Pouzdanost vjetroagregata u kritičnoj fazi rada

Filajdić, Mihael

Master's thesis / Diplomski rad

2018

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:786286

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek

zir.nsk.hr

Image not found or type unknown

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

Sveučilišni studij

POUZDANOST VJETROAGREGATA U KRITIČNOJ FAZI RADA

Diplomski rad

Mihael Filajdić

Mentor: prof.dr.sc. Tomislav Mrčela

Osijek, 2018.

FERIT
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK**

Obrazac D1: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za obranu diplomskog rada

Osijek, 27.02.2018.

Odboru za završne i diplomske ispite

Imenovanje Povjerenstva za obranu diplomskog rada

Ime i prezime studenta:	Mihael Filajdić
Studij, smjer:	Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika, smjer Komunikacije i informatika'
Mat. br. studenta, godina upisa:	D 982, 12.10.2015.
OIB studenta:	46218840087
Mentor:	Prof.dr.sc. Tomislav Mrčela
Sumentor:	
Sumentor iz tvrtke:	
Predsjednik Povjerenstva:	Prof.dr.sc. Srete Nikolovski
Član Povjerenstva:	Doc.dr.sc. Hrvoje Glavaš
Naslov diplomskog rada:	Pouzdanost vjetroagregata u kritičnoj fazi rada
Znanstvena grana rada:	**Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)**
Zadatak diplomskog rada:	U ovome diplomskom radu opisani su vjetroagregati kroz povijest te njihov razvoj i svrha do danas. Definirani su osnovni pojmovi kojima se opisuje pouzdanost vjetroagregata. Prikazane su brojne metode i alati za prikupljanje podataka, analizu i obradu podataka s ciljem određivanja pouzdanosti vjetroagregata. Definirana je kritična faza rada i naglašene kritične komponente koje su ključne u kritičnoj fazi rada. Također, opisan je i sam vjetroagregata kroz svoje mehaničke i električne sustave. Naposljetku, prikazani su rezultati istraživanja o pouzdanosti vjetroagregata za područje Europe. Detektirane su kritične komponente i uzroci kvarova.
Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (diplomskog rada):	Izvrstan (5)
Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 3 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 3 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 3 bod/boda Razina samostalnosti: 3 razina
Datum prijedloga ocjene mentora:	27.02.2018.

Potpis mentora za predaju konačne verzije rada u Studentsku službu pri završetku studija:	Potpis:
	Datum:

FERIT
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK**

IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA

Osijek, 29.03.2018.

Ime i prezime studenta:	Mihael Filajdić
Studij:	Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika, smjer Komunikacije i informatika'
Mat. br. studenta, godina upisa:	D 982, 12.10.2015.
Ephorus podudaranje [%]:	2

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom**: Pouzdanost vjetroagregata u kritičnoj fazi rada**

izrađen pod vodstvom mentora Prof.dr.sc. Tomislav Mrčela

i sumentora

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija.
Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

IZJAVA

Ja, Mihael Filajdić, OIB: 46218840087, student/ica na studiju: Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika, smjer Komunikacije i informatika', dajem suglasnost Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek da pohrani i javno objavi moj **diplomski rad**:

Pouzdanost vjetroagregata u kritičnoj fazi rada

u javno dostupnom fakultetskom, sveučilišnom i nacionalnom repozitoriju.

Osijek, 29.03.2018.

_____
potpis

SADRŽAJ

1. UVOD 1

2. POVIJESNI RAZVOJ 2

2.1. Povijesni razvoj vjetrenjača 2

2.2 Povijesni razvoj vjetrenjača za generiranje električne energije 9

2.3 Status vjetroagregata danas 12

3. POUZDANOST 15

3.1 Definicije 15

3.2 Prikupljanje podataka 18

3.2.1 ALT 18

3.2.2 RLDA 18

3.3 Razdioba vjerojatnosti 19

3.3.1 Weibullova razdioba 19

3.3.2 Eksponencijalna razdioba 20

3.3.3 Log normalna razdioba 21

3.3.4 Normalna razdioba 22

3.4 Metode i alati za određivanje pouzdanosti 24

3.4.1 Krivulja životnog vijeka 24

3.4.2 Kvalitativna i kvantitativna procjena 24

3.4.3 Procjena pouzdanosti korištenjem simulacije ili analitičkoga pristupa 25

3.4.4 Blok dijagram pouzdanosti (RBD) 26

3.4.5 Analiza vrsta i učinaka zastoja (FMEA) 28

3.4.6 Analiza pomoću stabla grešaka (FTA) 28

3.4.7 Analiza pomoću stabla događaja (ETA) 29

3.4.8 Analiza osjetljivosti 30

3.4.9 Procjena pomoću tri točke 30

3.4.10 Strategija održavanja 30

3.5 Pouzdanost u kritičnoj fazi rada 32

4. VJETROAGREGAT 35
4.1 Mehaničke komponente 36
4.1.1 Temelj 36
4.1.2 Stup 37
4.1.3 Rotor 38
4.1.4 Kućište 40
4.1.5 Prijenosnik 41
4.1.6 Kočnica 42
4.2 Električne komponente 43
4.2.1 Generator 43
4.2.2 Transformator 44
4.3 Ostale komponente 45
4.4 Pouzdanost vjetroagregata 46
5. ZAKLJUČAK 54
LITERATURA 56
POPIS SLIKA 59
POPIS TABLICA 61
POPIS OZNAKA 62
SAŽETAK 64
ABSTRACT 65
ŽIVOTOPIS 66

1. UVOD

Ljudi su kroz povijest koristili energiju vjetra u raznim područjima života – od navodnjavanja, pogona za brodove, do pokretanja mlina i sl. Energija vjetra jedan je od najbrže rastućih obnovljivih izvora energije u svijetu. Napretkom i razvojem tehnologije energija vjetra usmjerena je na proizvodnju električne energije korištenjem vjetroagregata.

Vjetroagregati su uređaji koji služe za pretvaranje kinetičke energije vjetra u električnu energiju. Kroz povijest su se dizajn i učinkovitost vjetroagregata mijenjali s ciljem što veće pouzdanosti i smanjenja troškova. Sustav od više vjetroagregata čini vjetroelektranu. Tijekom jednog desetljeća kapacitet vjetroelektrana povećao se nekoliko desetaka puta. Kroz korisničko iskustvo, sakupljano godinama, došlo se do zaključaka da su održavanje i troškovi održavanja ključan faktor u ukupnoj cijeni proizvodnje električne energije.

Pouzdanost tu igra ključnu ulogu. Definira se kao vjerojatnost da će proizvod vršiti zadanu funkciju određeni vremenski period pod određenim uvjetima. Kako se širi industrija vjetroelektrana tako se i podiže svijest o važnosti pouzdanosti vjetroagregata kroz unapređenje dizajna, povećanje proizvodne kvalitete i redovito održavanje. To se posebno odnosi na vjetroagregate u kritičnim područjima gdje vladaju neprijateljski prirodni uvjeti te je održavanje teško dostupno i skupo. Međutim, vjetroagregati nalaze se na različitim područjima i gotovo je nemoguće napraviti uzorak prema kojem treba provoditi održavanje i redovite kontrole rada sustava, što zbog vremenskih uvjeta, što zbog samih lokacija na kojima se nalaze.

Kada se govori o kritičnim uvjetima, riječ je o vremenskim uvjetima pri kojima vjetar puše brzinom većom od 25 m/s. U tim uvjetima cijeli sustav vjetroagregata pod posebnim je opterećenjem te je tada faktor pouzdanosti najvažniji.

Potrebno je detaljnom analizom proučiti pouzdanost svakog pojedinog dijela vjetroagregata u kritičnoj fazi rada, iz čega će biti moguće odrediti na koje dijelove vjetroagregata kritična faza rada najviše utječe, na što posebno treba obratiti pozornost i kojim se postupcima i metodama može povećati sama pouzdanost vjetroagregata.

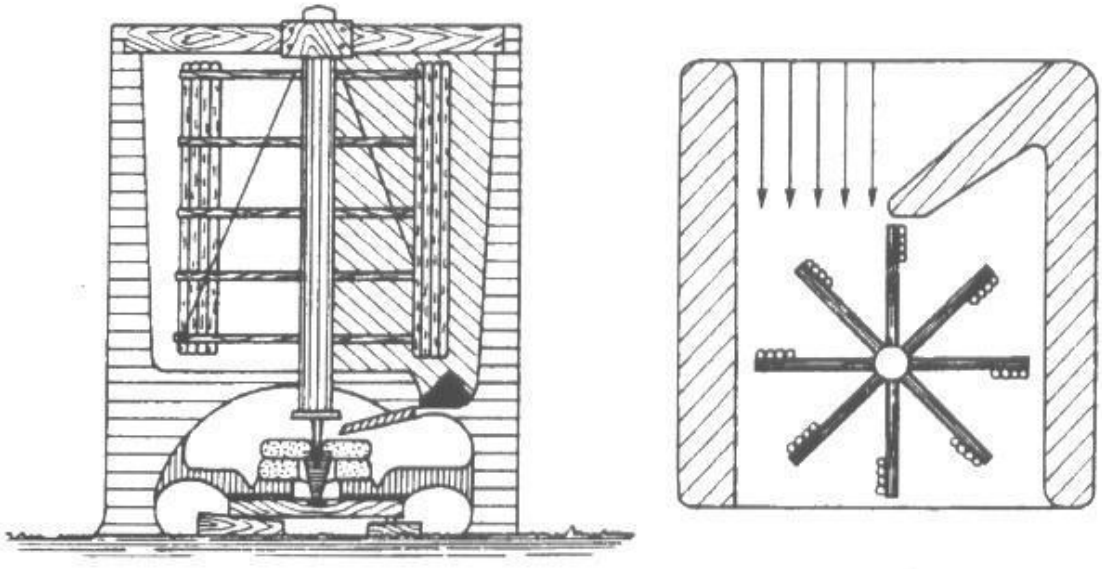
2. POVIJESNI RAZVOJ

2.1. Povijesni razvoj vjetrenjača

Prve vjetrenjače sežu daleko u prošlost. Prema povjesničarima Babilonski je vladar Hammurabi koristio vjetrenjače za navodnjavanje u 17. stoljeću prije Krista (Golding, 1976). Heron, koji je živio u 3. stoljeću prije Krista, opisuje vjetrenjaču s horizontalnom osi kao jednostavnu napravu s četiri jedra koja su služila za iskorištavanje energije vjetra (Golding, 1976).

Perzijanci su također koristili vjetrenjače sredinom 7. stoljeća naše ere. Njihove vjetrenjače bile su s vertikalnom osi vrtnje te su se sastojale od određenog broja jedara koja su se izrađivala od tada dostupnih materijala.

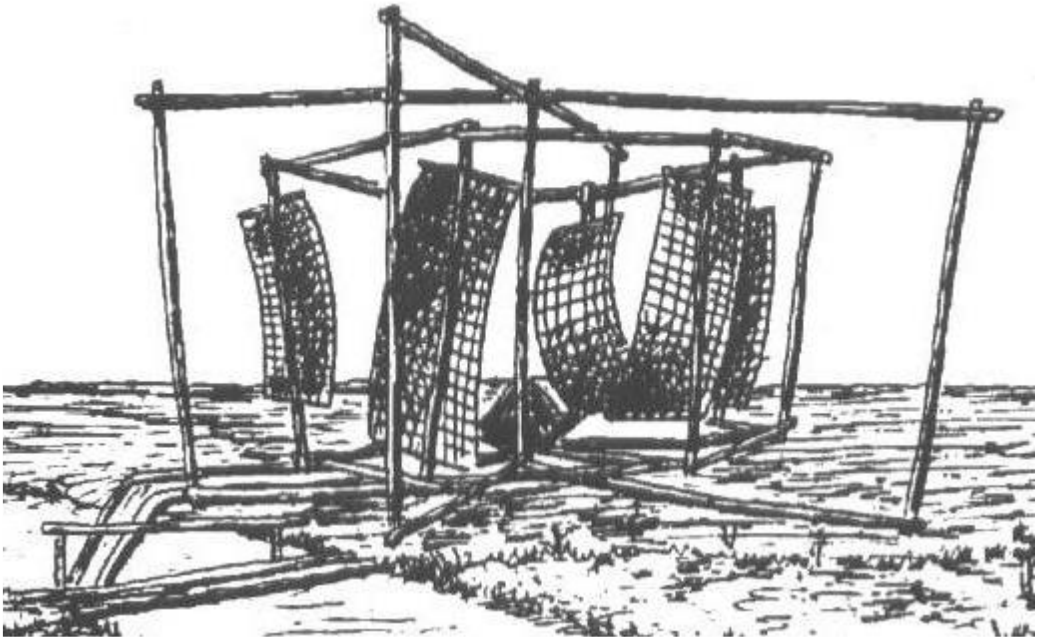
Na slici 2.1 prikazan je način gradnje vjetrenjača. Naime, vjetrenjače su izrađivali tako da su polovicu rotora prekrivali zidom te su na taj način neutralizirali otpor koji se stvarao na toj polovici koja se kreće u smjeru suprotnom vjetru (Guzović, 2010).



Slika 2.1: Perzijska vjetrenjača. Preuzeto iz (Guzović, 2010).

Najstarije vjetrenjače imale su vertikalnu os vrtnje, a pletene prostirke bile su pričvršćene na osovinu te su stvarale otpor strujanju vjetra te su na taj način bile pokretane.

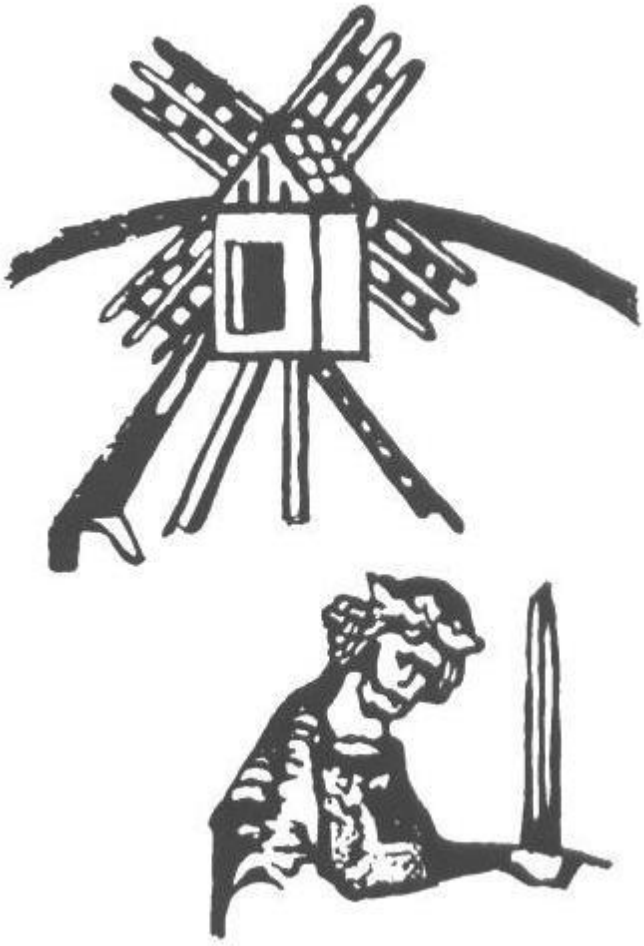
Kao i perzijske vjetrenjače, kineske vjetrenjače također su imale jednu vrstu asimetričnosti. Na slici 2.2 prikazana je asimetrija koja je postignuta na način da su jedra vjetrenjače konstruirana tako da se rotiraju i samim time ne pružaju veliki otpor kada se gibaju u smjeru suprotnom od smjera strujanja vjetra. Osnovna je prednost kineskih vjetrenjača, koje datiraju iz 1000. godine nove ere, u odnosu na perzijske ta da mogu koristiti glavnu prednost vjetrenjača s vertikalnom osi vrtnje, a to je korištenje energije vjetra bez obzira na njegov smjer (Guzović, 2010).



Slika 2.2: Kineska vjetrenjača. Preuzeto iz (Guzović, 2010).

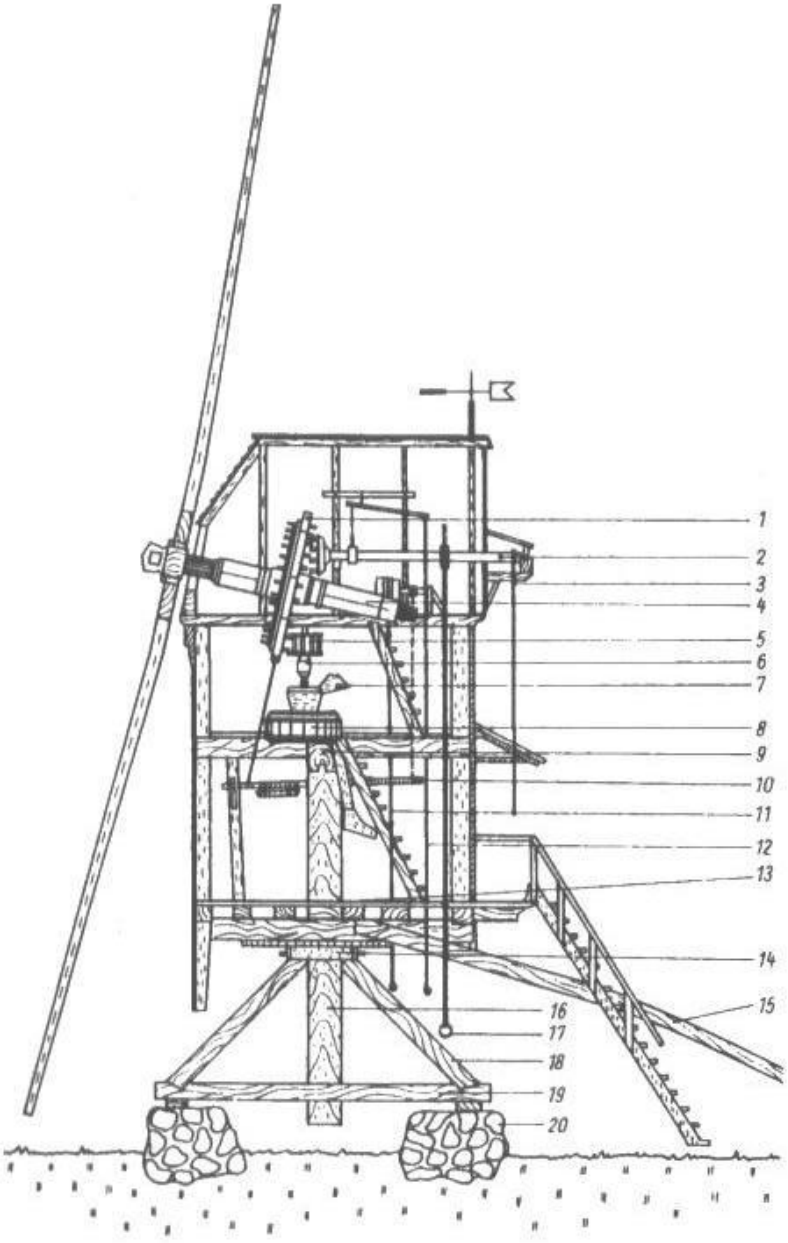
Takve su vjetrenjače nesumnjivo imale nisku razinu pouzdanosti, ali su služile svrsi stoljećima. Bile su napravljene od materijala koji su u to vrijeme bili dostupni, što je ujedno definiralo i veličinu pojedine vjetrenjače. Održavanje je bilo zahtjevno, a osobe koje su se bavile građenjem i održavanjem bile su izrazito cijenjene (Guzović, 2010).

Mnogo godina kasnije vjetrenjače s horizontalnom osi vrtnje pojavile su se i u Europi. Njihova je najznačajnija karakteristika rotor s horizontalnom osi čije lopatice rotiraju u ravnini okomitoj na smjer strujanja vjetra (Guzović, 2010.). Na slici 2.3 prikazana je vjetrenjača s horizontalnom osi vrtnje pronađena u knjigama u Engleskoj oko 1150. godine. Kao revolucionaran stroj širila se postupno s Engleske na Francusku oko 1180. godine, zatim na Nizozemsku oko 1190. godine, 1222. godine na Njemačku te na Dansku 1259. godine. U početku se mislilo da su križari imali veliki utjecaj na razvoj vjetrenjača donoseći znanja iz Perzije u različite krajeve Europe. Međutim, u današnje vrijeme vjeruje se da je situacija obrnuta te da su križari znanja o vjetrenjačama prenijeli na područje današnje Sirije (Guzović, 2010).



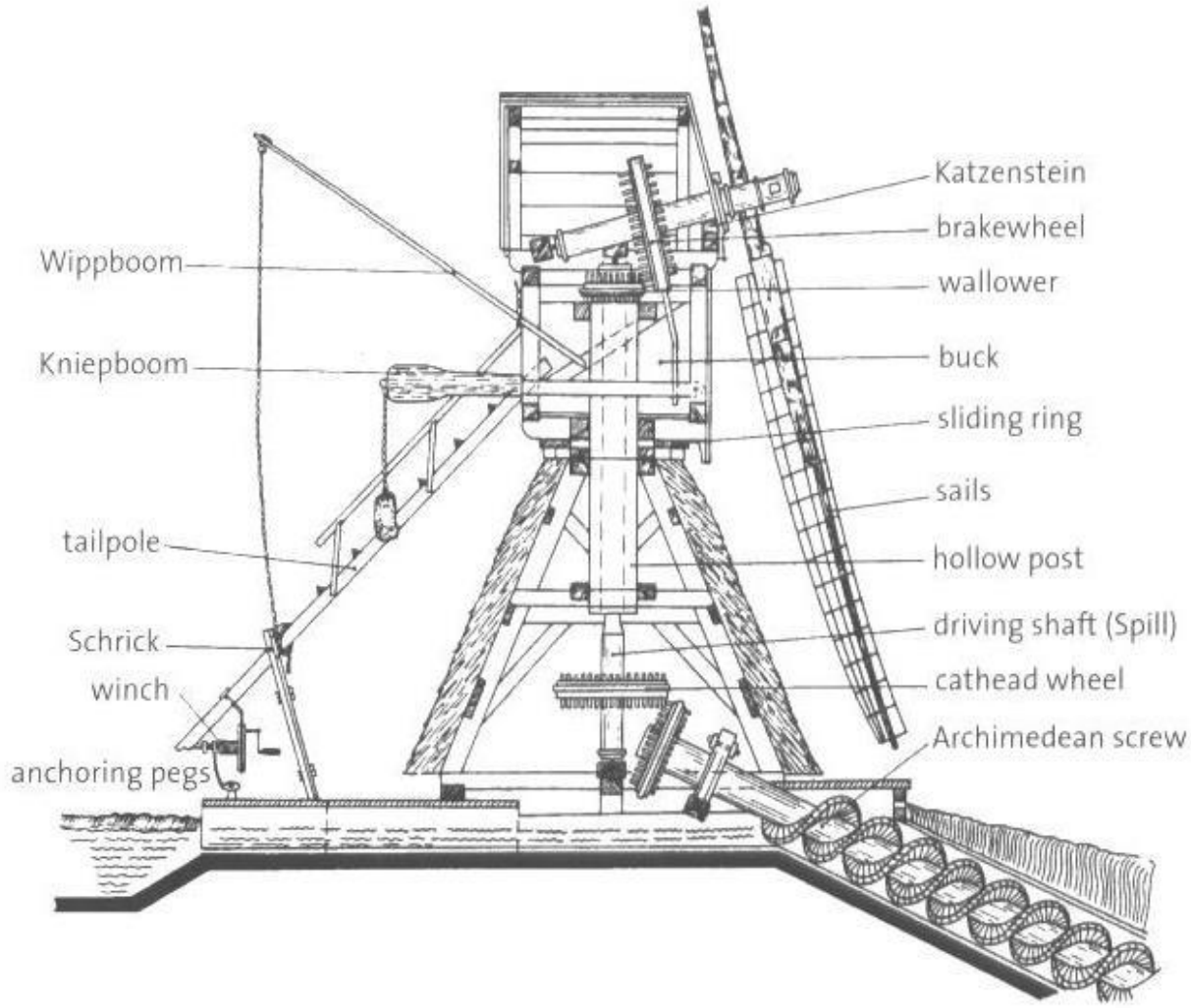
Slika 2.3: Crtež vjetrenjače iz Engleske. Preuzeto iz (Guzović, 2010).

Od 12. stoljeća pa do 19. stoljeća svojstva vjetrenjača su na području Europe konstantno razvijane i poboljšavane. U početku su stupne vjetrenjače bile korištene kao mlinovi (Slika 2.4). Tek od 1800. godine dolazi do unapređenja stupnih vjetrenjača tako što dobivaju dva zupčasta kola za istovremeno mljevenje s dva mlinska kamena. Oko 1400. godine u Nizozemskoj je došlo do potrebe za isušivanjem zemljišta radi dobivanja obradivih površina. Tada su stupne vjetrenjače prenamijene za crpljenje vode (Slika 2.5) (Guzović, 2010).



Slika 2.4: Konstrukcija stupne vjetrenjače. Preuzeto iz (Guzović, 2010).

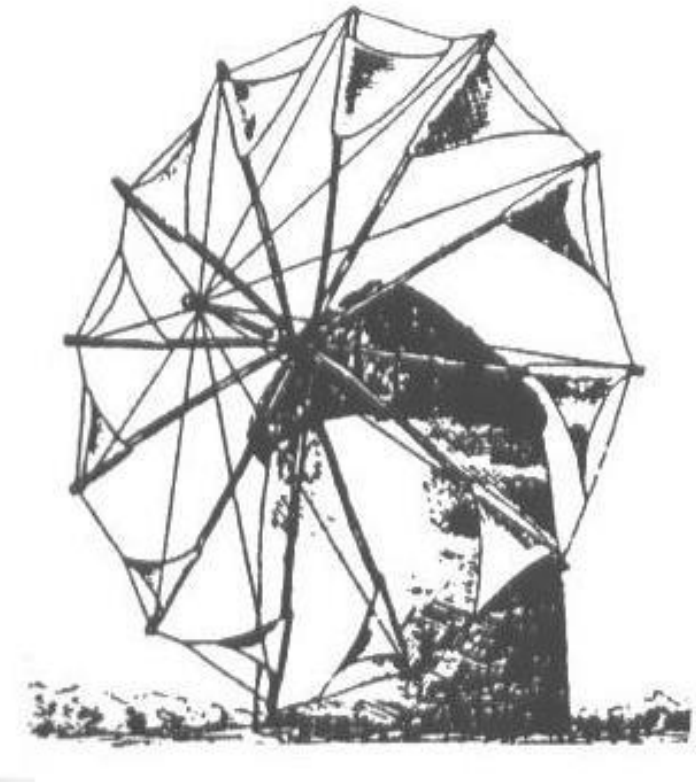
Na slici 2.4 prikazana je shema stupne vjetrenjače koja se sastoji od kvadratne konstrukcije koja se može rotirati oko svoje osi, što je pogodno za različite smjerove vjetra. Prema slici 2.4 dijelovi stupne vjetrenjače su: 1 – zupčasto kolo, 2 – osovina dizalice za vreće, 3 – ručna dizalica, 4 – osovina s rotorom, 5 – zupčanik, 6 – držač, 7 – lijevak za punjenje, 8 – mlinski kameni, 9 – poprečna greda, 10 – kočiona poluga, 11 – kočiono uže, 12 – uže za upravljanje dizalicom, 13 – spremište brašna, 14 – krunski ležaj, 15 – poluga za okretanje, 16 –centralni stup, 17 – dizalica za vreće, 18 i 19 – oslonac, 20 – temelji.



Slika 2.5: Konstrukcija vjetrenjače za crpljenje vode. Preuzeto iz (Guzović, 2010).

Na slici 2.5 nalazi se konstrukcija vjetrenjače za crpljenje vode, gdje se vidi da dio vjetrenjače koji se rotira sadrži samo prijenosni sustav dok se dio za pumpanje vode nalazi ispod rotirajućeg dijela. Također je vidljivo da osovina prolazi kroz šuplji stup, što je u to vrijeme bio pravi izazov za proizvesti. Kasnije je takva konstrukcija poslužila i kod mlinova za kukuruz jer teško teret nije trebalo dizati do rotirajućeg dijela u mlinu, nego se mljevenje moglo odvijati u prizemlju (Guzović, 2010).

Za razliku od Nizozemske i Engleske, u južnoj Europi stupne vjetrenjače nisu stekle popularnost. Tamo se koristila druga vrsta mlina – vjetrenjača toranj (Slika 2.6). Prvi dokumenti o navedenom tipu vjetrenjača datiraju iz 1200. godine. Glavna osobina takvih vjetrenjača je cilindričan oblik, u početku fiksan krov, i rotor. Kasnije izvedbe pronađene u Francuskoj imale su rotirajući krov te rotor s četiri jedra (Guzović, 2010).



Slika 2.6: Mediteranska vjetrenjača. Preuzeto iz (Guzović, 2010).

Upotreba energije vjetra svoj vrhunac doživljava u 17. i 18. stoljeću u Nizozemskoj. Budući da su sagrađeni deseci tisuća vjetrenjača, došlo je do standardizacije konstrukcije, što je bilo nekarakteristično za to razdoblje. U mnogim kasnijim izvedbama ostao je prepoznatljiv Nizozemski princip vjetrenjače.

Posljednji su tip vjetrenjača u povijesnom razvoju američke vjetrenjače (tzv. farmerske) (Slika 2.7). Razvijene su oko 1800. godine te su bile korištene uglavnom za pumpanje pitke vode. Glavno obilježje bio im je rotor promjera 3 – 5 metara koji je na sebi imao dvadesetak metalnih lopatica i visok rešetkasti toranj. Takve vjetrenjače zadržale su do dan danas te imaju jednaku primjenu diljem Australije, Argentine i SAD-a.



Slika 2.7: Američka vjetrenjača. Preuzeto iz (Guzović, 2010).

S aspekta pouzdanosti, stare vjetrenjače imale su nisku razinu pouzdanosti, što zbog materijala od kojih su bile načinjene, što zbog konstantne potrebe za prisutnošću mlinara, ali ne zbog mljevenja žita, nego zbog regulacije i održavanja mlinova. Naime, vjetrenjaču je trebalo okretati u smjeru vjetra, mijenjati materijale na jedrima ovisno o snazi vjetra te ih zaustavljati u slučaju oluja.

Revolucionarno otkriće u iskoristivosti vjetrenjača bilo je uvijanje lopatica. Naime, John Smeaton je 1759. godine prezentirao rezultate svog istraživanja. Rezultati su pokazali da se rotacijom u korijenu za 18° i rotacijom pri vrhu lopatica za 7° postižu najbolji rezultati. Također, primijetio je da povećanje površine iznad određene vrijednosti neće povećati snagu te je odredio snagu i odnos obodne brzine vrha lopatica i brzine vjetra za engleske i nizozemske vjetrenjače tog doba. Prema njegovim proračunima, odnos obodne brzine vrha lopatice i vjetra varirao je od 2.2 do 4.3 (Guzović, 2010).

2.2 Povijesni razvoj vjetrenjača za generiranje električne energije

Danac Poul LaCour, 1891. godine, razvio je prvu vjetrenjaču koja je generirala električnu energiju (Ackermann, 2005). Danske vjetrenjače bile su promjera 23 metra te ih je do 1910. bilo nekoliko stotina kapaciteta od 5 do 25 kW (Johnson, 2006.). Tijekom svjetskih ratova danski su inženjeri dodatno razvili tehnologiju kako bi pokrili nedostatke električne energije tako da se vjetroagregati danske tvrtke F. L. Smidth izgrađeni 1941. – 1942. smatraju pretečama suvremenih vjetroagregata (Ackermann, 2005). Smidthove turbine bile su prve koje su koristile moderne lopatice, temeljene na znanjima o aerodinamici u to doba.

Istovremeno je Amerikanac Palmer Putnam napravio divovski vjetroagregat za američku tvrtku Morgan Smith Co. s promjerom lopatica 53 metra te visinom od 34 metra (Ackermann, 2005). Nije jedina značajna razlika između američkih i danskih vjetroagregata bila u veličini, nego u kompletnom dizajnu. Danska filozofija bila je temeljena na rotoru koji je bio postavljen uz vjetar s mogućnošću regulacije brzine, dok je Putnamov dizajn bio temeljen na rotoru postavljenom niz vjetar s mogućnošću promjene nagiba lopatica kako bi se održavala idealna brzina rotora koja je iznosila 28.7 r/m. Takva brzina okretanja mogla je podnositi vjetrove do 32 m/s (Johnson, 2006). Obje lopatice bile su načinjene od nehrđajućeg čelika i težile su 7300 kg. Međutim, Putnamov dizajn nije bio veoma uspješan. Odbačen je 1945. nakon kvara na vjetroagregatu te je revizijom utvrđeno da se ne isplati popravak jer su nafta i ugljen bili cjenovno isplativiji izvori energije (Johnson, 2006).

Nakon Drugog svjetskog rata, Johannes Juul unaprijedio je dansku filozofiju te je njegov vjetroagregat, postavljen u Gedseru u Danskoj, generirao 2.2 milijuna kWh između 1956. i 1967. godine (Ackermann, 2005). Istovremeno, Nijemac German Hütter razvija novi pristup. Naime, njegov vjetroagregat činile su dvije vitke lopatice načinjene od stakloplastike postavljene niz vjetar. Hütterov vjetroagregat postao je poznat po svojoj efikasnosti (Ackermann, 2005). U tablici 2.1 vidi se prikaz najvažnijih vjetroagregata za generiranje električne energije kroz povijest.

Tablica 2.1: Povijesni razvoj vjetroagregata

Vjetroagregat i država	Promjer [m]	Površina zamaha [m^2]	Snaga	Specifična snaga [kW/m^2]	Broj lopatica	Visina tornja [m]	Godina rada
Poul LaCour, Danska	23	408	18	0.04	4	-	1891
Smith-Putnam, SAD	53	2231	1250	0.56	2	34	1941
F. L. Smidth, Danska	17	237	50	0.21	3	24	1941
F. L. Smidth, Danska	24	456	70	0.15	3	24	1942
Gedser, Danska	24	452	200	0.44	3	25	1957
Hütter, Njemačka	34	908	100	0.11	2	22	1958

Preuzeto iz (Gipe, 1995) i prilagođeno.

Unatoč uspjesima Juulova i Hütterova vjetroagregata, zanimanje za vjetroagregate velikih kapaciteta i dimenzija opada nakon Drugog svjetskog rata te se razvijaju samo oni manjih dimenzija za udaljena područja gdje su bili jedini izvor električne energije.

Kada je došlo do krize na tržištu naftom početkom 1970. godine, zanimanje za proizvodnju električne energije iz energije vjetra ponovno se vraća te se razvija dotad neviđenom brzinom. Mnoge države poput Njemačke, SAD-a, Švedske i drugih osiguravaju sredstva za istraživanje i razvoj vjetroagregata velikih dimenzija i kapaciteta reda veličine MW (Ackermann, 2005).

U tablici 2.2 vide se svojstva vjetroagregata velikih dimenzija i kapaciteta iz čega se može vidjeti da pouzdanost prvih vjetroagregata nije bila visoka. Usporedbom razdoblja u kojem je vjetroagregat bio u upotrebi i generirane količine energije vidi se da većina vjetroagregata glavninu vremena nije bila u funkciji zbog raznih tehničkih problema.

Tablica 2.2: Svojstva prvih vjetroagregata velikih dimenzija i kapaciteta

Vjetroagregat i država	Promjer [m]	Površina zamaha [m^2]	Kapacitet [MW]	Broj radnih sati	Generiranih GWh	Razdoblje rada
Mod-1, SAD	60	2827	2	-	-	1979.-1983.
Growian, Njemačka	100	7854	3	420	-	1981.-1987.
Smith-Putnam, SAD	53	2236	1.25	695	0.2	1941.-1945.
WTS-4, SAD	78	4778	4	7200	16	1982.-1994.
Nibe A, Danska	40	1257	0.63	8414	2	1979.-1993.
WEG LS-1, Velika Britanija	60	2827	3	8441	6	1987.-1992.
Mod-2, SAD	91	6504	2.5	8658	15	1982.-1988.
Näsudden I, Švedska	75	4418	2	11400	13	1983.-1988.
Mod-OA, SAD	38	1141	0.2	13045	1	1977.-1982.
Tjæreborg, Danska	61	2922	2	14175	10	1988.-1993.
Ecole, Kanada	64	4000	3.6	19000	12	1987.-1993.
Mod-5B, SAD	98	7466	3.2	20561	27	1987.-1992.
Maglarp WTS-3, Švedska	78	4778	3	26159	34	1982.-1992.
Nibe B, Danska	40	1257	0.63	29400	8	1980.-1993.
Tvind, Danska	54	2290	2	50000	14	1978.-1993.

Preuzeto iz (Gipe, 1995) i prilagođeno.

Do kraja 1980-ih samo u Kaliforniju uvezeno je oko 15 000 vjetroagregata kapaciteta od gotovo 1500 MW. U 1990-im godinama razvoj je usporio u SAD-u, ali se nastavio u Europi i Indiji. U Europi se razvoj temeljio na smanjenju poreza na obnovljive izvore energije dok se u Indiji razvoj temeljio na smanjenju poreza na iskorištavanje energije vjetra. Kroz te mjere došlo je do brzog porasta broja vjetroagregata. Kako se povećavalo tržište, tako se i tehnologija razvijala.

2.3 Status vjetroagregata danas

Između 1995. i 2003. godine 76% od ukupnog broja vjetroagregata priključenih na mrežu postavljeno je u Europi (Ackermann, 2005). U tablici 2.3 prikazano je kako se u kojoj regiji povećavao broj postavljenih vjetroagregata te je iz toga vidljivo i da je Europa daleko prednjačila u tome razvoju. U tablici 2.4 prikazane su europske zemlje koje su postavile najviše vjetroagregata te se vidi kako u tome prednjače Njemačka, Danska i Španjolska. U navedenim državama glavni pokretač razvoja je vlada koja je postavila fiksne cijene za energiju dobivenu iskorištavanjem vjetra. Time je smanjen rizik investitorima u energiju vjetra za narednih 10 do 15 godina (Ackermann, 2005). Sve više europskih država polazi tim putem kako bi potaknuli investiranje u vjetroelektrane.

Tablica 2.3: Kapacitet vjetroelektrana u svijetu

Regija	**Kapacitet [MW] na kraju godine**							
	1995.	**1997.**	**1999.**	**2000.**	**2001.**	**2002.**	**2003.**	**2017.**
Europa	2518	4766	9307	12972	17500	21319	28706	178096
Sjeverna Amerika	1676	1611	2619	2695	4245	4708	6677	105321
Srednja i Južna Amerika	11	38	87	103	135	137	139	17891
Azija i Oceanija	626	1149	1403	1795	2330	2606	3034	228542
Bliski istok i Afrika	13	24	39	141	147	149	150	4538

Preuzeto iz (Wind Power Monthly) i prilagođeno.

Tablica 2.4: Kapacitet vjetroelektrana u Europi

Država	**Kapacitet [MW] na kraju godine**		
	1995.	**2003.**	**2017.**
Njemačka	1136	14609	56.132
Danska	619	3110	5.476
Španjolska	145	6202	23.170
Nizozemska	236	912	4.341
Ujedinjeno Kraljevstvo	200	649	18.872
Švedska	67	399	6.691
Italija	25	904	9.479
Portugal	13	299	5.316
Austrija	3	415	2.828

Preuzeto iz (Wind Power Monthly) i prilagođeno.

Nakon ubrzanog razvoja vjetroelektrana tijekom 80-ih godina 20-og stoljeća u Sjevernoj Americi, razvoj je naglo opao fokusom na naftu i ugljen. No, 1998. godine ponovno počinje ubrzani razvoj. Naime, zakon o smanjenim i fiksnim porezima (PTC, engl. *Production Tax Credit*) na proizvodnju električne energije jamčio je fiksnu cijenu za energiju dobivenu iz energije vjetra. Prema tome porezu na proizvodnju električne energije zajamčena cijena je bila fiksirana na 10 godina (Ackermann, 2005). U periodu između sredine 1998. i sredine 1999. godine postavljeno je novih 800 MW kapaciteta vjetroelektrana u Sjedinjenim Američkim Državama. Sličan razvoj dogodio se i u periodu druge polovice 2001. godine kao i na kraju 2003. kada se kapacitet povećao za dodatnih 1600 MW.

U tablici 2.5 vidi se razvoj vjetroelektrana na području Sjeverne Amerike u periodu između 1995. i 2003. godine. Osim Kalifornije i Teksasa, novi projekti krenuli su se razvijati i u drugim američkim saveznim državama poput Iowe, Minnesote, Oregona i dr. (Ackermann, 2005).

Tablica 2.5: Kapacitet vjetroelektrana u Sjevernoj Americi

Država	**Kapacitet [MW] na kraju godine**		
	1995.	**2003.**	**2017.**
SAD	1655	6350	89077
Kanada	21	327	12239

Preuzeto iz (Wind Power Monthly) i prilagođeno.

U Južnoj Americi proizvodnja električne energije iz energije vjetra prilično se sporo razvijala. Iako imaju puno potencijala za proizvodnju, ne postoje dobro uređeni zakoni koji bi poticali razvoj vjetroelektrana. Također, cijena električne energije je niska. Brojni projekti diljem Južne Amerike financirani su od stranih investitora i programa. Argentina je pokušala 1998. godine financijski poduprijeti razvoj vjetroelektrana, ali nije postigla značajniji uspjeh (Ackermann, 2005). U tablici 2.6 vidi se kapacitet vjetroelektrana u Srednjoj i Južnoj Americi po državama.

Tablica 2.6: Kapacitet vjetroelektrana u Srednjoj i Južnoj Americi

Država	**Kapacitet [MW]**	
	2003.	**2017.**
Kostarika	71	378
Argentina	26	228
Brazil	22	12.763
Karibi	13	218
Meksiko	5	4.005
Čile	2	1.540

Preuzeto iz (Wind Power Monthly) i prilagođeno.

U Aziji je najznačajniji rast kapaciteta vjetroelektrana zabilježen u Indiji u periodu između 1993. i 1997. godine. Indijska vlada je nudila posebne poticaje za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora energije (Ackermann, 2005). U Kini je razvoj išao putem stranih ulaganja iako je postojao vladin program koji promovira energiju vjetra. U Japanu se razvoj vjetroelektrana temeljio na testiranju raznih vjetroagregata, ali je u konstantnom rastu. Krajem 1990-ih postavljeni su prvi komercijalni vjetroagregati (Ackermann, 2005). Također, u Australiji i na Novom Zelandu krajem 1990-ih vjetroelektrane se razvijaju kroz program održivog razvoja. U tablici 2.7 prikazan je kapacitet vjetroelektrana na području Azije i Oceanije.

Tablica 2.7: Kapacitet vjetroelektrana u Aziji i Oceaniji

Država	**Kapacitet [MW]**	
	2003.	**2017.**
Indija	1900	32.848
Kina	468	188.232
Japan	401	3.400
Australija	196	4.557
Novi Zeland	50	623
Južna Koreja	8	1.136
Tajvan	8	692

Preuzeto iz (Wind Power Monthly) i prilagođeno.

Proizvodnja električne energije iz energije vjetra na području Afrike razvija se prilično sporo. Postoje različiti problemi koji koče razvoj. Gotovo svi projekti zahtijevaju potporu vanjskih ulagača, a i postoji samo djelomična potpora regionalnih vlasti. Trenutno postoje u Egiptu i Maroku projekti kojima se planira povećanje kapaciteta vjetroelektrana. U tablici 2.8 vide se kapaciteti u Africi i na Bliskom Istoku.

Tablica 2.8: Kapaciteti vjetroelektrana u Africi i na Bliskom Istoku

Država ili regija	**Kapacitet [MW]**	
	2003.	**2017.**
Egipat	69	810
Maroko	54	787
Jordan	2	119
JAR	-	2.094
Ostatak Afrike	3	159

Preuzeto iz (Wind Power Monthly) i prilagođeno.

3. POUZDANOST

Planiranje elektroenergetskog sustava (EES) obično se izvodi prema prethodno dogovorenim načelima. Jedno od načela koja se traže jest i to da sustav izdrži svaki pojedini kvar bez većih utjecaja na isporuku električne energije. Ograničenja za prijenos električne energije postavljena su prema proizvodnim standardima te prema opterećenjima koja su dobivena pomoću softvera za analizu elektroenergetskog sustava, gdje su svi dijelovi povezani kako bi simulirali realna opterećenja i razinu proizvodnje električne energije.

Pouzdanost elektroenergetskog sustava održava se na visokoj razini tako što se planira održavanje, ali i rad sustava na način na koji će se minimalizirati vjerojatnost kvara ili stanja koje može dovesti do kvara (Billinton i Allan, 1988).

3.1 Definicije

Kako bi se moglo govoriti o pouzdanosti potrebno je definirati parametre koji opisuju pouzdanost, koji se često spominju u kontekstu pouzdanosti te koji utječu na pouzdanost. Tu se podrazumijevaju kvarovi, analize kvarova, popravci, vrijeme trajanja popravaka, vrijeme između kvarova itd.

Pouzdanost (eng. *Reliability*) – može se definirati kao vjerojatnost da će proizvod vršiti predviđenu funkciju pod određenim uvjetima određeni vremenski period (Hill, et al., 2008). Iz definicije je vidljivo da su u pouzdanost uključena četiri faktora. To su vjerojatnost, namjena, radni uvjeti i vrijeme rada. Općeprihvaćeni radni vijek vjetroagregata iznosi 20 godina. Što bi značilo da se, kada se govori o pouzdanosti vjetroagregata, misli na postotak vremena koje će vjetroagregat raditi punim kapacitetom za vrijeme odgovarajućeg vjetra na odgovarajućoj lokaciji tijekom 20 godina (Hill, et al., 2008).

Kvar (eng. *Failure*) **–** nemogućnost podsustava da vrši zadanu funkciju u određenim uvjetima te se nalazi u pokvarenom stanju, za razliku od operativnog ili radnog stanja (Spinato, et al., 2009).

Analiza vrsta i učinaka zastoja (eng. *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA)) **–** koristi se pri određivanju dijelova koji su pokvareni, otkrivanje uzroka njihovih kvarova te djelovanja na cjelokupni sustav (Barbati, 2009).

Popravak (eng. *Repair*) **–** dodavanje novog dijela, zamjena dijela, uklanjanje oštećenih ili pokvarenih dijelova, promjene ili prilagođavanja u postavkama, ažuriranje softvera, podmazivanje ili čišćenje (Spinato, et al., 2009).

Nepopravljivi sustav (eng. *Non-repairable system*) **–** sustav koji se odbacuje nakon kvara. Primjer nepopravljivog sustava su baterije ili žarulje (Spinato, et al., 2009).

Popravljivi sustav (eng. *Repairable system*) – sustav koji, kada se pojavi pogreška, može biti vraćen u funkciju nakon poduzimanja određenih postupaka popravka umjesto da se mora zamijeniti cijeli sustav. Primjer popravljivog sustava je električni generator (Spinato, et al., 2009).

Srednje vrijeme između kvarova (eng. *Mean Time Between Failure* (MTBF)) **–** pojam koji označava srednje vrijeme između kvarova prikazan u satima. Može se izračunati dijeljenjem broja radnih sati s brojem kvarova (Barbati, 2009).

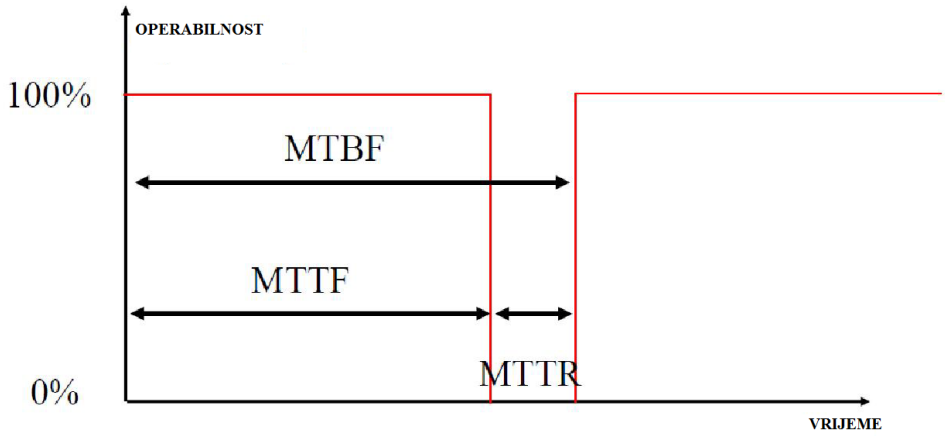
Srednje vrijeme do kvara (eng. *Mean Time To Failure* (MTTF)) – pojam sličan MTBF-u te se koristi pri procjeni nepopravljivih sustava. MTBF pretpostavlja da će doći do više kvarova u životnom ciklusu nakon kojih slijedi popravak, dok kod nepopravljivih sustava nema popravka. MTTF predstavlja vrijeme koje će proći prije nego dođe do kvara (Barbati, 2009).

Srednje vrijeme popravka (eng. *Mean Time To Repair* (MTTR)) – očekivana srednja vrijednost vremena potrebnog za popravak pojedinog dijela (Barbati, 2009).

Odnos između MTBF, MTTF i MTTR vidi se na slici 3.1.

Osim navedenih definicija bitno je spomenuti još neke funkcije koje su ključne u određivanju pouzdanosti, a to su:

- f(t) funkcija vjerojatnosti razdiobe (pdf)
- F(t) kumulativna funkcija razdiobe (cdf)
- U(t) nedostupnost u vremenu t
- $\lambda(t)$ funkcija stope kvara



Slika 3.1: Odnos između MTBF, MTTF, MTTR. Preuzeto iz (Travner, 2009) i prilagođeno.

Dostupnost (eng. *Availability*) – parametar koji najbolje govori o pouzdanosti vjetragregata. Često se definira kao postotak i iznos vremena za koje je vjetroagregat dostupan za upotrebu u odnosu na ukupno vrijeme rada (Hill, et al., 2008).

Ručni reset (eng. *Manual reset*) – kvar koji zahtijeva djelovanje radnika na turbinu kako bi resetirali upravljački sustav kada se pojavi pogreška dojavljena alarmnim sustavom (Wilkinson i Hendriks, 2011).

Manji popravak (eng. *Minor repair*)**:** popravak prouzrokovan manjim greškama, obično se odnosi na senzore ili instrumente. Može biti potrebna zamjena manjih dijelova kako bi se izolirala pogreška (Wilkinson i Hendriks, 2011).

Veći popravak (eng. *Major repair*) – kvar koji zahtijeva opsežan rad, obično na nekom od velikih mehaničkih dijelova vjetroagregata (Wilkinson i Hendriks, 2011).

3.2 Prikupljanje podataka

Kako bi se mogao napraviti dobar model, simulacija ili analiza, potrebno je prikupiti kvalitetne i relevantne podatke. Dvije su glavne metode kojima se prikupljaju podaci – eksperimentalno testiranje i prikupljanje stvarnih podataka. Obje metode zahtijevaju novac i vrijeme. Međutim, prikupljanje podataka neophodno je kako bi se napravila analiza pouzdanosti koja je dugoročno gledano od velike važnosti i isplativosti. Često kompanije koje prikupljaju podatke, znajući njihovu vrijednost, ne žele dijeliti informacije (Billinton, et al., 1992). Taj problem prepoznala je međunarodna agencija za energiju (eng. *International Energy Agency* (IEA)) kojoj je cilj bio uspostaviti zajedničku bazu podataka za sve vjetroelektrane s ciljem povećanja pouzdanosti.

3.2.1 ALT

ALT (eng. *Accelerated Life Test*) metoda je za prikupljanje podataka kroz eksperimente i testiranja. Koristi se kada nije dostupan pristup povijesti pogonskih događaja. Za dugačak životni ciklus, kakav imaju vjetroagregati, ovaj proces vrlo je koristan. Pokušava se odrediti pouzdanost sustava bez prolaska kroz cijeli životni ciklus istog tako što se implementiraju dodatna opterećenja na sustav. Dobiveni rezultati koriste se za procjenu životnog vijeka sustava u normalnim uvjetima (EPSMA, 2005).

3.2.2 RLDA

RLDA (eng. *Reliability Life Data Analysis*) metoda je kojom se prikupljaju podaci o kvarovima pojedinih komponenata te se podaci unose u razdiobu vjerojatnosti kojom se predviđa životni vijek svih komponenata u sustavu (Nelson, 1982). Pojam *Life Data* koristi se kada je životni vijek proizvoda mjerljiv te se može izraziti u mjernim jedinicama. Također, koristi se za analizu važnih karakteristika poput pouzdanosti, dostupnosti, vjerojatnosti pogrešaka i sl. Podaci se mogu prikupljati koristeći SCADA (eng. *Supervisory Control And Data Acquisition*) sustav ili od strane pružatelja usluga tijekom životnog ciklusa vjetroagregata. Budući da je životni vijek vjetroagregata dugačak, postoji mogućnost da se implementiraju novi dizajni vjetroagregata prije nego li se prikupe svi podaci o starima (Einarsson, 2016).

3.3 Razdioba vjerojatnosti

Postoje brojne razdiobe vjerojatnosti koje se koriste u proračunavanju pouzdanosti. Neke od njih su tzv. Weibullova razdioba, eksponencijalna razdioba, log normalna razdioba, normalna razdioba i dr.

3.3.1 Weibullova razdioba

Weibullova razdioba dobila je ime po Waloddiu Weibullu koji ju je razvio 1951. godine. Ono što je čini popularnom za korištenje pri izradi statističkih analiza jest njezina prilagodba. Razdioba može imati rastuću, padajuću ili konstantnu stopu kvara. Sadrži tri parametra: oblik, razmjer i lokaciju. U razdiobi se najčešće koriste samo oblik i razmjer. Parametar lokacije mijenja početnu točku razdiobe pomičući je po x-osi. Koristi se jedino kada ne postoji mogućnost kvara ili kada je moguće oštećenje prilikom transporta, a tada parametar poprima negativne vrijednosti (Billinton, et al., 1992).

Parametri i granice za Weibullovu razdiobu:

- Beta (β) je parametar oblika ili nagib (β>0)
    - β<1 predstavlja padajuću stopu kvara
    - β=1 predstavlja konstantnu stopu kvara
    - β>1 predstavlja rastuću stopu kvara
- Eta (η) je parametar mjere, a naziva se i parametar životnog vijeka (η>0)
- Gama (γ) je parametar lokacije (-∞<γ<+∞)
- t je varijabla koja predstavlja vrijeme

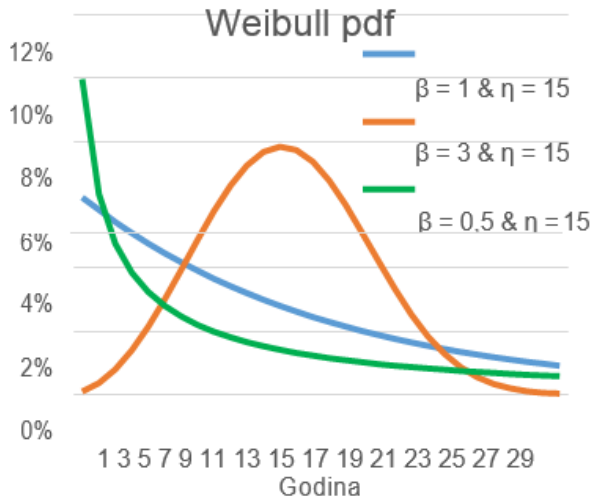
Weibullova razdioba s tri parametra dana je izrazom:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta}\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}} \tag{3.1}$$

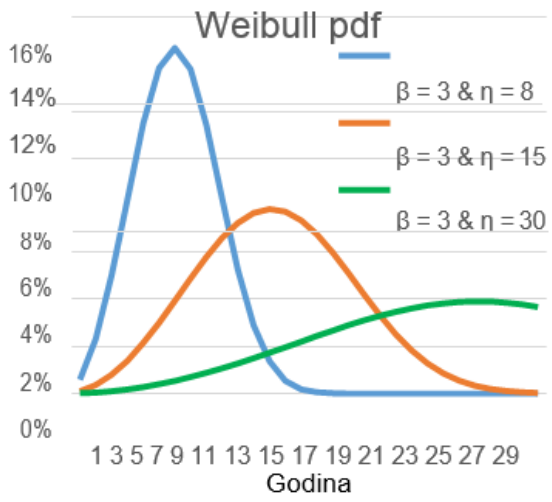
Češće korištena funkcija s dva parametra dana je izrazom:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta}\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}} \tag{3.2}$$

Na slici 3.2 vidi se kako promjena oblika (β) utječe na Weibullovu razdiobu, dok se na slici 3.3 vidi kako različit parametar mjere (η) utječe na Weibullovu razdiobu.



Slika 3.2: Weibullova razdioba u odnosu na β parametar. Preuzeto iz (Einarsson, 2016).



Slika 3.3: Weibullova razdioba u odnosu na η parametar. Preuzeto iz (Einarsson, 2016).

Kada je parametar oblika β poznat iz prijašnjih stanja, može se postaviti kao konstanta te se Weibullova razdioba može koristiti sa samo jednim nepoznatim parametrom, a to je parametar mjere η. U tom slučaju radi se o Weibullovoj razdiobi s jednim parametrom. Takva razdioba može se koristiti u slučajevima kada postoji malo ili niti jedan kvar za analizu iako su podaci dostupni iz sličnih ili jednakih iskustava (Haque, et al., 2008).

3.3.2 Eksponencijalna razdioba

Eksponencijalna razdioba koristi se u slučajevima koji uključuju konstantnu stopu kvara. Ona je poseban slučaj Weibullove razdiobe te ima dva parametra, ali se u većini slučajeva koristi samo jednim parametrom. Razdioba ima samo jedan oblik, samim time nema parametra oblika (Billinton, et al., 1992).

Parametri i granice za eksponencijalnu razdiobu:

- Lambda (λ) je parametar mjere, a jos se naziva i parametar životnog vijeka ($\eta>0$)
- Gama (γ) je parametar lokacije ($-\infty<\gamma<+\infty$)
- t je varijabla koja predstavlja vrijeme ($t\geq0$)

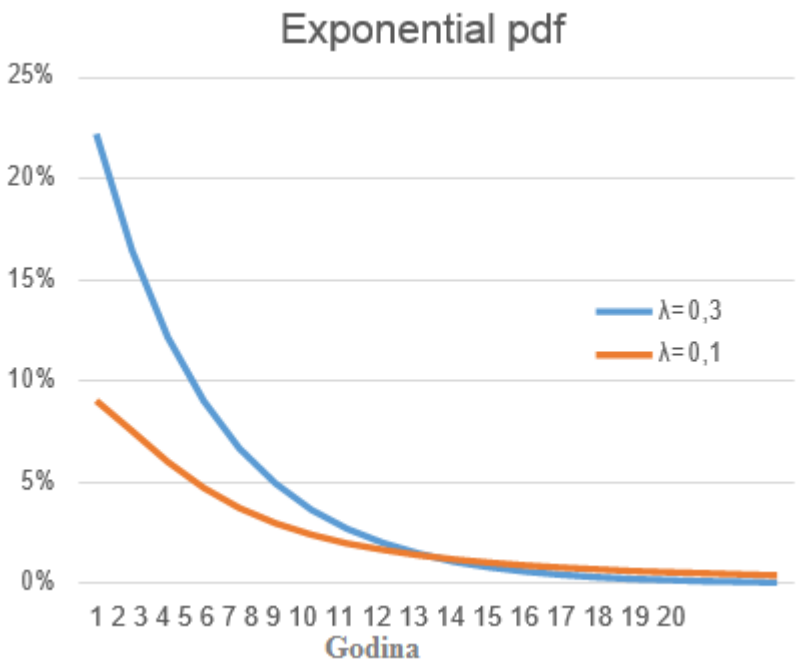
Eksponencijalna razdioba s dva parametra dana je izrazom:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda(t-\gamma)} \tag{3.3}$$

Dok je s jednim parametrom dana izrazom:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \tag{3.4}$$

Slika 3.4 pokazuje kako promjena mjere (λ) utječe na eksponencijalnu razdiobu.



Slika 3.4: Eksponencijalna razdioba s obzirom na λ. Preuzeto iz (Einarsson, 2016).

3.3.3 Log normalna razdioba

Log normalna razdioba koristi se za analizu kvarova uzrokovanih dugotrajnim opterećenjima, kao što je to slučaj u mehaničkim sustavima. U nekim slučajevima, log normalna razdioba koristi se zajedno s Weibullovom razdiobom. Stopa kvara se kod log normalne razdiobe povećava, a zatim pada (Rausand, et al., 2004).

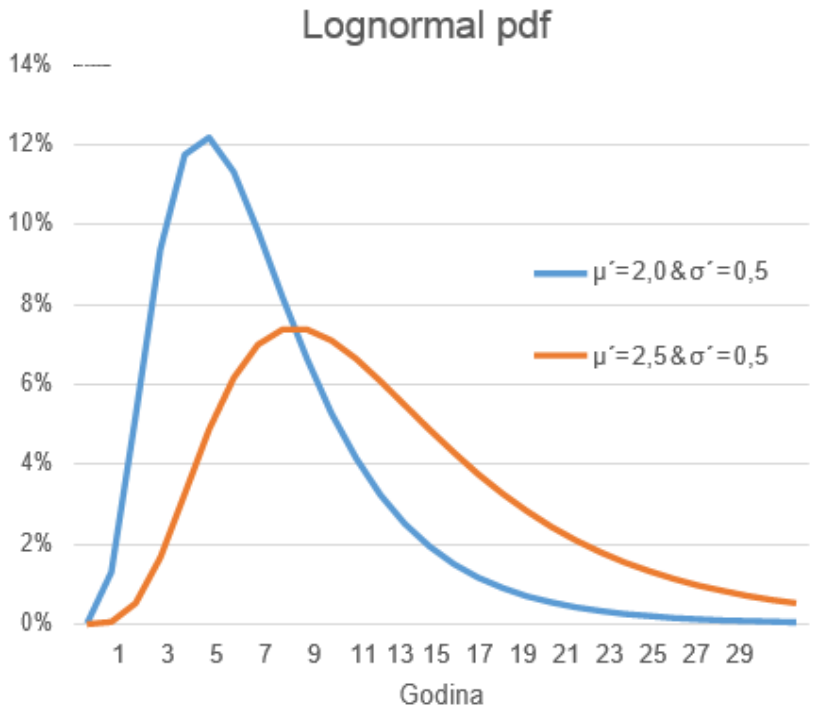
Parametri i granice log normalne razdiobe:

- μ' = prirodni logaritam srednjeg broja kvarova
- σ' = prirodni logaritam standardne devijacije srednjeg broj kvarova
- t'=ln(t)·t, gdje *t* predstavlja varijablu vremena

Log normalna razdioba dana je izrazom:

$$f(t') = \frac{1}{\sigma'\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t'-\mu'}{\sigma}\right)^2} \tag{3.5}$$

Slika 3.5 prikazuje kako se mijenja log normalna razdioba s obzirom na promjene srednjeg broja kvarova.



Slika 3.5: Log normalna razdioba s obzirom na μ'. Preuzeto iz (Einarsson, 2016).

3.3.4 Normalna razdioba

Normalnu razdiobu razvio je francuski matematičar Abraham de Moivre 1733. godine (Ross, 2009). Normalna razdioba jedna je od najpoznatijih razdioba. Granice su joj od minus beskonačno do plus beskonačno te je simetrična. Razdioba ima oblik zvona te su joj srednja vrijednost i medijan na sredini jednakih iznosa. Nema parametar oblika, što znači da je oblik uvijek jednak (Ross,2009).

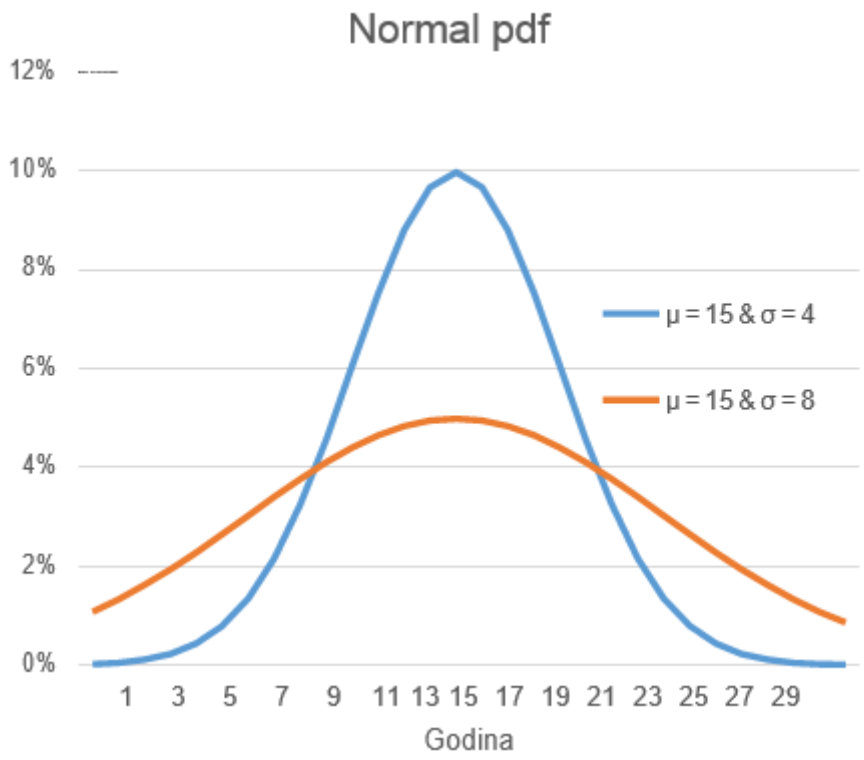
Parametri i granice normalne razdiobe:

- Mi (μ) predstavlja srednju vrijednost ili parametar lokacije (μ ∈ R)
- Sigma (σ) se koristi za standardnu devijaciju parametra mjere (σ>0)
- t je varijabla koja predstavlja vrijeme

Normalna razdioba dana je izrazom:

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-(t-\mu)^2/2\sigma^2} \tag{3.6}$$

Na slici 3.6 prikazano je kako standardna devijacija (σ) utječe na krivulju normalne razdiobe.



Slika 3.6: Normalna razdioba s obzirom na σ. Preuzeto iz (Einarsson, 2016).

Postoje brojne druge razdiobe koje se mogu koristiti prilikom unošenja podataka iz pogonskih događaja. Neke od njih mogu biti i pogodnije od prethodno navedenih razdioba, primjerice Gamma razdioba, ali koristeći rjeđe i kompliciranije razdiobe dobivaju se rezultati koje je teško uspoređivati, a samim time i prikazati.

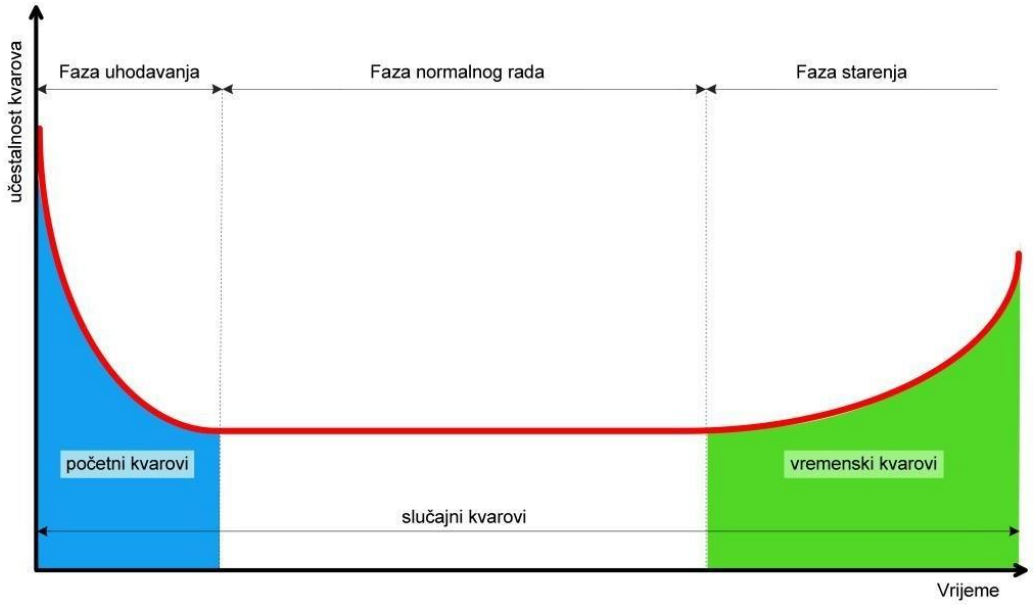
3.4 Metode i alati za određivanje pouzdanosti

3.4.1 Krivulja životnog vijeka

Krivulja životnog vijeka koristan je alat za određivanje pouzdanosti. Ona opisuje vjerojatnost kvara dijeleći životni vijek u tri faze.

- Prva faza podrazumijeva *fazu uhodavanja*, u kojoj se stopa kvarova smanjuje te su kvarovi uzrokovani greškama u komponentama ili nepravilnim korištenjem.
- Druga faza naziva se *faza normalnog rada* i to je najduža faza u životnom ciklusu te je u tom razdoblju stopa kvarova niska i konstantna.
- Završna faza je *faza starenja* i u njoj se stopa kvarova povećava zbog trošenja komponenata.

Na slici 3.7 vidi se kako krivulja ima oblik kade (eng. *Bathtub curve*) te se vidi kako se mijenja stopa kvarova po pojedinoj fazi rada (Slack, et al.,2010).



Slika 3.7: Krivulja životnog vijeka. Preuzeto iz (Protić, 2013).

3.4.2 Kvalitativna i kvantitativna procjena

Procjena pouzdanosti može se podijeliti na kvalitativnu i kvantitativnu procjenu. Kvalitativna procjena subjektivnija je te koristi različite kriterije u kojima je potrebno subjektivno mišljenje poput mišljenja o dizajnu ili projektiranju. Kvalitativna procjena nije znanstveno precizna te je mnogi vide kao metodu iz prošlosti (Billinton, et al., 1992). Za razliku od

kvalitativne, kvantitativna procjena temelji se na prikupljanju numeričkih podataka o kvarovima ili zastojima sustava. Glavni cilj kvantitativne procjene jest procijeniti buduće rezultate na temelju rezultata iz prošlosti.

3.4.3 Procjena pouzdanosti korištenjem simulacije ili analitičkoga pristupa

Pri procjeni pouzdanosti sustava postoji nekoliko stvari koje treba uzeti u obzir. Prvo i osnovno što je potrebno jest razumijevanje rada sustava i njegovih komponenti. Inženjerska znanja i razumijevanje sustava određuju koliko uspješno će se primijeniti teorija vjerojatnosti kao alat za određivanje budućih pogonskih događaja (Billinton, et al., 1992). Glavni koraci pri procjeni pouzdanosti sustava su:

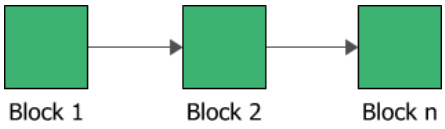
- Visoko razumijevanje sustava
- Identificiranje mogućih kvarova sustava
- Procjena utjecaja kvarova na sustav
- Izgradnja prikladnog modela
- Odabir metode za procjenu

Analitički pristup formira matematički model za procjenu pouzdanosti sustava, dostupnosti sustava ili drugog željenog parametra. Primjenom analitičkog pristupa za dobivanje željenog ishoda prikazuju se uvijek isti rezultati. Glavna je prednost analitičkog pristupa kraće vrijeme obrade podataka te jednostavnost u odnosu na simulacijsku. Također, analitički pristup ograničen je na više jednostavnih modela (Billinton, et al., 1992).

Simulacija, za razliku od analitičkog pristupa, obuhvaća raznovrsne životne situacije korištenjem nasumičnosti pri razdiobi vjerojatnosti s obzirom na prikupljene podatke. Izvođenje simulacije uključuje provođenje slučajne varijable kroz razdiobu vjerojatnosti, što podrazumijeva dobivanje raznovrsnih rezultata. Simulacija se radi više puta kako bi se došlo do očekivanih vrijednosti. Dakle, simulacijska metoda zahtijeva više vremena te veću procesorsku moć od analitičkog pristupa. Glavna prednost simulacije jest realistični pristup životnim problemima, kao i širok spektar mogućih rezultata i ishoda (ReliaSoft, 2018).

3.4.4 Blok dijagram pouzdanosti (RBD)

Blok dijagram pouzdanosti (eng. *Reliability Block Diagram* (RBD)) vizualni je alat koji se koristi za povezivanje blokova u seriju ili paralelu. Kaže se da je RBD sustav funkcionalan ako je moguće pratiti put od prvog bloka s lijeve strane do zadnjeg bloka s desne strana bez prolaska kroz pokvarene blokove. RBD koristi se za proračune i analizu parametara pouzdanosti kompleksnih sustava. Proračuni se temelje na poznatim ili pretpostavljenim podacima o pouzdanosti, koji su u većini slučajeva dobiveni iz ALT-a ili iz pogonskih događaja pojedinih komponenata ili podsustava. RBD može biti korišten prije nego li je sustav napravljen kako bi se proračunala pouzdanost i dostupnost sustava. Slika 3.8 prikazuje primjer RBD sustava.



Slika 3.8: RBD serijskog spoja. Preuzeto iz (Einarsson, 2016).

Serijski sustavi ne sadrže redundanciju, što znači da ako se jedan dio sustava pokvari, cijeli se sustav kvari. U većini slučajeva RBD vjetroagregata na razini podsustava jest serijski. To je tako prvenstveno zbog cijene redundancije. Da bi se postigla, potrebno je imati zamjenske komponente koje mogu biti skupe, a neće se koristiti dok se sustav ne pokvari. Pouzdanost serijskog sustava dana je izrazom (Slack, et al., 2010):

$$R_s = R_1 \times R_2 \times \ldots \times R_n \tag{3.7}$$

$$R_s = \prod_{i=1}^{n} R_i$$

gdje je:

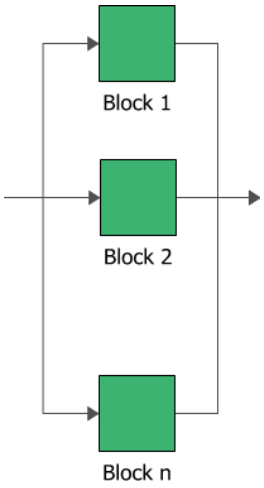
R_s= pouzdanost sustava

R_i= pouzdanost komponente i, $i \in \{i, \ldots, n\}$

Hoće li se redundancija naći u sustavima vjetroagregata ovisi u modelu (Liu, et al., 2015).

Paralelni blok dijagrami koriste se za sustave s redundancijom. To su sustavi u kojima su blokovi spojeni u paralelu te je kvar cijelog sustava moguća samo ako se svi dijelovi pokvare.

Slika 3.9 pokazuje RBD paralelnog spoja.



Slika 3.9: RBD paralelnog spoja. Preuzeto iz (Einarsson, 2010).

U paralelnim sustavima samo jedna komponenta mora raditi kako bi cijeli sustav radio. Pouzdanost paralelnog sustava dana je izrazom (Rausand, et al., 2004):

$$R_p = 1 - (1 - R_1) \times (1 - R_2) \times \ldots \times (1 - R_n) \tag{3.8}$$

$$R_p = 1 - \prod_{i=1}^{n} (1 - R_i)$$

$$R_p = \coprod_{i=1}^{n} R_i$$

gdje je:

R_p = pouzdanost sustava

R_i= pouzdanost komponente i, $i \in \{i, \ldots, n\}$

Iako paralelni sustavi imaju veću pouzdanost od serijskih sustava, treba uzeti u obzir činjenicu da kvar jedne komponente sustava povećava opterećenje na ostale komponente paralelnog sustava.

3.4.5 Analiza vrsta i učinaka zastoja (FMEA)

Analiza vrsta i učinaka zastoja analitička je tehnika implementirana za otkrivanje potencijalnih vrsta kvarova koji se mogu pojaviti u sustavima te za procjenu rizika svakog kvara (Rausand, et al., 2004).

Prednosti FMEA su:

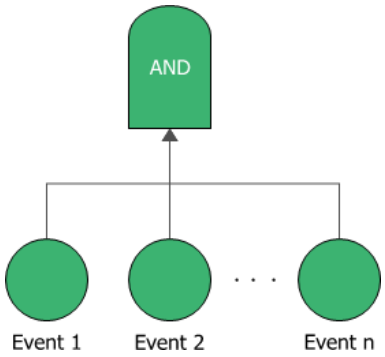
- Određivanje pouzdanosti i sigurnosti kritičnih komponenata
- Određivanje uzroka kvara i razvijanje aktivnosti za popravak
- Lakši odabir odgovarajućeg dizajna projekta u svim fazama

Osnovni koraci za izvedbu FMEA su:

1. Odrediti komponente i njihove funkcije
2. Odrediti kvarove
3. Procijeniti vjerojatnost otkrivanja kvara unaprijed
4. Odrediti uzrok kvara i djelovanje kvara
5. Isplanirati aktivnosti za popravak
6. Predložiti rješenje

3.4.6 Analiza pomoću stabla grešaka (FTA)

Analiza pomoću stabla grešaka (eng. *Fault Tree Analysis* (FTA)) analizira na koji način je sustav zakazao te određuje način za smanjivanje rizika (Rausand, et al., 2004). FTA može se prikazati pomoću blok dijagrama (FTD). FTD poredan je od gore prema dolje po događajima te omogućuje određivanje događaja koji su mogli uzrokovati kvar. Osnovna razlika između FTD i RBD jest ta što se FTD fokusira na kvarove, dok se RBD fokusira na dijelove sustava koji funkcioniraju. Na slici 3.10 prikazan je primjer FTD-a u kojem se događaji 1 i 2 moraju dogoditi da bi došlo do kvara. Ekvivalentni blok dijagram RBD-a je paralelni RBD prikazan na slici 3.9.



Slika 3.10: Dijagram analize pomoću stabla grešaka. Preuzeto iz (Einarsson, 2010).

3.4.7 Analiza pomoću stabla događaja (ETA)

Analiza pomoću stabla događaja (eng. *Event Tree Analysis* (ETA)) alat je koji se koristi za prikazivanje svih mogućih ishoda slučajnih događaja. Izlistavanjem i izučavanjem svih mogućih slučajnih događaja ETA se može koristiti za identificiranje svih potencijalnih scenarija slučajnih događaja u kompleksnom sustavu. Na taj način može se odrediti potencijalna slabost i rizik sustava (Rausand, et al., 2004). Slika 3.11 prikazuje primjer stabla događaja gdje se vidi da svaki događaj ima vjerojatnost pojavljivanja određenog ishoda. Stablo događaja može se koristiti u paralelnim sustavima za analizu kvarova te se iz nje može vidjeti utječu li kvarovi na sustav ili njegove dijelove.

Početni događaj	**Slijedni događaj**		**Vjerojatnost**	**Ishod**
	Događaj 1	**Događaj 2**		
Početni događaj (P=0.1)	Uspjeh (P=0.9)	Uspjeh (P=0.8)	0.72	Nema štete
		Kvar (P=0.2)	0.18	Mala šteta
	Kvar (P=0.1)	Uspjeh (P=0.7)	0.07	Velika šteta
		Kvar (P=0.3)	0.03	Greška sustava

Slika 3.11: Analiza pomoću stabla događaja (ETA).

3.4.8 Analiza osjetljivosti

Analiza osjetljivosti koristi se za određivanje kako mijenjanje jednog ili više faktora utječe na sustav, primjerice kako zamjena ključnog dijela utječe na pouzdanost sustava ili kako cijena zamjenskog dijela i vrijeme dostave utječe na ključne parametre pouzdanosti. Na rezultate se može utjecati mijenjanjem ulaznih parametara, primjerice snižavanjem pouzdanosti ključne komponente i računanjem kako to utječe na sustav (Einarsson, 2010).

3.4.9 Procjena pomoću tri točke

Procjena pomoću tri točke korisna je metoda određivanja procjene različitih parametara kada su dana tri referentna podatka. Primjerice, za određivanje cijene proizvoda gdje se koriste tri vrijednosti cijene te se proračunava težinski prosjek.
Parametri koji se koriste za procjenu pomoću tri točke su:

$$Optimistična\ vrijednost = a$$
$$Najvjerojatnija\ vrijednost = m$$
$$Pesimistična\ vrijednost = b$$
$$Težina = w$$

Težinski prosjek dan je izrazom:

$$Težinski\ prosjek = (a + w * m + b)/(w + 2) \tag{3.9}$$

Standardna devijacija (StDev) je izrazom:

$$StDev = (b - a)(w + 2) \tag{3.10}$$

Varijanca dana je izrazom:

$$Varijanca = StDev^2 \tag{3.11}$$

3.4.10 Strategija održavanja

Jedan od najvažnijih faktora za pouzdanost jest strategija održavanja. Može se podijeliti u dvije skupine – preventivno održavanje i korektivno održavanje.

Korektivno održavanje (eng. *Corrective Maintenance* (CM)) održavanje je koje se izvodi nakon što nastupi zastoj. Dakle, sustav radi dok se ne pokvari, a zatim je potreban popravak nakon kojeg se sustav ponovno vraća u funkciju (Slack, et al., 2010).

Preventivno održavanje (eng. *Preventive Maintenance* (PM)) održavanje je prema rasporedu koje se izvršava kako ne bi došlo do kvara. Često se izvodi u unaprijed određenim intervalima prema rasporedu utvrđenom u skladu s indikatorima koji pokazuju potrebu za održavanjem. Preventivno održavanje trebalo bi se vršiti samo u slučajevima kada je isplativije nego korektivno održavanje te kada sustav pokazuje rastuću stopu kvarova. Također, preventivno održavanje je pogodna opcija za izbjegavanje velikih kvarova ili osiguravanje visoke pouzdanosti, sigurnosti ili dostupnosti. Preventivno održavanje dijeli se u tri skupine: kružno održavanje, održavanje s obzirom na stanje, održavanje s obzirom na pouzdanost.

Kružno održavanje slijedi prethodno definirane rokove. Često se odrađuje u određenim intervalima ili nakon određenog broja korištenja.

Održavanje s obzirom na stanje temelji se na praćenju proizvoda te održavanju samo kada je to potrebno. SCADA sustav nadzora popularan je u modernim vjetroelektranama te se može koristiti za praćenje vibracija, temperature ili drugih faktora koji mogu ukazivati na potrebu za održavanjem (Slack, et al., 2010).

Održavanje s obzirom na pouzdanost (eng. *Reliability Centered Maintenance* (RCM)) razvijeno je kako bi se minimizirao trošak i maksimizirala isplativost primjenom najisplativije strategije održavanja (Rausand, et al., 2004). Navedena metoda koristi alate i statističke podatke kako bi se eliminiralo korektivno održavanje te minimiziralo preventivno održavanje, a zadržala pouzdanost. Time bi se održavala pouzdanost uz najmanju moguću cijenu (NASA, 1998). ključna pitanja vezana za RCM sastavljena su u sljedećih sedam pitanja (Mourbray, 1997):

1. Koje su funkcije sustava i kakvi su standardi izvedbe?
2. Na koji način sustav može prestati funkcionirati?
3. Što uzrokuje pojedini kvar?
4. Što se dogodi kada se pojavi pojedini kvar?
5. Na koji način je pojedini kvar važan?
6. Što je potrebno učiniti kako bi se predvidio ili spriječio pojedini kvar?
7. Što treba učiniti ukoliko se ne može odrediti odgovarajući preventivni postupak?

Svaka strategija održavanja koristi se ovisno o uvjetima o kojima se radi. U većini slučajeva, koristi se mješavina različitih strategija održavanja. Cijena, pouzdanost, sigurnost i dostupnost glavni su faktori koji utječu na odabir odgovarajuće strategije.

3.5 Pouzdanost u kritičnoj fazi rada

Kada se govori o pouzdanosti vjetroagregata u kritičnoj fazi rada, potrebno je definirati kritičnu fazu rada. Pod kritičnom fazom rada podrazumijeva se period u kojem je srednji iznos brzine vjetra iznad 25 *m/s*. Naime, pri tim brzinama potrebno je zaustaviti okretanje rotora te podesiti lopatice sustavom za zakretanje lopatica okomito na vjetar (tzv. „na nož“). Okretanjem „na nož“ postiže se minimalna aerodinamičnost lopatica te sila uzgona gotovo nestaje.

Moguće je zaključiti da sustav za zakretanje lopatica igra veliku ulogu u kontroli snage vjetroagregata. U normalnim uvjetima rada sustav za zakretanje lopatica rotira lopatice za određeni kut kako bi se uskladila brzina vrtnje rotora s okretnim momentom generatora. Snaga vjetra dana je izrazom:

$$P_{vj} = \frac{1}{2}\rho_z A_D v_{vj,0}^3 \tag{3.12}$$

gdje je:

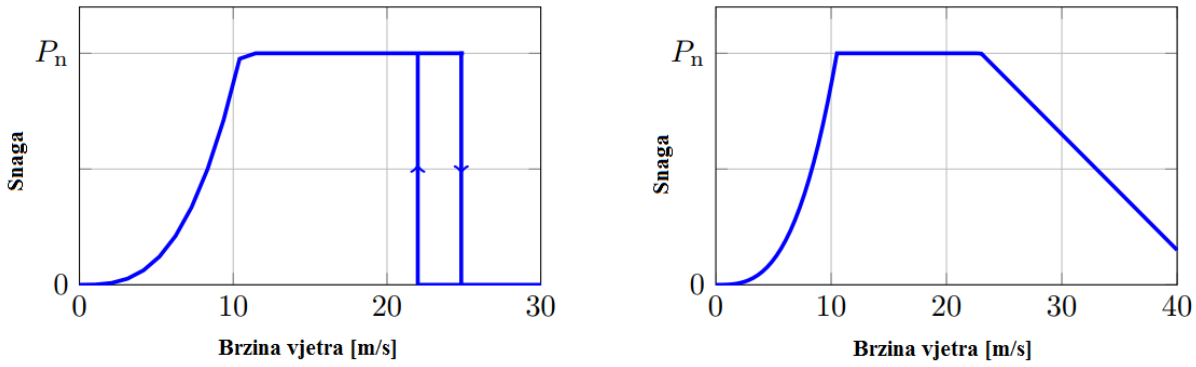
- P_{vj} snaga vjetra,
- ρ_z gustoća zraka u standardnim uvjetima,
- A_D površina
- $v_{vj,0}$ nedegenerirana brzina vjetra.

Jednadžba (3.12) jedna je od najvažnijih jednadžbi za rad vjetroagregata. Predstavlja kubnu ovisnost snage vjetra o njegovoj brzini. Vidljivo je da snaga vjetra raste s trećom potencijom njegove brzine.

Međutim, kada se povećava brzina vjetra, dolazi do prevelikih opterećenja te se u konačnici ne isplati rizik od trošenja materijala i podsustava pri velikim opterećenjima u usporedbi s količinom generirane električne energije (Burton, et al., 2001). Stoga se u praksi vjetroagregat zaustavlja kada se detektira jak vjetar. S obzirom na to da brzina vjetra varira iz trenutka u trenutak, uzima se srednja brzina vjetra tijekom jedne minute.

Postoje dva načina upravljanja u kritičnoj fazi rada. Prvi način je HST (eng. *Hard Storm Transition*) u kojem pri pojavi vjetra od 25 m/s dolazi do gašenja vjetroagregata, a do ponovnog paljenja će doći kada se vjetar uspori. Dok je drugi način SST (eng. *Soft Storm Transition*) takav da se snaga vjetroagregata krene smanjivati pri 25 m/s te se postepeno smanjuje dok se u potpunosti ne zaustavi vjetroagregat. Prednost SST-a jest ta što nema naglog gašenja i paljenja

koje povećava zamor materijala. Na slici 3.12 prikazana je ovisnost snage o brzini vjetra pri HST i SST.



Slika 3.12: Ovisnost snage vjetroagregata o brzini vjetra u HST (lijevo) i SST (desno). Preuzeto iz (Petrović, 2014) i prilagođeno.

Iz navedenoga se može zaključiti da je u kritičnoj fazi rada ključan dio vjetroagregata sustav za zakretanje lopatica. Naime, njegova pouzdanost mora biti iznimno visoka jer u kritičnim situacijama i najmanje zakazivanje sustava za zakretanje lopatica može prouzrokovati štete nesagledivih razmjera.

Sustav za zakretanje lopatica može biti izveden preko hidrauličkih motora ili pak preko elektromotora. U svakom slučaju mora biti izveden zasebno, bez obzira na ostatak vjetroagregata. Također, za svaku elisu sustav radi zasebno, ali moraju biti sinkronizirani. Lopatice se sinkronizirano zakreću prema uputama središnjeg upravljačkog sustava. Postoji i sigurnosno rezervno napajanje u slučaju zakazivanja sustava napajanja pomoću kojeg se lopatice postavljaju u krajnji sigurnosni položaj. Također postoji i potpuno neovisni sustav upravljanja pomoću kojega lopatice mogu biti postavljene u sigurnosni položaj čak i ako glavni sustav upravljanja zakaže.

Postoje i brojni senzori i sustavi za detekciju prekomjernih opterećenja ili događaja koji mogu prouzrokovati kvarove te su oni jedan on ključnih dijelova u lancu pouzdanosti vjetroagregata (Jelavić, 2009).

Kako bi pouzdanost vjetroagregata u kritičnoj fazi rada bila na visokoj razini, potrebno je voditi računa o podsustavima koji su ključni u kritičnoj fazi rada. Tu se prvenstveno misli na sustav za zakretanje lopatica te na senzore usko vezane uz navedeni sustav. Dakle, potrebne su redovite kontrole i održavanje sustava kako ne bi moglo doći do zastoja i kvarova kada su sustavi najpotrebniji, u kritičnoj fazi rada.

Osim sustava za zakretanje lopatica, kritične komponente su komponente električnog sustava vjetroagregata. Pod električni sustav vjetroagregata ubrajaju se: releji, kondenzatori, pretvarači, transformatori, kablovi napajanja te sustav za zaštitu od udara munje.

Od svih komponenti električnog sustava posebno se može izdvojiti frekvencijski pretvarač. Naime, kvar frekvencijskog pretvarača po intenzitetu drugi je najčešći uzrok zastoja. Frekvencijski pretvarač ima ulogu prilagođavanja frekvencije generirane struje na željenu frekvenciju, tj. generiranu AC struju pretvara u DC struju, a zatim DC struju vraća u trofaznu AC struju.

Kako bi sve to bilo izvedivo, potreban je veliki broj elektroničkih komponenata. Samim time šanse za pojavljivanjem kvara se povećavaju. Još jedan problem s frekvencijskim pretvaračem jest taj što je teško odrediti mjesto kvara budući da se sastoji od velikog broja komponenata.

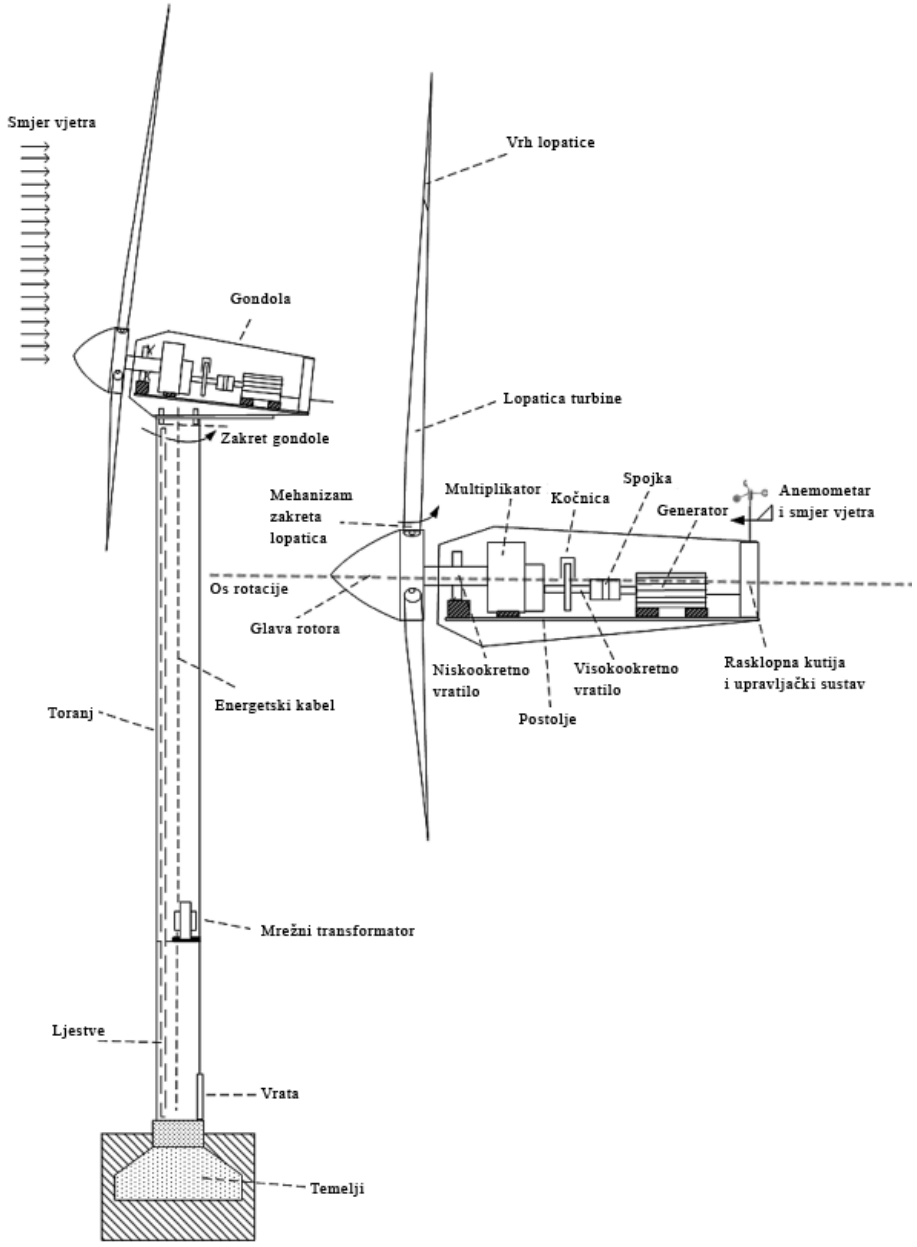
Analizom dobivenih podataka, učinkom okoline na komponente te testiranjem sustava moguće je donijeti zaključke o uzrocima kvarova električnih sustava. Naime, generatorska strana pretvarača smatra se najkritičnijom budući da pod visokom strujom niske frekvencije dolazi do zagrijavanja. Pod velikim opterećenjima dolazi do termo-mehaničkog naprezanja. Dakle, dolazi do zamora materijala na mjestima spojeva i lemova, što često može uzrokovati kvarove.

S obzirom na navedene pretpostavke napravljeno je istraživanje (Fischer, 2014) pri kojemu su postavljeni detektori za vlagu i temperaturu unutar pretvarača. Rezultati su pokazali da nisu pronađeni problemi vezani uz temperaturu, ali da postoje problemi s vlagom, pogotovo kada je sustav ponovno pokretan nakon dužeg mirovanja.

Iz analize kvarova moglo se zaključiti da su udari munje također mogli prouzrokovati kvarove na elektroničkim komponentama. Forenzičkom analizom utvrđena je kontaminiranost upravljačke pločice solju i korozijom, što potvrđuje utjecaj atmosferskih uvjeta.

4. VJETROAGREGAT

Vjetroagregat ima zadaću prikupiti mehaničku energiju iz vjetra te je pretvoriti u električnu energiju. Prema tome, mora sadržavati mehaničke i električne komponente (Slika 4.1). Svaka od tih skupina dodatno se može podijeliti na primarne i sekundarne komponente. Primarne komponente su one bez kojih sustav ne može raditi, dok su sekundarne one koje su mnogo manje te ih se čak može i izbaciti, ovisno o dizajnu samog vjetroagregata (Hemami, 2012).



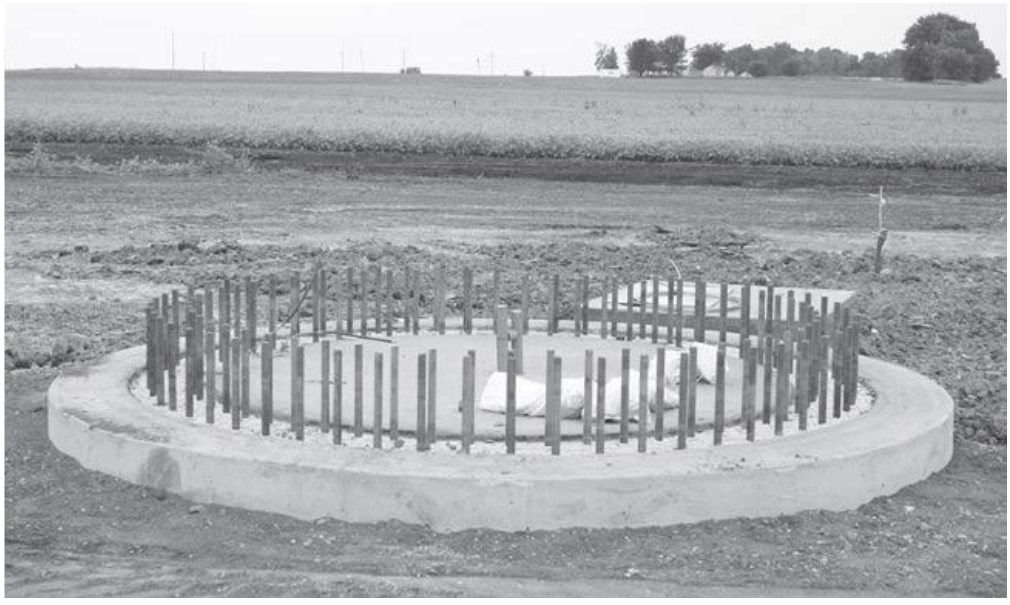
Slika 4.1: Glavni dijelovi vjetroagregata s horizontalnom osi. Preuzeto iz (Abad, et al., 2011) i prilagođeno.

4.1 Mehaničke komponente

Većinu vjetroagregata čine mehaničke komponente. Na temelje koji su pod zemljom postavlja stup se s kućištem i rotorom. Lopatice su spojene na glavčinu koja se rotira zajedno s njima. Cijeli taj rotirajući skup naziva se rotor. Rotor je mehanički izoliran od ostatka vjetroagregata koji se ne rotira. Lopatice i glavčina rotiraju glavnu osovinu koja vodi do zatvorenog prostora na vrhu stupa. Taj zatvoreni prostor naziva se kućište. U kućištu se nalaze prijenosnik, generator i ostale neophodne komponente poput grijača, hlađenja, motora, zupčanika i sl. (Hemami, 2012).

4.1.1 Temelj

Svaki vjetroagregat mora biti u mogućnosti podnijeti razna opterećenja prouzrokovana vjetrom. Kao za svaku visoku i tešku građevinu tako i za vjetroagregat temelji moraju biti dovoljno jaki da bi izdržali opterećenja. Ispod svakog vjetroagregata nalazi se veliki i teški betonski temelj dovoljno velike mase da drži vjetroagregat u mjestu sprječavajući okretanje, naginjanje, ljuljanje i sl. Veličina temelja vjetroagregata ovisi o raznim čimbenicima poput veličine samog vjetroagregata, vremenskih uvjeta na lokaciji gdje se postavlja, vrsti tla i sl. Može biti betonski blok dimenzija 15 m × 15 m × 9 m. Na temelj se pričvršćuje stup vijcima koji dopiru do dna temelja, a tek mali djelić svakog vijka vidljiv je na površini (Slika 4.2). Moguće je i staviti plastičnu zaštitu na vijke kako bi ih se zaštitilo od kiše i snijega (Hemami, 2012).

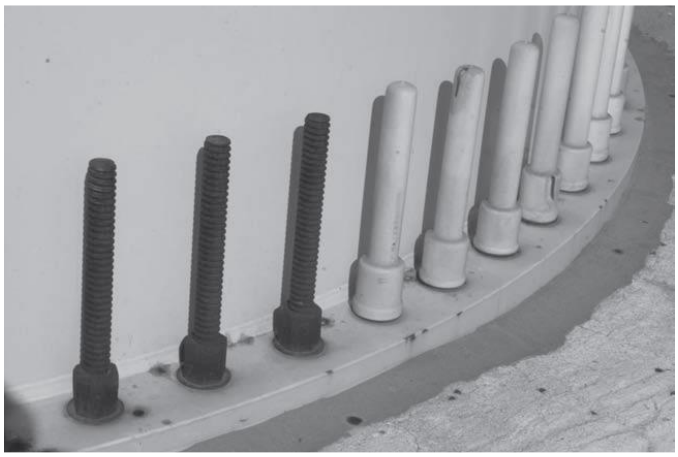


Slika 4.2: Temelj vjetroagregata. Preuzeto iz (Hemami, 2012).

4.1.2 Stup

Stup podržava sve ostale dijelove vjetroagregata te iz održava u zraku. Mora biti iznimno čvrst kako bi podnio težinu komponenata koje podržava zajedno s opterećenjima koja vjetar vrši na konstrukciju. Može biti izveden u različitim oblicima poput cjevastog, konusnog, rešetkastog i sl. Najveća je prednost rešetkastog oblika, koji se prije koristio, jednostavnost, a moguće ga je i rastaviti pa je jednostavniji za transport i montažu. Najčešći oblik koji se danas koristi jest onaj cjevastog oblika. Proizvodi se od valjanog čelika u cilindričnom obliku. Često je načinjen od više kraćih dijelova kako bi proizvodnja i transport bili jednostavniji. Dijelovi se međusobno povezuju vijcima na lokaciji postavljanja vjetroagregata. Najniži dio spaja se na temelj vijcima s vanjske strane (Slika 4.3) dok se ostali spajaju na prethodni s unutarnje strane, što omogućuje lakši pristup i bolji izgled. Svaki dio može biti dugačak 18 – 21 metar. Također, svaki dio ima platformu na svome dnu koja olakšava penjanje te odjeljuje jedan dio od drugog (Slika 4.4). Promjer cjevastog stupa može biti 3 – 4 metra. Neki stupovi mogu biti napravljeni od betonskih donjih dijelova dok su pri vrhu čelični dijelovi. Svi cjevasti stupovi imaju vrata na dnu. Neke od prednosti cjevastih stupova su (Hemami, 2012):

- Zatvoreni prostor koji štiti opremu poput kablova, električnih i komunikacijskih uređaja od vanjskih utjecaja (kiša, snijeg, sunce, prašina, itd.)
- Bolja zaštita za ljude koji vrše održavanje od vremenskih uvjeta poput vjetra, kiše, snijega i sl.
- Lakše prilagodba opreme za podizanje ljudi ili tereta poput ljestava i sl. Noviji vjetroagregati mogu imati i liftove.
- Ptice ne mogu praviti gnijezda na dijelovima vjetroagregata, što se često može vidjeti na rešetkastim stupovima



Slika 4.3: Vijci koji pričvršćuju stup za temelj. Preuzeto iz (Hemami, 2012).



Slika 4.4: Ljestve i kablovi unutar cjevastog stupa. Preuzeto iz (Hemami, 2012).

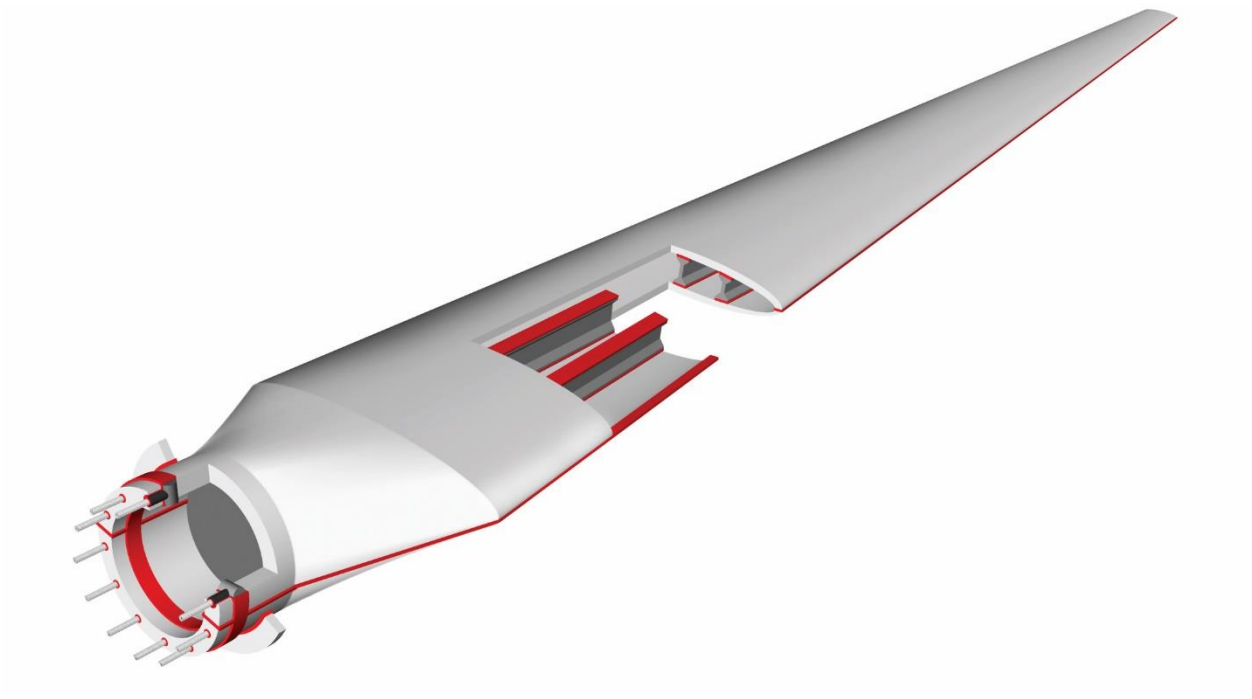
4.1.3 Rotor

Pod pojmom rotor podrazumijevaju se rotirajući dijelovi vjetroagregata. Tu se prvenstveno misli na lopatice i glavčinu. Lopatice su dio vjetroagregata koji skuplja energiju vjetra. Lopatice imaju oblik krila te su im dimenzije promjenjive duž pojedine lopatice (Slika 4.5). Dizajn je takav djelomično zbog aerodinamičnosti, a djelomično zato što dijelovi bliže glavčini moraju biti čvršći, veći i tanji od udaljenijih dijelova lopatica. Također, lopatice su lagano zakrivljene kako bi se povećala aerodinamičnost i efikasnost. Lopatice i glavčina zasebni su dijelovi koji mogu biti

spojeni u cjelinu. U starijim vjetroagregatima, lopatice su bile učvršćene za glavčinu vijcima te nije bila moguća nikakva relativna kretnja lopatica u odnosu na glavčinu.

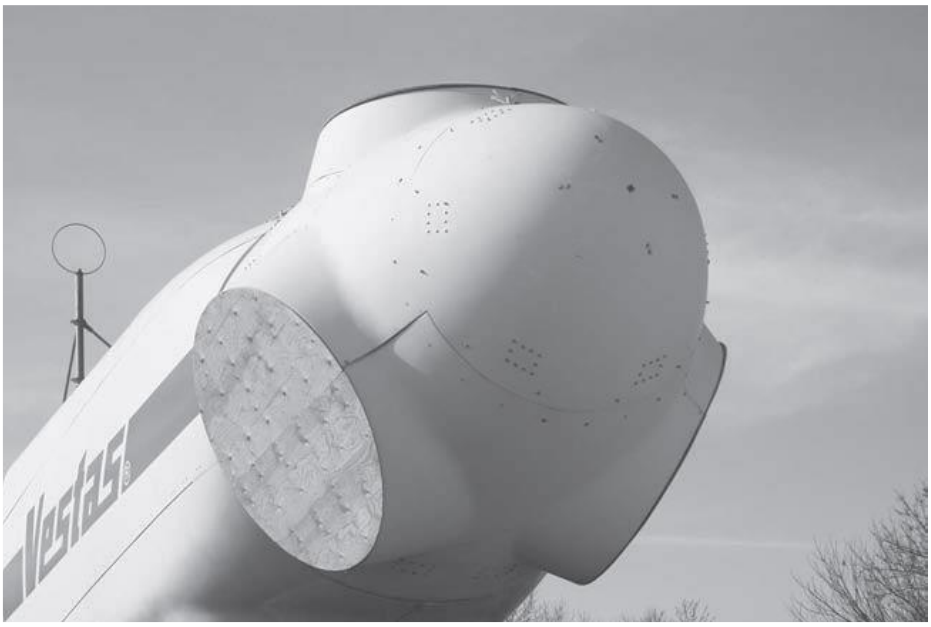
Noviji vjetroagregati opremljeni su sustavom za zakretanje lopatica (eng. *pitch system*). Kod vjetroagregata sa sustavom za zakretanje lopatica, lopatice nisu nepomične u odnosu na glavčinu, već se mogu rotirati oko svoje osi. Mijenjanjem kuta nagiba lopatica mijenja se sila koja se vrši na lopatice, a samim time postignuta je bolja iskoristivost energije vjetra. Također, postignuta je i mogućnost kontrole vjetroagregata kako inače tako i u kritičnoj fazi rada kada je potrebno zaustaviti vjetroagregat te rotirati lopatice tako da se minimizira opterećenje prouzrokovano vjetrom. Glavčina i lopatice rotiraju se zajedno kada je vjetroagregat u funkciji. Oni pokreću glavnu osovinu te je tako sva energija prikupljena na lopaticama prenesena na osovinu.

Dakle, veličina lopatica i količina energije koju mogu iskoristiti iz vjetra definira i snagu vjetroagregata. U današnje vrijeme lopatice su sve veće i veće te lopatice moraju biti sve čvršće kako bi izdržale sva opterećenja. Također, moraju biti i lagane. Stoga se lopatice izrađuju od kompozitnih materijala te su šuplje, a po potrebi su ojačane na nekim dijelovima.



Slika 4.5: Lopatica vjetroagregata. Preuzeto iz (Fernandez, 2017).

Na slici 4.6 prikazana je glavčina vjetroagregata i dio kućišta na koji je spojena. Također, vidljivo je i kako izgleda površina na koju se spajaju lopatice vjetroagregata.

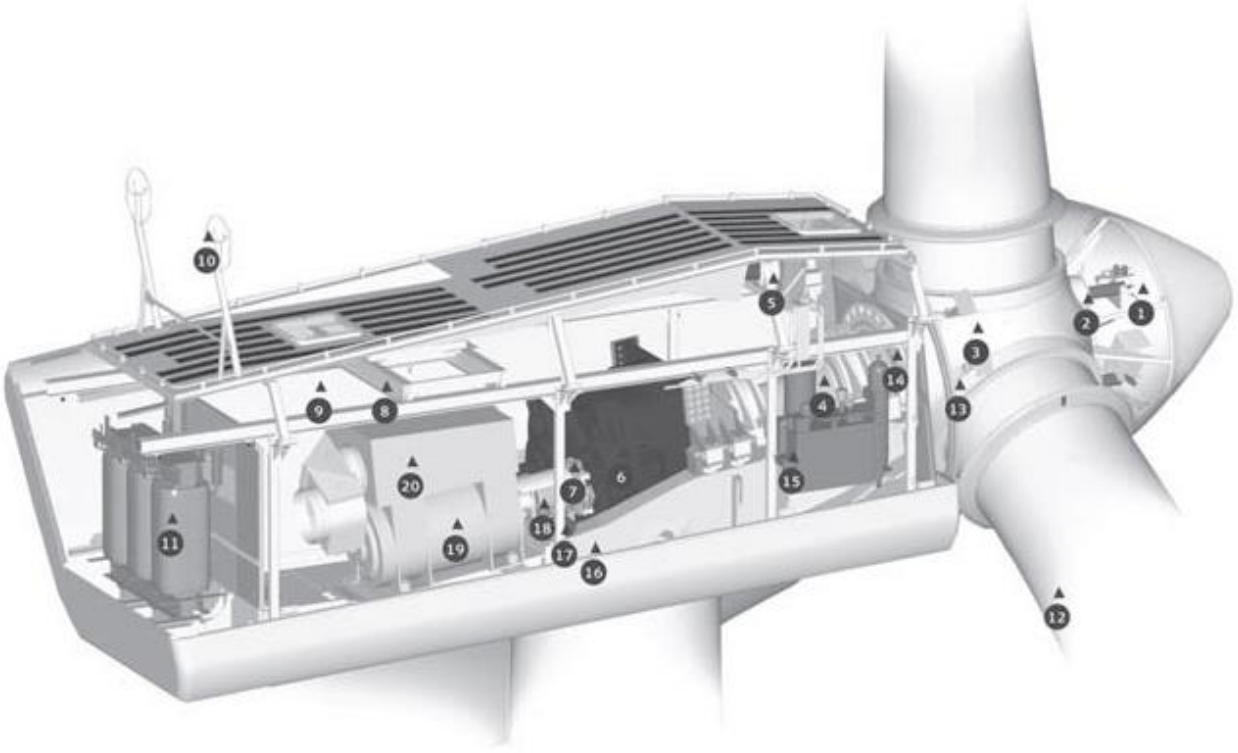


Slika 4.6: Glavčina vjetroagregata s dijelom kućišta. Preuzeto iz (Hemami, 2012).

4.1.4 Kućište

Dio tornja između rotora i stupa naziva se kućište vjetroagregata. Kućište se ne rotira s rotorom, ali mora imati mogućnost zakretanja s obzirom na stup. Sustav za zakretanje neophodan je za usmjeravanje vjetroagregata prema vjetru. Sastoji se od motora za zakretanje i zupčanika koji vrše zakretanje. Nakon što je rotor okrenut u pravom smjeru te je u funkciji, glavna osovina koja povezuje rotor s generatorom prenosi mehaničku energiju u generator koji je pretvara u električnu energiju. Međutim, taj proces ne ide direktno, već postoji prijenosnik koji prilagođava brzinu vrtnje rotora brzini vrtnje potrebnoj za generiranje električne energije. Naime, u kućištu se nalaze mnoge komponente i oprema poput prijenosnika, generatora, sustavi za grijanje i hlađenje, kočnica, motori i zupčanici za zakretanje, sustavi za mjerenje smjera i jačine vjetra i druga oprema potrebna za rad vjetroagregata. Također, kućište je i protuteža glavčini i lopaticama.

Na slici 4.7 prikazan je sadržaj kućišta vjetroagregata gdje su: 1. sustav za upravljanje glavčinom, 2. sustav za zakretanje lopatica, 3. prostor za pričvršćivanje lopatica na glavčinu, 4. glavna osovina, 5. rashladni sustav za ulje, 6. prijenosnik, 7. kočnica, 8. servisno dizalo, 9. upravljački sustav, 10. senzori, 11. transformator, 12. lopatica, 13. ležajevi za lopatice, 14. sustav za zaključavanje rotora, 15. hidraulička jedinica, 16. ležište za prijenosnik, 17. sustav za zakretanje, 18. spojka, 19. generator, 20. zračno hlađenje generatora.



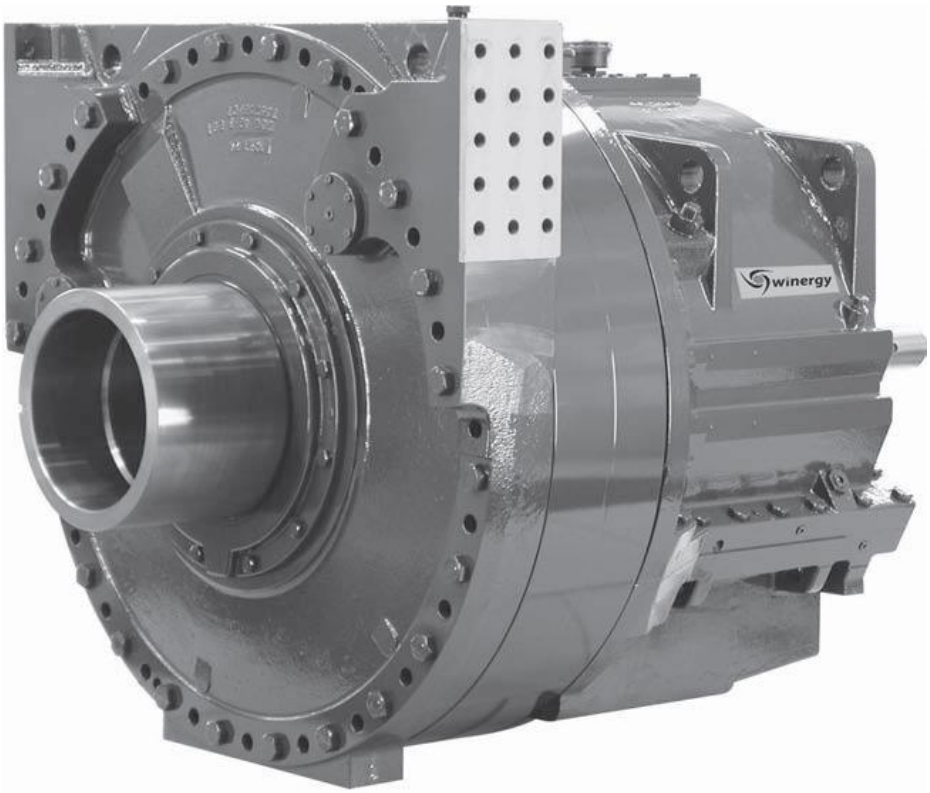
Slika 4.7: Unutrašnjost kućišta. Preuzeto iz (Hemami, 2012).

Sve su navedene komponente među osnovnim komponentama za klasični vjetroagregat uz moguće manje izmjene ovisno o dizajnu pojedinog proizvođača. Moguće je da postoji i platforma na koju se slažu navedene komponente te da ona bude pokrivena nekim laganim kompozitnim materijalom kao zaštitom od vremenskih uvjeta (Hemami, 2012).

4.1.5 Prijenosnik

Zupčanici se obično koriste kada se brzina okretanja jednog elementa ne podudara s brzinom okretanja drugog elementa. U vjetroagregatima brzina okretanja rotora treba se podudarati s brzinom na ulazu u generator. To se postiže korištenjem prijenosnika. Vjetroagregati specifični su po tome što je brzina rotora manja od brzine generatora jer je obično obrnuti slučaj (u drugim sustavima), što znači da prijenosnik mora povećati brzinu rotacije kako bi bila pogodna za generator. Obično se rotor vrti brzinom od 12 do 24 o/min, a brzina vrtne na generatoru nužna za proizvodnju električne energije iznosi od 900 do 1800 o/min. S obzirom na to da dolazi do trenja prilikom rada zupčanika, velika količina topline generira se unutar samog prijenosnika. Generiranje topline neizbježno je s obzirom na to da se radi o trenju, ali kako bi se smanjila količina

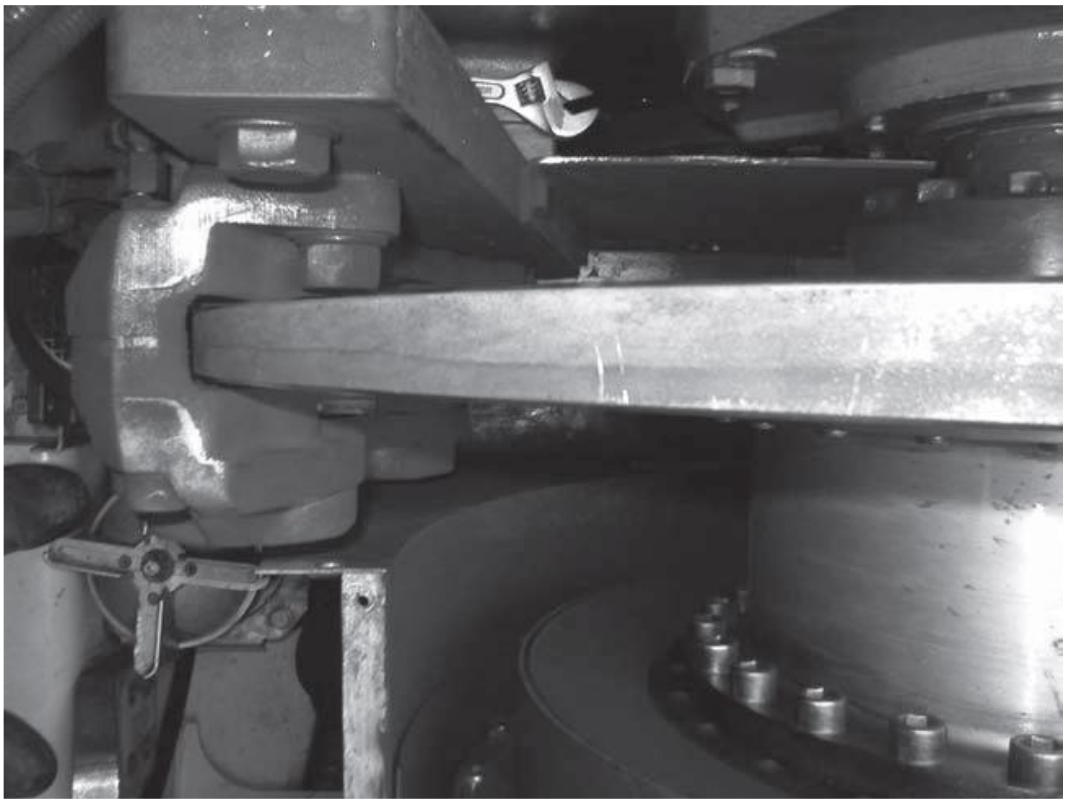
generirane topline, prijenosnik napunjen je određenom količinom ulja koje podmazuje i hladi zupčanike. Na slici 4.8 prikazan je prijenosnik koji se nalazi u vjetroagregatu (Hemami, 2012).



Slika 4.8: Prijenosnik. Preuzeto iz (Hemami, 2012).

4.1.6 Kočnica

Svaki vjetroagregat s vremena na vrijeme treba biti zaustavljen. Zaustavljanje može biti potrebno zbog održavanja ili zbog jakog vjetra. U svakom slučaju, da bi se to moglo izvesti, potrebno je imati mehaničku kočnicu (Slika 4.9) koja će zaustaviti rotor. Kada je vjetroagregat izvan pogona, okreće se od vjetra te se lopatice postavljaju u položaj u kojem pružaju najmanji otpor strujanju vjetra. Međutim, to nije dovoljno pa zato postoji kočnica koja osigurava imobilizaciju rotora. Kočnica funkcionira kao i kod automobila – pritišćući disk. Obično se postavlja na brzookretnu osovinu prije generatora. Kada je potrebno zaustavljanje vjetroagregata na dulje vrijeme, moguće je umetnuti klin u rupu na disku te na taj način zaustaviti glavnu osovinu (Hemami, 2012).



Slika 4.9: Kočnica vjetroagregata. Preuzeto iz (Hemami, 2012).

4.2 Električne komponente

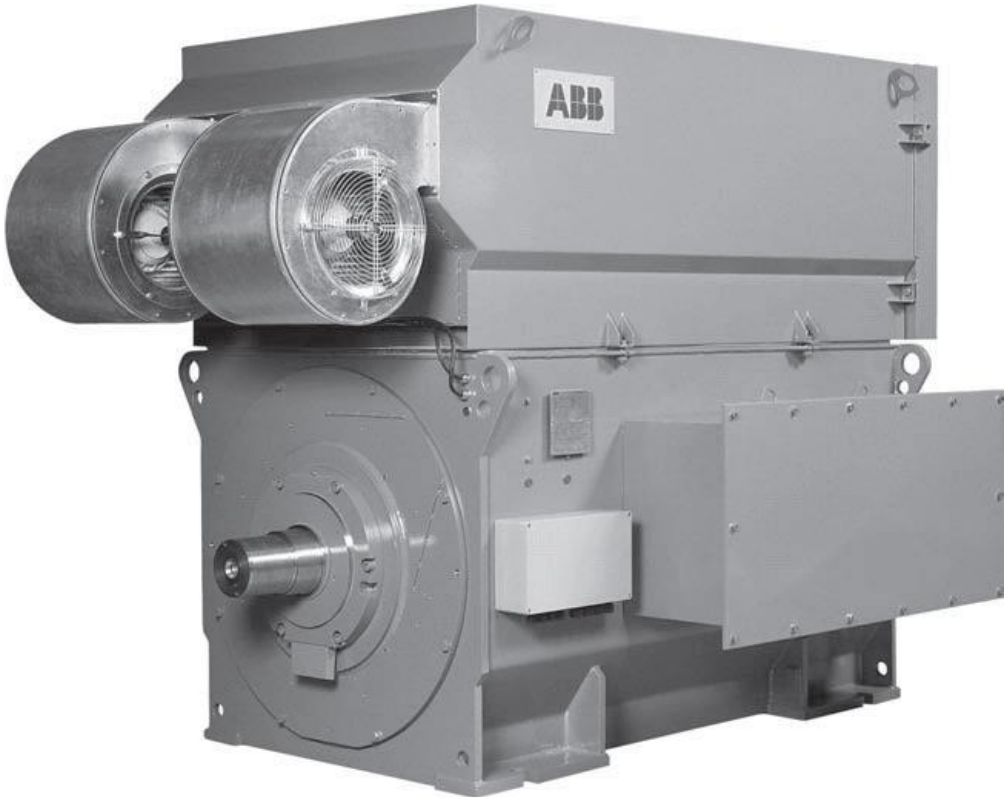
Glavne su električne komponente vjetroagregata generator i transformator. Postoje brojne druge komponente koje spadaju pod električne te su neophodne za rad sustava poput senzora, motora za sustave za zakretanje, grijanje, hlađenje, osvjetljenje i sl. Također, sustavi za upravljanje i nadzor opremljeni su raznim električnim, elektromehaničkim i elektroničkim komponentama.

4.2.1 Generator

Generator (Slika 4.10) je uređaj koji pretvara mehaničku energiju u električnu energiju promjenom magnetskog polja. Generatori obično generiraju električnu energiju napona od 600 do 4000 V. Postoje dvije vrste generatora koje se koriste u vjetroagregatima: sinkroni generatori i indukcijski generatori, koji su poznati i pod nazivom asinkroni generatori.

Indukcijski su generatori veliki, zahtijevaju malo održavanja te proizvode struju kada je brzina okretanja veća od brzine za sinkrone. Indukcijski se generatori sami pokreću te se mogu lako spojiti na mrežu.

Sinkroni generatori rade sinkronizirano s frekvencijom elektroenergetskog sustava kao što im i ime govori. Ne pokreću se sami, ali imaju druge prednosti kao što su visoka efikasnost i kvaliteta električne energije. Mogu biti spojeni na mrežu pomoću konvertera koji omogućavaju sinkronim generatorima rad pri različitim brzinama (Western Power, 2011; Haque, 2008).



Slika 4.10: Generator. Preuzeto iz (Hemami, 2012).

4.2.2 Transformator

S obzirom na to da je napon na izlazu iz generatora od 600 do 4000 V, potrebno je prilagoditi električnu energiju za prijenos od vjetroelektrane do potrošača. Za sam prijenos napon mora biti između 11000 i 25000 V zbog tehničkih razloga. Kako bi se to postiglo koristi se transformator (Slika 4.11).

Dakle, transformator je uređaj koji povećava ili smanjuje napon kako bi se prilagodio mreži na koju se spaja vjetroelektrana. Svaki vjetroagregat ima transformator koji povećava napon. Transformator se obično nalazi pored stupa, a može biti i unutar stupa.



Slika 4.11: Transformator. Preuzeto iz (Hemami, 2012).

4.3 Ostale komponente

Sustav za upravljanje i nadzor koristi se za upravljanje brojnim dijelovima vjetroagregata poput sustava za zakretanje kućišta ili lopatica, koji utječu na okretanje rotora i osovine te mogu biti korišteni za bolju iskoristivost. Osim toga, napon, frekvencija i ostale važne varijable trebaju biti nadzirane i praćene (Hemami, 2012).

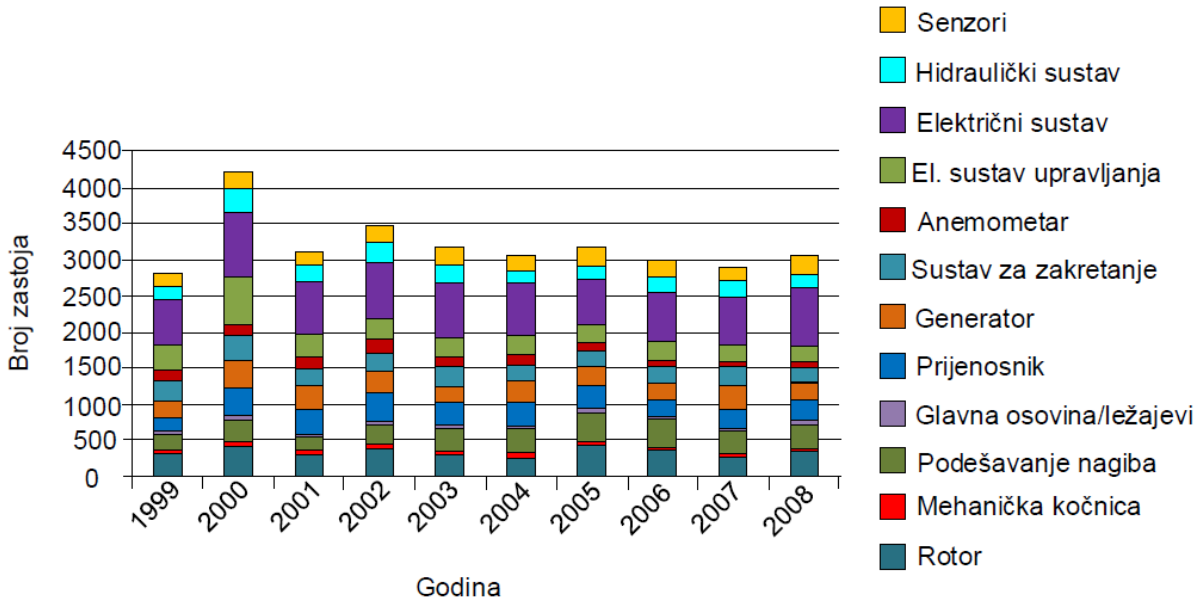
Vjetroagregat sadrži brojne **senzore** kojima prati rad sustava. Samo neki od njih su senzori za temperaturu, vibracije ili opterećenja i sl.

Jedna od najvažnijih komponenata jest **anemometar**. To je uređaj bez kojega vjetroagregat ne može raditi. Koristi se za mjerenje brzine vjetra, a u nekim modelima i određivanje smjera vjetra (Hemami, 2012).

4.4 Pouzdanost vjetroagregata

Kako bi se kvalitetno odredila pouzdanost potrebno je raspolagati pouzdanim i kvalitetnim podacima o zastojima. Najbolji je način za prikupljanje takvih podataka bilježenjem pogonskih događaja koji uzrokuju zastoje.

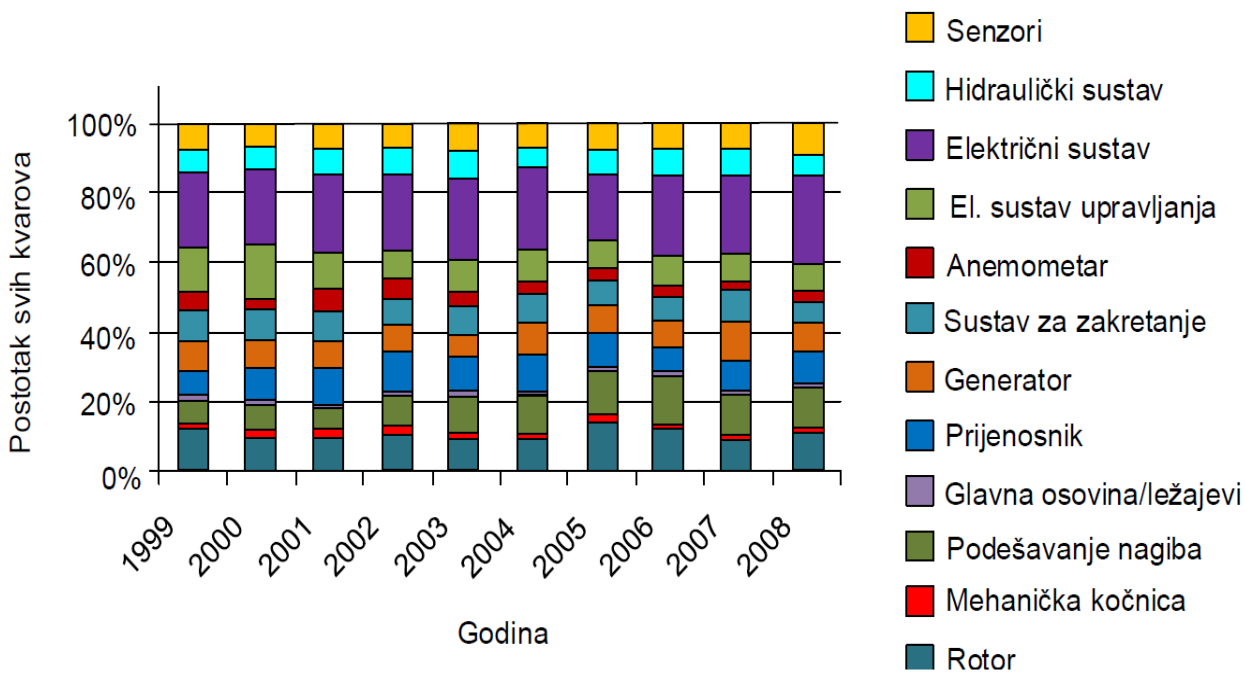
Napravljeno je nekoliko kvalitetnih studija kroz duži vremenski period o zastojima i kvarovima vjetroagregata. Najvažnije je spomenuti Windstatovo istraživanje za područje Njemačke (WS D) i Danske (WS DK) u periodu od 11 godina, zatim od njemačke Poljoprivredne komore (*Land Wirtschafts Kammer* - LWK), podaci iz Znanstvenog, mjernog i evaluacijskog programa (WMEP – *Wissenschaftliches Mess und Evaluierungsprogramm*) provedenog od strane Fraunhofer IWES instituta (*Fraunhofer – Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik*) te podaci o radu vjetroelektrana u Švedskoj, Finskoj i Njemačkoj predstavljeni od J. Ribranta (Spinato, et al., 2009; Ribrant, 2006).



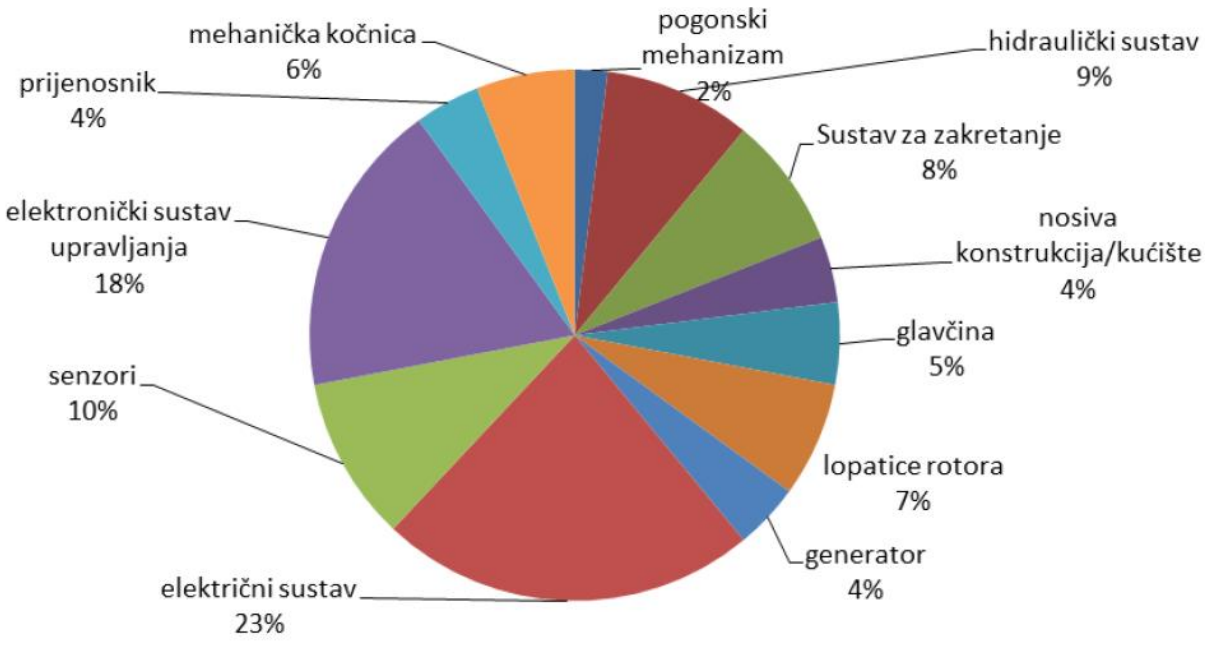
Slika 4.12: Broj zastoja vjetroagregata uzrokovan pojedinom komponentom prema Windstat-u. Preuzeto iz (Topić, 2014).

Na slici 4.12 vidi se ukupan broj zastoja, a na slici 4.13 postotak zastoja po komponenti, prema istraživanju Windstat-a u razdoblju od 1998. do 2008. godine. Također je vidljivo da je najviše zastoja prouzrokovano kvarom električnih sustava, čak 20 % ukupnih zastoja, a po intenzitetu zastoja slijede ih kvarovi sustava za podešavanje nagiba, kvarovi elektroničkog sustava

upravljanja te kvarovi transformatora. Slične rezultate dalo je i WMEP-ovo istraživanje za Njemačku prikazano na slici 4.14.

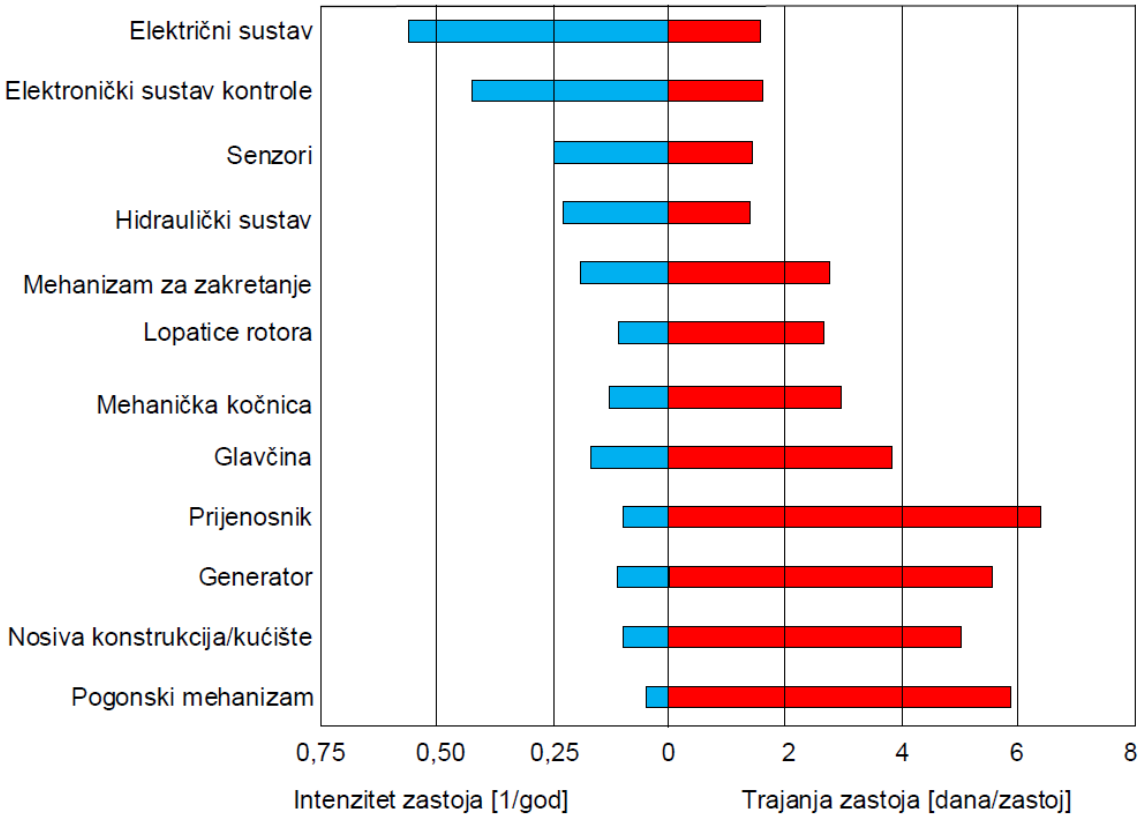


Slika 4.13: Postotak zastoja po komponentama prema Windstat-u. Preuzeto iz (Topić, 2014).



Slika 4.14: Udio zastoja pojedinih komponenti prema WMEP-u. Preuzeto iz (Topić, 2014).

Na slici 4.14 vidljivo je da prema WMEP-ovom istraživanju električni sustavi zauzimaju velikih 23 % ukupnih kvarova. Slijede ih kvarovi na elektroničkom sustavu upravljanja s 18 %, a zatim kvarovi senzora s 10 %, a bitno je spomenuti i kvarove na hidrauličkim sustavima s 9 % kao i kvarove na sustavu za zakretanje s 8 %. Ostali kvarovi zauzimaju manje postotke, što je u granicama tolerancije.

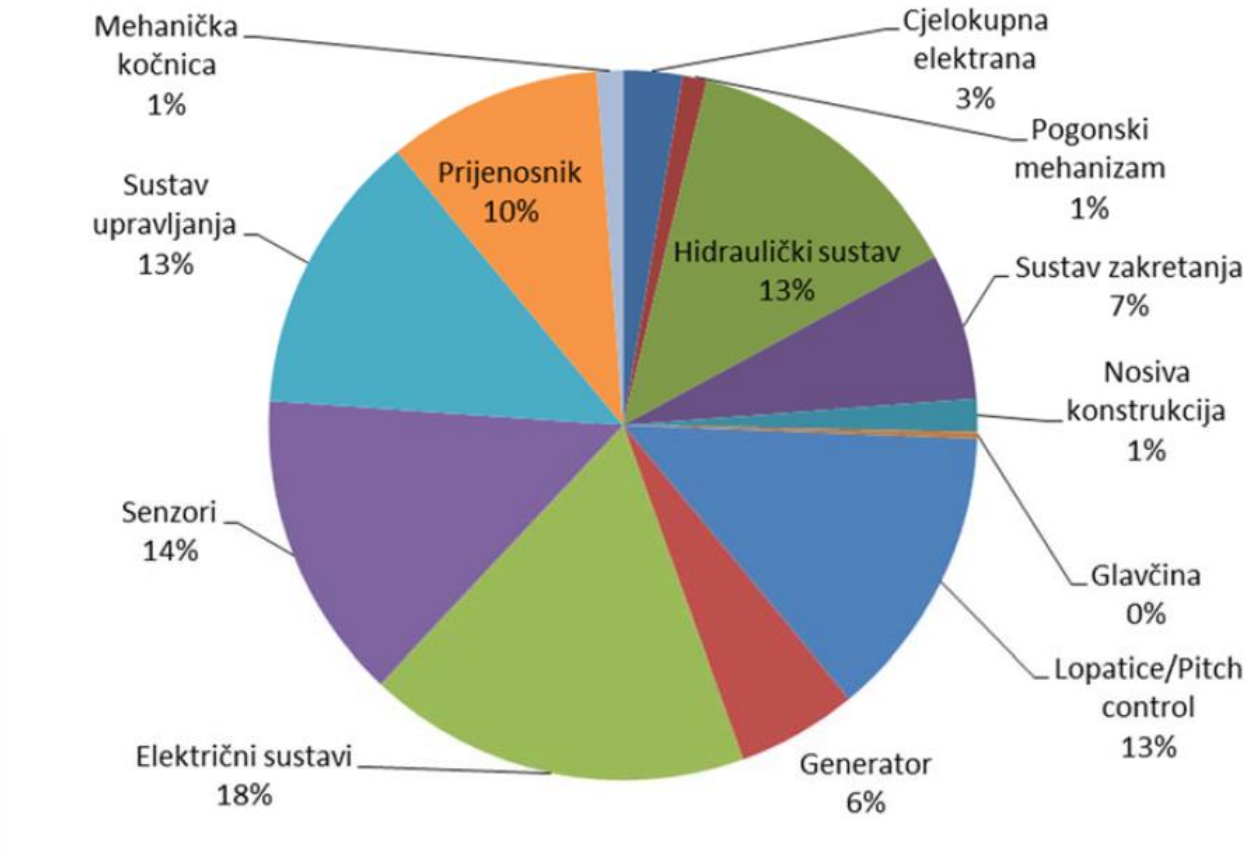


Slika 4.15: Učestalost i intenzitet zastoja prema WMEP-u. Preuzeto iz (Topić, 2014).

Na slici 4.15 prikazane su srednje vrijednosti učestalosti kvarova pojedinih komponenti te srednje vrijednosti trajanja popravaka istih prema istraživanju WMEP-a. Istraživanja su pokazala da se trajanja zastoja kreću od nekoliko sati pa do nekoliko mjeseci, s tim da se pojavljuju česti kvarovi koji se mogu otkloniti u kratkom vremenskom roku, ali i kvarovi koji se rijetko pojavljuju, ali traju puno duže.

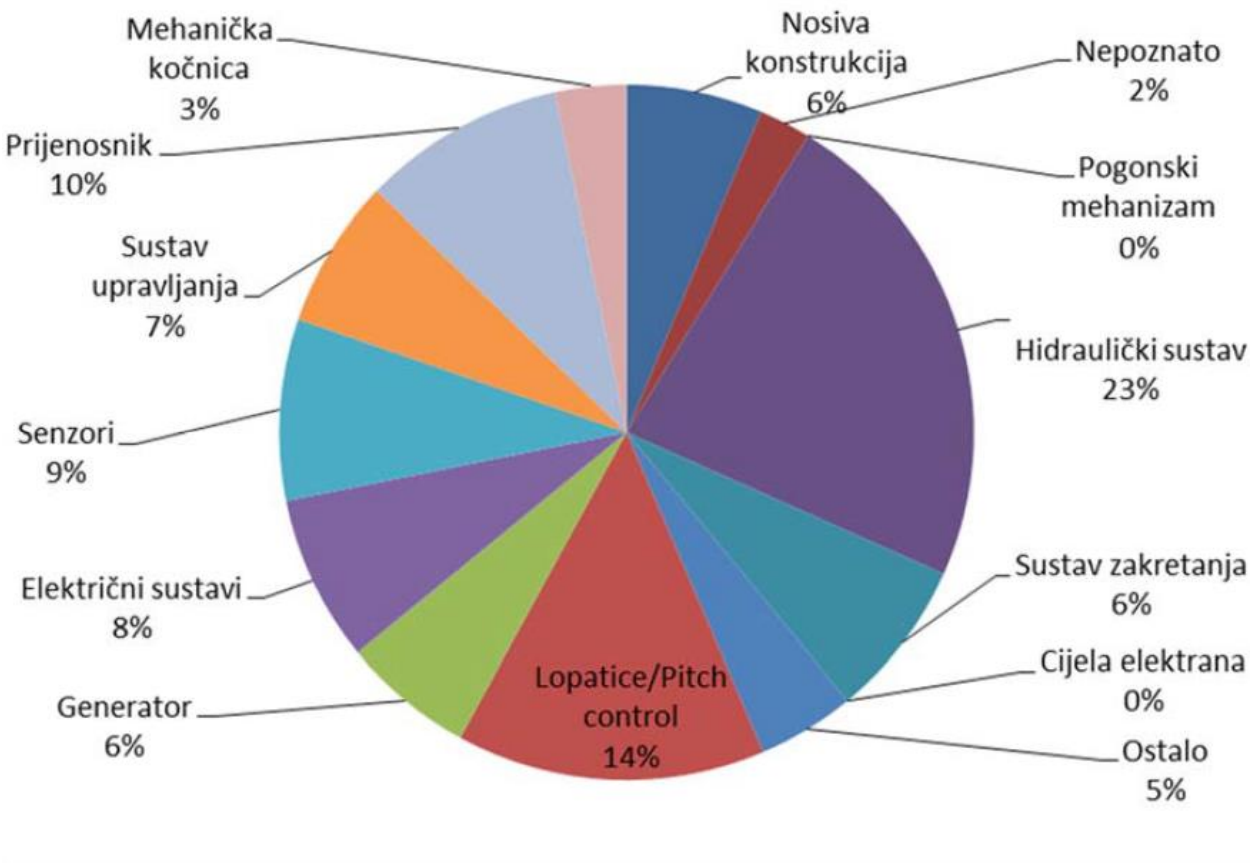
Na slici 4.16 prikazana je razdioba broja zastoja po pojedinoj komponenti prema istraživanju u Švedskoj, iz čega se može vidjeti da kao i u Njemačkoj, u Švedskoj glavni udio u

zastojima zauzimaju električni sustavi, sa senzorima i sustavima upravljanja, ali je također vidljivo i da sustav za zakretanje lopatica zauzima prilično velik udio kvarova.

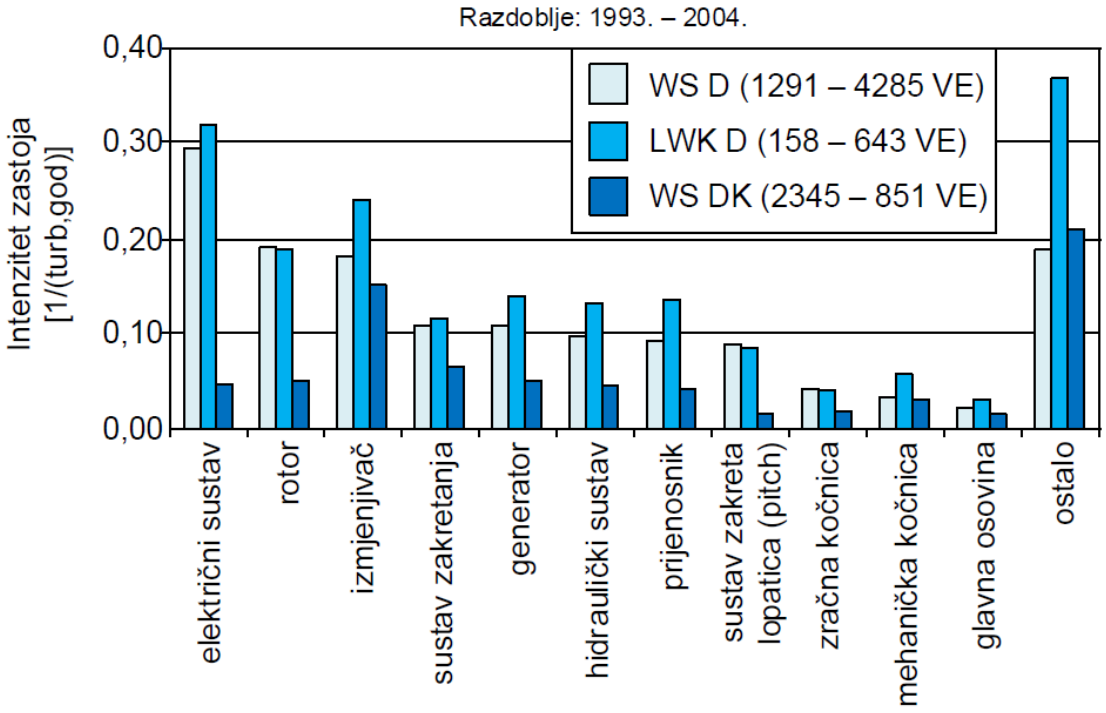


Slika 4.16: Udio zastoja pojedinih komponenata u Švedskoj. Preuzeto iz (Topić, 2014).

Na slici 4.17 može se vidjeti razdioba zastoja po komponentama u Finskoj. Za razliku od švedskih i njemačkih istraživanja, u Finskoj najveći udio zastoja prouzrokovan je kvarovima hidrauličkih sustava, a slijede ih kvarovi sustava za zakretanje lopatica te kvarovi prijenosnika. Bitno je napomenuti da se u istraživanju za finske vjetroagregate koristio znatno manji broj vjetroagregata nego u njemačkim ili danskim istraživanjima.

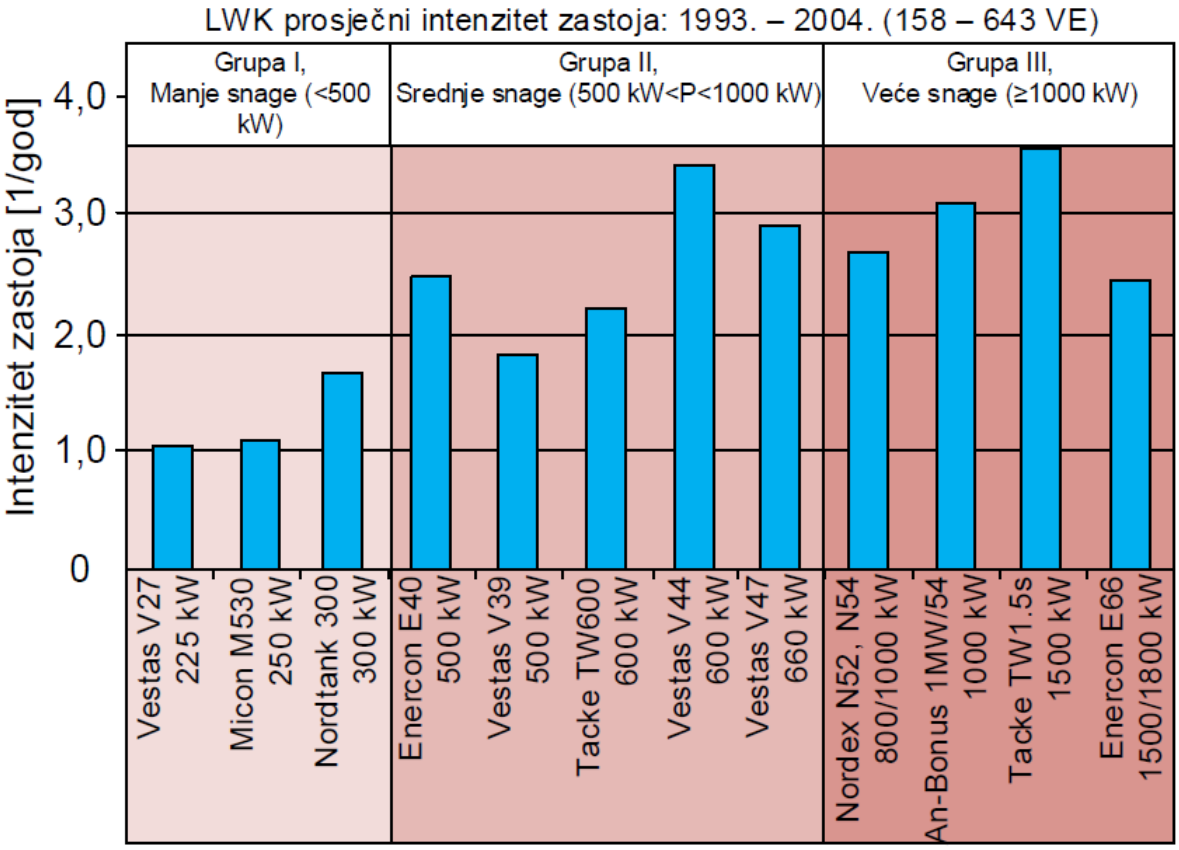


Slika 4.17: Udio zastoja pojedinih komponenata u Finskoj. Preuzeto iz (Topić, 2014).



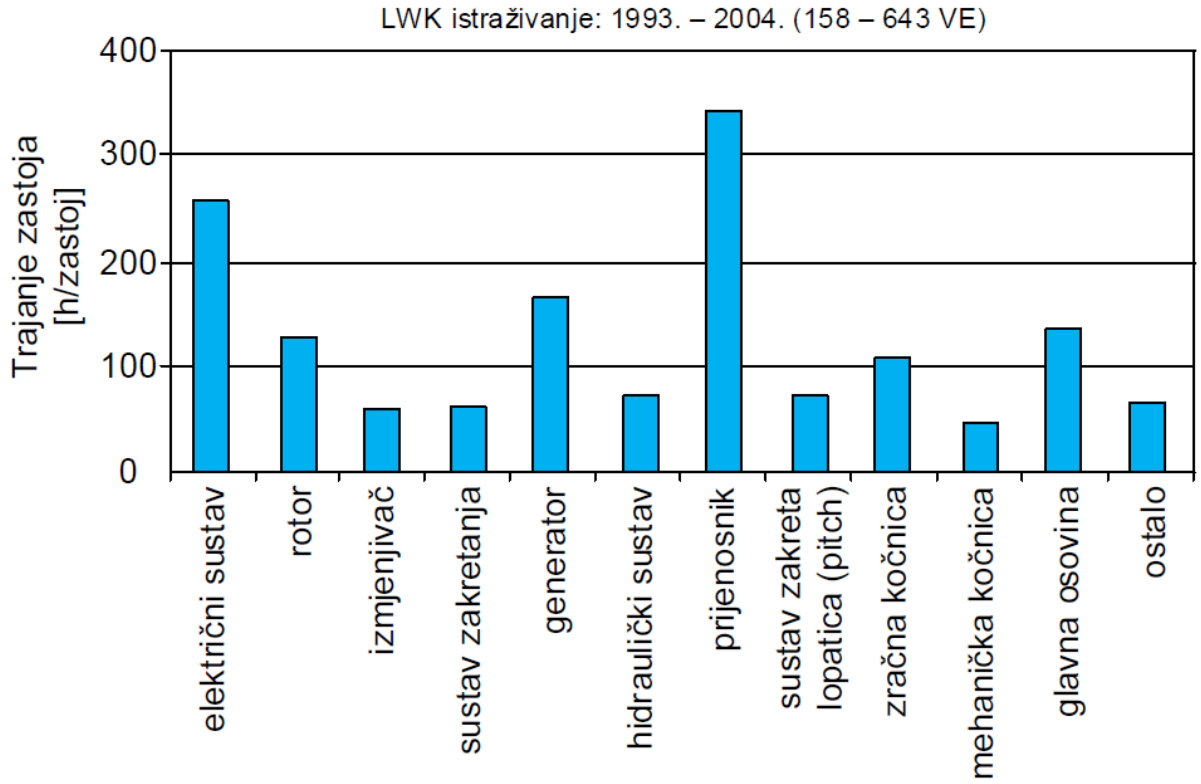
Slika 4.18: Intenzitet zastoja po komponentama prema LWK, WSD i WSDK. Preuzeto iz (Topić, 2014).

Na slici 4.18 vidi se usporedba rezultata istraživanja za područje Njemačke i Danske. Vidljivo je da je intenzitet zastoja veći u Njemačkoj nego u Danskoj. Također se vidi da su rezultati LWK-a slični rezultatima WSD-a, što potvrđuje pouzdanost podataka. Na slici 4.18 može se primijetiti da se intenzitet kvarova povećava s porastom snage vjetroagregata.



Slika 4.19: Intenzitet zastoja različitih modela, različitih veličina vjetroagregata. Preuzeto iz (Topić, 2014).

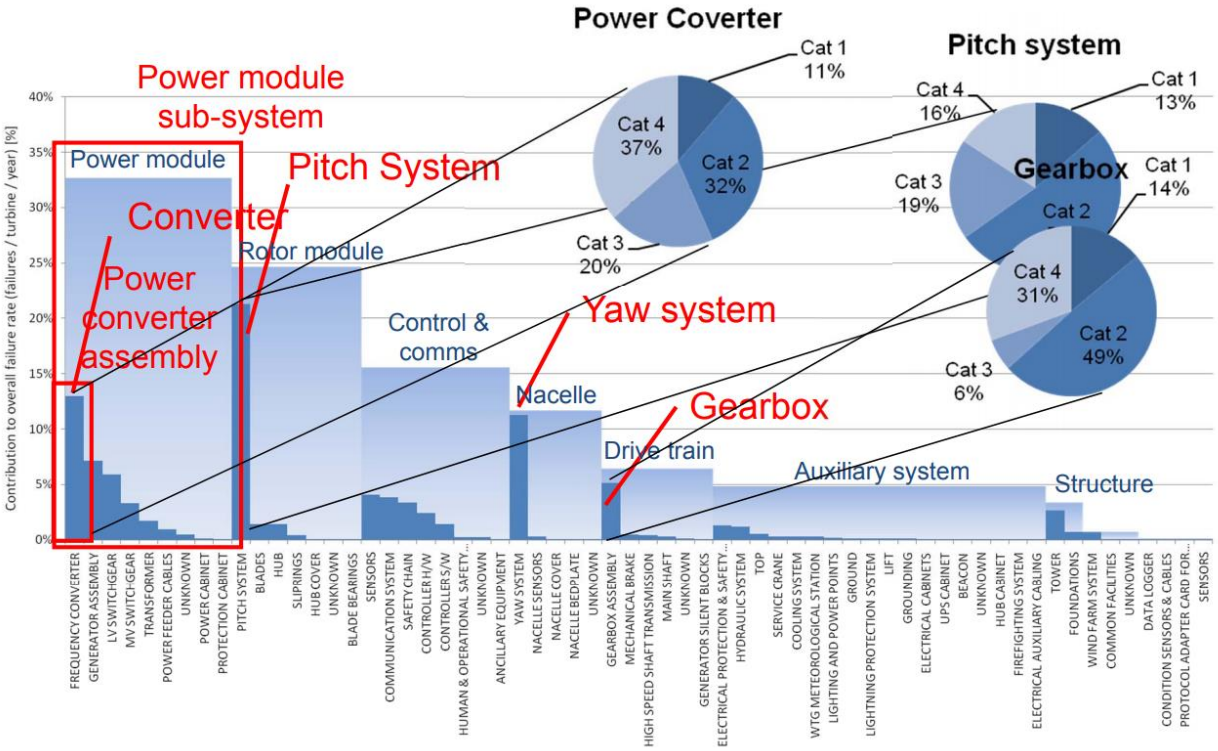
Što se tiče vremena trajanja kvarova, najveći postotak vremena zastoja zauzimaju kvarovi prijenosnika, a zatim električni sustavi (Slika 4.20).



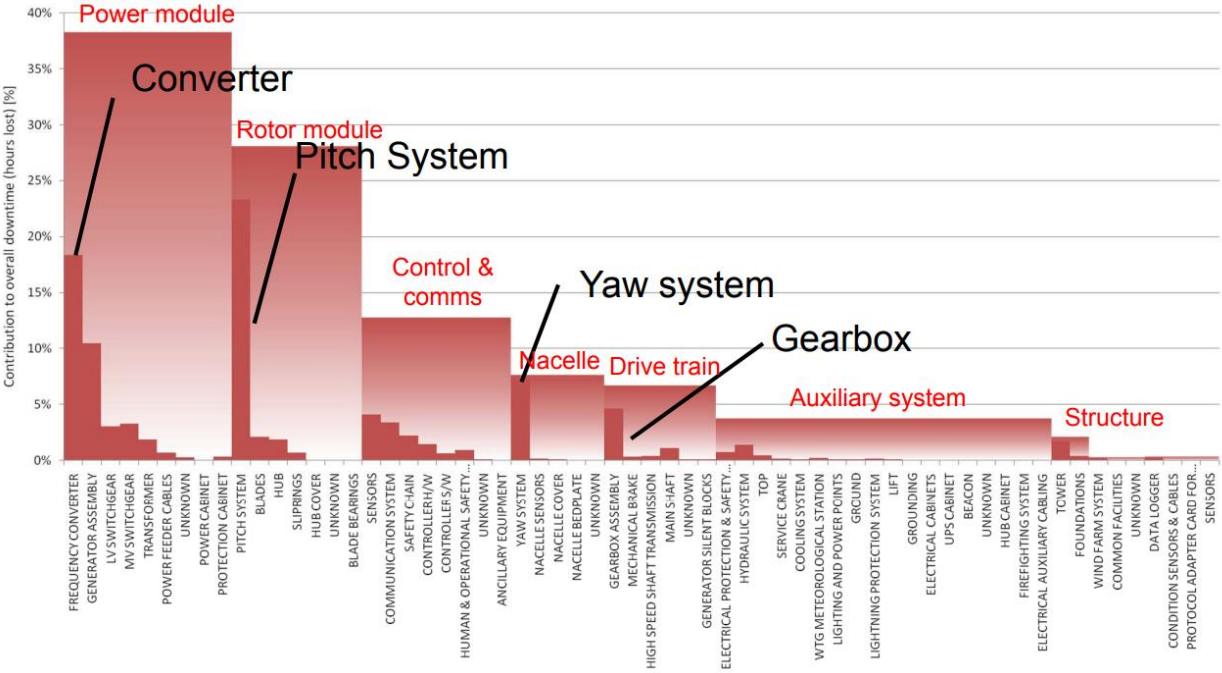
Slika 4.20: Prosječno trajanje zastoja prema LWK. Preuzeto iz (Topić, 2014).

Na slici 4.21 prikazani su kvarovi koji su prouzrokovali zastoje prema podsustavima u kojima se nalaze. Dakle, kao i u svim istraživanjima, električni sustavi zauzimaju najveći postotak od ukupnih kvarova, a slijede ga kvarovi na rotoru. Kod električnih sustava najviše zastoja prouzrokovano je kvarovima frekvencijskog pretvarača, a slijede ga kvarovi na generatoru te niskonaponskom i srednjenaponskom postrojenju. Što se tiče rotora, tu najveće probleme stvara sustav za zakretanje lopatica koji uzrokuje gotovo sve kvarove vezane za jedinicu rotora.

Na slici 4.22 može se vidjeti trajanje zastoja uzrokovanih kvarovima pojedinih komponenti. Također je vidljivo da najduže zastoje uzrokuje kvar na sustavima za zakretanje lopatica kao i kvarovi na električnim sustavima poput frekvencijskog pretvarača i generatora.



Slika 4.21: Postotak kvarova po komponentama prema Reliawindu. Preuzeto iz (Wilkinson, 2011).



Slika 4.22: Vrijeme trajanja kvara po komponentama prema Reliawindu. Preuzeto iz (Wilkinson, 2011).

5. ZAKLJUČAK

S obzirom na to da je vjetroagregat jedan složen tehnički sustav s mnoštvom podsustava koji su međusobno povezani kao lanac, postavljeni su zahtjevi za vrlo visokom pouzdanosti svake pojedine komponente.

Naime, kvar i na najmanjem podsustavu ili komponenti podsustava može dovesti do havarije i golemih troškova eksploatacije. Prema brojnim istraživanjima bilo je moguće doći do zaključka da su kritične komponente vjetroagregata sustav za zakretanje lopatica te električni sustavi.

Sustav za zakretanje lopatica ključan je podsustav vjetroagregata u kritičnoj fazi rada jer o njemu ovisi opterećenje na cijeli sustav kod jakih vjetrova. Međutim, kao što se vidi iz istraživanja, najviše zastoja prouzrokovano je kvarovima na navedenom sustavu. Razlog leži u više činjenica.

Jedna od njih je i ta da svaka elisa ima zaseban podsustav za zakretanje lopatica koji je autonoman, ali i sinkroniziran s ostalima. Svaki od sustava za zakretanje lopatica sastoji se od električnih ili hidrauličkih motora koji pokreću sustav. Budući da je pouzdanost ključna na tim podsustavima, postavljeni su i brojni senzori koji kontroliraju uvjete oko samog sustava za zakretanje lopatica. Zastoj bilo kojeg od tih dijelova (senzora, motora, ležajeva, zupčanika i sl.) prouzrokovat će zastoj cijelog vjetroagregata. S obzirom na to da se pomoću sustava za zakretanje lopatica vrši i kontrola snage vjetroagregata, sustav je pod konstantnim opterećenjima te je sklon bržem trošenju i zastojima.

Budući da je sustav za zakretanje lopatica ključna komponenta u kritičnoj fazi rada, smatram da bi se razvojem veće pouzdanosti komponenata povećala ukupna pouzdanost. To je moguće ostvariti na način da se ležajevi i zupčanici proizvode naprednijim metodama, od materijala otpornijih na radne uvjete, ali i boljim testiranjima za različite vremenske uvjete (vlaga, temperatura, sol i sl.).

Također, motori i senzori trebaju biti bolje zaštićeni kako bi se otklonili kvarovi prouzrokovani atmosferskim uvjetima. Dakle, konektori, spojevi i dijelovi pod većim opterećenjima trebaju veću pažnju kako bi se povećala pouzdanost. Smatram da bi održavanje, redovite kontrole pa i reparacije sustava prije predviđenih rokova doprinijeli ukupnoj pouzdanosti sustava, ali i smanjenju troškova.

Električni sustav u vjetroagregatu čini veliki broj komponenata, što ga čini kompliciranim za nadzor i održavanje. Čine ga releji, kondenzatori, pretvarači, transformatori, kablovi napajanja te sustav za zaštitu od udara munje. Kada se govori o kvarovima koji uzrokuju zastoj, posebnu pažnju treba obratiti na frekvencijski pretvarač.

Frekvencijski pretvarač sastoji se od sustava za hlađenje, generatorskog dijela, pretvarača i upravljačke jedinice.

Osobit problem je u tome što uzroci zastoja frekvencijskog pretvarača uglavnom nisu poznati.

Međutim, može se zaključiti, s obzirom na to da se veliki broj vjetroagregata nalazi u blizini mora ili u samim morima, da je utjecaj atmosfere veoma važan. Dakle, zrak koji okružuje same vjetroagregata može sadržavati sol koja štetno djeluje na brojne dijelove te je vrlo vjerojatno uzročnik brojnih zastoja. Naime, moguća je i pojava korozije na brojnim konektorima koji nisu adekvatno zaštićeni. Samim time moguć je prekid komunikacije s nekim od upravljačkih sustava.

Kao što je i istraživanje pokazalo, udari munje mogu također oštetiti dijelove pretvarača te prouzrokovati zastoje.

Kako bi se povećala pouzdanost električnih sustava vjetroagregata, a posebno frekvencijskog pretvarača smatram da je nužno češće održavanje i zamjena komponenata koje su izloženije utjecajima atmosferskih uvjeta poput vlage i soli.

Također, mišljenja sam da je potrebno bolje zaštititi spojeve te ih izolirati kako bi se spriječila pojava korozije. Preventivnim održavanjem i postavljanjem detektora i senzora koji mogu unaprijed prepoznati prijetnje za podsustave spriječio bi se veliki dio kvarova. Smatram da bi unaprjeđenje zaštite od udara munje također bitno povećalo pouzdanost električnih sustava. To bi se moglo postići na način da se bolje izoliraju kritične komponente. Postoji mogućnost da bi se korištenjem drugačijih materijala mogla smanjiti vjerojatnost udara munje, a samim time i kvarova na električnim sustavima.

Općenito, pouzdanost vjetroagregata u kritičnoj fazi rada može se povećati redovitim održavanjem podsustava, zamjenama podsustava koji su izloženiji kvarovima prije predviđenih rokova. Testiranjem rada sustava problemi se mogu otkriti prije nego li bude kasno, a pravilnim upravljanjem postiže se maksimalna pouzdanost vjetroagregata. Potrebno je konstantno unaprjeđivanje postojećih i razvoj novih podsustava kako bi se povećala pouzdanost. Razvojem tehnologije, razvija se i mogućnost napretka u svakom pogledu.

LITERATURA

[1] Golding, E. The Generation of Electricity by Wind Power, Halsted Press, New York, 1976.

[2] Guzović, Z. Povijesni razvoj vjetrenjača, 2. poglavlje, Zagreb, 2010.

[3] Ackermann, T., Wind Power in Power Systems, John Wiley & Sons, 1. izdanje, Stockholm, 2005.

[4] Johnson, G. L. Wind Energy Systems, Manhattan, KS, 2006.

[5] Gipe, P. Wind Energy Comes of Age, John Wiley & Sons, Ltd/Inc., New York., 1995.

[6] Billinton, R., Allan, R., Reliability Assessment of Large Electric Power Systems, Kluwer, Boston, MA, 1988.

[7] Hill, R. R., Stinebaugh, J. A., Briand, D., et. al., Wind turbine reliability: A database and analysis approach, Albuquerque, NM, 2008.

[8] Spinato, F., Tavner, P., van Bussel, G. & Koutoulakos, E., Reliability of wind turbine subassemblies. IET Renewable Power Generation, 2009.

[9] Barbati, S., Common reliability analysis methods and procedures, Reliawind consortium, 2009.

[10] Protić, T., Održavanje na temelju analize vibracija, Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2013.

[11] Tavner, P., Reliability & Availability of Wind Turbine Electrical & Electronic Components. Helsinki, 2009.

[12] Wilkinson, M. & Hendriks, B., Report on wind turbine reliability profiles, s.l.: Reliawind, 2011.

[13] Billinton, R., Allan, R. N., Reliability Evaluation of Engeneering Systems, Springer Science+Bussiness Media, New York, 1992.

[14] EPSMA, European Power Supply Manufacturers Association, Guidlines to Understanding Reliability Prediction, 2005.

[15] Nelson, W., Applied Life Data Analysis, John Wiley & Sons, Ltd/Inc., New York., 1982.

[16] Einarsson, S., Wind Turbine Reliability Modeling, Reykjavik, 2016.

[17] M. E. Haque, M. Negnevitsky, and K. Muttaqi, A novel control strategy for a variable speed wind turbine with a permanent magnet synchronous generator, IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 2008.

[18] Rausand, M., Hayland, A., System Reliability Theory, 2nd ed., John Wiley & Sons, Ltd/Inc., New York, 2004.

[19] Ross, S. M., Probability and Statistic for Engineers and Scientists, Fourth Edition, Los Angeles, 2009.
[20] Slack, N., Chambers, S., Johnston, R., Operations Management, Sixth edition, Prentice Hall, 2010.
[21] Billinton, R., Allan, R. N., Reliability Evaluation of Engineering Systems, Second Edition, Plenum Press, New York, 1992.
[22] ReliaSoft Corporation, System Analysis Reference, dostupno na: http://www.synthesisplatform.net/references/System_Analysis_Reference.pdf [pregled: veljača 2018].
[23] Liu, B., Domingues, K., Wind Turbine Reliability and OPEX focasting, 2015.
[24] Jensson, P., Profitability Assessment Model, Reykjavik University, Reykjavik, 2006.
[25] NASA, Planning, Developing and Managing an Effective Reliability and Maintainability Program, National Aeronautics and Space Administration, Dec. 1998.
[26] Mourbray, J., Reliability-Centered Maintenance, New York, USA, 1997.
[27] Hemami, A., Wind Turbine Technology, 1st Edition. 2012.
[28] Abad, G., López, J., Rodríguez, M. A., Marroyo, L., Iwanski, G., Doubly Fed Induction Machine: Modeling and Control for Wind Energy Generation, John Wiley & Sons, 1. izdanje, 2011.
[29] Fernandez, G., Usabiaga, H., Vandepitte, D., Subcomponent development for sandwich composite wind turbine blade bonded joints analysis, 2017.
[30] Western Power, Generator Grid Connection Guide V2 Introduction to Power System and the Connection Process, Jun. 2011.
[31] Haque, M. E., Negnevitsky, M., Muttaqi, K., A novel control strategy for a variable speed wind turbine with a permanent magnet synchronous generator, IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 2008.
[32] Ribrant, J., Reliability performence and maintenance – A survey of failures in wind power systems, Master thesis, KTH School of Electrical Engineering, 2005./2006.
[33] Topić, D., Unaprijeđeni simulacijski model predviđanja proizvodnje električne energije vjetroelektrane, Elektrotehnički fakultet, Osijek, 2014.
[34] Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N., Bossanyi, E., Wind energy handbook, John Wiley and Sons, 2001.
[35] Petrović, V., Bottasso, C. L., Wind turbine optimal control during storms, IOP Publishing Ltd, 2014.

[36] Jelavić, M., Upravljanje vjetroagregatom s ciljem smanjenja dinamičkih opterećenja konstrukcije, Zagreb, 2009.
[37] Wilkinson, M., Measuring Wind Turbine Reliability- Results of Reliawind Project, Brussels, 2011.
[38] Fischer, K., Reuter, A., Towards increased reliability of power converters in wind turbines, 2014

POPIS SLIKA

Slika 2.1: Perzijska vjetrenjača. Preuzeto iz (Guzović, 2010)……..……..2
Slika 2.2: Kineska vjetrenjača. Preuzeto iz (Guzović, 2010)…….……...3
Slika 2.3: Crtež vjetrenjače iz Engleske. Preuzeto iz (Guzović, 2010)…….4
Slika 2.4: Konstrukcija stupne vjetrenjače. Preuzeto iz (Guzović, 2010)…….……5
Slika 2.5: Konstrukcija vjetrenjače za crpljenje vode. Preuzeto iz (Guzović, 2010)……6
Slika 2.6: Mediteranska vjetrenjača. Preuzeto iz (Guzović, 2010)…….……..7
Slika 2.7: Američka vjetrenjača. Preuzeto iz (Guzović, 2010)…….…8
Slika 3.1: Odnos između MTBF, MTTF, MTTR. Preuzeto iz (Travner, 2009) i prilagođeno.....17
Slika 3.2: Weibullova razdioba u odnosu na β……...20
Slika 3.3: Weibullova razdioba u odnosu na η……...20
Slika 3.4: Eksponencijalna razdioba s obzirom na λ. Preuzeto iz (Einarsson, 2016)……..21
Slika 3.5: Log normalna razdioba s obzirom na μ'. Preuzeto iz (Einarsson, 2016)…….22
Slika 3.6: Normalna razdioba s obzirom na σ. Preuzeto iz (Einarsson, 2016)……...23
Slika 3.7: Krivulja životnog vijeka. Preuzeto iz (Protić, 2013)……..24
Slika 3.8: RBD serijskog spoja. Preuzeto iz (Einarsson, 2016)…….26
Slika 3.9: RBD paralelnog spoja. Preuzeto iz (Einarsson, 2010)……....27
Slika 3.10: Dijagram analize pomoću stabla grešaka. Preuzeto iz (Einarsson, 2010)……29
Slika 3.11: Analiza pomoću stabla događaja (ETA)…….…29
Slika 3.12: Ovisnost snage vjetroagregata o brzini vjetra u HST (lijevo) i SST (desno). Preuzeto iz (Petrović, 2014) i prilagođeno……...….33
Slika 4.1: Glavni dijelovi vjetroagregata s horizontalnom osi. Preuzeto iz (Abad, et al., 2011) i prilagođeno……..……..…35
Slika 4.2: Temelj vjetroagregata. Preuzeto iz (Hemami, 2012)…….36
Slika 4.3: Vijci koji pričvršćuju stup za temelj. Preuzeto iz (Hemami, 2012)……...37
Slika 4.4: Ljestve i kablovi unutar cjevastog stupa. Preuzeto iz (Hemami, 2012)…….…38
Slika 4.5: Lopatica vjetroagregata. Preuzeto iz (Fernandez, 2017)…….…39
Slika 4.6: Glavčina vjetroagregata s dijelom kućišta. Preuzeto iz (Hemami, 2012)……..40
Slika 4.7: Unutrašnjost kućišta. Preuzeto iz (Hemami, 2012)…….…41
Slika 4.8: Prijenosnik. Preuzeto iz (Hemami, 2012)……..42
Slika 4.9: Kočnica vjetroagregata. Preuzeto iz (Hemami, 2012)……...43
Slika 4.10: Generator. Preuzeto iz (Hemami, 2012)……...44
Slika 4.11: Transformator. Preuzeto iz (Hemami, 2012)……45

Slika 4.12: Broj zastoja vjetroagregata uzrokovan pojedinom komponentom prema Windstatu……...46
Slika 4.13: Postotak zastoja po komponentama prema Windstat-u. Preuzeto iz (Topić, 2014)….47
Slika 4.14: Udio zastoja pojedinih komponenti prema WMEP-u. Preuzeto iz (Topić, 2014)……47
Slika 4.15: Učestalost i intenzitet zastoja prema WMEP-u. Preuzeto iz (Topić, 2014)…….48
Slika 4.16: Udio zastoja pojedinih komponenata u Švedskoj. Preuzeto iz (Topić, 2014)……..49
Slika 4.17: Udio zastoja pojedinih komponenata u Finskoj. Preuzeto iz (Topić, 2014)……50
Slika 4.18: Intenzitet zastoja po komponentama prema LWK, WSD i WSDK. Preuzeto iz (Topić, 2014)……..50
Slika 4.19: Intenzitet zastoja različitih modela, različitih veličina vjetroagregata. Preuzeto iz (Topić, 2014)……..51
Slika 4.20: Prosječno trajanje zastoja prema LWK. Preuzeto iz (Topić, 2014)…….52
Slika 4.21: Postotak kvarova po komponentama prema Reliawind-u. Preuzeto iz (Wilkinson,2011)……...53
Slika 4.22: Vrijeme Trajanja kvara po komponentama prema Reliawind-u. Preuzeto iz (Wilkinson, 2011)…….53

POPIS TABLICA

Tablica 2.1: Povijesni razvoj vjetroagregata…….…….….10
Tablica 2.2: Performanse prvih vjetroagregata velikih dimenzija i kapaciteta……...11
Tablica 2.3: Kapacitet vjetroelektrana u svijetu…….……12
Tablica 2.4: Kapacitet vjetroelektrana u Europi…….12
Tablica 2.5: Kapacitet vjetroelektrana u Sjevernoj Americi……...13
Tablica 2.6: Kapacitet vjetroelektrana u Srednjoj i Južnoj Americi…….……..13
Tablica 2.7: Kapacitet vjetroelektrana u Aziji i Oceaniji…….……..14
Tablica 2.8: Kapaciteti vjetroelektrana u Africi i na Bliskom Istoku…….……14

POPIS OZNAKA

Oznaka	Značenje
EES	Elektroenergetski sustav
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis
MTBF	Mean Time Between Failure
MTTF	Mean Time To Failure
MTTR	Mean Time To Repair
f(t)	Funkcija vjerojatnosti razdiobe
pdf	Probability density function
F(t)	Kumulativna funkcija razdiobe
cdf	Cumulative distribution function
U(t)	Nedostupnost u vremenu
λ(t)	Funkcija stope kvara
IEA	International Energy Agency
ALT	Accelerated Life Test
RLDA	Reliability Life Dana Analysis
SCADA	Supervisory Control And Dana Acquisition
β	Parametar oblika ili nagib
η	Parametar mjere ili životnog vijeka
γ	Parametar lokacije
t	Vrijeme
λ	Parametar mjere ili životnog vijeka
μ'	Prirodni logaritam srednjeg broja kvarova
σ'	Prirodni logaritam standardne devijacije srednjeg broja kvarova
t'	Prirodni logaritam vremena pomnožen s vremenom
μ	Srednja vrijednost ili parametar lokacije
σ	Standardna devijacija parametra mjere
RBD	Reliability Block Diagram
R_s	Pouzdanost sustava
R_i	Pouzdanost komponente
R_p	Pouzdanost sustava
FTA	Fault Tree Analysis
FTD	Fault Tree Diagram

Oznaka	**Značenje**
ETA	Event Tree Analysis
a	Optimistična vrijednost
m	Najvjerojatnija vrijednost
b	Pesimistična vrijednost
w	Težina
StDev	Standardna Devijacija
CM	Corrective Maintenance
PM	Preventive Maintenace
RCM	Reliability Centered Maintenance
P_{vj}	Snaga vjetra
ρ_z	Gustoća zraka u standardnim uvjetima
A_D	Površina
$v_{vj,0}$	Nedegenerirana brzina vjetra
HST	Hard Storm Transition
SST	Soft Storm Transition
AC	Alternating Current
DC	Direct Current
WS D	Windstat Deutschland
WS DK	Windstat Denmark
LWK	Land Wirtschafts Kammer
WMEP	Wissenschaftliches Mess und Evaluierungsprogramm
IWES	Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik

SAŽETAK

U ovome diplomskom radu opisani su vjetroagregati kroz povijest te njihov razvoj i svrha do danas. Definirani su osnovni pojmovi kojima se opisuje pouzdanost vjetroagregata. Prikazane su brojne metode i alati za prikupljanje podataka, analizu i obradu podataka s ciljem određivanja pouzdanosti vjetroagregata. Definirana je kritična faza rada i naglašene kritične komponente koje su ključne u kritičnoj fazi rada. Također, opisan je i sam vjetroagregat kroz svoje mehaničke i električne sustave. Naposljetku, prikazani su rezultati istraživanja o pouzdanosti vjetroagregata za područje Europe. Detektirane su kritične komponente i uzroci kvarova.

Ključne riječi: vjetroagregat, pouzdanost, kritična faza rada, kvar, podsustav

ABSTRACT

WIND TURBINE RELIABILITY IN CRITICAL PHASE OF WORK

This thesis describes historical development and purpose of wind turbines through the years. Basic terms have been defined describing wind turbine reliability. Numerous methods and tools for data collection, analysis and data processing are presented for determing the reliability of wind turbines. Critical phase of work and critical components are defined. Also, wind turbine itself is described through its mechanical and electrical components. Finally, there are results of surveys for European wind turbines. Critical components and causes of failures were detected.

Keywords: wind turbine, reliability, critical phase, failure, subsystem

ŽIVOTOPIS

Mihael Filajdić rođen je 27. rujna 1991. u Slavonskom Brodu gdje završava osam razreda osnovnoškolskog obrazovanja s odličnim uspjehom. Nakon završene osnovne škole upisuje Klasičnu gimnaziju fra Marijana Lanosovića u Slavonskom Brodu gdje ostvaruje vrlo dobar uspjeh kroz četiri godine srednjoškolskog obrazovanja. Nakon završene srednje škole upisuje Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku, na kojemu odabire smjer Komunikacije i informatika. Po završetku preddiplomskog studija 2015. godine upisuje diplomski studij, smjer Komunikacijske tehnologije.