



A XVI-a Conferință internațională – multidisciplinară  
„Profesorul Dorin PAVEL – fondatorul hidroenergeticii românești”  
SEBEȘ, 2016

## **CINEMATICA MECANISMULUI CENTRIFUGAL DE PROTECȚIE LA SUPRATURARE A ROTORULUI DE TURBINĂ EOLIANĂ DE PUTERE MICĂ**

Rodica BĂDĂRĂU, Teodor MILOȘ

### **KINEMATICS OF THE CENTRIFUGAL MECHANISM FOR PROTECTION AT OVERSPEED OF THE LOW POWER WIND ROTOR TURBINE**

Rotor over speed protection for small wind turbine power requires a cheap and reliable mechanical system as possible. This is because any electric or electronic device depends on the electrical power source that becomes unavailable in disaster conditions. Of these, centrifugal mechanism is priced at acceptable cost, but contains some subtleties of interpretation of the operation mod. In terms of kinematics, centrifugal mechanism is reduced to a crank and connecting-rod assembly with sliding piece. This paper presents schematically this mechanism and the elements that govern the movement of the sliding piece: race, speed and acceleration.

The mechanism function is alternative to a crank angle range of  $\alpha = 0^\circ \dots 45^\circ$ . Sliding piece is operated offset from the sliding axis. The complexity consists in the fact that each blade is attached to the single sliding piece through a rod and a crank. Thus the three rotor blades rotate simultaneously by the cumulated action of the centrifugal force that occurs due to the rotating counterweights.

Keywords: wind turbine, slide race, speed, acceleration, crank and connecting-rod assembly

Cuvinte cheie: turbină eoliană, cursa culisei, viteza, accelerația, mecanism bielă-manivelă

## 1. Introducere

Principiile după care se aleg sau se proiectează sistemele de conducere și protecție sunt tratate în standardul CEI 64000-2 („Sistemul de protecție și de oprire”). Pentru acest sistem proiectantul turbinei și al celorlalte componente ale structurii mecanice, formulează condiții tehnice pe baza studiilor aerodinamice și statice (încărcările structurilor).

Generatorul electric sincron cu magneți permanenți este cel mai utilizat la ora actuală în producția agregatelor aeroelectrice. Acesta este echipat de regulă și cu o frână electromecanică de avarie. Celelalte componente electrice (redresor și convertizor de frecvență), dar și sistemul de conducere și protecție sunt alese sau proiectate în funcție de fondurile de investiție avute la dispoziție.

Elementele de plecare pentru proiectarea sistemului de conducere și protecție și restricțiile impuse sunt [2], [3], [5]:

- exploatarea grupului de mașini (turbină de vânt și generator electric) trebuie optimizată prin reglarea turației. Acest reglaj se face prin controlul puterii de ieșire la convertizorul de frecvență (putere corelată cu cea de intrare de la turbină în funcție de regimul vântului, respectiv tensiuni și frecvențe admise de standarde pentru consumatorii electrici conectați);
- menținerea puterii maxime de lucru la arborele generatorului chiar și în cazul unui regim de vânt cu rafale puternice;
- menținerea valorii turației maxime admise în cazul mersului în gol.

Sunt deosebit de importante protecțiile agregatului fiindcă nefuncționarea acestora sau funcționarea defectuoasă pot genera avarii care să ducă la ruperea paletelor, defecte de natură electrică sau mecanică, dar pot chiar să provoace accidente sau avarii grave la sol, persoanelor, respectiv structurilor din imediata apropiere a agregatului.

Sistemul de protecție trebuie să intervină de asemenea în cazul avariilor de natură electrică sau mecanică. Se consideră stare de avarie ajungerea în una din următoarele situații:

- a fost depășită puterea la arbore;
- a fost depășită turația maximă;
- apariția unei defecțiuni din categoriile următoare: creșterea vibrațiilor sistemului, supraîncălzirea lagărelor sau a bobinajului generatorului, funcționarea defectuoasă sau uzura frânei sau alte defecte ireversibile ale sistemului. În acest caz, agregatul trebuie oprit prin frânare și operată o revizie tehnică a agregatului.

Sistemul de conducere și protecție al agregatului asigură două cerințe: exploatarea agregatului în regimurile optime prescrise de proiectantul turbinei și operarea agregatului în condiții extreme. Prima cerință asigură eficiența investiției prin producția de energie valorificată, a doua la fel de importantă asigură securitatea agregatului. Exploatarea agregatului are la bază principiul că tot ce poate produce agregatul la o viteză de vânt dată trebuie folosit. Condițiile extreme la care sistemul trebuie să reziste sunt numeroase: viteze de vânt extreme, intemperii atmosferice (umezeală din aer, condens, trăsnet, ploaie, praf), defecte la echipament, vibrații, depășirea unor limite de funcționare (puteri, turații). Sistemul de conducere și protecție prevede dotarea agregatului cu senzorii necesari. Exemple de senzori: turație, viteza vântului, vibrații, temperatura lagărelor, putere etc.

În cadrul Grant-ului RO-0018/2009 [4] a fost proiectat, executat și montat de către colectivul Centrului de Cercetări Aeroenergetice din cadrul Universității Politehnica Timișoara, un agregat eolian. Acesta a fost conceput în două variante, cu două rotoare diferite. Varianta a doua a turbinei a fost concepută având la butuc un mecanism de protecție suplimentar, și anume un mecanism de protecție centrifugal, cu contragreutăți care rotește paletetele în poziția drapel în cazul unor viteze ale vântului foarte mari. Sistemul de protecție centrifugal la supraturare echipează turbina eoliană montată pe amplasamentul de la Șeușa, comuna Ciugud, județul Alba.

Turbina eoliană menționată mai sus (figura 1) asigură, într-un sistem integrat, împreună cu trei panouri fotovoltaice iluminatul stradal al satului Șeușa. Turbina eoliană asigură producerea unei puteri de 5 kW la o viteză a vântului de 8,5 m/s.

Cercetările se desfășoară în direcția adaptării și perfecționării sistemelor existente precum și punerea în aplicare a noilor concepte [1]. Interesul asupra mecanismelor este unul general având în vedere accidentele provocate de supraturare și care duc la avariarea gravă a turbinei sau a unei bune părți a acesteia.

Mecanismul centrifugal de protecție la supraturare (figura 2) funcționează alternativ în sensul că în câteva secunde de la declanșare și punere a paletelor rotorice în drapel se produce frânarea aerodinamică. Turația turbinei scade și arcul (7) al mecanismului readuce paletetele în poziția de lucru optimă după care, dacă vântul persistă cu viteze peste limita de lucru admisă, rotorul se ținut din nou în sarcină sau, dacă este aruncat din sarcină, cu atât mai mult, readuce paletetele rotorice în drapel. Alternanțele acestea nu sunt de dorit pentru că solicită dinamic întregul agregat eolian.



Fig. 1

Turbina eoliană proiectată și realizată de Universitatea Politehnica din Timișoara în cadrul Grant-ului RO-0018/2009, D = 7 m

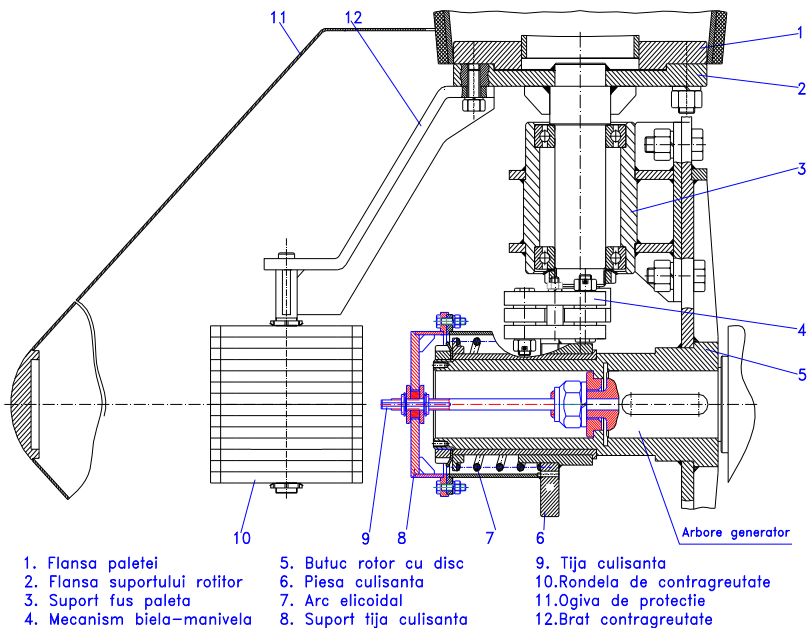


Fig. 2 Mecanismul centrifugal de protecție la supraturare

## 2. Aspecte specifice ale mecanismului bielă-manivelă cu piesă culisantă

Forma clasică a acestui mecanism este tratată în cărțile de mecanică teoretică [9] și s-a aplicat în special la acționarea roților locomotivei cu abur și la motoarele cu ardere internă (mecanismul piston-bielă-arbore cotit), la compresoare volumice etc. Sunt două variante distincte de abordare:

- Axa de rotație a manivelei este în același plan cu axa articulației piesei culisante (figura 3, a);
- Axa de rotație a manivelei este într-un plan paralel cu axa articulației piesei culisante, cele două plane fiind la distanța  $a$  unul față de celălalt (figura 3, b).

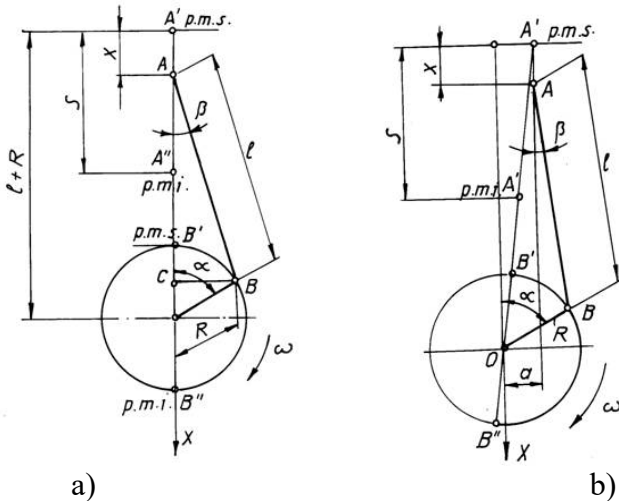


Fig. 3 Scheme clasice ale mecanismului bielă-manivelă: a) axat, b) dezaxat

În acest caz se aplică varianta b) a mecanismului bielă-manivelă. Reprezentarea la scară a pieselor componente (fără detaliile neesențiale) ale mecanismului bielă-manivelă cu piesă culisantă se pot observa în figura 4. Cu toate că axa de rotație a manivelei (axa fusului paletei) este în același plan cu axa de culisare (axa de rotație) se observă că axa articulației bielei la piesa culisantă este într-un plan lateral la distanța  $l_{pc}$ . Mișcarea acestui mecanism este alternativă și limitată pentru  $\alpha = 0^\circ \dots 45^\circ$ . De asemenea acest mecanism are per ansamblu o formă spațială, abordarea lui se poate face în plan deoarece elementele componente sunt în plane paralele.

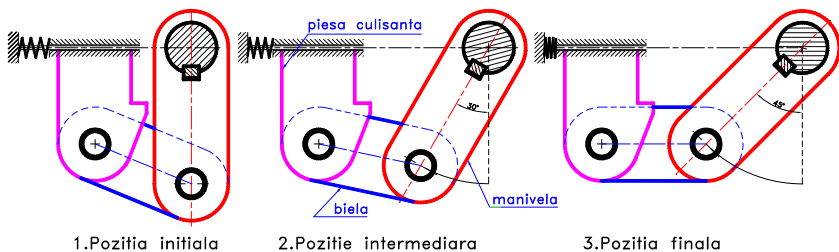


Fig. 4 Reprezentarea la scară a mecanismului bielă-manivelă cu piesă culisantă

În momentul declanșării automate a protecției la supraturare, fiecare paletă trebuie să se rotească simultan cu același unghi față de poziția inițială de funcționare normală. De aceea cele trei palete sunt legate separat printr-o bielă și o manivelă (4, figura 2) de piesa culisantă (6, figura 2).

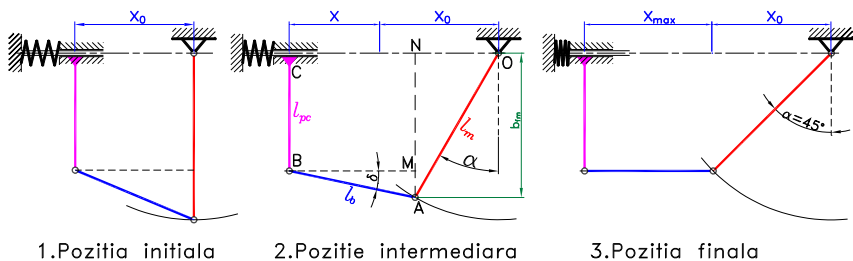


Fig. 5 Reprezentarea schematică a mecanismului bielă-manivelă cu piesă culisantă

### 3. Cinematica mecanismului centrifugal de protecție la supraturare

Studiul riguros al cinematicii mecanismului bielă-manivelă este foarte complicat, din cauza regimului variabil de funcționare funcție de  $\omega = \text{const.}$  sau  $\omega = \text{var.}$  De aceea s-au determinat relații simplificate, în ipoteza unei viteze unghiulare constante a manivelei și la regim stabilizat, obținându-se o precizie suficientă. La o viteză unghiulară constantă a manivelei, unghiul de rotație este proporțional cu timpul și, prin urmare, toate mărimile cinematice pot fi exprimate în funcție de unghiul de rotație al manivelei.

Se vor prezenta relațiile de calcul ale deplasării, vitezei și accelerației piesei culisante. Se consideră că poziția inițială pentru

măsurarea unghiului este poziția pentru care axa manivelei se află la 90° față de axa de deplasare a piesei culisante.

Pe baza schemei mecanismului bielă-manivelă dezaxat, (figura 3, b) au fost deduse relațiile de calcul adaptate la forma particulară a mecanismului analizat în cazul de față, (figura 5/2). S-au făcut următoarele notații:  $\alpha$  - unghiul de rotație al manivelei, se măsoară în sensul de rotație orar;  $\delta$  - unghiul de rotație al bielei;  $\omega$  - viteza unghiulară de rotație a manivelei, în [s<sup>-1</sup>];  $l_m$  - lungimea activă a manivelei (distanța dintre axa fusului paletii și axa articulației manivelei cu biela), în [m];  $l_b$  - lungimea activă a bielei, în [m];  $l_{pc}$  - lungimea activă a brațului lateral al piesei culisante, în [m].

*Deplasarea piesei culisante.* Legea de variație a deplasării piesei culisante în funcție de unghiul  $\alpha$  s-a determinat pe cale analitică. Aplicând relații trigonometrice în triunghiurile din figura 5/2 rezultă  $x_{pc}$ , legea de variație a deplasării piesei culisante în funcție de unghiul  $\alpha$ :

$$x_{pc} = l_m \sin \alpha + \sqrt{l_b^2 - (l_m \cos \alpha - l_{pc})^2} - \sqrt{l_b^2 - (l_m - l_{pc})^2} \quad (1)$$

*Viteza piesei culisante,  $v_{pc}$ .* Derivând relația (1) în raport cu timpul se obține expresia analitică a vitezei piesei culisante:

$$v_{pc} = \frac{dx_{pc}}{dt} = \frac{dx_{pc}}{d\alpha} \cdot \omega \quad (2)$$

Deci,

$$v_{pc} = \omega l_m \cos \alpha - \frac{\omega l_m \sin \alpha (l_{pc} - l_m \cos \alpha)}{\sqrt{l_b^2 - (l_{pc} - l_m \cos \alpha)^2}} \quad (3)$$

*Accelerația piesei culisante,  $a_{pc}$ .* Derivând în raport cu timpul expresia vitezei piesei culisante (3) se obține:

$$a_{pc} = \frac{dv_{pc}}{dt} = \frac{dv_{pc}}{d\alpha} \omega \quad (4)$$

Deci,

$$a_{pc} = -\omega^2 l_m \sin \alpha - \frac{\omega^2 l_m^2 (\sin \alpha)^2}{\sqrt{l_b^2 - (l_{pc} - l_m \cos \alpha)^2}} - \frac{\omega^2 l_m^2 (\sin \alpha)^2 (l_{pc} - l_m \cos \alpha)^2}{(l_b^2 - (l_{pc} - l_m \cos \alpha)^2)^{\frac{3}{2}}} - \frac{\omega^2 l_m \cos \alpha (l_{pc} - l_m \cos \alpha)}{\sqrt{l_b^2 - (l_{pc} - l_m \cos \alpha)^2}} \quad (5)$$

## 4. Concluzii

■ Analiza cinematică a elementelor componente ale mecanismului centrifugal de protecție la supraturare sunt baza de pornire pentru analiza dinamicii acestui mecanism.

■ Cursa piesei culisante se va utiliza la descompunerea forțelor în mecanismul bielă.

■ Accelația piesei culisante împreună cu masa ansamblului culisant vor fi utile la calculul forței de șoc la capătul de cursă a piesei culisante.

■ Forța de șoc este preluată de limitatorul de cursă cu toate că arcul elicoidal amortizează parțial această forță.

## BIBLIOGRAFIE

[1] Bădărău, R., Miloș, T., *Protection Centrifugal Mechanism of the Wind Turbine Rotor at Overspeed*, Știință și Inginerie, Vol. 28/2015, Editura AGIR, București, 2015, pag. 297-304.

[2] Bădărău, R., Miloș, T., *Dinamica mecanismului centrifugal de protecție la supraturare a rotorului de turbină eoliană de putere mică*, A XVI-a Conferință internațională – multidisciplinară, "Profesorul Dorin Pavel - fondatorul hidroenergeticii românești" – Sebeș, 2016, Știință și Inginerie, Editura AGIR, București, 2016, în curs de publicare.

[3] Bej, A., *Turbine de vânt (Wind turbines)*, Editura Politehnica, Timișoara, 2003.

[4] Gipe, P., *Wind turbine basics*, Chelsea Green Publishing Company, Vermont, USA, 2009.

[5] \* \* \* *Microgrid Integrated Small Power Renewable Energy Hybrid Systems*, Grant UEFISCDI-PCCA 36/2012., Parteneriat UEFISCDI 2012-2016, Raport științific 2013, 2014.

[6] \* \* \* *Improvement of the Structures and Efficiency of Small Horizontal Axis Wind Generators with Non-Regulated Blades*, EEA-Grant RO-0018/2009.

[7] Bădărău, R., *Contribuții la studiul turbomașinilor axiale neîntubate*, Teză de doctorat, Editura Politehnica, Timișoara, 2011.

[8] Abbott, I.H., Doenhoff, A.E., *Theory of Wing Sections*, Dover Publications, Inc., New York 1958.

[9] Vâlcovici, V., Bălan, Șt., Voinea, R., *Mecanica teoretică*, Editura tehnică, București, 1968.

Șef lucr.Dr.Ing. Rodica BĂDĂRĂU  
Universitatea Politehnica Timișoara, membru AGIR  
e-mail: badarau\_r@yahoo.com  
Conf.Dr.Ing. Teodor MILOȘ,  
Universitatea Politehnica Timișoara, membru AGIR  
e-mail: teodor.milos@gmail.com