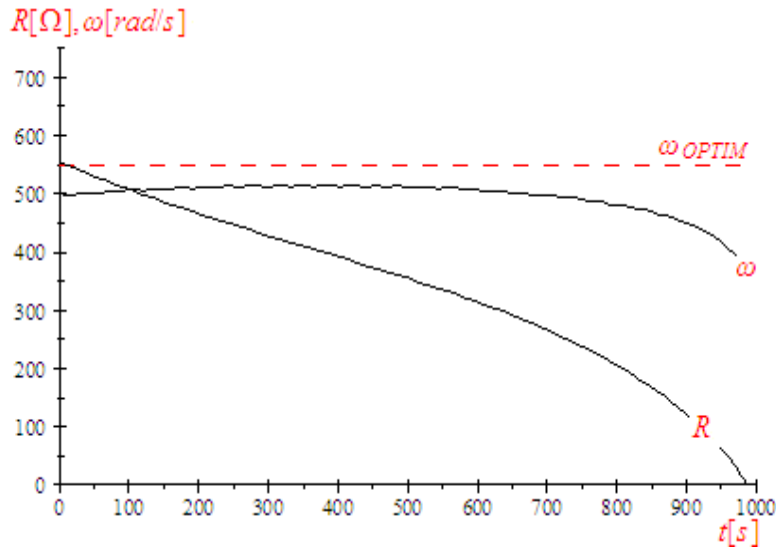


Fig.6.12. Variația în timp a lui R și  $\omega$  la  $\frac{dR}{dt} = 4.5064 \times 10^{-2} \frac{d\omega}{dt} + 0.01(\omega - 550.07)$

După un timp  $t = 1000$  [s], generatorul este pus în scurtcircuit.

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

$$\left\{ \begin{array}{l} 50 \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left( \frac{(16 - 6\sin(0.17943t))}{\omega - 0.0525} + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06 \left( \frac{16 - 6\sin(0.17943t)}{\omega - 0.0525} \right)} \\ (16 - 6\sin(0.17943t))^3 - 5445 \cdot \omega^2 (5R + 8) \cdot \frac{4\omega^2 + 625 \cdot (R)^2 + 2000 \cdot (R) + 1600}{(1250 \cdot (R)^2 + 4000 \cdot (R) + 3200 + 7\omega^2)^2} \\ \frac{dR}{dt} = 4.5064 \times 10^{-2} \frac{d\omega}{dt} + 0.1(\omega - 550.07) \\ \omega(0) = 500 \\ R(0) = 555 \end{array} \right.$$

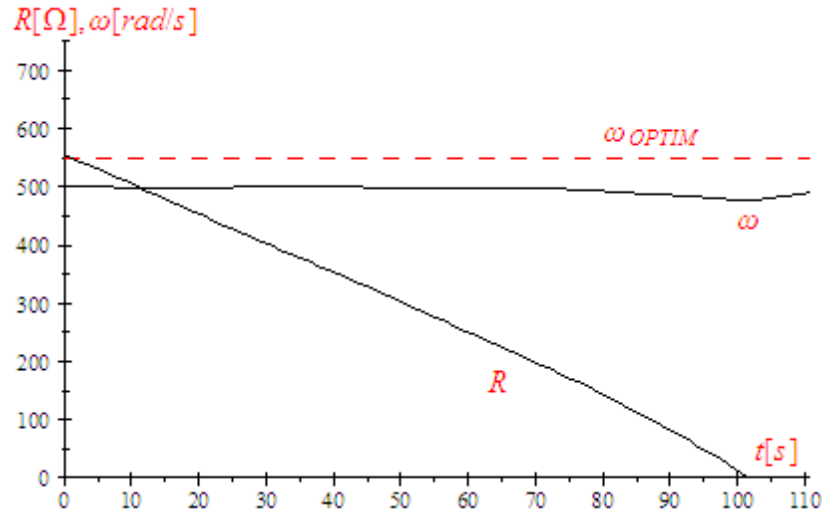


Fig.6.13.Variația în timp a lui R și  $\omega$  la  $\frac{dR}{dt} = 4.5064 \times 10^{-2} \frac{d\omega}{dt} + 0.1(\omega - 550.07)$

După un timp  $t = 100$  [s], generatorul este pus în scurtcircuit.

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

$$\left\{ \begin{array}{l} 50 \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left( \frac{(16 - 6 \sin(0.17943t))}{\omega - 0.0525} + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06((16 - 6 \sin(0.17943t))/\omega - 0.0525)} \\ (16 - 6 \sin(0.17943t))^3 - 5445 \cdot \omega^2 (5R + 8) \cdot \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot (R)^2 + 2000 \cdot (R) + 1600}{(1250 \cdot (R)^2 + 4000 \cdot (R) + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2} \\ \frac{dR}{dt} = 4.5064 \times 10^{-2} \frac{d\omega}{dt} + 0.001(\omega - 550.07) \\ \omega(0) = 500 \\ R(0) = 555 \end{array} \right.$$

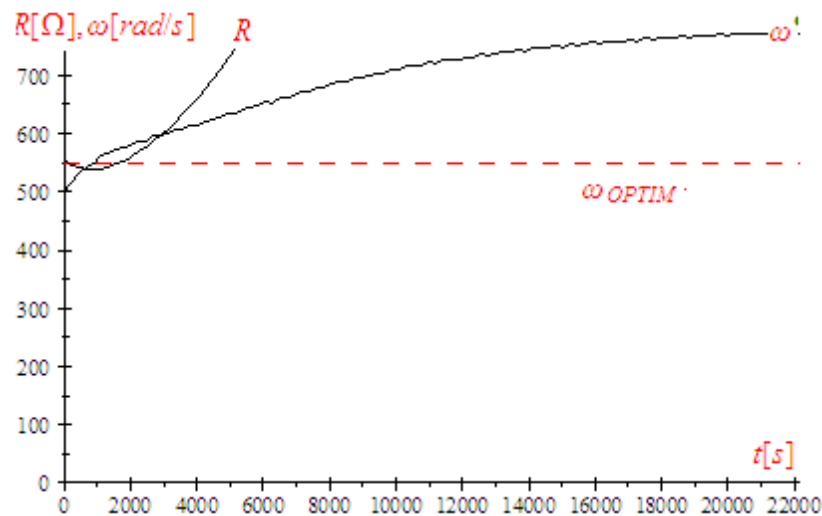


Fig.6.14.Variația în timp a lui R și  $\omega$  la  $\frac{dR}{dt} = 4.5064 \times 10^{-2} \frac{d\omega}{dt} + 0.001(\omega - 550.07)$

În acest caz sistemul este instabil, fapt dovedit prin evoluția în timp a VUM, care atinge valoarea corespunzătoare funcționării în gol, rezistența de sarcină devenind mare.

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

$$\left\{ \begin{array}{l} 50 \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left( \frac{(16 - 6 \sin(0.17943t))}{\omega - 0.0525} + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06 \left( \frac{(16 - 6 \sin(0.17943t))}{\omega - 0.0525} \right)} \\ (16 - 6 \sin(0.17943t))^3 - 5445 \cdot \omega^2 (5.R + 8) \cdot \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot (R)^2 + 2000 \cdot (R) + 1600}{(1250 \cdot (R)^2 + 4000 \cdot (R) + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2} \\ \frac{dR}{dt} = 4.5064 \times 10^{-2} \frac{d\omega}{dt} + 0.0001(\omega - 550.07) \\ \omega(0) = 500. \\ R(0) = 555 \end{array} \right.$$

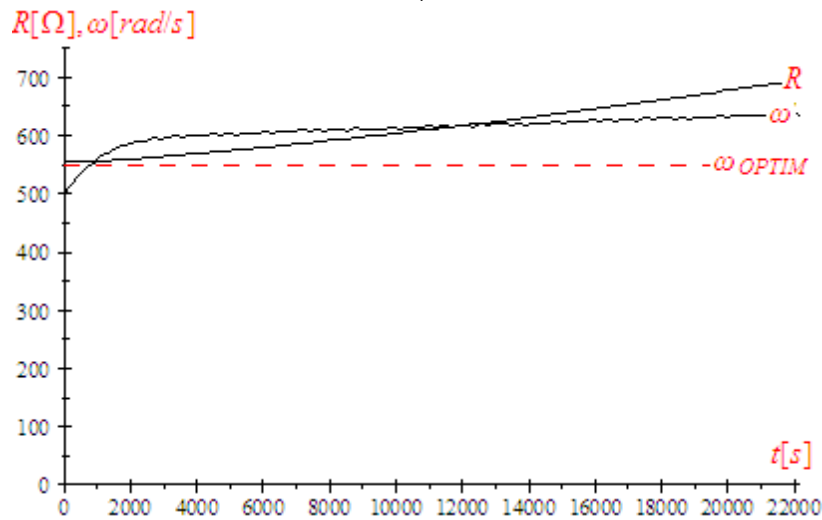


Fig.6.15. Variația în timp a lui R și  $\omega$  la  $\frac{dR}{dt} = 4.5064 \times 10^{-2} \frac{d\omega}{dt} + 0.0001(\omega - 550.07)$

În acest caz sistemul este instabil, VUM crescând mereu.

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

$$\left\{ \begin{array}{l} 50 \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left( \frac{(16 - 6 \sin(0.17943t))}{\omega - 0.0525} + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06 \left( \frac{(16 - 6 \sin(0.17943t))}{\omega - 0.0525} \right)} \\ (16 - 6 \sin(0.17943t))^3 - 5445 \cdot \omega^2 (5.R + 8) \cdot \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot (R)^2 + 2000 \cdot (R) + 1600}{(1250 \cdot (R)^2 + 4000 \cdot (R) + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2} \\ \frac{dR}{dt} = 4.5064 \times 10^{-2} \frac{d\omega}{dt} - 0.0001(\omega - 550.07) \\ \omega(0) = 500. \\ R(0) = 555 \end{array} \right.$$

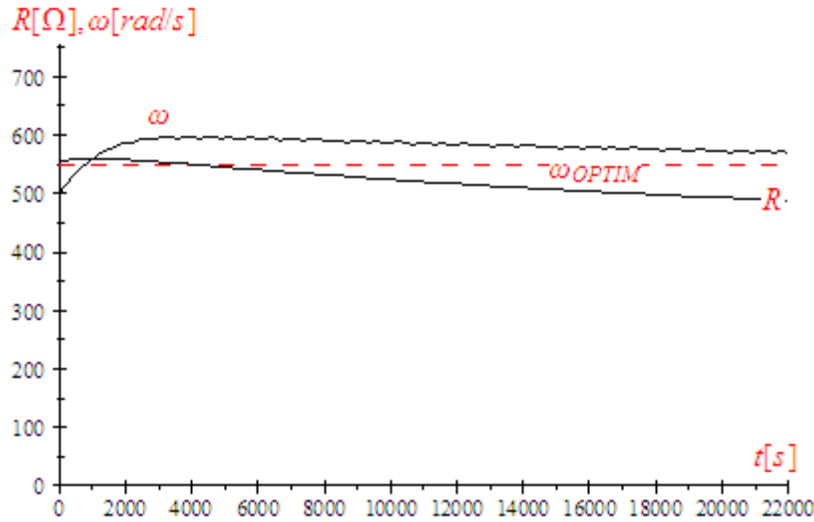


Fig.6.16.Variația în timp a lui R și  $\omega$  la  $\frac{dR}{dt} = 4.5064 \times 10^{-2} \frac{d\omega}{dt} - 0.0001(\omega - 550.07)$

În acest caz sistemul este stabil, VUM atingând valoarea optimă după un timp foarte lung, (mai mare de 22000 [s]).

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

$$\left\{ \begin{array}{l} 50 \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left( \frac{(16 - 6\sin(0.17943t))}{\omega - 0.0525} \right) + 3.1269 \times 10^{-2} \cdot e^{-98.06 \left( \frac{(16 - 6\sin(0.17943t))}{\omega - 0.0525} \right)} \\ (16 - 6\sin(0.17943t))^3 - 5445 \cdot \omega^2 (5R + 8) \cdot \frac{4\omega^2 + 625 \cdot (R)^2 + 2000 \cdot (R) + 1600}{(1250 \cdot (R)^2 + 4000 \cdot (R) + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2} \\ \frac{dR}{dt} = 4.5064 \times 10^{-2} \frac{d\omega}{dt} - 0.001(\omega - 550.07) \\ \omega(0) = 500. \\ R(0) = 555 \end{array} \right.$$

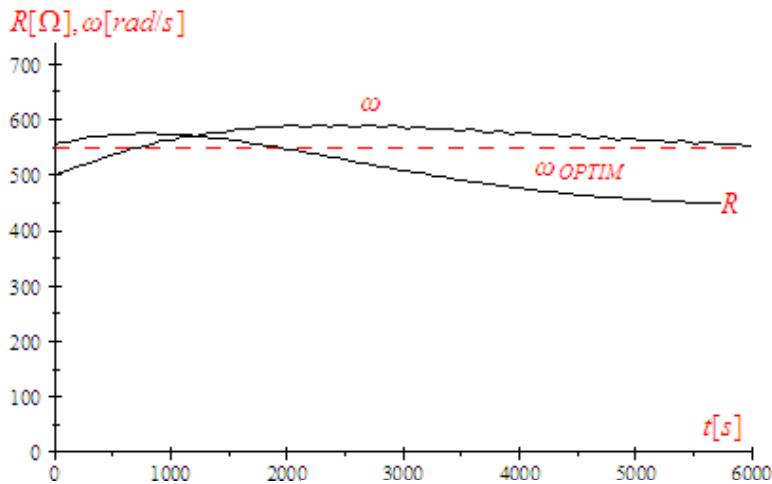


Fig.6.17.Variația în timp a lui R și  $\omega$  la  $\frac{dR}{dt} = 4.5064 \times 10^{-2} \frac{d\omega}{dt} - 0.001(\omega - 550.07)$

În acest caz sistemul este stabil, VUM atingând valoarea optimă după un timp  $t=8888[s]$  și rezistența devine:  $R(8888) = 449.39[\Omega]$  față de  $R = 451.84[\Omega]$  obținută anterior.

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

$$\left\{ \begin{array}{l} 50 \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left( \frac{(16 - 6 \sin(0.17943t))}{\omega - 0.0525} + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06 \left( \frac{16 - 6 \sin(0.17943t)}{\omega - 0.0525} \right)} \\ (16 - 6 \sin(0.17943t))^3 - 5445 \cdot \omega^2 (5.R + 8) \cdot \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot (R)^2 + 2000 \cdot (R) + 1600}{(1250 \cdot (R)^2 + 4000 \cdot (R) + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2} \\ \frac{dR}{dt} = 4.5064 \times 10^{-2} \frac{d\omega}{dt} - 0.01(\omega - 550.07) \\ \omega(0) = 500. \\ R(0) = 555 \end{array} \right.$$

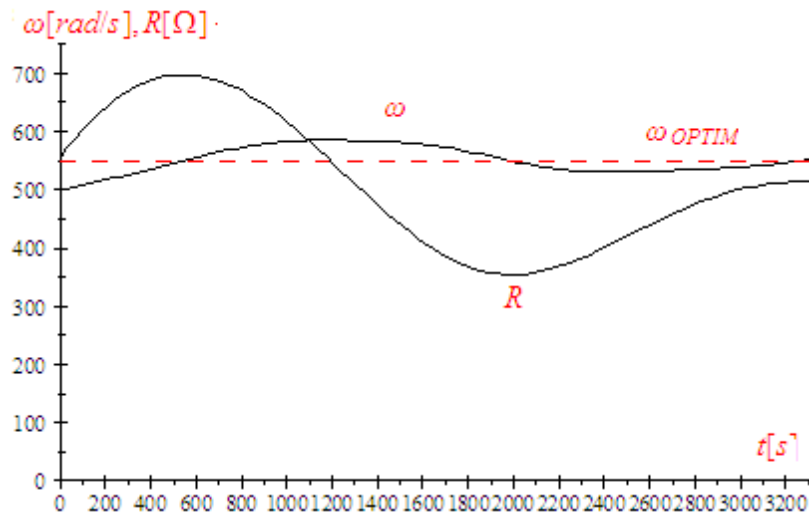


Fig.6.18. Variația în timp a lui R și  $\omega$  la  $\frac{dR}{dt} = 4.5064 \times 10^{-2} \frac{d\omega}{dt} - 0.01(\omega - 550.07)$

Atingerea valorilor de regim staționar se face prin oscilații, 7. 272 7% la VUM și 55. 556% la rezistența de sarcină.

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

$$\left\{ \begin{array}{l} 50 \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left( \frac{(16 - 6 \sin(0.17943t))}{\omega - 0.0525} + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06 \left( \frac{16 - 6 \sin(0.17943t)}{\omega - 0.0525} \right)} \\ (16 - 6 \sin(0.17943t))^3 - 5445 \cdot \omega^2 (5.R + 8) \cdot \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot (R)^2 + 2000 \cdot (R) + 1600}{(1250 \cdot (R)^2 + 4000 \cdot (R) + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2} \\ \frac{dR}{dt} = 4.5064 \times 10^{-2} \frac{d\omega}{dt} - 0.1(\omega - 550.07) \\ \omega(0) = 500. \\ R(0) = 555 \end{array} \right.$$

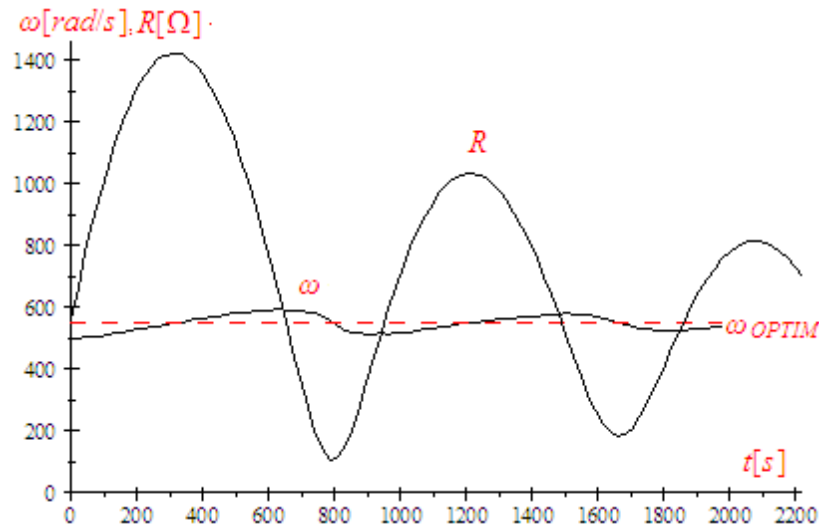


Fig.6.19.Variația în timp a lui  $R$  și  $\omega$  la  $\frac{dR}{dt} = 4.5064 \times 10^{-2} \frac{d\omega}{dt} - 0.1(\omega - 550.07)$

În acest caz atingerea valorilor de regim staționar se face prin oscilații mai mari: 8 % la VUM și 200% la rezistența de sarcină.

### Observația 1

Vitezele unghiulare mecanice optime :  $\omega_{OPTIM}$  s-au obținut prin simulări. Pentru a fi utile aceste mărimi trebuie să fie **determinate în timp real și acest fapt se poate realiza doar prin măsurarea vitezei vântului.**

Prin integrarea puterii energia maximă s-a obținut la :

$$\omega_{OPTIM1} = 551.10227[\text{rad/s}]$$

Prin liniarizarea caracteristicilor mecanice energia maximă s-a obținut la :

$$\omega_{OPTIM-LINIARIZARE} = 403.34[\text{rad/s}]$$

Prin aproximarea funcției exponențiale din derivata energiei s-a obținut energia maximă:

- la:  $\omega_{OPTIM2} = 557.13[\text{rad/s}]$  - în varianta grafică;
- la:  $\omega_{OPTIM3} = 604.93[\text{rad/s}]$  - în varianta descompunerii în serie.

Din calculul energiei maxime, folosind integrala puterii, s-a obținut:

$$\omega_{OPTIM-INTEGRAL} = 550. [\text{rad/s}]$$

Din derivata VUM puterea echivalentă maximă s-a obținut, pentru:

$$\omega_{OPTIM-PECH} = 606.61[\text{rad/s}]$$

Din derivata VUM energia maximă s-a obținut pentru:

$$\omega_{OPTIM-WMEC-MAX} = 552.62[\text{rad/s}],$$

Prin încărcări succesive la GSMP s-a obținut:

$$\omega_{OPTIM-REZ} = 552. [\text{rad/s}]$$

**Valorile cele mai apropiate de optimul energetic real sunt:**

$\omega_{OPTIM-REAL} = \omega_{OPTIM-REZ} = 552. [\text{rad/s}]$  și  $\omega_{OPTIM-WMEC-MAX} = 552.62[\text{rad/s}]$  deoarece s-au realizat simulări foarte apropiate de funcționarea în condiții reale, folosind ecuația mișcării.

Prin liniarizarea caracteristicilor mecanice se obține cea mai mare eroare:

$$\omega_{OPTIM-LINIARIZARE} = 403.34[\text{rad/s}]$$

față de  $\omega_{OPTIM-REAL} = 552. [\text{rad/s}]$  .

Metoda de determinare a VUM optime prezentată poate constitui baza etalonării optimului energetic de funcționare.

### Observația 2

Maximul puterii echivalente:  $P_{ECH}$ , conduce la valoarea:

$$\omega_{OPTIM-P_{ECH}} = 606.61 [rad/s]$$

,cu 10.2 8% diferită de cea reală.

Energetic, în condițiile în care puterea reală a turbinei oscilează între o valoare maximă la  $V_{MAX}$  și o valoare minimă la  $V_{MIN}$ .

Valorile obținute sunt deosebit de utile în a valida metoda de calcul a lui  $\omega_{OPTIM}$  în timp real, data în continuare.

Cunoscând VUM pentru care energia captată este maximă, prin comanda convertoarelor de putere interpușe între GSMP și rețea, figura 6.20, se asigură captarea unei energii maxime.

Din forma ecuației în  $\omega$  obținută din anularea derivatei  $dW/d\omega = 0$ :

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

Se poate observa că valoarea lui  $\omega$  depinde semnificativ de cunoașterea cât mai exactă a funcției  $V(t)$ , adică a variației vitezei vântului în timp.

Calculul VUM optime,  $\omega_{OPTIM}$ , are la bază cunoașterea, prin măsurători, a vitezei vântului, adică funcția  $V(t)$ .

La  $V=ct$  s-a obținut:

$$\omega_{OPTIM} = 31.817V$$

Folosind acest rezultat și pentru  $V \neq ct$  și având în vedere cele precizate anterior, referitoare la forma ecuației de calcul a lui  $\omega_{OPTIM}$ , este util a folosi o viteză echivalentă a vântului sub forma:

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

unde factorul  $n$  din radicalul de mai sus se deduce din ecuația:

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

sau

$$552. = 31.817V_{ECH}$$

obținându-se:

$$V_{ECH} = 552./31.817 = 17.349[m/s]$$

sau

$$17.349 = \sqrt[4]{\frac{1}{35} \int_0^{35} (16 - 6 \sin(0.17943t))^n dt}$$

Ecuația de mai sus are soluția  $n=4$  și prin urmare viteza echivalentă se poate calcula cu relația:

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

Pentru o turbină dată se poate determina  $\omega_{OPTIM}$  din:

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

unde:

$k$  - constantă dimensională a turbinei.

În concluzie, algoritmul de conducere este următorul:

- 1) se înregistrează viteza vântului și se determină  $V_{ECH}$ ;
- 2) se determină  $\omega_{OPTIM}$  din maximizarea funcției energiei;
- 3) se menține, prin sarcina la GSMP, VUM în jurul lui  $\omega_{OPTIM}$ .

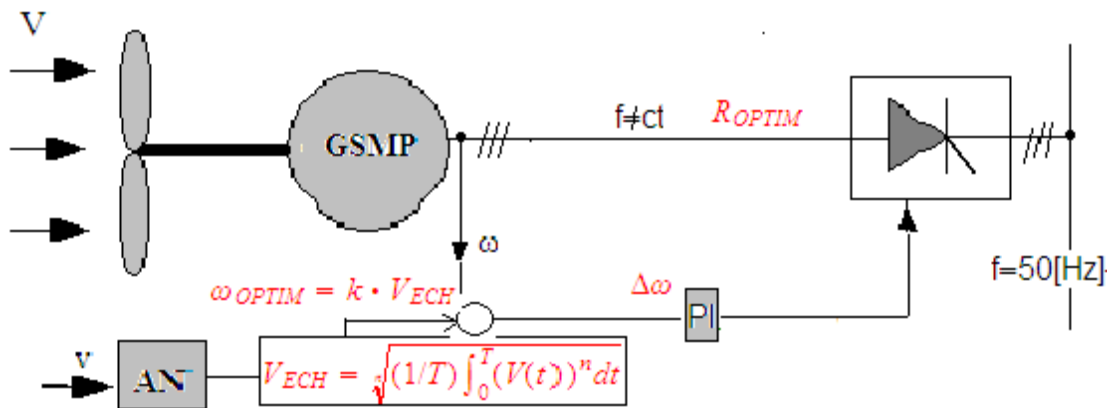


Fig.6.20. Conducerea sistemului TV+GSMP

Din simulările prezentate rezultă:

- 1) Determinarea VUM optime energetic este o problema complexa la viteze ale vântului variabile în timp;
- 2) Determinarea VUM optime nu se poate face doar prin cunoașterea valorii vitezei medii a vântului și se impune înregistrarea variației reale a vitezei vântului, adica cunoașterea funcției  $V(t)$ ;
- 3) În calculul valorii VUM optime intervin integralele vitezei vântului la puterile 4,5 și 6, integrale care se pot calcula relativ simplu, deoarece se cunoaște, din măsurători funcția  $V(t)$ .

## 6.8. Concluzii

S-au prezentat, în capitolul de față, metode originale pentru calculul energiei eoliene captate în condițiile în care viteza vântului variază semnificativ în timp.

Calculul energiei mecanice sau electrice obținute depinde esențial de valoarea vitezei unghiulare mecanice. Determinarea valorii turației la care energia este maximă devine o problemă complexă la viteze ale vântului variabile în timp.

Metoda cea mai rapidă constă dintr-o probă la funcționarea în gol și determinarea variației vitezei unghiulare mecanice în timp. Prin încărcarea generatorului electric la diferite valori de rezistență de sarcină se poate obține turația optimă și astfel energia obținută este maximă. Pe lângă metodele exacte s-au prezentat și metode aproximative de calcul, care însă introduc erori de până la 10%. S-a determinat legătura dintre viteza vântului și turația optimă la care trebuie să funcționeze sistemul, astfel încât energia eoliană captată să fie maximă.

Determinarea maximului energetic, deci a lui  $\omega_{OPTIM}$ , printr-o probă de funcționare în gol se poate realiza într-un timp foarte scurt, de ordinul minutelor, ceea ce este foarte important în aplicațiile în care viteza vântului variază semnificativ în timp. Se poate considera această metodă ca și esențială în conducerea optimală a sistemului eolian prin prescrierea VUM de referință:  $\omega_{ref} = \omega_{OPTIM}$ , deoarece realizează: -timpuri de răspuns cei mai mici și valori corecte pentru VUM optimă.

Metoda se bazează pe date certe experimentale și nu pe modele matematice care introduc erori și deci pierderi de energie. Prin cunoașterea valorii turației optime se poate regla încărcarea la generator astfel încât să se realizeze o funcționare la maximul energetic. Pe baza ecuației mișcării s-a determinat valoarea optimă pentru VUM,  $\omega_{OPTIM}$ , la variații ale vitezei vântului. S-a determinat și dependența lui  $\omega_{OPTIM}$  de viteza vântului. Prin măsurarea vitezei vântului se determină  $\omega_{OPTIM}$  și astfel se extrage maximul de energie mecanică la viteze ale vântului variabile în timp. Prin analiza mai multor cazuri s-au putut stabili mărimile de bază ce conduc la o funcționare optimă. Prin simulări s-a dedus turația optimă la generator, astfel încât să se obțină o energie maximă la o viteză a vântului variabilă în timp. În conducerea sistemului s-au dat metodele de calcul a turației de referință în funcție de viteza vântului, astfel încât să se obțină o energie maximă.



Principalele contribuții personale sunt:

- calcularea energiei mecanice maxime obținute la o viteză a vântului sinusoidală în timp, prin anularea derivatei funcției energiei:  $W(\omega)$ ;
- determinarea maximului puterii echivalente;
- analiza influenței valorii momentelor de timp discret, la care se măsoară viteza vântului;
- introducerea noțiunii de putere echivalentă și determinarea maximului acesteia;
- introducerea noțiunii de viteză echivalentă și calcularea acesteia prin intergrarea vitezei reale a vântului în timp;
- realizarea, pe baza acestei viteze echivalente, a unor sisteme de conducere optimale;
- prezentarea unor metode simplificate, liniarizate, de calcul a maximului energetic;
- determinarea maximului energetic prin calcularea valorii energiei obținute;
- determinarea maximului energetic prin măsurători la funcționarea în gol;
- determinarea maximului energetic prin încărcări successive la generatorul electric;
- analiza dinamicii sistemului eolian la încărcare optimă.

## 7. DINAMICA SISTEMULUI EOLIAN FUNCȚIONAND LA VITEZE ALE VÂNTULUI VARIABILE ÎN TIMP ȘI DETERMINAREA ZONEI OPTIMALE DIN PUNCT DE VEDERE ENERGETIC

În capitolul de față se face o analiză a dinamicii sistemelor eoliene funcționând la viteze ale vântului variabile în timp. Această analiză se bazează pe simulări numerice ce au la bază ecuația mișcării. Se folosesc modelele matematice uzuale pentru turbina de vânt, (TV) și generatorul sincron cu magneți permanenți, (GSMP). În prima parte a capitolului pe baza măsurării vitezei vântului și a turației la generator se definesc două mărimi fundamentale:

– viteza echivalentă a vântului,  $V_{ECH}$

și

– viteza unghiulară mecanică,  $VUM$ , optimă,  $\omega_{OPTIM}$ , aceasta din urmă fiind o funcție de  $V_{ECH}$ .

Prin analiza variației în timp a turației la generator se poate determina zona de funcționare optimă din punct de vedere energetic, caracterizată prin  $\omega_{OPTIM}$ . Viteza vântului fiind variabilă în timp  $\omega_{OPTIM}$  ia diverse valori, determinând și o reglare corespunzătoare a sarcinii la generator. A doua parte se referă la studiile privind funcționarea sistemului în punctele de putere maximă, MPP. Datorită inerțiilor mecanice mari funcționarea sistemului în punctele de putere maximă, MPP, este posibilă doar la variații mici ale vitezei vântului și deci la variații mari ale vitezei vântului se impune o nouă strategie bazată pe captarea unei energii maxime pe o durată lungă de timp. A treia parte cuprinde studiile efectuate pentru captarea unei energii maxime pe o durată lungă de timp la variații mari ale vitezei vântului.

Ultimul subcapitol prezintă concluziile finale cu privire la analiza rezultatelor studiilor de caz.

### 7.1. Prezentarea sistemelor de conducere performante ce asigură maximul de energie eoliană captată

Literatura de specialitate abundă în lucrări ce tratează funcționarea sistemelor eoliene [1-17], la viteza vântului constantă în timp. Funcționarea la viteze ale vântului variabile semnificativ în timp și în condiții energetice optime este foarte puțin tratată în literatură [1]. La viteze ale vântului variabile semnificativ în timp [4], cum este cazul real al României, determinarea MPP este o problemă complexă cu implicații majore în calitatea reglajului [2,4] și determinarea turației corespunzătoare energiei maxime.

Viteza vântului în domeniul exploatabil tehnico-economic este:  $V = 4 \div 25 [m/s]$  cu cele mai bune rezultate în intervalul:  $V = 12 \div 15 [m/s]$  [9].

Din cauza momentelor de inerție -  $J$  - foarte mari ale TV modificarea turației la generatorul sincron cu magneți permanenți, GSMP, este lentă și deci nu poate urmări variația rapidă în timp a vitezei vântului, așa cum ar fi necesar pentru a funcționa în MPP, [7], [1], [15]. Cum vitezele vântului sunt semnificativ variabile în timp se pune problema determinării turației corespunzătoare energiei maxime, astfel încât economic să se obțină un profit maxim pe locația unde se vor instala turbinele de vânt [2].

Sistemele de conducere performante trebuie să asigure maximul de energie eoliană captată pe un interval lung de timp. Conducerea sistemului, TV+GSMP, la putere maximă obținută de la generatorul electric duce la frânarea turbinei și mărirea artificială, pe moment, a puterii electrice din variațiile energiilor cinetice a maselor în mișcare de rotație, dar, în final, pe o perioadă lungă de timp, energia obținută este mai mică decât în cazul funcționării sistemului eolian la energia maximă [4]. Din acest motiv conducerea optimă a unui sistem eolian trebuie concepută în sensul obținerii energiei maxime la o viteză a vântului variabilă semnificativ în timp. Aceasta impune controlul  $VUM$  prin impunerea vitezei unghiulare mecanice de referință  $-\omega_{ref}$ , pe intervalul  $-\Delta t$  și, astfel, se extrage energia eoliană maximă disponibilă, la viteza vântului  $-V(t)$ .

Sistemul eolian funcționează optimal la maximum energetic, dacă TV captează o energie maxim posibilă pe un interval de timp dat de ordinul zilelor[7].

Datorită inerțiilor mecanice mari, simulările și toate celelalte rezultate teoretice și practice trebuie să aibe la bază intervale de timp de minimum câteva ore, (de regulă peste 10[h]). Sistemele electroenergetice eoliene de mare putere sunt conduse având în vedere viteza medie a vântului[8 ÷ 17], dar acestea nu realizează maximum energetic. Recent s-au propus și structuri de conducere bazate pe măsurarea vitezei momentane a vântului [1 ÷ 5] și folosind un model matematic adecvat pentru TV.

În lucrarea de față se tratează tocmai acest aspect: optimul energetic la viteze ale vântului variabile semnificativ în timp. Se determină valoarea vitezei unghiulare mecanice optime:  $\omega_{OPTIM}$ , la o viteză a vântului măsurată, [1-6], astfel încat energia obținută să fie maximă.

## 7.2. Studiul de caz

Se analizează ,în cele ce urmează un sistem eolian de putere:  $P_N = 22[kW]$  ,la viteze ale vântului variabile în timp într-un domeniu larg: 5-22[m/s].

### 7.2.1. Modelele matematice ale TV+GSMP

Pentru turbina de vânt de putere:  $P_N = 22[kW]$ , se dau de către firma constructoare, [14], caracteristicile experimentale ale puterii,  $P_{TV}(\omega, V)$  :

$$P_{TV}(\omega, V) = 23.584 \cdot ((V/\omega - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06(V/\omega - 0.0525)} \cdot V^3$$

unde :

$V$  – viteza vântului;

$\omega$  – viteza unghiulara mecanică, VUM

Valoarea maxima a funcției  $P_{TV}(\omega)$  se obține pentru VUM de referința  $\omega_{ref}$ , prin derivare :

$$\frac{dP_{TV}}{d\omega} = \frac{d}{d\omega}(23.584 \cdot ((V/\omega - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06(V/\omega - 0.0525)} \cdot V^3) = 0,$$

obținandu-se:

$$\omega_{ref} = 31.817 \cdot V$$

#### Precizare:

Rezultatul obținut este valabil la  $V = ct$ . În cazurile în care viteza vântului variază semnificativ în timp rezultatul obținut trebuie reanalizat.

Din datele de catalog [1] ale GSMP de putere:  $P_N = 22[kW]$  se obțin valorile:

$$R_1 = 1.6[\Omega], L_d = 0.07[H], L_q = 0.08[H], \Psi_{MP} = 3.3[Wb]$$

Din sistemul de ecuații ale GSMP:

$$\left\{ \begin{array}{l} -RI_d = 1.6I_d - \omega \cdot 0.08I_q \\ -RI_q = 1.6I_q + \omega \cdot 0.07I_d + \omega\Psi_M \\ M_G = -0.01I_dI_q + \Psi_MI_q \\ \Psi_M = 3.3 \\ P = R(I_d^2 + I_q^2) \end{array} \right.$$

se obțin:  
- puterea

$$P_{GSMP}(\omega, R) = 27225 \cdot R\omega^2 \frac{4.0\omega^2 + 625.0R^2 + 2000.0R + 1600.0}{(1250.0R^2 + 4000.0R + 3200.0 + 7.0\omega^2)^2} \text{ și}$$

- momentul

$$M_{GSMP}(\omega, R) = -5445.0\omega(5.0R + 8.0) \frac{4.0\omega^2 + 625.0R^2 + 2000.0R + 1600.0}{(1250.0R^2 + 4000.0R + 3200.0 + 7.0\omega^2)^2}$$

Cele doua funcții:  $P_{GSMP}(R, \omega)$  și  $M_{GSMP}(R, \omega)$  depind de :  $R$  – rezistența de sarcină și  $\omega$  – VUM.

## 7.2.2. Viteza vântului variabilă în timp

Puterea dată de TV depinde de  $V$  și  $\omega$ , fiind de forma

$$P_{TV}(V, \omega) = 23.584 \cdot (V/\omega - 2.1231 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06(V/\omega - 0.0525)} \cdot V^3$$

Puterea maximă, la  $V$  dat se obține prin anularea derivatei

$$\frac{dP_{TV}(\omega)}{d\omega} = \frac{d(23.584 \cdot (V/\omega - 2.1231 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06(V/\omega - 0.0525)} \cdot V^3)}{d\omega} = 0$$

sau

$$3.6135 \times 10V - 1.1357\omega = 0,$$

rezultând

$$\omega_{OPTIM} = 31.817 \cdot V$$

La o viteză  $V(t)$  descrescătoare în timp, cu  $e^{-t/3600}$ , figura 1, de formă sinusoidală de perioadă  $T = 35$  [s], se obține:

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

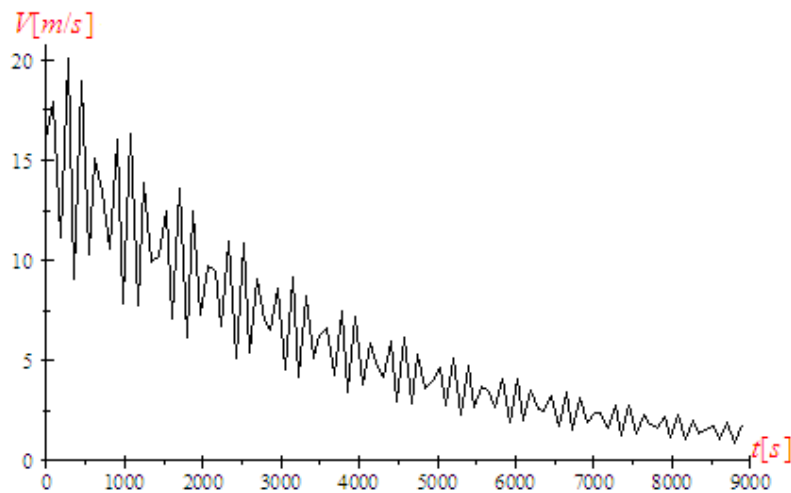


Fig.7.1. Variația vitezei vântului în timp

La această formă de variație a vitezei vântului se obține variația puterii turbinei în timp dată în figura 7.2.a.

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

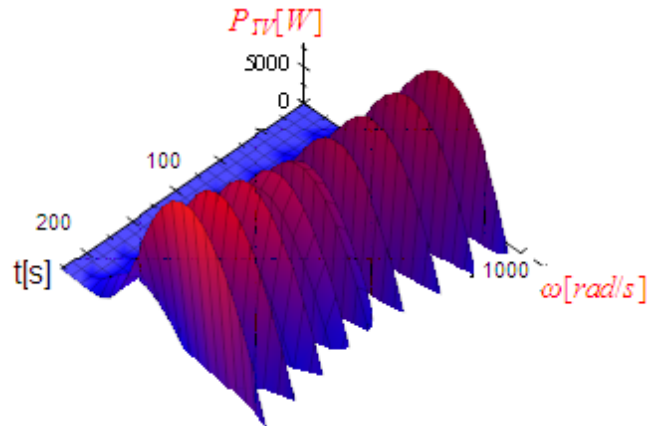


Fig.7.2.a.Variația puterii în timp

Asa cum se observă, din figurile 7.2.a. și 7.2.b, funcția  $P_{TV}(V, \omega)$  prezintă mai multe maxime.

La  $V = 18 [m/s]$  puterea are un maxim la  $\omega_{ref-1} = 572.73 [rad/s]$ , valoarea obținută din anularea derivatei funcției  $P_{TV}(\omega)$ .

$$P_{TV}(\omega) = 23.584 \cdot (((18))/\omega - 2.1231 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06(((18))/\omega - 0.0525)} \cdot ((18))^3$$

sau

$$\frac{d(23.584 \cdot (((18))/\omega - 2.1231 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06(((18))/\omega - 0.0525)} \cdot ((18))^3)}{d\omega} = 0 \quad \text{cu soluția:}$$

$$\omega_{ref-1} = 572.73 [rad/s]$$

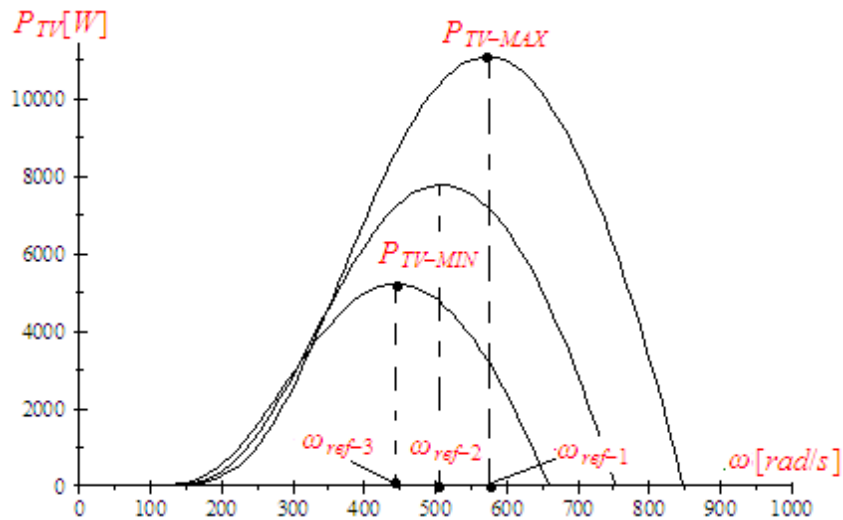


Fig.7.2.b. Dependența puterii de VUM,  $\omega$

În mod similar se obțin VUM optime:  $\omega_{ref-2} = 509.09 [rad/s]$  la  $V = 16 [m/s]$  și  $\omega_{ref-3} = 445.43 [rad/s]$  la  $V = 14 [m/s]$

Pentru ca punctul de funcționare sa se deplaseze din  $P_{TV-MAX}$  în  $P_{TV-MIN}$  în,aproximativ,17.5[s] este nevoie de un moment de valoare:  $M = 290.97 [Nm]$  obținut din ecuația mișcării

$$\left\{ J \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_{TV} \right.$$

unde:

$J$  – momentul de inerție echivalent

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} = 40 \cdot \frac{572.73 - 445.43}{17.5} = 290.97 [Nm],$$

Acest fapt este imposibil de realizat deoarece la TV momentul maxim are valoarea:

$$\begin{aligned} M_{TV-MAX} &= \left( 23.584 \cdot \left( \frac{((18))}{572.73 - 2.1231 \times 10^{-2}} \right) \cdot e^{-98.06 \left( \frac{((18))}{572.73 - 0.0525} \right)} \cdot \left( \frac{((18))}{572.73} \right)^3 \right) \\ &= 19.335 [Nm] \end{aligned}$$

Prin urmare,sistemul eolian neputând funcționa în MPP, se pune problema la ce VUM sa funcționeze pentru a capta o energie maximă. Prin calculul energiilor captate la diverse VUM se poate determina zona maximului energetic, așa cum se prezintă în continuare.

### 7.2.3.Determinarea vitezei unghiulare mecanice optime

Sistemul funcționează, la momentul  $t_k$ , la o VUM de valoare  $\omega(t_k) = ct$ , aproximativ constantă pe un interval scurt de timp.Se pune problema determinării valorii lui  $\omega(t_k)$ , astfel încat sistemul sa funcționeze mereu la un maxim energetic.

Considerând intervalul de timp, la care  $\omega(t_k) \approx ct$ , același cu perioada de oscilație a vitezei vântului  $T=35[s]$ , se obține valoarea energiei captate la diverse valori pentru  $\omega$ .

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

$$\left\{ \begin{array}{l} W(400) = 1.7993 \times 10^5 [J] - \text{la } \omega = 400. [rad/s] \\ W(450) = 2.2056 \times 10^5 [J] - \text{la } \omega = 450. [rad/s] \\ W(500.) = 2.4753 \times 10^5 [J] - \text{la } \omega = 500. [rad/s] \\ W(548.) = 2.5704 \times 10^5 [J] - \text{la } \omega = 548. [rad/s] \\ W(549.) = 2.5705 \times 10^5 [J] - \text{la } \omega = 549. [rad/s] \\ W(550.) = 2.5705 \times 10^5 [J] - \text{la } \omega = 550. [rad/s] - \text{maxim energetic} \\ W(551.) = 2.5705 \times 10^5 [J] - \text{la } \omega = 551. [rad/s] \\ W(555.) = 2.5696 \times 10^5 [J] - \text{la } \omega = 555. [rad/s] \\ W(560.) = 2.5667 \times 10^5 [J] - \text{la } \omega = 560. [rad/s] \\ W(600.) = 2.4725 \times 10^5 [J] - \text{la } \omega = 600. [rad/s] \\ W(650.) = 2.1772 \times 10^5 [J] - \text{la } \omega = 650. [rad/s] \end{array} \right.$$

Așa cum se observă, din rezultatele de mai sus, maximul energetic, la  $t=0$ , se obține la:

$$\omega_{OPTIM-1} = 550 [rad/s]$$

Prin măsurarea VUM, la o funcționare în gol, se poate deduce și prin altă metoda valoarea lui  $\omega_{OPTIM}$ .

### Verificare prin măsurarea VUM

Ecuția mișcării la TV+G, la funcționare în gol, la  $V(t) = (16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600}$  devine:

$$\left\{ \begin{array}{l} 40 \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} = \left( \begin{array}{l} 23.584 \cdot (((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600})/\omega - 2.1231 \times 10^{-2}) \cdot \\ e^{-98.06(((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600})/\omega - 0.0525)} \cdot ((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600})^3 \end{array} \right) \\ \omega(0) = 450 \end{array} \right.$$

și permite vizualizarea evoluției în timp a VUM, figura 7.3

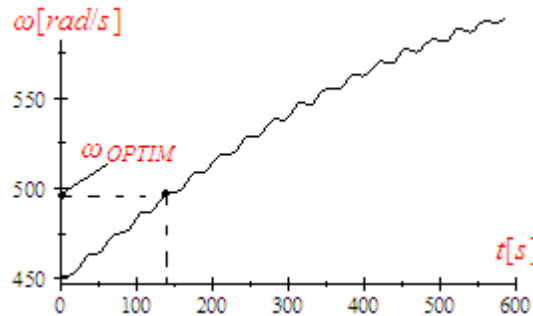


Fig.7.3.Variația în timp a VUM.

La momentele de timp  $t = 70, 140, \dots, 560$  [s] se obțin VUM :  $\omega(70), \omega(140), \dots, \omega(560)$  și puterea turbinei rezultă din :

$$P_{TV-ECH}(t) = J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2) / (2\Delta t)$$

unde:

$J$  – momentul de inerție echivalent;

$\omega_k$  – VUM la momentul  $t_k$  ;

$\omega_{k-1}$  – VUM la momentul  $t_{k-1}$  .

$$\omega(70) = 474.03 [\text{rad/s}]$$

$$P_{TV-ECH}(70) = 40 \cdot (474.03^2 - 450^2) / (140) = 6344.1 [\text{W}]$$

$$\omega(140) = 497.13 [\text{rad/s}]$$

$$P_{TV-ECH}(140) = 40 \cdot (497.13^2 - 474.03^2) / (140) = 6409.7 [\text{W}]$$

$$\omega(210) = 518.68 [\text{rad/s}]$$

$$P_{TV-ECH}(210) = 40 \cdot (518.68^2 - 497.13^2) / (140) = 6254.5 [\text{W}]$$

$$\omega(280) = 538.24 [\text{rad/s}]$$

$$P_{TV-ECH}(280) = 40 \cdot (538.24^2 - 518.68^2) / (140) = 5906.7 [\text{W}]$$

$$\omega(350) = 555.54 [\text{rad/s}]$$

$$P_{TV-ECH}(350) = 40 \cdot (555.54^2 - 538.24^2) / (140) = 5406.4 [\text{W}]$$

$$\omega = 570.49 [\text{rad/s}]$$

$$P_{TV-ECH}(420) = 40 \cdot (570.49^2 - 555.54^2) / (140) = 4809.8 [\text{W}]$$

$$\omega(490) = 583.09 [\text{rad/s}]$$

$$P_{TV-ECH}(490) = 40 \cdot (583.09^2 - 570.49^2)/(140) = 4152.9[W]$$

$$\omega(560) = 593.46[rad/s]$$

$$P_{TV-ECH}(560) = 40 \cdot (593.46^2 - 583.09^2)/(140) = 3485.9[W]$$

Se obține puterea maximă,  $P_{TV-ECH}(140) = 6409.7[W]$ , la  $\omega_{OPTIM-2} = \omega(140) = 497.13[rad/s]$  și la timpul  $t=140[s]$ .

La acest moment de timp,  $t=140[s]$ ,  $\omega_{OPTIM} = 31.817 \cdot V$ , calculat cu viteza medie,  $V_{MEDIU}$

$$V = V_{MEDIU} = 16e^{-t/3600} = 16e^{-140./3600} = 15.39[m/s]$$

are valoarea:

$$\omega_{OPTIM-3} = 31.817 \cdot 15.39 = 489.66[rad/s]$$

Diferențele ce apar între cele trei valori :

$\omega_{OPTIM-1} = 550[rad/s]$ ,  $\omega_{OPTIM-2} = 497.13[rad/s]$  și  $\omega_{OPTIM-3} = 489.66[rad/s]$  se motivează prin :

1) momentele de timp, la care s-au estimat  $\omega_{OPTIM}$ , sunt diferite  $t=0$ , respectiv  $t=140[s]$ ;

2) metodele de estimare sunt diferite : prin integrarea puterii  $P_{TV}$  sau din calculul variațiilor energiilor cinetice  $P_{TV-ECH}$ .

#### 7.2.4. Viteza și puterea echivalentă

Definind o viteză echivalentă a vântului,  $V_{ECH}$ , pe baza lui  $\omega_{OPTIM}$ , de forma:

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

și folosind dependența dintre  $\omega_{OPTIM}$  și  $V(t)$  obținută anterior:

$$\omega_{OPTIM} = 31.817 \cdot V$$

sau

$$550 = 31.817 \cdot V_{ECH} = 31.817 \cdot \sqrt[N]{\frac{1}{T} \int_{t_k}^{t_k+T} ((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600})^N dt},$$

la  $t=0$  rezultă

$$550 = 31.817 \cdot \sqrt[N]{\frac{1}{35} \int_0^{35} ((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600})^N dt}$$

și se obține valoarea lui  $N=3.78$ .

În concluzie,  $\omega_{OPTIM}$  la momentul  $t_k$  se calculează astfel:

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

1) se determină



$$V_{ECH} = \sqrt[3.78]{\frac{1}{35} \int_{t_k}^{t_k+T} ((16 - 6 \sin(0.17943t)) e^{-t/3600})^{3.78} dt}$$

2) se determină

$$\omega_{OPTIM} = 31.817 \cdot V_{ECH} = 31.817 \cdot \sqrt[3.78]{\frac{1}{35} \int_{t_k}^{t_k+T} ((16 - 6 \sin(0.17943t)) e^{-t/3600})^{3.78} dt}$$

Vitezele echivalente la  $t=0,100,3000,6000$  și  $9000[s]$  au valorile:

$$V_{ECH}(0) = 17.298, V_{ECH}(1000) = 13.148 [m/s], V_{ECH}(3000) = 7.537 [m/s],$$

$$V_{ECH}(6000) = 3.2755 [m/s], V_{ECH}(9000) = 1.420 [m/s]$$

Diferența dintre vitezele echivalente  $V_{ECH}$  și viteza medie  $V_{MEDIU} = (16) e^{-t/3600}$  este sub 9% , așa cum se observă și din figura 7.4.

$$V_{ECH}(t) = 2.2325 \times 10^{-7} t^2 - 3.6985 \times 10^{-3} t + 16.623$$

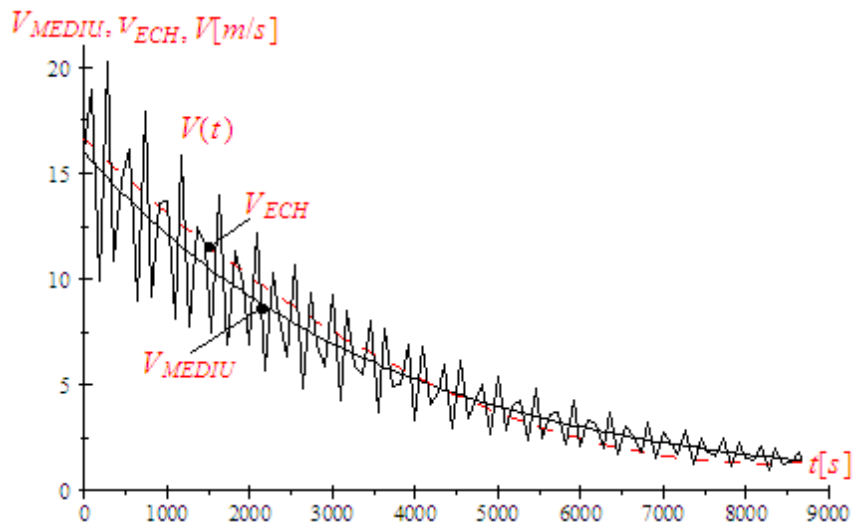


Fig.7.4.Variațiile în timp a vitezelor  $V(t)$ ,  $V_{ECH}$  și  $V_{MEDIU}$

Variația vitezei unghiulare optime,  $\omega_{OPTIM}$ , în timp este dată în figura 7. 5.

$$\omega_{OPTIM} = 31.817 \cdot V_{ECH} = 31.817 \cdot (2.2325 \times 10^{-7} t^2 - 3.6985 \times 10^{-3} t + 16.623) =$$

$$(7.1031 \times 10^{-6} t^2 - 0.11768t + 528.89)$$

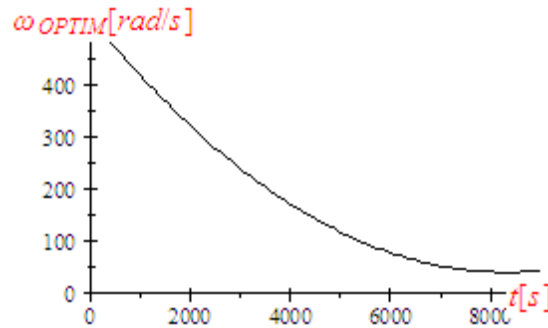


Fig.7.5.Variația în timp a lui  $\omega_{OPTIM}$

La o funcționare optimă din punct de vedere energetic, puterea dată de TV are valoarea:

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

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

Variația în timp a lui  $P_{TV}$  este dată în figurile 7.6.a și 7.6.b.

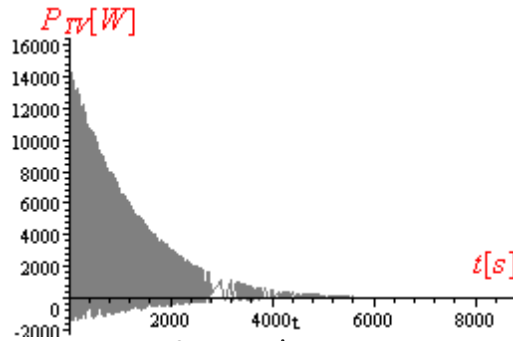


Fig. 7.6.a. Variația în timp a puterii

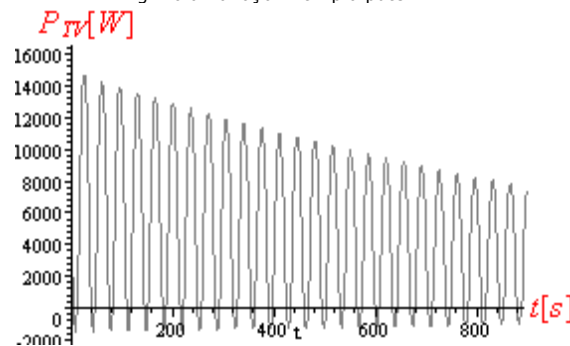


Fig. 7.6.b. Variația în timp a puterii (detaliu).

Considerând o dependență liniară a randamentului sistemului de putere și din egalitatea puterilor la turbina și generator rezultă:

$$P_{TV-MEDIU} \cdot \frac{0.9P_{TV-MEDIU}}{P_{TV-MAX}} = M_{GSMP} \cdot \omega$$

și cu

$$P_{TV-MAX} = \frac{1}{35} \int_0^{35} \left( \frac{23.584 \cdot (((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600}) / (528.89) - 2.1231 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06 \left( \frac{((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600})}{528.89 - 0.0525} \right)} \cdot ((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600})^3}{1} \right) dt$$

$$= 7061.5 [W]$$

→ se obține variația în timp a rezistenței de sarcină, considerând că momentul generatorului depinde liniar de  $\omega$ , sub forma:

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

Puterea la generator fiind:

$$P_{TV-MEDIU} \cdot \frac{0.9P_{TV-MEDIU}}{P_{TV-MAX}} \simeq 7.0263 \cdot \omega^2 / R$$

se obține

$$R = 7.807 \frac{\omega^2 P_{TV-MAX}}{P_{TV-MEDIU}^2}$$

La o funcționare la  $\omega_{OPTIM}$  rezultă:

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

sau

$$R = \frac{(7.1031 \times 10^{-6} t^2 - 0.11768 t + 528.89)^2 \cdot 55129}{\left( \begin{array}{l} 23.584 \cdot \left( (16) e^{-t/3600} \right) \cdot (7.1031 \times 10^{-6} t^2 - 0.11768 t + 528.89) - 2.1231 \times 10^{-2} \\ e^{-98.06 \left( (16) e^{-t/3600} \right) \cdot (7.1031 \times 10^{-6} t^2 - 0.11768 t + 528.89) - 0.0525} \cdot \left( (16) e^{-t/3600} \right)^3 \end{array} \right)^2}$$

În figurile 7.7.a și 7.7.b s-au reprezentat variațiile în timp ale lui R

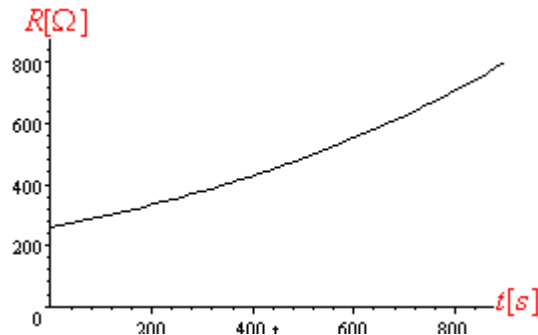


Fig. 7.7.a. Variația în timp a rezistenței de sarcină (detaliu)

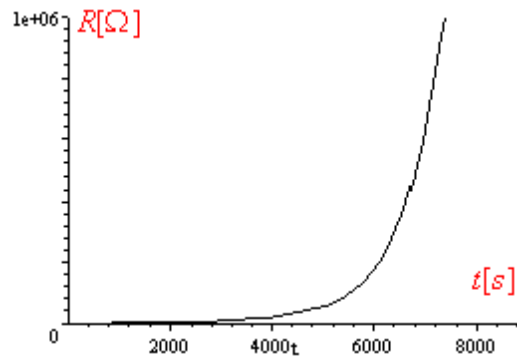


Fig. 7.7.b. Variația în timp a rezistenței de sarcină

La  $t=0$  se obține momentul mediu al TV, la  $\omega = 552.95 [\text{rad} / \text{s}]$ , de valoare:

$$M_{TV} = 12.831 [\text{Nm}]$$

Din egalitatea momentelor la TV și GSMP se obține valoarea rezistenței de sarcină de la generator,  $R(0) = 464.55 [\Omega]$ , mărime inițială în ecuația mișcării.

$$\begin{cases} 12.831 = 5445.0 \omega (5.R + 8.) \frac{4.0 \omega^2 + 625.0 R^2 + 2000.0 R + 1600.}{(1250.R^2 + 4000.R + 3200. + 7.\omega^2)^2} \\ \omega = 552.95 \end{cases}$$

Soluția:

$$\begin{cases} R = 464.55, \\ \omega = 552.95 \end{cases}$$

Ecuția mișcării la TV+G

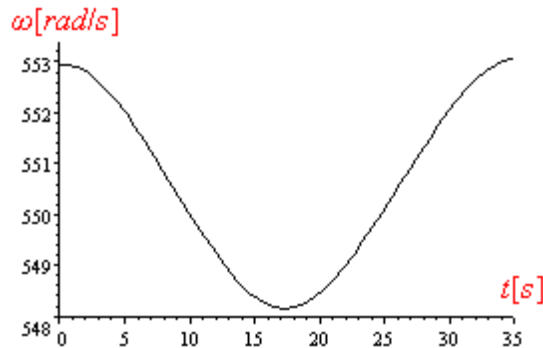
$$\left\{ 40 \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_{TV} - M_G \right.$$

sau

$$\left\{ 40 \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} = \left( \begin{array}{l} 23.584 \cdot (((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600})/\omega - 2.1231 \times 10^{-2}) \cdot \\ e^{-98.06(((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600})/\omega - 0.0525)} \cdot ((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600})^3 \\ -5445.0\omega^2(5 \cdot 464.55 + 8.) - \frac{4.0\omega^2 + 625 \cdot 464.55^2 + 2000 \cdot 464.55 + 1600.}{(1250 \cdot 464.55^2 + 4000 \cdot 464.55 + 3200 \cdot 7 \cdot \omega^2)^2} \end{array} \right) \right.$$

$$\omega(0) = 552.95$$

permite vizualizarea evoluției în timp a VUM , figura 7.8.

Fig.7.8.Variația în timp a lui  $\omega$ 

La  $t=35[s]$  VUM, calculată din ecuația mișcării, sub forma:

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

are valoarea  $\omega(35) = 553.05 [rad / s]$  și integrând, pe durata  $T=35[s]$ , ecuația mișcării se obține:

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

de unde rezultă energia preluată de generator

$$\int_0^{35} (M_G \cdot \omega) dt = \int_0^{35} (P_{TV}) dt - 4424.$$

$$\int_0^{35} (M_G \cdot \omega) dt = \int_0^{35} \left( \begin{array}{l} 23.584 \cdot (((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600})/550.5 - 2.1231 \times 10^{-2}) \cdot \\ e^{-98.06(((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600})/550.5 - 0.0525)} \cdot ((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600})^3 \end{array} \right) dt$$

sau

$$-4424. = 2.4399 \times 10^5 [J]$$

Aceeași valoare a energiei se obține și pentru o viteză echivalentă denumită  $V_{ECH-PUTERE}$ .

Valoarea  $V_{ECH-PUTERE} = 15.884e^{-t/3600} [m / s]$  se determină din ecuația:

$$\int_0^{35} \left( \begin{array}{l} 23.584 \cdot ((V_{ECH-PUTERE})/550.5 - 2.1231 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06((V_{ECH-PUTERE})/550.5 - 0.0525)} \cdot \\ (V_{ECH-PUTERE})^3 \end{array} \right) dt -$$

$$4424. = 2.4399 \times 10^5$$

Viteza echivalentă a vântului,  $V_{ECH-PUTERE}$ , are o valoare apropiată vitezei medii:

$$V_{MEDIU} = \frac{1}{35} \int_0^{35} ((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600}) dt = 15.913[m/s]$$

Cu  $V_{ECH-PUTERE}$  se definește puterea echivalentă  $P_{TV-ECH}(t)$ :

$$P_{TV-ECH}(t) = 23.584 \cdot ((15.884e^{-t/3600}) / (7.1031 \times 10^{-6}t^2 - 0.11768t + 528.89) - 2.1231 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06((15.884e^{-t/3600}) / (7.1031 \times 10^{-6}t^2 - 0.11768t + 528.89) - 0.0525)} \cdot ((15.884)e^{-t/3600})^3$$

Puteriile reale  $P_{TV-REAL}(t)$ :

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

și echivalente  $P_{TV-ECH}(t)$  sunt reprezentate în figura 7.9

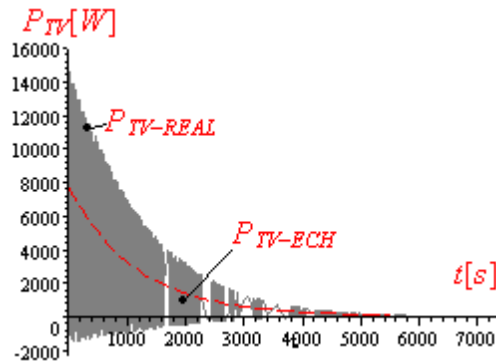


Fig.7.9.Variația puterilor în timp

Evoluțiile în timp a VUM, date în figurile 7.10.a.si 7.10.b, considerând viteza reală:

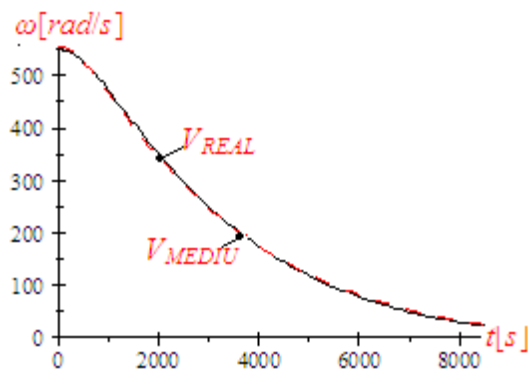
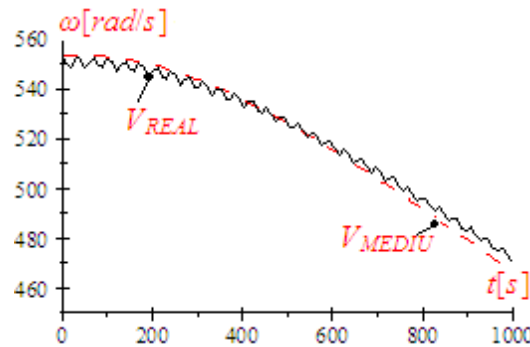
$$V_{REAL}(t) = V(t) = (16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600}.$$

și cea echivalentă

$$V_{ECH}(t) \simeq V_{MEDIU}(t) \simeq 16e^{-t/3600}.$$

se obțin cu ecuația mișcării:

$$\left. \begin{aligned}
 40 \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} &= 23.584 \cdot \left( \frac{((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600})}{2.1231 \times 10^{-2}} \right) \cdot \omega - \\
 &e^{-98.06 \left( \frac{((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600})}{\omega - 0.0525} \right)} \cdot \left( (16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600} \right)^3 - \\
 5445.0 \omega^2 (5 \cdot 464.55 + 8) &\frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot 464.55^2 + 2000 \cdot 464.55 + 1600}{(1250 \cdot 464.55^2 + 4000 \cdot 464.55 + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2} \\
 40 \cdot a \cdot \frac{da}{dt} &= 23.584 \cdot \left( \frac{(16e^{-t/3600})}{a - 2.1231 \times 10^{-2}} \right) \cdot \\
 &e^{-98.06 \left( \frac{(16e^{-t/3600})}{a - 0.0525} \right)} \cdot (16e^{-t/3600})^3 - \\
 5445.0 a^2 (5 \cdot 464.55 + 8) &\frac{4 \cdot a^2 + 625 \cdot 464.55^2 + 2000 \cdot 464.55 + 1600}{(1250 \cdot 464.55^2 + 4000 \cdot 464.55 + 3200 + 7 \cdot a^2)^2} \\
 \omega(0) &= 552.95 \\
 a(0) &= 552.95
 \end{aligned} \right\}$$

Fig.7.10.a.Variația în timp a lui  $\omega$  la  $V_{MEDIU}$  și  $V_{REAL}$ Fig.7.10.b.Variația în timp a lui  $\omega$  la  $V_{MEDIU}$  și  $V_{REAL}$  (detaliu)

La  $t=999[s]$  VUM calculată cu  $V_{MEDIU}$  are valoarea  $\omega_1(999) = 466.75[rad/s]$ , iar cea calculată cu  $V_{REAL}$  este  $\omega_2(999) = 470.31[rad/s]$ , diferențele între cele 2 cazuri fiind reduse: 0,8% .

Din simularile prezentate rezultă:

- 1) Determinarea VUM optime energetic este o problema complexă la viteze ale vântului variabile în timp;
- 2) Determinarea VUM optime nu se poate face doar prin cunoașterea valorii vitezei medii a vântului și se impune înregistrarea variației reale a vitezei vântului, adică cunoașterea funcției  $V(t)$ ;

- 3) În calculul valorii VUM optime intervin integralele vitezei vântului la puterile 4,5 și 6, integrale care se pot calcula relativ simplu, deoarece se cunoaște, din măsuratori funcția  $V(t)$ ;

### 7.2.5. Determinarea experimentală a zonei optime energetice

Din ecuația mișcării la funcționarea în gol

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_{TV}$$

prin înmulțire cu  $\omega$  se obține:

$$J \cdot \omega \frac{d\omega}{dt} = M_{TV} \cdot \omega = P_{TV}$$

unde:

$J$  – momentul de inerție echivalent

$M_{TV}$  -momentul TV

$P_{TV}$  -puterea TV.

Pornind sistemul în gol și măsurând în timp VUM ,  $\omega$ , iar în simulări prin rezolvarea ecuației mișcării:

$$\left\{ \begin{array}{l} 40 \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot (((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600})/\omega - 2.1231 \times 10^{-2}) \cdot \\ e^{-98.06(((16-6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600})/\omega - 0.0525)} \cdot ((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600})^3 \\ \omega(0) = 333 \end{array} \right.$$

se poate determina zona puterii maxime dată de TV, la valoarea maximă a produsului  $\omega \cdot \frac{d\omega}{dt}$ , care este și valoarea maximă a puterii, așa ca în figura 7.11.

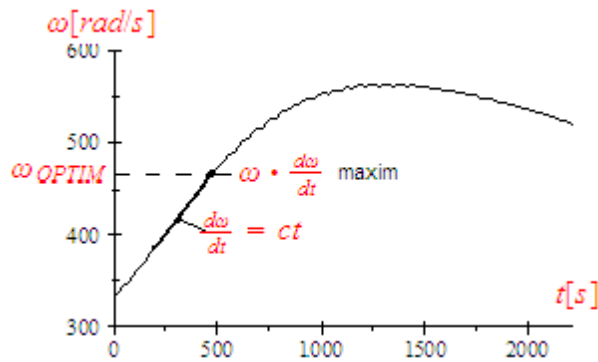


Fig.7.11.Variația în timp a lui  $\omega$  și zona de optim

Cunoașterea lui  $\omega_{OPTIM}$ , la o anumită forma de variație în timp a vitezei vântului este fundamentală în orice sistem de conducere.

Pentru determinarea lui  $\omega_{OPTIM}$ , așa cum s-a precizat, se folosesc doar măsurători ale vântului și turației la TV, deci în această etapă, generatorul este în gol

Pentru realizarea egalității  $\omega = \omega_{OPTIM}$ , însă, este necesar a se încărca generatorul cu o sarcină de valoare bine precizată și realizată prin intermediul reguletoarelor ce comandă unghiul de aprindere al tiristoarelor convertoarelor de putere interpusse între generator și rețea.

### 7.2.6. Dinamica sistemului la diferite încărcări

Pentru două valori ale rezistenței de sarcină :  $R = 464.55[\Omega]$  și  $R = 264.55[\Omega]$  ,cu ecuația mișcării:

$$\left\{ \begin{array}{l} 40 \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left( \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) e^{-t/3600} \right) / \omega - 2.1231 \times 10^{-2} \right) \cdot \\ e^{-98.06 \left( \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) e^{-t/3600} \right) / \omega - 0.0525 \right)} \\ \cdot \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) e^{-t/3600} \right)^3 - 5445.0 \omega^2 \\ (5 \cdot 464.55 + 8) \cdot \frac{4.0\omega^2 + 625 \cdot 464.55^2 + 2000 \cdot 464.55 + 1600}{(1250 \cdot 464.55^2 + 4000 \cdot 464.55 + 3200 \cdot 7 \cdot \omega^2)^2} \\ 40 \cdot a \cdot \frac{da}{dt} = 23.584 \cdot \left( \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) e^{-t/3600} \right) / a - 2.1231 \times 10^{-2} \right) \cdot \\ e^{-98.06 \left( \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) e^{-t/3600} \right) / a - 0.0525 \right)} \\ \cdot \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) e^{-t/3600} \right)^3 - 5445.0 a^2 \\ (5 \cdot 264.55 + 8) \cdot \frac{4.0a^2 + 625 \cdot 264.55^2 + 2000 \cdot 264.55 + 1600}{(1250 \cdot 264.55^2 + 4000 \cdot 264.55 + 3200 \cdot 7 \cdot a^2)^2} \\ \omega(0) = 552.95 \\ a(0) = 552.95 \end{array} \right.$$

se obține vizualizarea în timp a VUM :

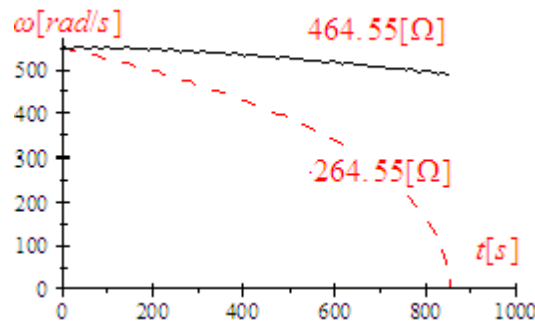


Fig.7.12.Variația în timp a lui  $\omega$

În cazul  $R_1 = 464.55[\Omega]$  energia electrică obținută,  $W_e$ , în intervalul de timp  $\Delta t = 8888[s]$ , cât funcționează sistemul, are valoarea  $W_{e-1}(8888) = 1.4241 \times 10^7 [J]$  , obținută din putere:

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

sau

$$27225 \cdot R \omega^2 \frac{4.0\omega^2 + 625 \cdot 0R^2 + 2000 \cdot 0R + 1600 \cdot 0}{(1250 \cdot 0R^2 + 4000 \cdot 0R + 3200 \cdot 0 + 7 \cdot 0\omega^2)^2} = \frac{dW_e}{dt}$$

La  $R_2 = 264.55[\Omega]$  energia electrică obținută, prin rezolvarea ecuației mișcării:



$$\left\{ \begin{array}{l} 40 \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left( \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) e^{-t/3600} \right) / \omega - 2.1231 \times 10^{-2} \right) \cdot \\ e^{-98.06 \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) e^{-t/3600} / \omega - 0.0525 \right)} \\ \cdot \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) e^{-t/3600} \right)^3 - 5445.0 \omega^2 (5 \cdot 464.55 + 8) \cdot \\ \frac{4.0\omega^2 + 625 \cdot 464.55^2 + 2000 \cdot 464.55 + 1600}{(1250 \cdot 464.55^2 + 4000 \cdot 464.55 + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2} \\ \frac{dW}{dt} = 27225 \cdot 264.55 \omega^2 \frac{4.0\omega^2 + 625 \cdot 0.264.55^2 + 2000 \cdot 0.264.55 + 1600.0}{(1250 \cdot 0.264.55^2 + 4000 \cdot 0.264.55 + 3200.0 + 7 \cdot 0\omega^2)^2} \\ \omega(0) = 552.95 \\ W(0) = 0 \end{array} \right.$$

într-un timp  $t=830$ [s], este  $W_{e-2}(830) = 9.0079 \times 10^6$  [J]. La  $t=830$ [s] turația TV devine nulă și deci nu se mai captează energie.

Diferențele între cele două cazuri,  $W_{e-1}(8888)$ , la  $R_1 = 464.55$  [Ω] și  $W_{e-2}(830)$  la  $R_2 = 264.55$  [Ω], sunt mari 36.747%.

Prin urmare, încărcarea generatorului, în funcție de variația vitezei vântului în timp, dictează valoarea energiei captate.

Considerând și cazurile:

$$R_3 = 564.55 \text{ [}\Omega\text{]}, \text{ cu } W(8888.) = 1.3619 \times 10^7 \text{ [J]}$$

$$R_4 = 364.55 \text{ [}\Omega\text{]}, \text{ cu } W(8888.) = 1.4325 \times 10^7 \text{ [J]}$$

$$R_5 = 304.55 \text{ [}\Omega\text{]}, \text{ cu } W(8888.) = 1.3726 \times 10^7 \text{ [J]}$$

$$R_6 = R(t) = (t + 464.) \text{ cu } W(8888.) = 7.2158 \times 10^6 \text{ [J]}$$

$$R_7 = R(t) = 464 + \left( \frac{100}{8888.} \right)^3 t^3 \text{ cu } W(8888.) = 5.5788 \times 10^6 \text{ [J]}$$

se poate concluziona că la o valoare constantă a sarcinii  $R_4 = 364.55$  [Ω] se obține energia maximă  $W_{e-4}(8888) = 1.4325 \times 10^7$  [J].

### 7.2.7. Variațiile în timp ale puterilor

La  $R_4 = 364.55$  [Ω] prin rezolvarea ecuației mișcării:

$$\left\{ \begin{array}{l} 40 \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left( \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) e^{-t/3600} \right) / \omega - 2.1231 \times 10^{-2} \right) \cdot \\ e^{-98.06 \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) e^{-t/3600} / \omega - 0.0525 \right)} \\ \cdot \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) e^{-t/3600} \right)^3 - 5445.0 \omega^2 \\ (5 \cdot 364.55 + 8) \cdot \frac{4.0\omega^2 + 625 \cdot 364.55^2 + 2000 \cdot 364.55 + 1600}{(1250 \cdot 364.55^2 + 4000 \cdot 364.55 + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2} \\ \frac{dW}{dt} = 9.9249 \times 10^6 \omega^2 \frac{4.0\omega^2 + 8.3791 \times 10^7}{(7.0\omega^2 + 1.6758 \times 10^8)^2} \\ \omega(0) = 552.95 \\ W(0) = 0 \end{array} \right.$$

se obține variația în timp a lui  $\omega$ , dată în figura:

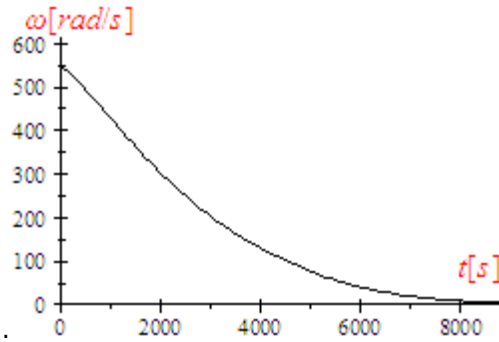


Fig.7.13.Variația în timp a lui  $\omega$  la  $R_4 = 364.55 [\Omega]$

Analizând variația în timp a lui  $\omega$ , din figura 13 se poate determina funcția  $\omega(t)$  sub forma:

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

Puterea dată de TV, la această formă de variație în timp a lui  $\omega$ , este:

$$P_{TV}(t) = 23.584 \cdot \left( \frac{((16 - 6\sin(0.17943t))e^{-t/3600})}{(9.4553 \times 10^{-6} t^2 - 0.14357t + 552.95) - 2.1231 \times 10^{-2}} \right) \cdot e^{-98.06((16 - 6\sin(0.17943t))e^{-t/3600}) / (9.4553 \times 10^{-6} t^2 - 0.14357t + 552.95) - 0.0525} \cdot ((16 - 6\sin(0.17943t))e^{-t/3600})^3$$

În mod similar se obține și puterea debitată de generator:

$$P_{GSMP}(t) = 9.9249 \times 10^6 \frac{4.0(9.4553 \times 10^{-6} t^2 - 0.14357t + 552.95)^2 + 8.3791 \times 10^7}{(7.0(9.4553 \times 10^{-6} t^2 - 0.14357t + 552.95)^2 + 1.6758 \times 10^8)^2}$$

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

În figura 7.14 sunt date variațiile în timp ale puterilor date de turbină și generator:

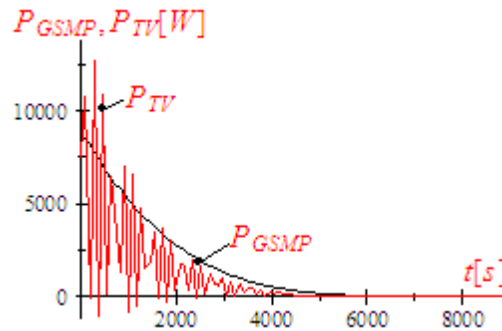


Fig.7.14.Variația în timp a puterilor

Oscilațiile mari ale puterii la TV,  $P_{TV}(t)$  nu se regasesc în puterea la generator  $P_{GSMP}(t)$ , aceasta datorită inerției mecanice mari a sistemului  $J = 40 [kg \cdot m^2]$ . În acest caz inerția mecanică este utilă în atenuarea oscilațiilor de putere.

### 7.2.8. Conducerea optimă a sistemului eolian funcționând la viteze ale vântului variabile în timp

Sistemele de conducere performante trebuie să asigure maximul de energie eoliană captată pe un interval lung de timp.

Conducerea sistemului (TV+GSMP) la putere maximă obținută de la generatorul electric duce la frânarea turbinei și mărirea artificială, pe moment, a puterii electrice din variațiile energiilor cinetice a maselor în mișcare de rotație, dar, în final, pe o perioadă lungă de timp, energia obținută este mai mică decât în cazul conducerii sistemului la energie maximă.

Conducerea sistemului la energie maximă obținută de la generatorul electric este o soluție corectă din punct de vedere tehnico-economic și aceasta impune estimarea unor mărimi fundamentale dependente de viteza vântului, ca de exemplu: turația TV, curentul sau rezistența de sarcină la GSMP, variația vitezei unghiulare optime,  $\omega_{OPTIM}$ .

Energia eoliană maximă disponibilă, la viteza vântului  $V(t)$ , pe intervalul  $-\Delta t$  se extrage prin impunerea turației/vitezei unghiulare optime,  $\omega_{OPTIM}$ .

Funcționarea la turație /viteză unghiulară ( $\omega$ ) optimă se realizează prin estimarea vitezei vântului cu anemometru -AN- și calcularea lui  $\omega_{OPTIM}$ , figura 7.15.

Cu ajutorul controlerului se asigură viteza unghiulară prescrisă -  $\omega_{OPTIM}$  -, însă acordarea acestui regulator este o problemă, mai ales că viteza vântului este imprevizibilă în timp.

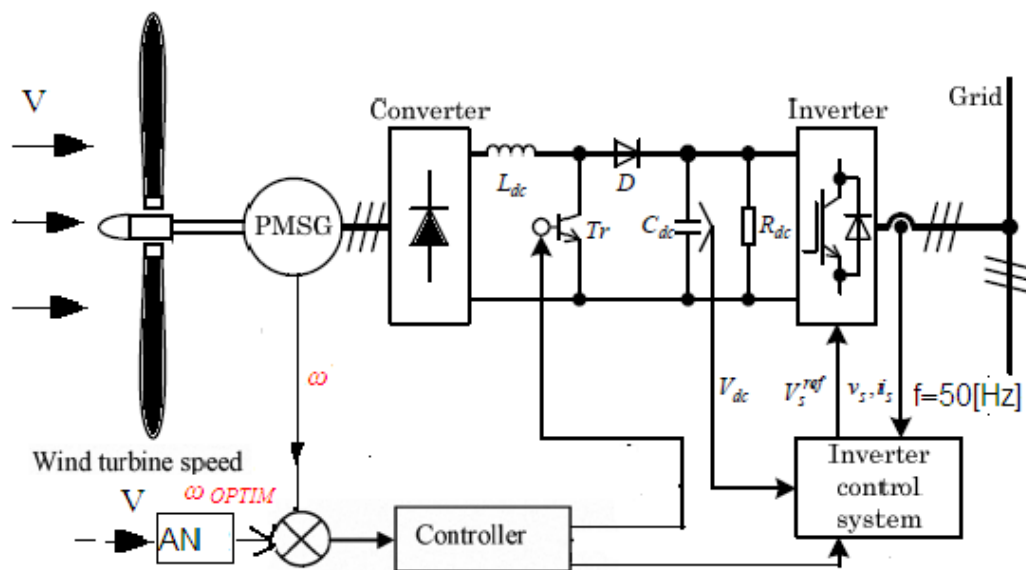


Fig.7.15. Conducerea optimă a sistemului

Calculul vitezei unghiulare optime,  $\omega_{OPTIM}$ , se face prin măsurarea vitezei vântului cu anemometrul AN. Prin măsurarea VUM- ( $\omega$ ), de la arborele GSMP se calculează diferența  $\Delta\omega = \omega_{OPTIM} - \omega$ , diferență ce constituie mărime de intrare în regulator.

Regulatorul modifică încărcarea la GSMP prin modificarea unghiului de conducție al tiristoarelor convertorului ce preia energia de la generator.

La  $\omega = \omega_{OPTIM}$  se realizează o captare maximă a energiei eoliene pe un anumit interval de timp.

### 7.3. Determinarea puterii maxime prin măsurători de turație și putere la GSMP la viteze ale vântului variabile în timp

Determinarea  $P_{ECH}$  se bazează pe măsurători de turație și putere la GSMP și aflarea maximului funcției  $P_{TV}(\omega)$ . În acest punct derivata puterii echivalente este nulă. Pe baza puterii echivalente se poate determina valoarea turației, la care energia captată este maximă. Aceasta constituie problema fundamentală în orice sistem de conducere performant. Conducerea optimă a unui sistem eolian presupune extragerea, (captarea), unei energii maxime la o viteză a vântului variabilă semnificativ în timp.

Aceasta impune controlul turației și cuplului la turbină și adaptarea sarcinii generatorului la viteza vântului. Determinarea turației corespunzătoare energiei maxime date de turbina de vânt, (TV), este obiectivul principal al acestei lucrări. Prin simulări se verifică metoda dată, considerând viteza vântului variabilă în timp.

#### 7.3.1. Studiu de caz

Din datele de catalog [1] ale GSMP de putere:  $P_N = 5[kW]$  se obțin valorile:

$$R_l = 1.6[\Omega], L_d = 0.07[H], L_q = 0.08[H], \Psi_{MP} = 3.3[Wb]$$

Din sistemul de ecuații ale GSMP:

$$\left\{ \begin{array}{l} -RI_d = 1.6I_d - \omega \cdot 0.08I_q \\ -RI_q = 1.6I_q + \omega \cdot 0.07I_d + \omega\Psi_M \\ M_G = -0.01I_dI_q + \Psi_M I_q \\ \Psi_M = 3.3 \\ P = R(I_d^2 + I_q^2) \end{array} \right.$$

se obțin:

$$M_{GSMP} = -5445.0\omega(5.0R + 8.0) \frac{4.0\omega^2 + 625.0R^2 + 2000.0R + 1600.0}{(1250.0R^2 + 4000.0R + 3200.0 + 7.0\omega^2)^2}$$

**momentul-**

$$P_{G-electric} = 27225.0R\omega^2 \frac{4.0\omega^2 + 625.0R^2 + 2000.0R + 1600.0}{(1250.0R^2 + 4000.0R + 3200.0 + 7.0\omega^2)^2}$$

**puterea electrică-**  
**puterea mecanică-**

$$P_{G-arbore} = M_{GSMP} \cdot \omega = 5445.0\omega^2(5.0R + 8.0) \frac{4.0\omega^2 + 625.0R^2 + 2000.0R + 1600.0}{(1250.0R^2 + 4000.0R + 3200.0 + 7.0\omega^2)^2}$$

Pentru o turbină de putere:  $P_N = 6[kW]$ , [14], caracteristica puterii are forma:

$$P_{TV}(\omega, V) = 23.584 \cdot ((V)/\omega - 2.1231 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06((V)/\omega - 0.0525)} \cdot (V)^3$$

Metoda folosită pentru determinarea MPP se bazează pe următorul algoritm:

- 1) se modifică sarcina la GSMP;
- 2) se monitorizează valoarea VUM,  $\omega$  și a puterii la GSMP și
  - a) la creșterea VUM se mărește sarcina la GSMP, iar

- b) la scăderea VUM se micșorează sarcina la GSMP
- 3) în cazul
- a. se menține creșterea sarcinii la GSMP până când puterea  $P_{G-electric}$  scade;
- 4) în cazul
- b. se menține scăderea sarcinii la GSMP până când VUM crește și puterea  $P_{G-electric}$  scade.

Se compară valorile puterilor -  $P_{G-electric}$  -debitate de GSMP, în regim stabilizat și se reține valoarea maximă și VUM corespunzătoare acestei valori.

Se realizează, astfel, o funcționare în zona optimă prin monitorizarea:

- valorii puterii active debitate de GSMP
- și a
- valorii vitezei unghiulare mecanice de la GSMP.

Se analizează două cazuri:

- a) Viteza vântului este constantă în timp,
- b) Viteza vântului este variabilă în timp

### Cazul a) Viteza vântului este constantă în timp

Pentru  $V = 22[m/s]$  caracteristica puterii are forma:

$$P_{TV}(\omega, 22) = 23.584 \cdot ((22)/\omega - 2.1231 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06((22)/\omega - 0.0525)} \cdot (22)^3$$

Puterea TV,  $P_{TV}(\omega, V)$ , depinde de  $\omega$  și  $V$ . Viteza vântului fiind impusă se pune problema maximizării lui  $P_{TV}(\omega)$  și acest fapt se realizează prin anularea derivatei

$$\frac{dP_{TV}(\omega)}{d\omega} = 0$$

sau

$$\frac{dP_{TV}(\omega)}{d\omega} = \frac{d}{d\omega} (23.584 \cdot ((V)/\omega - 2.1231 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06((V)/\omega - 0.0525)} \cdot (V)^3) = 0$$

cu soluția:  $\omega = 31.817 \cdot V = 31.817 \cdot 22 = 700[rad/s]$ .

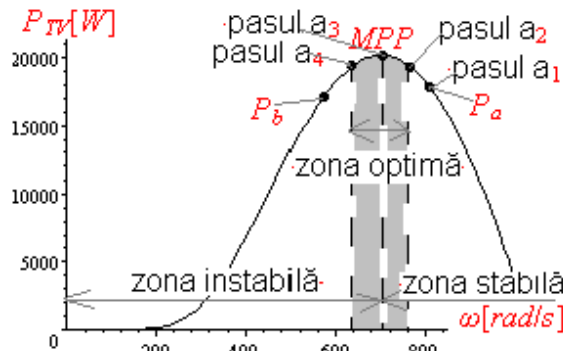


Fig.7.16. Caracteristicile puterii la  $V=ct$

Puterea la arborele GSMP,  $P_{G-arbore}$ , fiind egală cu puterea TV, rezultă:

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

$$23.584 \cdot ((22)/\omega - 2.1231 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06((22)/\omega - 0.0525)} \cdot (22)^3$$

La  $\omega_{OPTIM} = 700[rad/s]$  din egalitatea puterilor se obține rezistența de sarcină,

$R_{OPTIM} = 253.08[\Omega]$ , corespunzătoare MPP, din sistemul:

$$\left\{ \begin{array}{l} 5445 \cdot \omega^2 (5 \cdot R + 8) \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot (R)^2 + 2000 \cdot (R) + 1600}{(1250 \cdot (R)^2 + 4000 \cdot (R) + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2} = P_T \\ P_T = 23.584 \cdot ((22)/\omega - 2.1231 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06((22)/\omega - 0.0525)} \cdot (22)^3 \\ \omega = 700. \end{array} \right. \quad \text{cu soluția:}$$

$$\{\omega = 700.0, P_T = 20219 = P_{G-\text{arbore}}, R = 253.08\} .$$

Metoda pentru determinarea MPP se bazează pe următorii pași, figura 7.16.

### 1) pasul a<sup>1</sup>

La pasul a<sup>1</sup> rezistența de sarcină este mai mare decât  $R = 253.08[\Omega]$ , corespunzătoare MPP, având valoarea  $R_{a1} = 263.08[\Omega]$ . La această valoare a sarcinii VUM are valoarea  $\omega_{a1} = 712.56[\text{rad/s}]$ , obținută din egalitatea

$$\left\{ \begin{array}{l} 5445 \cdot \omega^2 (5 \cdot R + 8) \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot (R)^2 + 2000 \cdot (R) + 1600}{(1250 \cdot (R)^2 + 4000 \cdot (R) + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2} = P_T \\ P_T = 23.584 \cdot ((22)/\omega - 2.1231 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06((22)/\omega - 0.0525)} \cdot (22)^3 \\ R = 263.08 \end{array} \right. \quad \text{cu}$$

puteriilor.

soluția:  $\{P_T = 20188., R = 263.08, \omega = 712.56\}$ .

**Puterea electrică-**  $P_{G-\text{electric}} = 20066[\text{W}]$  -la  $\omega_{a1} = 712.56[\text{rad/s}]$  și  $R = 263.08[\Omega]$  se obține din:

$$\left\{ \begin{array}{l} 27225 \cdot R \omega^2 \frac{4 \cdot 0 \omega^2 + 625 \cdot 0 R^2 + 2000 \cdot 0 R + 1600 \cdot 0}{(1250 \cdot 0 R^2 + 4000 \cdot 0 R + 3200 \cdot 0 + 7 \cdot 0 \omega^2)^2} = P_G \\ R = 263.08 \\ \omega = 712.56 \end{array} \right. ,$$

cu soluția:  $\{\omega = 712.56, R = 263.08, P_G = 20066.\}$

### 2) pasul a<sup>2</sup>

La pasul a<sup>2</sup> rezistența de sarcină se micșorează, devenind, de exemplu,  $R_{a2} = 258.08[\Omega]$ .

Din ecuația mișcării:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{TV} - M_{GSMP}$$

la  $R_{a2} = 258.08[\Omega]$  se obține ecuația diferențială a mișcării, cu variabila  $\omega$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} 40 \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot ((22)/\omega - 2.1231 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06((22)/\omega - 0.0525)} \cdot (22)^3 - \\ 5445 \cdot \omega^2 (5 \cdot 258.08 + 8) \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot (258.08)^2 + 2000 \cdot (258.08) + 1600}{(1250 \cdot (258.08)^2 + 4000 \cdot (258.08) + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2} \\ \omega(0) = 712.56 \end{array} \right. \quad \text{După}$$

un timp  $t = 2888[\text{s}]$  procesul s-a stabilizat la  $\omega(2888) = 706.46[\text{rad/s}]$ .

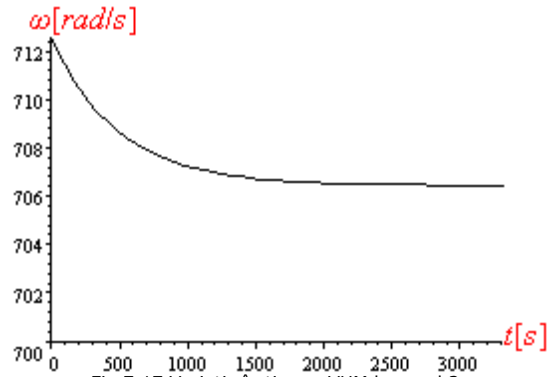


Fig.7.17.Variația în timp a VUM la pasul 2

**Puterea electrică-**  $P_{G-electric} = 20087. [W]$  -la  $\omega_{a1} = 706.46 [rad / s]$  și  $R = 258.08 [\Omega]$  se obține din:

$$\left\{ \begin{array}{l} 27225 \cdot R \omega^2 \frac{4 \cdot 0 \omega^2 + 625 \cdot 0 R^2 + 2000 \cdot 0 R + 1600 \cdot 0}{(1250 \cdot 0 R^2 + 4000 \cdot 0 R + 3200 \cdot 0 + 7 \cdot 0 \omega^2)^2} = P_G \\ R = 258.08 \\ \omega = 706.46 \end{array} \right.$$

cu soluția:  $\{\omega = 706.46, R = 258.08, P_G = 20087.\}$

### 3) pasul a<sup>3</sup>

La pasul a<sup>3</sup> rezistența de sarcină are valoarea  $R_{a3} = 253.08 [\Omega]$  și se obține ecuația diferențială:

$$\left\{ \begin{array}{l} 40 \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot ((22)/\omega - 2.1231 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06((22)/\omega - 0.0525)} \cdot (22)^3 - \\ 5445 \cdot \omega^2 (5 \cdot 253.08 + 8) \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot (253.08)^2 + 2000 \cdot (253.08) + 1600}{(1250 \cdot (253.08)^2 + 4000 \cdot (253.08) + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2} \\ \omega(0) = 706.46 \end{array} \right.$$

După un timp  $t = 28888 [s]$  procesul s-a stabilizat la  $\omega(2888) = 700.02 [rad / s]$ .

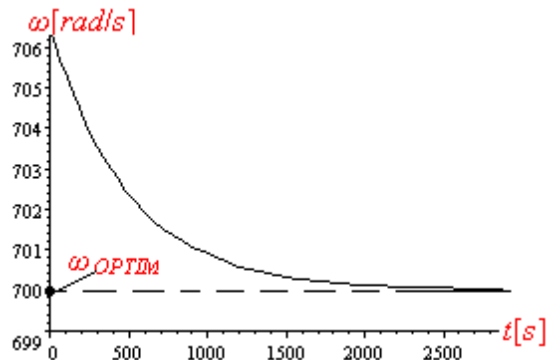


Fig.7.18.Variația în timp a VUM la pasul 3

**Puterea electrică-**  $P_{G-electric} = 20092. [W]$  -la  $\omega_{a1} = 700.02 [rad / s]$  și  $R = 253.08 [\Omega]$  se obține din:

$$\left\{ \begin{array}{l} 27225 \cdot R \omega^2 \frac{4.0\omega^2 + 625.0R^2 + 2000.0R + 1600.0}{(1250.0R^2 + 4000.0R + 3200.0 + 7.0\omega^2)^2} = P_G \\ R = 253.08 \\ \omega = 700.02 \end{array} \right.$$

cu soluția:  $\{R = 253.08, \omega = 700.02, P_G = 20092.\}$

#### 4) pasul a 4

La pasul a 4 rezistența de sarcină are valoarea  $R_{a4} = 248.08[\Omega]$  și se obține ecuația diferențială:

$$\left\{ \begin{array}{l} 40 \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot ((22)/\omega - 2.1231 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06((22)/\omega - 0.0525)} \cdot (22)^3 - \\ 5445 \cdot \omega^2 (5 \cdot 248.08 + 8.) \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot (248.08)^2 + 2000 \cdot (248.08) + 1600.}{(1250 \cdot (248.08)^2 + 4000 \cdot (248.08) + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2} \\ \omega(0) = 700.02 \end{array} \right.$$

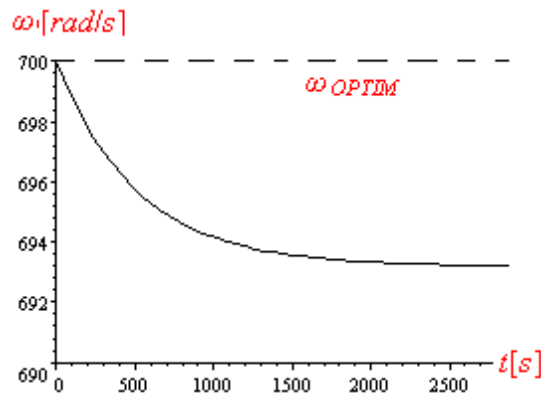


Fig.7.19.Variația în timp a VUM la pasul 4

După un timp  $t = 2888[s]$  procesul s-a stabilizat la  $\omega(2888) = 693.21[rad / s]$

**Puterea electrică-**  $P_{G-electric} = 20081[W]$  -la  $\omega_{a1} = 693.21[rad / s]$  și  $R = 248.08[\Omega]$  se obține din:

$$\left\{ \begin{array}{l} 27225 \cdot R \omega^2 \frac{4.0\omega^2 + 625.0R^2 + 2000.0R + 1600.0}{(1250.0R^2 + 4000.0R + 3200.0 + 7.0\omega^2)^2} = P_G \\ R = 248.08 \\ \omega = 693.21 \end{array} \right.$$

cu soluția  $\{P_G = 20081., R = 248.08, \omega = 693.21\}$ .

#### Observația 1

Procesul s-a stabilizat după un timp  $t = 2888[s]$  la valoarea VUM  $\omega(2888) = 693.21[rad / s]$ , însă la o valoare mai mică a rezistenței de sarcină, de exemplu  $R_{a5} = 148.08[\Omega]$ , procesul este instabil așa cum se observă prin rezolvarea ecuației mișcării, figura 7.19.



$$\left\{ \begin{array}{l} 40 \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot ((22)/\omega - 2.1231 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06((22)/\omega - 0.0525)} \cdot (22)^3 - \\ 5445 \cdot \omega^2 (5 \cdot 148.08 + 8.) \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot (148.08)^2 + 2000 \cdot (148.08) + 1600}{(1250 \cdot (148.08)^2 + 4000 \cdot (148.08) + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2} \\ \omega(0) = 693.21 \end{array} \right.$$

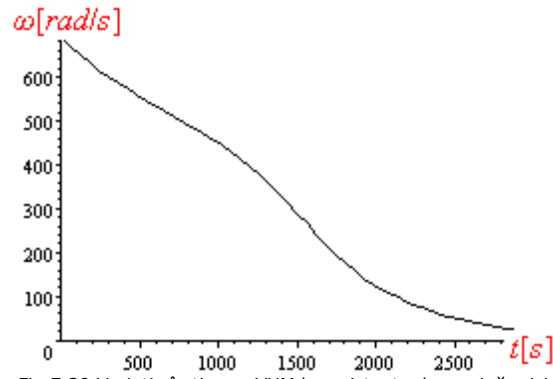


Fig.7.20.Variația în timp a VUM la rezistențe de sarcină mici

Puterile debitate de GSMP pot folosi la determinarea MPP, în sensul că la  $\omega_{OPTIM} = 702.02 [rad/s]$ , cu  $R = 253.08 [\Omega]$ , se obține puterea maximă,  $P_G = 20092 [W]$ .

A rezultat, așadar, că din monitorizarea puterii și turației la GSMP se pot determina cu aparatele MPP.

### Cazul b) Viteza vântului este variabilă în timp

Viteza vântului este variabilă în timp de forma:

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

Datorită inerțiilor mecanice mari, simulările și toate celelalte rezultate teoretice și practice trebuie să aibă la bază intervale de timp de minimum câteva ore, (de regulă peste 10[h]).

La viteze ale vântului variabile între o valoare maximă,  $V_{MAX}$  și o valoare minimă,  $V_{MIN}$ , puterea reală a turbinei de vânt, ia valori între  $P_{TV-MAX}$  și  $P_{TV-MIN}$ , într-un interval foarte scurt de timp, ordinul secundelor. În acest interval scurt de timp VUM nu se modifică semnificativ, [2], datorită inerțiilor mecanice mari ale sistemului TV+GSMP.

SEE funcționează la VUM  $\omega$ , în punctul F, figura 7.21.

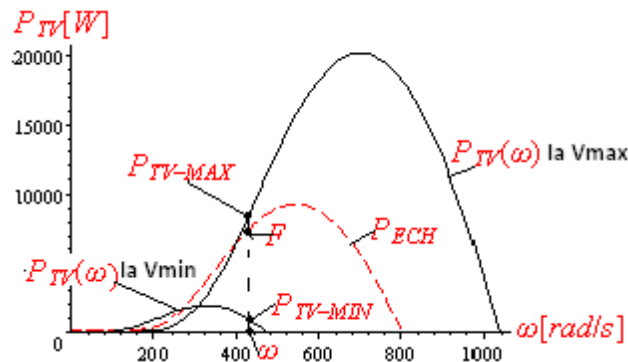


Fig.7.21.Caracteristicile puterilor la TV

Puterea echivalentă a turbinei  $P_{ECH}(\omega)$ , generează aceeași formă de variație în timp a VUM ca și puterea reală,  $P_{TV}$  putere care oscilează ca și valoare între puterea maximă dată de TV la  $V_{MAX} = 22[m/s]$  și puterea minimă dată de TV la  $V_{MIN} = 10[m/s]$ , figura 8.

Se poate defini funcția  $P_{ECH}(\omega)$  folosind viteza echivalentă:  $V_{ECH}$ .

Pentru  $V(t) = 16 - 6 \sin(0.17943t)$  caracteristicile puterii sunt:

$$P_{TV}(\omega, 22) = 23.584 \cdot \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) / \omega - 2.1231 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06((16 - 6 \sin(0.17943t)) / \omega - 0.0525)} \cdot (16 - 6 \sin(0.17943t))^3$$

Se aleg valori ale rezistenței de sarcină în domeniul  $R = 349.84[\Omega] \div 491.84[\Omega]$ .

La  $R_{OPTIM} = 459.84[\Omega]$ , se obține energia maximă și VUM optimă:  $\omega_{OPTIM} = 554.9[rad/s]$ .

Caracteristicile puterilor sunt:

$$\text{- la } V_{MAX} = 22[m/s]$$

$$P_{TV}(\omega, 22) = 23.584 \cdot \left( (22) / \omega - 2.1231 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06((22) / \omega - 0.0525)} \cdot (22)^3 \quad \text{- la}$$

$$V_{MIN} = 10[m/s]$$

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

$$\text{- la } V_{ECH} = 17[m/s]$$

$$P_{ECH}(\omega) = 23.584 \cdot \left( (17) / \omega - 2.1231 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06((17) / \omega - 0.0525)} \cdot (17)^3$$

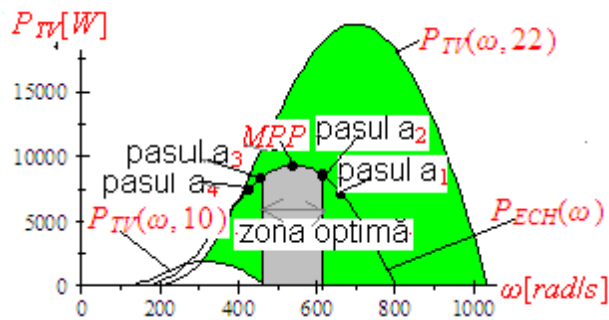


Fig.7.22.Puterea echivalentă a turbinei

La viteze ale vântului variabile în timp punctele de funcționare ale SEE sunt pe caracteristica  $P_{ECH}(\omega)$ , figura 7.22.

### 1) pasul a<sup>1</sup>

La pasul a<sup>1</sup> rezistența de sarcină are valoarea  $R_{a1} = 464.84[\Omega] > R_{OPTIM} = 454.84[\Omega]$ .

Prin rezolvarea ecuației mișcării:

$$\left\{ \begin{array}{l} 40 \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) / \omega - 2.1231 \times 10^{-2} \right) \cdot \\ e^{-98.06 \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) / \omega - 0.0525 \right)} \cdot (16 - 6 \sin(0.17943t))^3 - \\ 5445 \cdot \omega^2 (5 \cdot 464.84 + 8) \cdot \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot (464.84)^2 + 2000 \cdot (464.84) + 1600}{(1250 \cdot (464.84)^2 + 4000 \cdot (464.84) + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2} \\ \omega(0) = 560. \end{array} \right.$$

se poate observa variația în timp a VUM, figura 7.23.

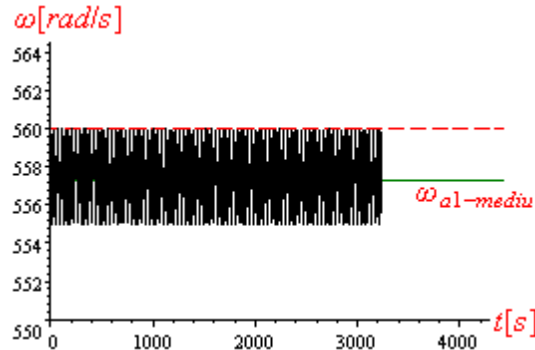


Fig.7.23.Variația în timp a VUM la pasul 1

Aceasta are o valoare medie  $\omega_{a1-mediu} = 557.3 [rad / s]$

**Puterea electrică-**  $P_{G-electric} = 7177.1 [W]$  -la  $\omega_{a1-mediu} = 557.3 [rad / s]$  și  $R = 464.84 [\Omega]$   
se obține din:

$$\left\{ \begin{array}{l} 27225 \cdot R \omega^2 \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot 0R^2 + 2000 \cdot 0R + 1600 \cdot 0}{(1250 \cdot 0R^2 + 4000 \cdot 0R + 3200 \cdot 0 + 7 \cdot 0 \omega^2)^2} = P_G \\ R = 464.84 \\ \omega = 557.3 \end{array} \right.$$

cu soluția:  $\{R = 464.84, \omega = 557.3, P_G = 7177.1\}$

## 2) pasul a<sup>2</sup>

La pasul a<sup>2</sup>, cu rezistența de sarcină  $R_{a2} = 459.84 [\Omega]$ , se obține ecuația diferențială a mișcării:

$$\left\{ \begin{array}{l} 40 \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) / \omega - 2.1231 \times 10^{-2} \right) \cdot \\ e^{-98.06 \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) / \omega - 0.0525 \right)} \cdot (16 - 6 \sin(0.17943t))^3 - \\ 5445 \cdot \omega^2 (5 \cdot 459.84 + 8) \cdot \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot (459.84)^2 + 2000 \cdot (459.84) + 1600}{(1250 \cdot (459.84)^2 + 4000 \cdot (459.84) + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2} \\ \omega(0) = 557.3 \end{array} \right.$$

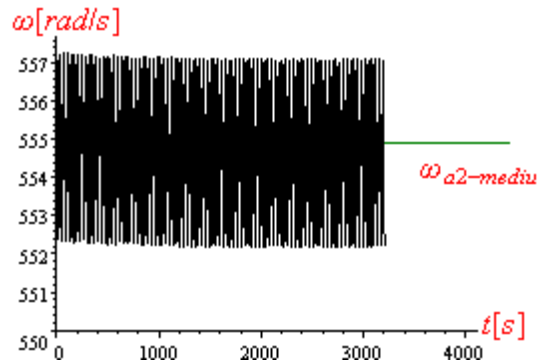


Fig.7.24.Variația în timp a VUM la pasul 2

La pasul 2 VUM are valoarea:  $\omega_{a2-mediu} = 554.9 [rad / s]$  ,

**Puterea electrică-**  $P_{G-electric} = 7191.7 [W]$  -la  $\omega_{a2-mediu} = 554.9 [rad / s]$  , și  $R = 459.84 [\Omega]$   
se obține din:

$$\left\{ \begin{array}{l} 27225 \cdot R \omega^2 \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot 0R^2 + 2000 \cdot 0R + 1600 \cdot 0}{(1250 \cdot 0R^2 + 4000 \cdot 0R + 3200 \cdot 0 + 7 \cdot 0\omega^2)^2} = P_G \\ R = 459.84 \\ \omega = 554.9 \end{array} \right.$$

cu soluția:  $\{R = 459.84, \omega = 554.9, P_G = 7191.7\}$

### 3) pasul a<sup>3</sup>

La pasul a<sup>3</sup> ,cu rezistența de sarcină  $R_{a3} = 454.84 [\Omega]$  ,se obține ecuația diferențială a mișcării:

$$\left\{ \begin{array}{l} 40 \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) / \omega - 2.1231 \times 10^{-2} \right) \cdot \\ e^{-98.06 \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) / \omega - 0.0525 \right)} \cdot (16 - 6 \sin(0.17943t))^3 - \\ 5445 \cdot \omega^2 (5 \cdot 454.84 + 8) \cdot \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot (454.84)^2 + 2000 \cdot (454.84) + 1600}{(1250 \cdot (454.84)^2 + 4000 \cdot (454.84) + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2} \\ \omega(0) = 554.9 \end{array} \right.$$

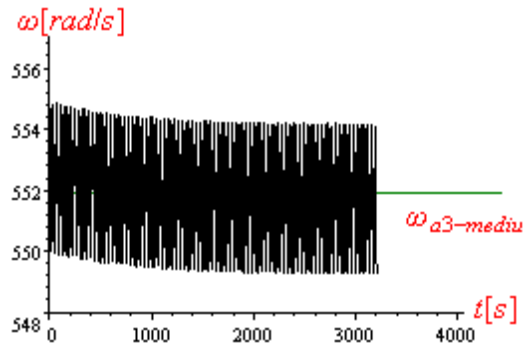


Fig.7.25.Variația în timp a VUM la pasul 3

La pasul 3 VUM are valoarea:  $\omega_{a3-mediu} = 551.9 [rad / s]$  ,

**Puterea electrică-**  $P_{G-electric} = 7191.2 [W]$  -la  $\omega_{a3-mediu} = 551.9 [rad / s]$  , și  $R = 454.84 [\Omega]$  se obține din

$$\left\{ \begin{array}{l} 27225 \cdot R \omega^2 \frac{4.0\omega^2 + 625.0R^2 + 2000.0R + 1600.0}{(1250.0R^2 + 4000.0R + 3200.0 + 7.0\omega^2)^2} = P_G \\ R = 454.84 \\ \omega = 551.9 \end{array} \right.$$

cu soluția:  $\{R = 454.84, \omega = 551.9, P_G = 7191.2\}$

#### 4) pasul a 4

La pasul a 4 , cu rezistența de sarcină  $R_{a4} = 449.84 [\Omega]$  , se obține ecuația diferențială a mișcării:

$$\left\{ \begin{array}{l} 40 \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) / \omega - 2.1231 \times 10^{-2} \right) \cdot \\ e^{-98.06 \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) / \omega - 0.0525 \right)} \cdot (16 - 6 \sin(0.17943t))^3 - \\ 5445 \cdot \omega^2 (5 \cdot 449.84 + 8) \cdot \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot (449.84)^2 + 2000 \cdot (449.84) + 1600}{(1250 \cdot (449.84)^2 + 4000 \cdot (449.84) + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2} \\ \omega(0) = 551.9 \end{array} \right.$$

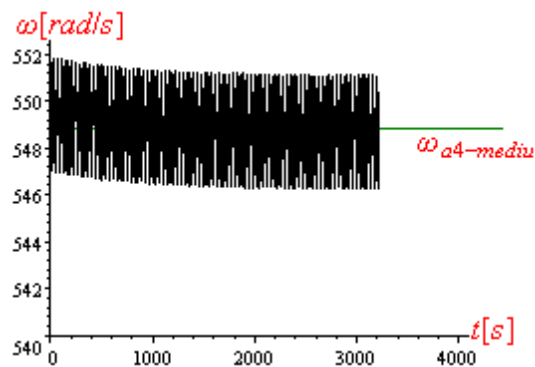


Fig.7.26.Variația în timp a VUM la pasul 4

La pasul 4 VUM are valoarea:  $\omega_{a4-mediu} = 548.8 [rad/s]$  ,

Puterea electrică-  $P_{G-electric} = 7188.6 [W]$  -la  $\omega_{a4-mediu} = 551.9 [rad / s]$  , și  $R = 449.84 [\Omega]$  se obține din

$$\left\{ \begin{array}{l} 27225 \cdot R \omega^2 \frac{4.0\omega^2 + 625.0R^2 + 2000.0R + 1600.0}{(1250.0R^2 + 4000.0R + 3200.0 + 7.0\omega^2)^2} = P_G \\ R = 449.84 \\ \omega = 548.8 \end{array} \right.$$

cu soluția:  $\{R = 449.84, \omega = 548.8, P_G = 7188.6\}$

**Puterea electrică maximă-**  $P_{G-electric} = 7191.7 [W]$  - se obține la  $\omega_{a2-mediu} = 554.9 [rad / s]$  , și  $R = 459.84 [\Omega]$  .

Cu metoda dată se poate asigura funcționarea în MPP, prin estimarea puterii date de GSMP. Sunt necesare, însă, măsuratori într-un timp foarte mare  $t = 4 \cdot 3333 = 13332 [s] = 3.7 [h]$ , ceea ce face ca metoda să nu se poată aplica în situațiile în care viteza vântului variază semnificativ în timp.

La viteze ale vântului variabile în timp, timpii de răspuns trebuie să fie reduși, ordinul minutelor și nu de ordinul orelor cum este în cazul metodei bazată pe determinarea MPP, prin modificarea sarcinii la GSMP.

## 7.4. Concluzii

S-au calculat VUM optime energetice prin 3 metode:

1. prin calculul energiei,
2. din puterea echivalentă calculată din variațiile energiilor cinetice și
3. din derivata puterii.

S-au făcut comparații privind dinamica sistemului eolian considerând viteza vântului reala, medie sau echivalentă, s-au dedus rezistența de sarcină pentru VUM optimă și s-a analizat variația în timp a VUM în acest caz. S-a determinat zona optimă energetic prin măsurarea turației în timp.

La diferite încărcări s-a analizat dinamica sistemului și s-au evaluat energiile obținute pentru diferite valori ale rezistenței de sarcină.

La sfârșitul capitolului s-au vizualizat variațiile în timp a puterilor la turbină și la generator.

La sistemele eoliene ce funcționează la viteze ale vântului variabile semnificativ în timp s-a determinat zona de maxim energetic, zonă caracterizată de VUM  $\omega_{OPTIM}$  .

Pentru determinarea lui  $\omega_{OPTIM}$  s-a introdus noțiunea de putere echivalentă a turbinei,  $P_{ECH}$  , care este dependentă de VUM,  $\omega$  .

Maximul  $P_{ECH}$  este la  $\omega_{OPTIM}$  . Estimarea funcției  $P_{ECH}(\omega)$  și determinarea lui  $\omega_{OPTIM}$  se bazează pe valorile măsurate ale VUM de la arborele generatorului sau turbinei și a puterii debitate de GSMP, la diferite încărcări. Deoarece după fiecare modificare a rezistenței de sarcină urmează un regim tranzitoriu, cu durata de ordinul minutelor, metoda de determinare a MPP necesită un timp lung de ordinul orelor și din acest motiv nu poate fi aplicată decât în cazul în care viteza vântului se modifică lent în timp, ordinul orelor. La viteze ale vântului variabile rapid în timp metoda nu poate fi aplicată.

În continuare se prezintă o sinteză a contribuțiilor personale:

- acest capitol este în întregime original;
- s-au calculat energiile captate la diferite valori ale VUM și s-a dedus valoarea optimă la VUM, corespunzătoare energiei maxime;
- s-a verificat valoarea VUM optime prin măsurarea în timp a turației și deducerea zonei de maxim energetic din calculul variațiilor energiilor cinetice;
- în analiza dinamicii sistemului s-a definit viteza echivalentă a vântului și puterea echivalentă a turbinei, putere asociată vitezei echivalente;

- s-au determinat energiile captate la diferite valori ale rezistenței de sarcină și s-a dedus valoarea rezistenței optime corespunzătoare energiei maxime;
- la această valoare a rezistenței optime s-au analizat variațiile puterilor la turbină și la generator;
- prin măsurarea vitezei vântului se determină valoarea VUM optime;
- prin analiza mai multor cazuri s-au putut stabili mărimile de bază ce conduc la o funcționare optimă;
- s-a dat legătura dintre viteza vântului și turația optimă la care trebuie să funcționeze sistemul, astfel încât energia eoliană captată să fie maximă;
- prin simulări, în prezenta lucrare și prin măsurători ale turației la generator în exploatare, se poate deduce turația optimă la generator, astfel încât să se obțină o energie maximă la o viteză a vântului variabilă în timp;
- s-au definit vitezele echivalente ale vântului și puterile echivalente, mărimi fundamentale în determinarea lui  $\omega_{OPTIM}$  ;
- determinarea puterii maxime prin măsurători pe turație și putere la generator la viteze ale vântului constante sau variabile în timp;
- analiza dinamicii sistemului la modificări ale sarcinii în vederea determinării MPP.

## 8.DINAMICA SISTEMULUI EOLIAN FUNCȚIONÂND ÎN GOL

În prezentul capitol se pun bazele unor noțiuni fundamentale privind dinamica unui sistem eolian, în sensul introducerii conceptului de putere echivalentă a turbinei,  $P_{ECH}$ , asociată cu viteza vântului variabilă în timp. Din proba la funcționarea în gol se pot obține informații deosebit de utile privind caracteristicile puterii turbinei de vânt, TV. Prin proba la funcționarea în gol se pot rezolva două probleme fundamentale :

- 1) determinarea zonelor de maxim energetic la viteze ale vântului variabile în timp prin cunoșterea turației optime;
- 2) deducerea modelului matematic al TV, MM-TV, din măsurători de viteză a vântului și a turației la TV.

Datorită inerțiilor mecanice mari, pe un interval scurt de timp viteza unghiulară mecanică a turbinei nu se modifică sensibil și din acest motiv se poate considera constantă, pe respectivul interval de timp. În acel interval scurt de timp, în care viteza unghiulară mecanică,  $\omega_{VUM}$ , se consideră constantă, datorită vitezei variabile a vântului puterea reală a turbinei,  $P_{TV}$ , ia valori între  $P_{TV-MAX}$  -la maximul vitezei vântului și  $P_{TV-MIN}$  -la minimul vitezei vântului,  $P_{ECH}$  fiind constantă. Energia eoliană reală captată, pe o perioadă scurtă de timp, este aceeași cu energia generată de puterea echivalentă. Prin folosirea noțiunii de putere echivalentă,  $P_{ECH}$ , se poate localiza mai ușor zona de funcționare optimă din punct de vedere energetic. Determinarea  $P_{ECH}$  se bazează pe o probă la funcționarea în gol a generatorului și pe baza puterii echivalente se poate determina valoarea turației, la care energia captată este maximă. Aceasta constituie problema fundamentală în orice sistem de conducere performant. Conducerea optimală a unui sistem eolian presupune extragerea, (captarea), unei energii maxime la o viteză a vântului variabilă semnificativ în timp. Aceasta impune controlul turației și cuplului la turbină și adaptarea sarcinii generatorului la viteza vântului. Determinarea turației corespunzătoare energiei maxime date de turbina de vânt, (TV), este obiectivul principal al acestei lucrări. Prin simulări se verifică metoda dată, considerând viteza vântului variabilă în timp. Determinarea legăturii dintre viteza vântului și turația optimă, din punct de vedere energetic se face o singură dată în etapa de omologare a turbinei.

### 8.1.Considerații preliminare

Funcționarea sistemului eolian în punctul de putere maxim, MPP, este obiectivul principal al celor mai multe lucrări din domeniu [1-23]. Majoritatea, însă, iau în considerare o viteză a vântului constantă în timp [5-24]. În literatura de specialitate [1 ÷ 17], se tratează, în general, funcționarea TV la viteze ale vântului constante în timp. La viteze ale vântului variabile în timp problemele devin complexe și optimizarea din punct de vedere energetic a sistemului TV+GSMP este puțin abordată, cu excepția unor puține lucrări, [1 ÷ 3].

În capitolul de față se tratează tocmai acest aspect: optimul energetic la viteze ale vântului variabile semnificativ în timp. Se determină valoarea vitezei unghiulare mecanice optime:  $\omega_{OPTIM}$ , la care  $P_{ECH}$  este maximă, măsurând viteza vântului. Determinarea puterii echivalente se bazează pe variația în timp a  $\omega_{VUM}$ , care se obține, la funcționarea în gol, direct din măsurători de turație, iar în simulări prin rezolvarea ecuației mișcării. Simulările se bazează pe un model matematic uzual al turbinei, preluat din [14].

La viteze ale vântului variabile semnificativ în timp [4], cum este cazul real al României [1], determinarea MPP este o problemă complexă cu implicații majore în calitatea reglajului [2,4].

Datorită inerțiilor mecanice mari, simulările și toate celelalte rezultate teoretice și practice trebuie să aibă la bază intervale de timp de minimum câteva ore, (de regulă peste 10[h]). Sistemele electroenergetice eoliene de mare putere sunt conduse având în vedere viteza medie a vântului [8 ÷ 17], dar acestea nu realizează maximul energetic. Recent s-au propus și structuri de conducere bazate pe măsurarea vitezei momentane a vântului [1 ÷ 5], și folosind un model matematic adecvat pentru TV.



La viteze ale vântului variabile între o valoare maximă,  $V_{MAX}$  și o valoare minimă,  $V_{MIN}$ , puterea reală a turbinei de vânt, ce funcționează la VUM  $\omega$ , în punctul F, figura 8.1, ia valori între  $P_{TV-MAX}$  și  $P_{TV-MIN}$ , într-un interval foarte scurt de timp, ordinul secundelor. În acest interval scurt de timp VUM nu se modifică semnificativ, [2], datorită inerțiilor mecanice mari ale sistemului TV+GSMP.

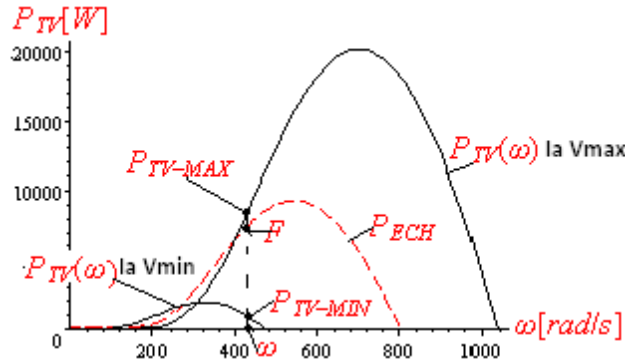


Fig.8.1.Caracteristicile puterilor la TV

La o viteză a vântului variabilă în timp, impusă de condițiile meteo, se pune problema determinării VUM optime  $\omega_{OPTIM}$ , astfel încât energia eoliană captată să fie maximă, într-un interval de timp dat. Maximul energetic corespunde cu maximul valorii lui  $P_{ECH}$ , la o viteză a vântului măsurată pe respectivul interval de timp. Puterea echivalentă se determină din energia eoliană reală captată în intervalul de timp dat.

## 8.2.Viteza corespunzătoare puterii echivalente

Puterea TV,  $P_{TV}(\omega, V)$ , depinde de  $\omega$  și  $V$ . Viteza vântului fiind impusă se pune problema maximizării lui  $P_{TV}(\omega)$  și acest fapt se realizează prin anularea derivatei

$$\frac{dP_{TV}(\omega)}{d\omega} = 0$$

Pentru o turbină dată [14] caracteristica puterii are forma

$$P_{TV}(\omega, V) = 23.584 \cdot ((V)/\omega - 2.1231 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06((V)/\omega - 0.0525)} \cdot (V)^3$$

unde:  $\omega$  - VUM la arborele generatorului;  $V$  - viteza vântului.

Prin anularea derivatei se obține

$$\frac{dP_{TV}(\omega)}{d\omega} = \frac{d}{d\omega} (23.584 \cdot ((V)/\omega - 2.1231 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06((V)/\omega - 0.0525)} \cdot (V)^3) = 0$$

cu soluția:  $\{\omega = 31.817V\}$

Pentru a funcționa în zona maximă, din punct de vedere al puterii,  $P_{TV}(\omega, V)$ , viteza unghiulară mecanică,  $\omega$ , ar trebui să se modifice într-un timp foarte scurt, așa ca și viteza vântului  $V$ , dar datorită inerțiilor mecanice mari ea este constantă,  $\omega = ct$ , [1].

În aceste condiții se pune problema determinării VUM optime,  $\omega_{OPTIM}$ , din măsuratori ale vitezei vântului și printr-o calibrare prealabilă a TV. Această calibrare inițială se face la o funcționare în gol și prin măsurarea periodică a VUM.

La viteze ale vântului,  $V(t)$ , variabile în timp cu perioada  $T=35[s]$ , de forma:

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

puterea variază între o valoare minimă, la viteza minimă,  $V_{MIN}$  și o valoare maximă, la viteza maximă,  $V_{MAX}$ , figura 1.

Pentru a funcționa la putere maximă este necesar ca VUM să se modifice de la valoarea minimă la valoarea maximă într-un timp foarte mic,  $t=35[s]$ , timp dictat de variația în timp a vitezei vântului, care are perioada  $T=35[s]$ . Datorită inerțiilor mecanice foarte mari modificarea VUM, în acest interval de timp, nu este posibilă.

Din acest motiv se pune problema definirii unei puteri echivalente a TV, putere care la o anumită VUM,  $\omega$ , are o valoare bine precizată. Determinarea puterii echivalente se bazează numai pe măsurarea VUM la o funcționare în gol a TV.

### 8.2.1. Puterea echivalentă și viteza echivalentă

Din ecuația mișcării :

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{TV}$$

prin înmulțire cu  $\omega$  se obține puterea dată de turbină

$$J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega = \omega \cdot M_{TV} = P_{TV}$$

Prin integrare se obține energia mecanică captată în intervalul de timp  $T$  sub forma:

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

sau puterea echivalentă,  $P_{ECH}$ , la VUM  $\omega_k^* = (\omega_k + \omega_{k-1}) / 2$

$$P_{ECH} = J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2) / (2 \cdot T)$$

unde:  $J$  – momentul de inerție echivalent;  $\omega_k$  – VUM la momentul  $t_k$ ;  $\omega_{k-1}$  – VUM la momentul  $t_{k-1}$ .

Puterea echivalentă a turbinei  $P_{ECH}(\omega)$ , generează aceeași formă de variație în timp a VUM ca și puterea reală,  $P_{TV}$  putere care oscilează ca și valoare între puterea maximă dată de TV la  $V_{MAX} = 22[m/s]$  și puterea minimă dată de TV la  $V_{MIN} = 10[m/s]$ , figura 1.

Măsurând, în exploatare și din ecuația mișcării, în simulare, se determină VUM la intervale de timp  $\Delta t$  și apoi se calculează puterea echivalentă cu relația :

$$P_{ECH} = J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2) / (2 \cdot T) = 50 \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2) / (2 \Delta t)$$

Simulările prezentate în lucrare se bazează pe modelele matematice clasice ale TV și GSMP, preluate din [14]. La o viteză a vântului variabilă în timp de forma

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

se obține viteza echivalentă,  $V_{ECH}$ , asociată lui  $P_{ECH}$ .

Determinarea vitezei echivalente,  $V_{ECH}$ , se poate face prin două metode:

- 1) determinarea vitezei printr-o probă la funcționarea în gol și
  - 2) din turația optimă corespunzătoare puterii echivalente maxime
- Ambele metode se bazează pe măsuratori de turație la funcționarea în gol

#### 8.2.1.1. Determinarea vitezei și puterii echivalente printr-o probă la funcționarea în gol

Prin rezolvarea ecuației mișcării, la funcționarea în gol

$$\left\{ \begin{array}{l} 50 \cdot \omega \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot ((16 - 6 \sin(0.17943t)) / \omega - 2.1231 \times 10^{-2}) \cdot \\ e^{-98.06((16 - 6 \sin(0.17943t)) / \omega - 0.0525)} \cdot (16 - 6 \sin(0.17943t))^3 \\ \omega(0) = 455.66 \end{array} \right.$$

se obține variația în timp a VUM, figura.8.2.

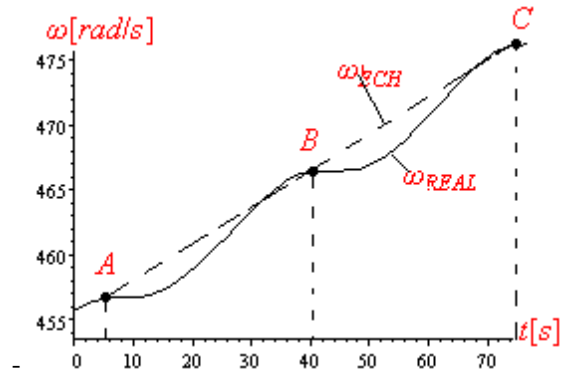


Fig.8.2.Variația în timp a VUM

Valorile VUM echivalente,  $\omega_{ECH}$ , se măresc, aproximativ linear în timp, deoarece viteza echivalentă a vântului este constantă,  $V_{ECH} = ct$ , așa cum se observă din figura 8.2.

Variația VUM reale,  $\omega_{REAL}$ , este oscilantă, având intervale de timp unde  $\omega$  este aproximativ constantă, după care urmează o creștere accentuată, așa cum se observă din graficul lui  $\omega_{REAL}$ , figura 8.2.

Așa cum se poate observa din variația în timp a lui  $\omega_{REAL}$  din figura 8.2, există intervale de timp în care  $\omega_{REAL} = ct$  și în care puterea dată de TV este nulă sau chiar negativă, aceasta datorită valorilor mici a vitezelor vântului, la acele momente de timp. La valoarea minimă a vitezei vântului,  $V_{MIN}$ , puterea TV este redusă și la  $\omega \geq 480 [rad / s]$  este chiar negativă, figura 8.2.

Prin urmare, valoarea intervalului de măsură a VUM este foarte importantă și trebuie corelată cu valoarea perioadei variației în timp a vitezei vântului

La momentele de timp  $t=5, 40$  și  $75$  [s], VUM sunt

$$\omega(5) = 456.71 [rad / s], \omega(40) = 466.37 [rad / s] \text{ și } \omega(75) = 476.13 [rad / s].$$

În zona AB puterea echivalentă are valoarea:

$$P_{ECH} = 50 \cdot (\omega(40)^2 - \omega(5)^2) / (70) = 50 \cdot (466.37^2 - 456.71^2) / (70) = 6369.3 [W]$$

În zona BC puterea echivalentă este:

$$P_{ECH} = 50 \cdot (\omega(75)^2 - \omega(40)^2) / (70) = 50 \cdot (476.13^2 - 466.37^2) / (70) = 6570.6 [W]$$

La momentele de timp  $t=300, 335, 370$  și  $405$  [s], se obțin VUM

$$\omega(300) = 535.42 [rad / s], \omega(335) = 544.66 [rad / s], \omega(370) = 553.77 [rad / s]$$

și  $\omega(405) = 562.72 [rad / s]$  și rezultă puterile echivalente:

$$P_{ECH} = 50 \cdot (544.66^2 - 535.42^2) / (70) = 7128.5 [W]$$

La momentele de timp  $t=500, 535$  și  $570$  [s], se obțin VUM

$\omega(500) = 587.7 [rad / s], \omega(535) = 596.01 [rad / s]$  și  $\omega(570) = 604.1 [rad / s]$  și rezultă puterile echivalente:

$$P_{ECH} = 50 \cdot (596.01^2 - 587.7^2) / (70) = 7026.2 [W]$$

$$P_{ECH} = 50 \cdot (604.1^2 - 596.01^2) / (70) = 6934.9 [W]$$

Pentru  $t=1000, 1035$  și  $1070$  [s] VUM sunt:  $\omega(1000) = 683.69 [rad / s], \omega(1035)$

$= 688.89 [rad / s]$  și  $\omega(1070) = 693.9 [rad / s]$  și puterile echivalente au valorile:

$$P_{ECH} = 50 \cdot (688.89^2 - 683.69^2) / (70) = 5098.2 [W]$$

$$P_{ECH} = 50 \cdot (693.9^2 - 688.89^2) / (70) = 4948.4 [W]$$

La momentele de timp  $t=1500$ ,  $1535$  și  $1570$  [s] se obțin VUM:  
 $\omega(1500) = 745.06[\text{rad} / \text{s}]$ ,  $\omega(1535) = 747.96[\text{rad} / \text{s}]$  și  $\omega(1570) = 750.74[\text{rad} / \text{s}]$  și  
 puterile echivalente sunt:

$$P_{ECH} = 50 \cdot (747.96^2 - 745.06^2) / (70) = 3092.7[\text{W}]$$

$$P_{ECH} = 50 \cdot (750.74^2 - 747.96^2) / (70) = 2976.0[\text{W}]$$

Pentru  $t=2000$ ,  $2035$  și  $2070$  [s], din ecuația mișcării rezultă:  
 $\omega(2000) = 776.85[\text{rad} / \text{s}]$ ,  $\omega(2035) = 778.42[\text{rad} / \text{s}]$  și  $\omega(2070) = 779.92[\text{rad} / \text{s}]$  și  
 puterile echivalente:

$$P_{ECH} = 50 \cdot (778.42^2 - 776.85^2) / (70) = 1744.1[\text{W}]$$

$$P_{ECH} = 50 \cdot (779.92^2 - 778.42^2) / (70) = 1669.7[\text{W}]$$

În mod similar la  $t=2500$ ,  $2535$  și  $2570$  [s] se obțin VUM  
 $\omega(2500) = 791.01[\text{rad} / \text{s}]$ ,  $\omega(2535) = 791.85[\text{rad} / \text{s}]$  și  $\omega(2570) = 792.64[\text{rad} / \text{s}]$  și  
 puterile echivalente au valorile:

$$P_{ECH} = 50 \cdot (791.85^2 - 791.01^2) / (70) = 949.72[\text{W}]$$

$$P_{ECH} = 50 \cdot (792.64^2 - 791.85^2) / (70) = 894.11[\text{W}]$$

Analog la  $t=3000$ ,  $3035$  și  $3070$  [s] VUM sunt  
 $\omega(3000) = 800.22[\text{rad} / \text{s}]$ ,  $\omega(3035) = 800.65[\text{rad} / \text{s}]$  și  
 $\omega(3070) = 801.06[\text{rad} / \text{s}]$  rezultând puterile echivalente:

$$P_{ECH} = 50 \cdot (800.65^2 - 800.22^2) / (70) = 491.70[\text{W}]$$

$$P_{ECH} = 50 \cdot (801.06^2 - 800.65^2) / (70) = 469.07[\text{W}]$$

Pentru  $t=4000$ ,  $4035$  și  $4070$  [s], rezultă:  
 $\omega(4000) = 808.71[\text{rad} / \text{s}]$ ,  $\omega(4035) = 808.84[\text{rad} / \text{s}]$  și  $\omega(4070) = 808.96[\text{rad} / \text{s}]$  și  
 puterile echivalente:

$$P_{ECH} = 50 \cdot (808.84^2 - 808.71^2) / (70) = 150.2[\text{W}]$$

$$P_{ECH} = 50 \cdot (808.96^2 - 808.84^2) / (70) = 138.67[\text{W}]$$

În final, pentru  $t=5000$ ,  $5035$  și  $5070$  [s] se obțin VUM  
 $\omega(5000) = 811.06[\text{rad} / \text{s}]$ ,  $\omega(5035) = 811.09[\text{rad} / \text{s}]$  și  $\omega(5070) = 811.11[\text{rad} / \text{s}]$  și  
 puterile echivalente:

$$P_{ECH} = 50 \cdot (811.09^2 - 811.06^2) / (70) = 34.76[\text{W}]$$

$$P_{ECH} = 50 \cdot (811.11^2 - 811.09^2) / (70) = 23.174[\text{W}]$$

Valoarea maximă a lui  $P_{ECH}$  se obține în intervalul

$$\Delta\omega = 544.66[\text{rad} / \text{s}] \div 553.77[\text{rad} / \text{s}],$$

deci pentru

$$\omega_{OPTIM} = (544.66 + 553.77) / 2 = 549.22[\text{rad} / \text{s}]$$

La această valoare optimală pentru VUM și folosind rezultatul anterior obținut

$$\omega = 31.817V$$

se poate defini o viteză echivalentă a vântului,  $V_{ECH}$ , sub forma

$$V_{ECH-1} = \omega / 31.817 = 549.22 / 31.817 = 17.23[\text{m} / \text{s}]$$

Pe baza rezultatelor de mai sus se poate defini funcția  $P_{ECH}(\omega)$  folosind viteza

$$\text{echivalentă } V_{ECH-1} = 17.23[\text{m} / \text{s}]$$

$$P_{ECH}(\omega) = 23.584 \cdot ((17.23)/\omega - 2.1231 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06((17.23)/\omega - 0.0525)} \cdot (17.23)^3$$

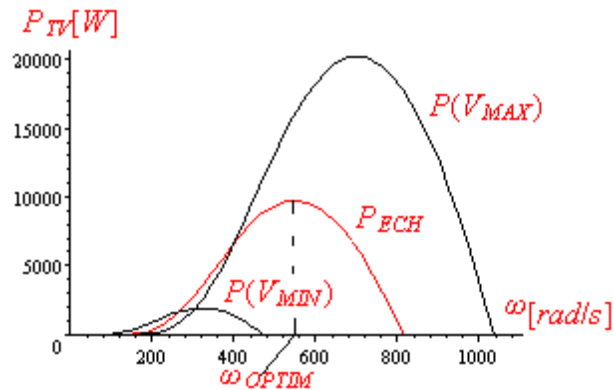


Fig.8.3.Puterea echivalentă la TV

În figura 8.3 sunt date caracteristicile puterilor

$P(V_{MAX})$ ,  $P(V_{MIN})$  și  $P(V_{ECH})$  corespunzătoare vitezelor: maximă  $V_{MAX}$ , minimă  $V_{MIN}$  și echivalentă  $V_{ECH-1}$ .

Așa cum se observă din figura 8.3, VUM finală la  $V(t) = 16 - 6 \sin(0.17943t)$  are valoarea

$$\omega_{FINAL-V_{ECH}} = 809.33 [rad / s]$$

iar la  $V_{MAX} = 22 [m / s]$  și  $V_{MIN} = 10 [m / s]$ , VUM sunt

$$\omega_{FINAL-V_{MAX}} = 1036.2 [rad / s] \text{ și } \omega_{FINAL-V_{MIN}} = 471.01 [rad / s]$$

Așadar, la o viteză a vântului  $V_{REAL}(t) = 16 - 6 \sin(0.17943t)$ , oscilând între  $V_{MAX} = 22 [m / s]$  și  $V_{MIN} = 10 [m / s]$  există o viteză a vântului, denumită viteză echivalentă,  $V_{ECH}$ , care stabilizează TV la funcționarea în gol la valoarea  $\omega_{FINAL-V_{ECH}}$  cuprinsă în intervalul  $\omega_{FINAL-V_{MIN}} ? \omega_{FINAL-V_{ECH}} ? \omega_{FINAL-V_{MAX}}$

### 8.2.1.2. Determinarea vitezei echivalente din $\omega_{FINAL}$

La momentele de timp  $t=111,115\dots155[s]$  se obțin următoarele valori pentru VUM și  $P_{ECH}$

$$\omega(111) = 485.95 [rad / s]$$

$$\omega(115) = 485.93 [rad / s]$$

$$\text{zona AB - } P_{ECH} = 50 \cdot (485.93^2 - 485.95^2) / (8.) = -121.49 [W], \omega(119) = 486.08 [rad / s]$$

$$\text{zona BC - } P_{ECH} = 50 \cdot (486.08^2 - 485.93^2) / (8.) = 911.26 [W], \omega(123) = 486.98 [rad / s]$$

$$\text{zona CD - } P_{ECH} = 50 \cdot (486.98^2 - 486.08^2) / (8.) = 5473.5 [W], \omega(127) = 488.67 [rad / s]$$

$$\text{zona DE - } P_{ECH} = 50 \cdot (488.67^2 - 486.98^2) / (8.) = 10305. [W], \omega(131) = 490.68 [rad / s]$$

$$\text{zona EF - } P_{ECH} = 50 \cdot (490.68^2 - 488.67^2) / (8.) = 12303. [W], \omega(135) = 492.71 [rad / s]$$

$$\text{zona FG - } P_{ECH} = 50 \cdot (492.71^2 - 490.68^2) / (8.) = 12477. [W], \omega(139) = 494.49 [rad / s]$$

zona GH -  $P_{ECH} = 50 \cdot (494.49^2 - 492.71^2) / (8.) = 10983. [W]$ ,  $\omega(143) = 495.52 [rad / s]$   
 zona HL -  $P_{ECH} = 50 \cdot (495.52^2 - 494.49^2) / (8.) = 6373.2 [W]$ ,  $\omega(147) = 495.71 [rad / s]$   
 zona LM -  $P_{ECH} = 50 \cdot (495.71^2 - 495.52^2) / (8.) = 1177.1 [W]$ ,  $\omega(151) = 495.64 [rad / s]$   
 zona MN -  $P_{ECH} = 50 \cdot (495.64^2 - 495.71^2) / (8.) = -433.72 [W]$ ,  $\omega(155) = 495.9 [rad / s]$   
 zona NO -  $P_{ECH} = 50 \cdot (495.9^2 - 495.64^2) / (8.) = 1611.3 [W]$

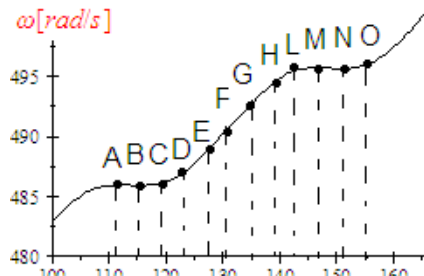


Fig. 8.5. Variația în timp a VUM

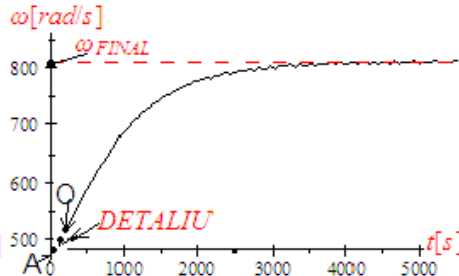


Fig. 8.4. Variația în timp a VUM(DETALIU)

La momentele de timp  $t=111,115\dots155[s]$  punctele de funcționare sunt :A,B,C,D,E,F,G,H,L,M,N și O, figura 8.4.

În zonele AB și MN puterile sunt negative:

$$P_{ECH-AB} = -121.49 [W] \text{ și } P_{ECH-MN} = -433.72 [W]$$

Acest fapt se poate observa și din caracteristicile puterilor date în figura 8.6.

La viteza maximă a vântului  $V_{MAX} = 22 [m / s]$  și la cea minimă  $V_{MIN} = 10 [m / s]$  puterile sunt

$$P_{TV-1}(\omega) = 23.584 \cdot \left( \frac{22}{\omega} - 2.1231 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06 \left( \frac{22}{\omega} - 0.0525 \right)} \cdot (22)^3 \text{ -la } V_{MAX} = 22 [m / s]$$

$$P_{TV-2}(\omega) = 23.584 \cdot \left( \frac{10}{\omega} - 2.1231 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06 \left( \frac{10}{\omega} - 0.0525 \right)} \cdot (10)^3 \text{ -la } V_{MIN} = 10 [m / s]$$

Punctele de funcționare :A,B,C,D,E,F,G,H,L,M,N și O, pe caracteristicile puterilor, figura 8.6, sunt în zona

$$\omega = 485.95 [rad / s] \div 495.9 [rad / s]$$

La  $t = 5555 [s]$  VUM are valoarea

$$\omega(5555) = \omega_{FINAL} = 809.33 [rad / s]$$

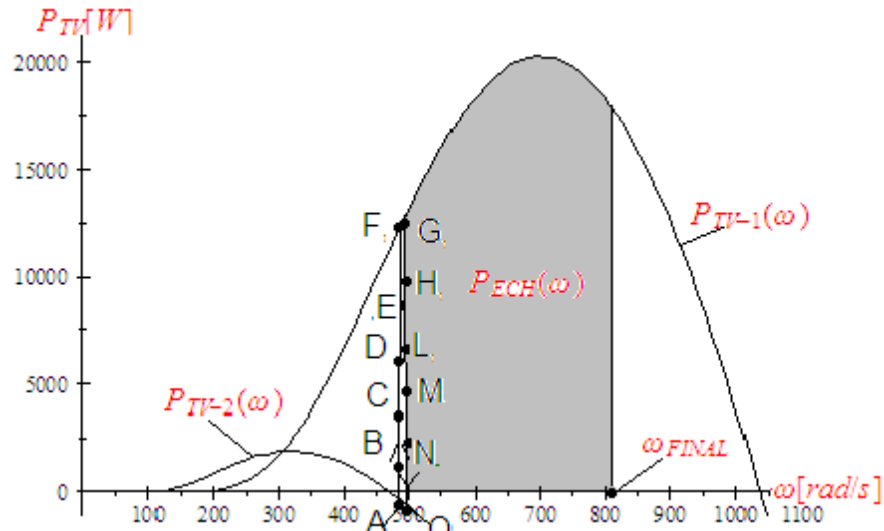


Fig.8.6.Caracteristicile puterilor

### Importanța valorii lui $\omega_{FINAL}$

Cunoscând VUM de la funcționarea în gol, în regim stabilizat,  $\omega_{FINAL}$ , se poate defini o viteză echivalentă,  $V_{ECH-2}$ , constantă, la care puterea echivalentă este nulă

$$P_{ECH}(\omega_{FINAL}, V_{ECH-2}) = 0$$

sau

$$P_{ECH}(\omega) = 23.584 \cdot \left( \frac{V_{ECH-2}}{\omega_{FINAL}} - 2.1231 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06 \left( \frac{V_{ECH-2}}{\omega_{FINAL}} - 0.0525 \right)} \cdot (V_{ECH-2})^3 = 0$$

de unde se obține

$$23.584 \cdot \left( \frac{V_{ECH-2}}{809.33} - 2.1231 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06 \left( \frac{V_{ECH-2}}{809.33} - 0.0525 \right)} \cdot (V_{ECH-2})^3 = 0 \quad \text{cu soluția}$$

$$V_{ECH-2} = 17.183 [m/s]$$

Cunoscând valoarea  $V_{ECH}$  se poate determina legătura acesteia cu  $V_{REAL}$ , propunând în acest sens o estimare de formă integrală, cu formula

$$V_{ECH} = \sqrt[n]{\int_0^T (V(t))^n dt}$$

La  $V_{ECH} = (17.183 + 17.23) / 2 = 17.207 [m/s]$  și cu  $V_{REAL} = V(t) = 16 - 6 \sin(0.17943t)$  se obține  $n = 3.56$

### 8.3. Considerarea momentului de frecări

Ecuția mișcării la un moment al frecării de valoare  $M_F$ , este

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{TV} - M_F$$

prin înmulțire cu  $\omega$  se obține puterea dată de turbină

$$J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega + M_F \cdot \omega = \omega \cdot M_{TV} = P_{TV}$$

Prin integrare se obține energia mecanică captată în intervalul de timp T sub forma:

$$W_{MEC} = \int_0^T \omega \cdot M_{TV} \cdot dt = J \cdot \left( \omega_k^2 - \omega_{k-1}^2 \right) / 2 + \int_0^T \omega \cdot M_F \cdot dt = P_{ECH} \cdot T$$

sau puterea echivalentă,  $P_{ECH}$ , la VUM  $\omega_k^* = (\omega_k + \omega_{k-1}) / 2$

$$P_{ECH} = \left( J \cdot \left( \omega_k^2 - \omega_{k-1}^2 \right) + \int_0^T \omega \cdot M_F \cdot dt \right) / (2 \cdot T)$$

unde:  $J$  – momentul de inerție echivalent;  $\omega_k$  – VUM la momentul  $t_k$ ;  $\omega_{k-1}$  – VUM la momentul  $t_{k-1}$ .

#### 8.4. Determinarea modelului matematic al TV printr-o probă la funcționarea în gol

Din proba de funcționare în gol și prin măsurarea VUM, la generator sau la turbină, se obțin date deosebit de importante privind caracteristicile reale ale puterii TV. Aceste rezultate obținute pot valida sau invalida modelul matematic al TV dat de firma constructoare  
Modelul matematic acceptat în literatura de specialitate este de forma [1,3,4,11,15,17,22]

$$P_{TV}(\omega_T, V) = kV^3 C_p(\lambda, \omega_T)$$

unde :

$$\lambda = \frac{\omega_T R}{V}; \omega_T - \text{viteza unghiulară mecanică a turbinei}; R - \text{raza paletelor}; V - \text{viteza vântului}$$

$$C_p(\lambda, \omega_T) = 0.56 \left( \frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-21/\lambda_i}$$

$$\lambda_i = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{1 + \beta^3}; \beta - \text{unghiul de înclinare a paletelor}$$

La generator VUM este  $\omega = k_{RED} \cdot \omega_T$ , unde  $k_{RED}$  este raportul de transformare dintre TV și GSMP.

Pentru putere se obține la  $\beta = ct.$ , în final, expresia

$$P_{TV}(\omega_T, V) = a(b \cdot A - c) \cdot e^{d \cdot A} \cdot V^3$$

unde :  $A = \frac{f \cdot V + \omega}{h \cdot V - g \cdot \omega}$ ;  $a, b, c, d$  – constante dimensionale ce urmează a fi determinate

La funcționarea în gol, la viteze ale vântului variabile în timp și la puteri mari, cu momente de inerție echivalente mari, VUM crește asimptotic spre o valoare finală  $\omega(\infty) = \omega_{FINAL}$  oscilând în jurul unei valori medii. Valoarea amplitudinii oscilațiilor VUM este invers proporțională cu valoarea momentului de inerție echivalent al sistemului TV+GSMP. La puteri de ordinul kW și MW oscilațiile VUM, în jurul valorii  $\omega_{FINAL}$  nu sunt observabile.

Puterea turbinei devine 0 la  $\omega_{FINAL}$ , sau

$$bA - c = 0$$

rezultând

$$A = c / b$$

sau

$$\frac{f \cdot V + \omega}{h \cdot V - g \cdot \omega} = c / b$$

La funcționarea în gol la  $t = 4444$  [s] se obține

$$\omega_{FINAL} = \omega(4444) = 809.33 \text{ [rad / s]}$$

Punând valoarea puterii sub forma

$$P_{TV}(\omega, V) = x \cdot ((V - \omega y) / (wV + z\omega)) \cdot e^{-p(V - \omega q) / (wV + z\omega)} \cdot (V)^3$$

rezultă prima ecuație a sistemului algebric în necunoscutele  $x, y, z, w, p$  și  $q$

$$V - \omega_{FINAL} \cdot y = 0$$

La  $V_{ECH} = 17.207$  [m / s] se obține

$$17.207 - y \cdot 809.33 = 0,$$

cu soluția:  $y = 2.1261 \times 10^{-2}$

La momentele de timp  $t = 0, 5, 10, 15$  [s], din măsurători în funcționare și din simulări în momentul de față se obțin VUM, puterile echivalente și vitezele vântului  
Prin rezolvarea ecuației mișcării, la funcționarea în gol



$$\left\{ \begin{array}{l} 50 \cdot \omega \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot ((16 - 6 \sin(0.17943t))/\omega - 2.1231 \times 10^{-2}) \cdot \\ e^{-98.06((16-6 \sin(0.17943t))/\omega - 0.0525)} \cdot (16 - 6 \sin(0.17943t))^3 \\ \omega(0) = 455.66 \end{array} \right.$$

rezultă

-la  $V(0) = 16 - 6 \sin(0.17943 \cdot 0) = 16 [m/s]$  și  $\omega(0) = 455.66 [rad/s]$

-la  $V(5) = 16 - 6 \sin(0.17943 \cdot 5) = 11.311 [m/s]$  și  $\omega(5) = 456.65 [rad/s]$

$$P_{ECH} = 50 \cdot (456.65^2 - 455.66^2) / (10) = 4515.9 [W]$$

-la  $V(2.5) = 16 - 6 \sin(0.17943 \cdot 2.5) = 13.398 [m/s]$ ,  $\omega(2.5) = 456.31 [rad/s]$

-la  $V(10) = 16 - 6 \sin(0.17943 \cdot 10) = 10.149 [m/s]$  și  $\omega(10) = 456.8 [rad/s]$

$$P_{ECH} = 50 \cdot (456.8^2 - 456.65^2) / (10) = 685.09 [W]$$

-la  $V(7.5) = 16 - 6 \sin(0.17943 \cdot 7.5) = 10.151 [m/s]$ ,  $\omega(7.5)$

-la  $V(15) = 16 - 6 \sin(0.17943 \cdot 15) = 13.389 [m/s]$  și  $\omega(15) = 457.25 [rad/s]$

$$P_{ECH} = 50 \cdot (457.25^2 - 456.8^2) / (10) = 2056.6 [W]$$

-la  $V(12.5) = 16 - 6 \sin(0.17943 \cdot 12.5) = 11.305 [m/s]$ ,  $\omega(12.5) = 456.91 [rad/s]$

La momentele de timp  $t=100,105,110$  [s] se obțin rezultatele

-la  $V(100) = 16 - 6 \sin(0.17943 \cdot 100) = 20.724 [m/s]$  și  $\omega(100) = 482.92 [rad/s]$

-la  $V(105) = 16 - 6 \sin(0.17943 \cdot 105) = 16.056 [m/s]$  și  $\omega(105) = 485.02 [rad/s]$

$$P_{ECH} = 50 \cdot (485.02^2 - 482.92^2) / (10) = 10163. [W]$$

-la  $V(102.5) = 16 - 6 \sin(0.17943 \cdot 102.5) = 18.653 [m/s]$ ,  $\omega(102.5) = 484.07 [rad/s]$

-la  $V(110) = 16 - 6 \sin(0.17943 \cdot 110) = 11.346 [m/s]$  și  $\omega(110) = 485.91 [rad/s]$

$$P_{ECH} = 50 \cdot (485.91^2 - 485.02^2) / (10) = 4320.6 [W]$$

-la  $V(107.5) = 16 - 6 \sin(0.17943 \cdot 107.5) = 13.449 [m/s]$ ,  $\omega(107.5) = 485.64 [rad/s]$

Se obțin următoarele ecuații în necunoscutele  $x, z, w, p$  și  $q$

-la  $V = 13.398 [m/s]$ ,  $\omega = 456.31 [rad/s]$  și  $P_{ECH} = 4515.9 [W]$

$$4515.9 = x \cdot ((13.398 - 2.1261 \times 10^{-2} \cdot 456.31) / (w13.398 + z456.31)) \cdot$$

$$e^{-p(13.398-456.31q)/(w13.398+z456.31)} \cdot (13.398)^3$$

-la  $V = 10.151 [m/s]$ ,  $\omega = 456.76 [rad/s]$  și  $P_{ECH} = 685.09 [W]$

$$685.09 = x \cdot ((10.151 - 2.1261 \times 10^{-2} \cdot 456.76) / (w10.151 + z456.76)) \cdot$$

$$e^{-p(10.151-456.76q)/(w10.151+z456.76)} \cdot (10.151)^3$$

-la  $V = 11.305 [m/s]$ ,  $\omega = 456.91 [rad/s]$  și  $P_{ECH} = 2056.6 [W]$

$$2056.6 = x \cdot ((11.305 - 2.1261 \times 10^{-2} \cdot 456.91) / (w11.305 + z456.91)) \cdot$$

$$e^{-p(11.305-456.91q)/(w11.305+z456.91)} \cdot (11.305)^3$$

-la  $V = 18.653 [m/s]$ ,  $\omega = 484.07 [rad/s]$  și  $P_{ECH} = 10163. [W]$

$$10163. = x \cdot \left( (18.653 - 2.1261 \times 10^{-2} \cdot 484.07) / (w18.653 + z484.07) \right) \cdot e^{-p(18.653-484.07q)/(w18.653+z484.07)} \cdot (18.653)^3$$

-la  $V = 13.449 [m / s]$ ,  $\omega = 485.64 [rad / s]$  și  $P_{ECH} = 2056.6 [W]$

$$4320.6 = x \cdot \left( (13.449 - 2.1261 \times 10^{-2} \cdot 485.64) / (w13.449 + z485.64) \right) \cdot e^{-p(13.449-485.64q)/(w13.449+z485.64)} \cdot (13.449)^3$$

Necunoscutele  $x, z, w, p, q$  se determină din sistemul:

$$\left\{ \begin{array}{l} 4515.9 = x \cdot \left( (13.398 - 2.1261 \times 10^{-2} \cdot 456.31) / (w13.398 + z456.31) \right) \cdot e^{-p(13.398-456.31q)/(w13.398+z456.31)} \cdot (13.398)^3 \\ 685.09 = x \cdot \left( (10.151 - 2.1261 \times 10^{-2} \cdot 456.76) / (w10.151 + z456.76) \right) \cdot e^{-p(10.151-456.76q)/(w10.151+z456.76)} \cdot (10.151)^3 \\ 2056.6 = x \cdot \left( (11.305 - 2.1261 \times 10^{-2} \cdot 456.91) / (w11.305 + z456.91) \right) \cdot e^{-p(11.305-456.91q)/(w11.305+z456.91)} \cdot (11.305)^3 \\ 10163. = x \cdot \left( (18.653 - 2.1261 \times 10^{-2} \cdot 484.07) / (w18.653 + z484.07) \right) \cdot e^{-p(18.653-484.07q)/(w18.653+z484.07)} \cdot (18.653)^3 \\ 4320.6 = x \cdot \left( (13.449 - 2.1261 \times 10^{-2} \cdot 485.64) / (w13.449 + z485.64) \right) \cdot e^{-p(13.449-485.64q)/(w13.449+z485.64)} \cdot (13.449)^3 \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} x = 23.57 \\ z = 1.001 \\ w = 0.001 \\ p = 98.006 \\ q = 0.0522 \end{array} \right.$$

Valorile obținute conduc la modelul:

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

#### 8.4.1. Modelul matematic simplificat al TV (MMS-TV)

Modelul simplificat poate fi pus sub forma:

$$P_{TV-SIMP}(\omega, V) = a \cdot (V_E) \cdot e^{-b(V_E)} \cdot (V)^3$$

unde:  $V_E = (V) / \omega - c$

Din VUM stabilizată  $\omega_{FINAL} = 809.33 [rad / s]$ , la  $V_{ECH} = 17.207 [m / s]$ , la care

$$P_{TV-SIMP}(\omega, V) = 0$$

se obține

$$0 = (V) / \omega - c$$

$$0 = (17.207) / 809.33 - c, \text{ cu soluția: } \{c = 2.1261 \times 10^{-2}\}$$

Maximul puterii se obține la  $\omega_{OPTIM} = 549.22 [rad / s]$ , obținut din anularea derivatei puterii

$$\frac{dP_{TV}(V_E)}{dV_E} = \frac{d}{dV_E} \left( a \cdot (V_E) \cdot e^{-b(V_E)} \cdot (V)^3 \right) = a e^{-bV_E} V^3 - a V_E b e^{-bV_E} V^3 = 0$$

sau

$$1 - V_E b = 0$$

Cu  $V_{ECH} = 17.183 [m / s]$  și cu  $\omega_{OPTIM} = 549.22 [rad / s]$ , figura 8.7, rezultă

$$b = 1/V_E = 1/((17.183)/549.22 - 2.1261 \times 10^{-2}) = 99.749$$

În intervalul de timp  $t=0-5 [s]$ , la  $\omega(0) = 455.66 [rad / s]$ ,  $\omega(5) = 456.65 [rad / s]$  și  $\omega = (\omega(0) + \omega(5))/2 = 456.31 [rad / s]$  a rezultat puterea echivalentă

$$P_{ECH} = 50 \cdot (456.65^2 - 455.66^2) / (10) = 4515.9 [W]$$

La  $P_{ECH} = 4515.9 [W]$  și la viteza momentană a vântului  $V = 13.398 [m / s]$ , cu  $\omega = 456.31 [rad / s]$  se obține

$$4515.9 = a \cdot ((13.398) / 456.31 - 2.1261 \times 10^{-2}) \cdot e^{-99.749((13.398) / 456.31 - 2.1261 \times 10^{-2})} \cdot (13.398)^3, \text{cu}$$

$$\text{soluția: } \{a = 507.78\}$$

Se obține astfel, modelul matematic simplificat al TV, sub forma, MMS-TV

$$P_{TV-SIMP}(\omega, V) = 507.78 \cdot ((V) / \omega - 2.1261 \times 10^{-2}) \cdot e^{-99.749((V) / \omega - 2.1261 \times 10^{-2})} \cdot (V)^3$$

La  $V = 22 [m / s]$  MMS-TV devine

$$P_{TV-SIMP}(\omega, 22) = 507.78 \cdot ((22) / \omega - 2.1261 \times 10^{-2}) \cdot e^{-99.749((22) / \omega - 2.1261 \times 10^{-2})} \cdot (22)^3$$

La  $V_{ECH} = 17.183 [m / s]$  rezultă

$$P_{TV-SIMP}(\omega, V_{ECH}) = 507.78 \cdot ((17.183) / \omega - 2.1261 \times 10^{-2}) \cdot e^{-99.749((17.183) / \omega - 2.1261 \times 10^{-2})} \cdot (17.183)^3$$

Pentru  $V = 22 [m / s]$  modelul matematic inițial este

$$P_{TV}(\omega, 22) = 23.584 \cdot ((22) / \omega - 2.1231 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06((22) / \omega - 0.0525)} \cdot (22)^3$$

Comparația între MMS-TV și MM-TV se observă din figura 8.7

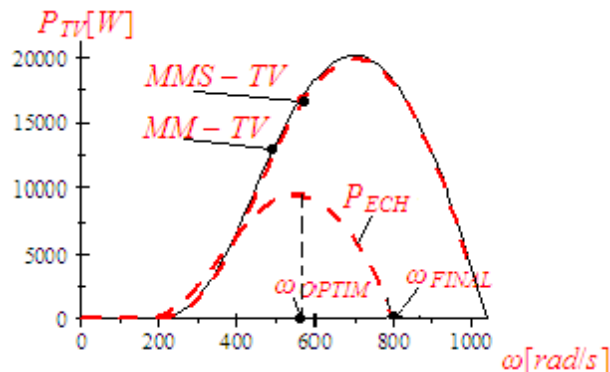


Fig.8.7. Modelele matematice ale TV

Diferențele dintre cele 2 modele, la  $V=22 [m/s]$ , sunt nesemnificative  
Algoritmul pentru estimarea MMS-TV, printr-o proba la funcționarea în gol este următorul:

**1)** se măsoară, eșantionat viteza vântului și VUM

**2)** se determină putere echivalentă din variația energiilor cinetice  $P_{ECH} = J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2) / (2 \cdot T)$

- 3) se determină VUM optimă  $\omega_{OPTIM}$
- 4) se determină VUM finală stabilizată,  $\omega_{FINAL}$
- 5) din  $\omega_{OPTIM}$ ,  $\omega_{FINAL}$  și  $P_{ECH}$  se determină constantele MMS-TV

În concluzie, MM-TV, se poate determina printr-o probă la funcționarea în gol și măsurând în timp viteza vântului și VUM.

### 8.5. Conducerea optimală a sistemului TV+GSMP

Prin măsurarea vitezei vântului cu anemometrul AN, figura 8.8, se determină viteza echivalentă  $V_{ECH}$  și apoi VUM optimă,  $\omega_{OPTIM}$ . Se compară  $\omega_{OPTIM}$  cu valoarea măsurată a VUM,  $\omega$ , și diferența lor

$$\Delta\omega = \omega_{OPTIM} - \omega$$

constituie mărime de intrare a regulatorului R. Mărimea de ieșire a regulatorului R este transmisă elementelor de comutație din convertoarele de putere interpușe între generator și rețea.

Se realizează, astfel, o funcționare în zona optimă din punct de vedere energetic, în condițiile în care viteza vântului variază semnificativ în timp.

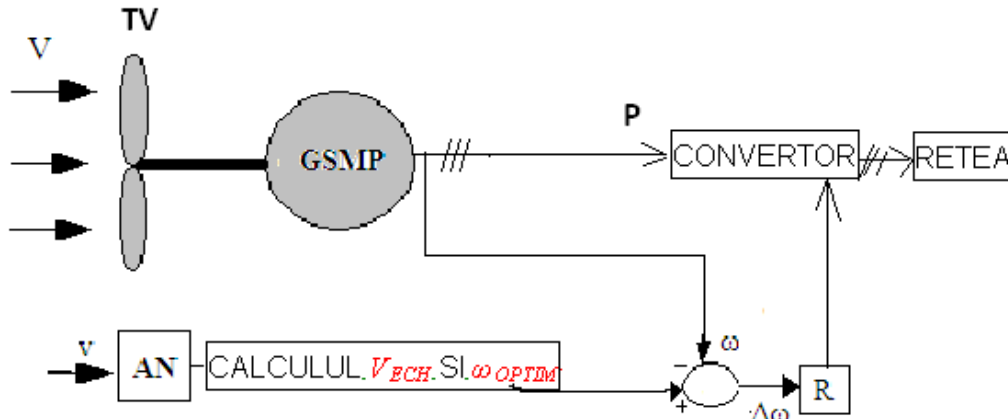


Fig. 8.8 Sistemul de conducere

#### 8.5.1. Determinare aproximativă a funcției $P_{ECH}(\omega)$

Determinarea aproximativă, dar rapidă a funcției  $P_{ECH}(\omega)$  se poate face direct din graficul funcției  $\omega(t)$ , la funcționarea în gol a sistemului

Înregistrând VUM de la valoarea inițială  $\omega(0) = 455.66 [rad/s]$ , într-un timp  $t = 2000[s]$  se obține graficul funcției  $\omega(t)$ , figura 8.9.

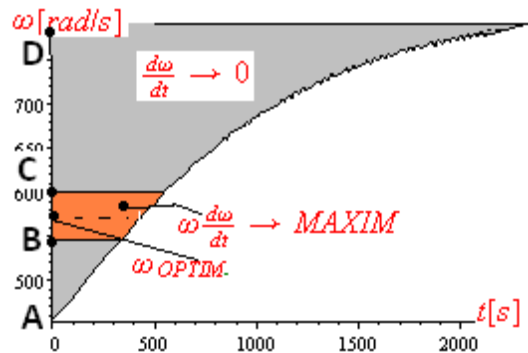


Fig. 8.9 Zona lui  $\omega_{OPTIM}$

Analizând graficul funcției  $\omega(t)$  și având în vedere că puterea echivalentă se determină din

$$P_{TV} = J \frac{d\omega}{dt} \omega$$

se pot distinge 3 regiuni de bază

- 1) zona **AB**-turații mici;
- 2) zona **BC**-turații medii;
- 3) zona **CD**-turații mari.

Valoarea derivatei  $\frac{d\omega}{dt}$  devine foarte mică în zona CD, zonă în care valorile lui  $\omega$  tind asimptotic spre  $\omega_{FINAL} = 811 [rad/s]$  și  $P_{ECH}$  scade la zero. La  $\omega_{FINAL}$  derivata devine nulă, VUM atingând o valoare stabilă, valoare mai mică decât  $\omega_{V_{MAX}} = 1040 [rad/s]$ , cea corespunzătoare vitezei maxime a vântului,  $V_{MAX}$ .

În zona BC valoarea produsului  $\omega \frac{d\omega}{dt}$  este maximă, deci  $P_{ECH}$  are valoarea maximă. Derivata are o valoare aproximativ constantă și valorile lui  $\omega$  cresc atingând în punctul C valoarea maximă. În această zonă se regăsește valoarea lui  $\omega_{OPTIM}$ , cu o eroare de  $-9.0\%$  la începutul intervalului, punctul B și  $+9.4\%$  la sfârșitul intervalului, punctul C.

În zona AB valoarea produsului  $\omega \frac{d\omega}{dt}$  este mai mică decât în zona BC, fiindcă valorile lui  $\omega$  sunt mici, începând de la  $\omega(0) = 455.66 [rad/s]$ .

În concret, prin analiza graficului funcției  $\omega(t)$  se poate localiza zona optimă, aceasta prin deplasarea pe grafic din zona turațiilor mari până în zona în care derivata  $\frac{d\omega}{dt}$  ia valori maxime.

Momentul începerii înregistrării VUM inițiale, adică valoarea  $\omega(0)$ , este dictat de valoarea vitezei vântului. La viteze ale vântului mici valoarea lui  $\omega(0)$  este mică.

Informațiile obținute dintr-o simplă probă de funcționare în gol sunt deosebit de utile deoarece se cunoaște, din date certe experimentale două mărimi funcționale de bază

- 1) valoarea VUM optime,  $\omega_{OPTIM}$

și

- 2) valoarea puterii echivalente  $P_{ECH}$ .

La această estimare aproximativă a lui  $\omega_{OPTIM}$  și  $P_{ECH}$  nu se pun probleme în alegerea timpului în care se fac măsurătorile, deoarece VUM,  $\omega_{REAL}$ , oscilează în vecinătatea VUM echivalente  $\omega_{ECH}$ , figura 8.10.

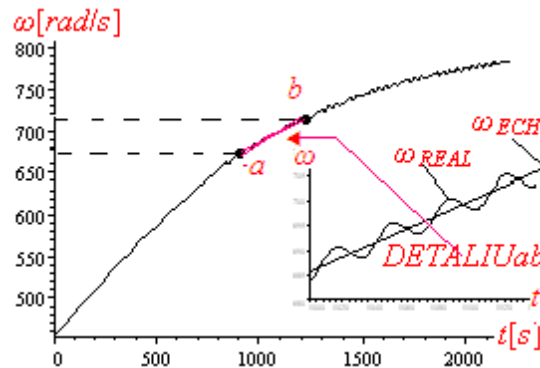


Fig.8.10 VUM reală și echivalentă

Alegerea nepotrivită a valorii pasului de eșantionare a măsurării VUM și fără a se ține cont de variația vitezei vântului în timp nu influențează sensibil graficul funcției  $\omega(t)$ .

La o analiză ce presupune un grad mai ridicat de precizie în determinarea lui  $\omega_{OPTIM}$  și  $P_{ECH}$ , este necesară corelarea pasului de eșantionare cu perioada de oscilație a vitezei vântului.

Alegerea corectă a pasului de eșantionare se face considerând perioada de oscilație a vitezei vântului, pasul de eșantionare fiind un multiplu a perioadei de oscilație a vitezei vântului, perioadă care însă se poate modifica în timp și deci pasul de eșantionare trebuie și el modificat, fapt destul de complicat deoarece acestea nu se pot face în timp real, evoluția în timp a vitezei vântului fiind imprevizibilă. Se pot folosi, totuși înregistrările meteo anterioare specifice locației respective și perioadei similare din an. Sunt zone în care perioada de oscilație este de ordinul secundelor, de exemplu 35[s], zona montană din România, sau zonele litoralului unde valoarea perioadei de oscilație a vântului este mare, de ordinul orelor.

## 8.6. Concluzii

La sistemele eoliene ce funcționează la viteze ale vântului variabile semnificativ în timp s-a determinat zona de maxim energetic, zonă caracterizată de VUM  $\omega_{OPTIM}$ .

Pentru determinarea lui  $\omega_{OPTIM}$  s-a introdus noțiunea de putere echivalentă a turbinei,  $P_{ECH}$ , care este dependentă de VUM,  $\omega$ . Maximul  $P_{ECH}$  este la  $\omega_{OPTIM}$ . Estimarea funcției și determinarea  $P_{ECH}(\omega)$  lui  $\omega_{OPTIM}$  se bazează pe valorile măsurate ale VUM de la arborele generatorului sau turbinei, la o funcționare în gol a sistemului, deci cu generatorul declupat de la sarcină. Puterea echivalentă,  $P_{ECH}$ , corespunde vitezei echivalente a vântului,  $V_{ECH}$ . Aceasta se calculează din valoarea reală a vântului măsurată cu anemometrul atașat turbinei, folosind un model matematic original și deosebit de util în aplicațiile curente, mai ales în locațiile în care viteza vântului variază, ca și valoare, semnificativ în timp. Prin urmare, realizarea optimului energetic, la un sistem eolian ce funcționează la viteze ale vântului variabile semnificativ în timp, se bazează pe date certe, măsuratori ale vitezei vântului și turației la turbină.

În continuare se prezintă o sinteză a contribuțiilor personale:

- acest capitol este în întregime original;
- s-a determinat viteza echivalentă a vântului și puterea echivalentă a turbinei printr-o probă la funcționarea în gol;
- s-a determinat viteza echivalentă a vântului printr-o probă la funcționarea în gol;
- s-a determinat modelul matematic al turbinei printr-o probă la funcționarea în gol;
- s-a propus și validat prin simulări un model matematic simplificat pentru turbina de vânt;
- s-a dat o metodă aproximativă, dar rapidă, pentru determinarea zonei de maxim a puterii echivalente;
- s-a determinat zona de maxim energetic, zonă caracterizată de VUM  $\omega_{OPTIM}$ ;
- s-a realizat optimul energetic, la un sistem eolian ce funcționează la viteze ale vântului variabile semnificativ în timp, pe baza măsurătorilor vitezei vântului și turației la turbină.

## 9.PUTEREA ECHIVALENTĂ ȘI FUNCȚIONAREA SISTEMULUI EOLIAN CU STOCARE ÎN ACUMULATOARE ELECTRICE

În acest capitol se pun bazele unor noțiuni fundamentale privind dinamica unui sistem eolian, în sensul introducerii conceptului de putere echivalentă a turbinei,  $P_{ECH}$ , asociată cu viteza vântului variabilă în timp.

Funcționarea sistemului eolian în punctul de putere maxim, MPP, este obiectivul principal al celor mai multe lucrări din domeniu [1-23]. Majoritatea, însă, iau în considerare o viteză a vântului constantă în timp [5-24]. În literatura de specialitate [1 ÷ 17] se tratează, în general, funcționarea TV la viteze ale vântului constante în timp. La viteze ale vântului variabile în timp problemele devin complexe și optimizarea din punct de vedere energetic a sistemului TV+GSMP este puțin abordată, cu excepția unor puține lucrări [1 ÷ 3]. În acest capitol se tratează tocmai acest aspect: optimul energetic la viteze ale vântului variabile semnificativ în timp. Se determină valoarea vitezei unghiulare mecanice optime:  $\omega_{OPTIM}$ , la care  $P_{ECH}$  este maximă, măsurând viteza vântului. Determinarea puterii echivalente se bazează pe variația în timp a VUM, care se obține, la funcționarea în gol, direct din măsurători de turație, iar în simulări prin rezolvarea ecuației mișcării. Datorită inerțiilor mecanice mari, pe un interval scurt de timp viteza unghiulară mecanică a turbinei nu se modifică sensibil și din acest motiv se poate considera constantă, pe respectivul interval de timp. În acel interval scurt de timp, în care viteza unghiulară mecanică, VUM, se consideră constantă, datorită vitezei variabile a vântului puterea reală a turbinei,  $P_{TV}$ , ia valori între  $P_{TV-MAX}$  -la maximul vitezei vântului și  $P_{TV-MIN}$  -la minimul vitezei vântului,  $P_{ECH}$  fiind constantă. Energia eoliană reală captată, pe o perioadă scurtă de timp, este aceeași cu energia generată de puterea echivalentă. Prin folosirea noțiunii de putere echivalentă,  $P_{ECH}$ , se poate localiza mai ușor zona de funcționare optimă din punct de vedere energetic.

În partea a doua a acestui capitol se determină energia înmagazinată în acumulatori electrice, AE, la un sistem eolian funcționând la viteze ale vântului variabile în timp. Energia mecanică captată de turbina de vânt (TV), se transformă în energie electrică de către generatorul sincron cu magneți permanenți, GSMP. Generatorul sincron cu magneți permanenți debitează, prin intermediul unui redresor, energie într-o baterie de AE, în două variante: varianta 1- redresor necomandat și varianta 2- redresor comandat și sarcină adaptată. Prin simulare se determină diferențele între cele două variante.

### 9.1.Considerații preliminare

Determinarea  $P_{ECH}$  se bazează pe o probă la funcționarea în gol a generatorului și pe baza puterii echivalente se poate determina valoarea turației, la care energia captată este maximă. Aceasta constituie problema fundamentală în orice sistem de conducere performant. Conducerea optimă a unui sistem eolian presupune extragerea, (captarea), unei energii maxime la o viteză a vântului variabilă semnificativ în timp. Aceasta impune controlul turației și cuplului la turbină și adaptarea sarcinii generatorului la viteza vântului. Determinarea turației corespunzătoare energiei maxime date de turbina de vânt,(TV), este obiectivul principal al acestei lucrări. Prin simulări se verifică metoda dată, considerând viteza vântului variabilă în timp. Determinarea legăturii dintre viteza vântului și turația optimă, din punct de vedere energetic se face o singură dată în etapa de omologare a turbinei.

Datorită inerțiilor mecanice mari, simulările și toate celelalte rezultate teoretice și practice trebuie să aibă la bază intervale de timp de minimum câteva ore, (de regulă peste 10[h]). Sistemele electroenergetice eoliene de mare putere sunt conduse având în vedere viteza medie a vântului [8 ÷ 17], dar acestea nu realizează maximul energetic. Recent s-au propus și structuri de conducere bazate pe măsurarea vitezei momentane a vântului [1 ÷ 5] și folosind un model matematic adecvat pentru TV.

La viteze ale vântului variabile între o valoare maximă,  $V_{MAX}$  și o valoare minimă,  $V_{MIN}$ , puterea reală a turbinei de vânt, ce funcționează la VUM  $\omega$ , în punctul F, figura 9.1., ia valori între  $P_{TV-MAX}$  și  $P_{TV-MIN}$ , într-un interval foarte scurt de timp, ordinul secundelor. În acest interval scurt de timp VUM nu se modifică semnificativ, [2], datorită inerțiilor mecanice mari ale sistemului TV+GSMP.

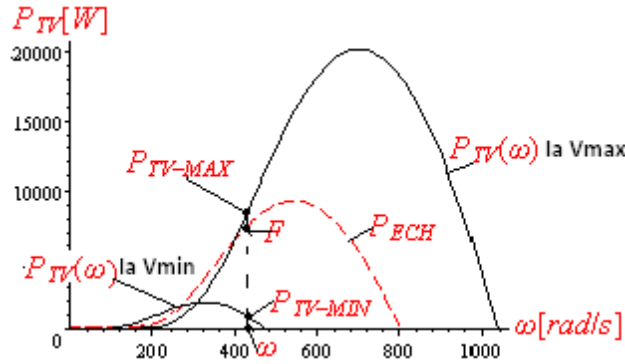


Fig.9.1. Caracteristicile puterilor la TV

La o viteză a vântului variabilă în timp, impusă de condițiile meteo, se pune problema determinării VUM optime  $\omega_{OPTIM}$ , astfel încât energia eoliană captată să fie maximă, într-un interval de timp dat. Maximul energetic corespunde cu maximul valorii lui  $P_{ECH}$ , la o viteză a vântului măsurată pe respectivul interval de timp. Puterea echivalentă se determină din energia eoliană reală captată în intervalul de timp dat.

## 9.2. Modelele matematice ale TV,GSMP și AE

Se are în vedere un model clasic, [14], pentru turbină, model ce permite estimarea vitezei unghiulare de referință -  $\omega_{ref}$ . Modelul matematic al TV permite determinarea orientativă a turației optime de funcționare, astfel ca energia captată să fie maximă.

Puterea dată de TV se calculează cu relația:

$$P_{TV} = \rho \pi R_p^2 C_p(\lambda) V^3$$

unde :

$\rho$  – densitatea aerului;

$R_p$  – raza paletelor;

$C_p(\lambda)$  – coeficient de conversie al puterii;

$\lambda = \omega R_p / V$  ;  $V$  – viteza vântului;

$\omega$  – viteza unghiulară mecanică, VUM

Coeficientul de conversie al puterii,  $C_p(\lambda)$ , se determină cu relația:

$$C_p(\lambda) = c_1 \left( \frac{c_2}{\lambda} - c_3 \right) e^{-\frac{c_4}{\lambda}}, \quad \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda} - 0.035, \quad c_1 - c_4 \text{ sunt constante, date în catalog.}$$

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda} - 0.035 = \frac{V}{R_p \omega} - 0.035 = (V/(1.5\omega) - 0.035)$$

Prin înlocuire, coeficientul de conversie al puterii,  $C_p(\lambda)$ , se obține sub forma:

$$C_p(\lambda) = c_1 \left( \frac{c_2}{\lambda} - c_3 \right) e^{-\frac{c_4}{\lambda}} = c_1 (c_2 (V/(1.5\omega) - 0.035) - c_3) e^{-c_4 \cdot (V/(1.5\omega) - 0.035)}$$

și puterea dată de TV se calculează cu relația:



$$P_{TV}(\omega, V) = \rho \pi R_p^2 C_p(\lambda) V^3 = 1.225 \pi 1.5^2 c_1 (c_2 (V / (1.5\omega) - 0.035) - c_3) \cdot e^{-c_4 (V / (1.5\omega) - 0.035)} V^3 = k_1 \cdot (c_2 (V / (1.5\omega) - 0.035) - c_3) e^{-c_4 (V / (1.5\omega) - 0.035)} V^3$$

sau

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

unde:  $k_1 = 1.225 \pi 1.5^2 c_1$ ;  $k_2 = c_2 / 1.5$ ;  $k_3 = c_4 / 1.5$

Pentru turbina de vânt, TV, se dau de către firma constructoare, [14], caracteristicile experimentale ale puterii,  $P_{TV}(\omega, V)$ , sau ale cuplului,  $M_{TV}(\omega, V)$ , acestea din urmă denumite și caracteristici mecanice experimentale:

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

unde :

$V$  – viteza vântului;

$\omega$  – viteza unghiulară mecanică, VUM

Valoarea maximă a funcției  $P_{TV}(\omega)$  se obține pentru VUM de referință  $\omega_{ref}$ , prin derivare :

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

obținându-se:

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

Rezultatul obținut demonstrează legătura directă dintre  $\omega_{ref}$  și viteza vântului.

În cazurile în care viteza vântului variază semnificativ în timp rezultatul obținut trebuie reanalizat, în sensul că maximele puterii TV se modifică. La două viteze ale vântului  $V_{MAX} = 22 [m/s]$  și  $V_{MIN} = 10 [m/s]$  caracteristicile puterii pentru TV,  $P_{TV}(\omega)$  și pentru AE + sarcină,  $P_{AE}(\omega) + P_S(\omega)$ , sunt date în figura 5.2.

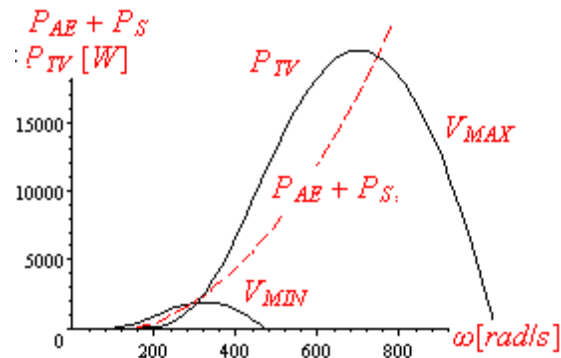


Fig.9.2 Dependențele puterilor de VUM,  $\omega$

La viteze ale vântului,  $V(t)$ , variabile în timp, puterea variază între o valoare minimă și o valoare maximă în funcție de valoarea VUM.

Pentru a analiza funcționarea sistemului (TV+GSMP), la viteze ale vântului variabile în timp, se folosește modelul matematic ortogonal pentru generatorul sincron cu magneți permanenți, (GSMP), dat în continuare prin ecuațiile[5]:

$$\begin{cases} -U\sqrt{3} \sin\theta = R_1 I_d - \omega L_q I_q \\ U\sqrt{3} \cos\theta = R_1 I_q + \omega L_d I_d + \omega \Psi_{MP} \\ M_G = p_1 (L_d - L_q) I_d I_q + I_q \Psi_{MP} \end{cases}$$

unde:

$U$  – tensiunea statorică;  
 $I_d, I_q$  – curenții statorici;  
 $M_G$  – momentul electromagnetic;  
 $\theta$  – unghiul de sarcină;  
 $R_1$  – rezistența înfășurării statorice;  
 $L_d$  – inductanța proprie a înfășurării statorice din axa d ;  
 $L_q$  – inductanța proprie a înfășurării rotorice din axa q;  
 $p_1$  – numărul perechilor de poli;  
 $\Psi_{MP}$  - fluxul magnetului permanent.

Din sistemul de ecuații ale GSMP se obțin: puterea-  $P_G$  și momentul-  $M_G$

Cele două funcții:  $P_G(R, \omega)$  și  $M_G(R, \omega)$  depind de :  $R$  – rezistența echivalentă de sarcină și  $\omega$  – VUM. Rezistența echivalentă de sarcină depinde de caracteristicile AE și de rezistența de sarcină  $R_S$  conectată la bornele redresorului.

Determinarea încărcării optime a sistemului TV+GSMP presupune cunoașterea turației la generator, astfel că energia captată să fie maximă, la viteze ale vântului variabile semnificativ în timp.

La o viteză a vântului variabilă în timp, de forma  $V(t) = b + a \sin \omega t$ , încărcarea optimă se obține la  $\omega = \omega_{ref}$ , prin adaptarea sarcinii generatorului, controlând valoarea puterii debitate în AE.

#### Modelul matematic al AE, (MM-AE)

Caracteristica externă la acumulatorul electric este funcția  $U(I)$  care la un acumulator acid cu plumb are forma:

$$U = E + R_{AE} \cdot I_{AE}$$

unde:

$U$  - tensiunea de la bornele AE;

$I_{AE}$  - curentul de încărcare;

$E$  - tensiunea electromotoare;

$R_{AE}$  - rezistența internă a acumulatorului;

Consumatorii conectați la bornele AE intervin prin rezistența de sarcină  $R_S$ , figura 9.3.

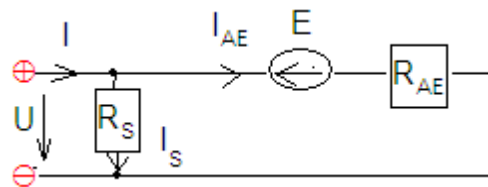


Fig.9.3. Schema electrică a AE

Din egalitatea puterilor, la generator și la bornele AE, rezultă

$$M_G \cdot \omega = U \cdot I = k \cdot \omega \cdot I$$

sau

$$M_G = k \cdot I$$

Din sistemul de ecuații

$$\left\{ \begin{array}{l} I = I_S + I_{AE} \\ U = I_S \cdot R_S \\ U = I_{AE} \cdot R_{AE} + E \\ U = k \cdot \omega \\ M_G = k \cdot I \end{array} \right.$$

rezultă momentul generatorului sub forma

$$M_G = k \cdot \left( \frac{k \cdot \omega}{R_S} + \frac{k \cdot \omega - E}{R_{AE}} \right)$$

Puterea dată de generator se regăsește în puterea  $P_{AE}$  acumulată în AE și în puterea  $P_S$  corespunzătoare sarcinii  $R_S$ , dacă se neglijează pierderile și, deci, rezultă:

$$P_G = P_{AE} + P_S = U \cdot I$$

Curentul la încărcarea AE se calculează din:

$$U = I_{AE} \cdot R_{AE} + E = k \cdot \omega$$

sau

$$I_{AE} = (k \cdot \omega - E) / R_{AE}$$

### 9.3. Puterea echivalentă

Pe un interval de timp T energia mecanică captată de TV are valoarea:

$$W_{mec} = \int_0^T P_{TV} \cdot dt$$

Puterea TV,  $P_{TV}(\omega, V)$ , depinde de  $\omega$  și V. Viteza vântului fiind impusă se pune problema maximizării lui  $P_{TV}(\omega)$  și acest fapt se realizează prin anularea derivatei:

$$\frac{dP_{TV}(\omega)}{d\omega} = 0$$

Pentru o turbină dată [14] caracteristica puterii are forma:

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

unde:

$\omega$  - VUM la arborele generatorului;

V - viteza vântului.

Prin anularea derivatei se obține:

$$\frac{dP_{TV}(\omega)}{d\omega} = \frac{d}{d\omega} \left( 23.584 \cdot \left( (V) / \omega - 2.1231 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06((V)/\omega - 0.0525)} \cdot (V)^3 \right) = 0$$

cu soluția:  $\{\omega = 31.817V\}$ .

Pentru a funcționa în zona maximă, din punct de vedere al puterii,  $P_{TV}(\omega, V)$ , viteza unghiulară mecanică,  $\omega$ , ar trebui să se modifice într-un timp foarte scurt, așa ca și viteza vântului V, dar datorită inerțiilor mecanice mari ea este constantă,  $\omega = ct$ , [1].

În aceste condiții se pune problema determinării VUM optime,  $\omega_{OPTIM}$ , din măsuratori ale vitezei vântului și printr-o calibrare prealabilă a TV. Această calibrare inițială se face la o funcționare în gol și prin măsurarea periodică a VUM.

La viteze ale vântului,  $V(t)$ , variabile în timp cu perioada T=35[s], de forma:

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

puterea variază între o valoare minimă, la viteza minimă,  $V_{MIN}$  și o valoare maximă, la viteza

maximă,  $V_{MAX}$ , figura 1.

Pentru a funcționa la putere maximă este necesar ca VUM să se modifice de la valoarea minimă la valoarea maximă într-un timp foarte mic,  $t=35[s]$ , timp dictat de variația în timp a vitezei vântului, care are perioada  $T=35[s]$ . Datorită inerțiilor mecanice foarte mari modificarea VUM, în acest interval de timp, nu este posibilă.

Din acest motiv se pune problema definirii unei puteri echivalente a TV, putere care la o anumită VUM,  $\omega$ , are o valoare bine precizată. Determinarea puterii echivalente se bazează numai pe măsurarea VUM la o funcționare în gol a TV.

## 9.4. Puterea echivalentă și viteza echivalentă

Din ecuația mișcării :

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{TV}$$

prin înmulțire cu  $\omega$  se obține puterea dată de turbină:

$$J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega = \omega \cdot M_{TV} = P_{TV}$$

Prin integrare se obține energia mecanică captată în intervalul de timp T sub forma:

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

sau puterea echivalentă,  $P_{ECH}$ , la VUM  $\omega_k^* = (\omega_k + \omega_{k-1}) / 2$

$$P_{ECH} = J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2) / (2 \cdot T)$$

unde:

$J$  – momentul de inerție echivalent;

$\omega_k$  – VUM la momentul  $t_k$  ;

$\omega_{k-1}$  – VUM la momentul  $t_{k-1}$  .

Puterea echivalentă a turbinei  $P_{ECH}(\omega)$ , generează aceeași formă de variație în timp a VUM ca și puterea reală,  $P_{TV}$  putere care oscilează ca și valoare între puterea maximă dată de TV la  $V_{MAX} = 22[m/s]$  și puterea minimă dată de TV la  $V_{MIN} = 10[m/s]$ , figura 1.

Măsurând, în exploatare și din ecuația mișcării, în simulare, se determină VUM la intervale de timp  $\Delta t$  și apoi se calculează puterea echivalentă cu relația :

$$P_{ECH} = J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2) / (2 \cdot T) = 50 \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2) / (2\Delta t)$$

Simulările prezentate în lucrare se bazează pe modelele matematice clasice ale TV și GSMP, preluate din [14]. La o viteză a vântului variabilă în timp de forma :

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

se obține viteza echivalentă,  $V_{ECH}$ , asociată lui  $P_{ECH}$ , folosind relația de optim anterior calculată:

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

Pentru viteza echivalentă a vântului,  $V_{ECH}$ , se propune o relație bazată pe integrala vitezei reale:  $V(t)$ , pe durata unei perioade:  $T=35[s]$ . Prin integrala vitezei se poate ține seama de forma reală a variației vitezei vântului în timp. În acest sens, se propune o relație de forma:

$$V_{ECH} = \sqrt[3]{\frac{1}{35} \int_0^{35} (V(t))^n dt}$$

La  $\omega_{OPTIM} = 549.22[rad/s]$ , dedus în cele ce urmează, se obține pentru n valoarea:  $n=3.56$  și deci, la  $V(t) = 16 - 6 \cdot \sin(0.17943t)$ , rezultă:

$$V_{ECH} = \sqrt[3.56]{\frac{1}{35} \int_0^{35} (16 - 6 \cdot \sin(0.17943t))^{3.56} dt} = 17.309[m/s],$$

Pentru cele trei viteze:  $V(t)$  - viteza reală,  $V_{MEDIU}$  - viteza medie și  $V_{ECH}$  - viteza echivalentă, se obțin ecuațiile mișcării, la funcționarea în gol, sub forma

$$50 \cdot \omega \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) / \omega - 2.1231 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06((16 - 6 \sin(0.17943t)) / \omega - 0.0525)} \cdot (16 - 6 \sin(0.17943t))^3 \quad \text{-la}$$

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

$$50 \cdot a \frac{da}{dt} = 23.584 \cdot \left( (16) / a - 2.1231 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06((16) / a - 0.0525)} \cdot (16)^3 \quad \text{-la}$$

$$V_{MEDIU} = 16[m/s] \text{ și } a - \text{VUM}$$

$$50 \cdot c \frac{dc}{dt} = 23.584 \cdot \left( (17.309) / c - 2.1231 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06((17.309) / c - 0.0525)} \cdot (17.309)^3 \quad \text{-la}$$

$$V_{ECH} = 17.309[m/s] \text{ și } c - \text{VUM}$$

Sistemul de ecuații diferențiale cu vitezele unghiulare mecanice  $\omega$ ,  $a$  și  $c$  devine

$$\left\{ \begin{array}{l} 50 \cdot \omega \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) / \omega - 2.1231 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06((16 - 6 \sin(0.17943t)) / \omega - 0.0525)} \cdot (16 - 6 \sin(0.17943t))^3 \\ 50 \cdot a \frac{da}{dt} = 23.584 \cdot \left( (16) / a - 2.1231 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06((16) / a - 0.0525)} \cdot (16)^3 \\ 50 \cdot c \frac{dc}{dt} = 23.584 \cdot \left( (17.309) / c - 2.1231 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06((17.309) / c - 0.0525)} \cdot (17.309)^3 \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \omega(0) = 455.66 \\ a(0) = 455.66 \\ c(0) = 455.66 \end{array}$$

și prin rezolvarea lui se obțin variațiile în timp ale celor trei viteze, figurile 9.4. și 9.5.

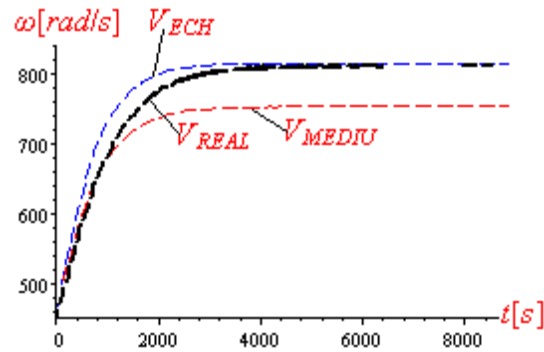


Fig.9.4.Variația în timp a VUM pentru 3 viteze ale vântului

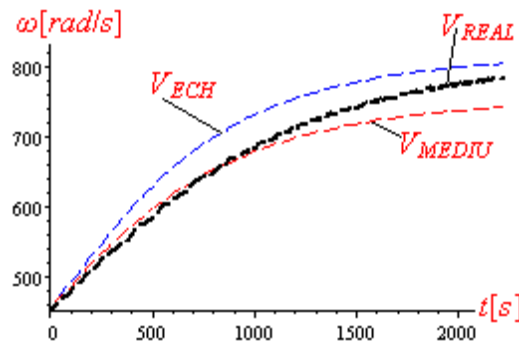


Fig.9.5.Variația în timp a VUM (detaliu)

Rezultă din evoluția în timp a VUM, la cele 3 valori pentru viteza vântului, figurile 9.4 și 9.5 , următoarele:

- 1) viteza unghiulară mecanică stabilizată are aceeași valoare la  $V_{REAL}$  și  $V_{ECH}$
- 2) la  $V_{MEDIU}$  VUM se stabilizează sub valoarea corespunzătoare vitezei reale  $V_{REAL}$
- 3) abaterile VUM,  $\omega$ , față de cele aferente lui  $V_{REAL}$  sunt de 5.7143% , pentru  $V_{ECH}$  și -6.84% pentru  $V_{MEDIU}$  .

## 9.5.Determinarea puterii echivalente printr-o probă la funcționarea în gol

Prin rezolvarea ecuației mișcării, la funcționarea în gol

$$\begin{cases} 50 \cdot \omega \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) / \omega - 2.1231 \times 10^{-2} \right) \cdot \\ e^{-98.06 \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) / \omega - 0.0525 \right)} \cdot (16 - 6 \sin(0.17943t))^3 \\ \omega(0) = 455.66 \end{cases}$$

se obține variația în timp a VUM, figura.9.6.

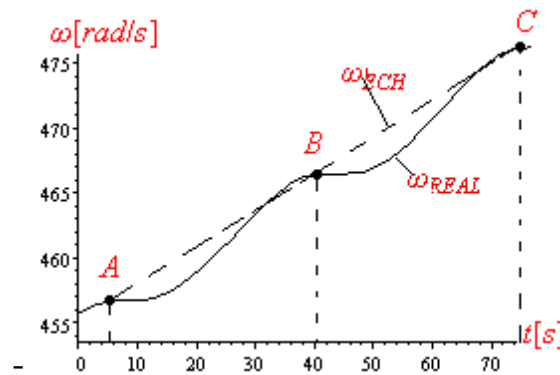


Fig.9.6. Variația în timp a VUM

Valorile VUM echivalente,  $\omega_{ECH}$ , se măresc , aproximativ liniar în timp, deoarece viteza echivalentă a vântului este constantă,  $V_{ECH} = ct$ , așa cum se observă din figura 9.6.

Variația VUM reale,  $\omega_{REAL}$ , este oscilantă, având intervale de timp unde  $\omega$  este aproximativ constantă, după care urmează o creștere accentuată, așa cum se observă din graficul lui  $\omega_{REAL}$ , figura 9.6.

Așa cum se poate observa din variația în timp a lui  $\omega_{REAL}$  din figura 9.6, există intervale de timp în care  $\omega_{REAL} = ct$  și în care puterea dată de TV este nulă sau chiar negativă, aceasta datorită valorilor mici a vitezelor vântului, la acele momente de timp. La valoarea minimă a vitezei vântului,  $V_{MIN}$ , puterea TV este redusă și la  $\omega = 480 [rad / s]$  este chiar negativă, figura 9.6.

Prin urmare, valoarea intervalului de măsură a VUM este foarte importantă și trebuie colerată cu valoarea perioadei variației în timp a vitezei vântului. La momentele de timp  $t=5,40$  și  $75$  [s], VUM sunt:

$$\omega(5) = 456.71 [rad / s], \omega(40) = 466.37 [rad / s] \text{ și } \omega(75) = 476.13 [rad / s]$$

În zona AB puterea echivalentă are valoarea:

$$P_{ECH} = 50 \cdot (\omega(40)^2 - \omega(5)^2) / (70) = 50 \cdot (466.37^2 - 456.71^2) / (70) = 6369.3 [W]$$

În zona BC puterea echivalentă este:

$$P_{ECH} = 50 \cdot (\omega(75)^2 - \omega(40)^2) / (70) = 50 \cdot (476.13^2 - 466.37^2) / (70) = 6570.6 [W]$$

La momentele de timp  $t=300, 335, 370$  și  $405$  [s], se obțin VUM  $\omega(300) = 535.42[\text{rad/s}]$ ,  $\omega(335) = 544.66[\text{rad/s}]$ ,  $\omega(370) = 553.77[\text{rad/s}]$  și  $\omega(405) = 562.72[\text{rad/s}]$  și rezultă puterile echivalente:

$$P_{ECH} = 50 \cdot (544.66^2 - 535.42^2)/(70) = 7128.5[\text{W}]$$

$$P_{ECH} = 50 \cdot (553.77^2 - 544.66^2)/(70) = 7147.6[\text{W}]$$

$$P_{ECH} = 50 \cdot (562.72^2 - 553.77^2)/(70) = 7137.6[\text{W}]$$

La momentele de timp  $t=500, 535$  și  $570$  [s], se obțin VUM  $\omega(500) = 587.7[\text{rad/s}]$ ,  $\omega(535) = 596.01[\text{rad/s}]$  și  $\omega(570) = 604.1[\text{rad/s}]$  și rezultă puterile echivalente:

$$P_{ECH} = 50 \cdot (596.01^2 - 587.7^2)/(70) = 7026.2[\text{W}]$$

$$P_{ECH} = 50 \cdot (604.1^2 - 596.01^2)/(70) = 6934.9[\text{W}]$$

Pentru  $t=1000, 1035$  și  $1070$  [s] VUM sunt:  $\omega(1000) = 683.69[\text{rad/s}]$ ,  $\omega(1035) = 688.89[\text{rad/s}]$  și  $\omega(1070) = 693.9[\text{rad/s}]$  și puterile echivalente au valorile:

$$P_{ECH} = 50 \cdot (688.89^2 - 683.69^2)/(70) = 5098.2[\text{W}]$$

$$P_{ECH} = 50 \cdot (693.9^2 - 688.89^2)/(70) = 4948.4[\text{W}]$$

La momentele de timp  $t=1500, 1535$  și  $1570$  [s] se obțin VUM:  $\omega(1500) = 745.06[\text{rad/s}]$ ,  $\omega(1535) = 747.96[\text{rad/s}]$  și  $\omega(1570) = 750.74[\text{rad/s}]$  și puterile echivalente sunt:

$$P_{ECH} = 50 \cdot (747.96^2 - 745.06^2)/(70) = 3092.7[\text{W}]$$

$$P_{ECH} = 50 \cdot (750.74^2 - 747.96^2)/(70) = 2976.0[\text{W}]$$

Pentru  $t=2000, 2035$  și  $2070$  [s], din ecuația mișcării rezultă:  $\omega(2000) = 776.85[\text{rad/s}]$ ,  $\omega(2035) = 778.42[\text{rad/s}]$  și  $\omega(2070) = 779.92[\text{rad/s}]$  și puterile echivalente:

$$P_{ECH} = 50 \cdot (778.42^2 - 776.85^2)/(70) = 1744.1[\text{W}]$$

$$P_{ECH} = 50 \cdot (779.92^2 - 778.42^2)/(70) = 1669.7[\text{W}]$$

În mod similar la  $t=2500, 2535$  și  $2570$  [s] se obțin VUM  $\omega(2500) = 791.01[\text{rad/s}]$ ,  $\omega(2535) = 791.85[\text{rad/s}]$  și  $\omega(2570) = 792.64[\text{rad/s}]$  și puterile echivalente au valorile:

$$P_{ECH} = 50 \cdot (791.85^2 - 791.01^2)/(70) = 949.72[\text{W}]$$

$$P_{ECH} = 50 \cdot (792.64^2 - 791.85^2)/(70) = 894.11[\text{W}]$$

Analog la  $t=3000, 3035$  și  $3070$  [s] VUM sunt:  $\omega(3000) = 800.22[\text{rad/s}]$ ,  $\omega(3035) = 800.65[\text{rad/s}]$  și  $\omega(3070) = 801.06[\text{rad/s}]$  rezultând puterile echivalente:

$$P_{ECH} = 50 \cdot (800.65^2 - 800.22^2)/(70) = 491.70[\text{W}]$$

$$P_{ECH} = 50 \cdot (801.06^2 - 800.65^2)/(70) = 469.07[\text{W}]$$

Pentru  $t=4000, 4035$  și  $4070$  [s], rezultă:  $\omega(4000) = 808.71[\text{rad/s}]$ ,  $\omega(4035) = 808.84[\text{rad/s}]$  și  $\omega(4070) = 808.96[\text{rad/s}]$  și puterile echivalente:

$$P_{ECH} = 50 \cdot (808.84^2 - 808.71^2)/(70) = 150.2[\text{W}]$$

$$P_{ECH} = 50 \cdot (808.96^2 - 808.84^2)/(70) = 138.67[\text{W}]$$

În final, pentru  $t=5000, 5035$  și  $5070$  [s] se obțin VUM  $\omega(5000) = 811.06[\text{rad/s}]$ ,  $\omega(5035) = 811.09[\text{rad/s}]$  și  $\omega(5070) = 811.11[\text{rad/s}]$  și puterile echivalente:

$$P_{ECH} = 50 \cdot (811.09^2 - 811.06^2)/(70) = 34.76[W]$$

$$P_{ECH} = 50 \cdot (811.11^2 - 811.09^2)/(70) = 23.174[W]$$

Valoarea maximă a lui  $P_{ECH}$  se obține în intervalul:

$$\Delta\omega = 544.66[rad/s] \div 553.77[rad/s],$$

deci pentru

$$\omega_{OPTIM} = (544.66 + 553.77)/2 = 549.22[rad/s]$$

La această valoare optimală pentru VUM și folosind rezultatul anterior obținut:

$$\omega = 31.817V$$

se poate defini o viteză echivalentă a vântului,  $V_{ECH}$ , sub forma

$$V_{ECH} = \omega/31.817 = 549.22/31.817 = 17.23[m/s]$$

Pe baza rezultatelor de mai sus se poate defini funcția  $P_{ECH}(\omega)$  folosind viteza echivalentă  $V_{ECH} = 17.23[m/s]$ .

$$P_{ECH}(\omega) = 23.584 \cdot ((17.23)/\omega - 2.1231 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06((17.23)/\omega - 0.0525)} \cdot (17.23)^3$$

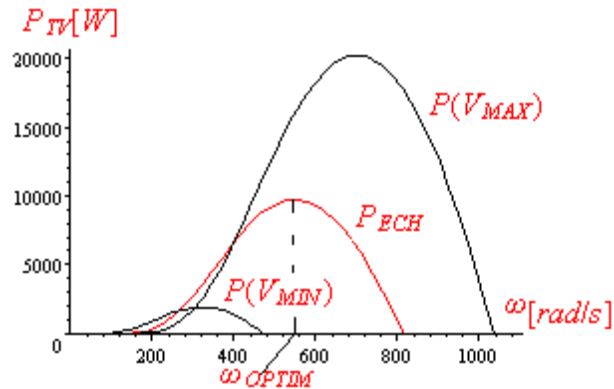


Fig.9.7. Puterea echivalentă la TV

În figura 4.5 sunt date caracteristicile puterilor  $P(V_{MAX})$ ,  $P(V_{MIN})$  și  $P(V_{ECH})$  corespunzătoare vitezelor: maximă  $V_{MAX}$ , minimă  $V_{MIN}$  și echivalentă  $V_{ECH}$ .

Maximul puterii echivalente, deduse experimental, este la  $\omega_{OPTIM}$ , figura 4.5. Prin cunoașterea lui  $\omega_{OPTIM}$  se poate controla sistemul, modificând astfel sarcina la GSMP încât să se realizeze egalitatea:

$$\omega = \omega_{OPTIM}$$

La această valoare a VUM se realizează o captare maximă a energiei eoliene,  $\omega_{OPTIM}$  fiind mărime de referință în sistemul de reglare.

## 9.6. Conducerea optimă a sistemului TV+GSMP

Prin măsurarea vitezei vântului cu anemometrul AN, figura 4.6, se determină viteza echivalentă  $V_{ECH}$  și apoi VUM optimă,  $\omega_{OPTIM}$ . Se compară  $\omega_{OPTIM}$  cu valoarea măsurată a VUM,  $\omega$ , și diferența lor:

$$\Delta\omega = \omega_{OPTIM} - \omega$$

constituie mărime de intrare a regulatorului R. Mărimea de ieșire a regulatorului R este transmisă



elementelor de comutație din convertoarele de putere interpuse între generator și rețea. Se realizează, astfel o funcționare în zona optimă din punct de vedere energetic, în condițiile în care viteza vântului variază semnificativ în timp.

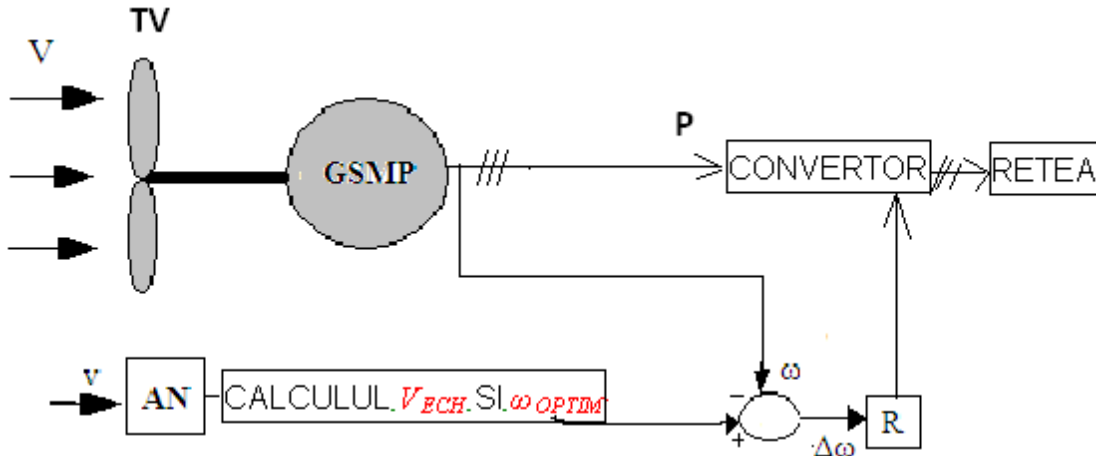


Fig.9.8.Sistemul de conducere

Determinarea VUM optime,  $\omega_{OPTIM}$ , se face foarte ușor și cu un grad ridicat de precizie printr-o probă la funcționarea în gol. În simulări cu ecuația mișcării:

$$\begin{cases} 50 \cdot \omega \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) / \omega - 2.1231 \times 10^{-2} \right) \cdot \\ e^{-98.06 \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) / \omega - 0.0525 \right)} \cdot (16 - 6 \sin(0.17943t))^3 \\ \omega(0) = 455.66 \end{cases}$$

se obține variația în timp a VUM, figura 9.9.

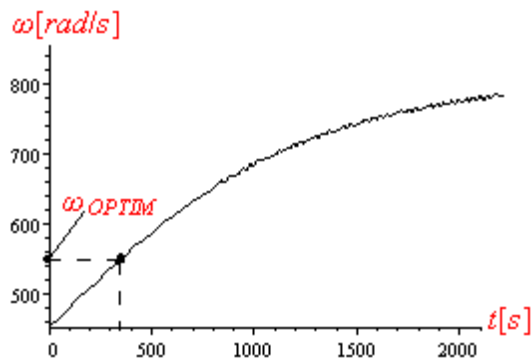


Fig.9.9. Variația în timp a VUM

La momentele de timp  $t=230, 300, \dots, 510$  [s] se obțin VUM  $\omega(230) = 516.58$  [rad/s],  $\omega(300) = 535.42$  [rad/s] și cu aceste valori se calculează puterea echivalentă:

$$P_{ECH} = 50 \cdot (535.42^2 - 516.58^2) / (140) = 7078.5 [W]$$

$$\omega(370) = 553.77 [rad/s]$$

$$P_{ECH} = 50 \cdot (553.77^2 - 535.42^2) / (140) = 7138.1 [W]$$

$$\omega(440) = 571.5 [rad/s]$$

$$P_{ECH} = 50 \cdot (571.5^2 - 553.77^2) / (140) = 7125.4 [W]$$

$$\omega(510) = 588.51 [rad/s]$$

$$P_{ECH} = 50 \cdot (588.51^2 - 571.5^2) / (140) = 7047.1 [W]$$

$$\omega(300) = 535.42[\text{rad/s}] \text{ si } \omega(370) = 553.77[\text{rad/s}]$$

Micșorând perioada de eșantionare de la  $T=70$  [s] la  $T=35$  [s] se obțin rezultatele:

$$\omega(265) = 526.05[\text{rad/s}]$$

$$\omega(300) = 535.42[\text{rad/s}]$$

$$P_{ECH} = 50 \cdot (535.42^2 - 526.05^2)/(70) = 7104.3 [\text{W}]$$

$$\omega(335) = 544.66[\text{rad/s}]$$

$$P_{ECH} = 50 \cdot (544.66^2 - 535.42^2)/(70) = 7128.5 [\text{W}]$$

$$\omega(370) = 553.77[\text{rad/s}]$$

$$P_{ECH} = 50 \cdot (553.77^2 - 544.66^2)/(70) = 7147.6 [\text{W}]$$

$$\omega(405) = 562.72[\text{rad/s}]$$

$$P_{ECH} = 50 \cdot (562.72^2 - 553.77^2)/(70) = 7137.6 [\text{W}]$$

În acest caz se poate face o localizare mult mai exactă a maximului puterii echivalente, în sensul că acesta este la VUM:

$$\omega_{OPTIM} = (544.66 + 553.77)/2 = 549.22[\text{rad/s}] ,$$

Același rezultat s-a obținut și anterior, la alte valori pentru perioada de eșantionare.

## 9.7. Determinare aproximativă a $P_{ECH}$

Determinarea aproximativă, dar rapidă a funcției  $P_{ECH}(\omega)$  se poate face direct din graficul funcției  $\omega(t)$ , la funcționarea în gol a sistemului.

Înregistrând VUM de la valoarea inițială  $\omega(0) = 455.66[\text{rad/s}]$ , într-un timp  $t=2000$  [s] se obține din ecuația mișcării:

$$\begin{cases} 50 \cdot \omega \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot ((16 - 6 \sin(0.17943t)) / \omega - 2.1231 \times 10^{-2}) \cdot \\ e^{-98.06((16 - 6 \sin(0.17943t)) / \omega - 0.0525)} \cdot (16 - 6 \sin(0.17943t))^3 \\ \omega(0) = 455.66 \end{cases}$$

graficul funcției  $\omega(t)$ , figura 9.10.

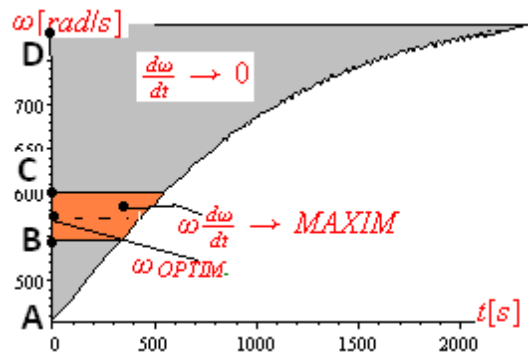


Fig.9.10.Zona lui  $\omega_{OPTIM}$

Analizând graficul funcției  $\omega(t)$  și având în vedere că puterea echivalentă se determină din:

$$P_{TV} = J \frac{d\omega}{dt} \omega$$

se pot distinge 3 regiuni de bază

- 1) zona **AB**-turații mici;
- 2) zona **BC**-turații medii;
- 3) zona **CD**-turații mari.

Valoarea derivatei  $\frac{d\omega}{dt}$  devine foarte mică în zona CD, zonă în care valorile lui  $\omega$  tind asimptotic spre  $\omega_{FINAL} = 811[\text{rad} / \text{s}]$  și  $P_{ECH}$  scade la zero. La  $\omega_{FINAL}$  derivata devine nulă, VUM atingând o valoare stabilă, valoare mai mică decât  $\omega_{V_{MAX}} = 1040[\text{rad} / \text{s}]$ , cea corespunzătoare vitezei maxime a vântului,  $V_{MAX}$ .

În zona BC valoarea produsului  $\omega \frac{d\omega}{dt}$  este maximă, deci  $P_{ECH}$  are valoarea maximă. Derivata are o valoare aproximativ constantă și valorile lui  $\omega$  cresc atingând în punctul C valoarea maximă. În această zonă se regăsește valoarea lui  $\omega_{OPTIM}$ , cu o eroare de  $-9.4\%$  la începutul intervalului, punctul B și  $+9.4\%$  la sfârșitul intervalului, punctul C.

În zona AB valoarea produsului  $\omega \frac{d\omega}{dt}$  este mai mică decât în zona BC, fiindcă valorile lui  $\omega$  sunt mici, începând de la  $\omega(0) = 455.66[\text{rad} / \text{s}]$ .

În concret, prin analiza graficului funcției  $\omega(t)$  se poate localiza zona optimă, aceasta prin deplasarea pe grafic din zona turațiilor mari până în zona în care derivata  $\frac{d\omega}{dt}$  ia valori maxime. Momentul începerii înregistrării VUM inițiale, adică valoarea  $\omega(0)$ , este dictat de valoarea vitezei vântului. La viteze ale vântului mici valoarea lui  $\omega(0)$  este mică.

Informațiile obținute dintr-o simplă probă de funcționare în gol sunt deosebit de utile deoarece se cunosc, din date certe experimentale două mărimi funcționale de bază:

- 1) valoarea VUM optime,  $\omega_{OPTIM}$  și
- 2) valoarea puterii echivalente  $P_{ECH}$ .

La această estimare aproximativă a lui  $\omega_{OPTIM}$  și  $P_{ECH}$  nu se pun probleme în alegerea timpului în care se fac măsurătorile, deoarece VUM,  $\omega_{REAL}$ , oscilează în vecinătatea VUM echivalente  $\omega_{ECH}$ , figura 9.11.

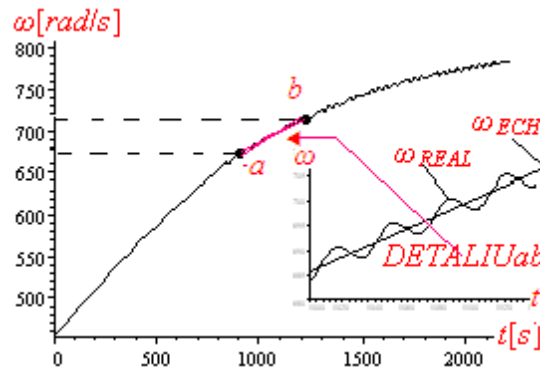


Fig.9.11.VUM reală și echivalentă

Alegerea nepotrivită a valorii pasului de eșantionare a măsurării VUM și fără a se ține cont de variația vitezei vântului în timp nu influențează sensibil graficul funcției  $\omega(t)$ .

La o analiză ce presupune un grad mai ridicat de precizie în determinarea lui  $\omega_{OPTIM}$  și  $P_{ECH}$ , este necesară corelarea pasului de eșantionare cu perioada de oscilație a vitezei vântului.

Alegerea corectă a pasului de eșantionare se face considerând perioada de oscilație a vitezei vântului, pasul de eșantionare fiind un multiplu a perioadei de oscilație a vitezei vântului,

perioadă care însă se poate modifica în timp și deci pasul de eșantionare trebuie și el modificat, fapt destul de complicat deoarece acestea nu se pot face în timp real, evoluția în timp a vitezei vântului fiind impredictibilă. Se pot folosi, totuși înregistrările meteo anterioare specifice locației respective și perioadei similare din an. Sunt zone în care perioada de oscilație este de ordinul secundelor, de exemplu 35[s], zona montană din România, sau zonele litoralului unde valoarea perioadei de oscilație a vântului este mare, de ordinul orelor.

## 9.8. Sistem eolian cu stocare în acumuloare electrice

La puteri mici și în zone izolate energia eoliană înmagazinată în acumuloare electrice este o soluție optimă din punct de vedere economic [1-6]. În variantele în care se folosește o comandă pe partea de redresare se poate realiza o funcționare optimă din punct de vedere energetic [7,8], adaptându-se încărcarea la viteze ale vântului variabile în timp. Pentru aceasta se determină, în prealabil, dependența dintre valoarea optimă a vitezei unghiulare mecanice,  $\omega_{OPTIM}$  și viteza vântului măsurată cu anemometrul AN, figura 9.12.

În conducerea sistemului, VUM  $\omega_{OPTIM}$  este mărime de referință :  $\omega_{ref} = \omega_{OPTIM}$

Obținerea energiei electrice maxime, în condițiile meteo date, viteza vântului fiind variabilă semnificativ în timp, este scopul conducerii sistemului TV+GSMP, figura 1,[7-16].

Mărimi principale măsurabile în proces sunt:

- viteza vântului, măsurată cu anemometrul AN, figura 1
- viteza unghiulară mecanică,  $\omega$ , măsurată la arborele GSMP.

Pe baza acestor mărimi se asigură controlul încărcării la GSMP.

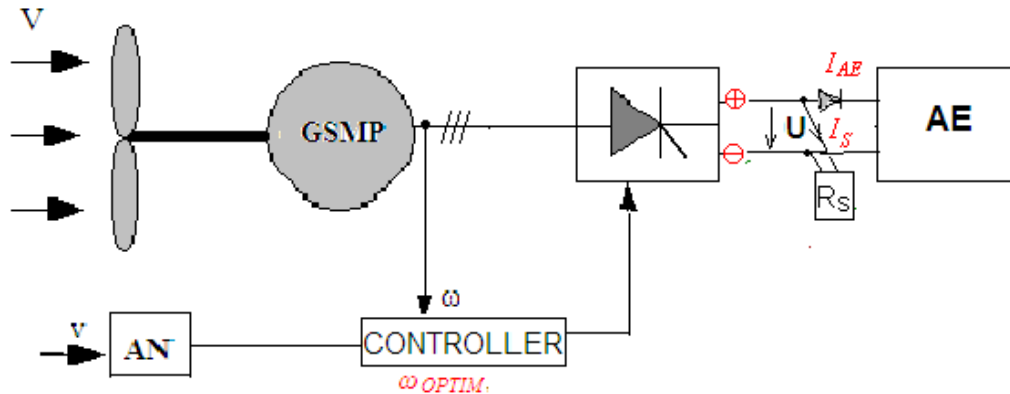


Fig.9.12.Sistem eolian cu stocare în AE

Prin măsurarea vitezei vântului se poate cunoaște VUM optimă,  $\omega_{OPTIM}$  și prin comanda unghiului de aprindere la tiristoarele redresorului comandat se poate controla VUM,  $\omega$ , astfel încât să se realizeze  $\omega = \omega_{OPTIM}$ .

La viteze mici ale vântului tensiunea U de la bornele bateriei de AE, figura 1, poate să fie sub valoarea tensiunii electromotoare a AE și, în acest caz, AE se descarcă peste GSMP. Pentru a se evita descărcarea AE la borna  $\oplus$  se pune o diodă.

### 9.8.1.Studiu de caz

În simulări se folosește o viteză a vântului variabilă în timp de forma  $V(t) = 16 - 6 \sin(0.17943t)$

Pentru turbina de vânt, TV, se dau de către firma constructoare, [14], caracteristicile experimentale ale puterii,  $P_{TV}(\omega, V)$ :

$$P_{TV}(\omega, V) = 23.584 \cdot ((V/\omega - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2}) e^{-98.06(V/\omega - 0.0525)} \cdot V^3$$

unde :

$V$  – viteza vântului;

$\omega$  – viteza unghiulară mecanică, VUM

VUM de referință  $\omega_{ref}$

Valoarea maximă a funcției  $P_{TV}(\omega)$  se obține pentru VUM de referință  $\omega_{ref}$ , prin derivare :

$$\frac{dP_{TV}}{d\omega} = \frac{d}{d\omega} (23.584 \cdot ((V/\omega - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06(V/\omega - 0.0525)} \cdot V^3) = 0,$$

obținându-se:

$$\omega_{ref} = 31.817 \cdot V$$

La această valoare a VUM  $\omega_{ref}$  se obține valoarea maximă a puterii turbinei:

$$P_{TV-MAX} = 23.584 \cdot ((1/31.817 - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06(1/31.817 - 0.0525)} \cdot V^3 = 1.8988V^3$$

Din datele de catalog [1] ale GSMP de putere:  $P_N = 5[kW]$  se obțin valorile:

$$R_1 = 1.6[\Omega], L_d = 0.07[H], L_q = 0.08[H], \Psi_{MP} = 3.3[Wb].$$

Din sistemul de ecuații ale GSMP:

$$\left\{ \begin{array}{l} -RI_d = 1.6I_d - \omega \cdot 0.08I_q \\ -RI_q = 1.6I_q + \omega \cdot 0.07I_d + \omega\Psi_M \\ M_G = -0.01I_dI_q + \Psi_MI_q \\ \Psi_M = 3.3 \\ P = R(I_d^2 + I_q^2) \end{array} \right.$$

se obțin:

$$\begin{array}{l} \text{puterea-} P_G = 27225 \cdot R\omega^2 \frac{4.0\omega^2 + 625.0R^2 + 2000.0R + 1600.0}{(1250.0R^2 + 4000.0R + 3200.0 + 7.0\omega^2)^2} \text{ și} \\ \text{momentul-} M_G = -5445.0\omega(5.0R + 8.0) \frac{4.0\omega^2 + 625.0R^2 + 2000.0R + 1600.0}{(1250.0R^2 + 4000.0R + 3200.0 + 7.0\omega^2)^2} \end{array}$$

Rezistența echivalentă de sarcină,  $R$  definește acumulatorul electric racordat la bornele generatorului.

Puterea fiind derivata energiei, energia electrică  $W_e$ , se calculează din putere, astfel:

$$\frac{dW_e}{dt} = P_G$$

sau

$$\frac{dW_e}{dt} = M_G \cdot \omega$$

### Modelul matematic al AE

În simularile prezentate valorile pentru  $E$ ,  $R_S$  și  $R_{AE}$  sunt:

$$E = 12.4[V], R_S = 0.5[\Omega], R_{AE} = 0.11[\Omega].$$

În realitate tensiunea  $E$  nu este constantă și crește odată cu gradul de încărcare al AE, sub forma:

$$E = 12.4 + k \cdot I \cdot t$$

Considerând că în 10 [h] se încarcă AE, pentru  $E$  se poate folosi aproximarea:

$$E = 12.4 + 1.6 \cdot t / (36000) = 12.4 + 4.4444 \times 10^{-5} t$$

Puterea dată de generator este suma dintre puterea,  $P_{AE}$ , ce intră în AE și puterea  $P_S$  corespunzătoare sarcinii  $R_S$ , dacă se neglijează pierderile și, la:  $E = 12.4[V]$ , rezultă:

$$P_G = P_{AE} + P_S = k \cdot \omega \cdot I_{AE} + (k \cdot \omega)^2 / R_S = k \cdot \omega (I_{AE} + (k \cdot \omega) / R_S) =$$

$$6.3782 \times 10^{-2} \cdot \omega \left( \frac{6.3782 \times 10^{-2} \cdot \omega - 12.4}{0.11} + \frac{6.3782 \times 10^{-2} \cdot \omega}{0.5} \right) = 6.3782 \times 10^{-2} \omega (0.7074 \omega - 112.73)$$

Momentul-  $M_G$  depinde liniar de  $\omega$  și, deci, are forma:

$$M_G = P_G / \omega = 6.3782 \times 10^{-2} (0.7074 \omega - 112.73)$$

Curentul la încărcare se calculează din

$$I_{AE} = \frac{6.3782 \times 10^{-2} \cdot \omega - 12.4}{0.11}$$

Se obține variația lui  $\omega$  din ecuația mișcării:  $J \frac{d\omega}{dt} = M_{TV} - M_G$  unde :  $J$  – momentul de inerție echivalent,  $M_{GSMP}$  – momentul la GSMP,  $M_{GSMP}$  – momentul la TV.

### 9.8.2.Redresor necomandat

Ecuția mișcării și ecuația energiei formează sistemul de ecuații diferențiale de mai jos cu  $R_s = 0.5 [\Omega]$

$$\left\{ \begin{array}{l} 50 \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left( \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) / \omega - 0.0525 \right) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot \\ e^{-98.06 \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) / \omega - 0.0525 \right)} \cdot \\ (16 - 6 \sin(0.17943t))^3 / \omega - 6.3782 \times 10^{-2} (0.7074 \omega - 112.73) - \text{ecuația mișcării} \\ \frac{dW_e}{dt} = 6.3782 \times 10^{-2} (0.7074 \omega - 112.73) \cdot \omega - \text{ecuația energiei} \\ \omega(0) = 535.66 \\ W_e(0) = 0 \end{array} \right.$$

Fără rezistența de sarcină  $R_s$  se obține:

$$\left\{ \begin{array}{l} 50 \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left( \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) / \omega - 0.0525 \right) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot \\ e^{-98.06 \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) / \omega - 0.0525 \right)} \cdot \\ (16 - 6 \sin(0.17943t))^3 / \omega - 6.3782 \times 10^{-2} (0.57984 \omega - 112.73) - \text{ecuația mișcării} \\ \frac{dW_e}{dt} = 6.3782 \times 10^{-2} (0.57984 \omega - 112.73) \cdot \omega - \text{ecuația energiei} \\ \omega(0) = 535.66 \\ W_e(0) = 0 \end{array} \right.$$

sau

$$\left\{ \begin{array}{l} 50 \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left( \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) / \omega - 0.0525 \right) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot \\ e^{-98.06 \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) / \omega - 0.0525 \right)} \cdot \\ (16 - 6 \sin(0.17943t))^3 / \omega - 6.3782 \times 10^{-2} (0.7074 \omega - 112.73) \\ \frac{dW_e}{dt} = 6.3782 \times 10^{-2} (0.7074 \omega - 112.73) \cdot \omega \\ \omega(0) = 535.66 \\ W_e(0) = 0 \end{array} \right.$$

Energia captată la  $t=3333[s]$  are valoarea  $W_e(3333) = 2.4116 \times 10^7 [J]$ , față de de valoarea  $W_e(3333) = 2.3604 \times 10^7 [J]$  obținută fără  $R_s$ .

Variațiile în timp ale VUM,  $\omega$  și ale curentului de încărcare a AE sunt date în figurile 9.13-9.14.

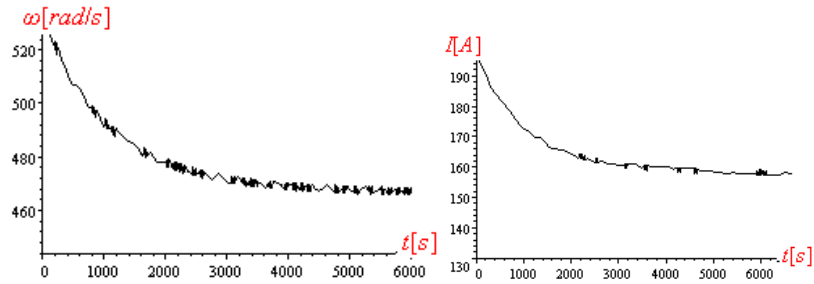


Fig.9.13. Variația în timp a lui  $\omega$  cu  $R_s = 0.5 [\Omega]$  Fig.9.14 Variația în timp a curentului cu  $R_s = 0.5 [\Omega]$

Influența variației în timp a tensiunii electromotoare, (t.e.m.),  $E = 12.4 + k \cdot I \cdot t$  se poate vedea în figura 5.6.a. La  $E = ct$ , VUM are valori mai mici față de cazul  $E \neq ct$ , aceasta și prin faptul că prin mărirea lui E se descarcă generatorul.

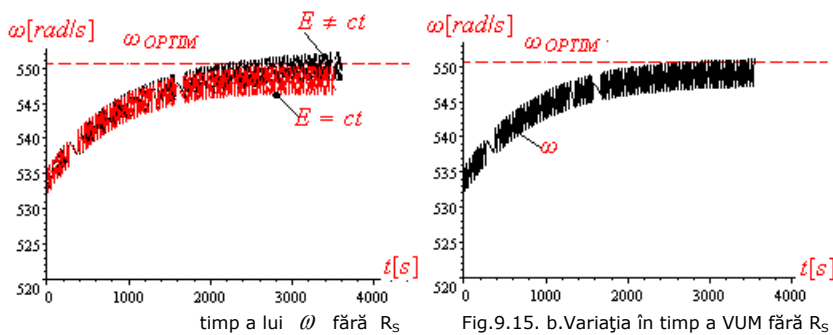


Fig.9.15. a. Variația în timp a lui  $\omega$  fără  $R_s$

Fig.9.15. b. Variația în timp a VUM fără  $R_s$  și la  $E=ct$

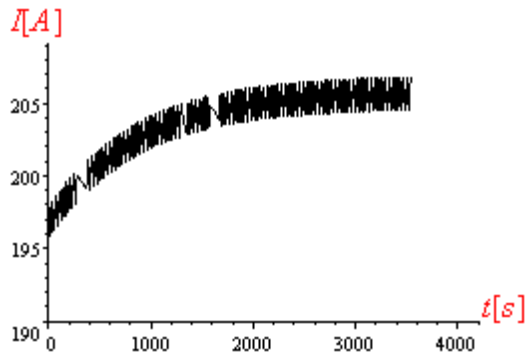


Fig.9.16. Variația în timp a curentului fără  $R_s$

Se observă că apar diferențe notabile între cele două situații: cu  $R_s$  și fără  $R_s$ . Energia captată în varianta cu  $R_s$  este cu 2.1691% mai mare, aceasta și datorită energiilor cinetice ale maselor în mișcare de rotație, energii datorate scăderii VUM.

### 9.8.3. Calculul bateriei de acumuloare

Alegerea corectă a numărului și tipului de AE este esențială în definirea regimului de funcționare și poate elimina sistemul de reglare, realizând totuși o funcționare în zona optimă energetic.

Se analizează două cazuri de bază:

- 1) Viteza vântului constantă în timp
- 2) Viteza vântului variabilă în timp

Viteza vântului are valoarea  $V = 22$  [m/s]

Puterea maximă,  $P_{TV-MAX} = 20219 [W]$ , se obține la  $\omega = 700.01 [rad / s]$ , valoare obținută din anularea derivatei

$$\frac{dP_{TV}}{d\omega} = \frac{d}{d\omega} \left( 23.584 \cdot ((22)/\omega - 2.1231 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06((22)/\omega - 0.0525)} \cdot (22)^3 \right) = 0$$

Putera injectată în AE, dacă se neglijează pierderile, are valoarea:

$$P_{AE} = P_{TV-MAX} = 20219 [W]$$

sau

$$k \cdot \omega \cdot I_{AE} = 6.3782 \times 10^{-2} \cdot \omega \frac{6.3782 \times 10^{-2} \cdot \omega - E}{R_{AE}} = 20219$$

La  $\omega = 700.01 [rad / s]$  se obține dependența dintre  $E$  și  $R_{AE}$ , sub forma

$$E = 44.648 - 452.85 R_{AE}$$

La  $E = 15 [V]$ , de exemplu, rezultă:

$$R_{AE} = 0.06547 [\Omega]$$

În aceste condiții se obține:

$$P_{AE} = 6.3782 \times 10^{-2} \cdot \omega \frac{6.3782 \times 10^{-2} \cdot \omega - 15}{0.06547} = 6.3782 \times 10^{-2} \omega (0.97422\omega - 229.11)$$

La aceste valori pentru  $E$  și  $R_{AE}$ , se asigură funcționarea în punctul de funcționare maximă la  $\omega = \omega_{OPTIM} = 700.01 [rad/s]$ , figura 9.18:

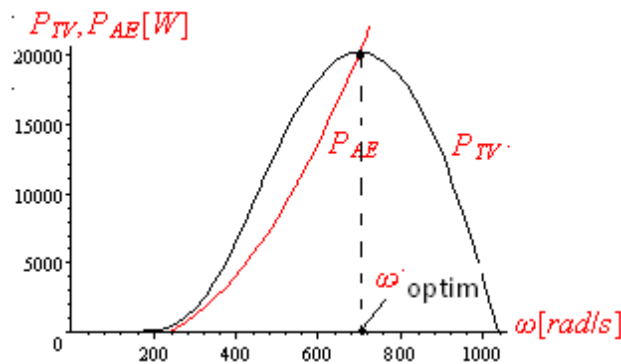


Fig.9.17. Dependenta puterilor de  $\omega$

Dacă viteza vântului nu se modifică, acest punct este fix. La viteze ale vântului variabile în timp punctul de funcționare se deplasează pe caracteristicile puterii.

$$\text{Viteza vântului este variabilă sub forma } V(t) = 16 - 6 \sin(0.17943t)$$

La o viteză a vântului variabilă în timp de forma  $V(t) = 16 - 6 \sin(0.17943t)$  caracteristicile puterii sunt în zona hașurată, figura 9.19:

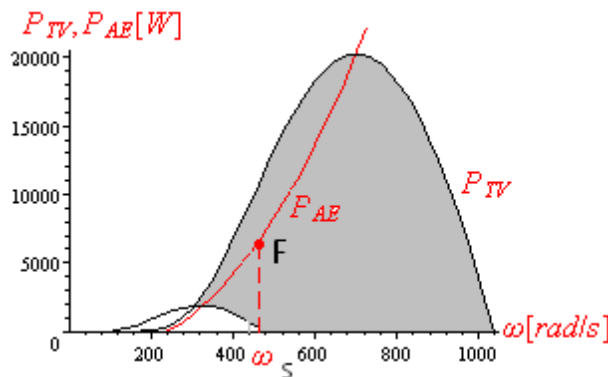


Fig.9.18. Caracteristicile puterii



Pentru a observa evoluția în timp a VUM se rezolvă ecuația mișcării:

$$\left\{ \begin{array}{l} 50 \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left( \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) / \omega - 0.0525 \right) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot \\ e^{-98.06 \left( (16 - 6 \sin(0.17943t)) / \omega - 0.0525 \right)} \cdot \\ (16 - 6 \sin(0.17943t))^3 / \omega - (6.2138 \times 10^{-2} \omega - 14.613) \\ \omega(0) = 455.66 \end{array} \right.$$

obținându-se variația lui  $\omega$  dată în fig. 9.20:

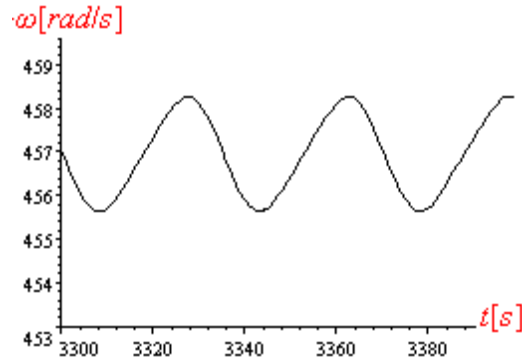


Fig.9.19. Variația în timp a lui  $\omega$

Viteza unghiulară se stabilizează la valoarea  $\omega = 457. [rad / s]$ , punctul de funcționare fiind în F, figura 19. La această valoare a VUM punctul de funcționare nu este în zona optimă definită de  $\omega_{OPTIM} = 550.72 [rad / s]$ . Pentru a realiza o funcționare în zona optimă, se impun alte caracteristici pentru bateria de AE, de exemplu prin modificarea lui  $R_{AE} = 0.06547 [\Omega]$ , la valoarea  $R_{AE} = 0.08547 [\Omega]$ , și se obține valoarea de regim staționar  $\omega = 521 [rad / s]$ , mult mai apropiată de  $\omega_{OPTIM} = 550.72 [rad / s]$ . Se modifică și  $P_{AE}$

$$P_{AE} = (4.7597 \times 10^{-2} \omega - 11.194) \cdot \omega$$

și punctul de funcționare F, figura 9.21:

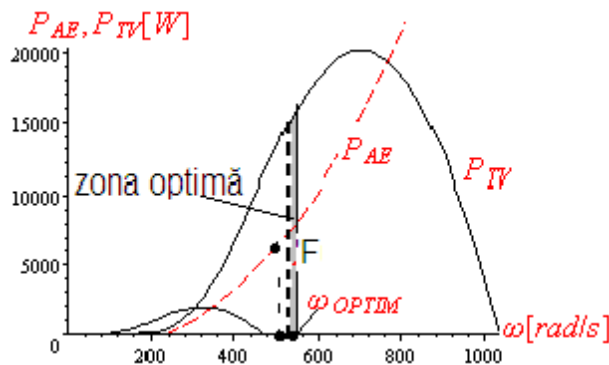


Fig.9.20. Zona optimă a puterii

Energia captată în acest caz la  $\omega = 521 [rad / s]$  are valoarea:

$$W_m(521.) = \int_0^{70} \left( 23.584 \cdot \left( \frac{(16 - 6 \sin(0.17943t))}{521. - 0.0525} + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06 \left( \frac{(16 - 6 \sin(0.17943t))}{521. - 0.0525} \right)} \cdot (16 - 6 \sin(0.17943t))^3 \right) dt = 4.979 \times 10^5 [J]$$

În cazul anterior, la  $\omega = 457. [rad / s]$  energia captată este mai mică

$$W_m(457.) = \int_0^{70} \left( 23.584 \cdot \left( \frac{(16 - 6 \sin(0.17943t))}{457. - 0.0525} + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06 \left( \frac{(16 - 6 \sin(0.17943t))}{457. - 0.0525} \right)} \cdot (16 - 6 \sin(0.17943t))^3 \right) dt = 4.4096 \times 10^5 [J],$$

între cele 2 cazuri fiind o diferență de 12.913% .

Valoarea lui  $V_{ECH}$  este apropiată de valoarea vitezei medii  $V_{MEDIU} = 16 [m / s]$

Punctul de funcționare  $F_{FINAL}$  se obține la intersecția dintre caracteristicile puterii echivalente ale turbinei și caracteristica sarcinii  $P_{AE}(\omega)$ , figura 9.22.

$$P_{ECH}(\omega) = 23.584 \cdot \left( \frac{16.155}{\omega} - 2.1231 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06 \left( \frac{16.155}{\omega} - 0.0525 \right)} \cdot (16.155)^3$$

$$P_{AE}(\omega) = (4.7597 \times 10^{-2} \omega - 11.194) \cdot \omega$$

$$23.584 \cdot \left( \frac{22}{\omega} - 2.1231 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06 \left( \frac{22}{\omega} - 0.0525 \right)} \cdot (22)^3$$

$$23.584 \cdot \left( \frac{10}{\omega} - 2.1231 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06 \left( \frac{10}{\omega} - 0.0525 \right)} \cdot (10)^3$$

$$-P_{ECH} - P_{AE} - P_{ECH}, P_{AE} [W] - \omega [rad/s] - \omega_{OPTIM} - P_{TV-MAX} - P_{TV-MIN} -$$

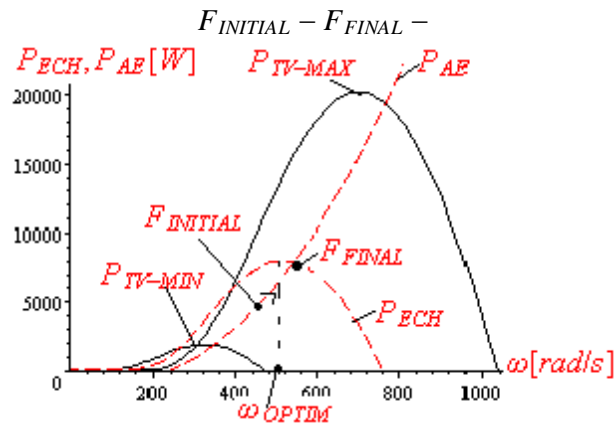


Fig.9.21. Caracteristicile puterii și punctul de funcționare

Acest punct de funcționare devine optim din punct de vedere energetic dacă  $\omega = \omega_{OPTIM}$  și aceasta se realizează printr-o alegere potrivită a TV și AE, sau folosind între generator și AE un redresor comandat.

## 9.9. Concluzii

La sistemele eoliene ce funcționează la viteze ale vântului variabile semnificativ în timp s-a determinat zona de maxim energetic, zonă caracterizată de VUM  $\omega_{OPTIM}$ .

Pentru determinarea lui  $\omega_{OPTIM}$  s-a introdus noțiunea de putere echivalentă a turbinei,

$P_{ECH}$ , care este dependentă de VUM,  $\omega$ . Maximul  $P_{ECH}$  este la  $\omega_{OPTIM}$ . Estimarea funcției  $P_{ECH}(\omega)$  și determinarea lui  $\omega_{OPTIM}$  se bazează pe valorile măsurate ale VUM de la arborele generatorului sau turbinei, la o funcționare în gol a sistemului, deci cu generatorul declupat de la sarcină. Puterea echivalentă,  $P_{ECH}$ , corespunde vitezei echivalente a vântului,  $V_{ECH}$ . Aceasta se calculează din valoarea reală a vântului măsurată cu anemometrul atașat turbinei, folosind un model matematic original și deosebit de util în aplicațiile curente, mai ales în locațiile în care viteza vântului variază, ca și valoare, semnificativ în timp. Prin urmare, realizarea optimului energetic, la un sistem eolian ce funcționează la viteze ale vântului variabile semnificativ în timp, se bazează pe date certe, măsuratori ale vitezei vântului și turației la turbină.

Prin simulările prezentate s-a putut observa diferența dintre cele două variante: redresor comandat și redresor necomandat. În varianta redresor comandat energia captată este mai mică și oscilațiile curentului sunt, în multe cazuri, foarte mari și, deci, varianta mai simplă: redresor necomandat este mai avantajoasă decât cea cu redresor comandat, dar numai în absența rezistenței adiționale de sarcină  $R_s$ . În cazul când se folosesc și rezistențele de sarcină este necesară reglarea, astfel încât să se realizeze funcționarea în zona optimă din punct de vedere energetic, mai ales că  $R_s$  de regulă este variabilă în timp și deci imprevizibilă. S-a introdus noțiunea de putere echivalentă la TV pentru a se putea mai bine preciza punctele de funcționare și zona de optim energetic.

S-a determinat legătura dintre viteza vântului și turația optimă la care trebuie să funcționeze sistemul, astfel încât energia eoliană captată să fie maximă. Prin cunoașterea valorii turației optime se poate regla încărcarea la generator astfel încât să se realizeze o funcționare la maximul energetic. Prin analiza mai multor cazuri s-au putut stabili mărimile de bază ce conduc la o funcționare optimă.

În continuare se prezintă o sinteză a contribuțiilor personale:

- acest capitol este în întregime original;
- la viteze ale vântului variabile în timp de formă sinusoidală s-au determinat viteza echivalentă a vântului și puterea echivalentă a turbinei;
- s-a determinat puterea echivalentă printr-o probă la funcționarea în gol;
- s-a dat o metodă aproximativă pentru determinarea puterii echivalente;
- s-a calculat optimal o baterie de acumuloare care stochează energia captată, folosindu-se un model matematic adecvat pentru aceasta;
- s-a determinat prin analiza dinamicii sistemului, zona optimă din punct de vedere energetic.

## 10. DETERMINAREA MODELELOR MATEMATICE ALE TURBINEI EOLIENE PRINTR-O PROBĂ DE GOL

În prezentul capitol printr-o probă la funcționarea în gol se determină caracteristicile puterii turbinei de vânt, TV. Prin proba la funcționarea în gol se pot rezolva două probleme fundamentale :  
1) determinarea zonelor de maxim energetic la viteze ale vântului variabile în timp prin cunoșterea turației optime;  
2) deducerea modelului matematic al TV, MM-TV, din măsurători de viteză a vântului și a turației la TV.

Determinarea turației corespunzătoare energiei maxime date de turbina de vânt, (TV), este obiectivul principal al acestei lucrări. Prin simulări se verifică metoda dată, considerând viteza vântului variabilă în timp. Determinarea legăturii dintre viteza vântului și turația optimă, din punct de vedere energetic se face o singură dată în etapa de omologare a turbinei.

### 10.1 Considerații preliminare

Funcționarea sistemului eolian în punctul de putere maxim, MPP, este obiectivul principal al celor mai multe lucrări din domeniu [1-23]. Majoritatea, însă, iau în considerare o viteză a vântului constantă în timp [5-24]. În literatura de specialitate [1 ÷ 17] se tratează, în general, funcționarea TV la viteze ale vântului constante în timp. La viteze ale vântului variabile în timp problemele devin complexe și optimizarea din punct de vedere energetic a sistemului TV+GSMP este puțin abordată, cu excepția unor puține lucrări, [1 ÷ 3].

În lucrarea de față măsurând viteza vântului și turația la generator, sau turbină, se determină, în prima fază, modelul matematic al TV, iar în faza a doua se determină turația din zona de maxim energetic.

Modelul matematic al TV, MM-TV, permite determinarea orientativă a turației optime de funcționare, astfel ca energia captată să fie maximă.

Puterea dată de TV se calculează cu relația [4,7,8,11,15,17,22]

$$P_{TV} = \rho \pi R_p^2 C_p(\lambda) V^3$$

unde :

$\rho$  – densitatea aerului;

$R_p$  – raza paletelor;

$C_p(\lambda)$  – coeficient de conversie al puterii;

$\lambda = \omega R_p / V$  ;

$V$  – viteza vântului;

$\omega$  – viteza unghiulară mecanică, VUM.

Coeficientul de conversie al puterii,  $C_p(\lambda)$ , se determină cu relația:

$$C_p(\lambda) = c_1 \left( \frac{c_2}{\lambda} - c_3 \right) e^{-\frac{c_4}{\lambda}}, \quad \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda} - 0.035, \quad c_1 - c_4 \text{ sunt constante date în catalog.}$$

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda} - 0.035 = \frac{V}{R_p \omega} - 0.035 = (V / (1.5\omega) - 0.035)$$

Prin înlocuire, coeficientul de conversie al puterii,  $C_p(\lambda)$ , se obține sub forma

$$C_p(\lambda) = c_1 \left( \frac{c_2}{\lambda} - c_3 \right) e^{-\frac{c_4}{\lambda}} = c_1 \left( c_2 (V / (1.5\omega) - 0.035) - c_3 \right) e^{-c_4 (V / (1.5\omega) - 0.035)}$$

și puterea dată de TV se calculează cu relația

$$P_{TV}(\omega, V) = \rho \pi R_p^2 C_p(\lambda) V^3 = 1.225 \pi 1.5^2 c_1 \left( c_2 (V / (1.5\omega) - 0.035) - c_3 \right) e^{-c_4 (V / (1.5\omega) - 0.035)} V^3 =$$

$$k_1 \cdot \left( c_2 (V / (1.5\omega) - 0.035) - c_3 \right) e^{-c_4 (V / (1.5\omega) - 0.035)} V^3$$

sau

$$P_{TV}(\omega, V) = k_1 \cdot \left( k_2 (V / \omega - 0.0525) - c_3 \right) \cdot e^{-k_3 (V / \omega - 0.0525)} \cdot V^3$$

unde:  $k_1 = 1.225 \pi 1.5^2 c_1$ ;  $k_2 = c_2 / 1.5$ ;  $k_3 = c_4 / 1.5$

Pentru turbina de vânt, TV, se dau de către firma constructoare, [14], caracteristicile

experimentale ale puterii,  $P_{TV}(\omega, V)$ , sau ale cuplului,  $M_{TV}(\omega, V)$ , acestea din urmă denumite și caracteristici mecanice experimentale:

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

unde:  $V$  – viteza vântului;  $\omega$  – viteza unghiulară mecanică, VUM

Valoarea maximă a funcției  $P_{TV}(\omega)$  se obține pentru VUM de referință  $\omega_{ref}$ , prin derivare:

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

obținându-se:

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

Rezultatul obținut demonstrează legătura directă dintre  $\omega_{ref}$  și viteza vântului.

În lucrarea de față măsurând viteza vântului și turația la generator, sau turbină, se determină, în prima fază, modelul matematic al TV, iar în faza a doua se determină turația din zona de maxim energetic.

În simulări turația la TV se determină din ecuația mișcării:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{TV}$$

unde:

$J$  – momentul de inerție echivalent.

Din ecuația mișcării prin înmulțire cu  $\omega$  se obține

$$J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega = \omega \cdot M_{TV} = P_{TV}$$

Cunoscând variația în timp a VUM se poate determina MMS-TV.

Pe înregistrările de viteză a vântului,  $V(t)$  și VUM  $\omega(t)$  se bazează determinarea

MMS-TV.

Sunt date două MM-TV, unul bazat pe funcția trigonometrică sinus, iar celălalt bazat pe funcția exponențială.

La generator VUM este  $\omega = k_{RED} \cdot \omega_T$ , unde  $k_{RED}$  este raportul de transformare dintre TV și GSMP.

Modelul simplificat propus, la  $\beta = ct$ , are forma:

$$P_{TV-SIMP}(\omega, V) = a \cdot (V/\omega - b) \cdot e^{-c(V/\omega - d)} \cdot (V)^3$$

unde:  $a, b, c$  și  $d$  se determină printr-o probă la funcționarea în gol din măsurători de viteză a vântului și a turației la TV, în simulări cu ecuația mișcării.

Din ecuația mișcării:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{TV}$$

prin înmulțire cu  $\omega$  se obține puterea dată de turbină

$$J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega = \omega \cdot M_{TV} = P_{TV}$$

Prin integrare se obține energia mecanică captată, în intervalul de timp

$\Delta t = t_k - t_{k-1} = 10[s]$ , sub forma:

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

unde:  $J$  – momentul de inerție echivalent;  $\omega_k$  – VUM la momentul  $t_k$ ;  $\omega_{k-1}$  – VUM la momentul  $t_{k-1}$ .

Puterea echivalentă,  $P_{ECH}$ , la VUM  $\omega_k^* = (\omega_k + \omega_{k-1}) / 2$  este

$$P_{ECH} = J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2) / (2 \cdot \Delta t)$$

Puterea echivalentă a turbinei  $P_{ECH}(\omega)$ , generează aceeași formă de variație în timp a VUM ca și puterea reală,  $P_{TV}$ .

## 10.2. Studiu de caz –determinarea modelului matematic al TV

Pentru determinarea modelului matematic simplificat, MMS-TV, se folosesc măsurători de turație și viteză a vântului, la funcționarea în gol în două variante:

- 1) la viteze ale vântului constante în timp,  $v=ct$ .
- 2) la viteze ale vântului variabile în timp,  $v \neq ct$ .

### 10.2.1 Viteza vântului este constantă în timp

Simulările se fac la viteza vântului constantă în timp:  $V=22[m/s]$

Pentru determinarea modelului matematic simplificat, MMS-TV, se folosesc măsurători de turație și viteză a vântului la momentele de timp  $t=50 [s]$ , punctul A,  $t=100 [s]$ , punctul B,  $t=150 [s]$ , punctul C,  $t=200 [s]$ , punctul D,  $t=250 [s]$ , punctul E și  $t=250 [s]$ , punctul F, figura 10.1.b.

În simulări variația VUM se obține prin rezolvarea ecuației mișcării, la funcționarea în gol, cu  $J = 40 [kgm^2]$ , de forma:

$$\begin{cases} 40 \cdot \omega \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot ((22.)/\omega - 0.02) \cdot e^{-98.06((22)/\omega - 0.04)} \cdot (22.)^3 \\ \omega(0) = 333. \end{cases}$$

Se observă, din figura 10.1.a., că la  $t=7777[s]$  VUM nu a atins valoarea staționară

$\omega_{FINAL} = 1097 [rad/s]$ , fiind:  $\omega(7777) = 1093. [rad/s]$ . La  $t=8888[s]=2.47[h]$  VUM se apropie de valoarea finală, fiind:  $\omega(8888/3600.) = 1096.9 [rad/s]$

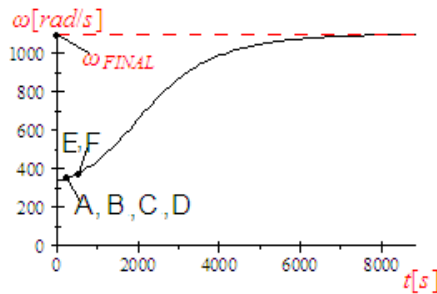


Fig10.1.a.Variația în timp a VUM

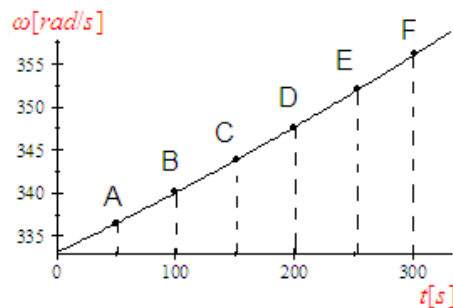


Fig10.1.b.Variația în timp a VUM (detaliu)

Datorită timpului foarte mare necesar atingerii lui  $\omega_{FINAL}$ , metoda de determinare a MMS-TV nu poate să folosească această valoare, mai ales că între timp, în realitate viteza vântului se poate modifica semnificativ. Din acest motiv metoda de calcul a MMS-TV trebuie să fie rapidă pentru a fi utilă în exploatare, adică într-un interval de timp de ordinul secundelor.

În punctele A, B, C, D, E și F se obține VUM,  $\omega$ , figura 10.1.b și pe baza lor puterile echivalente ale turbinei  $P_{ECH}$ .

$$\text{punctul A } \omega(50) = 334.36 [rad/s],$$

$$\text{zona AB } V = 22 [m/s], \omega^* = 338.21 [rad/s]$$

$$P_{ECH} = 40 \cdot (340.03^2 - 336.44^2) / (100.) = 971.41. [W]$$

$$\text{punctul B. } \omega(100) = 340.03 [rad/s]$$

$$\text{zona BC } V = 22 [m/s], \omega^* = 341.88 [rad/s]$$

$$P_{ECH} = 40 \cdot (343.77^2 - 340.03^2) / (100.) = 1023.0 [W]$$

$$\text{punctul C. } \omega(150) = 343.77 [rad/s],$$

$$\text{zona CD } V = 22 [m/s], \omega^* = 345.7 [rad/s]$$

$$P_{ECH} = 40 \cdot (347.67^2 - 343.77^2) / (100.) = 1078.6 [W]$$

$$\text{punctul D. } \omega(200) = 347.67[\text{rad} / \text{s}]$$

$$\text{zona DE } V = 22[\text{m} / \text{s}], \omega^* = 349.68[\text{rad} / \text{s}]$$

$$P_{ECH} = 40 \cdot (351.74^2 - 347.67^2) / (100.) = 1138.6[\text{W}]$$

$$\text{punctul E. } \omega(250) = 351.74[\text{rad} / \text{s}]$$

$$\text{zona EF } V = 22[\text{m} / \text{s}], \omega^* = 353.84[\text{rad} / \text{s}]$$

$$P_{ECH} = 40 \cdot (355.99^2 - 351.74^2) / (100.) = 1203.1[\text{W}]$$

$$\text{punctul F. } \omega(250) = 355.99[\text{rad} / \text{s}]$$

Folosind ecuația modelului

$$P_{TV-SIMP}(\omega, 22) = a \cdot (22 / \omega^* - b) \cdot e^{-c(22/\omega^* - d)} \cdot (22)^3$$

pentru zonele AB, BC, CD și DE, figura 10.2, se obține sistemul în necunoscutele:  $a, b, c, d$ .

$$\left\{ \begin{array}{l} 9.1229 \times 10^{-2} = a \cdot (0.065048 \times 10^{-2} - b) \cdot e^{-c(22/338.21-d)} \\ 9.6074 \times 10^{-2} = a \cdot (0.06435 - b) \cdot e^{-c(22/341.88-d)} \\ 0.1013 = a \cdot (0.06363 - b) \cdot e^{-c(22/345.7-d)} \\ 0.10693 = a \cdot (0.06291 - b) \cdot e^{-c(22/349.68-d)} \end{array} \right.$$

Prin împărțirea primelor trei ecuații se obține sistemul în necunoscutele  $b$  și  $c$

$$\left\{ \begin{array}{l} (0.06363 - b)0.94841 \cdot e^{7.1107 \times 10^{-4}c} = (0.06435 - b) \\ (0.06291 - b)0.94735 \cdot e^{7.2433 \times 10^{-4}c} = (0.06363 - b) \end{array} \right. \text{ cu soluția: } b = 0.02, c = 98.06$$

Revenind în primele două ecuații se obțin necunoscutele  $a$  și  $d$

$$\left\{ \begin{array}{l} 9.1229 \times 10^{-2} = a \cdot (0.065048 \times 10^{-2} - b) \cdot e^{-c(22/338.21-d)} \\ 9.6074 \times 10^{-2} = a \cdot (0.06435 - b) \cdot e^{-c(22/341.88-d)} \\ b = 0.02 \\ c = 98.06 \end{array} \right. \text{ cu soluția:}$$

$$a = 23.584, d = 0.04$$

În final, MMS-TV, la  $V=22[\text{m/s}]$ , este

$$P_{TV-SIMP}(\omega, 22) = 23.584 \cdot ((22.) / \omega - 0.02) \cdot e^{-98.06((22)/\omega - 0.04)} \cdot (22.)^3$$

Puterea maximă se obține la  $\omega_{OPTIM} = 728.53[\text{rad} / \text{s}]$ , obținut prin anularea derivatei

$$\frac{dP_{TV-SIMP}(\omega)}{d\omega} = 0$$

sau

$$\frac{d}{d\omega} (23.584 \cdot ((22.) / \omega - 0.02) \cdot e^{-98.06((22)/\omega - 0.04)} \cdot (22.)^3) = 0, \text{ cu soluția:}$$

$$\omega = 728.53[\text{rad/s}]$$

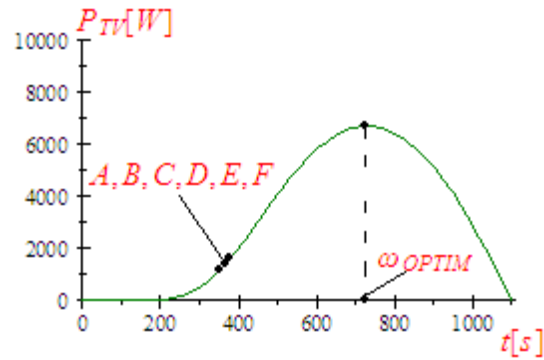


Fig10.2. Caracteristica puterii

### 10.2.2 Viteza vântului este variabilă în timp

La viteze ale vântului,  $V(t)$ , variabile în timp cu perioada  $T=35[s]$ , de forma:

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

se determină prin măsurători variația în timp a vitezei unghiulare mecanice,  $VUM$ , figura 10.3.

În simulări variația  $VUM$  se obține prin rezolvarea ecuației mișcării, la funcționarea în gol, în forma

$$\begin{cases} 40 \cdot \omega \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left( (16 - 6 \cdot \sin(0.17943t)) / \omega - 0.02 \right) \cdot e^{-98.06 \left( (16 - 6 \cdot \sin(0.17943t)) / \omega - 0.04 \right)} \cdot (16 - 6 \cdot \sin(0.17943t))^3 \\ \omega(0) = 333. \end{cases}$$

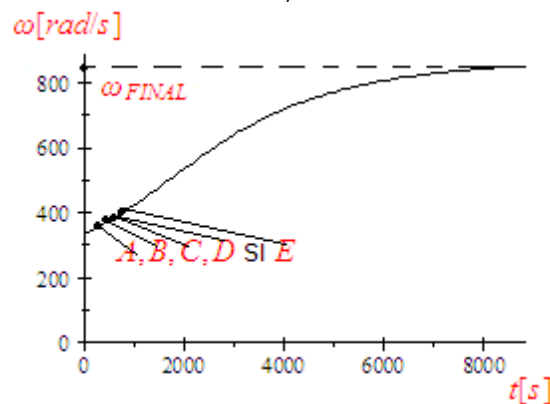


Fig 10.3. Variația în timp a VUM

Așa cum se observă din figura 10.3,  $VUM$  se stabilizează, datorită valorilor mari a momentelor de inerție, după un timp de ordinul orelor. La  $t=4444[s]$  are valoarea  $\omega(4444) = 743.18 [rad / s]$ , la  $t=5222[s]$  este  $\omega(5222) = 779.12 [rad / s]$ , iar la  $t=8888[s]$  este  $\omega(8888) = 850.63 [rad / s]$ . Din acest motiv determinarea experimentală a  $VUM$  stabilizate,

$\omega_{FINAL}$ , în practică, este dificil de determinat, mai ales că între timp viteza vântului poate să-și modifice valoarea.

Determinarea modelului matematic al TV, MMS-TV, pe baza lui  $\omega_{FINAL}$  ar necesita timp, timp în care se modifică viteza vântului și deci rezultatele ar fi eronate. Pentru a rezolva, în timp util problema determinării MMS-TV se folosesc măsurători la momentele de timp  $t=5, 15, 25, 35, 45[s]$  și se determină 4 condiții pentru calcularea necunoscutelor  $a, b, c$  și  $d$ , ale modelului matematic de forma

$$P_{TV-SIMP}(\omega, V) = a \cdot (V / \omega - b) \cdot e^{-c(V/\omega - d)} \cdot (V)^3$$

În punctele A, B, C, D și E prin rezolvarea ecuației mișcării și se obțin rezultatele

$$\text{punctul A } \omega(5) = 333.41 [rad / s],$$



$$\begin{aligned} & \text{zona AB} \\ V(10) &= 16 - 6 \cdot \sin(0.17943 \cdot 10) = 10.149 [m/s], \omega^* = (333.41 + 334.) / 2 = 333.71 [rad/s] \\ P_{ECH} &= 40 \cdot (334.^2 - 333.41^2) / (20.) = 787.54 [W] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & P_{TV-SIMP} = \\ & \text{punctul B } \omega(15) = 334.00 [rad/s] \\ & \text{zona BC} \\ V(20) &= 16 - 6 \cdot \sin(0.17943 \cdot 20) = 18.594 [m/s], \omega^* = (334 + 334.84) / 2 = 334.42 [rad/s] \\ P_{ECH} &= 40 \cdot (334.84^2 - 334.^2) / (20.) = 1123.7 [W] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{TV-SIMP} &= 1123.7 = a \cdot (5.5601 \times 10^{-2} - b) \cdot e^{-c(5.5601 \times 10^{-2} - d)} \cdot (18.594)^3 \\ & \text{punctul C } \omega(25) = 334.84 [rad/s], \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{zona CD} \\ V(30) &= 16 - 6 \cdot \sin(0.17943 \cdot 30) = 20.701 [m/s], \omega^* = (335.63 + 334.84) / 2 = 335.24 [rad/s] \\ P_{ECH} &= 40 \cdot (335.63^2 - 334.84^2) / (20.) = 1059.3 [W] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{TV-SIMP} &= 1059.3 = a \cdot (6.175 \times 10^{-2} - b) \cdot e^{-c((20.701)/335.24 - d)} \cdot (20.701)^3 \\ & \text{punctul D } \omega(35) = 335.63 [rad/s] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{zona DE} \\ V(40) &= 16 - 6 \cdot \sin(0.17943 \cdot 40) = 11.322 [m/s], \omega^* = (335.63 + 336.3) / 2 = 335.97 [rad/s] \\ P_{ECH} &= 40 \cdot (335.6^2 - 335.63^2) / (20.) = -40.274 [W] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{TV-SIMP} &= -40.274 = a \cdot (3.3699 \times 10^{-2} - b) \cdot e^{-c(3.3699 \times 10^{-2} - d)} \cdot (20.701)^3 \\ & \text{punctul E } \omega(45) = 336.3 [rad/s] \end{aligned}$$

Se obține sistemul în necunoscutele:  $a, b, c, d$ .

$$\left\{ \begin{aligned} 984.43 &= a \cdot (3.0413 \times 10^{-2} - b) \cdot e^{-c(3.0413 \times 10^{-2} - d)} \cdot (10.149)^3 \\ 1123.7 &= a \cdot (5.5601 \times 10^{-2} - b) \cdot e^{-c(5.5601 \times 10^{-2} - d)} \cdot (18.594)^3 \\ 1059.3 &= a \cdot (6.175 \times 10^{-2} - b) \cdot e^{-c((20.701)/335.24 - d)} \cdot (20.701)^3 \\ -40.274 &= a \cdot (3.3699 \times 10^{-2} - b) \cdot e^{-c(3.3699 \times 10^{-2} - d)} \cdot (20.701)^3 \end{aligned} \right.$$

Din primele 3 ecuații prin împărțire se obține sistemul în necunoscutele:  $b$  și  $c$

$$\left\{ \begin{aligned} 5.3875 \cdot (5.5601 \times 10^{-2} - b) &= (3.0413 \times 10^{-2} - b) \cdot e^{2.5188 \times 10^{-2} c} \\ 1.4638 \cdot (6.175 \times 10^{-2} - b) &= (5.5601 \times 10^{-2} - b) \cdot e^{6.1488 \times 10^{-3} c} \end{aligned} \right.$$

soluțiile acestui sistem sunt numere complexe și deci, nu sunt compatibile cu momentele de timp alese pentru determinarea modelului matematic. Aceasta deoarece viteza vântului:

$V(t) = 16 - 6 \cdot \sin(0.17943t)$ , în perioada  $t = 5 \div 45[s]$  are o variație de forma dată în figura 10.4

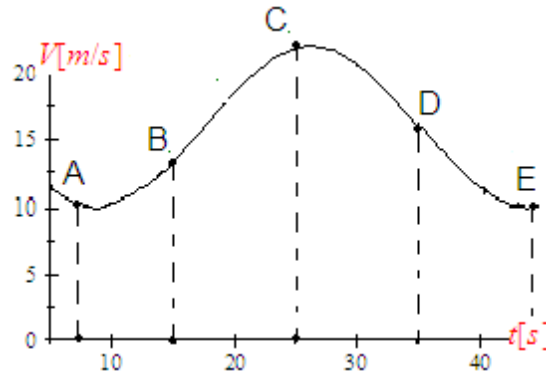


Fig.10.4.Variația vitezei vântului în timp

Derivata vitezei vântului, în raport cu timpul pe acest interval de timp are valori pozitive și negative, și deci în ecuația mișcării derivata  $\frac{d\omega}{dt}$  nu poate fi aproximată cu:

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{\omega_k - \omega_{k-1}}{t_k - t_{k-1}}$$

Viteza vântului fiind variabilă în timp, impune în acest interval de timp, o variație a VUM, așa ca în figura 10.5

$$\begin{cases} 40 \cdot \omega \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot ((16 - 6 \cdot \sin(0.17943t)) / \omega - 0.02) \cdot e^{-98.06((16 - 6 \cdot \sin(0.17943t)) / \omega - 0.04)} \cdot (16 - 6 \cdot \sin(0.17943t))^3 \\ \omega(0) = 333. \end{cases}$$

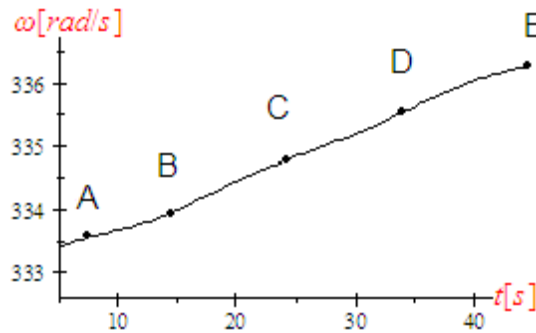


Fig 10.5.Variația în timp a VUM

Pentru a obține soluții reale în modelul matematic se consideră un alt interval de timp pentru măsurarea vitezei vântului și a turației.

Pe intervalul  $t = 11 \div 25$  [s] viteza vântului crește de la valoarea:  $V(11) = 10.481$  [m/s] la  $V(25) = 21.847$  [m/s]

Pe acest interval de timp se vor face măsurătorile de turație și viteza a vântului. Viteza vântului în acest interval de timp, crește uniform, așa ca în figura 10.6.

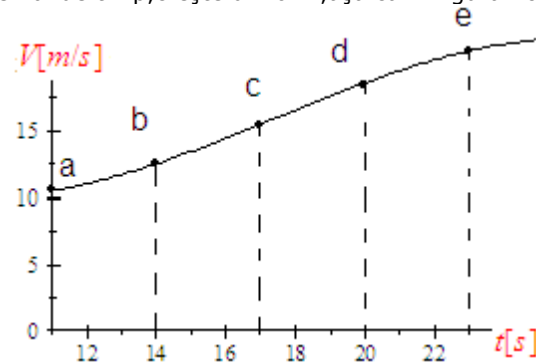


Fig 10.6.Variația în timp vitezei vântului

În figura 10.7, este dată variația în timp a VUM pentru intervalul de timp  $t = 11 \div 25$  [s]

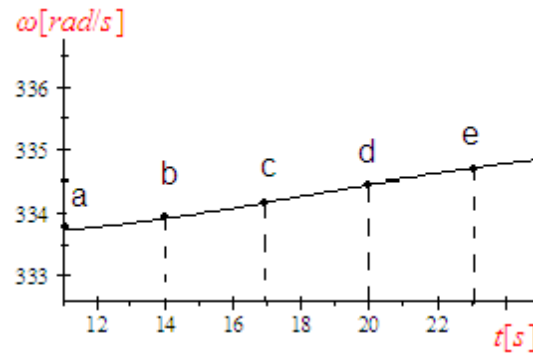


Fig 10.7. Variația în timp a VUM

La  $t=11,14,17,20$  și  $23[s]$ , respectiv în punctele de funcționare: a, b, c, d și e, se obțin rezultatele

$$\text{punctul a } \omega(11) = 333.72 [\text{rad/s}],$$

zona ab

$$V(11) = 16 - 6 \cdot \sin(0.17943 \cdot 11) = 10.481 [\text{m/s}], \omega^* = (333.72 + 333.92)/2 = 333.82 [\text{rad/s}]$$

$$P_{ECH} = 890.2 [\text{W}]$$

$$P_{TV-SIMP} = 267.06 = a \cdot (3.1397 \times 10^{-2} - b) \cdot e^{-c(3.1397 \times 10^{-2} - d)} \cdot (10.481)^3$$

$$\text{punctul b } \omega(14) = 333.92 [\text{rad/s}]$$

zona bc

$$V(14) = 16 - 6 \cdot \sin(0.17943 \cdot 14) = 12.467 [\text{m/s}], \omega^* = (333.92 + 334.18)/2 = 334.05 [\text{rad/s}]$$

$$P_{ECH} = 1158.0 [\text{W}]$$

$$P_{TV-SIMP} = 347.41 = a \cdot (3.7321 \times 10^{-2} - b) \cdot e^{-c(3.7321 \times 10^{-2} - d)} \cdot (12.467)^3$$

$$\text{punctul c } \omega(17) = 334.18 [\text{rad/s}],$$

zona cd

$$V(17) = 16 - 6 \cdot \sin(0.17943 \cdot 17) = 15.453 [\text{m/s}], \omega^* = (334.18 + 334.45)/2 = 334.32 [\text{rad/s}]$$

$$P_{ECH} = 1203.5 [\text{W}]$$

$$P_{TV-SIMP} = 361.06 = a \cdot (4.6222 \times 10^{-2} - b) \cdot e^{-c(4.6222 \times 10^{-2} - d)} \cdot (15.453)^3$$

$$\text{punctul d } \omega(20) = 334.45 [\text{rad/s}]$$

zona de

$$V(20) = 16 - 6 \cdot \sin(0.17943 \cdot 20) = 18.594 [\text{m/s}], \omega^* = (334.45 + 334.69)/2 = 334.57 [\text{rad/s}]$$

$$P_{ECH} = 1070.6 [\text{W}]$$

$$P_{TV-SIMP} = 321.19 = a \cdot (5.5576 \times 10^{-2} - b) \cdot e^{-c(5.5576 \times 10^{-2} - d)} \cdot (18.594)^3$$

$$\text{punctul e } \omega(23) = 334.69 [\text{rad/s}]$$

Pe baza rezultatelor de mai sus, se obține sistemul algebric, în necunoscutele: a, b, c, d și e:

$$\left\{ \begin{array}{l} 890.2 = a \cdot (3.1397 \times 10^{-2} - b) \cdot e^{-c(3.1397 \times 10^{-2} - d)} \cdot (10.481)^3 \\ 1158. = a \cdot (3.7321 \times 10^{-2} - b) \cdot e^{-c(3.7321 \times 10^{-2} - d)} \cdot (12.467)^3 \\ 1203.5 = a \cdot (4.6222 \times 10^{-2} - b) \cdot e^{-c(4.6222 \times 10^{-2} - d)} \cdot (15.453)^3 \\ 1070.6 = a \cdot (5.5576 \times 10^{-2} - b) \cdot e^{-c(5.5576 \times 10^{-2} - d)} \cdot (18.594)^3 \end{array} \right.$$

Prin împărțirea succesivă a ecuațiilor între ele, se reduce numărul necunoscutelor la 3, și rezultă:

$$\left\{ \begin{array}{l} 1.2938 \cdot (3.7321 \times 10^{-2} - b) = (3.1397 \times 10^{-2} - b) \cdot e^{5.924 \times 10^{-3}c} \\ 1.8324 \cdot (4.6222 \times 10^{-2} - b) = (3.7321 \times 10^{-2} - b) \cdot e^{8.901 \times 10^{-3}c} \\ 1.9584 \cdot (5.5576 \times 10^{-2} - b) = (4.6222 \times 10^{-2} - b) \cdot e^{9.354 \times 10^{-3}c} \end{array} \right.$$

Descompunând în serie exponențialele

$$e^{5.924 \times 10^{-3}c} = 1 + 5.924 \times 10^{-3}c + (5.924 \times 10^{-3}c)^2/2$$

$$e^{8.901 \times 10^{-3}c} = 1 + 8.901 \times 10^{-3}c + (8.901 \times 10^{-3}c)^2/2$$

Se obține sistemul

$$\left\{ \begin{array}{l} 1.2938 \cdot (3.7321 \times 10^{-2} - b) = (3.1397 \times 10^{-2} - b) \cdot (1 + 5.924 \times 10^{-3}c + (5.924 \times 10^{-3}c)^2/2) \\ 1.8324 \cdot (4.6222 \times 10^{-2} - b) = (3.7321 \times 10^{-2} - b) \cdot (1 + 8.901 \times 10^{-3}c + (8.901 \times 10^{-3}c)^2/2) \end{array} \right. ,$$

cu soluțiile:  $\{, [b = 2.1909 \times 10^{-2}, c = 133.31]\}$

Înlocuind în ultimele 2 ecuații ale sistemului de bază, rezultă sistemul în necunoscutele a și d:

$$\left\{ \begin{array}{l} 1203.5 = a \cdot (4.6222 \times 10^{-2} - 2.1909 \times 10^{-2}) \cdot e^{-133.31(4.6222 \times 10^{-2} - d)} \cdot (15.453)^3 \\ 1070.6 = a \cdot (5.5576 \times 10^{-2} - 2.1909 \times 10^{-2}) \cdot e^{-133.31(5.5576 \times 10^{-2} - d)} \cdot (18.594)^3 \end{array} \right.$$

Descompunând exponențialele în serie:

$$e^{-133.31(4.6222 \times 10^{-2} - d)} = 1 - 133.31(4.6222 \times 10^{-2} - d) + (133.31(4.6222 \times 10^{-2} - d))^2/2$$

$$e^{-133.31(5.5576 \times 10^{-2} - d)} = 1 - 133.31(5.5576 \times 10^{-2} - d) + (133.31(5.5576 \times 10^{-2} - d))^2/2$$

se obține sistemul în necunoscutele a și d.

$$\left\{ \begin{array}{l} 1203.5 = a \cdot (4.6222 \times 10^{-2} - 2.1909 \times 10^{-2}) \cdot \\ \left( 1 - 133.31(4.6222 \times 10^{-2} - d) + (133.31(4.6222 \times 10^{-2} - d))^2/2 \right) \cdot (15.453)^3 \\ 1070.6 = a \cdot (5.5576 \times 10^{-2} - 2.1909 \times 10^{-2}) \cdot \\ \left( 1 - 133.31(5.5576 \times 10^{-2} - d) + (133.31(5.5576 \times 10^{-2} - d))^2/2 \right) \cdot (18.594)^3 \end{array} \right. ,$$

cu soluțiile:  $\{ [a = 3.3709, d = 5.8509 \times 10^{-2}], [a = 9.8504, d = 4.8569 \times 10^{-2}] \}$

S-au obținut, astfel, modelele simplificate  $P_{TV-SIMP-1}(\omega, V)$  și  $P_{TV-SIMP-2}(\omega, V)$  în forma:

$$P_{TV-SIMP-1}(\omega, V) = 3.3709 \cdot ((V)/\omega - 2.1909 \times 10^{-2}) \cdot e^{-133.31((V)/\omega - 5.8509 \times 10^{-2})} \cdot (V)^3$$

$$P_{TV-SIMP-2}(\omega, V) = 9.8504 \cdot ((V)/\omega - 2.1909 \times 10^{-2}) \cdot e^{-133.31((V)/\omega - 4.8569 \times 10^{-2})} \cdot (V)^3$$

La viteza vântului  $V=22$ [m/s], MMS-TV obținut la  $V=ct$  este

$$P_{TV-SIMP}(\omega, 22) = 23.584 \cdot ((22.)/\omega - 0.02) \cdot e^{-98.06((22)/\omega - 0.04)} \cdot (22.)^3$$

iar cele 2 variante obținute la  $V \neq ct$ , sunt

$$P_{TV-SIMP-1}(\omega, 22) = 3.3709 \cdot ((22.)/\omega - 2.1909 \times 10^{-2}) \cdot e^{-133.31((22)/\omega - 5.8509 \times 10^{-2})} \cdot (22.)^3$$

$$P_{TV-SIMP-2}(\omega, 22) = 9.8504 \cdot ((22.)/\omega - 2.1909 \times 10^{-2}) \cdot e^{-133.31((22)/\omega - 4.8569 \times 10^{-2})} \cdot (22.)^3$$

În figura 10.8 sunt reprezentate cele 3 variante ale modelului:

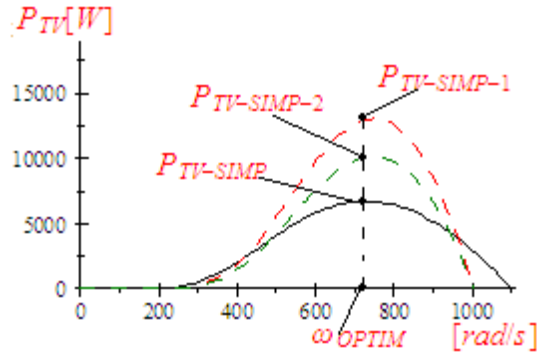


Fig 10.8. Modelele matematice ale TV

Se observă, din figura 10.8, că în toate cazurile VUM optimă este aproximativ aceeași:

$$\omega_{OPTIM} = 728.53 [rad / s]$$

În concluzie, în mai puțin de 1 minut se pot determina MMS-TV, în condițiile reale prin măsurarea vitezei vântului și a turației la TV. Cunoscând MMS-TV se poate determina VUM optimă,  $\omega_{OPTIM}$  valoare de referință în orice sistem de conducere performant care asigură o funcționare în zona energetică maximă.

### 10.2.3. Simplificarea modelului matematic

#### Precizarea 1

În modelul matematic al TV, MMS-TV, prin substituția:  $A = (V / \omega - b)$  și considerând

$A \approx (V / \omega - d)$  se obține varianta 3 a MMS-TV, sub forma:

$$P_{TV-SIMP-3}(\omega, V) = a \cdot (V / \omega - b) \cdot e^{-c(V/\omega - d)} \cdot (V)^3 = a \cdot (A) \cdot e^{-c(A)} \cdot (V)^3$$

Considerând rezultatele anterioare din punctele A, B, C și D, se obțin rezultatele:

$$\text{punctul A } \omega(50) = 334.36 [rad / s],$$

$$\text{zona AB } V = 22 [m / s], \omega^* = 338.21 [rad / s]$$

$$P_{ECH} = 40 \cdot (340.03^2 - 336.44^2) / (100.) = 971.41 [W]$$

$$A = (V / \omega - b) = (22 / 334.36 - b) = (6.5797 \times 10^{-2} - b)$$

$$P_{TV-SIMP-3} = a \cdot (A) \cdot e^{-c(A)} \cdot (V)^3 = a \cdot (6.5797 \times 10^{-2} - b) \cdot e^{-c(6.5797 \times 10^{-2} - b)} \cdot (22)^3$$

$$\text{punctul B. } \omega(100) = 340.03 [rad / s]$$

$$\text{zona BC } V = 22 [m / s], \omega^* = 341.88 [rad / s]$$

$$P_{ECH} = 40 \cdot (343.77^2 - 340.03^2) / (100.) = 1023. [W]$$

$$A = (V / \omega - b) = (22 / 341.88 - b) = (0.06435 - b)$$

$$P_{TV-SIMP-3} = a \cdot (A) \cdot e^{-c(A)} \cdot (V)^3 = a \cdot (0.06435 - b) \cdot e^{-c(0.06435 - b)} \cdot (22)^3$$

$$\text{punctul C. } \omega(150) = 343.77 [\text{rad} / \text{s}],$$

$$\text{zona CD } V = 22 [\text{m} / \text{s}], \omega^* = 345.7 [\text{rad} / \text{s}]$$

$$P_{ECH} = 40 \cdot (347.67^2 - 343.77^2) / (100.) = 1078.6 [\text{W}]$$

$$A = (V / \omega - b) = (22 / 345.7 - b) = (6.3639 \times 10^{-2} - b)$$

$$P_{TV-SIMP-3} = a \cdot (A) \cdot e^{-c(A)} \cdot (V)^3 = a \cdot (6.3639 \times 10^{-2} - b) \cdot e^{-c(6.3639 \times 10^{-2} - b)} \cdot (22)^3$$

Cu rezultatele din cele 3 zone de analiză se obțin sistemul de ecuații algebrice în necunoscutele  $a, b$  și  $c$ , sub forma:

$$\begin{cases} 971.41 = a \cdot (6.5797 \times 10^{-2} - b) \cdot e^{-c(6.5797 \times 10^{-2} - b)} \cdot (22)^3 \\ 1023. = a \cdot (0.06435 - b) \cdot e^{-c(0.06435 - b)} \cdot (22)^3 \\ 1078.6 = a \cdot (6.3639 \times 10^{-2} - b) \cdot e^{-c(6.3639 \times 10^{-2} - b)} \cdot (22)^3 \end{cases}$$

Prin împărțire se obține sistemul cu necunoscutele:  $b$  și  $c$ , astfel:

$$\begin{cases} 0.94957 \cdot (0.06435 - b) = (6.5797 \times 10^{-2} - b) \cdot e^{-1.447 \times 10^{-3} c} \\ 0.94845 \cdot (6.3639 \times 10^{-2} - b) = (0.06435 - b) \cdot e^{-7.11 \times 10^{-4} c} \end{cases}$$

Descompunând în serie funcțiile exponențiale

$$e^{-1.447 \times 10^{-3} c} = \left(1 - 1.447 \times 10^{-3} c + (1.447 \times 10^{-3} c)^2 / 2\right)$$

$$e^{-7.11 \times 10^{-4} c} = \left(1 - 7.11 \times 10^{-4} c + (7.11 \times 10^{-4} c)^2 / 2\right)$$

rezultă

$$\begin{cases} 0.94957 \cdot (0.06435 - b) = (6.5797 \times 10^{-2} - b) \cdot \left(1 - 1.447 \times 10^{-3} c + (1.447 \times 10^{-3} c)^2 / 2\right) \\ 0.94845 \cdot (6.3639 \times 10^{-2} - b) = (0.06435 - b) \cdot \left(1 - 7.11 \times 10^{-4} c + (7.11 \times 10^{-4} c)^2 / 2\right) \end{cases}$$

de unde se obțin soluțiile:

$$\{[b = 6.6012 \times 10^{-2}, c = 3244.7], [b = 6.2536 \times 10^{-2}, c = 855.37]\}$$

Cu aceste rezultate modelele 4 și 5 sunt :

$$P_{TV-SIMP-4}(\omega, V) = a \cdot (A) \cdot e^{-c(A)} \cdot (V)^3 = -1.9336 \times 10^{-2} \cdot (V/\omega - 6.6012 \times 10^{-2}) \cdot e^{-3244.7(V/\omega - 6.6012 \times 10^{-2})} \cdot (V)^3$$

$$P_{TV-SIMP-5}(\omega, V) = a \cdot (A) \cdot e^{-c(A)} \cdot (V)^3 = 235.92 \cdot (V/\omega - 6.2536 \times 10^{-2}) \cdot e^{-855.37(V/\omega - 6.2536 \times 10^{-2})} \cdot (V)^3$$

$$P_{TV-SIMP-4}(\omega, 22) = -1.9336 \times 10^{-2} \cdot (22/\omega - 6.6012 \times 10^{-2}) \cdot e^{-3244.7(22/\omega - 6.6012 \times 10^{-2})} \cdot (22)^3$$

$$P_{TV-SIMP-5}(\omega, 22) = 235.92 \cdot (22/\omega - 6.2536 \times 10^{-2}) \cdot e^{-855.37(22/\omega - 6.2536 \times 10^{-2})} \cdot (22)^3$$

$$P_{TV}(\omega, 22) = 9.8504 \cdot ((22.)/\omega - 2.1909 \times 10^{-2}) \cdot e^{-133.31((22.)/\omega - 4.8569 \times 10^{-2})} \cdot (22.)^3$$

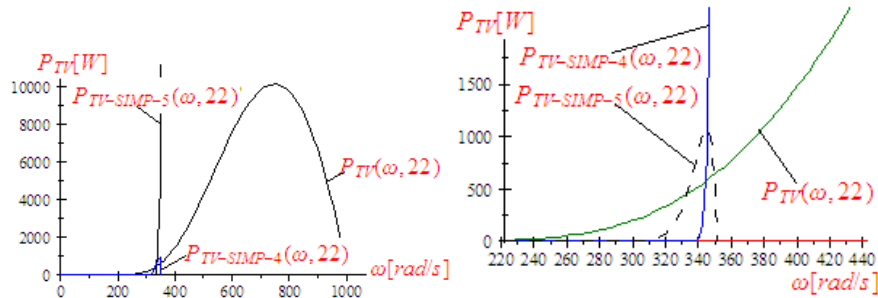


Fig 10.9.a. Modele matematice simplificate ale TV

Fig 10.9.b. Modele matematice simplificate ale TV (detaliu)

### Precizarea 2

Se propune un MMS-TV de forma:

$$P_{TV-SIMP-7}(\omega, V) = \omega \cdot (a - \omega/(V)) \cdot e^{b(\omega/(22.)-c)} \cdot (V)^3$$

Măsurând VUM la momentele de timp  $t=50, 100, 150$  și  $200$ [s] se calculează puterile echivalente. În simulări VUM se determină prin rezolvarea ecuației mișcării

$$\begin{cases} 40 \cdot \frac{d\omega}{dt} = (45.645 - \omega/(22.)) \cdot e^{0.1(\omega/(22.)-130.27)} \cdot (22.)^3 \\ \omega(0) = 333. \end{cases}$$

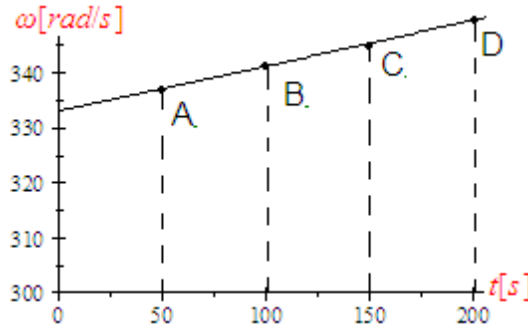


Fig 10.10. Variația în timp a VUM

În punctele A, B, C și D se obțin VUM,  $\omega$ , figura 10.10 și pe baza lor puterile echivalente ale turbinei  $P_{ECH}$ .

$$\text{punctul A } \omega(50) = 337.08 [\text{rad} / \text{s}],$$

$$\text{zona AB } V = 22 [\text{m} / \text{s}], \omega^* = (337.08 + 341.22) / 2 = 339.15 [\text{rad} / \text{s}]$$

$$P_{ECH} = 40 \cdot (341.22^2 - 337.08^2) / (100.) = 1123.3. [W]$$

$$P_{TV-SIMP-7}(\omega, 22) = 339.15 \cdot (a - 339.15 / (22.)) \cdot e^{b(339.15/(22.)-c)} \cdot (22.)^3$$

$$\text{punctul B. } \omega(100) = 341.22 [\text{rad} / \text{s}]$$

$$\text{zona BC } V = 22 [\text{m} / \text{s}], \omega^* = (345.41 + 341.22) / 2 = 343.32 [\text{rad} / \text{s}]$$

$$P_{ECH} = 40 \cdot (345.41^2 - 341.22^2) / (100.) = 1150.8 [W]$$

$$P_{TV-SIMP-7}(\omega, 22) = 343.32 \cdot (a - 343.32 / (22.)) \cdot e^{b(343.32/(22.)-c)} \cdot (22.)^3$$

$$\text{punctul C. } \omega(150) = 345.41 [\text{rad} / \text{s}],$$

$$\text{zona CD } V = 22 [\text{m} / \text{s}], \omega^* = (345.41 + 349.65) / 2 = 347.53 [\text{rad} / \text{s}]$$

$$P_{ECH} = 40 \cdot (349.65^2 - 345.41^2) / (100.) = 1178.8 [W]$$

$$P_{TV-SIMP-7}(\omega, 22) = 347.53 \cdot (a - 347.53 / (22.)) \cdot e^{b(347.53/(22.)-c)} \cdot (22.)^3$$

punctul D.  $\omega(200) = 349.65 [rad / s]$

Folosind ecuația modelului pentru zonele AB, BC și CD se obține sistemul în necunoscutele:  $a, b, c,$

$$\begin{cases} 1123.3 = 339.15 \cdot (a - 339.15 / (22.)) \cdot e^{b(339.15/(22.)-c)} \cdot (22.)^3 \\ 1150.8 = 343.32 \cdot (a - 343.32 / (22.)) \cdot e^{b(343.32/(22.)-c)} \cdot (22.)^3 \\ 1178.8 = 347.53 \cdot (a - 347.53 / (22.)) \cdot e^{b(347.53/(22.)-c)} \cdot (22.)^3 \end{cases}$$

cu soluția:  $a = 45.645, b = 0.1, c = 130.27$

Cu valorile astfel determinate se obține MMS-TV,  $P_{TV-SIMP-7}(\omega, V)$ , sub forma

$$P_{TV-SIMP-7}(\omega, V) = \omega \cdot (45.645 - \omega / (V)) \cdot e^{0.1(\omega/(V)-130.27)} \cdot (V)^3$$

sau momentul la TV

$$M_{TV-SIMP-7}(\omega, V) = (45.645 - \omega / (V)) \cdot e^{0.1(\omega/(V)-130.27)} \cdot (V)^3$$

La  $V=22[m/s]$  MMS-TV este

$$P_{TV-SIMP-7}(\omega, 22) = \omega \cdot (45.645 - \omega / (22)) \cdot e^{0.1(\omega/(22)-130.27)} \cdot (22)^3$$

și caracteristica puterii este dată în figura 10.11

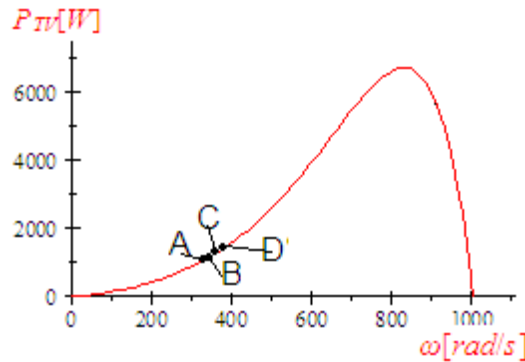


Fig 10.11 Caracteristica puterii

Puterea maximă se obține la  $\omega_{OPTIM} = 830.27 [rad / s]$ , obținut prin anularea derivatei

$$\frac{dP_{TV-SIMP}(\omega, V)}{d\omega} = 0$$

sau

$$\frac{d}{d\omega} \left( \omega \cdot (45.645 - \omega / (V)) \cdot e^{0.1(\omega/(V)-130.27)} \cdot (V)^3 \right) = 0 \text{ ,cu soluția: } \omega = 37.740V$$

sau la  $V=22[m/s]$

$$\frac{d}{d\omega} \left( \omega \cdot (45.645 - \omega / (22)) \cdot e^{0.1(\omega/(22)-130.27)} \cdot (22)^3 \right) = 0 \text{ cu soluția: } \omega = 830.27 [rad / s]$$

### Precizarea 3

Informațiile din zonele AB, BC și CD, figura 10.11, nu sunt suficiente în a defini, cu precizie, funcția  $P_{TV-SIMP}(\omega, V)$  și din acest motiv se impune a cunoaște și VUM stabilizată,

$\omega_{FINAL}$ , caracterizată la  $P_{TV-SIMP}(\omega, V) = 0$

$$P_{TV-SIMP-7}(\omega, V) = \omega \cdot (a - \omega / (V)) \cdot e^{b(\omega/(22.)-c)} \cdot (V)^3 = 0$$

Din  $\omega_{FINAL}$  se calculează foarte simplu constanta  $a$

$$a - \omega_{FINAL} / (V) = 0$$

Timpu pentru determinarea lui  $\omega_{FINAL}$  este relativ mare și depinde de valoarea inițială  $\omega(0)$ .

Din ecuația mișcării



$$\begin{cases} 40 \cdot \frac{d\omega}{dt} = (45.645 - \omega/(22.)) \cdot e^{0.1(\omega/(22.)-130.27)} \cdot (22.)^3 \\ \omega(0) = 333. \end{cases}$$

la funcționarea în gol și cu  $\omega(0) = 333. [rad / s]$ , acest timp este în jurul valorii

$t_{FINAL} = 6000 [s]$ , figura 12,  $\omega_{STABIL} = \omega_{FINAL} = \omega(6000) = 1003.4 [rad / s]$

$a - \omega_{FINAL} / (V) = a - 1003.4 / (22) = 0$ , cu soluția:  $a = 45.609$

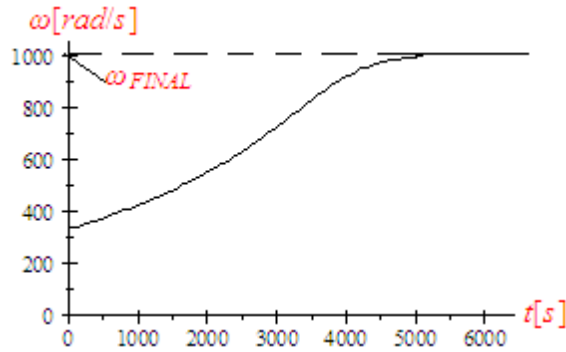


Fig 10.12. Variația în timp a VUM

#### Precizarea 4

Determinarea MMS-TV, în acest fel, necesită un timp relativ mare, ordinul orelor, timp în care, în anumite condiții meteo, viteza vântului se poate modifica. Pentru a obține un MMS-TV valid este necesar ca măsurătorile de viteză a vântului și turație să fie făcute într-o perioadă de timp, ordinul orelor, în care viteza vântului să nu se modifice semnificativ.

Verificarea MMS-TV și recalcularea lui se impune a fi făcută doar la schimbarea semnificativă a condițiilor meteo, iarnă, vară sau a datelor tehnice, de exemplu modificarea unghiului paletelor,  $\beta$

În timpul funcționării se folosește pentru determinarea lui  $\omega_{OPTIM}$ , dependența lui de viteză

$V_{ECH}$ , viteza echivalentă a vântului în forma:

$$\omega_{OPTIM} = 37.74V,$$

relație mai sus determinată.

#### Precizarea 5

Determinarea lui  $\omega_{FINAL}$  la viteze ale vântului variabile semnificativ în timp este o problemă complexă deoarece,  $P_{TV}$  oscilează între  $P_{TV-MAX}$ , corespunzătoare lui  $V_{MAX}$  și  $P_{TV-MIN}$  corespunzătoare lui  $V_{MIN}$

Pentru determinarea lui  $\omega_{FINAL}$  se folosește noțiunea de viteză echivalentă a vântului definită astfel:

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

unde factorul  $n$  din radicalul de mai sus se deduce din ecuația:

$$\omega_{OPTIM} = 37.74V_{ECH}$$

obținându-se:

$$V_{ECH} = \omega_{OPTIM}/37.74$$

sau la  $V_{ECH} = 17.349 [m / s]$ , valoare obținută din viteza vântului de forma

$V(t) = (16 - 6 \sin(0.17943t)) e^{-t/3600}$ , rezultă

$$17.349 = \sqrt[n]{\frac{1}{35} \int_0^{35} (16 - 6 \sin(0.17943t))^n dt}$$

Ecuația de mai sus are soluția  $n = 4$  și prin urmare viteza echivalentă se poate calcula cu relația:

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

**Precizarea 6**

La o viteză  $V(t)$  descrescătoare în timp, figura 10.13, de formă sinusoidală de perioadă  $T = 35. [s]$ , se obține

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

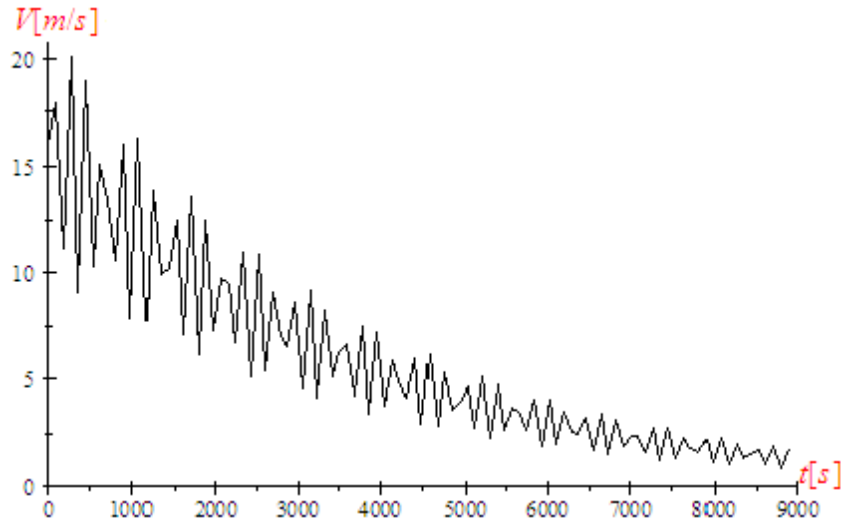


Fig 10.13. Variația în timp a vitezei vântului

La funcționarea în gol cu ecuația mișcării

$$\begin{cases} 40. \frac{d\omega}{dt} = (45.645 - \omega / ((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600})) \cdot e^{0.1(\omega / ((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600}) - 130.27)} \\ ((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600})^3 \end{cases} \quad \omega(0) = 333.$$

se obține variația în timp a VUM, figura 10.14.

$$\omega(1555) = 381.38$$

$$\omega(1666) = 381.97$$

$$\omega(1666 + 8.8) = 382.31$$

$$\omega(1666 + 17.5) = 382.52$$

$$\omega(1666 + 35.) = 382.$$

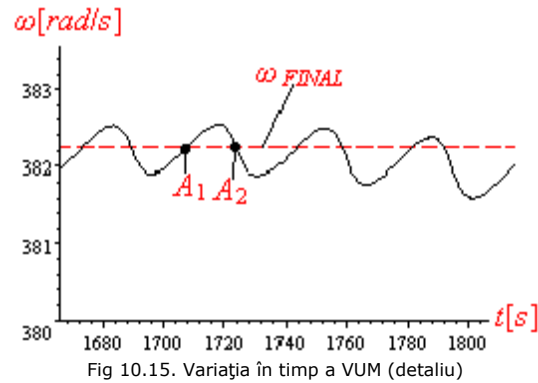
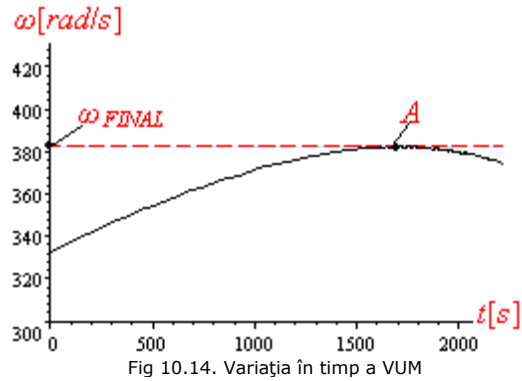
$$\omega(1666 + 35. + 17.5) = 382.54$$

$$\omega(1666 + 35. + 35) = 381.96$$

Pe cele două înregistrări de viteză a vântului,  $V(t)$  și VUM  $\omega(t)$  se bazează determinarea MMS-TV.

După un timp  $t = 1666 + 17.5 = 1683.5 [s]$  VUM atinge o valoare cvasistabilă

$\omega_{FINAL} = \omega(1666 + 17.5) = 382.52 [rad / s]$ , așa cum rezultă din figura 10.14, punctul A.



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

$$V(1666.) = (16 - 6 \sin(0.17943 \cdot 1666.)) e^{-1666./3600} = 11.814$$

$$V(1666.+8.8) = (16 - 6 \sin(0.17943 \cdot 1674.8)) e^{-1674.8/3600} = 13.377$$

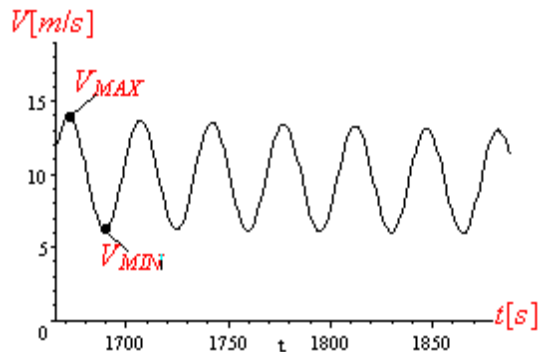
La  $t=1666+17.5=1683.5[s]$  viteza vântului are valoarea

$$V(1666+17.5) = (16 - 6 \sin(0.17943 \cdot 1683.5)) e^{-1683.5/3600} = 8.2962 [m/s]$$

$$V(1666+35.) = (16 - 6 \sin(0.17943 \cdot 1701.)) e^{-1701./3600} = 11.689$$

$$V(1666+35.) = (16 - 6 \sin(0.17943 \cdot 1718.5)) e^{-1718.5/3600} = 8.2263$$

$$V(1690.) = (16 - 6 \sin(0.17943 \cdot 1690.)) e^{-1690./3600} = 6.2635 [m/s]$$



Din ecuația mișcării

$$J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega = \omega \cdot M_{TV} = P_{TV}$$

la  $\omega = ct$  rezultă

$$P_{TV} = 0$$

Informațiile din zona punctului de funcționare A, cu VUM stabilizată,  $\omega_{FINAL}$ , la care

$$P_{TV-SIMP}(\omega, V) = 0$$

$P_{TV-SIMP-8}(\omega, V) = \omega_{FINAL} \cdot (a - \omega_{FINAL}/(V)) \cdot e^{b(\omega_{FINAL}/(V)-c)} \cdot (V)^3 = 0$   
se pot folosi pentru determinarea constantei  $a$

$$a - \omega_{FINAL}/(V) = 0$$

Viteza unghiulară mecanică stabilizată,  $\omega_{FINAL}$ , are valoarea

$$\omega_{FINAL} = 382.52[\text{rad/s}]$$

obținându-se

$$a = 382.52/(V)$$

În zona punctului A viteza vântului variază între  $V_{MAX} = V(1666. + 8.8) = 13.377[m/s]$  și

$V_{MIN} = V(1690.) = 6.2635[m/s]$  și, deci, valoarea lui V din relația de mai sus este în intervalul

$$V_{MIN} \div V_{MAX}$$

Integrând ecuația mișcării

$$J \cdot \omega \cdot d\omega = P_{TV} \cdot dt$$

în intervalul de timp  $\Delta t = 17.5[s]$  între punctele  $A_1$  și  $A_2$  se obține:

$$0 = \int_{1710}^{1727.5} P_{TV} \cdot dt$$

sau

$$0 = \int_{1710}^{1727.5} (382.52 \cdot (a - 382.52/(V)) \cdot e^{b(382.52/(V)-c)} \cdot (V)^3) \cdot dt$$

La  $V(t) = (16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600}$  rezultă

$$\int_{1710}^{1727.5} \left( \frac{382.52 \cdot (a - 382.52 / ((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600})) \cdot e^{b(382.52 / ((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600}) - c)}}{((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600})^3} \right) \cdot dt = 0$$

Din cauza complexității matematice rezultatul obținut nu poate fi folosit în aplicațiile curente și din acest motiv este util a folosi viteza medie a vântului,  $V_{MEDIU}$ , calculată cu relația:

$$V_{MEDIU} = \frac{1}{17.5} \int_{1710}^{1727.5} ((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600}) dt = 8.7528[m/s]$$

Cu această valoare se obține:

$$a = 382.52 / V_{MEDIU} = 382.52 / 8.7528 = 43.703$$

În concluzie, informațiile privind variația în timp a vitezei vântului și a VUM, la funcționarea în gol și în regim cvasistabil pot fi folosite pentru determinarea constantei  $a$  din MMS-TV, prin calculul vitezei medii a vântului.

### 10.3. Modelul matematic bazat pe funcția SINUS

Determinarea MM-TV, într-un timp scurt, se impune în cazurile reale în care viteza vântului variază semnificativ în timp.

Aliura clasică a caracteristicii puterii, funcția:  $P_{TV}(\omega, V)$  este dată în figura 10.17, cu

argumentele:  $\omega$  – viteza unghiulară mecanică,  $V$  – viteza vântului.

Această funcție poate fi modelată prin funcția SINUS, de forma:

$$P_{TV}(\omega, V) = k \cdot V^3 \cdot \sin\left(\pi^a \sqrt{\frac{\omega}{V/b}}\right)$$

unde:  $k, a, b$  sunt constante dependente de datele constructive ale TV și care se determină din măsurători de turație și VUM în două puncte de funcționare: MPP și F, figura 10.17.

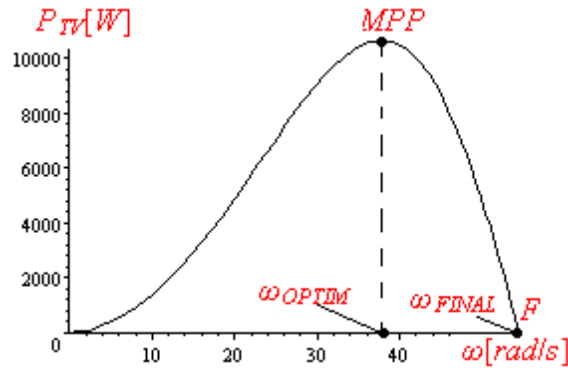


Fig.10.17. Caracteristica puterii la o TV

Punctele de funcționare importante sunt:

- 1) Punctul de putere maximă, MPP, cu VUM -  $\omega_{OPTIM}$  și
- 2) Punctul de putere nulă, F, cu  $\omega = \omega_{FINAL}$

Modelul matematic se determină din coordonatele acestor două puncte de funcționare.

### 10.3.1.Studiu de caz

În [RUI ] prin  $\beta$  se ține seamă de unghiul de înclinare al paletelor

$$P_{TV} = \rho \pi R_p^2 C_p (\lambda) V^3$$

unde :  $\rho$  – densitatea aerului;  $R_p$  – raza paletelor;  $C_p (\lambda)$  – coeficient de conversie al puterii;  $\lambda = \omega R_p / V$  ;  $V$  – viteza vântului;  $\omega$  – viteza unghiulară mecanică, VUM

Coeficientul de conversie al puterii,  $C_p (\lambda)$ , are forma:

$$C_p (\lambda, \omega_T) = 0.73 \left( \frac{151}{\lambda_i} - 0.002\beta - 13.2 \right) e^{-18.4/\lambda_i}$$

unde:  $\beta$  – unghiul de înclinare al paletelor, în grade

$$\lambda_i = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} \frac{0.035}{\beta^2 + 1}$$

La  $\beta = 0, R = 3.3 [m], V = 22 [m / s]$  se obține

$$\lambda_i = \frac{1}{\frac{1}{\lambda} - 0.035} = \frac{1}{\frac{1}{\frac{3.3\omega}{22}} - 0.035} = \frac{1}{\frac{6.667}{\omega} - 0.035} = \frac{\omega}{6.667 - 0.035\omega}$$

$$C_p (\lambda, \omega_T) = 0.73 \left( \frac{151 \cdot (6.667 - 0.035\omega)}{\omega} - 13.2 \right) e^{-\frac{1}{\omega} (122.67 - 0.644\omega)}$$

#### Determinarea lui $\omega_{FINAL}$

Printr-o probă la funcționarea în gol se înregistrează VUM în timp și se obține, la  $V=22 [m/s]$ ,  $\omega_{FINAL} = 54.459 [rad / s]$  așa cum rezultă din figura 10.18.

Pentru a obține  $\omega_{FINAL}$  într-un timp scurt se antrenează TV din exterior la  $\omega(0) = 43 [rad / s]$

$$\begin{cases} 15 \cdot \frac{d\omega}{dt} \omega = 22 \cdot \sin \left( 1.6653 \times 10^{-3} \omega^{\frac{188\ 682\ 805\ 335\ 949\ 734\ 901}{100\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000}} \right) \\ \omega(0) = 43. \end{cases}$$

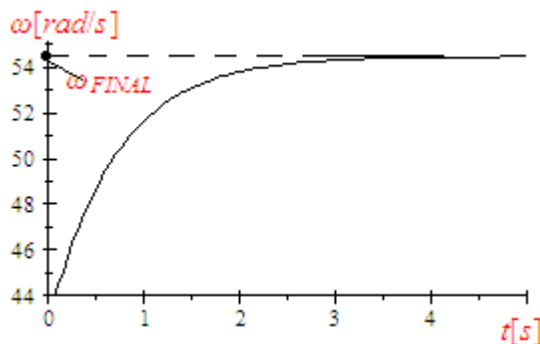


Fig.10.18. Variația în timp a VUM

Cu  $\omega_{FINAL} = 54.459 [rad / s]$  se obține constanta  $b$  din ecuația:

$$P_{TV}(\omega, V) = k \cdot V^3 \cdot \sin\left(\pi \sqrt{\frac{\omega}{V/b}}\right) = k \cdot V^3 \cdot \sin\left(\pi \sqrt{\frac{\omega_{FINAL}}{V/b}}\right) = 0$$

sau

$$\sin\left(\pi \sqrt{\frac{\omega_{FINAL}}{V/b}}\right) = 0$$

și rezultă:  $\frac{\omega_{FINAL}}{V/b} = 1$ , deci  $\omega_{FINAL} = V / b$ , sau

$$54.459 = 22 / b \quad \text{cu soluția: } b = 0.40397$$

#### Determinarea MPP

În zona MPP se fac măsurători de turație, figura 10.19.

$$\begin{cases} 15 \cdot \frac{d\omega}{dt} \omega = 22.3 \sin\left(1.6653 \times 10^{-3} \omega^{\frac{188\,682\,805\,335\,949\,734\,901}{100\,000\,000\,000\,000\,000\,000}}\right) \\ \omega(0) = 33. \end{cases}$$

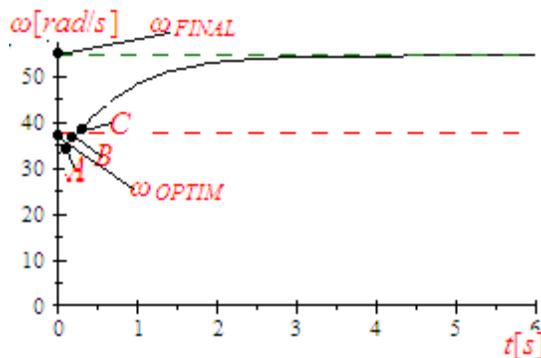


Fig.10.19. Variația în timp a VUM

Turbina se aduce la valoarea  $\omega(0) = 33. [rad / s]$  trecând generatorul în regim de motor.

Se obține puterea TV în punctele A,B,C, figura 10.20, din variația energiilor cinetice în sensul celor de mai jos.

Din ecuația mișcării :

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{TV}$$

prin înmulțire cu  $\omega$  se obține puterea dată de turbină

$$J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega = \omega \cdot M_{TV} = P_{TV}$$

Prin integrare se obține energia mecanică captată, în intervalul de timp  $\Delta t = t_k - t_{k-1}$ , sub forma:

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

unde:  $J$  – momentul de inerție echivalent;  $\omega_k$  – VUM la momentul  $t_k$ ;  $\omega_{k-1}$  – VUM la momentul

$t_{k-1}$ .

Puterea echivalentă,  $P_{ECH}$ , la VUM  $\omega_k^* = (\omega_k + \omega_{k-1})/2$  este

$$P_{ECH} = J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2) / (2 \cdot \Delta t)$$

Puterea echivalentă a turbinei  $P_{ECH}(\omega)$ , generează aceeași formă de variație în timp a VUM ca și puterea reală,  $P_{TV}$ .

$$\text{punctul A } \omega(0.1) = 35.006 [\text{rad} / \text{s}]$$

$$\text{zona AB } P_{ECH} = J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2) / (2 \cdot \Delta t) = 15 \cdot (36.959^2 - 35.006^2) / (0.2) = 10541. [\text{W}]$$

$$\text{punctul B } \omega(0.2) = 36.959 [\text{rad} / \text{s}]$$

$$\text{zona BC } P_{ECH} = J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2) / (2 \cdot \Delta t) = 15 \cdot (38.831^2 - 36.959^2) / (0.2) = 10641. [\text{W}]$$

$$\text{punctul C } \omega(0.3) = 38.831 [\text{rad} / \text{s}]$$

$$\text{zona CD } P_{ECH} = J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2) / (2 \cdot \Delta t) = 15 \cdot (40.593^2 - 38.831^2) / (0.2) = 10496. [\text{W}]$$

$$\text{punctul D } \omega(0.4) = 40.593 [\text{rad} / \text{s}]$$

În ecuația MM-TV

$$P_{TV}(\omega, V) = k \cdot V^3 \cdot \sin\left(\pi^a \sqrt{\frac{\omega}{V/b}}\right)$$

la  $b = 0.40397$  se obține:

$$V/b = 22 / 0.40397 = 54.459$$

Considerând puterea constantă pe zona AB, respectiv BC rezultă

$$\text{zona AB } P_{TV}(\omega, 22) = k \cdot 22^3 \cdot \sin\left(\pi^a \sqrt{\frac{35.983}{54.459}}\right) = k \cdot 22^3 \cdot \sin\left(\pi^a \sqrt{0.66074}\right) = 10541. [\text{W}]$$

$$\text{zona BC } P_{TV}(\omega, 22) = k \cdot 22^3 \cdot \sin\left(\pi^a \sqrt{\frac{37.895}{54.459}}\right) = k \cdot 22^3 \cdot \sin\left(\pi^a \sqrt{0.69584}\right) = 10641. [\text{W}]$$

Maximul puterii se obține la  $\omega_{OPTIM}$ , așa cum rezultă din rezultatele de mai jos

$$\omega_{OPTIM} = (\omega_B + \omega_C) / 2 = (36.959 + 38.831) / 2 = 37.895 [\text{rad} / \text{s}]$$

Din ecuația:

$$\pi^a \sqrt{\frac{37.895}{54.459}} = \pi / 2, \text{ se obține } a = 0.52316$$

Înlocuind în prima ecuație rezultă:

$$k \cdot 22^3 \cdot \sin\left(\pi^{0.52316} \sqrt{0.66074}\right) = 10541.$$

sau

$$k \cdot 22^3 \cdot \sin(1.4228) = 10541. \text{ ,cu soluția: } \{k = 1.0009\}$$

Se obține, astfel, MM-TV, sub forma:

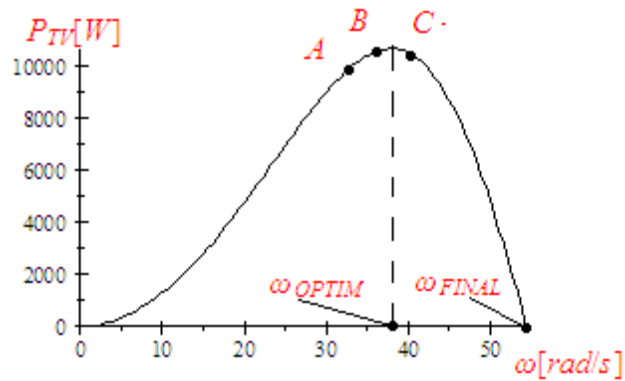
$$P_{TV}(\omega, V) = 1.0009 \cdot V^3 \cdot \sin\left(\pi^{0.52316} \sqrt{\frac{\omega}{V/0.40397}}\right)$$

La  $V=22$  [m/s] se obține:

$$P_{TV}(\omega, 22) = 1.0009 \cdot 22^3 \cdot \sin\left(\pi^{0.52316} \sqrt{\frac{\omega}{22/0.40397}}\right)$$

sau

$$P_{TV}(\omega, 22) = 1.0009 \cdot 22^3 \cdot \sin(1.5091 \times 10^{-3} \omega^{1.9115})$$

Fig.10.20. Caracteristica puterii la  $V=22$  [m/s]

Viteza unghiulară optimă se obține din anularea derivatei funcției:  $P_{TV}(\omega)$  pentru o viteză dată  $V$

$$\frac{dP_{TV}(\omega)}{d\omega} = \frac{d(1.0009 \cdot V^3 \cdot \sin(\pi^{0.52316} \sqrt{\frac{\omega}{V \cdot 0.40397}}))}{d\omega} = 0$$

sau

$$0.55552 \left(\frac{1}{V} \omega\right)^{1.9115} = 1.57$$

sau

$$\frac{1}{V} \omega = (2.8262)^{\frac{1}{1.9115}} = 1.7221$$

obținându-se:

$$\omega_{OPTIM} = 1.7221 \cdot V$$

**Observația 1:** viteza unghiulară mecanică,  $\omega_{OPTIM}$ , se poate determina și direct din  $\omega_{FINAL}$ , astfel:

$$\sin\left(\pi^{0.52316} \sqrt{\frac{\omega}{\omega_{FINAL}}}\right) = 1$$

sau

$$\pi^{0.52316} \sqrt{\frac{\omega}{\omega_{FINAL}}} = \frac{\pi}{2}$$

sau

$$0.52316 \sqrt{\frac{\omega_{OPTIM}}{\omega_{FINAL}}} = \frac{1}{2}$$

sau

$$\frac{\omega_{OPTIM}}{\omega_{FINAL}} = \left(\frac{1}{2}\right)^{0.52316} = 0.69585$$

de unde rezultă

$$\omega_{OPTIM} = 0.69585 \cdot \omega_{FINAL}$$

Cu  $\omega_{FINAL} = 54.459$  [rad / s] se obține:

$$\omega_{OPTIM} = 0.69585 \cdot \omega_{FINAL} = 0.69585 \cdot 54.459 = 37.895$$
 [rad / s]

același rezultat ca cel obținut anterior din măsurători de turație.

Prin urmare, este suficient a măsura VUM stabilizată la funcționarea în gol,  $\omega_{FINAL}$  și VUM optimă,  $\omega_{OPTIM}$ , se obține foarte simplu folosind relația:

$$\omega_{OPTIM} = 0.69585 \cdot \omega_{FINAL}$$

**Importanța valorii lui  $\omega_{FINAL}$**

Cunoscând VUM de la funcționarea în gol, în regim stabilizat,  $\omega_{FINAL}$ , se poate defini o viteză echivalentă,  $V_{ECH}$ , constantă, la care puterea echivalentă este nulă:



$$P_{ECH}(\omega_{FINAL}, V_{ECH}) = 0$$

sau

$$P_{ECH}(\omega) = \omega_{FINAL} \cdot (45.645 - \omega_{FINAL}/(V_{ECH})) \cdot e^{0.1(\omega_{FINAL}/(V_{ECH})-130.27)} \cdot (V_{ECH})^3 = 0$$

de unde se obține  $V_{ECH} = 17.349 [m/s]$  și la o viteză a vântului de forma:

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

rezultă:

$$17.349 = \sqrt[n]{\frac{1}{35} \int_0^{35} (16 - 6 \sin(0.17943t))^n dt}$$

Ecuția de mai sus are soluția:  $n = 4$  și prin urmare viteza echivalentă se poate calcula cu relația:

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

## 10.4. Conducerea optimală a sistemului TV+GSMP

Prin măsurarea vitezei vântului cu anemometrul AN, figura 10.21, se determină viteza echivalentă  $V_{ECH}$  și apoi VUM optimă,  $\omega_{OPTIM}$ . Se compară  $\omega_{OPTIM}$  cu valoarea măsurată a  $VUM$ ,  $\omega$ , și diferența lor:

$$\Delta\omega = \omega_{OPTIM} - \omega$$

constituie mărime de intrare a regulatorului R. Mărimea de ieșire a regulatorului R este transmisă elementelor de comutație din convertoarele de putere interpușe între generator și rețea.

Se realizează, astfel o funcționare în zona optimă din punct de vedere energetic, în condițiile în care viteza vântului variază semnificativ în timp.

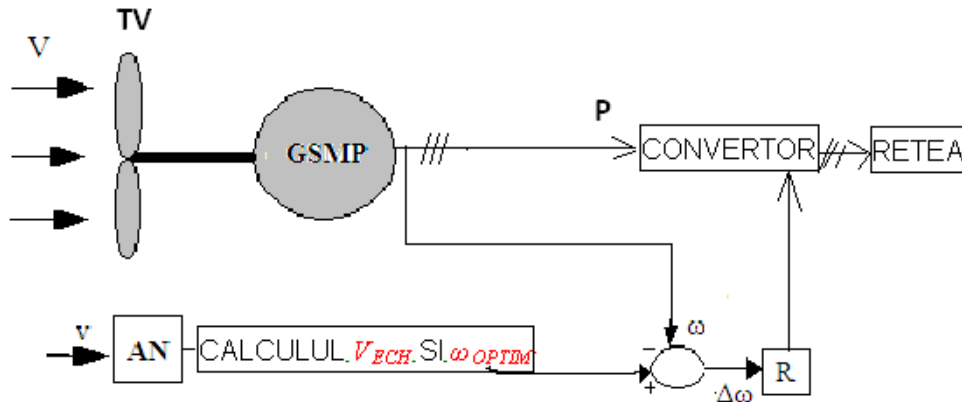


Fig.10.21 Sistemul de conducere

## 10.5. Concluzii

La sistemele eoliene ce funcționează la viteze ale vântului variabile semnificativ în timp s-a determinat zona de maxim energetic, zonă caracterizată de VUM  $\omega_{OPTIM}$ .

Pentru determinarea lui  $\omega_{OPTIM}$  s-a introdus noțiunea de putere echivalentă a turbinei,  $P_{ECH}$ , care este dependentă de VUM,  $\omega$ . Maximul  $P_{ECH}$  este la  $\omega_{OPTIM}$ .

Estimarea funcției  $P_{ECH}(\omega)$  și determinarea lui  $\omega_{OPTIM}$  se bazează pe valorile măsurate ale VUM de la arborele generatorului sau turbinei, la o funcționare în gol a sistemului, deci cu generatorul declupat de la sarcină. Puterea echivalentă,  $P_{ECH}$ , corespunde vitezei echivalente a vântului,  $V_{ECH}$ . Aceasta se calculează din valoarea reală a vântului măsurată cu anemometrul atașat turbinei, folosind un model matematic original și deosebit de util în aplicațiile curente, mai ales în locațiile în care viteza vântului variază, ca și valoare, semnificativ în timp. Prin urmare, realizarea optimului energetic, la un sistem eolian ce funcționează la viteze ale vântului variabile semnificativ în timp, se bazează pe date certe, măsurători ale vitezei vântului și turației la turbină.

Principalele contribuții personale din acest capitol sunt:

- determinarea modelului matematic al turbinei folosind măsurători de la funcționarea în gol;
- determinarea VUM optime,  $\omega_{OPTIM}$ , din VUM stabilizată la funcționarea în gol,  $\omega_{FINAL}$ , obținută din măsurători de turație;
- definirea vitezei echivalente,  $V_{ECH}$ , constantă, din VUM stabilizată la funcționarea în gol,  $\omega_{FINAL}$ ;
- determinarea a două variante de modele matematice simplificate pentru turbina de vânt;
- determinarea limitelor între care sunt valabile modelele matematice simplificate;
- determinarea unui model matematic al turbinei de vânt bazat pe funcția SINUS;
- determinarea maximului energetic folosind modelul matematic cu SINUS.

## 11. DETERMINAREA EXPERIMENTALĂ A CARACTERISTICII PUTERII LA O TURBINA DE VÂNT PRINTR-O PROBĂ DE FUNCȚIONARE ÎN GOL

Caracteristicile experimentale ale puterii,  $P_{TV}(\omega, V)$ , sunt modelate prin relația:

$$P_{TV}(\omega, V) = a(V/\omega - b)e^{-c(V/\omega)}V^3$$

unde:  $a, b, c$  – coeficienți ce urmează a fi determinați;  $V$  – viteza vântului;  $\omega$  – viteza unghiulară mecanică, VUM.

Determinarea energiei eoliene captate, într-un interval de timp dat,  $\Delta t$ , se face prin măsurători de VUM și energie electrică debitată, așa cum se demonstrează în continuare, folosind ecuația mișcării la funcționare în gol:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{TV}$$

unde:  $J$  – momentul de inerție echivalent;  $M_{TV}$  – momentul la TV;  $M_{GSMP}$  – momentul la GSMP

Prin înmulțire cu  $\omega$  se obține:

$$J \frac{d\omega}{dt} \omega = \omega \cdot M_{TV} = P_{TV}$$

sau prin integrare, pe intervalul de eșantionare  $\Delta t = t_k - t_{k-1}$ , rezultă:

$$J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2) / 2 = \int_{t_{k-1}}^{t_k} P_{TV} \cdot dt = P_{TV-MEDIU} \cdot \Delta t$$

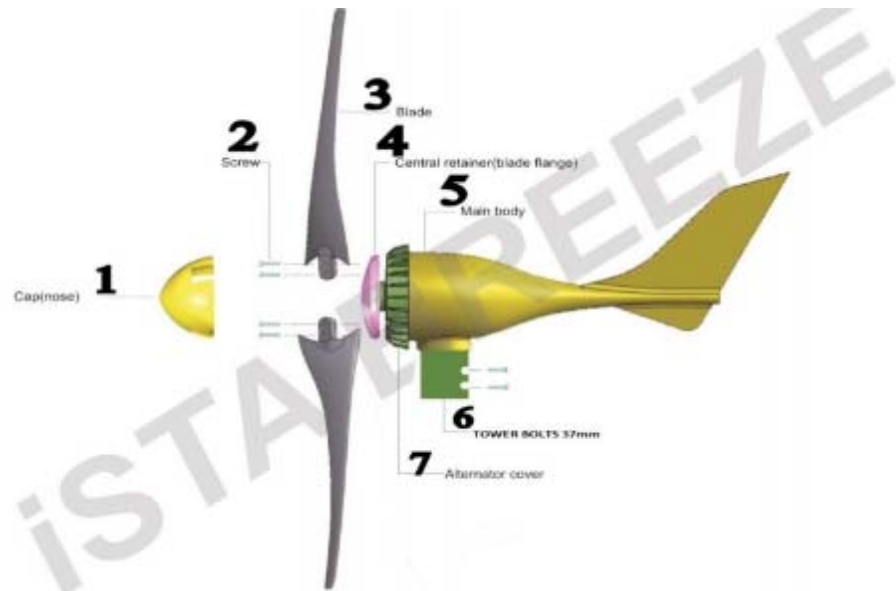
unde:  $\omega_k$  – VUM la momentul  $t_k$ ;  $\omega_{k-1}$  – VUM la momentul  $t_{k-1}$ ;  $\Delta t = t_k - t_{k-1}$  intervalul de eșantionare.

Calculând energia eoliană preluată de TV, care este suma variațiilor energiilor cinetice,  $\Delta W_{cinetic}$ , sub forma:

$$W_{eoliana} = \int_{t_{k-1}}^{t_k} P_{TV} \cdot dt = J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2) / 2$$

se poate determina caracteristica puterii, adică funcția:  $P_{TV}(\omega)$ .

Se determina caracteristica puterii la o TV de tipul **ISTA BREEZE I-500**.



### construction

Position	Description	Number
1	NOSE	1
2	M6 x 25 stainless Steel	6
3	Blades i-500 (50cm) ----- L-500 (60cm)	3
4	Flange	1
5	Housing	1
6	Pole connection To plug in $\varnothing$ 37mm	1
7	Alternator cap	1

Generatoarele eoliene sunt excitate cu magneți permanenți din neodim.  
 Tubina funcționează de la 3 [ m / s ].

Încercările s-au făcut în laboratorul de la facultatea de mecanică.



Fig.11.1 Tunelul aerodynamic și TV



Fig.11.2 Vedere generală a tunelului aerodinamic și TV



Fig.11.3 Dispozitivul pentru reglarea și măsurarea vitezei vântului.

### INCERCĂRI EXPERIMENTALE

$\omega$ [rad/s]	n [rot/s]	Fregvență [Hz]
9,42	1,5	9
14,65	2,33	14
17,79	2,83	17
19,88	3,16	19

21,98	3,5	21
23,02	3,66	22
24,07	3,81	23
25,12	4	24
26,16	4,16	25
27,21	4,33	26
28,26	4,5	27

### STUDIU DE CAZ

Măsurând din 5 in 5 secunde VUM se obțin rezultatele :

$$W_{eoliana} = J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2) / 2$$

$$P_{TV} = W_{eoliana} / \Delta t = 45 \cdot (9.42^2) / 20 = 199.66 [W] - \text{PUNCTUL A}$$

$$P_{TV} = W_{eoliana} / \Delta t = 45 \cdot (14.65^2 - 9.42^2) / 20 = 283.24 [W] - \text{PUNCTUL B}$$

$$P_{TV} = W_{eoliana} / \Delta t = 45 \cdot (17.79^2 - 14.65^2) / 20 = 229.19 [W] - \text{punctul a}$$

$$P_{TV} = W_{eoliana} / \Delta t = 45 \cdot (19.88^2 - 17.79^2) / 20 = 177.14 [W] - \text{punctul b}$$

$$P_{TV} = W_{eoliana} / \Delta t = 45 \cdot (21.98^2 - 19.88^2) / 20 = 197.79 [W] - \text{punctul c}$$

$$P_{TV} = W_{eoliana} / \Delta t = 45 \cdot (23.02^2 - 21.98^2) / 20 = 105.3 [W] - \text{punctul d}$$

$$P_{TV} = W_{eoliana} / \Delta t = 45 \cdot (24.07^2 - 23.02^2) / 20 = 111.25 [W] - \text{punctul e}$$

$$P_{TV} = W_{eoliana} / \Delta t = 45 \cdot (25.12^2 - 24.07^2) / 20 = 116.21 [W] - \text{punctul f}$$

$$P_{TV} = W_{eoliana} / \Delta t = 45 \cdot (26.16^2 - 25.12^2) / 20 = 120.00 [W] - \text{punctul g}$$

$$P_{TV} = W_{eoliana} / \Delta t = 45 \cdot (27.21^2 - 26.16^2) / 20 = 126.09 [W] - \text{punctul h}$$

$$P_{TV} = W_{eoliana} / \Delta t = 45 \cdot (27.21^2 - 27.21^2) / 20 = 0 - \text{PUNCTUL C}$$

### 11.1. Modelul matematic al TV, (MM-TV)

Se are în vedere un model clasic, [14], pentru turbină.

Puterea dată de TV se calculează cu relația

$$P_{TV} = \rho \pi R_p^2 C_p(\lambda) V^3$$

unde :  $\rho$  – densitatea aerului;  $R_p$  – raza paletelor;  $C_p(\lambda)$  – coeficient de conversie al puterii;

$\lambda = \omega R_p / V$  ;  $V$  – viteza vântului;  $\omega$  – viteza unghiulară mecanică, VUM.

Coeficientul de conversie al puterii,  $C_p(\lambda)$ , se determină cu relația:

$$C_p(\lambda) = c_1 \left( \frac{c_2}{\lambda} - c_3 \right) e^{-\frac{c_4}{\lambda}},$$

unde:  $c_1 - c_4$  sunt constante date în catalog,

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{V}{R_p \omega} - 0.035$$

Prin înlocuire se obține caracteristica puterii sub forma:

$$P_{TV}(\omega, V) = k_1 \cdot (k_2 (V/\omega - 0.035 R_p) - c_3) \cdot e^{-k_3 (V/\omega - 0.035 R_p)} \cdot V^3$$

unde:  $k_1 = 1.225 \pi 1.5^2 c_1$ ;  $k_2 = c_2 / R_p$ ;  $k_3 = c_4 / R_p$

Valoarea maximă a funcției  $P_{TV}(\omega)$  se obține pentru VUM de referință/optimiză  $\omega_{ref}$ , prin derivare :

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

obtinandu-se:

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

sau

$$\omega_{OPTIM} = k_o \cdot V$$

unde  $k_o$  -constanta constructivă a turbinei.

Rezultatul obținut demonstrează legătura directă dintre  $\omega_{ref} / \omega_{OPTIM}$  și viteza vântului. Simulările au la bază ecuația mișcării:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{TV} - M_{GSMP}$$

unde:  $J$  – momentul de inerție echivalent;  $M_{TV}$  -momentul la TV;  $M_{GSMP}$  -momentul la GSMP. Prin urmare,puterea dată de TV se poate calcula cu relația:

$$P_{TV}(\omega, V) = a(V/\omega - b)e^{-c(V/\omega)} V^3$$

unde constantele  $a, b$  și  $c$ , de determină din măsurători.

Caracteristica puterii,  $P_{TV}(\omega, V)$ , la viteza vântului de valoare:

$$V = 10.6 [m/s]$$

fiind:

$$P_{TV}(\omega, 10.6) = a(V/\omega - b)e^{-c(V/\omega)} V^3 = a(10.6/\omega - b)e^{-c(10.6/\omega)} 10.6^3$$

se obțin, în punctele A,B,C,puteriile:

**PUNCTUL A**

$$P_{TV-A} = W_{eoliana}/\Delta t = 45 \cdot (9.42^2)/20 = 199.66 [W]$$

sau:

$$199.66 = a(10.6/9.42 - b)e^{-c(10.6/9.42)} 10.6^3 = a(1.1253 - b)e^{-c(1.1253)} 10.6^3$$

**PUNCTUL B**

$$P_{TV-B} = W_{eoliana}/\Delta t = 45 \cdot (14.65^2 - 9.42^2)/20 = 283.24 [W]$$

sau:

$$283.24 = a(10.6/14.65 - b)e^{-c(10.6/14.65)} 10.6^3 = a(0.72355 - b)e^{-c(0.72355)} 10.6^3$$

**PUNCTUL C**

$$P_{TV-C} = W_{eoliana}/\Delta t = 45 \cdot (27.21^2 - 27.21^2)/20 = 0$$

sau:

$$0 = a(10.6/27.21 - b)e^{-c(10.6/27.21)} 10.6^3$$

Din această ultimă relație rezultă constanta  $-b$  de valoare:

$$b = 10.6/27.21 = 0.38956$$

Înlocuind această valoare în valorile puterilor din punctele A și B se obține:

$$199.66 = a(10.6/9.42 - 0.38956)e^{-c(10.6/9.42)} 10.6^3 = a(0.73571)e^{-c(1.1253)} 10.6^3 ;$$

**PUNCTUL A**

$$283.24 = a(10.6/14.65 - 0.38956)e^{-c(10.6/14.65)} 10.6^3 = a(0.33399)e^{-c(0.72355)} 10.6^3 ;$$

**PUNCTUL B**

Prin împărțire se obține:

$$\frac{199.66}{283.24} = \frac{a(0.73571)e^{-c(1.1253)} 10.6^3}{a(0.33399)e^{-c(0.72355)} 10.6^3}$$

sau:

$$0.70491 = 2.2028e^{-0.40175c}$$

de unde rezultă constanta  $c$  de valoare:

$$c = 2.8361$$



Cu aceste valori pentru  $b$  și  $c$ , astfel determinate, puterea în punctul A se poate pune sub forma:

$$199.66 = a(0.73571)e^{-2.8361(1.1253)}10.6^3 = a(0.73571)e^{-3.1915}10.6^3 ;$$

de unde rezultă constanta  $a$  de valoare:

$$199.66 = a(0.73571)e^{-3.1915}10.6^3$$

sau:

$$199.66 = a(0.73571)48.963 = a36.023$$

sau:

$$a = 5.5426$$

În acest fel s-a determinat caracteristica puterii TV sub forma:

$$P_{TV}(\omega, 10.6) = 5.5426(10.6/\omega - 0.38956)e^{-2.8361(10.6/\omega)}10.6^3$$

Maximul energetic se obține prin anularea derivatei puterii:

$$\frac{dP_{TV}(\omega, 10.6)}{d\omega} = \frac{d(5.5426(10.6/\omega - 0.38956)e^{-2.8361(10.6/\omega)}10.6^3)}{d\omega} = 0$$

sau:

$$2.9457 \times 10^8 \omega - 4.2072 \times 10^9 = 0, \text{ cu soluția: } \omega_{OPTIM-1} = 14.283[\text{rad/s}]$$

În figura 11.4 este reprezentată această caracteristică a puterii TV.

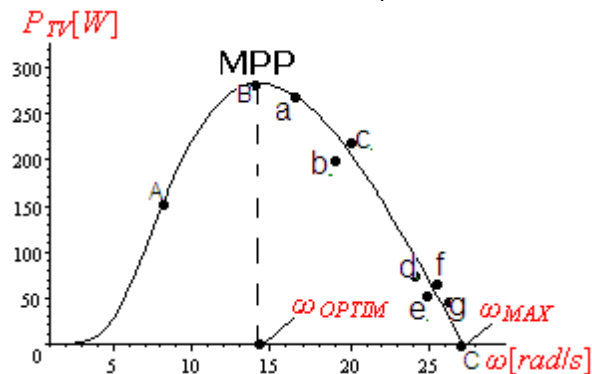


Fig.11.4 Caracteristica puterii TV

Punctele importante, de pe caracteristica puterii echivalente a GSMP sunt:

-punctul de putere maximă-MPP-cu VUM -  $\omega_{OPTIM}$

-punctul de putere nulă cu VUM maximă -  $\omega_{MAX}$ .

Determinarea corectă a acestor puncte, în condiții de exploatare, asigură o funcționare în zona MPP.

Valoarea maximă a funcției  $P_{TV}(\omega)$  se obține pentru VUM optimă,  $\omega_{OPTIM}$ , prin derivare :

$$\frac{dP_{TV}}{d\omega} = \frac{d}{d\omega}(5.5426(10.6/\omega - 0.38956)e^{-2.8361(10.6/\omega)}10.6^3) = 0$$

sau

$$1.1507 \times 10^{20} \omega - 1.6434 \times 10^{21} = 0,$$

obtinându-se:

$$\omega_{OPTIM-2} = 14.282[\text{rad/s}]$$

comparativ cu valoarea obținută prin anularea derivatei

$$\omega_{OPTIM-1} = 14.283[\text{rad/s}]$$

Diferența între cele 2 valori este foarte mică.

La funcționarea în gol a TV VUM maximă,  $\omega_{MAX}$ , se obține din ecuația:

$$P_{TV}(\omega, V) = 0$$

sau:

$$5.5426(10.6/\omega - 0.38956)e^{-2.8361(10.6/\omega)}10.6^3 = 0$$

sau:

$$\omega_{MAX} = 27.21[\text{rad/s}]$$

Făcând raportul:  $\omega_{OPTIM}/\omega_{MAX}$  ,se obține:

$$\omega_{OPTIM}/\omega_{MAX} = 14.282/27.21 = 0.52488$$

S-a demonstrat faptul că  $\omega_{OPTIM}$  se poate determina dacă se cunoaște  $\omega_{MAX}$  .Aceasta se poate determina cu ajutorul unei turbine de vânt auxiliare de mică putere ce funcționează în gol,anemometrul,figura 5.

## 12. CONCLUZII GENERALE ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE

Acest capitol sintetizează concluziile generale ale lucrării, contribuțiile originale aduse în cadrul tezei, modul de valorificare a rezultatelor obținute și direcțiile posibile de continuare a cercetărilor în domeniul abordat.

Elementele teoretice și practice prezentate în cadrul tezei de doctorat evidențiază următoarele concluzii cu caracter mai general:

Creșterea consumului energetic global și reducerea permanentă a rezervelor energetice, în special cele fosile : cărbuni, petrol, gaze naturale, necesită atragerea unor noi surse alternative, regenerabile cum ar fi : energia vântului și energia solară. Se poate, deci, afirma că domeniul analizat se va dezvolta și în continuare, fiind în atenția specialiștilor , mai ales că se estimează consumarea combustibililor fosili (cărbune, petrol, gaze) în următorii zeci de ani (50 de ani petrol, gaze, 200 ani cărbune).

Cunoașterea comportării acestor sisteme electroenergetice eoliene este esențială în :

- estimarea valorilor de șoc permise pentru sarcină ;
- aprecierea comportării dinamice a sistemului ;

Din punct de vedere al aplicațiilor software dezvoltate pentru analiza dinamicii CEE, se pot evidenția următoarele concluzii:

- prin rezolvarea ecuației mișcării se poate observa dinamica sistemului eolian;
- analizele efectuate cu ajutorul aplicațiilor software dezvoltate sunt realizate folosind modele matematice complete pentru turbina de vânt și generatorul electric;
- studiile de caz din literatura de specialitate se referă, în marea lor majoritate, la sisteme eoliene funcționând la viteze ale vântului constante în timp;
- în simulările date în prezenta lucrare se consideră viteza vântului variabilă în timp;
- toate instrumentele software elaborate sunt destinate SEE reale.

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 stadiului actual al integrării surselor regenerabile de energie la nivel mondial, pot fi enumerate următoarele contribuții:

- s-a realizat un studiu bibliografic sistematizat referitor la stadiul actual al utilizării la nivel mondial al energiilor regenerabile ;
- demonstrarea faptului că fără atragerea unor surse de energii regenerabile nu mai este posibilă realizarea creșterii energetice ca până în prezent;
- energiile regenerabile,preponderent la sistemele eoliene și solare, sunt dependente de condițiile meteo, care sunt aleatorii și se impune folosirea unui sistem de stocare pentru a exista o disponibilitate pe tot parcursul timpului;
- s-au evidențiat principalele aspecte care definesc energia eoliană ca principala sursă regenerabilă de energie din punct de vedere al investițiilor și integrării în SEE.

În capitolul 3, destinat prezentării principalelor aspecte ce privesc integrarea surselor regenerabile de energie de putere mare în sistemele electroenergetice actuale, se pot evidenția următoarele contribuții:

- efectuarea unui studiu bibliografic sistematizat privind integrarea pe scară largă a SRE de mare putere în SEE actuale, la nivel mondial, european și național;
- realizarea unei sinteze bibliografice, într-o manieră proprie, a principalelor aspecte de natură economică și tehnică ce însoțesc integrarea CEE în SEE actuale, în condițiile în care viteza vântului se modifică semnificativ în timp.

În cadrul capitolului 4 s-a realizat analiza dinamicii unui sistem eolian și energia înmagazinată în acumulatori electrice, AE, la viteze ale vântului variabile în timp, contribuțiile personale fiind:

- calculul energiei mecanice captate de turbina de vânt și transformă în energie electrică de către generatorul sincron cu magneți permanenți;
- calculul energiei înmagazinate într-o baterie de AE, în două variante: varianta1-redresor necomandat și varianta 2-redresor comandat și sarcină adaptată;
- determinarea, prin simulare, a diferențelor între cele două variante.

În cadrul capitolului 5 s-a prezentat o metodă de conducere originală a sistemelor electroenergetice eoliene, bazată pe măsurarea vitezei vântului și a turației de la generator. Prin determinarea unei viteze echivalente a vântului se poate determina turația optimă din punct de vedere energetic și astfel se modifică sarcina la generator pentru a asigura o funcționare în zona optimă. Principalele contribuții personale sunt:

- realizarea unor studii de caz la viteze ale vântului variabile în timp;
- determinarea încărcării la curentul limită admis;
- analiza evoluției în timp a procesului;
- determinarea unei relații originale pentru modificarea rezistenței de sarcină;
- crearea unui algoritm de conducere optimal din punct de vedere energetic, bazat pe măsurarea vitezei vântului în timp;
- comparație cu sistemele de reglare clasice cu reglatoare de tip PI;
- modificarea sarcinii astfel încât să se atingă viteza unghiulară mecanică optimă în minimumul de timp;
- determinarea unei viteze echivalente din viteza reală a vântului, rezultat original și deosebit de important în practică;
- perfecționarea sistemului de conducere prin prescrierea vitezei unghiulare mecanice optime în funcție de variația reală în timp a vitezei vântului .

În cadrul capitolului 6 se prezintă metode originale de estimare a maximumului energetic la sisteme eoliene funcționând la viteze ale vântului variabile în timp. Cunoașterea valorii turației, la care energia captată este maximă, constituie problema fundamentală în orice sistem de conducere performant. Aceasta impune controlul turației și cuplului la turbină și adaptarea sarcinii generatorului la viteza vântului. Prin simulare se determină viteza unghiulară mecanică, la care energia este maximă, considerând viteza vântului variabilă în timp. În această direcție pot fi enumerate următoarele contribuții:

- calcularea energiei mecanice maxime obținute la o viteză a vântului sinusoidală în timp, prin anularea derivatei funcției energiei;
- determinarea maximumului puterii echivalente;
- analiza influenței valorii momentelor de timp discret, la care se măsoară viteza vântului;
- introducerea noțiunii de putere echivalentă și determinarea maximumului acesteia;
- introducerea noțiunii de viteză echivalentă și calcularea acesteia prin integrarea vitezei reale a vântului în timp;
- realizarea, pe baza acestei viteze echivalente, a unor sisteme de conducere optimale;
- prezentarea unor metode simplificate, liniarizate, de calcul a maximumului energetic;
- determinarea maximumului energetic prin calcularea valorii energiei obținute;
- determinarea maximumului energetic prin măsurători la funcționarea în gol;
- determinarea maximumului energetic prin încărcări successive la generatorul electric;
- analiza dinamicii sistemului eolian la încărcare optimă.

În capitolul 7, destinat analizei variației în timp a turației la generator ,se determină zona de funcționare optimă din punct de vedere energetic, viteza vântului fiind variabilă în timp. Studiile se referă la funcționarea sistemului în punctele de putere maximă, MPP. Contribuțiile originale sunt:

- calculul energiilor captate la diferite valori ale VUM și deducerea valorii optime a VUM, corespunzătoare energiei maxime;
- s-a verificat valoarea VUM optime prin măsurarea în timp a turației și deducerea zonei de maxim energetic din calculul variațiilor energiilor cinetice;
- în analiza dinamicii sistemului s-a definit viteza echivalentă a vântului și puterea echivalentă a turbinei, putere asociată vitezei echivalente;
- s-au determinat energiile captate la diferite valori ale rezistenței de sarcină și s-a dedus valoarea rezistenței optime corespunzătoare energiei maxime;
- la această valoare a rezistenței optime s-au analizat variațiile puterilor la turbină și la generator;
- prin măsurarea vitezei vântului se determină valoarea VUM optime;
- prin analiza mai multor cazuri s-au putut stabili mărimile de bază ce conduc la o funcționare optimă;
- s-a dat legătura dintre viteza vântului și turația optimă la care trebuie să funcționeze sistemul, astfel încât energia eoliană captată să fie maximă;

- prin simulări, în prezenta lucrare și prin măsurători ale turației la generator în exploatare, se poate deduce turația optimă la generator, astfel încât să se obțină o energie maximă la o viteză a vântului variabilă în timp;
- s-au definit vitezele echivalente ale vântului și puterile echivalente, mărimi fundamentale în determinarea lui  $\omega_{OPTIM}$ ;
- determinarea puterii maxime prin măsurători pe turație și putere la generator la viteze ale vântului constante sau variabile în timp;
- analiza dinamicii sistemului la modificări ale sarcinii în vederea determinării MPP.

În cadrul capitolului 8 se pun bazele unor noțiuni fundamentale privind dinamica unui sistem eolian, în sensul introducerii conceptului de putere echivalentă a turbinei asociată cu viteza vântului variabilă în timp. Din proba la funcționarea în gol se pot obține informații deosebit de utile privind caracteristicile puterii turbinei de vânt. Prin proba la funcționarea în gol se rezolvă două probleme fundamentale :

- 1)** determinarea zonelor de maxim energetic la viteze ale vântului variabile în timp prin cunoșterea turației optime;
- 2)** deducerea modelului matematic al TV din măsurători de viteză a vântului și a turației la TV. Se pot evidenția următoarele contribuții:
  - determinarea vitezei echivalente a vântului și a puterii echivalente a turbinei, printr-o probă la funcționarea în gol;
  - s-a determinat modelul matematic al turbinei printr-o probă la funcționarea în gol;
  - s-a propus și validat prin simulări un model matematic simplificat pentru turbina de vânt;
  - s-a dat o metodă aproximativă, dar rapidă, pentru determinarea zonei de maxim a puterii echivalente;
  - s-a determinat zona de maxim energetic, zonă caracterizată de VUM  $\omega_{OPTIM}$ ;
  - s-a realizat optimul energetic, la un sistem eolian ce funcționează la viteze ale vântului variabile semnificativ în timp, pe baza măsurătorilor vitezei vântului și turației la turbină.

Capitolul 9 este în întregime original și cuprinde determinarea energiei înmagazinate în acumulatori electrice la un sistem eolian funcționând la viteze ale vântului variabile în timp. Se pot scoate în evidență următoarele contribuții originale:

- determinarea vitezei echivalente a vântului și a puterii echivalente a turbinei, la viteze ale vântului variabile în timp de formă sinusoidală;
- determinarea puterii echivalente printr-o probă la funcționarea în gol;
- s-a dat o metodă aproximativă pentru determinarea puterii echivalente;
- s-a calculat optimal o baterie de acumulatori care stochează energia captată, folosindu-se un model matematic adecvat pentru aceasta;

În cadrul capitolului 10 , printr-o probă la funcționarea în gol, se determină caracteristicile puterii turbinei de vânt. Prin proba la funcționarea în gol se pot rezolva două probleme fundamentale:

- 1)** determinarea zonelor de maxim energetic la viteze ale vântului variabile în timp prin cunoșterea turației optime;
- 2)** deducerea modelului matematic al TV ,MM-TV, din măsurători de viteză a vântului și a turației la TV. Contribuțiile originale sunt:
  - determinarea modelului matematic al turbinei folosind măsurători de la funcționarea în gol;
  - determinarea VUM optime din VUM stabilizată la funcționarea în gol, obținută din măsurători de turație;
  - definirea vitezei echivalente, constantă, din VUM stabilizată la funcționarea în gol;
  - determinarea a două variante de modele matematice simplificate pentru turbina de vânt;
  - determinarea limitelor între care sunt valabile modelele matematice simplificate;
  - determinarea unui model matematic al turbinei de vânt bazat pe funcția SINUS;
  - determinarea maximului energetic folosind modelul matematic cu SINUS;

În capitolul 11 , la funcționarea în gol, se determină experimental caracteristicile puterii turbinei de vânt în tunelul aerodinamic.

Rezultatele cercetării au fost și vor fi valorificate în cadrul unor contracte de cercetare științifică încheiate între Universitatea „Politehnica” din Timișoara și 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 . Dintre cele 5 lucrări 3 sunt publicate în străinătate, 2 sunt cotate ISI Thomson și 3 în alte BDI.

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 prin:

- implementarea metodelor de optimizare din punct de vedere energetic și la centralelor eoliene ce funcționează în prezent la randamente scăzute;
- extinderea instrumentului software pentru analiza dinamici sistemelor eoliene atât în faza de proiectare cât și în faza de exploatare;
- folosirea rezultatelor obținute la conceperea sistemelor de conducere optimale din punct de vedere energetic;
- implementarea soluțiilor date simple și deosebit de economice la sistemele cu stocarea energiei în acumulate electrice.

## BIBLIOGRAFIE

1. Ackermann T., Wind Power in Power Systems, John Wiley & Sons, England, 2005.
2. Adaramola M S, Krogstad P A. "Experimental investigation of wake effects on wind turbine performance. Renewable Energy", , 36: 2078--2086(2011)
3. Akpinar, S. and Akpinar, E.K., "Estimation of wind energy potential using finite mixture distribution models", Energy Conversion and Management 50, 877-884(2009).
4. Appa K. "Counter Rotating Wind Turbine System. Energy Innovations Small Grant (EISG)" Program Technical Report, California, USA, (2002)
5. Akpinar, S. and Akpinar, E.K., . "Wind energy analysis based on maximum entropy principle (MEP) - type distribution function", Energy Conversion and Management,48(4), 1140-1149.(2007)
6. Akpinar, E.K. and Akpinar, S., . "A statistical analysis of wind speed data used in installation of wind energy conversion systems", Energy Conversion and Management, 46(4), 515-532.(2005)
7. Allan R.N., Borkowska B., Grigg C. H., Probabilistic analysis of power flows, Proceedings of IEE, vol. 121, no. 12, 1974, pp.1551-1556.
8. Allan R.N., da Silva A.M. L., Burchett R.C., Evaluation methods and accuracy in probabilistic load flow solutions, IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, PAS-100, 1981, pp.2539-2546.
9. A.N. Celik, M. Kolhe, "Generalized feed-forward based method for wind energy prediction", Applied Energy 101 582--588(2013)
10. A.N. Celik, "Energy output estimation for small-scale wind power generators using Weibull-representative wind data, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics "91 693--(2003)
11. A.N. Celik, "Weibull representative compressed wind speed data for energy and performance calculations of wind energy systems", Energy Conversion and Management 44 3057--3072.(2003)
12. Ata R, Kocyigit Y, Kocyigit Y "An adaptive neuro-fuzzy inference system approach for prediction of tip speed ratio in wind turbines." Expert Syst Appl 37:5454--5460(2010)
13. Babescu M, Borlea I, Jigoria Oprea D."Fundamental aspects concerning Wind Power System Operattion Part.2, Case Study"Medina Tunisia 2012 IEEE MELECON, 2012,25-28 March,978-1-4673-0783-3
14. Babescu,M, Borlea I, Jigoria Oprea D "Fundamental aspects concerning Wind Power System Operattion Part.1, Matemactical Models" Medina Tunisia 2012 IEEE MELECON, 2012 ,25-28 March,978-1-4673-0783-3
15. M. Babescu, O.Gana,L.Clotea"Fundamental Problems related to the Control of Wind Energy Conversion Systems-Maximum Power Extraction and Smoothing the Power Fluctuations delivers to the Grid"OPTIM-13th International Conference on Optimizytion of Electrical and Electronic Equipment ,Optim 2012,Brasov,24-26 May
16. Babescu M, Borza I.,Gana O., Lăcătușu F."Comportarea sistemului electroenergetic eolian la variații rapide ale vitezei vântului" Producerea , transportul si utilizarea energiei, pp 11-24,Editura RISOPRINT Cluj-Napoca, 2010, ISSN 2066-4125.
17. Babescu M, Boraci.R, Chioreanu C, Koch C, Gana O On Functioning of the Electric Wind System at his Maximum Power ICC-CONTI 2010, Timișoara, Romania, May 27-29, 2010.
18. Babescu.M, Petrescu.D, Vasar.C, Prostean.O, Boraci.R- Maximum Power Point Control Approach for Wind Generators –SOFA 24-26 July 2014-Timișoara,România
19. Balog.F, Ciocârlie.H, Babescu.M,Petrescu.D-Maximizing the Captured Energy of a Wind System-IEE – International Symposion on applied Computational intelligence and informatics-SACI 2014- Polytechnic University, Timișoara, Romania
20. Balog.F, Ciocârlie.H, Erdodi.G, Petrescu.D- Peak Energy Determination by a Sample at Idle Mode Operation- IEE – International Symposion on applied Computational intelligence and informatics-SACI 2014- Polytechnic University, Timișoara, Romania
21. Borza.I, Erdodi.G, Petrescu.D, Lăcătușu.F- "Sistem Eolian cu Stocare în Acumuloare Electrice"-SME 2014-Conferința Știința Modernă și Energia-Cluj-Napoca-15-16 Mai 2014
22. Balog.F, Ciocârlie.H,Babescu.M,Erdodi.G- Equivalent speed and equivalent power of the wind systems that works at variable wind speed- SOFA 24-26 July 2014-Timișoara, România
23. Balog.F,Ciocârlie.H, Petrescu.D, Erdodi.G- "Behavior of the wind systems optimally controlled at variable wind speeds"- SOFA 24-26 July 2014-Timișoara,România
24. Badelin A., Large-scale integration of wind power in the Russian power supply: analysis, issues, strategy, PhD. Thesis, Kassel University Press GmbH, Kassel, Germany, 2007.

25. 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
26. Barthelmie R J, Jensen L E. "Evaluation of power losses due to wind turbine wakes at the Nysted offshore wind farm". Wind Energy, 2010, 13: 573–58
27. Barthelmie R J, Folkerts L, Ormel F T, et al. "Offshore wind turbine wakes measured by sodar". J Atmospheric Oceanic Tech, 2003, 20(4): 466--477
28. Barthelmie, R. J., Pryor, S., Frandsen, S. T., Hansen, K. S., Schepers, J., Rados, K., et al., "Quantifying the Impact of Wind Turbine Wakes on Power Output at Offshore Wind Farms," Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, Vol. 27, No. 8, pp. 1302-1317, 2010.
29. Barthelmie R J, Larsen G C, Pryor S C, et al. "Efficient development of offshore wind farms" (ENDOW): Modeling wake and boundary layer interactions. Wind Energy, 2004, 7: 225--245
30. Bej,A-Turbine de vânt-ISBN 973-625-098-9,Editura POLITEHNICA Timișoara,2003
31. Borbely A., Kreider J., Distributed Generation – The Power Paradigm for the New Millennium, CRC Press, USA, 2001.
32. Borza.I, Erdodi.G, Petrescu.D, Lăcătușu.F- Sistem Eolian cu Stocare în Acumulatori Electrice-SME 2014-Conferința Știința Modernă și Energia-Cluj-Napoca-15-16 Mai 2014
33. Burton T, Sharpe D, Jenkins N, et al. "Wind Energy "Handbook. England: John Wiley & Sons Ltd, 2001
34. Carta JA, Vela ´zquez S " A new probabilistic method to estimate the long-term wind speed characteristics at a potential wind energy conversion" site. Energy 36:2671--2685,(2011)
35. Carta JA, Ramirez P, Bueno C " A joint probability density function of wind speed and direction for wind energy analysis". Energy Convers Manag 49:1309--1320,(2008)
36. Carta JA, Ramirez P, Velazquez S "A review of wind speed probability distributions used in wind energy analysis: case studies in the Canary Islands". Renew Sustain Energy Rev 13:933--955,(2009)
37. Corten, G. P. and Schaak, P., "Heat and Flux: Increase of Wind Farm Production by Reduction of the Axial Induction," Proc. of the European Wind Energy Conference, 2003.
38. Corten, G. P. and Schaak, P., "More Power and Less Loads in Wind Farms," Proc. of European Wind Energy Conference, 2004.
39. Calaf M, Meneveau C, Meyers J. "Large eddy simulation study of fully developed wind-turbine array boundary layers". Phys Fluids, 2010, 22: 015110
40. Conzemius R J. "Wind turbine and sodar observations of wakes in a large wind farm". In: 19th Symposium on Boundary Layers and Turbulence, Keystone, CO,U.S., Aug., 2010
41. Chang, T.J., Wu, Y.T., Hsu, H.Y., Chu, C.R., Liao, C.M., ."Assessment of wind characteristics and wind turbine characteristics in Taiwan". Renewable Energy, 28, 851--871.,2003
42. 871.,2003
43. Caixia Wang, Zongxiang Lu, Ying QiaoA Consideration of the Wind Power Benefits in Day-Ahead Scheduling of Wind-Coal Intensive Power Systems, IEEE Transactions On Power Systems, Vol. 28, No. 1, February 2013.
44. Dany G., Power reserve in interconnected systems with high wind power production, IEEE 2001 Porto Power Tech Conference, vol.4, Porto, Portugal, 2001, pp.1-6.
45. Diedrichs V. et al., Analysis of large scale integration of wind power in regional HV-grids using probabilistic power flow, Proceedings of the 4th International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power and Trans-mission Networks for Offshore Wind Farms, Billund, Denmark, 2003, pp.1-6.
46. Dondi P., Bayoumi D., Haederli C., Julian D., Suter M., Network integration of distributed power generation, Journal of Power Sources, vol. 106, 2002, pp.1-9.
47. Driesen J., Belmans R, Distributed generation: challenges and possible solutions, Power Engineering Society General Meeting, 2006, pp.1-8.
48. Erdodi G. M., Petrescu D. I., Sorandaru C., - The determination of the Maximum Energetic Zones for a Wind System, Operating at Variable Wind Speeds, October 17-19, 2014 , Sinaia, Romania
49. Erdem E, Shi J ARMA "Based approaches for forecasting the tuple of wind speed and direction". Appl Energy 88:1405--1414 Gallego C, Pinson P, Madsen H, Costa A, Cuerva A (2011) Influence of local wind speed and direction on wind power dynamics--- application to offshore very short-term forecasting. Appl Energy 88:4087--4096,(2011)
50. 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,
51. Eugene C. Morgan, Matthew Lackner, Richard M. Vogel, Laurie G. Baise, "Probability distributions for offshore wind speeds", Energy Conversion and Management 52 (2011) 15--26.



52. Farahani E M, Hosseinzadeh N, Ektesabi M M. "Comparison of dynamic responses of dual and single rotor wind turbines under transient conditions". In: Sustainable Energy Technologies (ICSET), 2010 IEEE International Conference, Kandy, Sri Lanka, Dec., 2010
53. Gavis M.L--"Dual Input DC-DC Converters for Renewable Energy Processing"---Teza de doctorat,feb.2013,Univ."POLITEHNICA TIMISOARA"
54. Gilbert D., Exploration in Romania from Yesterday to Tomorrow, Conferința 150 de ani de petrol românesc, București, 2007.
55. Greenwood C., Market capitalization statistics and analysis, New Energy Finance, 2009, <http://www.newenergymarket.com>.
56. Gertmar-"Windturbines". Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2000-
57. Habash R W Y, Groza V, Yang Y, et al. "Performance of a Contra rotating Small Wind Energy Converter". In: DELTA 2011, IEEE 6th International Workshop on Electronic Design, Test and Application, Queenstown, New Zealand, 17--19 Jan, 2011. 263--268.
58. Hafidi G., Jonathan C.- Wind speed estimation for wind turbine control, 2012 IEEE International Conference on Control Applications Part of 2012 IEEE Multi-Conference on Systems and Control October 3-5, Dubrovnik, Croatia, 2012.
59. Hao Sipeng Zhang Yangfei Li Xianyun, Yuan Yue-Equivalent wind speed model in wind farm dynamic analysis, 978-1-4577-0365-2/11, IEEE 2011.
60. Haseeb Ahmad, Steven Coppens, Bahri Uzunoglu-Connection of an offshore wind park to HVDC converter platform without using offshore AC collector platforms, 2013 IEEE Green Technologies Conference, 978-0-7695-4966-8/13, DOI 10.1109/GreenTech.2013.68.
61. Hau E. "Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics". Berlin: Springer, 2005
62. Hermina A., Șerban C.A., Condiții impuse de structura SEN pentru preluarea puterii produse de CEE, SUSPLAN Workshop, Bucharest, 2009.
63. Heir S., Grid integration of wind energy conservation systems, 2nd Edition, John Willey & Sons Ltd., England, 2006.
64. Hossein Hosseini S., Choon Yik Tang, John N. Jiang- Calibration of a Wind Farm Wind Speed Model With Incomplete Wind Data, IEEE Transactions On Sustainable Energy, Vol. 5, No. 1, January 2014.
65. Hlusov V., Contribuții la evaluarea rentabilității și fezabilității utilizării surselor distribuite de energie pentru condițiile specifice Republicii Moldova, Teză de doctor în Științe Tehnice, Chișinău, 2007.
66. Holttinen H., The impact of large scale wind power on the Nordic electricity system, PhD. Thesis, VTT Publications 554, 2004.
67. Holttinen, H. Koreneff, G., Imbalance costs of wind power for a hydro power producer in Finland, Proceedings of European Wind Energy Conference EWEC2007, Milan, Italy, 2007, pp.1-6.
68. Hu H, Tian W, Ozbay A. "Wind turbine aeromechanics and interferences among multiple turbines in onshore and offshore wind farms". In: 2013 NAWEA Symposium on Wind Energy, the University of Colorado, Boulder, USA, Aug. 06--08, 2013
69. Hu H, Yang Z, Sarkar P. "Dynamic wind loads and wake characteristics of a wind turbine model in an atmospheric boundary layer wind". Exp Fluids, 2012, 52(5): 1277--1294
70. Huajie Ding, Zechun Hu, Yonghua Song, Jincheng Wu, Xiaoxu Fan-Coordinated Operational Strategy of Energy Storage System and Wind Farm, 2013 4th IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe), Copenhagen.
71. J.A. Carta, P. Ramirez, Analysis of two-component mixture Weibull statistics for estimation of wind speed distributions, Renewable Energy 32 (2007) 518--531
72. Jianxiao Zou, Junping Yao, Qingze Zou, Hongbing Xu-A Multi-Objective Optimization Approach to Active Power Control of Wind Farms, 2012 American Control Conference Fairmont Queen Elizabeth, Montreal, Canada, 2012, 978-1-4577 -1096-4/12.
73. Jeong H G, Seung R H, Lee K B-"An Improved Maximum Power Point Tracking Method for Wind Power Systems"-Energies 2012, 5, 1339-1354; doi:10.3390 /en5051339 energies ISSN 1996-1073, [www.mdpi.com/journal/energies](http://www.mdpi.com/journal/energies)
74. 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
75. Jonkman, J. M., Butterfield, S., Musial, W., and Scott, G., "Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development," National Renewable Energy Laboratory Golden, NREL/TP-500-38060, 2009.
76. Jung S N, No T S, Ryu K W. "Aerodynamic performance prediction of a 30 kW counter-rotating wind turbine system". Renewable Energy, 2005, 30: 631--644

77. K. Sunderland, T. Woolmington, J. Blackledge, M. Conlon, "Small wind turbines in turbulent (urban) environments: A consideration of normal and Weibull distributions for power prediction", *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 121 (2013) 70--81
78. Kaigui Xie, Zefu Jiang, Wenyuan Li, Fellow- Effect of Wind Speed on Wind Turbine Power Converter Reliability, *IEEE Transactions On Energy Conversion*, Vol. 27, No. 1, March 2012.
79. Kang H S, Meneveau C. "Direct mechanical torque sensor for model wind turbines". *Meas Sci Tech*, 2010, 21(10 ): 105206
80. Kim K.H., Van T.L., Lee D.C., Song S.H., Kim E.H. - "Maximum output Power Tracking Control in Variable-Speed Wind Turbine System Considering Rotor Inertial Power", in *IEEE transaction on industrial electronics*, vol.60, no.8, august 2013, pp.3207-3217
81. Kim, H., Kim, K., Paek, I., and Yoo, N., "Development of a Time- Domain Simulation Tool for Offshore Wind Farms," *Journal of Power Electronics*, Vol. 15, No. 4, pp. 1047-1053, 2015.
82. Kim, K., Lim, C., Oh, Y.-O., Kwon, I., Yoo, N., and Paek, I., "Time- Domain Dynamic Simulation of a Wind Turbine Including Yaw Motion for Power Prediction," *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol. 15, No. 10, pp. 2199-2203, 2014.
83. Koutroulis E, Kalaitzakis K- "Design of a Maximum Power Tracking System for Wind-Energy"- Conversion Applications-486 *IEEE Transactions on industrial electronics*, Vol. 53, No. 2, April 2006
84. Lai L.L., *Power Systems Restructuring: Engineering and economics and deregulation: trading, performance and technology*, John Wiley & Sons, 2001.
85. Lee, J., Son, E., Hwang, B., and Lee, S., "Blade Pitch Angle Control for Aerodynamic Performance Optimization of a Wind Farm," *Renewable Energy*, Vol. 54, pp. 124-130, 2013.
86. Libao Shi, Chen Wang, Liangzhong Yao, Yixin Ni, Masoud Bazargan-Optimal Power Flow Solution Incorporating Wind Power, *IEEE Systems Journal*, Vol. 6, No. 2, June 2012.
87. Lin Cheng, JinLin, Yuan-Zhang Sun, Chanan Singh, Wen-Zhong Gao, Xing-Mei Qin - A Model for Assessing the Power Variation of a Wind Farm Considering the Outages of Wind Turbines, *IEEE Transactions On Sustainable Energy*, Vol. 3, No. 3, July 2012.
88. Lopez P, Velo R, Maseda F " Effect of direction on wind speed estimation in complex terrain using neural networks". *Renew Energy* 33:2266--2272,(2008)
89. 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
90. Lun, I.Y.F., and Lam, J.C., "A study of Weibull parameters using long-term wind observations", *Renewable Energy*, 20, 145--153., 2000
91. Locke J, Valecia U, Ishikawa K. "Design studies for twist-coupled wind turbine blades". In: *ASME 2003 Wind Energy Symposium (WIND2003)*, Reno, Nevada, USA, January 6--9, 2003
92. M. Li, X. Li, "MEP-type distribution function: a better alternative to Weibull function for wind speed distributions", *Renewable Energy* 30 (2005) 1221--1240
93. Manwell, J.F., McGowan, J.G., and Rogers, A.L., . "Wind energy explained: theory, design and application, 2nd ed"., Amherst, USA: John Wiley & Sons., 2009
94. Matevosyan J., Evaluation of wind energy storage in hydro reservoirs in areas with limited transmission capacity, *Proceedings of the 4th International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power and Transmission Networks for Offshore Wind Farms*, Billund, Denmark, 2003.
95. Manwell J F, McGowan J G, Rogers A L. "Wind Energy Explained, Theory, Design and Application". London: John Wiley & Sons Ltd., 2002
96. Medici D, Alfredsson P. "Measurement on a wind turbine wake: 3D effects and bluff body vortex shedding". *Wind Energy*, 2006, 9: 219--236
97. Markfort C D, Zhang W, Porté-Agel F. "Turbulent flow and scalar flux through and over aligned and staggered wind farms". *J Turbulence*, 2012, 13(1): 1--36
98. Meyers J, Meneveau C. "Optimal turbine spacing in fully developed wind farm boundary layers". *Wind Energy*, 2012, 15: 305--317
99. Milborrow D., Goodbye gas and squaring up to coal, *Wind Power Monthly*, January 2005, pp.31-35.
100. Miller N., Ye Z., Kroposki B., Report on Distributed Generation Penetration Study, National Renewable Energy Laboratory USA, NREL/SR-560-34715, August 2003.
101. Medici D, Alfredsson P H. "Measurements on a wind turbine wake: 3D effects and bluff body vortex shedding". *Wind Energy*, 2006, 9: 219--236
102. Nicholas Miller, Jason MacDowell, Gary Chmiel, Ryan Konopinski, Durga Gautam, Grant Laughter, Dave Hagen-Coordinated Voltage Control for Multiple Wind Plants in Eastern Wyoming: Analysis and Field Experience, *IEEE PEMWA Denver*, July 2012.

103. 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.
104. Örs M-"Maximum Power Point Tracking for Small Scale Wind Turbine With Self-Excited Induction Generator"-CEAI, Vol.11, No.2, pp. 30-34, 2009 Printed in Romania,Technical University of Cluj-Napoca Department of Automatic Control,26-28 Gh. Baritiu Str. 400027 Cluj-Napoca, Romania(e-mail: ors.marton@aut.utcluj.ro)
105. Ozbay A, Tian W, Yang Z, et al. "Interference of wind turbines with different yaw angles of the upstream wind turbine". AIAA Paper, 2012, AIAA-2012-2719
106. Ozbay A, Tian W, Yang Z, et al. "Interference of wind turbines with different yaw angles of the upstream wind turbine". AIAA Paper, 2012, AIAA-2012-2719
107. Patel M., Wind and Solar Power Systems, CRC Press, 1999.
108. Pandey K K,Tiwari Dr.A.N-"Maximum Power Point Tracking Of Wind Energy Conversion System With Synchronus Generator"-International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT),Vol. 1 Issue 5, July - 2012 ISSN: 2278-0181 MMMEC Gorakhpur-273010
109. Petrilă D.P.-"Energy Conversion and Storage Control for Small Wind Turbine Systems"-Teza de doctorat,feb 2013,Univ."POLITEHNICA TIMISOARA"
110. Petru T.-"Modeling wind turbines for power system studies", Ph. D. dissertation, Chalmers, Goteborg, Sweden, Jun. 2003
111. Poller M., Achilles S., „Aggregated Wind Park Models for Analyzing Power System Dynamics", 4th International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power and Transmission Networks for Off-shore Wind Farms, Billund, Denmark 2003.
112. Porrua F, Chabar R., Thome L.M., Barroso L.A., Pereira M., Incorporating large scale renewable to the transmission grid: Technical and regulatory issues, IEEE Power and Energy Society General Meeting, PES09, 2009, pp.1-7.
113. Porté-Agel F, Wu Y T, Lu H, et al. "Large eddy simulation of atmospheric boundary layer flow through wind turbines and wind farms". J Wind Eng Ind Aerodyn, 2011, 99: 154--168
114. Ramirez,P, J.A. Carta, "Influence of the data sampling interval in the estimation of the parameters of the Weibull wind speed probability density distribution: a case study", Energy Conversion and Management 46 (2005) 2419--2438.
115. Ross J N, Ainslie J F. "Wake measurements in clusters of model wind turbines using laser Doppler anemometry" In: Proceedings of the Third BWEA Wind Energy Conference, Cranfield, 1981. 172--184
116. Rudion K., Orths A., Lebioda A., Styczynski Z., Wind Farms with DFIG as Virtual Power Plants, Proceedings of the Fifth International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power and Transmission Networks for Offshore Wind Farms, Glasgow, Scotland, 2005.
117. Sorandaru C., Babescu M., Muşuroi S. -Load Control Method for Photovoltaic Solar Panels Based on the Measurement of Short Circuit Currents-ICSTCC-October 11-13,2013 Sinaia-Romania
118. Verseille J., Growth and Grids – Panel discussion on issues of grid extension, supply predictability and power quality, Proceedings of European Wind Energy Conference, Madrid, 2003, 8pp.
119. Quaschnig V.- Understanding Renewable Energy Systems,ISBN 1-84407-128-6 ,London Carl Hanser Verlag GmbH & Co KG, 2005.
120. Quaschnig V.- "Understanding Renewable Energy Systems",ISBN 1-84407-128-6 ,London Carl Hanser Verlag GmbH & Co KG, 2011.----
121. Rebecca J. Barthelmie, Kurt S. Hansen, Sara C. Pryor K.,S. Hansen-Meteorological Controls on Wind Turbine Wakes,IEEE | Vol. 101, No. 4, April 2013 0018-9219
122. Sairaj V. Dhople, Alejandro D. Domínguez-García-A Framework to Determine the Probability Density Function for the Output Power of Wind Farms, 978-1-4673-2308-6/12, IEEE 2012.
123. Schreck S, Lundquist J, Shaw W. "U.S. Department of Energy Workshop Report: Research Needs for Wind Resource Characterization." Technical Report, 2008, NREL/TP-500-43521
124. Seungmin L, Hogeon K, Eunkuk S, et al. "Effects of design parameters on aerodynamic performance of a counter-rotating wind turbine". Renewable Energy, 2012, 42: 140--144
125. Seyit, A. and Dinler, A., "A new method to estimate Weibull parameters for wind energy applications", Energy Conversion and Management 50, 1761--1766.2009
126. Shouxiang Wang a, Na Zhang b, Lei Wu c, Yamin Wang c-"Wind speed forecasting based on the hybrid ensemble empirical mode decomposition and GA-BP neural network method"-Renewable Energy 94 (2016) 629e636 Contents lists available at

- ScienceDirect, Renewable Energy, journal homepage: [www.elsevier.com/locate/renene](http://www.elsevier.com/locate/renene)
1. Nam, Y. S., "Wind Turbine System Control," GS Intersivision, pp. 405-441, 2013. (In Korean)
  127. Shupo Bu, Xunwen Su- Analysis of Temporal and Spatial Characteristics on Output of Wind Farms with Doubly Fed Induction Generator Wind Turbines, Second International Conference on Instrumentation & Measurement, Computer, Communication and Control, 978-0-7695-4935-4/12, IEEE, DOI 10.1109/IMCCC.2012.297, 2012.
  128. Sørensen B. "Renewable Energy: Its Physics, Engineering, Use, Environmental Impacts, Economy, and Planning" Aspects. London: Elsevier, 2004
  129. Tian W, Ozbay A, Yang Z, et al. "An experimental investigation on the wake interference of multiple wind turbines in atmospheric boundary layer winds". AIAA Paper, 2012, AIAA-2012-2784
  130. Vermeer L J, Sørensen J N, Crespo A. "Wind turbine wake aerodynamics". Prog Aerospace Sci, 2003, 39: 467--510
  131. Wu Y T, Porté-Agel F. "Large-eddy simulation of wind-turbine wakes: Evaluation of turbine parameterizations". Boundary-Layer Meteorology, 2011, 138(3): 345--366
  132. Wu Y T, Porté-Agel F. "Simulation of turbulent flow inside and above wind farms: Model validation and layout effects". Boundary-Layer Meteorology, 2013, 146(2): 181--205
  133. Wua,S, Y. Wang, S. Cheng, "Extreme learning machine based wind speed estimation and sensorless control for wind turbine power generation system", Neurocomputing 102 (2013) 163--175
  134. Xie K, Wang K "Measurement of wind speed and direction with ultrasonic sensor using "FPGA. Energy Procedia 12:837--843,(2011)
  135. Xiaoqing Han, Ying Qu, Peng Wang, Junhu Yang-Four-Dimensional Wind Speed Model for Adequacy Assessment of Power Systems With Wind Farms, IEEE Transactions On Power Systems, Vol. 28, No. 3, August 2013
  136. Yuan W, Ozbay A, Tian W, et al. "An experimental investigation on the effects of turbine rotation directions on the wake interference of wind turbines". AIAA Paper, 2013, AIAA-2013-0607
  137. Zhou Y, Kareem A. "Definition of wind profiles" in ASCE 7. J Struct Eng, 2002, 128: 1082--1086
  138. Zhang W, Markfort C D, Porté-Agel F. "Near-wake flow structure downwind of a wind turbine in a turbulent boundary layer". Exp Fluids, 2012, 52: 1219--1235

#### **RAPOARTE**

139. [BEI2009] Raport privind activitatea și responsabilitatea corporativă – Volumul I, Raportul anual pentru 2008 al Grupului BEI, Banca Europeană de Investiții, 2009, <http://www.eib.org/report>.
140. [CIRED1999] Dispersed generation, Preliminary report of CIRED working group WG04, 1999, pp.1-39.
141. [CNTEE20014] CNTEE Transelectrica S.A., 2014, Anual Report.
142. [DENA2005] DENA: Energiewirtschaftliche Planung für die Netzintegration von Windenergie in Deutschland an Land und Offshore bis zum Jahr 2020, Dena, Deutschland, 2005.
143. IEA Wind Energy Annual Report, International Energy Agency, IEA Wind, Paris, 2007.
144. World Energy Outlook Fact Sheet, International Energy Agency, 2009.
145. Wind turbine generator systems. Part 1: Safety requirements, IEC 61400-1/2005, International Electrotechnical Commission, 2005.
146. Pachetul pentru energie al Comunității Europene, Buletinul IRE, anul IV, nr. 4, 2007.
147. The Kyoto Protocol, United Nations Framework Convention on Climate Change, Kyoto, Japan, 1995, [http://unfccc.int/kyoto\\_protocol](http://unfccc.int/kyoto_protocol).
148. Legea pentru stabilirea sistemului de promovare a producerii energiei din surse regenerabile de energie, Monitorul Oficial, 2008.
149. European distributed energy resources projects, European Commission, Luxembourg, 2004.
150. Towards Smart Power Networks - Lessons learned from European research FP5 projects, European Commission, Belgium, 2005.
151. Commission of the European Communities - Communication from the Commission to the European Council and the European Parliament - An Energy Policy for Europe, Brussels, 2007.
152. Directive 2001/77/EC of the European Parliament and the Council of 27.09.2001 on the promotion of electricity produced from renewable energy sources in the internal electricity market, Official Journal no. L283/27.10.2001.
153. International Energy Outlook 2009, Energy Information Administration, Office of Integrated Analysis and Forecasting, U.S. Department of Energy, May 2009.

154. Integration of Renewable Energy Sources. Targets and benefits of large-scale deployment of renewable energy sources, Workshop – Renewable Energy Market Development, Status and Prospects, European Renewable Energy Council (EREC), 2004.
155. Large Scale Integration of Wind Energy in the European Power Supply: analysis, issues and recommendation, A report by EWEA, European Wind Energy Association, December 2005.
156. Delivering energy and climate solutions, EWEA 2007 Annual Report, European Wind Energy Association, March 2008.
157. Winning with European Wind – Creating power, helping the environment, EWEA 2008 Annual Report, European Wind Energy Association, June 2009.
158. The Economics of Wind Energy, A report by the European Wind Energy Association, European Wind Energy Association, March 2009.
159. 2004 State of the markets report. Staff report by the office of market oversight and investigations, Federal Energy Regulatory Commission, Washington, USA, 2005.
160. Renewables 2007 - Global status report, Renewable Energy Policy Network for the 21<sup>st</sup> Century, REN21, 2007.
161. Renewables global status report 2009 Update, Renewable Energy Policy Network for the 21<sup>st</sup> Century, REN21, 2009.
162. Riso DTU, Sustainable energy generation, storage and distribution, Riso DTU National Laboratory for Sustainable Energy, 2006.
163. World Energy and Climate Policy: 2009 Assessment, World Energy Council, 2009.
164. Certificate Verzi emise producătorilor de E-SRE pentru energia produsă în perioada 2012-2014, 2009, <http://www.transelectrica.ro>.
165. Wikipedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Renewable\\_energy](http://en.wikipedia.org/wiki/Renewable_energy).