

CU PRIVIRE LA PROCESUL DE PORNIRE A UNUI SISTEM ELECTRIC EOLIAN DE POMPARE

AUTORI: RACHIER VASILE, SOLOVIOV VITALII
Conducător științific: prof. univ., dr. ing. Ion Sobor

Universitatea Tehnică a Moldovei

Rezumat: Se prezintă modelul matematic al unui sistem electric eolian de pompare. Sistemul include componentele: turbina cu puterea de 10 kW, generatorul cu magneți permanenți cuplat direct cu rotorul turbinei, motorul asincron și pompa centrifugă. Modelul matematic se bazează pe schemele echivalente ale generatorului și motorului. Simulările procesului de pornire s-a realizat în mediul Simulink pentru diferite viteze ale vântului cuprinse între 2 și 12 m/s.

Cuvinte cheie: turbina eoliană, generator cu magneți permanenți, motor asincron, pompă centrifugă, simulări

1. introducere

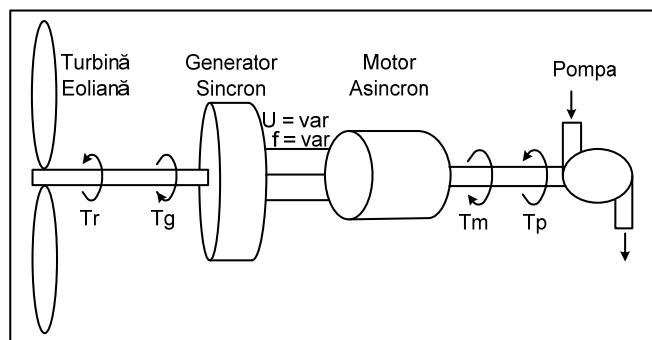
Multe țări se confruntă la momentul actual cu problema alimentării cu apă, inclusiv Republica Moldova. Cea mai acută problema este în domeniul irigației deoarece, în majoritatea cazurilor, atât terenurile agricole, care necesită irigație, cât și sursele de apă se află la mari distanțe de rețelele electrice publice. Pe lângă extinderea rețelelor electrice publice menționăm încă două variante alternative care pot fi folosite pentru pomparea apei: utilizarea motopompei sau a unui grup electrogen, care funcționează pe benzină sau motorină. Studiul de fezabilitate prezentat în lucrarea [1] demonstrează că în cazul pomparii apei până la înălțimea de 40 m deasupra nivelului solului costul specific (MDL/m³) este cu mult mai mic dacă folosim o turbină eoliană în comparație cu motopompa sau cu un grup electrogen.

Procesele staționare într-un sistem electric eolian de pompare sunt studiate în lucrările [1-4]. În acest caz viteza de rotație a rotorului turbinei, a generatorului, a motorului asincron și a pompei centrifuge se consideră constante și corespund unei valori specificate a vitezei vântului. Se urmărește determinarea cantității de apă care poate fi pompată la diferite înălțimi pe parcursul unei perioade de timp în dependență de viteza vântului, distribuția densității de probabilitate a căreia este aproximată cu funcția Weibull.

Totodată, funcționarea normală a sistemului va avea loc dacă pornirea acestuia din starea de repaus a fost reușită. Mai mult, pentru un sistem de pompare cu caracteristici specificate trebuie să cunoaștem viteza minimă a vântului

pentru care are loc pornirea și accelerarea pompei până la viteza staționară. În lucrarea [5] pornirea cu succes sau nu a sistemului se

Figura 1. Schema sistemului electric eolian de pompare



studiază în ipoteza că turbina eoliană funcționează la o viteză constantă a vântului, iar coeficientul de putere $C_P(\lambda)$ este egal cu valoarea maximală. În acest caz concluziile făcute pot fi prea optimiste deoarece coeficientul de putere variază în funcție de viteza de rotație.

În lucrare se prezintă modelul matematic al sistemului și modelul Simulink în care s-a luat în considerație variația coeficientul de putere $C_P(\lambda)$ în funcție de rapiditatea λ sau viteza specifică.

2. Modelul matematic al sistemului de pompare

Elementele componente al sistemului electric eolian de pompare sunt prezentate în figura 1. Rotorul turbinei eoliene este cuplat direct cu generatorul cu magneți permanenți, arborele 1 rotește cu viteza Ω_1 , rotorul turbinei dezvoltă momentul T_r , în direcție opusă acționează momentul generatorului T_g . Momentul de inerție J_I include momentul de inerție a rotorului turbinei și a rotorului generatorului. Motorul asincron este cuplat direct cu pompa centrifugă și rotește cu viteza Ω_2 , care depinde de frecvența f și tensiunea U generate

de generator. Ambele sunt variabile și depind de viteza de rotație a generatorului (rotorului turbinei) Ω_1 , implicit de viteza vântului, de numărul de poli a generatorului și a motorului. Momentul de inerție J_2 include momentul de inerție a rotorului motorului și a roatei centrifuge a pompei. Turbina eoliană cu puterea nominală de 10 kW cu trei pale, are un diametru de 8 m și o putere maxima de 12 kW. Pompa este antrenată de un motor de 5,5 kW cu viteza de rotație sincronă $n_0=3000$ tur/min. Generatorul are o construcție inversată, inductorul exterior cu magneți permanenți, cu 40 de poli rotește în jurul indusului. Viteza nominală de rotație este egală cu 150 tur/min. Între arborii 1 și 2 există legătura electromecanică determinată de tensiunea U și frecvența f , raportul cărora $U/f = \text{const}$.

Modelarea adecvată a sistemului este posibilă doar prin încadrarea tuturor componentelor lui într-un model complex, care va reacționa dinamic la modificarea variabilelor de intrare. Pentru prezicerea comportamentului sistemului în procese tranzitorii, care sunt relevante cazurilor de pornire se recurge la studiul mișcării celor două arbore în baza legii a 2-a lui Newton:

$$J_1 \frac{d\Omega_1}{dt} = T_r(\Omega_1) - T_g(\Omega_1, \Omega_2) \quad (1)$$

$$J_2 \frac{d\Omega_2}{dt} = T_m(\Omega_1, \Omega_2) - T_p(\Omega_2). \quad (2)$$

În rezultatul integrării numerice a acestor ecuații obținem diagramele procesului tranzitoriu $\Omega_1(t)$ și $\Omega_2(t)$.

Primul pas este modelarea momentului turbinei eoliene în baza relației (3):

$$T_v = 0,5\rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v^3 \cdot \frac{C_p(\lambda)}{\Omega} = 0,5 \cdot 1,225 \cdot \pi \cdot 4^2 \cdot v^3 \cdot \frac{C_p(\lambda)}{\Omega} = 30,8 \cdot v^3 \frac{C_p(\lambda)}{\Omega} \quad (3)$$

unde: ρ - densitatea aerului, v - viteza vântului, R - raza elicei, C_p este coeficientul de putere ce definește eficiența aerodinamică a turbinei eoliene.

Viteza vântului se consideră constantă deoarece variația ei pe durata a câtorva secunde nu influențează semnificativ regimul de funcționare a sistemului. Coeficientul de putere C_p este adimensional și depinde de viteza specifică λ și viteza unghiulară a rotorului Ω_1 . Interdependența este dată de (4), interpretarea grafică în figura 3:

$$\lambda = \frac{\Omega_1 R}{V} \rightarrow \Omega_1 = \frac{\lambda V}{R} \quad (4)$$

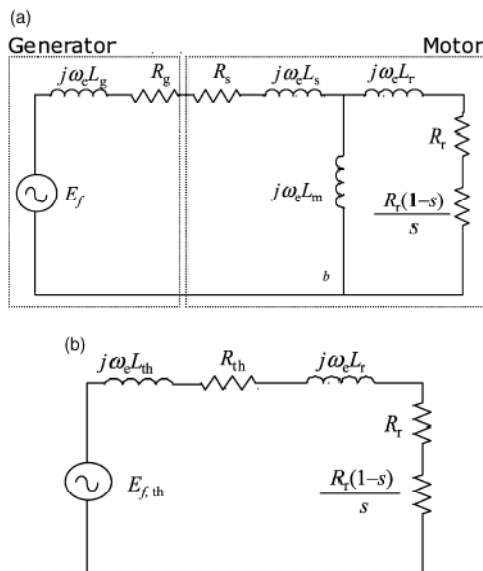


Figura 2. Circuitul echivalent al sistemului generator – motor (a) și circuitul echivalent Thevenin (b)

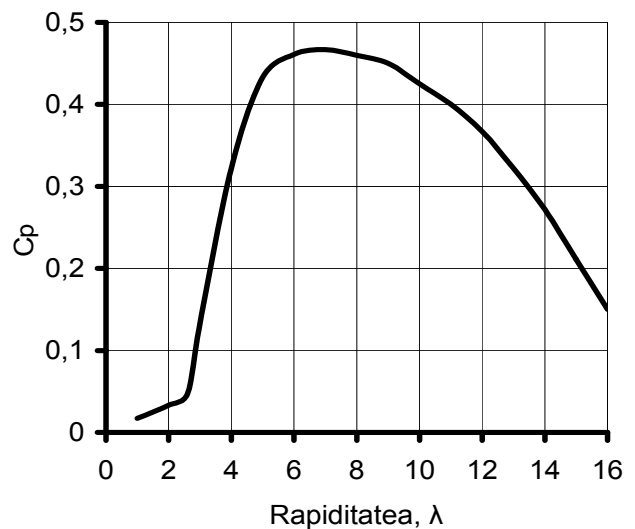


Figura 3. Variația coeficientului de putere în funcție de rapiditate

Modelul generatorului și a motorului pe baza circuitului echivalent pe a teoremei Thevenin. Echivalentul Thevenin permite conversia circuitului ramificat (fig.2, a) într-un circuit cu un singur contur (fig.2, b). Cu valorile Thevenin L_{th} , R_{th} și $E_{f,th}$ calculate este ușor să obținem relațiile pentru puterea și momentul motorului. Tensiunea Thevenin se numește căderea de tensiune între punctele a și b care are loc la ruperea circuitului motorului.

$$E_{f,th} = \frac{j\omega_e L_m}{j\omega_e(L_g + L_s + L_m) + (R_g + R_s)} E_f \quad (5)$$

unde: L_m, L_s, L_g – sunt inductanțele de magnetizare, a înfășurării statorice a motorului și generatorului; R_g, R_s – rezistențele ohmice ale generatorului și a înfășurării statorice; E_f – tensiunea electromotoare pe fază a generatorului.

Puterea electrică dezvoltată de motor va fi determinată de relația (6), iar momentul se obține prin împărțirea puterii la viteza unghiulară a arborelui Ω_2 . Expresii similare pot fi deduse respectiv și pentru puterea și momentul generatorului. Reieșind din figura 2, a, putem afirma că puterea real produsă de generator poate fi scrisă ca suma puterii transferate la motor și a pierderilor rezistive care au loc pe rezistențe R_g și R_s (7).

Pompa centrifugă este modelată cu expresia (9), în care coeficientul K se determină din datele nominale.

$$P_m = 3I \times I^* \times R_r(1-s)/s = \frac{3|E_{f,th}|^2}{(R_{th} + R_r/s)^2 + \omega_e^2(L_{th} + L_r)^2} \frac{R_r(1-s)}{s} \quad T_m = P_m/\Omega_2 \quad (6)$$

$$P_g = 3I^2 R_r/s + 3I_g^2(R_g + R_s) = \frac{3|E_{f,th}|^2}{(R_{th} + R_r/s)^2 + \omega_e^2(L_{th} + L_r)^2} (R_{th}/s + R_{cu}) \quad T_g = P_g/\Omega_1. \quad (7)$$

unde: R_r - pierderi pe înfășurările rotorice; $L_{th}, R_{th}, E_{f,th}$ – parametrii calculați ai circuitului echivalent.

Pierderile în înfășurările generatorului și motorului R_{cu} se determină cu relația:

$$R_{cu} = (R_g + R_s) \frac{(R_r/s)^2 + \omega_e^2(L_r + L_m)^2}{\omega_e^2 L_m^2} \quad (8)$$

$$T_p = K \cdot \Omega_2^2 \Rightarrow K = \frac{T_{np}}{\Omega_{2nom}^2} = \frac{13,5}{305^2} = 0,000145. \quad (9)$$

Momentul de inerție J_l a rotorului turbinei s-a calculat cu formula (10), divizând palele în mai multe secțiuni și luând în considerație caracteristicile materialelor compozite din care sunt confecționate (poliester armat cu fibre și poliuretan injectat).

$$J = J_c + md^2 \quad (10)$$

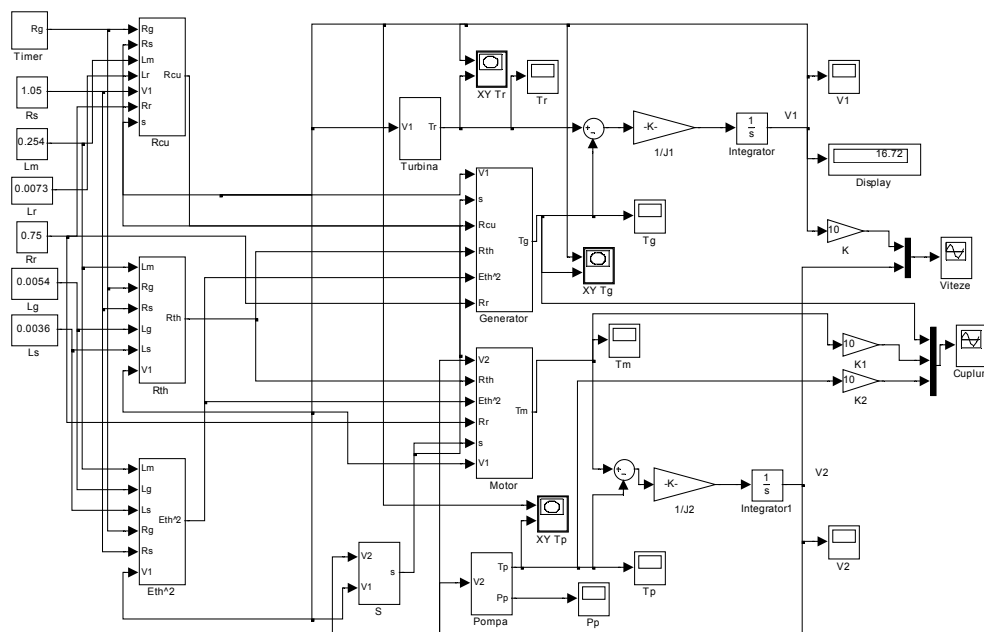


Figura 4. Modelul Simulink al sistemului electric eolian de pompare

Conform calculului efectuat, momentul de inerție a turbinei este de $309,5 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, momentul de inerție a generatorului, fiind de $6,1 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$. Momentul de inerție a motorului, tip 4A100L2Y3 și a pompei este egal cu $0,015 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$.

Simularea proceselor tranzitorii se efectuează în mediul MatLab Simulink. Totalitatea subsistemelor descrise anterior se încadrează într-un sistem complex (figura 4), stabilindu-se legături între ele. Modelul general al sistemului de pompare pentru studiul proceselor dinamice la pornire se elaborează în baza relațiilor (1) și (2). Momentele $T_r(\Omega_1)$, $T_g(\Omega_1, \Omega_2)$, $T_m(\Omega_1, \Omega_2)$, $T_p(\Omega_2)$ sunt ieșirile subsistemelor corespunzătoare de calcul a caracteristicilor mecanice a componentelor sistemului. Parametrii R_s , L_m , L_r , R_r , L_g , L_s , R_g se calculează pe baza datelor tehnice a componentelor și apoi se calculează parametrii R_{th} , R_{cu} , E_{fth} ai circuitului echivalent 2 b. Pentru a simula conectarea motorului cu temporizare (mai întâi se pornește turbina, apoi se conectează pompa) se modifică parametrul R_g . Mărind rezistența înfășurării generatorului la o valoare excesiv de mare se ajunge la situația identică cu cea de mers în gol a turbinei.

3. rezultatele simulărilor

În figurile 5 – 10 sunt prezentate rezultatele simulării pornirii sistemului de pompare pentru diferite viteze ale vântului.

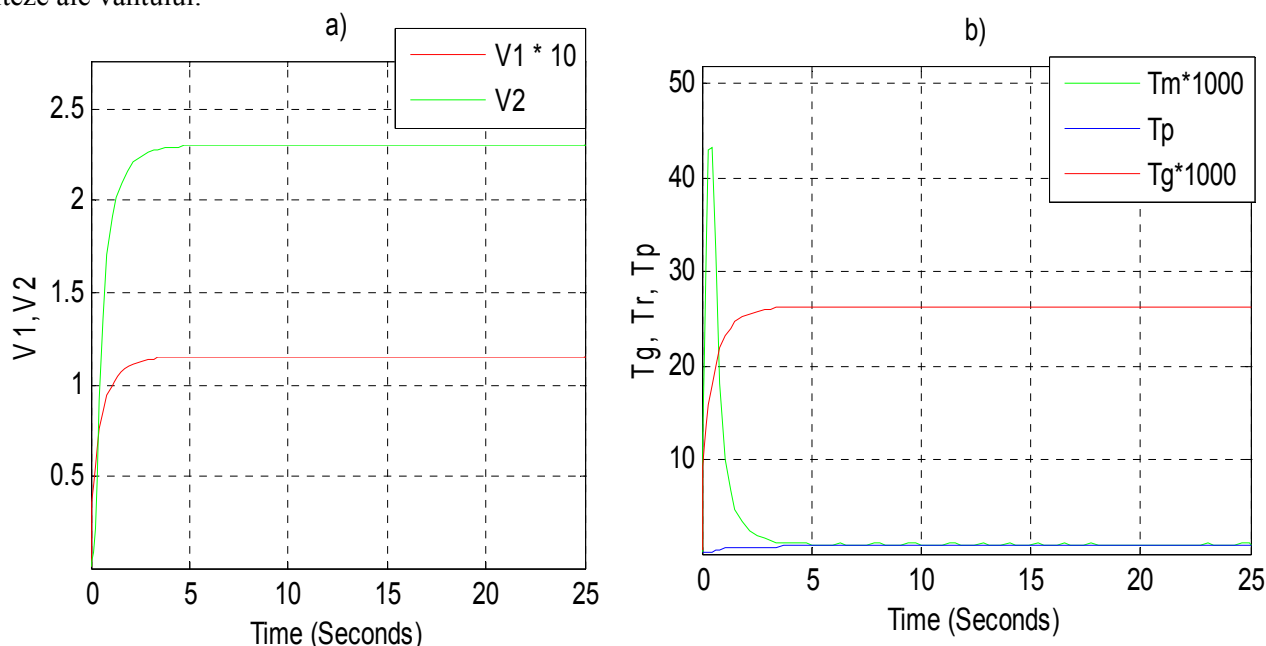


Figura 5. Procesul de pornire la viteza vântului 2 m/s: a) – $\Omega_1(t)$ și $\Omega_2(t)$; b) – $T_g(t)$, $T_m(t)$, $T_p(t)$

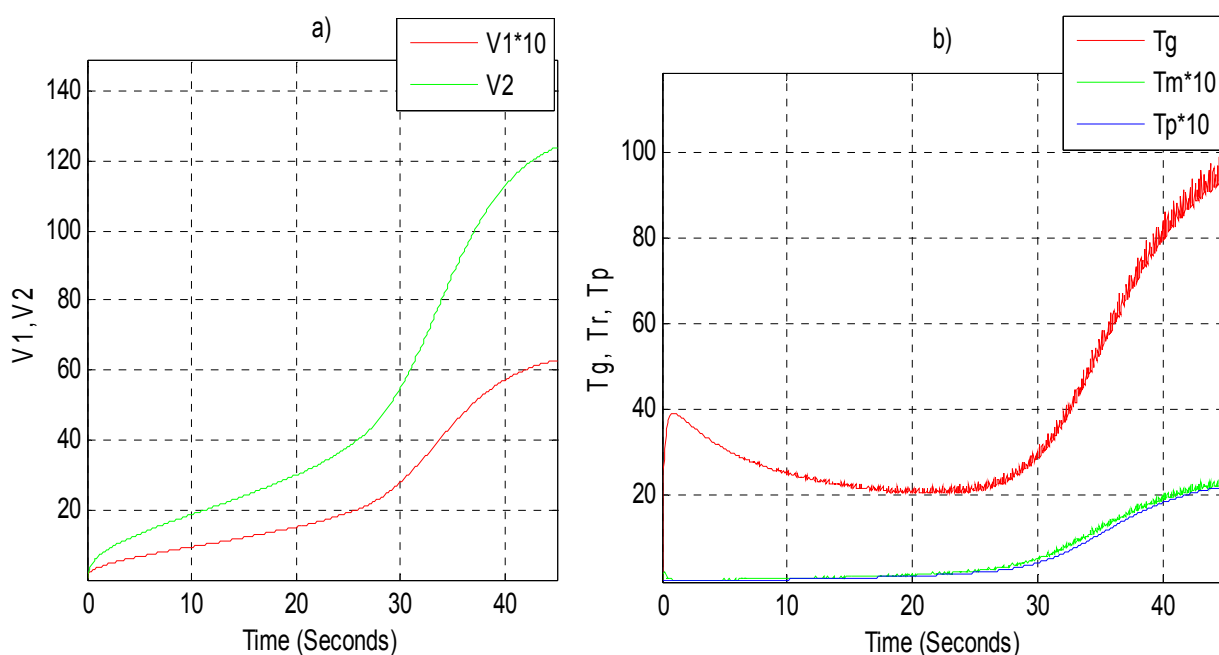


Figura 6. Procesul de pornire la viteza vântului 4 m/s: a) – $\Omega_1(t)$ și $\Omega_2(t)$; b) – $T_g(t)$, $T_m(t)$, $T_p(t)$

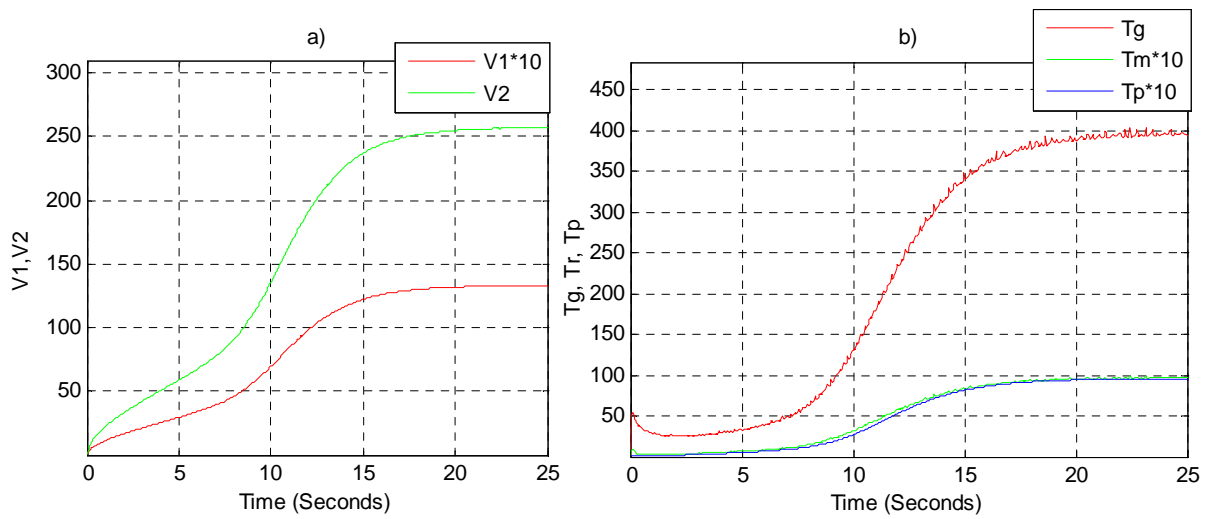


Figura 7. Procesul de pornire la viteza vântului 8 m/s: a) – $\Omega_1(t)$ și $\Omega_2(t)$; b) - $T_g(t)$, $T_m(t)$, $T_p(t)$

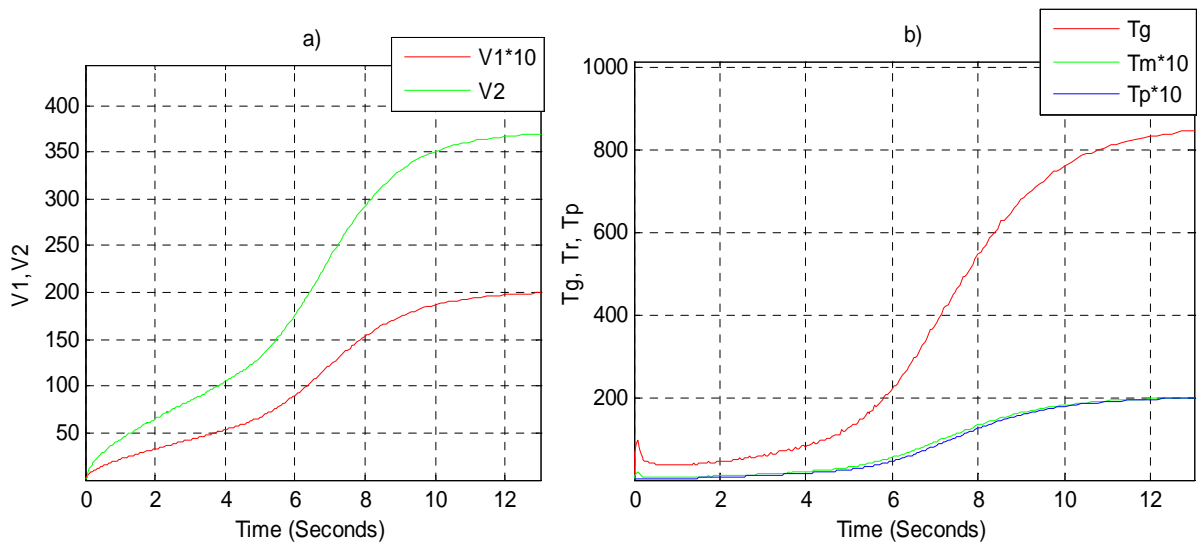


Figura 8. Procesul de pornire la viteza vântului 12 m/s: a) – $\Omega_1(t)$ și $\Omega_2(t)$; b) - $T_g(t)$, $T_m(t)$, $T_p(t)$

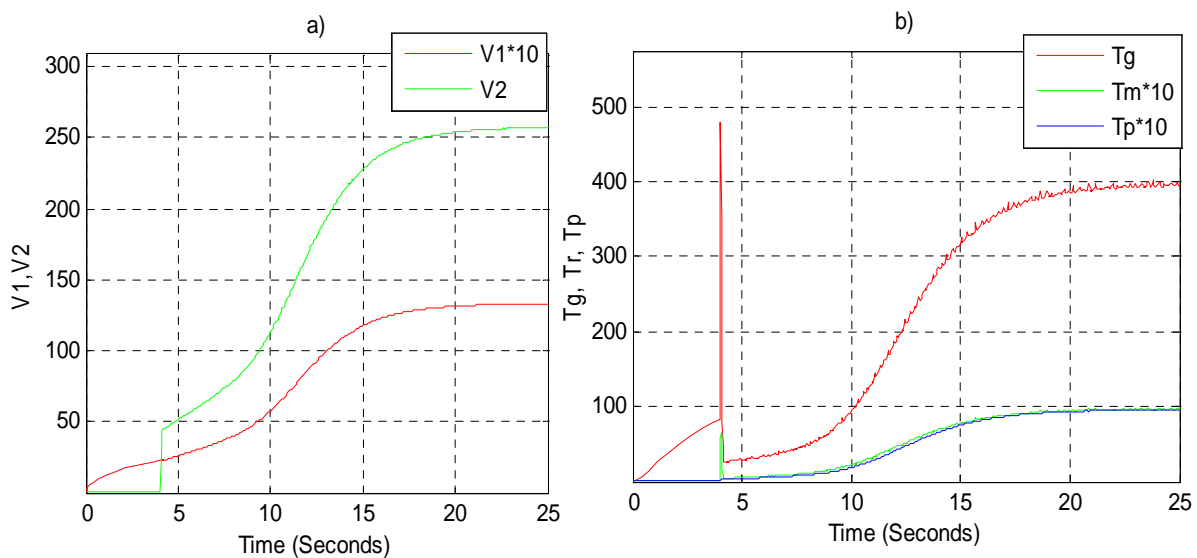


Figura 9. Procesul de pornire la viteza vântului 8 m/s, temporizarea 4 s:
a) – $\Omega_1(t)$ și $\Omega_2(t)$; b) - $T_g(t)$, $T_m(t)$, $T_p(t)$

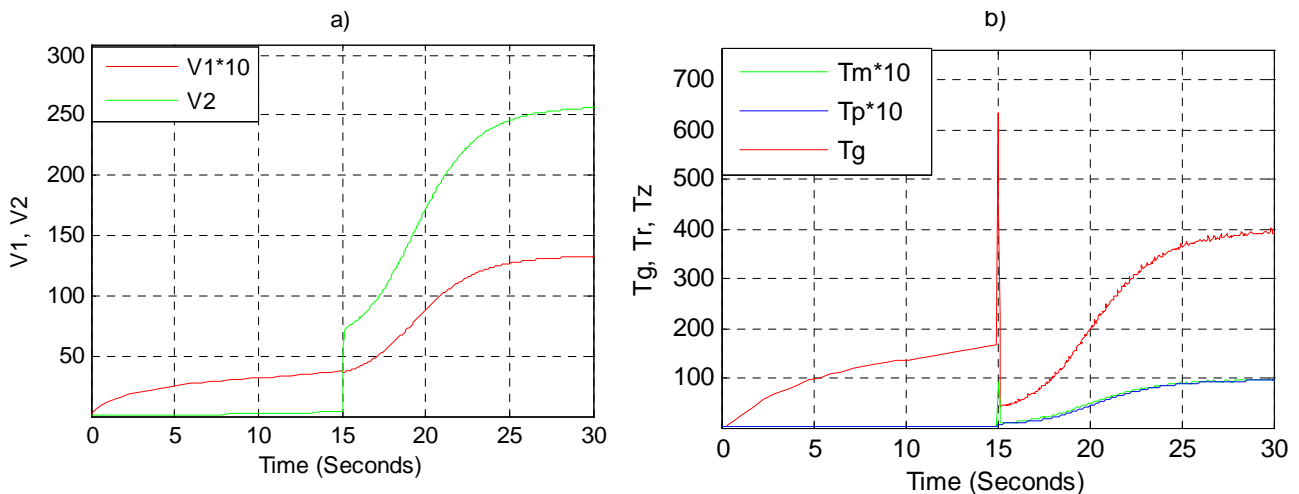


Figura 10. Procesul de pornire la viteza vântului 8 m/s, temporizarea 15 s:
a) – $\Omega_1(t)$ și $\Omega_2(t)$; b) – $T_g(t)$, $T_m(t)$, $T_p(t)$

CONCLUZII

1. Viteza minimală a vântului pentru care se constată o pornire concomitentă reușită a turbinei eoliene și a grupului motor-pompă este egală cu 4 m/s. Durata de pornire este de circa 50 s.
2. Odată cu creșterea vitezei vântului se micșorează durata de pornire, fiind de circa 12 s la viteza vântului egală cu 12 m/s. Pentru viteze ale vântului cuprinse între 8 și 12 m/s pompa va funcționa la viteze de rotații de 2500-3500 tur/min, iar la viteza vântului egală cu 10 m/s – în regim apropiat de cel nominal: $T_p=15$ Nm, $\Omega_2=320$ rad/s sau 3055 tur/min; $P_p=4,8$ kW.
3. Începând cu viteze ale vântului mai mari de 12 m/s are loc depășirea esențială a frecvenței nominale de alimentare a pompei (~20 %), faptul care impune necesitatea utilizării unei metode de limitare a vitezei rotorului turbinei (modificarea unghiului de atac a palelor, frânarea aerodinamică sau scoaterea rotorului din direcția vântului).
4. Pornirea pompei cu temporizare față de turbina eoliană conduce la majorarea de circa două ori a momentului de pornire a motorului, respectiv, a generatorului (figura 9,10). La conectarea pompei nu se constată micșorarea bruscă a vitezei rotorului turbinei și se datorează raportului mare dintre momentul de inerție a rotorului turbinei și momentul de inerție a grupului motor-pompă. Datorită înmagazinării în rotorul turbinei a energiei cinetice poate fi asigurată pornirea pompei la viteze mai mici ale vântului.

Bibliografie

1. *Sisteme de conversie a energiilor regenerabile/* I. Bostan, V. Dulgheru, I. Sobor, V. Bostan, A. Sochirean, Univ. Tehn. a Moldovei. – Ch.: „Tehnica - Info”, 2007, - 592 p. ISBN 978-995-63-076-4
2. R. Nolan Clark. *Performance of Small Wind Electric systems for water pumping.* Windpower '94, May 10-13, 1994, Minneapolis, Minnesota, - 1994, p. 627-634.
3. Brett G. Ziter. *Electric Wind Pumping for Meeting Off-Grid Community Water Demands.* Guelph Engineering Journal, (2), 2009, p. 14 – 23. ISSN: 1916-1107.
4. Sobor Ion. Rachier Vasile. *Characteristics Calculation of the Wind Electric Water Pumping System.* Proceedings of the 13-th International Conference on Scientific Research and Education in the Air Force, AFASES 2011 Brasov, 26-18 May, 2011, p. 1018-1023. ISSN: 2247- 3173 ISSN-L: 2247 – 3173
5. M. Velasco, O. Probst, S. Acevedo. *Theory of wind-electric water pumping.* Renewable Energy 29 (2004), p. 873–893
6. www.scholar.sun.ac.za. Lemmer E. C. *Wind-Electric Pump System Design.* Stellenbosch University. Master thesis, March, 2009.