

## Stručni članak

# KVAROVI I POUZDANOST SKLOPOVA I PODSKLOPOVA VJETROTURBINA

Marko Štajner, Msc, e-mail: [marko@zitel.hr](mailto:marko@zitel.hr)

Darijo Božičković, Bsc., e-mail: [darijobozickovic@gmail.com](mailto:darijobozickovic@gmail.com)

Prof. dr Zdravko Božičković, e-mail: [zdravko.bozickovic@gmail.com](mailto:zdravko.bozickovic@gmail.com)

Prof. dr Asib Alihodžić, e-mail: [asib.dr@gmail.com](mailto:asib.dr@gmail.com)

Internacionalni univerzitet Travnik u Travniku

**Sažetak:** Energije vjetra doživljava veliki uspon u odnosu na tehnologiju izrade vjetrotubina i tržišni udio. Sklopovi i podsklopovi vjetroturbina (WT) se susreću sa različitim stopama kvarova i njihovi kvarovi dovode do zastoja. Da bi se utvrdilo koji su kvarovi dijelova kritičniji za WT-u, uzeti su u obzir, stopa otkaza i vrijeme zastoja. Sumirani su uzroci kvarova i metode detekcije nekih ključnih komponenti u vjetroturbinama. Također, analizirane su najčešće korištene metode analize pouzdanosti i status istraživanja pouzdanosti vjetroturbina. Nakon toga, predstavljeni su fokusi istraživanja, metode i mjere za poboljšanje pouzdanosti vjetroturbina. Praćenje i nadzor stanja WT-a, bilo da se radi o ispravnom stanju dijelova WT-a ili performansama cijelog vjetroparka i njegove izlazne snage, može se obaviti korištenjem sistema za praćenje stanja (CM) i nadzornog sistema za kontrolu i prikupljanje podataka (SCADA). Pregledom objavljenog istraživanja o kvarovima i analizi pouzdanosti WT-a, zaključeno je da je najkritičnija komponenta za dostupnost WT-a reduktor jer njegov kvar dovodi do najdužeg zastoja WT-a. Naveden je pregled kvarova reduktora i opisane su istaknute CM tehnike koje se koriste za njihovo praćenje.

**Ključne riječi:** vjetroturbine; kvarovi, zastoji; stopa neuspjeha; nadzor stanja, SCADA, Vejbulova raspodjela

## FAILURES AND RELIABILITY ANALYSIS OF WIND TURBINE ASSEMBLY AND SUBASSEMBLY

**Abstract:** Wind energy is experiencing a big rise in terms of wind turbine manufacturing technology and market share. Wind turbine (WT) assemblies and subassemblies experience varying failure rates and their failures lead to downtime. To determine which part failures are more critical for a WT, consider the failure rate and downtime. The causes of failures and detection methods of some key components in wind turbines are summarized. Also, the most commonly used reliability analysis methods and the status of wind turbine reliability research were analyzed. After that, research focuses, methods and measures for improving the reliability of wind turbines are presented. Monitoring and supervision of the WT condition, whether it is the health of the WT parts or the performance of the entire wind farm and its power output, can be done using a condition monitoring (CM) system and a supervisory control and data acquisition (SCADA) system. . Reviewing published research on WT failures and reliability analysis, it was concluded that the most critical component for WT availability is the reducer because its failure results in the longest WT downtime. An overview of reducer failures is given and the prominent CM techniques used to monitor them are described.

**Key words:** wind turbines; breakdowns, downtimes; failure rate; condition monitoring, SCADA, Weibull distribution

### 1. UVOD

Fosilna goriva su neobnovljiva i njihove cijene naglo fluktuiraju. U međuvremenu, sve veći ekološki i klimatski problemi u današnje vrijeme pomjerili su fokus istraživanja sa konvencionalnih izvora električne energije na obnovljive izvore [1, 2]. Obnovljivi izvori

energije, poput vjetra, sunca i geotermalne energije, čiste su alternative fosilnim gorivima. Među njima, energija vjetra je danas jedan od najperspektivnijih obnovljivih izvora energije u svijetu. Glavne atrakcije energije vjetra su veliki resurs i mali utjecaj na okoliš. U ovom stanju energija vjetra se ubrzano razvija.

Vjetroelektrane su podložne promjenjivim vremenskim uslovima 24 sata, uključujući promjene temperature, brzine vjetra, ukupnog opterećenja i pritiska zraka, itd., uzrokujući da vjetroturbine (WT) rade pod promjenjivim dinamičkim opterećenjima. WT-e doživljavaju teške vremenske uslove u veoma hladnim regionima gde su niske temperature, zaleđivanje i vlažnost česta pojava, jer mogu da promijene karakteristike konstruktivnog materijala i fluida (ulja i zraka), povećaju stope kvarova i smanjuju performanse WT-a. Kvarovi WT-a dovode do zastoja, gubitka proizvedene energije, a time i do povećanja cijene proizvedene energije. Stoga se mora uložiti veliki napor da se postigne visoka pouzdanost u sistemu pretvarača energetske elektronike vjetroturbine. Brojne komponente vjetroturbina su sklone kvaru, te ih je teško i skupo popraviti ili zamijeniti. Na primjer, ležajevi, invertori i reduktori postavljaju probleme održavanja. Da bi se utvrdilo koje su komponente WT-a kritičnije, stopa kvarova i vrijeme zastoja su najvažniji faktori koje treba uzeti u obzir. Ovo pomaže operaterima i menadžerima u donošenju isplativih odluka u vezi sa strategijama rada i održavanja (O&M). Troškovi rada i održavanja za kopnene WT su 20-30% troškova životnog ciklusa i do 35% za morske WT [3, 4]. Stoga su smanjenje troškova rada i održavanja te poboljšanje pouzdanosti vjetroturbina (WT) postali glavni prioritet. Kako bi se postigao duži vijek trajanja vjetroturbina i smanjili troškovi održavanja, razvoj tehnologije za poboljšanje pouzdanosti vjetroturbina je važno razmatranje za budući razvoj, posebno za vjetroturbine na moru. Stoga se moraju preduzeti mjere za poboljšanje pouzdanosti vjetroturbina.

Niska pouzdanost kod WT povećava troškove rada i održavanja (O&M) i time se povećava cijena energije. Pouzdane komponente mogu biti veoma skupe, ali sa niskim troškovima rada i održavanja, što rezultira niskim cijenama energije. Optimalna pouzdanost stoga treba biti procijenjena uzimajući u obzir i troškove komponenti i troškove O&M, kao i druge doprinose troškova (npr. troškovi instalacije). Stoga je važno biti u mogućnosti procijeniti pouzdanost svih komponenti WT-a i dizajnirati komponente tako da se postigne optimalan nivo pouzdanosti. Komponente vjetroturbina su sklone teškim oštećenjima usljed slabog rada i održavanja. Teška oštećenja koja mogu da nastanu na sklopovima i podsklopovima je prikazano na slici br. 1. Teška oštećenja su nastala usljed udara groma.



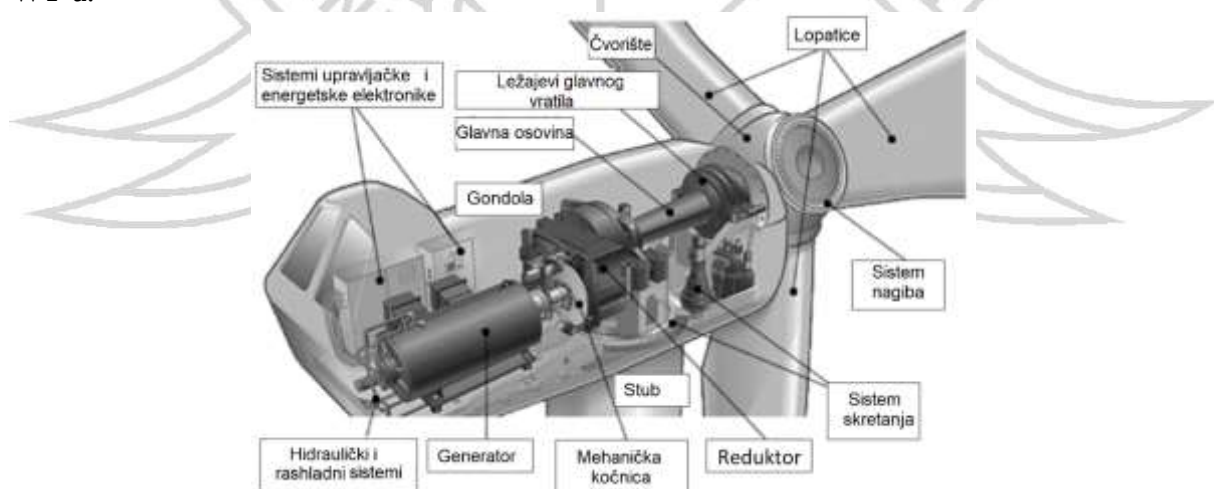
Slika 1. Teška oštećenja koja mogu da nastanu usled direktnog udara groma na lopaticama, gondoli i drugim komponentama vjetroturbine

## 2. KVAROVI SKLOPOVA I PODSKLOPOVA VJETROTURBINA

WT kao sistem se sastoji od podsistema, sklopova i podsklopova. Primjer WT podsistema je pogonski sklop koji se sastoji od glavčine rotora, vratila, ležaja, reduktora, spojnice i generatora. Podsklop je dio podsistema, poput reduktora. WT i njegovi podsistemi i podsklopovi podložni su kvarovima zbog različitih uzroka kao što su jaki vjetrovi i jake padavine [5]. Nakupljanje leda na lopaticama, koje se javlja na WT koji se koristi u hladnim regijama, može dovesti do neuravnoteženog rada i strukturalnog zamora WT, [6]. Nedostatak ili nepravilno održavanje, prisustvo krhotina između zubaca reduktora, nedovoljno podmazivanje mehaničkih dijelova, korozija, vibracije itd. [7], svi su uzroci različitih oblika neuspjeha.

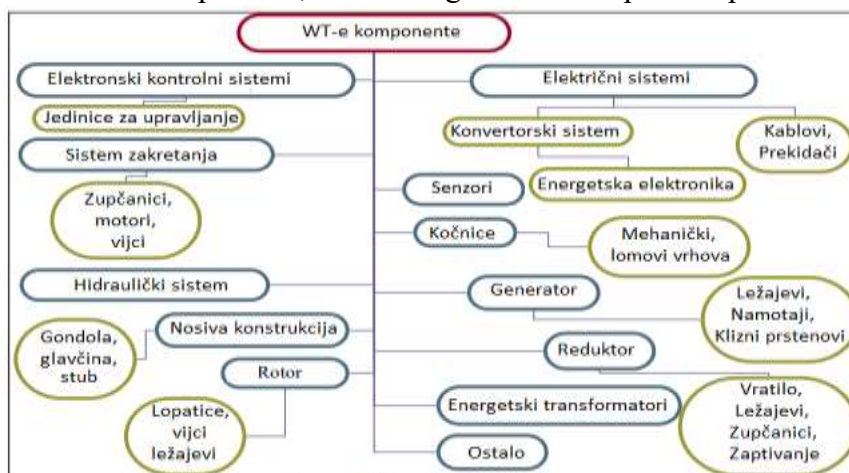
### 2.1. Pogonski sklop (i druge komponente unutar gondole)

Komponente vjetroturbina i statistika kvarova WT se može posmatrati kao sistem koji se sastoji od strukturnih, mehaničkih i električnih podsistema. Kategorizacija WT komponenti je neophodna za održavanje kako bi se izradila statistika kvarova i time procijenila pouzdanost kritičnih komponenti sklopova i podsklopova. Slika 2 ilustruje glavne komponente sistema WT-a.



Slika 2. Mehaničke i električne komponente unutar gondole konvencionalne vjetroturbine sa horizontalnom osom vrtnje (HAWT), prilagođeno iz [14]

Gondola je kućište poklopca, postavljena na vrhu stuba, namijenjena da zaštiti mehaničke i električne komponente od vanjskih uticaja svih mehaničkih i električnih komponenti instaliranih unutra. Ovi mehanizmi uključuju (za HAWT) reduktor, vratilo rotora, kočnicu i generator, koji su svi zajedno sastavljeni slika 2. Ovi dijelovi su neophodni za konverziju energije i sami po sebi predstavljaju otprilike između jedne trećine i polovine ukupnog troška HAWT-a [8]. Ako su u pitanju elektronski kontrolni i električni sistemi WT-a, odnosno elektronske i električne komponente, one se mogu naći u sklopovima prema slici 3.



Slika 3: Glavne komponente WT-a

Vjerovatnoća neuspjeha (kvara) i kvar koji se desi ima svoje posljedice. Kvar i posljedice kvara su rangirani niska (mala), srednja i visoka (velika vjerovatnoća odnosno velika posljedica). Svi kvarovi i posljedice imaju svoj ekonomski aspekt (E) te različito utiču na zdravlje, sigurnost i okoliš (HSE). Matrica rizika sklopova i podsklopova je prikazana na slici 4.

|                       |         |                                                       |                                                                    |                                                                                                         |
|-----------------------|---------|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Verovatnoća neuspjeha | Visoko  | Električni sistem (E)                                 |                                                                    |                                                                                                         |
|                       | Srednje | Reduktor za skretanje (E)<br>Podešavanje lopatice (E) | Reduktor (E)                                                       |                                                                                                         |
|                       | Nisko   |                                                       | Transformator (E)<br>Temelj stroja (E)<br>Glavčina rotora (E, HSE) | Lopatic, rotor (E, HSE)<br>Osovine rotora (E, HSE)<br>Vijčani spojevi (E, HSE)<br>Čelični stub (E, HSE) |
|                       |         | Nisko                                                 | Srednje                                                            | Visoko                                                                                                  |
|                       |         | Posljedica neuspjeha                                  |                                                                    |                                                                                                         |

(E) - sa ekonomskog aspekta,  
 (HSE) - sa aspekta zdravlja, sigurnosti i okoliša

Slika 4: Matrica rizika sklopova i podsklopova WT-e zasnovana na “2011, Elforsk izvještaj 11:18”

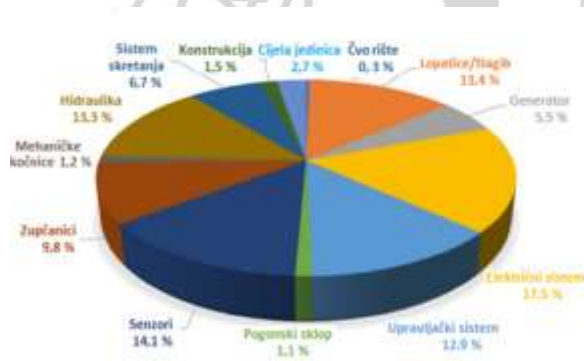
## 2.2. Stope kvarova

Kvar se definiše kao nesposobnost mašine ili sistema, (u našem slučaju WT-e) da izvrši svoju predviđenu funkciju, [9]. Broj kvarova koji tehnološki sistem doživljava po jedinici vremena,

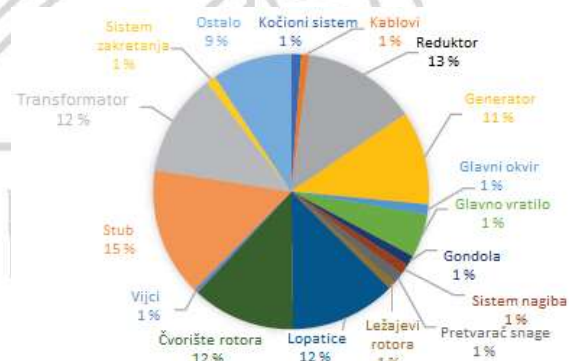
obično u godini, se opisuje stopom kvarova. Varijacije u arhitekturi i tehnologijama koje se koriste u različitim modelima WT-a i njihovih podsklopova mogu rezultirati različitim stopama kvarova od jedne populacije WT-a do druge [10]. Na primjer, u istraživanju podataka o kvarovima njemačkih i danskih WT-a na kopnu u periodu od 1994. do 2004. godine, njemačke WT-e su pokazale više prosječne stope kvarova. To se odnosilo na činjenicu da su njemačke WT-e bile novije i sa složenijim tehnologijama.

Najveće stope kvarova u njemačkim WT-a bile su u podsklopovima električnog sistema (mreža ili električni sistem, sistem skretanja i mehanički ili sistem kontrole nagiba). Međutim, obje populacije WT-a (njemačke i danske WT-e) imale su slične stope kvarova na glavnoj osovini i kočnicama, a primjećeno je da se stope kvarova njemačkih WT-a vremenom smanjuju u mnogo bržem (gotovo dvostruko bržem) trendu od danskih WT-a.

Slična istraživanj kvarova podsklopova WT-a izvršili su [11] između 2000. i 2004. i uključili su 723 vjetroturbine u Švedskoj. Utvrdili su da je najveći procenat kvarova bio u električnom sistemu: 17,5%, senzorima: 14,1%, lopaticama/nagibu: 13,4%, hidrauličkom: 13,3% i kontrolnom sistemu: 13,9% itd., kao što je prikazano u Slika (5). Bliske rezultate su pokazali [12], gdje su podsklopovi sa najvećim stopama otkaza, u opadajućem redoslijedu, i to: električni sistem, rotor (lopatice i glavčina), upravljački sistem, generator, hidraulički sistem i reduktor.



Slika 5: Procenat broja kvarova za švedske vjetroelettrane 2000-2004, prilagođeno iz [10]

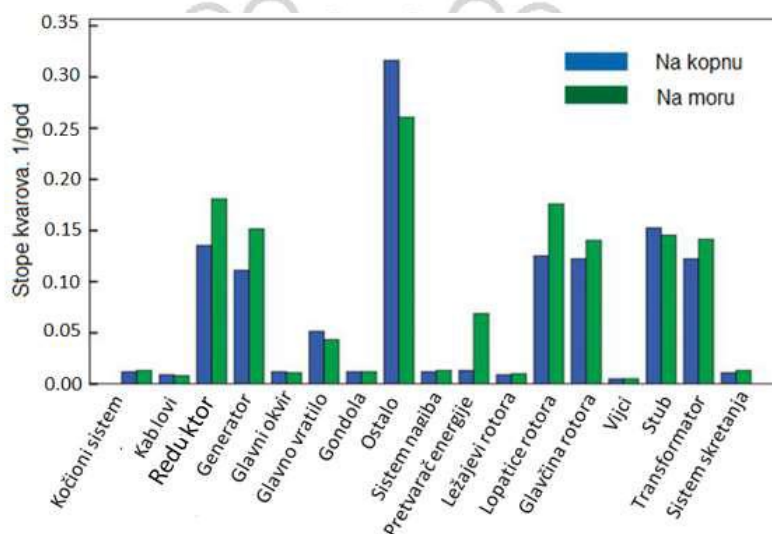


Slika 6: Stope kvarova 16 podsklopova kopnenih vjetroturbina, prilagođeno od [12]

U drugom istraživanju, [13], imali su drugačiju klasifikaciju za WT-e podsklopove, gdje su identificirali 16 WT-ih podsklopova. Otkrili su da je stub imao najveću stopu kvarova od 15,1%, a slijedi ga reduktor sa 13,4% prema slici (6):

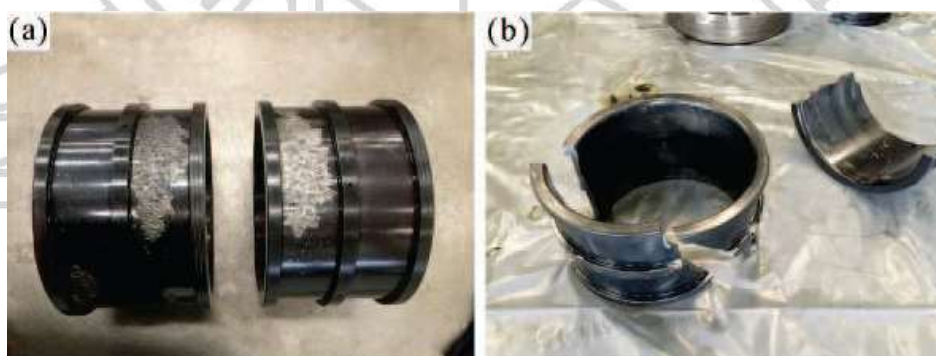
U današnje vrijeme razvoj vjetroturbina teži ka većim i težim konstrukcijama, što povećava učestalost kvarova. U stvarnosti, stope kvarova su takođe veoma različite između kopnenih i morskih turbinskih sistema za isti tip. Slika 7 prikazuje stope kvarova sistema i komponenti vjetroturbina [14]. Rezultati na slici 7 pokazuju da neke ključne komponente imaju veće stope kvarova od ostalih komponenti, a iste komponente koje rade na moru imaju mnogo veće stope kvarova od onih koje rade na kopnu. Statistika kvarova WT-a zasnovana je na “Njemačkom izvještaju o energiji vjetra 2008”.

Kvarovi WT-a reduktora obično su uzrokovani greškama u dizajnu, podcijenjenim radnim opterećenjima kao što su vjetrovi velike brzine, prolazni impulsi kočnica i korozija prašine. Tipični načini kvara WT reduktora uključuju kvar planetarnog zupčanika, kvar planetarnog ležaja, kvar ležaja srednjeg vratila, kvar ležaja vratila velike brzine i kvara sistema podmazivanja. Tako su ležajevi reduktora najranjiviji dio u reduktoru s najvećim brojem kvarova i najdužim zastojsima. Slika 9, prikazuje da je reduktor imao najviše izgubljenih sati. Mreža ili električni sistem, lopatica rotora i generator su rangirani na četvrtom mjestu po godišnjem prosječnom zastoju. Neispravnost je uzrokovala dugo vrijeme zastoja. Dakle, dobio je najviši prioritet. Komercijalno ovaj sistem bi trebao posvetiti više pažnje podsklopovima.

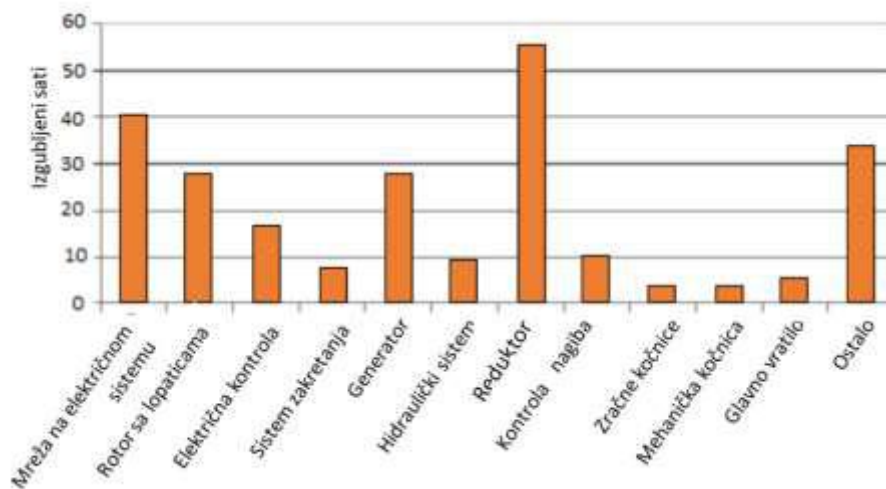


Slika 7. Stope kvarova za podsklopove vjetroturbina koji rade na kopnu i na moru [15].

Više od 60% kvarova reduktora potiče od kvarova na ležajevima, [15]. Kvarovi ležajeva obično zahtijevaju potpunu zamjenu reduktora, odnosno ležajeva reduktora. Na slici (8) vidi se da je kvar u suštini uzrokovan prisustvom trećeg tijela između unutrašnjeg prstena i cilindričnih valjaka, što je dovelo do abraziva s tri tijela nositi.



Slika 8: Deformisani valjkasti ležaj (a) istrošeni unutrašnji prsten (b) slomljen unutrašnji prsten



Slika 9. Godišnji izgubljeni sati uzrokovani podsklopovima vjetroturbina [15]

### 2.3. Komponente pod nadzorom stanja

Prema švedskom standardu SS-EN 13306 [16], nadgledanje se može definisati kao aktivnost koja se izvodi ručno ili automatski koja je namijenjena za praćenje stvarnog stanja svakog sklopa ili podsklopa. Ključna funkcija uspješnog CMS-a trebala bi biti da pruži pouzdanu indikaciju prisutnosti kvara unutar WECS-a i da ukaže na lokaciju i ozbiljnost situacije [17]. U tu svrhu potreban je CMS za rano otkrivanje znakova upozorenja. CM se zasniva na akviziciji podataka i obradi signala i može se implementirati korištenjem različitih pristupa s različitim nivoima tehnologije. Kompletan CMS se sastoji od mnogo podsistema, od kojih svaki prati određenu komponentu vjetrogeneratora [18]. Zbog značajnog nivoa preklapanja između funkcija različitih podsistema, određeni CM podsistemi će pratiti mnoge komponente WT-a.

*Nadzor stanja reduktora:* Od 2004. istraživački napor u oblasti praćenja stanja (CM) za WT se naglo povećalo interesovanje za praćenje stanja za WT reduktor. Ovo ukazuje na sve veću pažnju koju proizvođači i operateri WT-a pridaju CM-u. U pregledu koji su proveli [19], četiri najčešće CM tehnike za WT reduktor, a to su analiza ulja (OA), analiza akustične emisije (AE), analiza vibracija (VA) i električna analiza (EA).

Reduktor sadrži set međusobno povezanih zupčastih točkova (zupčanika) u nekoj vrsti kućišta koje je obično napravljeno od livenog gvožđa. Reduktor je povezan s rotorom preko osovine male brzine s jedne strane i sa generatorom s druge strane preko osovine velike brzine, [20, 21, 22].

*Nadzor stanja mehaničkih komponenti:* Potpuna strategija nadzora za vjetroturbine zahtijeva i praćenje stanja (CM) njihovih mehaničkih komponenti i nadzor stanja konstrukcije (SHM) njihovih nosivih strukturnih elemenata (temelja, tornja i lopatica). Dakle, obuhvata i građevinsko i mašinsko inženjerstvo. Nekoliko tradicionalnih i naprednih nedestruktivnih tehnika (NDT) je predloženo za oba područja primjene tijekom posljednjih godina. To uključuje vizuelnu inspekciju (VI), akustične emisije (AE), ultrazvučno ispitivanje (UT),

infracrvenu termografiju (IRT), radiografsko testiranje (RT), elektromagnetno ispitivanje (ET), praćenje ulja i mnoge druge metode. Ove NDT može izvoditi ljudsko osoblje, roboti ili bespilotne letjelice (UAV). Pristupi zasnovani na vibracijama jedna su od glavnih strategija u ovoj oblasti, čak i kodificirane specifičnim zahtjevima (vidjeti npr. ISO 13373-1:2002 i ISO 61400-25-6:2016). SCADA analiza podataka je također visoko procijenjena za ovaj cilj.

*Nadzor lopatica vjetroturbine - SHM* : Vjerojatno drugi najvažniji aspekt nadzora su lopatice zbog relativne učestalosti (djelimičnih ili potpunih) kvarova. Mnoge studije uključuju dinamičku i/ili statičku karakterizaciju WT lopatica, van lokacije ili na licu mjesta. Naravno, prvi slučaj općenito daje pouzdanije rezultate, ali zahtijeva odvajanje lopatica od rotora i njihovo nošenje u laboratoriju, sa svim povezanim troškovima i kašnjenja.

Što se tiče postavljanja senzora, oni se mogu locirati u blizini „vrućih tačaka“ lopatica, odnosno lokacija na kojima će najverovatnije doći do oštećenja [50] kao: u korijenu lopatice (gdje je mehaničko naprezanje maksimalno); između 30% i 35% dužine akorda; na 70% istog; na maksimalnom dijelu tetive (podložno potencijalnom izvijanju); na gornjoj prirubnici špale, na različitim dužinama tetive u zavisnosti od ugla nagiba (dakle i trenutne brzine vjetra).

*Nadzor potporne konstrukcije i podkonstrukcije – SHM*: Iako je generalno rijetka pojava, strukturalni otkaz stuba ima visok nivo rizika zbog ozbiljnosti potencijalnih posljedica (ukupni gubitak). Mnogi regulatori zahtijevaju periodične kontrole kako bi se izbjeglo neusklađenost stuba. Lokalni monitoring se fokusira na specifične komponente visokog rizika. Ove komponente su sklone oštećenju i uključuju:

1. zavarene, injektirane i vijčane spojeve, zbog njihove relativne krhkosti, posebno zbog oštećenja od zamora; npr., na građevinama stativa na moru, gornji središnji spoj je najkritičnija lokacija;
2. lokacija je izložena agresivnom okruženju (npr. pod vodom ili, još gore, u zoni prskanja). Praćenje korozije je posebno potrebno na ovim najugroženijim lokacijama.

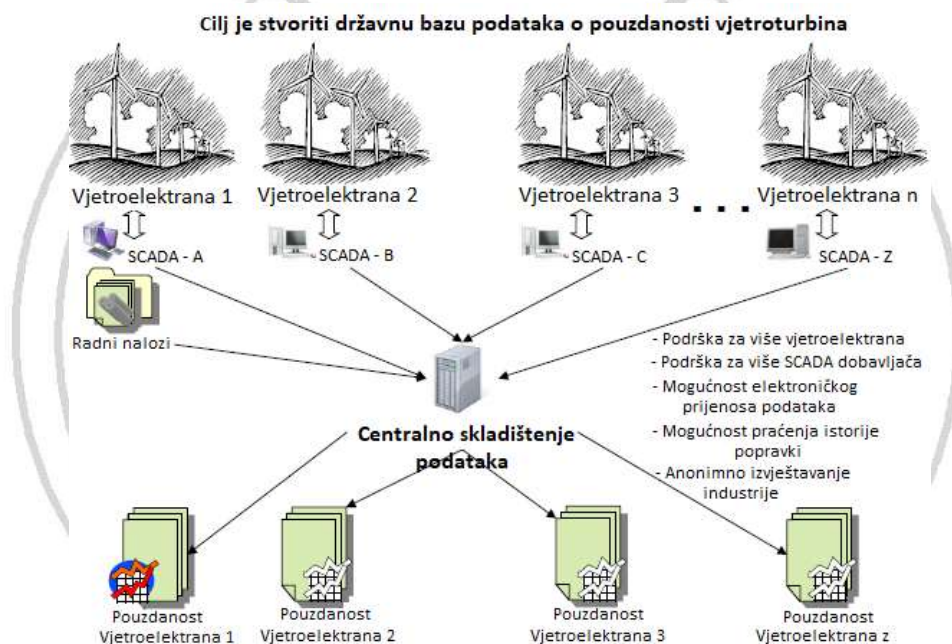
*Infracrvena termografija (IRT)*: Ovi pristupi zahtijevaju neku vrstu kontrolisane toplinske pobude. To se može inducirati putem, npr. toplinskih emitera, ultrazvuka, mikrovalova, vrtložnih struja, bljeskalica, itd. Mikrovalovi, ultrazvuk i visokofrekventne indukcijske struje mogu se koristiti za termografiju zagrijavanja volumena (VHT), tj. zagrijavanje iznutra prema van. Prema izvoru energije moguće je VHT tehnike dalje klasificirati kao vrtložna strujna (EC) termografija, mikrovalna termografija, koja se temelji na dobro poznatim principima mikrovalnog zagrijavanja i vibrotermografija (ili termosonično ispitivanje), s mehaničkim valovima.

*Nadzor vjetroturbina korišćenjem wi-fi mreže*: Osnovni ciljevi korišćenja wi-fi mreže je za praćenje ispravnosti su otkrivanje trenutnog ispravnog stanja vjetroturbine, sprečavanje kvarova uzrokovanih mehaničkim greškama, poboljšanje kvaliteta električne energije pre nego što se problem ispravi, predviđanje nivoa ozbiljnosti kvara i procijena vijeka trajanja vjetroturbine. Praćenje vjetroturbina korišćenjem wi-fi mreže su korisni u otkrivanju mehaničkih kvarova, ali nisu prikladni za otkrivanje mehaničkih grešaka koje se javljaju u sistemu zupčanika i generatoru. Za bolje otkrivanje mehaničkih kvarova, novi sistem za

praćenje zasnovan je na vibracijama, gdje se kvar javlja na lopaticama, osovini ležaja ili reduktoru će uticati na generator vjetroturbine.

#### 2.4. Vjetroturbinski CM baziran na SCADA analizi podataka

Sistemi nadzorne kontrole i prikupljanja podataka (SCADA) su u suštini dizajnirani da pruže informacije o uslovima rada WT-a. Ovi sistemi pružaju mjerenja proizvodnje energije WT-a kao što su izlazna snaga i faktor snage i potvrđuju da je WT bila operativna kroz prosječne intervale od 5-10 minuta koji su proslijeđeni u centralnu bazu podataka [23]. Moderni SCADA sistemi pružaju 10-minutna prosječna očitavanja za praćenje ispravnosti WT podsklopova i dijelova, koristeći pretvarače temperature i vibracija, kao što su temperatura reduktora, ležajeva, gondole i maziva, nivoi vibracija i ubrzanje pogonskog sklopa, itd. Analiza ovih skupova podataka omogućava rano otkrivanje kvarova kako bi se podržala odluka o održavanju. U većini modernih WT-a, SCADA sistemi su sada uobičajeni sistemi za praćenje stanja i pouzdanosti [24]. Cilj je stvoriti državnu (nacionalnu) bazu podataka o pouzdanosti za energiju vjetera, Slika (10).



Slika 10. Struktura Nacionalne baze podataka o pouzdanosti za energiju vjetra, prilagođeno iz [24]

Funkcionalni opis Sandia Wind nacionalne baze podataka o pouzdanosti (NRD) je:

- a. Napraviti skladište svih podataka o vjetroturbinama koji se odnose na događaje, vremenske okvire i okruženja.
- b. Uspostaviti veze između vremena događaja i okruženja.
- c. Uspostaviti pravila za određivanje stopa kvarova, uzroka kvarova, dostupnosti i vremena popravka iz upita baze podataka.
- d. Odrediti stope kvarova, uzroke kvarova, dostupnost i vremena popravke za komponente vjetroturbina. Weibull softver za analizu pruža alate za analizu podataka neophodnih za analizu podataka iz svih faza životnog vijeka proizvoda.

### 3. POUZDANOST PODSKLOPOVA I SKLOPOVA ZA VJETROTURBINE

Postoji značajna potreba za poboljšanjem pouzdanosti u fazama projektovanja, proizvodnje, rada i održavanja. Akcenat analize pouzdanosti je na glavnim komponentama vjetroturbinskog sistema i njegovog podsistema kao što su rotorski sistem, reduktor, kočioni sistem, generator, hidraulički sistem i sistem skretanja.

Glavna svrha određivanja pouzdanosti sistema vjetroturbine je da se identifikuju slabosti sistema i kvantifikuje uticaj različitih komponenti. Pouzdanost sistema se koristi za analizu važnih faktora koji utiču na pojedinačne komponente. Karakteristike kvara pojedinih dijelova vjetroturbinske opreme, (tj. komponenti) mogu se djelomično opisati sljedećim osnovnim statistikama pouzdanosti:

- Stopa kvarova*, često izražena kao kvarovi godišnje po komponenti (kvarovi po jediničnoj godini).
- Vrijeme zastoja* radi popravke ili zamjene komponente nakon što nije u funkciji, izraženo u satima (ili minutama) po kvaru.

Izvor informacija o pouzdanosti je poznati naučnik za pouzdanost Paul Barringer, koji je razvio Weibullovu bazu podataka o pouzdanosti za podatke o kvarovima za različite komponente. Ova baza podataka navodi komponente koje se također nalaze u vjetroturbinama uključujući valjkaste ležajeve, zupčanike, pumpe za podmazivanje, spojnice, zaptivke, prekidače, motore na naizmjeničnu struju i sintetička ulja za podmazivanje koja imaju tipičan Weibullov karakteristični vijek trajanja.

#### 3.1 Vejbulova raspodjela u analizi pouzdanosti

Funkcija gustine otkaza Vejbulove raspodjele je [25]:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left( \frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta}}, t \geq \gamma, \beta > 0, \quad \eta > 0 \text{ ili } f(t) \geq 0, t \geq 0, \\ -\infty < \gamma < \infty \quad (1)$$

Troparametarska Vejbulova raspodjela sadrži:

$t$  – vrijeme otkaza

$\gamma$  - parametar položaja

$\beta$  - parametar oblika

$\eta$  - parametar razmjere.

Negativna vrijednost parametra  $\gamma$  znači da sistem može da otkaze pre korišćenja (na skladištu). U momentu puštanja sistema u rad parametar  $\gamma$  jednak je nula, vrijeme otkaza  $t$  veće je ili jednako  $\gamma$ . Dvoparametarska Vejbulova raspodjela dobijena je postavljanjem da je  $\gamma = 0$ .

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}} \quad (2)$$

Raspodela jednog parametra dobija se postavljanjem da je  $\gamma = 0$  i pretpostavkom da je  $\beta = c = \text{konstanta} = \text{pretpostavljena vrijednost}$  ili:

$$f(t) = \frac{c}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{c-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^c} \quad (3)$$

gde je jedini nepoznati parametar, parametar razmjere  $\eta$ .

Weibulova raspodela se koristi u analizi pouzdanosti [25], ali na osnovu vrijednosti parametra ona ima višenamjensku upotrebu i može se koristiti kao model za različita ponašanja sistema. Funkcija pouzdanosti ima oblik:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}} \quad (4)$$

a vjerovatnoća otkaza:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}} \quad (5)$$

Funkcija intenziteta otkaza je:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (6)$$

Oblik funkcije  $f(t)$ ,  $R(t)$  i  $\lambda(t)$  zavisi od vrijednosti parametara  $\gamma$ ,  $\beta$  i  $\eta$ . U slučaju dvoparametarske Weibulove raspodele, kada je  $\gamma = 0$ , funkcija pouzdanosti ima oblik:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}} \quad (7)$$

vjerovatnoća otkaza:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}} \quad (8)$$

a funkcija intenziteta otkaza je:

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (9)$$

## 4. ZAKLJUČAK

Mehanički kvar je najveći problem sa kojim se susreću vjetroturbine u eksploataciji. Osetljiviji dijelovi WT-a poput ležajeva, zupčanika reduktora, lopatica, hidraulika i generator su najpodložniji kvarovima te rezultiraju velike zastoje (sati izgubljeni po turbini godišnje). Dakle, oni utiču na efikasnost i efektivnost rada vjetroturbine. Identifikacija kvara na mehaničkim uređajima putem vibracija je najefikasniji način. Bežična tehnika pomaže nam da analiziramo i mjerimo abnormalnosti vjetroturbine.

Karakteristike pouzdanosti dijelova i sklopova vjetroturbina se određuju na bazi empirijskih podataka o vremenu ispravnog rada do pojave otkaza. Podaci se dobijaju praćenjem elemenata u realnoj eksploataciji ili sprovođenjem ispitivanja. Primjenom zakona raspodjele u analizi pouzdanosti su ustanovljena koja od poznatih teorijskih zakona raspodjele najviše odgovara empirijskim odnosno eksperimentalnim podacima.

Primjenom softvera za analizu pouzdanosti je omogućena brza analiza pouzdanosti sa mogućnošću dobijanja parametara teorijskih raspodjela (Vejbulova, eksponencijalna, normalna i log-normalana) grafičkim postupkom i analitičkom metodom najmanjih kvadrata.

## 5. LITERATURA

- [1] Hansen A, Iov F, Blaabjerg F, Hansen L. Review of contemporary wind turbine concepts and their market penetration. *Wind Engineering*. 2004;28:247-263
- [2] Clive PJM. *Windpower 2.0: Technology rises to the challenge*. Environmental Research Web. 2008
- [3] Lee, Joyce, and Feng Zhao. 2020. *GWEC GLOBAL WIND REPORT 2019*. edited by Ben Backwell Alastair Dutton, Ramon, Liming Qiao Fiestas, Naveen, Shuxin Lim Balachandran, Wanliang, Emerson Clarke Liang, Anjali and Lathigaralead. Brussels, Belgium: Global Wind Energy Council.
- [4] Stehly, Tyler J, and Philipp C Beiter. 2020. 2018, *Cost of Wind Energy Review*. National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).
- [5] Chou, Jui-Sheng, Chien-Kuo Chiu, I-Kui Huang, and Kai-Ning Chi. 2013. "Failure analysis of wind turbine blade under critical wind loads." *Engineering Failure Analysis* 27:99-118.
- [6] Andersen, Elin, Elin Börjesson, Päivi Vainionpää, and Linn Silje Undem. 2011. "Wind Power in cold climate." *WSP Environmental*.
- [7] Arabian-Hoseynabadi, Hooman, Hashem Oraee, and PJ Tavner. 2010. "Failure modes and effects analysis (FMEA) for wind turbines." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 32 (7):817-824.
- [8] Fingersh, L.; Hand, M.; Laxson, A. *Wind Turbine Design Cost and Scaling Model*; National Renewable Energy Laboratory: Golden, CO, USA, 2006.
- [9] Besnard, François. 2013. *On maintenance optimization for offshore wind farms*: Chalmers University of Technology.
- [10] Tavner, PJ, J Xiang, and F Spinato. 2007. "Reliability analysis for wind turbines." *Wind Energy: An International Journal for Progress and Applications in Wind Power Conversion Technology* 10 (1):1-18.
- [11] Ribrant, Johan, and Lina Bertling. 2007. "Survey of failures in wind power systems with focus on Swedish wind power plants during 1997-2005." *Power Engineering Society General Meeting*, 2007. IEEE.
- [12] Spinato, Fabio, Peter J Tavner, Gerard JW Van Bussel, and E Koutoulakos. 2009. "Reliability of wind turbine subassemblies." *IET Renewable Power Generation* 3 (4):387-401.

- [13] Shafiee, Mahmood, and Fateme Dinmohammadi. 2014. "An FMEA-based risk assessment approach for wind turbine systems: a comparative study of onshore and offshore." *Energies* 7 (2):619-642.
- [14] Caichao Zhu and Yao Li. „Reliability Analysis of Wind Turbines“. Stability Control and Reliable Performance of Wind Turbines,  
<http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.74859>  
 , 01.12.2022.
- [15] Albara Mustafa, Tore Markeset, Abbas Barabadi. Wind Turbine Failures Review and Gearbox Condition Monitoring: Conference Paper · November 2020, DOI: 10.3850/978-981-14-8593-0\_5784-cd
- [16] Maintenance Terminology; SS-EN 13306; Swedish Standards Institute: Stockholm, Sweden, 2011.
- [17] Crabtree, C.J. Condition Monitoring Techniques for Wind Turbines. Ph.D. Thesis, Durham University, Durham, UK, February 2011.
- [18] Popa, L.M.; Jensen, B.-B.; Ritchie, E.; Boldea, I. Condition Monitoring of Wind Generators. Proceedings of the 38th IAS Annual Meeting, Conference Record of the Industry Applications Conference, Salt Lake City, UT, USA, 12–16 October 2003; Volume 3, pp. 1839–1846.
- [19] Salameh, Jack P, Sebastien Cauet, Erik Etien, Anas Sakout, and Laurent Rambault. 2018. "Gearbox condition monitoring in wind turbines: A review." *Mechanical Systems and Signal Processing* 111:251-264
- [20] Roger R. Hill, Jennifer A. Stinebaugh, Daniel Briand, Dr. Allan S. Benjamin and James Lindsay, Wind Turbine Reliability: A Database and Analysis Approach, SANDIA REPORT SAND2008-0983 Unlimited Release Printed February 2008.
- [21] Tchakoua, P.; Wamkeue, R.; Ouhrouche, M.; Slaoui-Hasnaoui, F.; Tameghe, T.A.; Ekemb, G. Wind turbine condition monitoring: State-of-the-art review, new trends, and future challenges. *Energies* 2014, 7, 2595–2630. [CrossRef].
- [22] Gong, Yi, Jing-Lu Fei, Jie Tang, Zhen-Guo Yang, Yong-Ming Han, and Xiang Li. 2017. "Failure analysis on abnormal wear of roller bearings in gearbox for wind turbine." *Engineering Failure Analysis* 82:26-38.
- [23] Butler, S.; O'Connor, F.; Farren, D.; Ringwood, J.V. A Feasibility Study into Prognostics for the Main Bearing of A Wind Turbine. Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Control Applications (CCA), Dubrovnik, Croatia, 3–5 October 2012; pp. 1092–1097.
- [24] Marco Civera, Cecilia, Surace, Non-Destructive Techniques for the Condition and Structural Health Monitoring of Wind Turbines: A Literature Review of the Last 20 Years, *Sensors* 2022, 22, 1627  
<https://doi.org/10.3390/s22041627>
- [25] <https://laboi.fon.bg.ac.rs/wp-content/uploads/2020/11/Weibull.pdf>, pristupano 15.11.2022. god.