

ASPECTE PRIVIND REZILIENȚA ȘI MONITORIZAREA PREDICTIVĂ A STĂRII STRUCTURALE A PALELOR TURBINELOR EOLIENE

Prof. univ. dr. hab. Valeriu DULGHERU, Conf. univ. dr. Marin GUȚU, Dr. ing. Ivan RABEL,
Conf. univ. dr. Radu CIOBANU, Conf. univ. dr. Oleg CIOBANU

Universitatea Tehnică a Moldovei, Chișinău, Republica Moldova

REZUMAT. Tehnologiile informaționale penetrează tot mai mult toate domeniile, inclusiv, cel al energiilor regenerabile. Impactul ecologic și criza energetică afectează tot mai mult omenirea, care se orientează hotărât spre energiile regenerabile. În acest context optimizarea sistemelor de conversie a energiilor regenerabile devine o problemă primordială. În lucrare se prezintă analiza cauzelor distrugerii palelor turbinelor eoliene cu ax orizontal, modelări numerice privind fortificarea zonelor „slabe” ale palelor, fabricarea palelor cu impregnarea senzorilor filiformi de deformări fără contact la etapa de fabricație, recepționarea și prelucrarea semnalelor. Totodată, este propus un sistem de monitorizare predictivă a stării turbinei eoliene și implementarea contramăsurilor care ar asigura depistarea și protecția palei aerodinamice de la distrugere mecanică, sporirea rezilienței, de asemenea, protecția oamenilor de căderea fracțiunilor de pală asupra lor.

Cuvinte cheie: stație eoliană, modelare numerică, mentenanță predictivă, monitorizare, senzori filiformi.

ABSTRACT. Information technologies increasingly penetrate all fields, including that of renewable energies. The ecological impact and the energy crisis are increasingly affecting humanity, which is resolutely moving towards renewable energies. In this context, the optimization of renewable energy conversion systems becomes a primary issue. The paper presents the analysis of the causes of the destruction of the blades of wind turbines with a horizontal axis, numerical modeling regarding the strengthening of the "weak" areas of the blades, the manufacture of the blades with the impregnation of non-contact filiform strain sensors at the manufacturing stage, the reception and processing of the signals. At the same time, a system for predictive monitoring of the state of the wind turbine and the implementation of countermeasures is proposed that would ensure the detection and protection of the aerodynamic blade from mechanical destruction, as well as the protection of people from blade fractions falling on them.

Keywords: wind station, numerical modelling, predictive maintenance, monitoring, filiform sensors.

1. INTRODUCERE

Tehnologiile informaționale penetrează tot mai mult toate domeniile, inclusiv, cel al energiilor regenerabile. Impactul ecologic și criza energetică afectează tot mai mult Omenirea, care se orientează hotărât spre energiile regenerabile. În acest context optimizarea sistemelor de conversie a energiilor regenerabile devine o problemă primordială.

Optimizarea funcționării sistemelor de conversie a energiilor regenerabile poate fi realizată pe două căi:

- prin optimizarea constructiv-funcțională a componentelor mecanice ale sistemului;
- prin optimizarea funcționării sistemelor cu utilizarea prin crearea sistemelor inteligente de monitorizare continuă.

Optimizarea constructiv-funcțională a devenit un domeniu de interes deosebit al inventatorilor și cercetătorilor. Există o gamă largă de invenții, elaborate

inclusiv de autori. Aceste soluții asigură majorarea eficienței de conversie, siguranței în exploatare și fiabilității.

Actualmente, turbinele eoliene sunt domeniul cel mai dinamic din clasa sistemelor de conversie a energiilor regenerabile. De aceea, reducerea costurilor de operare și întreținere a acestora este deosebit de importantă.

Turbinele eoliene pot ieși din funcțiune din cauza diferitor defecțiuni, de aceea este importantă asigurarea mentenanței. Activitățile de mentenanță sunt costisitoare din cauza logisticii și întâzierilor, în special, în sectorul offshore [1]. Statistica [1] arată că:

- Apr. 63% din toate cauzele ieșirilor din funcțiune sunt legate de inginerie internă, iar restul sunt provocate de efecte externe, în principal, legate de condițiile climatice;
- Apr. 82% din întreaga activitate de mentenanță este legată de echipamente, fapt ce necesită deplasarea

echipajelor de întreținere la instalație pentru a elimina defecțiunea, lucru dificil în special când turbina eoliană este offshore;

- Conform statisticii o defecțiune va apărea o dată pe an pentru turbinele eoliene cu puterea de până la 500 kW, de două ori pe an pentru turbinele cu puterea 500 - 999 kW și de 3,5 ori pe an pentru turbinele eoliene cu puterea mai mare de 1000 kW.

Cele mai supuse defecțiunilor mecanice sunt palele turbinelor eoliene, care funcționează în condiții complexe de încărcare, inclusiv, sarcini aerodinamice generate de caracterul aleatoriu al vitezei vântului și densității de putere. Fiabilitatea palelor rotorului este vitală pentru industria energiei eoliene ca urmare a condițiilor severe de funcționare, a cerințelor privind durata de viață pe termen lung (15–20 de ani) și a costurilor ridicate (costul de producție al palelor rotorului reprezintă aproximativ 15–20% din costul total de producție a turbinei eoliene) [2]. De aceea, monitorizarea on-line devine deosebit de importantă, fapt ce impulsionează crearea sistemelor inteligente dar necesită sisteme inteligente de monitorizare a unei turbine eoliene poate monitoriza în regim on-line: rezistența palelor (aparitia micro-fisurilor în pale); gradul de depunere a gheții pe profilul aerodinamic al palelor; gradul de încălzire în interiorul nacelei (pierderile de putere de doar 1% într-o turbină eoliană cu puterea de 1 MW reprezintă apr. 10000 W, care în mare parte se transformă în căldură).

Palele turbinelor eoliene sunt expuse unor sarcini complexe de mediu și mecanice în timpul funcționării (deformări ciclice, precipitați, acțiuni ale particulelor abrazive, înghețare, umiditate ridicată și variații de temperatură, impact cu păsările zburătoare ș.a.), dar și deteriorării în timpul transportării, instalării. Pentru a reduce și optimiza costurile de întreținere, este necesară cunoașterea naturii și cauzelor defecțiunilor, de degradare a palelor turbinelor eoliene, care poate asigura predicția cazurilor de defecțiune, planificarea activităților de întreținere și reducerea gradului de degradare. Cu toate acestea, accidentele cauzate de defecțiuni structurale ale palelor turbinelor eoliene nu sunt rare. Statistica arată că la aproximativ 700000 de pale în funcțiune la nivel global, există, în medie 3800 de incidente, care țin de defecțiunea palelor în fiecare an [3].

2. CAUZELE DE DEFECTARE A PALELOR TURBINEI EOLIENE

Defectarea palelor turbinei eoliene poate fi privită ca deteriorarea suprafeței (microfisuri pe suprafață și în înveliș), degradarea rășinii și/sau a interfeței (procese de delaminare, defecte ale rășinii) și deteriorarea elementelor structurale (ruperea fibrelor sau îndoirea lor) [3,4]. Defectele de suprafață pot fi

cauzate de eroziune (provocată de ploii, nisip și grindină) sau impacturi cu obiecte mici. Suprafața deteriorată și rugoasă reduce performanța aerodinamică a palei. Cu toate că turbina eoliană continuă să funcționeze, însă defectele de suprafață cresc și se dezvoltă și pot duce la deteriorarea structurală a palei.

Modurile de defectare ale palelor turbinelor eoliene pot fi analizate, folosind următoarele metode principale:

- ✓ analiza palelor defectate după distrugerea lor;
- ✓ încercarea palelor pe standuri în laboratoare cu monitorizarea stării structurale;
- ✓ analiza incidentelor din culegeri de rapoarte;
- ✓ monitorizarea deformării și degradării palei în timpul funcționării (de exemplu, utilizând teste nedistructive și metode de monitorizare a stării structurale);
- ✓ testarea proiectării subcomponentelor (de exemplu, grinda, îmbinări sau sandvișuri);
- ✓ modelarea computațională a deformării și deteriorării palei.

2.1. Segmente cu risc de deteriorare ale palei turbinei eoliene

Pala pe lungimea ei este solicitată neuniform, de aceea există zone cu risc sporit de degradare, cum ar fi vârful palei și bordul de atac, de asemenea, anumite zone de tranziție (de exemplu, de la cilindru în partea de prindere a palei în rotorul eolian la forma aerodinamică a palei sau de la o grosime a stratului compozit la alta). Conform cercetărilor autorilor [5] cele mai periculoase sub aspectul deteriorării zone ale palei sunt: în apropiere de baza lor (locul de prindere în rotor) (30–35% din lungimea coardei de la bază) și în zona apropiată de vârful palei (70% din lungimea coardei de la baza palei), baza palei, bordul de fugă pe partea de presiune înaltă și bordul de atac.

Sa analizăm cauzele de distrugere a palei în sectoarele cu risc major:

Capătul exterior al palei. Datorită vitezei liniare sporite la capătul exterior al palei gradul de eroziune a suprafeței și de deformare a bordurilor de atac și de fugă este mult mai intens la capete. De asemenea, capetele palelor sunt supuse unor sarcini dinamice mai pronunțate, care pot duce la exfolierea învelișului de lonjeron în apropierea capătului palei.

Bordul de atac. Este zona palei cea mai intens supusă impactului cu factori gen picături de ploaie, lapoviță, particule abrazive de praf și nisip, care provoacă atât eroziunea suprafeței, dar și apariția unor micro-fisuri. Dacă nu sunt reparate în timp, sub acțiunea sarcinilor dinamice extrem de variabile, micro-fisurile se dezvoltă și pot conduce la fisurarea laminatelor [6].

REZILIENȚA ȘI MONITORIZAREA PREDICTIVĂ A STĂRII STRUCTURALE A PALELOR TURBINELOR

Bordul de fugă. Este zona palei turbinei eoliene, care se poate defecta în urma degradării adezivului (de exemplu, la apariția tensiunilor de exfoliere) care, în rezultatul flambajului, poate duce la defectarea finală a îmbinării adezive pe bordul de fugă chiar la sarcini mici.

Sectoare cu tranziții de grosime, în special în apropierea butucului: Din cauza trecerii bruște de la laminatul gros de formă circulară în sectorul butucului la o geometrie fină a profilului aerodinamic al palei în sectorul palei cu valoare maximă a corzii pot apărea pericole de flambaj [6].



Fig. 1. Locația și aspectul deteriorărilor palelor turbinelor eoliene existente.

Analiza arată că cele mai periculoase (dispușe deteriorărilor) sectoare ale palelor unei turbine eoliene sunt capătul exterior al palei, bordul de atac, zonele cu secțiuni de tranziție și cele de lipire a elementelor structurale. Locațiile deteriorărilor palelor sunt în zona de flambare, la distanțe cuprinse între 0,3 și 0,5 din raza rotorului. Conform rezultatelor cercetărilor prezentate de autorii [5] distrugerile palelor apar de cele mai multe ori în condiții de funcționare cu parametri nominali cum ar fi viteza vântului și perioada de exploatare. Astfel de distrugereri sunt, preponderent, din cauza nerespectării tehnologiei de fabricație. Pentru a îmbunătăți integritatea structurală a palelor este necesară o bună coordonare între selecția materialelor, modelul structural și procesul de fabricație. Fortificarea acestor sectoare poate conduce la sporirea substanțială a durabilității și duratei de exploatare a palelor. Aceasta se poate face prin modelări numerice ale palei.

2.2. Modelarea numerică a palei

Geometria rotorului a fost proiectată în software-ul SolidWorks și apoi importată în programul DesignModeler în mediul ANSYS Workbench, unde a fost creat domeniul fluidului. Pentru simplificarea analizei CFD (Computational fluid dynamics) și economisirea timpului de calcul a fost modelat 1/3 din întregul domeniu. Un volum CFD, care include 120° din rotor, a fost creat cu o singură pală, presupunând condiții de periodicitate. În același timp,

Îmbinări adezive/linii de lipire: Degradarea îmbinărilor adezive de la bordul de atac și de fugă ale palei. Legăturile între înveliș și elementele de rigidizare interne se pot deteriora, fapt ce conduce la flambajul structurilor [6]. Conform [7], defectele palelor, cel mai des observate, sunt fisurile transversale în zona secțiunii cu coarda maximă și dezlipirea nervurilor de rigidizare de învelișul palei în zona de tranziție de la bază. Aceste efecte sunt amplificate de defectele de fabricație și de solicitările la torsiune ale palei [7]. În figura 1 sunt prezentate două cazuri de distrugere și locațiile distrugerilor pe lungimea palei observate des.

turnul și solul au fost neglijate. Pentru a asigura curgerea liberă fără a influența limitele domeniului dimensiunile domeniului computațional al fluidului au fost alese, ținând cont de bunele practici și recomandări prezentate în cercetări [8,9]. Pentru simulări a fost luat un rotor tipic pentru turbine eoliene cu următorii parametri de intrare:

Tabelul 1: Parametrii constructiv-funcționali ai rotorului analizat

Putere nominală, MW	1,5 - 3
Turația nominală a rotorului, min ⁻¹	18 - 20
Viteza vântului, m/s	6 - 20
Diametrul rotorului, m	85
Variația grosimii învelișului și lonjeronului, m	0,1 - 0,01

Pentru simplificarea analizei structurale a fost acceptată ipoteza că materialul compozit poate fi omogenizat prin următoarele proprietăți ortotrope ale materialului (v. tabelul 2). Valorile alese ale proprietăților mecanice ale materialelor compozite sunt reprezentative pentru majoritatea materialelor palelor turbinelor eoliene reale.

Pasul de generare a rețelei cu elemente finite este cel mai important dintre toți pașii de simulare. Acuratețea calculului numeric este determinată, în primul rând, de calitatea rețelei, de densitatea și distribuția nodurilor în zonele cheie ale domeniului computațional. O astfel de zonă se află în apropierea suprafeței palei, unde se formează stratul limită. În

aceste zone elementele au fost rafinate corespunzător, pentru a surprinde corect variațiile puternice ale parametrilor de curgere. De asemenea, trecerile de la zonele cu rețeaua fină la cele cu rețeaua grosieră au fost tratate cu atenție, dat fiind faptul că o trecere prea brusca poate altera precizia calculului. Domeniul fluidului a fost împărțit în apr. 3 000 000 de elemente. Această valoare a fost acceptată în conformitate cu studiul de rafinare a rețelei prezentat în lucrarea [10]. Detalii ale discretizării învelișului palei sunt prezentate în figura 2. Rotorul eolian a fost simulat în diferite condiții la limită, cum ar fi viteza vântului de 10–20 m/s și turația corespunzătoare cu cea nominală 18–20 min⁻¹. Pentru a verifica corectitudinea setărilor, în figura 2 se prezintă vectorii viteză distribuiți pe suprafața palei la turația nominală 18 min⁻¹ (viteza vântului de 10 m/s).

Tabelul 2: Proprietățile mecanice ale materialului utilizat

Densitate (kg/m ³)	1550
Modulul Young-X (Pa)	1,1375E+11
Modulul Young-Y (Pa)	7,583E+09
Modulul Young-Z (Pa)	7,583E+09
Raportul lui Poisson-XY	0,32
Raportul lui Poisson-YZ	0,37
Raportul lui Poisson-XZ	0,35
Modulul de forfecare-XY(Pa)	5,446E+09
Modulul de forfecare-YZ (Pa)	2,964E+09
Modul de forfecare-XZ (Pa)	2,964E+09

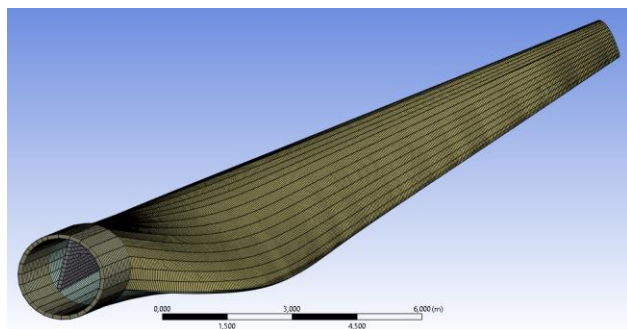


Fig. 2. Modelul palei discretizate în elemente finite.

Figura 3 prezintă distribuția deformațiilor elastice echivalente pe suprafața palei la viteza vântului de 10 m/s. Asemenea distribuție a presiunii obținută în rezultatul efectelor aerodinamice pentru toată gama de viteze ale vântului a fost considerată ca sarcină principală în modelul de calcul.

Astfel, pala este supusă solicitărilor complexe „încovoiere-torsiune”. În comparație cu solicitările reale, care conțin și influența forțelor de gravitație, în simulări aceasta a fost neglijată.

După efectuarea simulărilor palei au fost selectate rezultatele principale, care prezintă interes. Distribuția tensiunilor echivalente (von-Misses) și locația concentrărilor sunt prezentate în figura 4.

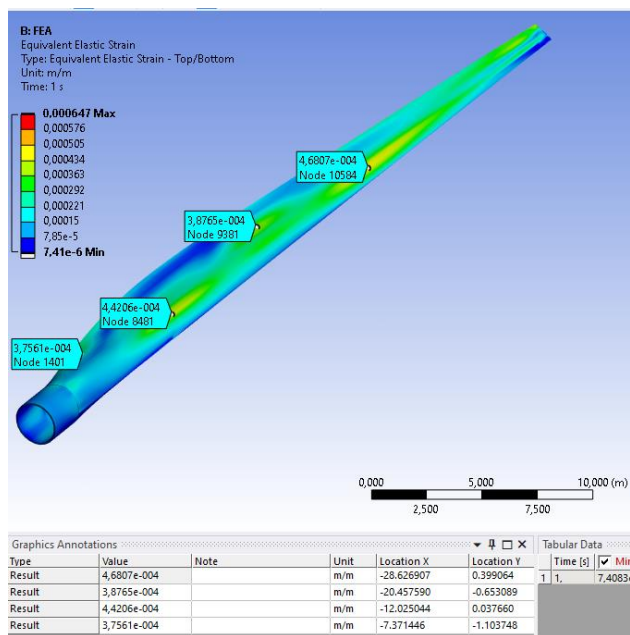


Fig. 3. Distribuția deformațiilor elastice echivalente pe suprafața palei.

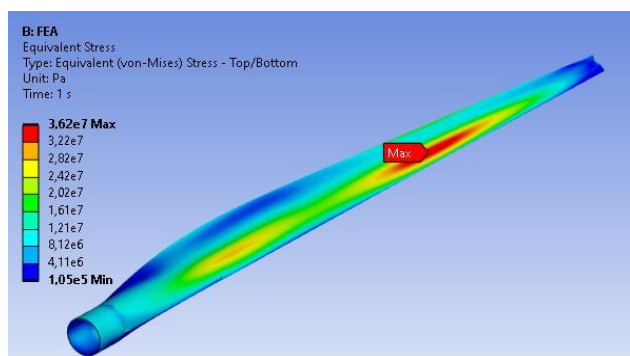


Fig. 4. Distribuția tensiunilor echivalente (von-Misses) în învelișul palei.

Acestea sunt valorile maxime (≈ 36 MPa), care corespund vitezei vântului de 16m/s. Pentru viteza nominală a vântului (≈ 11 m/s) valoarea tensiunilor echivalente este ≈ 35 MPa. Pentru comparație, rezistența la rupere a adezivului pe bază de rășină epoxidică utilizat în construcția palei este de 30–40MPa. Este evident faptul că funcționarea turbinei eoliene la viteze ale vântului puțin mai mari decât cea nominală este limitată. Modelarea numerică permite determinarea cu exactitate și stabilirea locațiilor critice ale palei în raport cu raza rotorului. În cazul analizat au fost identificate patru locații dintre cele mai vulnerabile, printre care se regăsesc și unele cazuri reale de rupere a palelor (v. fig. 1). Simulările au fost efectuate pentru locațiile: 0,18r, 0,3r, 0,5r și 0,7r, unde r este raza rotorului eolian. Valorile obținute ale deformațiilor specifice pentru vitezele vântului între 6–20 m/s sunt incluse în tabelul 3. Analiza datelor obținute arată că valorile deformațiilor specifice ϵ cresc odată cu creșterea vitezei vântului. Valorile maxime apar la viteze de apr. 16 m/s, care depășesc vitezele nominale pentru această clasă de

REZILIENȚA ȘI MONITORIZAREA PREDICTIVĂ A STĂRII STRUCTURALE A PALELOR TURBINELOR

turbine. Tabloul distribuției tensiunilor în structura palei permite evidențierea zonelor cu solicitare maximă, informație importantă pentru monitorizarea predictivă a stării palelor turbinei, care au stat la baza elaborării invenției [10].

Tabela 2: Proprietățile mecanice ale materialului utilizat.

Viteza vântului, m/s	Localizarea zonei critice în raport cu raza			
	0,18r	0,3r	0,5r	0,7r
6	0,00011	0,0002	0,00014	0,00016
7	0,00015	0,00024	0,00017	0,0002
8	0,00019	0,00028	0,00022	0,00026
9	0,00025	0,00033	0,00027	0,000325
10	0,000321	0,000404	0,000342	0,000414
11	0,000375	0,000442	0,000388	0,000468
12	0,000435	0,000486	0,000439	0,000527
13	0,000473	0,000517	0,000472	0,00056
14	0,000485	0,000525	0,00048	0,00057
15	0,000505	0,000542	0,000501	0,0006
16	0,000508	0,000562	0,000511	0,000611
17	0,000502	0,000559	0,000505	0,000607
18	0,000487	0,000546	0,000489	0,000584
19	0,000494	0,000556	0,000497	0,000593
20	0,000476	0,000546	0,000478	0,00056

3. METODĂ ȘI DISPOZITIV DE MONITORIZARE PREDICTIVĂ A STĂRII TENSIONALE A TURBINEI EOLIENE

Răspândirea tot mai largă a turbinelor eoliene ca sisteme de producere a energiei regenerabile alternative face ca problema predictibilității ieșirii din funcție a unor componente ale turbinelor eoliene, în special, distrugerea palelor care, pe lângă compromiterea funcționalității turbinei, de asemenea, prezintă pericol pentru oameni, să devină una majoră. Performanțele crescânde ale tehnologiilor informaționale face mai ușoară rezolvarea acestei probleme. Metoda și dispozitivul de monitorizare predictivă a stării turbinei eoliene și de implementare a contramăsurilor elaborate [11] este un exemplu cras de penetrare a tehnologiilor informaționale în sistemele inteligente de conversie a energiei eoliene.

Dispozitivul de monitorizare predictivă a stării tensionale a palelor turbinei eoliene și de implementare a contramăsurilor, conform fig. 5, include turnul 1, pe care este instalată nacela 2 cu posibilitatea rotirii în jurul axei turnului 1, rotorul eolian 3 cu palele aerodinamice 4 legate cu arborele conducător 5 al multiplicatorului mecanic 6. Arborele condus al

multiplicatorului mecanic 6 este legat rigid cu rotorul generatorului electric 7. Palele 4 includ senzori de deformății filiformi 8 lipiți pe partea interioară a învelișului 9 al palei 4 (fig. 6,a) sau impregnați în structura învelișului palei 9 la faza de fabricație prin depunerea straturilor materialului compozit sau prin imprimare 3D. Palele pot fi legate periodic cu actuatorul 10 și frâna 11.

Dispozitivul de monitorizare predictivă a stării tensionale a palei 4 a turbinei eoliene și de implementare a contramăsurilor conform fig. 5-7 funcționează în modul următor: În cazul apariției unei micro-fisuri senzorul de deformății 8 emite semnale, care sunt transmise (cu sau fără contact) la echipamentul de monitorizare și procesare EMP 12, procesorul 13 și sistemul de control SC 14, care va acționa actuatorul 10 pentru a roti pala aerodinamică 4 în jurul axei sale, astfel modificându-i unghiul de atac, și ulterior frânată de frâna 11.

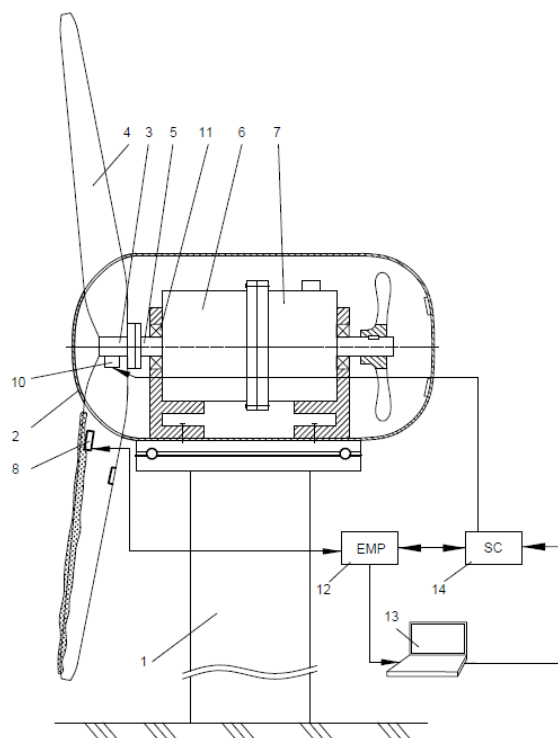


Fig. 5. Vedere generală a turbinei eoliene cu dispozitivul de monitorizare predictivă a stării tensionale a palei.

În metoda de monitorizare predictivă a stării tensionale a palelor turbinei eoliene pentru protecția palelor aerodinamice 4 ale turbinei eoliene de distrugeri, recepția și măsurarea semnalului privind apariția unor micro-fisuri în învelișul compozit 15 al palei aerodinamice 4 se efectuează prin intermediul a cel puțin unui senzor de deformății fără contact 14 instalat în zona cu solicitări maxime I a palei aerodinamice 4 prin recepția, transmisiunea și măsurarea valorii datelor achiziționate și prelucrate precum și transformarea semnalului, evaluarea lui,

inclusiv, analiza de la distanță și implementarea de contramăsuri. În cazul unui parc eolian (fig. 7) semnalele de la senzorii de deformații (8) sunt recepționate de echipamentul de monitorizare și procesare (EMP) (12) legat cu procesorul (13) și sistemul de control (SC) (14), care elaborează comenzi pentru efectuarea contramăsurilor respective. Starea turbinelor eoliene este monitorizată în timp real.

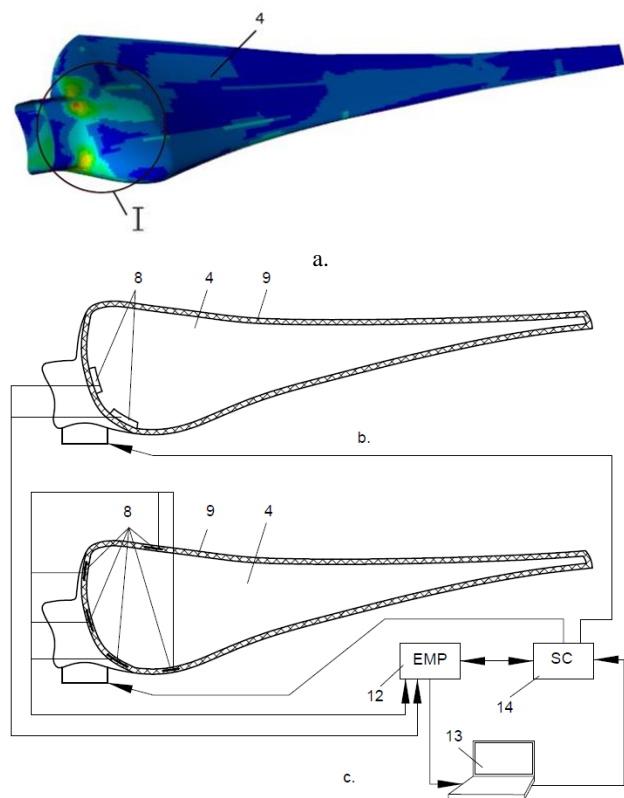


Fig. 6. Tabloul modelării numerice a palei (a), secțiunea învelișului palei cu senzori lipiți în interior (b) și impregnați în structura învelișului palei (c).

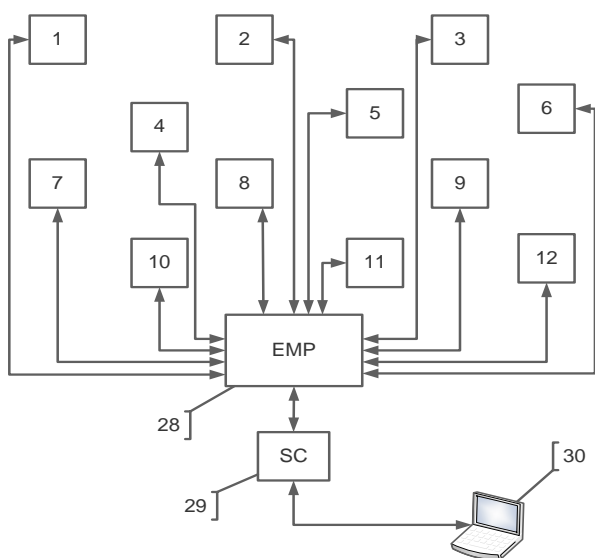


Fig. 7. Parc eolian cu turbine eoliene conectate la sistemul de monitorizare, procesare și control a semnalelor, emise de senzorii instalați pe fiecare turbină.

4. CONCLUZII

Analiza cazurilor reale de distrugere a palelor permite proiectarea corectă a palelor, a materialului compozit folosit la fabricarea palelor.

Modelarea numerică a stării de tensiune și deformații a palelor permite fortificarea palelor în zonele predispușe deteriorărilor.

Instalarea senzorilor filiformi fără contact pe suprafața interioară a învelișului palei sau prin impregnare în structura învelișului permite depistarea din timp a microfisurilor și elaborarea contramăsurilor până la distrugerea palei.

Astfel, dispozitivele de monitorizare predictivă a stării turbinei eoliene și de implementare a contramăsurilor asigură depistarea și protecția palei aerodinamice de la distrugere mecanică, de asemenea, protecția oamenilor de căderea fracțiunilor de pală asupra lor.

Acknowledgements / Mulțumiri

Cercetările au fost efectuate în cadrul proiectului Program de Stat nr. 20.80009.7007.10 „Studiul potențialului energetic eolian și solar al Republicii Moldova și elaborarea sistemelor de conversie pentru consumatori dispersați”.

BIBLIOGRAFIE

- [1] Bangert P. *Failures of Wind Power Plants*. http://www.algorithmica-technologies.com/en/case_studies/failures-of-wind-power-plants. Accesat: 13.09.2023.
- [2] Rezamand M., Kordestani M., Carriveau R., TING D. S-K., Orchard M. E., SAIF M. *Critical Wind Turbine Components Prognostics: A Comprehensive Review*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 69, no. 12, 2020, pp.9306-9328. doi: 10.1109/TIM.2020.3030165.
- [3] Chen X. *Fracture of wind turbine blades in operation - Part I: A comprehensive forensic investigation*. Wind Energy 2018; 21: 1046–1063. <https://doi.org/10.1002/we.2212>. Accesat: 13.09.2023.
- [4] Mishnaevsky L. Jr. *Root Causes and Mechanisms of Failure of Wind Turbine Blades*: Overview. Materials. 2022, 23 p. <https://doi.org/10.3390/ma15092959>. Accesat: 13.09.2023.
- [5] Bladena Report, *Cost and Risk Tool for Interim and Preventive Repair (CORTIR)* EUDP. Bladena, Denmark: 2021. 302p. EUDP Project 64018-0507–Final Report.
- [6] Merizalde Y., Hernández-Callejo L., Duque-Perez O., Alonso-Gómez V. *Maintenance Models Applied to Wind Turbines*. A Comprehensive Overview. Energies 2019, 12, 225. <https://doi.org/10.3390/EN12020225>. Accesat: 12.09.2023.
- [7] Robinson C. M. E. *Study and Development of a Methodology for the Estimation of the Risk and Harm to Persons from Wind Turbines*. MMI Engineering Ltd., London, UK, 2013. 86 p.

REZILIENȚA ȘI MONITORIZAREA PREDICTIVĂ A STĂRII STRUCTURALE A PALELOR TURBINELOR

- [8] <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=>
- [9] Archive: *Statistici privind energia din surse regenerabile #Ponderea energiei din surse regenerabile a crescut de aproape dou.C4.83_ori_C3.AEntre_2004_C8.99i_2018*. Accesat: 18.09.2023.
- [10] <https://www.bursa.ro/pentru-atingerea-obiectivului-de-neutralitate-a-emisiilor-ey-este-nevoie-de-investitii-in-electrificarea-transporturilor-si-sistemelor-de-incalzire-04285830>. Accesat: 18.09.2023.
- [11] <https://adevarul.ro/stil-de-viata/tehnologie/solutia-huawei-digital-power-prezentata-la-cop26-2130603.html>. Accesat: 16.06.2022.
- [12] Dulgheru V., Zaporojan S., Larin V., Manoli I., Munteanu E., Rabei I. BI nr. 1701 Y (MD). CIB F03D 1/00, F03D 7/02, G08B 1/08 (2006.01). Dispozitiv și metodă de monitorizare predictivă a stării turbinei eoliene și de implementare a contramăsurilor/ - Nr. depozit a 2022 0030. Data depozit: 2022.05.18. Publ. 30.06.2023. BOPI nr. 6/2023.

Despre autori

Prof.univ. dr. hab. **Valeriu DULGHERU**, Universitatea Tehnică a Moldovei, Facultatea Inginerie Mecanică, Industrială și Transporturi, valeriu.dulgheru@bpm.utm.md, Chișinău, Republica Moldova, str. Studenților 9/8, of. 208

Conf. univ. dr. **Marin GUȚU**, Universitatea Tehnică a Moldovei, Facultatea Inginerie Mecanică, Industrială și Transporturi, marin.gutu@pmai.utm.md, Chișinău, Republica Moldova, str. Studenților 9/8, of. 417

Dr. ing. **Ivan RABEL**, Universitatea Tehnică a Moldovei, Facultatea Inginerie Mecanică, Industrială și Transporturi, ivan.rabei@tcm.utm.md, Chișinău, Republica Moldova, str. Studenților 9/8, of. 417

Conf. univ. dr. **Radu CIOBANU**, Universitatea Tehnică a Moldovei, Facultatea Inginerie Mecanică, Industrială și Transporturi, radu.ciobanu@bpm.utm.md, Chișinău, Republica Moldova, str. Studenților 9/8, of. 414

Conf. univ. dr. **Oleg CIOBANU**, Universitatea Tehnică a Moldovei, Facultatea Inginerie Mecanică, Industrială și Transporturi, oleg.ciobanu@bpm.utm.md, Chișinău, Republica Moldova, str. Studenților 9/8, of. 414