

Capitolul 7 – Energia eoliană

1. Aspecte generale

Energia eoliană este o formă transformată a energiei solare, constând în energia cinetică asociată mișcărilor maselor de aer în atmosferă. Mișcarea maselor de aer este cunoscută sub denumirea de vânt, acesta fiind rezultatul încălzirii inegale a suprafeței pământului.

Sistemul global al vântului prezintă un număr de șase centuri, cuprinse între $0 \div 30$, $30 \div 60$, respectiv $30 \div 90$ grade latitudine nordică și sudică. Căldura rezultată în urma absorbției radiației solare este parțial transmisă aerului, având loc o încălzire diferită a acestuia, în funcție și de natura suprafeței, uscat sau apă. Astfel, densitatea aerului în aceste zone începe să scadă, presiunea atmosferică devenind de asemenea mai mică. La latitudini mai mari aerul rece este mai dens, presiunea atmosferică fiind implicit mai mare.

Pe glob există patru zone cu presiune atmosferică ridicată, două regăsindu-se în zona polilor, celelalte două fiind amplasate în zonele subtropicale (în dreptul paralelor de 30° din cele două emisfere). Între aceste patru zone de presiune ridicată se regăsesc trei zone cu presiune redusă, una aflată în zona ecuatorială, celelalte două fiind în zonele subpolare (în dreptul paralelor de 60° din cele două emisfere). Datorită diferențelor de presiune dintre aceste zone se creează curenți de aer, dinspre zonele cu presiune atmosferică mai mare, către cele în care presiunea atmosferică este mai mică.

Direcția inițială a vântului este perturbată de efectul forței Coriolis, rezultate ca urmare a mișcării de rotație a planetei. Există și o serie de efecte locale ce conduc la modificarea direcției vântului. Dintre acestea poate fi amintită încălzirea diferită a mării și a uscatului. Natura terenului, de la munți și văi, până la obstacole locale precum clădiri și arbori au, de asemenea, efecte importante.

Principalele avantaje ale energiei eoliene sunt următoarele:

- potențialul disponibil este suficient de mare pentru a prezenta importanță pentru utilizarea comercială;
- conținutul specific de energie se exprimă prin densitatea de putere a vântului, care crește foarte rapid cu viteza aerului;
- gradul de acces nu este limitat din punct de vedere tehnologic;
- energia eoliană este inepuizabilă, având un ciclu de regenerare anual;
- este accesibilă fără costuri;
- utilizarea energiei eoliene are efecte ecologice reduse și doar locale.

Există însă și o serie de dezavantaje care nu pot fi trecute cu vederea, dintre care cele mai importante sunt:

- utilizarea energetică este limitată la producerea electricității;
- potențialul eolian se valorifică în locurile unde se formează;
- stocarea energiei eoliene este posibilă numai indirect.

2. Potențialul energetic eolian

Evaluarea mărimii potențialului eolian este mai dificilă și mai puțin precis decât în cazul energiei solare. Deși aproximativ 2% din energia solară ce revine pământului este cedată atmosferei, distribuția acestei energii este neuniformă, deoarece mișcările aerului pot acoperi suprafețe foarte întinse.

Este evident că pentru captarea energiei eoliene nu se poate utiliza întreaga grosime a atmosferei ($H = 11.000$ m), ci numai un strat mult mai îngust, a cărui grosime, h , depinde de dimensiunile posibile ale captatoarelor eoliene, și anume diametrul și înălțimea de instalare. În consecință, potențialul eolian al acestui strat poate fi evaluat conform expresiei:

$$W_h = W_A \frac{\rho_0 + \rho_h}{\rho_0 + \rho_H} \frac{h}{H} \quad (7.1)$$

în care: W_A – energia totală a atmosferei, ρ_0 , ρ_h și ρ_H sunt densitățile aerului la nivelul solului, la înălțimea h , respectiv la înălțimea H .

Dacă se consideră $h = 200$ m, ceea ce corespunde celor mai mari diametre de rotoare eoliene considerate ca posibil de realizat, energia corespunzătoare acestui strat rezultă:

$$W_h = 2,932 \cdot 10^{-2} W_A \quad (7.2)$$

Această egalitate este obținută în condițiile în care: $H = 11000$ m, $\rho_0 = 1,226$ kg/m³, $\rho_h = \rho_0$ și $\rho_H = 0,24 \cdot \rho_0$.

Energia solară ce revine suprafeței pământului însumează o putere totală de $1,8 \cdot 10^{11}$ MW, iar ținând cont de faptul că doar 2% din această cantitate este transformată în energie eoliană, rezultă că potențialul eolian al atmosferei are o putere de $3,6 \cdot 10^9$ MW. Aproximativ 35% din această cantitate este distribuită până la altitudinea de 1000 m, deci energia disponibilă pentru conversie ar fi de $1,26 \cdot 10^9$ MW. Această valoare este de 20 de ori mai mare decât consumul total la nivelul întregii planete.

Valoarea potențialului amenajabil este însă, mult mai redusă, fiind determinată de tipul captatoarelor eoliene existente, precum și de imposibilitatea amplasării acestora în toate locurile favorabile. Acest fapt este datorat condițiilor naturale locale sau utilizării terenului în alte scopuri.

Astfel, resursa eoliană mondială, pe uscat, este de cca. 53.000 TWh/an, cu considerarea restricțiilor de amplasament. Calculele efectuate pentru teritoriul țării noastre converg către un potențial tehnic amenajabil de $10 \div 30$ TWh/an, valoarea destul de greu de obținut.

3. Parametrii vântului

Principalii parametri ai vântului, care interesează în vederea captării energiei eoliene, sunt: viteza vântului, direcția vântului, respectiv durata anuală a vântului (în funcție de viteză).

a. Viteza vântului

Viteza vântului prezintă fluctuații destul de rapide și ample, ceea ce influențează în mod major puterea dezvoltată de instalațiile de conversie. Astfel, pentru determinarea producției de energie a captatoarelor eoliene, este necesară măsurarea vitezei vântului la intervale cât mai mici sau chiar o înregistrare continuă a acesteia.

Viteza vântului variază și în funcție de altitudine, conform expresiei:

$$v_h = v_0 \cdot h^\alpha \quad (7.3)$$

în care: v_h este viteza vântului la înălțimea h , v_0 este viteza la înălțimea observatorului (cca.1m), iar α este un coeficient a cărui mărime depinde de relief și de obstacolele de pe sol ($\alpha = 0,03$ – deasupra mării; $\alpha = 0,08$ – pentru relief plat; $\alpha = 0,2$ – în zona deluroasă; $\alpha = 0,4$ – în zona montană).

b. Direcția vântului

Actualele captatoare eoliene se pot orienta în funcție de direcția vântului, astfel încât cunoașterea acestui parametru nu este esențială. Acest parametru prezintă totuși importanță, mai ales în cazul fermelor eoliene, în care captatoarele sunt așezate cât mai compact, iar curentul de aer suferă o perturbare la trecerea prin captator. Interesează astfel dacă vântul are, sau nu, o direcție preponderentă pe parcursul unui an.

c. Durata anuală a vântului

Atât viteza vântului cât și durata disponibilității vitezei sunt importante pentru a evalua producția de electricitate a captatoarelor. Durata vântului se exprimă prin numărul de ore pe durata unui an în care viteza vântului depășește o valoare precizată.

Variația anuală a intensității vântului în țara noastră urmează o tendință generală, cu intensificări în perioadele ianuarie-martie, septembrie-noiembrie și cu scăderi în intervalele aprilie-august, decembrie.

d. Puterea vântului

Energia cinetică a unei mase de aer care se deplasează cu viteza constantă, v , este:

$$W = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (7.4)$$

în care: m reprezintă masa de aer care traversează suprafața rotorului unui captator eolian în intervalul de timp t , aceasta fiind determinată de expresia:

$$m = \rho \cdot S \cdot v \cdot t = q \cdot t \quad (7.5)$$

unde: $q = \rho \cdot S \cdot v$, reprezintă debitul masic de aer prin suprafața S a captatorului.

Puterea curentului de aer se obține divizând prin t energia W . Astfel se obține:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 = \frac{1}{2} \cdot q \cdot v^2 \quad (7.6)$$

Dacă $S = 1 \text{ m}^2$, știind că $\rho = 1,226 \text{ kg/m}^3$, puterii specifice a vântului poate fi determinată cu următoarea expresie:

$$P = 0,613 \cdot \left(\frac{v}{10} \right)^3 \quad (\text{kW} / \text{m}^2) \quad (7.7)$$

Din expresia (7.7) se poate desprinde concluzia că puterea vântului crește foarte rapid la creșterea de vitezei acestuia, datorită exponentului 3.

4. Limita de putere a captatoarelor eoliene

Nici unul dintre tipurile de captatoare eoliene nu poate utiliza integral puterea curentului de aer care îl străbate. Puterea maximă preluată se poate determina, în principiu, luând în considerare numai modificarea vitezei vântului la trecerea prin captator. Calculul se efectuează pornind de la ipoteza simplificatoare a incompresibilității aerului la trecerea prin captator.

Pentru a determina limita de putere a captatoarelor eoliene cu ax orizontal, în figura 7.1, se consideră un tub de curent având secțiunea egală cu suprafața descrisă de rotorul eolian în mișcare. În amonte de captator viteza vântului este v_1 , iar în aval de acesta devine v_2 , în dreptul captatorului viteza fiind v .

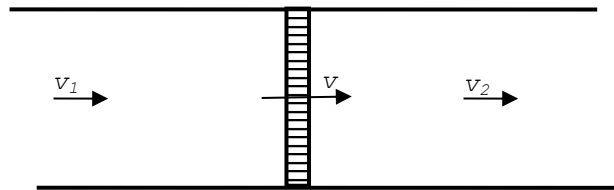


Fig.7.1. Captator eolian cu ax orizontal

Puterea preluată de captator poate fi considerată ca diferența puterilor curentului de aer în amonte, respectiv în aval de captator:

$$P = P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \cdot q \cdot v_1^2 - \frac{1}{2} \cdot q \cdot v_2^2 = \frac{1}{2} \cdot q \cdot (v_1^2 - v_2^2) \quad (7.8)$$

Cunoscând că debitul masic de aer prin suprafața captatorului este $q = \rho \cdot S \cdot v$, relația (7.8) devine:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v \cdot (v_1^2 - v_2^2) \quad (7.9)$$

în care viteza v nu este cunoscută.

Determinarea vitezei v , a vântului la nivelul captatorului este posibilă, ținând cont de faptul că puterea captatorului poate fi definită și ca produsul dintre variația impulsului curentului de aer la trecerea prin captator și viteza acestuia în dreptul captatorului, conform expresiei:

$$P = \frac{\Delta p}{\Delta t} \cdot v \quad (7.10)$$

Deoarece:

$$\frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{\Delta(mv)}{\Delta t} = q \cdot (v_1 - v_2) = \rho \cdot S \cdot v \cdot (v_1 - v_2) \quad (7.11)$$

Expresia (7.10) devine:

$$P = \rho \cdot S \cdot v^2 \cdot (v_1 - v_2) \quad (7.12)$$

Din egalitatea expresiilor (7.9), respectiv (7.12), rezultă viteza v a vântului prin captatorul eolian, conform relației:

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad (7.13)$$

Introducând relația (7.13) în expresia puterii (7.9) și scoțând în factor comun viteza v_1 din amonte de captator, se obține:

$$P = \frac{1}{4} \rho \cdot S \cdot (v_1 + v_2) \cdot (v_1^2 - v_2^2) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v_1^3 \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{v_2}{v_1}\right) \cdot \left(1 - \frac{v_2^2}{v_1^2}\right) \quad (7.14)$$

Daca raportul v_2 / v_1 se notează cu x , atunci expresia (7.14) devine:

$$P = \frac{1}{2} \cdot P_v \cdot (1 + x) \cdot (1 - x^2) \quad (7.15)$$

în care cu P_v reprezintă puterea vântului în amonte de captator.

Valoarea x pentru care puterea preluată este maximă se obține prin rezolvarea ecuației $dP/dx = 0$, soluțiile acestei fiind $x_1 = -1$, respectiv $x_2 = 1/3$.

Puterea maximă a captatorului corespunde soluției x_2 , fiind astfel egală cu:

$$P = \frac{16}{27} \cdot P_v = 0,592 \cdot P_v \quad (7.16)$$

Așadar, puterea maximă preluată de rotor de la vânt se ridică la aproximativ 60% din puterea vântului care trece prin secțiunea captatorului. Această valoare este cunoscută sub numele de limita lui Betz.

5. Parametri energetici ai captatoarelor eoliene

Principalul parametru al unui captator eolian este puterea acestuia, ce poate fi scrisă în diferite puncte ale lanțului de transformări energetice ce au loc în captator.

Astfel, puterea preluată de un captator de la curentul de aer ce îl străbate este cunoscută sub denumirea de puterea mecanică la axul captatorului și este dată de expresia:

$$P = c_p \cdot P_v \quad (7.17)$$

în care: c_p este coeficientul de putere al captatorului, iar P_v reprezintă puterea curentului de aer ce traversează suprafața captatorului.

Coeficientul de putere reprezintă acea parte a puterii vântului care revine captatorului și care poate fi preluată de către acesta. Valoarea acestui coeficient depinde de construcția rotorului, precum și de turația acestuia, exprimată prin parametrul numit rapiditate. Rapiditatea rotorului poate determinată conform relației:

$$\lambda = \frac{u}{v} \quad (7.18)$$

în care: u este viteza liniară la periferia rotorului, iar v reprezintă viteza vântului.

Reprezentarea variației coeficientului de putere al captatorului în funcție de rapiditatea rotorului, $c_p(\lambda)$, permite obținerea așa numitei caracteristici de putere a captatorului, un exemplu în acest sens fiind oferit în figura 7.2.

Așa cum se poate observa din figura 7.2, modul de variație al caracteristicii de putere a unui captator eolian este neliniar, prezentând o valoare extremă ce corespunde puterii maxime preluate de către captator.

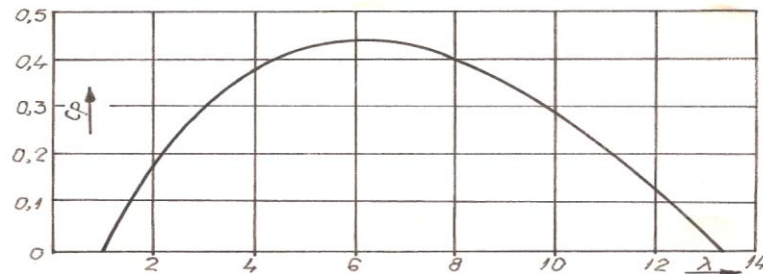


Fig.7.2. Coeficientul de putere al unei turbine eoliene

Puterea nominală a captatorului eolian este egală cu puterea generatorului electric (sau a mașinii de lucru antrenate). Deoarece puterea preluată de la vânt crește neliniar (proporțional cu v^3), iar puterea nominală a mașinii antrenate nu poate fi depășită decât cu riscul unei uzuri premature, dependența puterii furnizate de un captator eolian de viteza vântului are forma din figura 7.3.

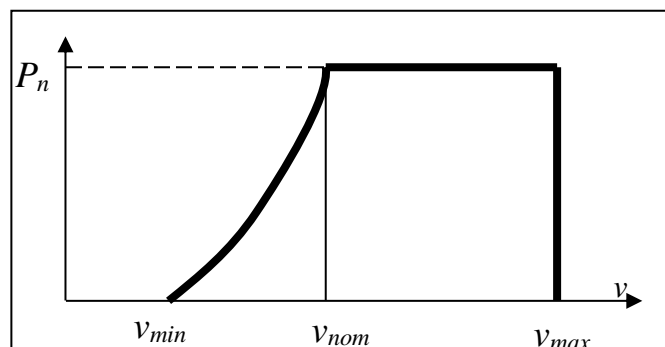


Fig.7.3. Puterea captatorului eolian

Din analiza reprezentării grafice prezentate în figura 7.3 se pot evidenția regimurile de funcționare ale captatoarelor eoliene. Astfel:

- viteza v_{min} este viteza minimă a vântului, necesară pentru antrenarea palelor captatorului; cuplul motor creat de vânt este mai mare decât cuplul rezistent datorat frecării elementelor mobile ale captatorului; generatorul electric funcționând la gol;
- pentru viteze ale vântului cuprinse între v_{min} și v_{nom} , puterea dezvoltată crește proporțional cu cubul vitezei vântului, până la atingerea puterii nominale;
- pentru viteze ale vântului cuprinse între v_{nom} și v_{max} , puterea dezvoltată este limitată la valoarea nominală, folosind posibilitățile de reglare a puterii preluate de la vânt (prin reglarea unghiului de incidență a vântului la rotor, micșorarea secțiunii active a rotorului, frânare);
- pentru viteze ale vântului mai mari decât v_{max} funcționarea captatorului este întreruptă, fiind epuizate posibilitățile de limitare a puterii dezvoltate. În această situație, trebuie luate măsuri de protecție a rotorului împotriva distrugerii (așezarea palelor paralel cu direcția vântului - "în drapel", limitarea accesului vântului, etc.).

Puterea specifică a captatorului eolian se definește ca raportul dintre puterea nominală și suprafața descrisă de rotorul în mișcare. Acest parametru este util mai ales pentru compararea performanțelor diferitelor captatoare eoliene din punct de vedere al eficienței utilizării energiei vântului.

6. Amplasarea captatoarelor eoliene

În principiu, amplasarea captatoarelor trebuie făcută în locurile cele mai favorabile în privința potențialului energetic disponibil. Există, însă, o serie de restricții ce limitează alegerea amplasamentului, precum: folosirea terenului pentru diverse activități (amplasarea locuințelor sau a unor obiective economice, etc), calitatea terenului în sensul existenței condițiilor favorabile lucrărilor de construcție, diverse aspecte de natură ecologică (modificarea aspectului peisajului, zgomot și mișcare permanentă care pot îndepărta păsările, etc).

În ceea ce privește conversia energiei, trebuie avute în vedere influența unor obstacole naturale sau artificiale, precum și influența reciprocă dintre captatoare asupra puterii vântului incidentă pe captatoare.

Viteza vântului se modifică în plan vertical atunci când curentul de aer întâlnește un obstacol, precum arbori, denivelări de teren sau clădiri. Aceste modificări pot merge până la inversarea locală a direcției vântului, așa cum rezultă și din figura 7.4.

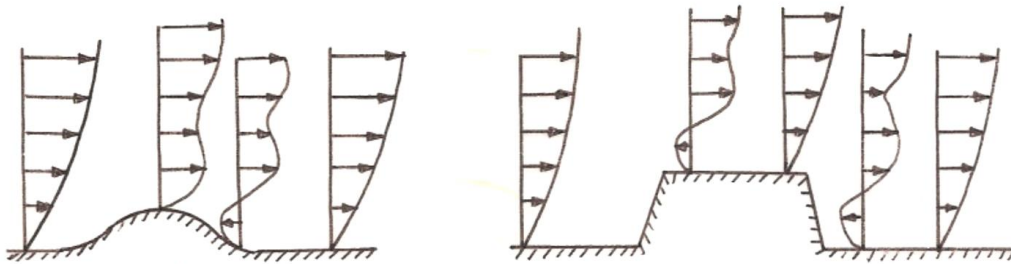


Fig.7.4. Influența denivelărilor asupra vitezei vântului

Pentru a instala în centralele eoliene puteri comparabile cu acelea ale centralelor electrice actuale, este necesară folosirea a zeci sau sute de rotoare, a căror putere nominală poate ajunge astăzi până la 10 MW pe unitate. Pentru folosirea eficientă a terenului, dar și pentru limitarea lungimii cablurilor electrice, captatoarele trebuie amplasate cât mai compact în ansambluri denumite ferme sau parcuri eoliene.

Pentru ca toate captatoarele să lucreze în condiții identice, este necesar ca viteza vântului să se restabilească la viteza inițială până la impact cu următorul rotor. Aceasta are loc după parcurgerea unei distanțe suficiente pentru ca, prin amestecul maselor de aer cu viteze diferite să se uniformizeze viteza vântului:

$$d = k \cdot D \quad (7.19)$$

în care: D este diametrul rotorului, iar d este distanța dintre captatoare. Coeficientul k ia valori între 6 și 12, cu atât mai mari cu cât diametrul rotorului este mai mare.

Modul de așezare grupată a captatoarelor depinde de variația vitezei vântului în amplasament, pe parcursul unui an. Dacă există o direcție dominantă a vântului de-a lungul anului, captatoarele pot

fi așezate în nodurile unei rețele cu ochiuri dreptunghiulare (fig.7.5, a). Dacă însă o direcție dominantă a vântului nu este evidentă, atunci trebuie folosită o rețea formată din triunghiuri echilaterale (fig.7.5, b).

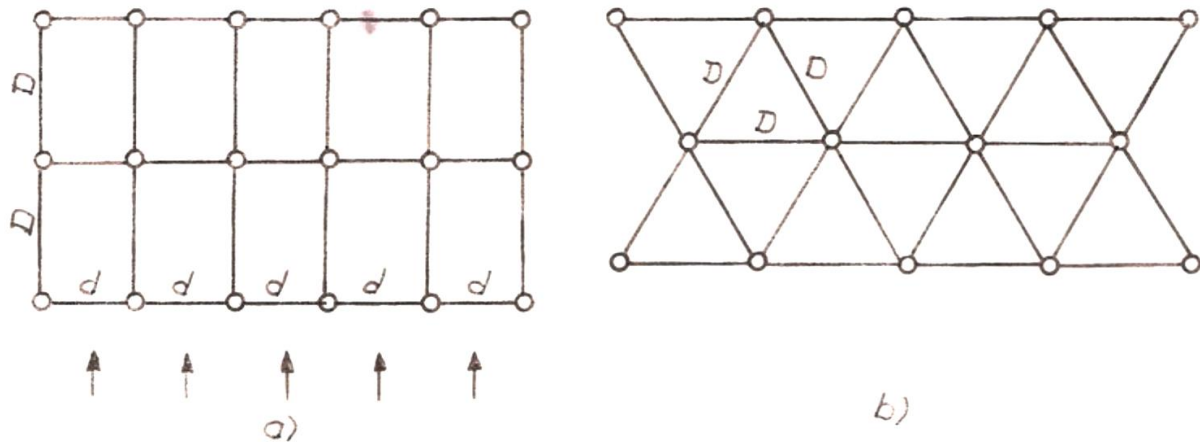


Fig.7.5. Amplasarea captatoarelor pe teritoriului unui parc eolian

7. Clasificarea captatoarelor eoliene

În construcția de captatoare eoliene, ca și în cazul captatoarelor solare, există numeroase variante, rezultat al intensului efort de cercetare depus în ultimele două decenii. O clasificare a acestora, după mai multe criterii, este prezentată în cele ce urmează.

a. Criteriul cinematic

- *captatoare dinamice*, care realizează o mișcare sub acțiunea vântului (cuprinde toate tipurile de captatoare de interes practic);
- *captatoare statice*, care realizează conversia energiei eoliene fără execuția unei mișcări (funcționează pe seama unor principii fizice legate de curgerea fluidelor, însă aplicațiile practice sunt inexistente datorită randamentului scăzut).

b. Criteriul forței motoare

Curgerea aerului în jurul elementelor componente ale unui captator poate dezvolta două tipuri de forță, și anume: forța de rezistență și forța de portanță. Astfel, forța de rezistență este rezultatul transmiterii impulsului mecanic al masei de aer către pala captatorului. Forța portantă apare datorită diferenței de presiune a aerului pe cele două flancuri ale profilului palei, datorită curburii diferite, care modifică modul de curgere a aerului în jurul acesteia.

În funcție de tipul forței de antrenare palele captatorului există:

- *captatoare cu rezistență aerodinamică*;
- *captatoare cu portanță aerodinamică*.

În principiu, captatoarele cu rezistență aerodinamică au axul vertical, iar palele se mișcă pe direcția vântului. Rapiditatea acestora este, în general, subunitară. Captatoarele cu portanță au, în general, ax orizontal, palele mișcându-se perpendicular pe direcția vântului. Astfel rapiditatea lor poate fi mult supraunitară.

c. Criteriul poziției axului

Conform acestui criteriu captatoarele eoliene se împart în:

- *captatoare cu ax orizontal*, având axul mișcării de rotație paralel cu direcția vântului;
- *captatoare cu ax vertical*, având axul perpendicular pe direcția vântului.

d. Criteriul unghiului de incidență

Unghiul de incidență este definit între normala la suprafața palei și direcția vântului. Deoarece, în general, suprafețele paletelor nu sunt plane, unghiul de incidență diferă de la un punct la altul.

Astfel, se deosebesc:

- *captatoare cu incidență constantă*, în cazul cărora unghiul de incidență se păstrează același pe toată durata rotației. În această situație, palele dezvoltă cuplu motor constant, indiferent de poziția lor în timpul mișcării de rotație. Realizarea incidenței constante se poate obține direct în cazul captatoarelor cu ax orizontal, iar, în cazul captatoarelor cu ax vertical, cu ajutorul unor mecanisme de schimbare a poziției paletelor pe axele lor în timpul mișcării de rotație a ansamblului rotorului. Rezultă însă, o construcție complicată, fără interes practic.
- *captatoare cu incidență variabilă*, pentru care unghiul de incidență variază în timpul mișcării de rotație. Din acest motiv, forța motoare dezvoltată de o pală în decursul unei rotații variază, putând chiar deveni, în unele poziții, forță de frânare.

8. Conversia energiei eoliene în forme utilizabile de energie

Principala destinație a energiei eoliene, în prezent, constă în producerea energiei electrice, într-un mod nepoluant. Pe lângă aceasta mai există și unele aplicații mică amploare precum pomparea apei pentru irigații, alimentări cu apă, comprimarea aerului pentru diferite întrebuințări, producerea de căldură prin frecare, căldură care poate fi acumulată în materiale solide sau lichide și folosită la nevoie.

Schema bloc a unei asemenea instalații de producere a energiei electrice este dată în figura 7.6.

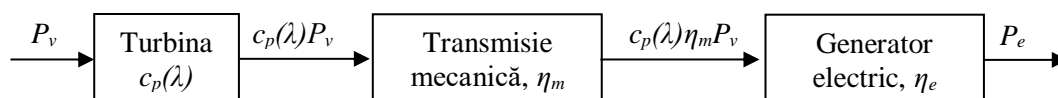


Fig.7.6. Conversia energiei eoliene în electricitate

Veriga intermediară de transmisie mecanică este prezentă adeseori pentru multiplicarea turației turbinei conform cu cerințele mașinii electrice. De asemenea, poate conține și un mecanism de frânare pentru limitarea puterii transmise generatorului electric.

Puterea electrică se determină cu relația:

$$P_e = c_p(\lambda) \cdot \eta_m \cdot \eta_e \cdot P_v \quad (7.20)$$

în care: c_p – coeficientul de putere al captatorului, η_m – randamentul mecanic, η_e – randamentul generatorului electric, P_v – puterea curentului de aer ce traversează suprafața captatorului.

Sistemul de conversie în energie electrică diferă în privința generatorului electric. Pentru ca energia produsă să poată fi distribuită prin sistemul energetic este necesară aceeași frecvență la bornele generatorului cu aceea din sistem. Această condiție poate fi îndeplinită prin utilizarea generatoarelor sincrone sau asincrone.

În cazul utilizării generatoarelor sincrone turația acestora trebuie menținută constantă. Acest lucru este posibil cu ajutorul unor mijloace de reglare a turației atât la turbina eoliană cât și la transmisia mecanică. Deși energia produsă ar putea fi livrată sistemului energetic, dificultatea asigurării turației fixe face ca acest procedeu să fie puțin utilizat. Cel mai utilizat procedeu presupune utilizarea generatoarelor asincrone, deoarece nu necesită reglarea rigidă a turației mașinii electrice.