

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

ZAVRŠNI RAD  
**RASPOLOŽIVOST I RIZIK RADA  
VJETROELEKTRANA**

Marko Špoljarić

Zagreb, siječanj 2011



## Sadržaj

1. Uvod.....	1
2. Energija vjetra .....	2
2.1. Razvoj vjetroenergetike.....	2
2.2. Vjetroenergetika u Europskoj uniji i Hrvatskoj .....	2
2.3. Snaga vjetra .....	4
2.4. Mjerenje brzine vjetra i ruža vjetrova.....	6
3. Tehnički rizik pri planiranju .....	10
3.1. Rizici vezani uz vjetar.....	10
3.2. Rizici vezani uz opremu .....	12
3.2.1. Vjetroagregat .....	13
3.2.2. Sustav upravljanja .....	14
3.3. Rizici vezani uz integriranje vjetroelektrana u EES .....	14
4. Raspoloživost.....	16
4.1. Izbor tehnologije.....	20
4.1.1. Veličina turbine .....	20
4.1.2. Ograničavanje izlazne snage.....	21
4.1.3. Generatori.....	23
4.1.4. Indirektan i direktan pogon .....	26
4.2. Održavanje.....	27
4.2.1. Sustavi za praćenje stanja.....	29
4.2.2. Rezervni dijelovi.....	29
5. Analiza rada .....	30
5.1. Analiza kvarova.....	34
5.2. Pareto analiza .....	35
5.3. Financijski gubici .....	37
6. Zaključak.....	38
7. Literatura.....	40
8. Sažetak .....	42
9. Abstract.....	43

## 1. Uvod

Povećanom svijješću stanovništva za očuvanjem okoliša, ali i poticanjem od strane države, započinje i sve veća proizvodnja električne energije iz obnovljivih izvora. Sve više na značaju dobivaju do sada na neki način zanemarivani ili ignorirani izvori energije. Vjetar je jedan od takvih takozvanih nekonvencionalnih izvora koji se primjerice na sjeveru i u srednjoj Europi već dobar niz godina koristi sve više kao izvor električne energije.

Tijekom prošlog desetljeća instalirana snaga vjetroelektrana u svijetu u značajnom je porastu, što je prvenstveno posljedica državnih poticaja obnovljivim izvorima energije, ali i stalnom padu cijene vjetroagregata. U 2009. godini u Europskoj uniji udio novih instaliranih kapaciteta vjetroelektrana u ukupnom udjelu novih instaliranih kapaciteta je iznosio 39% [1].

Ubrzano instaliranje vjetroelektrana je dovelo do potrebe za tehnološkim napretkom u iskorištavanju energije vjetra. Nove tehnologije su dosegle visoku razinu kvalitete, a time i visoku raspoloživost vjetroelektrana. Iako je raspoloživost današnjih vjetroelektrana vrlo visoka popriličan broj kvarova uzrokuju neplanirane prekide rada te time velike gubitke u proizvodnji i novčane gubitke.

Cilj ovog rada je analizirati dostupne informacije o riziku i raspoloživosti vjetroelektrana te odrediti važnost pojedinih aktivnosti, komponenti i parametara za povećavanje raspoloživosti i smanjivanje rizika vjetroelektrana.

## **2. Energija vjetra**

### **2.1. Razvoj vjetroenergetike**

Ljudska vrsta koristi energiju vjetra već nekoliko tisućljeća. Primjena energije vjetra seže u vrijeme prvih civilizacija, kada se energija vjetra koristila za pogon čamaca na rijeci Nil (5000 godina prije Krista), za navodnjavanje na otoku Kreti, a oko 700. godine prije Krista, u današnjem Afganistanu, pojavile su se prve vjetrenjače koje su služile za mljevenje žitarica. Tijekom 19. stoljeća u Sjevernoj Americi je bilo instalirano na tisuće vjetrenjača, koje su uglavnom bile korištene za pumpanje vode na farmama i plantažama. Početkom 20. stoljeća u SAD-u masovno su korištene prve male vjetrenjače za proizvodnju električne energije, ali su mnoge od njih prestale s radom tijekom tridesetih godina, zbog intenzivnog proširenja elektrodistributivnog sustava i do najudaljenijih naseljenih područja.

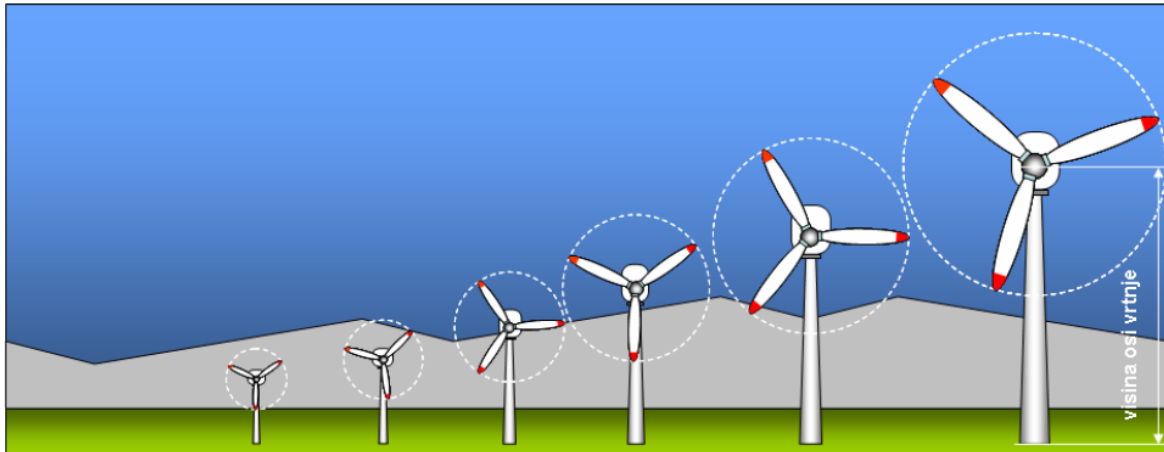
Proizvodnja električne energije iz vjetra doživjela je nagli porast tijekom naftne krize početkom 1970-ih, ali je tek 1980-ih godina prošlog stoljeća doživjela izuzetan rast primjenom novih tehnoloških dostignuća.

Od 1980. godine vjetroenergetika je snažno napredovala, kako u instaliranoj snazi tako i u obujmu proizvodnje. Čak prije nekoliko godina vjetroagregat od 500 kW bio je svojevrsna senzacija. Danas vjetroagregati od 1.0 do 2.5 MW, s promjerom rotora od 50 do 90 metara, već predstavljaju standardna rješenja. Na slici 1 [2] prikazan je razvoj tehnologije vjetroagregata.

### **2.2. Vjetroenergetika u Europskoj uniji i Hrvatskoj**

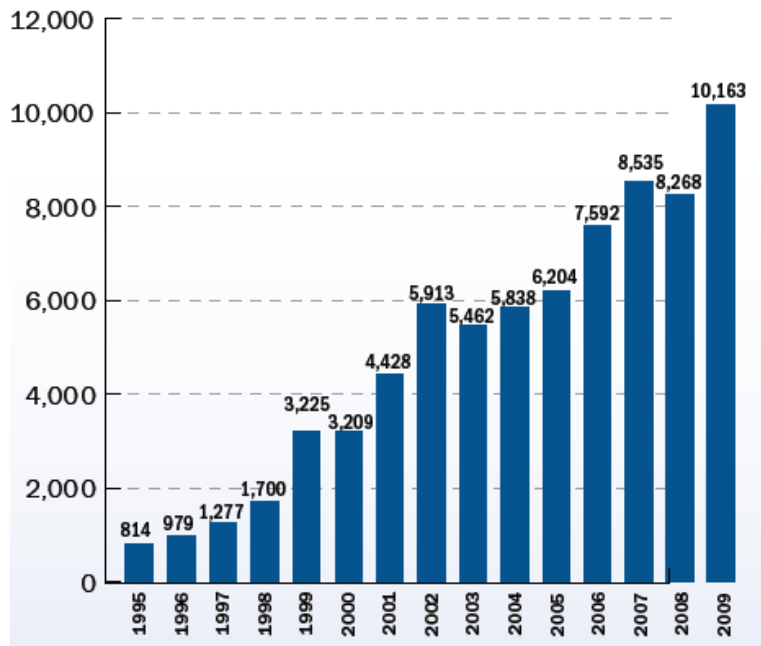
U Europskoj uniji (EU) je 2009. godine instalirano ukupno 26.363 MW [1] kapaciteta za proizvodnju električne energije, od toga je 10.526 MW (39%) kapaciteta za proizvodnju električne energije iz vjetra. U odnosu na 2008. godinu to je porast od 23%. Već 2. godinu za redom instalirani kapacitet za proizvodnju električne energije iz vjetra je veći nego instalirani kapacitet za bilo koju drugu tehnologiju proizvodnje. Investicije u vjetroelektrane 2009. godine su iznosile 13 milijardi €

Godišnja instalacija u posljednjih 15 godina je porasla sa 472 MW (1994.) na 10.526 MW (2009.). Na slici 2 je prikazan godišnji instalirani kapacitet. Ukupni instalirani kapacitet vjetroelektrana u EU iznosi 74.767 MW te je prikazan na slici 3.



Godina	1980.	1985.	1990.	1995.	2000.	2005.
Nazivna snaga	30 kW	80 kW	250 kW	600 kW	1.500 kW	5.000 kW
Promjer rotora	15 m	20 m	30 m	46 m	70 m	115 m
Visina osi vrtnje	30 m	40 m	50 m	78 m	100 m	120 m
Godišnja proizvodnja	35.000 kWh	95.000 kWh	400.000 kWh	1.250.000 kWh	3.500.000 kWh	17.000.000 kWh

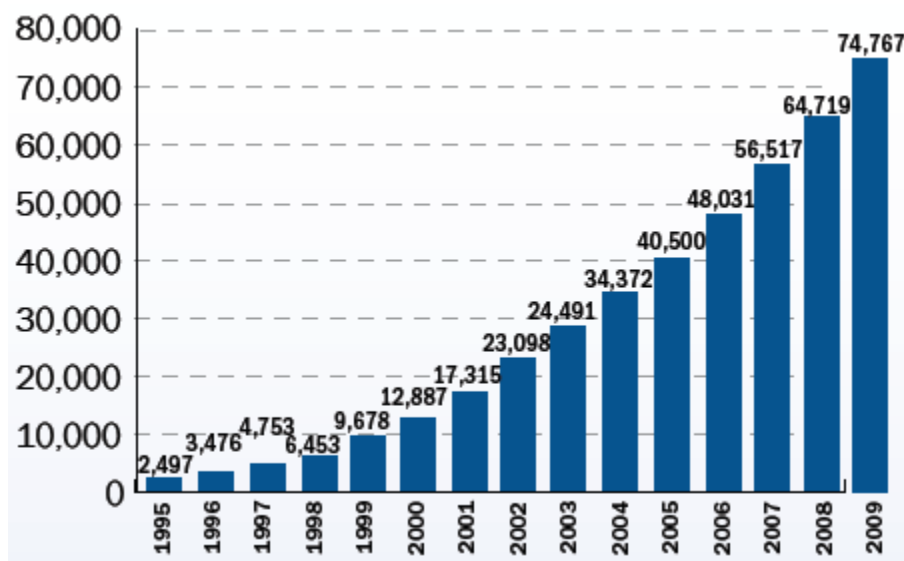
Slika 1 Povećanje snaga i dimenzija vjetroagregata u periodu 1980. - 2005., [2]



Slika 2 Godišnji instalirani kapacitet vjetroelektrana u EU, [1]

U skladu s trendovima u Europi i obavezama europskih država za proizvodnju dijela električne energije iz obnovljivih izvora Hrvatska se uključila u korištenje vjetroenergije, kupnjom i instaliranjem vjetroagregata sa svjetskog tržišta.

Prema studiji koju je za potrebe HEP-a izradio Institut Hrvoje Požar procijenjeni mogući kapaciteti u Hrvatskoj iznose oko 400 MW.



Slika 3 Ukupni instalirani kapacitet vjetroelektrana u EU, [1]

### 2.3. Snaga vjetra

Lopatice rotora vjetroagregata okreću se zbog strujanja zračne mase. Količina energije koju vjetar prenosi na rotor direktno zavisi o gustoći zraka, površini rotora i brzini vjetra. Kinetička energija tijela u pokretu proporcionalna je njegovoj masi, tako da kinetička energija vjetra ovisi o gustoći zraka. Točnije rečeno, što je zrak teži, dobije se više energije na vjetroturbini. Gustoća zraka odnosi se na količini molekula po jedinici volumena zraka. Pri normalnom atmosferskom tlaku i temperaturi zraka od 15 °C težina zraka je 1.225 kg/m<sup>3</sup>, ali sa povećanjem vlažnosti zraka opada i njegova gustoća. Hladniji zrak gušći je od toplijeg, stoga će vjetroagregat pri istoj brzini vjetra proizvesti više električne energije tijekom zime nego tijekom ljeta. Atmosferski tlak opada sa povećanjem nadmorske visine, stoga je na većim nadmorskim visinama (planine) tlak niži, a zrak je manje gust.

Vjetroagregat dobiva svoju ulaznu sagu pretvaranjem jakosti u snagu okretanja lopatice rotora. Nameće se logički zaključak da površina rotora određuje količinu energije koju vjetroagregat može dobiti iz vjetra. Pošto se površina rotora povećava sa kvadratom promjera rotora, dvostruko veća turbina dobiva četiri puta veću količinu energije. Povećanje površine rotora nije toliko jednostavno kao

postavljenje dužih lopatice, budući da se povećanjem površina rotora povećava naprezanje cijelog sustava, nebitno o brzini vjetra. Kako bi se kompenziralo naprezanje potrebno je ojačati cijeli mehanički sustav.

Drugi faktor koji utječe na izlaznu snagu vjetroagregata je činjenica da vjetroagregat utječe na skretanje vjetra, čak prije no što vjetar bude obuhvaćen lopaticama rotora. Dakle, rotor usporava brzinu vjetra, tako da je brzina vjetra manja ispred nego iza rotora, što znači da vjetroagregat ne može iskoristiti cjelokupnu energiju vjetra. Povećanjem brzine vjetra raste količina zračne mase koja prolazi kroz rotor, odnosno dolazi do porasta izlazne snage vjetroagregata. Teoretska izlazna snaga vjetroagregata ovisi o trećoj potenciji vjetra prema formuli:

$$P = \frac{\rho \cdot A \cdot v^3}{2}$$

gdje je:

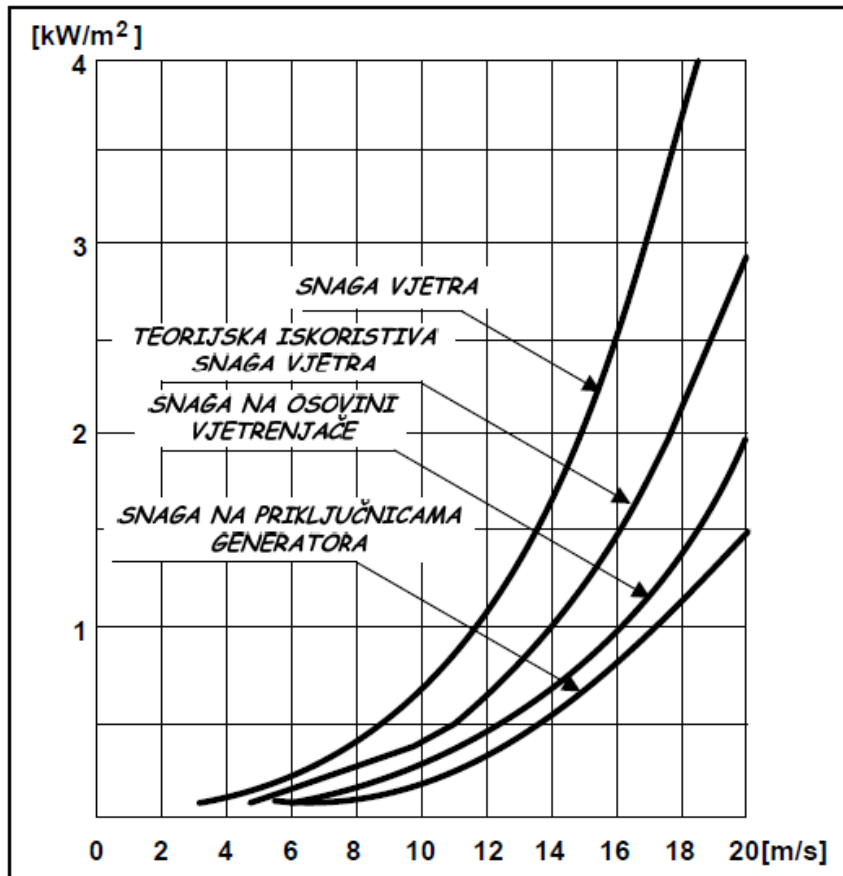
P – specifična snaga vjetra [W/m<sup>2</sup>]

ρ– gustoća zraka [kg/m<sup>3</sup>]

v- prosječna satna brzina vjetra [m/s]

Efektivna snaga koju daje vjetrogenerator ovisi o mnogo faktora, a samo u jednom uskom rasponu ovisi o brzini vjetra na treću potenciju. Maksimalna snaga koja se može dobiti pomoću vjetroagregata računa se pomoću Betzovog zakona, prema kojemu se samo dio raspoložive energije vjetra (59 %) može iskoristiti zato što vjetar mora nastaviti puhati u svom smjeru kako bi ostavio slobodan prostor za nadolazeći zrak. Stoga se cjelokupna kinetička energija vjetra ne može isporučiti na vjetroagregat, što je prikazano na slici 4.



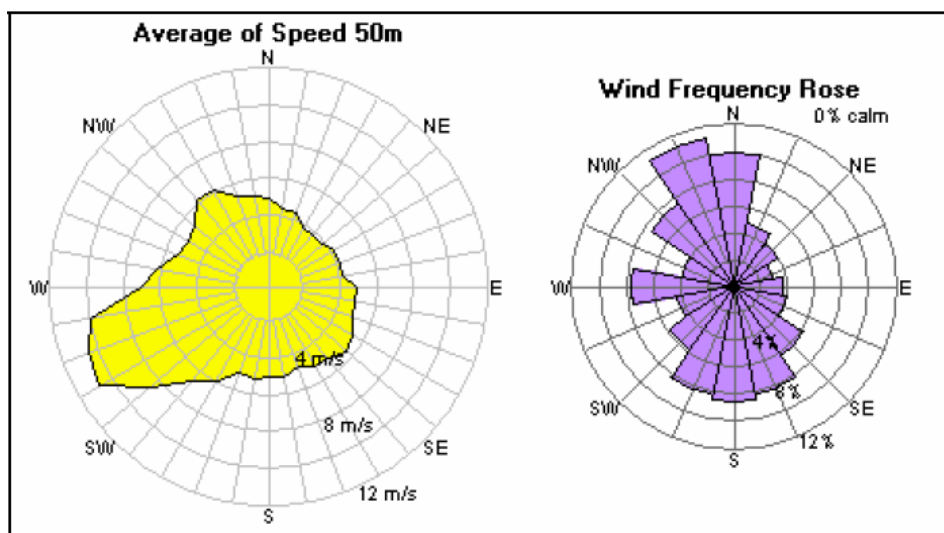


Slika 4 Ovisnost specifične snage o brzini vjetra

#### 2.4. Mjerenje brzine vjetra i ruža vjetrova

Brzina vjetra se obično mjeri sa anemometrom sa poluloptastim čašicama. Takav tip anemometra sastoji se od vertikalne osovine na kojoj se na vrhu nalaze tri poluloptaste čašice koje se okreću u smjeru vjetra. Broj okretaja u minuti registrira se elektroničkim putem. Uz anemometar se obično postavlja vjetrulja, odnosno mehanizam za utvrđivanje smjera vjetra. Drugi tipovi, uključujući ultrazvučni ili laserski anemometar, utvrđuju fazni pomak zvuka ili koherentnu svjetlost reflektiranu molekulama zraka, čime precizno određuju brzinu vjetra na raznim visinama.

Na osnovi prikupljenih podataka o brzinama i pravcima vjetrova, mogu se izraditi dijagrami ruža vjetrova za nekakvu lokaciju. Dijagram ruža vjetrova prikazuje se u obliku kruga koji je, kao kompas, podijeljen na 12 jednakih dijelova, svaki od 30 stupnjeva horizonta, što se uzima kao standard za europski atlas vjetrova (slika 5).



Slika 5 Primjer dijagrama ruže vjetrova za brzine, smjerova i frekvencije vjetrova, [13]

Karakteristike vjetrova na nekoj lokaciji mogu se razlikovati iz godine u godinu, tako da se energetske potencijal vjetra može razlikovati od godine do godine i do 10%, pa je preporučljivo osigurati višegodišnja mjerenja karakteristika vjetrova na nekoj lokaciji. U primjenjenoj vjetroenergetici važno je točno odrediti promjenjivost brzine vjetra na potencijalnoj lokaciji kako bi projektanti smanjili proizvodne troškove električne energije.

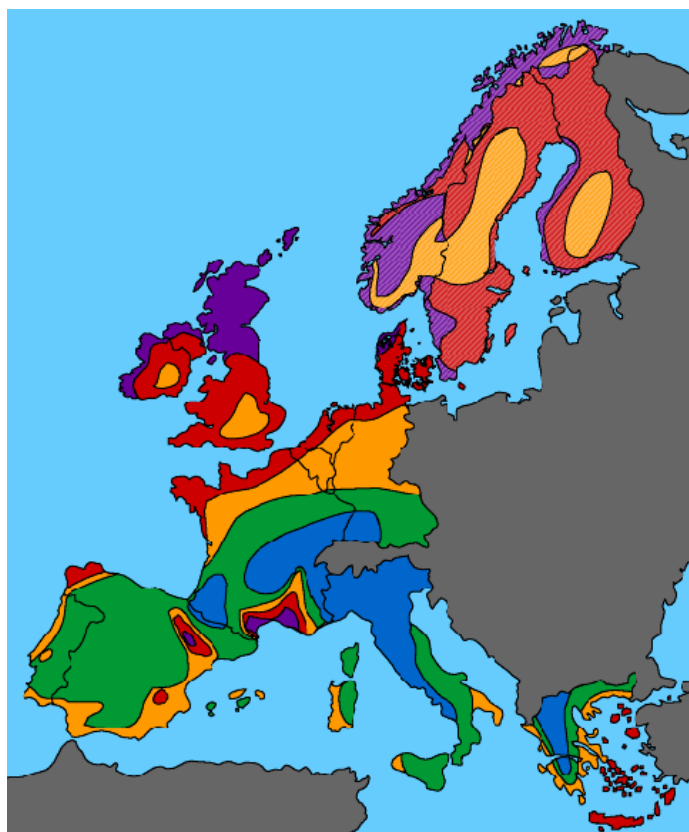
Na karakteristike vjetropotencijala neke lokacije utječe konfiguracija terena, odnosno hrapavost terena, prepreke na tlu i slično. Šumska prostranstva, livade obrasle niskim gmljem i drvećem smanjuju brzine vjetra, dok vodene površine gotovo da i ne utječu na smanjenje brzine vjetra. Stoga se tereni klasificiraju prema hrapavosti. Teren sa više stabala ili visokih objekata ima visoku klasu hrapavosti, primjerice 3 do 4. Suprotno tomu, morska površina ima nisku klasu hrapavosti, najčešće 0. Kao rezultat utjecaja konfiguracije terena mogu nastati lokalne promjene brzine vjetra, tzv. "tunel efekt" i "brdski efekt".

"Tunel efekt" je pojava povećanja brzina vjetra, kada zračne mase prelaze preko planinskih perivoja, a nastaje zbog značajnih redukcija strujnih zračnih površina.









"Brdski efekt" se objašnjava činjenicom da se zrak komprimira kad vjetar struji prema brdu, što dovodi do uzlaznog toka vjetra uz povećanje njegove brzine.

Detaljan prikaz vjetropotencijala za nekakvu lokaciju, ili šire, daje atlas ili karta vjetrova. Izrada atlasa vjetrova skup je i kompliciran postupak koji obuhvaća unos

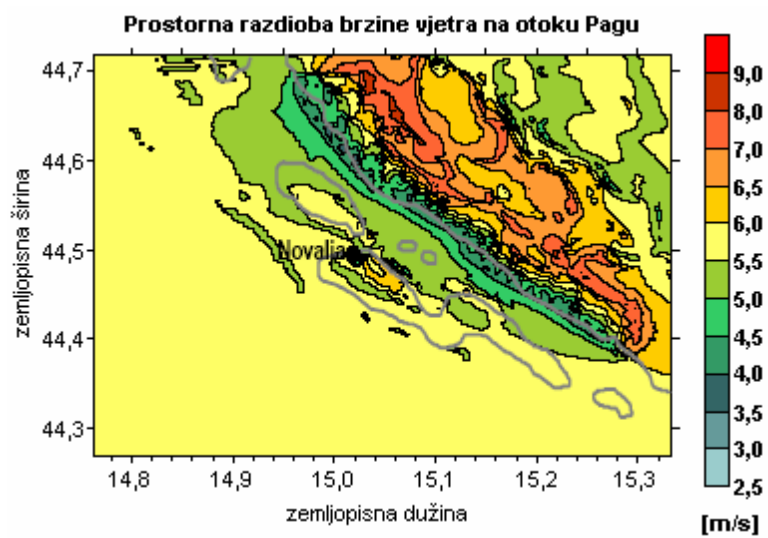
svih mogućih komponenti koje utječu na ponašanje vjetra. Topografija terena se ucrtava pomoću satelita i računalnih programa. Detaljan atlas vjetrova prikazan slikom 6, izrađen je za područje Zapadne Europe, gdje postoji višegodišnja tradicija mjerenja brzina vjetrova, smjera i slično. Izrada atlasa vjetrova za područje Hrvatske u svojim je počecima, trenutno je dostupna karta vjetrova za područje otoka Paga, prikazana slikom 7.



### Podatci o vjetru na 50m iznad zemlje

boja	zaklonjeni teren		otvoreni prostor		na morskoj obali		otvoreno more		brdoviti kraj	
	m/s	W/m <sup>2</sup>	m/s	W/m <sup>2</sup>	m/s	W/m <sup>2</sup>	m/s	W/m <sup>2</sup>	m/s	W/m <sup>2</sup>
	>6.0	>250	>7.5	>500	>8.5	>700	>9.0	>800	>11.5	>1800
	5.0-6.0	150-250	6.5-7.5	300-500	7.0-8.5	400-700	8.0-9.0	600-800	10.0-11.5	1200-1800
	4.5-5.0	100-150	5.5-6.5	200-300	6.0-7.0	250-400	7.0-8.0	400-600	8.5-10.0	700-1200
	3.5-4.5	50-100	4.5-5.5	100-200	5.0-6.0	150-250	5.5-7.0	200-400	7.0-8.5	400-700
	<3.5	<50	<4.5	<100	<5.0	<150	<5.5	<200	<7.0	<400
			>7.5							
			5.5-7.5							
			<5.5							

Slika 6 Europska karta vjetrova, [13]



Slika 7 Karta vjetrova za područje otoka Paga, [13]

### 3. Tehnički rizik pri planiranju

Rizik je sastavni dio svakog poslovanja i projekta. Upravljanje rizikom traži organiziran i analitički pristup. Prema ISO/IEC 73 – 2002 rizik je kombinacija vjerojatnosti nekog događaja i njegovih posljedica.

$$\text{Rizik} = \text{Vjerojatnost} \times \text{Posljedice} [14]$$

Tehnički rizici se mogu podijeliti u 3 kategorije [15]:

- rizici vezani uz vjetar i opremu za mjerenje vjetropotencijala
- rizici vezani uz opremu za proizvodnju električne energije
- rizici vezani uz integriranje vjetroelektrana u elektorenergetski sustav

#### 3.1. Rizici vezani uz vjetar

Rizik vjetra je, općenito gledano, rizik vezan uz nedostatak vjetra. Kod klasičnih tehnologija proizvodnje energije radilo bi se o dostupnosti nafte, plina, ugljena i sl., a kod vjetroelektrana je to vjetar. Budući da je on besplatan, eventualna cijena nema značaj, ali zato postoje druge specifičnosti.

Meteorološki podatci mogu biti od neke pomoći pri određivanju potencijalnih lokacija. Ovdje se ne misli samo na atlas vjetra koji je definitivno bitan za prvi odabir lokacije, već i na dugogodišnja mjerenja koja u Hrvatskoj vrši Državni hidrometeorološki zavod (DHMZ). Uspoređivanje vlastitih mjerenja s postojećim podacima nužno je za procjenu kvalitete mjerenja i korekciju dobivenih podataka. Nažalost, takva su mjerenja u principu udaljena od planirane lokacije vjetroelektrane pa su za ozbiljnija predviđanja proizvodnje praktički neupotrebljiva. Najtočnije je mjerenje na samoj lokaciji vjetroelektrane, i to najmanje 1 godinu, a preporuka je 3 godine.

Mjerenje vjetropotencijala sastoji se od dva dijela. Najprije se određuju potencijalne lokacije na kojima će se pokrenuti mjerenje, a zatim se na odabranim lokacijama vrši mjerenje. Potencijal vjetra neke lokacije određuje se preliminarno i općenito iz postojećih podataka, a konačno i precizno mjerenjem na konkretnoj lokaciji. Vanjski podaci su podaci dostupni na tržištu i oni nisu vezani uz samo mjerenje. Vjetar kao energent ima vrlo nepovoljna svojstva zbog svoje

nestabilnosti. Kvalitetno predviđanje proizvodnje ovisi najviše o kvalitetnom mjerenju. Dodatni problem u Hrvatskoj je nedostatak atlasa vjetrova koji je u fazi izrade.

Kvalitetno mjerenje vjetra je jedan od važnih faktora za projekt vjetroenergije. U razvijenim zemljama prakticira se dugogodišnje mjerenje brzine vjetra s odgovarajućom industrijskom potporom na tom području (mjerna oprema, programska podrška za modeliranje karakteristika i sl.). U Hrvatskoj se mjeri na različite načine koji variraju od certificiranih mjernih uređaja (stupova) do vješanja neumjerenih anemometara na dalekovodne stupove.

Pri mjerenju vjetropotencijala ne mjeri se samo „brzina“ vjetra, već i druge karakteristike koje mogu biti važne za izradu modela strujanja (vertikalna brzina vjetra, temperatura i sl.). Također je važno mjerne uređaje postaviti dovoljno visoko kako bi se određivanje modela strujanja zraka na visini agregata što manje oslanjalo na računalnu simulaciju, a što više na mjerene vrijednosti. Idealno bi bilo postaviti mjerni stup visine jednake onoj koja se planira za agregat, što je u svakom slučaju iznad 50 m.

Visina stupa na koji će se postaviti vjetroagregat ne ovisi nužno o snazi uređaja. Iz mjernih bi se rezultata moralo moći odrediti optimalnu visinu, odnosno uspostaviti krivulju odnosa proizvodnosti i troškova s visinom. Neki proizvođači također daju na izbor promjer rotora za isti generator.

Kvalitetno mjerenje podrazumijeva i obradu podataka. Podizvoditelj bi u okviru mjerenja trebao ponuditi i određivanje razmještaja agregata na lokaciji.

Osim kvalitete za mjerenje vjetropotencijala bitno je i trajanje. Osnovni ciklus vjetroprihoda podrazumijeva jednu godinu mjerenja, ali će većina voditelja projekata navesti da je nužno mjeriti barem dvije godine kako bi se dobili pouzdani rezultati. Također se preporuča nastavak mjerenja i za vrijeme eksploatacije elektrane. Ovi podatci su potrebni za slučaj eventualnog proširenja (uglavnom se vjetroelektrana gradi u fazama zbog raspodjele troškova), ali i za kontrolu vjetroprihoda lokacije.

Posljedice rizika dobivanja nekvalitetnih rezultata obrnuto su proporcionalne kvaliteti lokacije. Eventualna je posljedica ostvarenja tog rizika ulazak u projekt izgradnje vjetroelektrane koja će imati lošu karakteristiku proizvodnje. Vjerojatnost

da se zanemari neka kvalitetna lokacija zbog lošeg mjerenja je manja, kao i posljedice takve greške. U Hrvatskoj su prve odabrane najkvalitetnije lokacije i one su sada većinom zauzete, barem u području priobalja koje je uočeno kao najisplativije za razvoj projekata. U takvim se uvjetima velik broj voditelja projekata odlučio na upitne metode mjerenja, zanemarujući navedene rizike. Preostale lokacije su zahtjevnije sa stanovišta mjerenja vjetropotencijala pa će utjecaj rizika od nekvalitetnih mjerenja ovdje biti velik.

Mjerenje vjetra povezano je s uvjetima za dobivanje kredita. U većini slučajeva se u projektima vjetroelektrana primjenjuje projektno financiranje, što znači da se kredit vraća iz prihoda od prodaje energije. Banka (ili slična institucija koja se bavi kreditiranjem) se za odobrenje kredita oslanja na predviđenu proizvodnju, a dokaz za to je mjerenje. Ako mjerenje ne zadovoljava standarde postavljene od strane banke, teško je dobiti kredit. Većina banaka traži da mjerna oprema bude umjerena po nekom standardu i da mjerenje bude reprezentativno. Također se traži redovito kalibriranje opreme od strane referentne institucije te ponovno kalibriranje nakon kvara. Slučajevi odbijanja zahtjeva za kreditom zbog nekvalitetnog mjerenja nisu rijetki.

### **3.2. Rizici vezani uz opremu**

Tehnologija iskorištavanja vjetra nije više tako nova, ali je proizvodnja električne energije s postojećom tehnologijom još uvijek rizičnija nego eksploatacija fosilnih goriva ili vode. Jedan od uzroka povećanog rizika u odnosu na poznate tehnologije je i brzi razvoj te stalne inovacije opreme za iskorištavanja vjetra.

Problem je što predviđanje mogućeg otkazivanja komponenata zahtijeva dugogodišnje praćenje i analiziranje podataka koje je kod opreme za iskorištavanja vjetra još u začetku. Voditelji projekata (i investitori) ne moraju biti upućeni u detalje vezane za opremu jer je to dio koji se kupuje na tržištu i svi potencijalni problemi i poslovi se prenose na dobavljača. Oprema se sa aspekta voditelja projekata može promatrati kao „crna kutija“ pa se svi rizici svode na rizik odabira pouzdanog i kvalitetnog dobavljača (podizvoditelja). Ovdje se mogu pojaviti dvije situacije [16].

U prvom slučaju dolazi do nepredviđenih problema vezanih uz opremu jer voditelj projekta nije analizirao podizvedeni dio poslova, a dobavljač ih nije dovoljno

kvalitetno obavio. Takva situacija je moguća usprkos eventualnom iskustvu i kvaliteti dobavljača, budući da u Hrvatskoj trenutno postoji samo pet vjetroelektrana (u kojima je instalirana oprema proizvođača Vestas i Enercon). Najčešće će dobavljač upotrijebiti tipske ugovore koje inače koristi na drugim tržištima i u klimatsko-geološkim uvjetima koji mogu biti vrlo različiti od Hrvatskih. Takvo ugovaranje ga oslobađa od rješavanja novih problema, odnosno svaki rizik zbog specifičnosti lokacije se prebacuje na voditelja projekta.

Drugi slučaj je prenošenje svih predviđenih i nepredviđenih rizika od voditelja projekta na druge. Takvo uređenje poslova opet zahtijeva detaljniju analizu rizika kako bi se predvidjeli svi potencijalni problemi, a u svakom je slučaju skupo i teško provedivo u hrvatskim uvjetima. Za razliku od zemalja u kojima su projekti vjetroenergije svakodnevnica, osiguravajuće kuće u Hrvatskoj nemaju relevantna znanja pa određuju visoke premije.

### 3.2.1. Vjetroagregat

Razvoj modernih vjetroagregata namijenjenih proizvodnji električne energije iz vjetra traje već nekoliko desetaka godina, a ubrzan je poticanjem vjetroenergetike. Tehničko rješenje koje dominira među vjetroagregatima većih snaga (od 1 MW i više) temelji se na konceptu s tri lopatice. Okretanjem lopatica pokreće se generator koji proizvodi električnu energiju.

Lopatice i generator mogu biti spojeni direktno ili indirektno. Indirektni pogon podrazumijeva upotrebu multiplikatora koji brzinu okretanja lopatica mehanički prilagođava generatoru. U ovom se slučaju obično radi o asinkronom generatoru koji mora imati konstantnu brzinu vrtnje. Rješenje s multiplikatorom je starije, ali još uvijek najčešće među proizvođačima. Direktni pogon je novije rješenje i kvalitetnije. Vjetroagregat s direktnim pogonom koristi sinkroni generator koji se vrti promjenjivom brzinom, a na mrežu se spaja preko frekvencijskog pretvarača da bi izlazni napon imao mrežnu frekvenciju.

Voditelji projekata vrlo često odgađaju odluku o proizvođaču do zadnjeg trenutka, a promjena dobavljača neposredno prije početka radova na terenu također nije rijedak slučaj. Iako dobavljač daje garancije za svoju opremu i preuzima odgovornost za rješavanje mogućih tehničkih problema, postoje neke odluke koje



nije dobro u potpunosti prepustiti dobavljaču opreme, budući da je njegov interes za projekt ograničen.

Još uvijek postoji značajan rizik od otkazivanja komponenti. Najbolji način smanjenja ovog rizika je inzistiranje na certificiranim proizvodima i garancijama.

### 3.2.2. Sustav upravljanja

Neprikladan sustav upravljanja može uzrokovati česta isključenja agregata i smanjen broj radnih sati. U principu sustav upravljanja dolazi s izborom dobavljača opreme, ali treba voditi računa i o lokaciji. Slično kao kod mjerenja, sustavi upravljanja razvijeni za prilike konstantnog vjetera ne moraju biti dobri za hrvatske prilike, a to je rizik koji dobavljač najčešće neće uzeti u obzir. Kao primjer rizika vezanog za sustav upravljanja može poslužiti vremensko područje u kojem upravljanje reagira. Ako sustav upravljanja radi u minutnom području, parametriran je tako da reagira na promjene brzine vjetera koje nisu češće od npr. 10 minuta. Takav sustav će raditi loše u uvjetima vrlo promjenjivog vjetera (kakav je na brojnim lokacijama u Hrvatskoj). Ako je automatski ponovni uklop vjetroagregata podešen na 10 minuta, a slučaj isklopa zbog udara vjetera se događa učestalo, elektrana neće raditi koliko bi trebala. Daljnji je problem u tome što se mehaničke komponente upravljanja (motori, kočnice) biraju ovisno o sustavu upravljanja pa će troškovi naknadnog poboljšanja sustava biti znatno veći od promjene parametara programa. Neprikladan sustav upravljanja može uzrokovati brže starenje komponenti i smanjenje životnog vijeka elektrane.

### **3.3. Rizici vezani uz integriranje vjetroelektrana u EES**

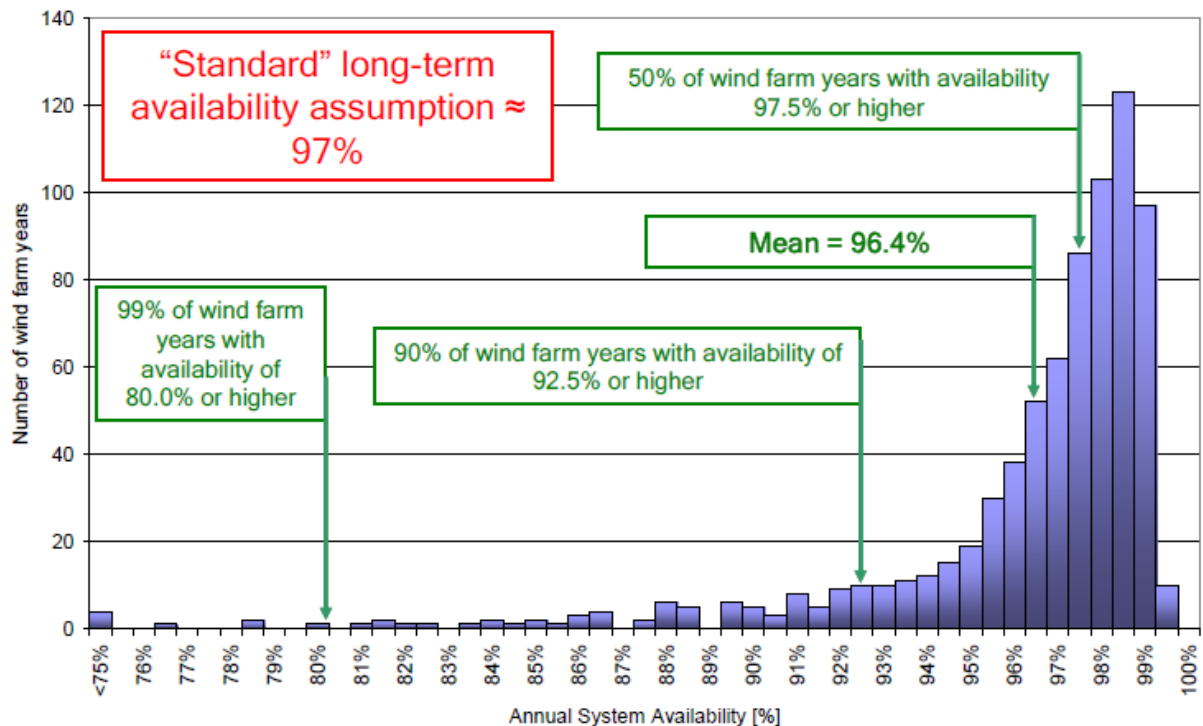
Za sada u Hrvatskoj postoji tek pet vjetroelektrane pa je njihov utjecaj zanemariv, ali zbog velikog interesa za izgradnjom treba pratiti iskustva zemalja u kojima se vode brojne rasprave na ovu temu.

Rizici koji se ovdje pojavljuju vezani su uz moguće nametanje visokih troškova od strane operatora prijenosnog i distributivnog sustava da bi se opravdali troškovi nastali zbog utjecaja vjetroelektrana na elektroenergetski sustav. U Hrvatskoj je situacija nepovoljna zbog velikog utjecaja HEP-a koji bi mogao jednostrano procijeniti ove troškove.

Najznačajniji utjecaji vjetroelektrana na elektroenergetski sustav je nadogradnja mreže zbog vjetroelektrane. Potrebe za nadogradnjom prijenosne i razdjelne elektroenergetske mreže uzrokovane povećanjem udjela vjetroelektrana u elektroenergetskom sustavu uzrok su brojnih nesporazuma. Operatori sustava optužuju vjetroelektrane zbog unošenja velikih troškova koje pokušavaju nametnuti vlasnicima vjetroelektrana. Troškovi nadogradnje prijenosne i distribucijske mreže uzrokovane vjetroelektranama ovise u njihovom udjelu, a za udio vjetroelektrana od 10 % iznose 1€/MWh [17].

## 4. Raspoloživost

Moderni vjetroagregati danas dosežu visoku raspoloživost od 95% do 99%. Industrijski standard je oko 97%. Na slici 8 je prikazana distribucija godišnje raspoloživosti. Ova distribucija daje uvid u učestalost pojave različitih raspoloživosti, i pokazuje koliko je realan industrijski standard raspoloživosti od 97%.

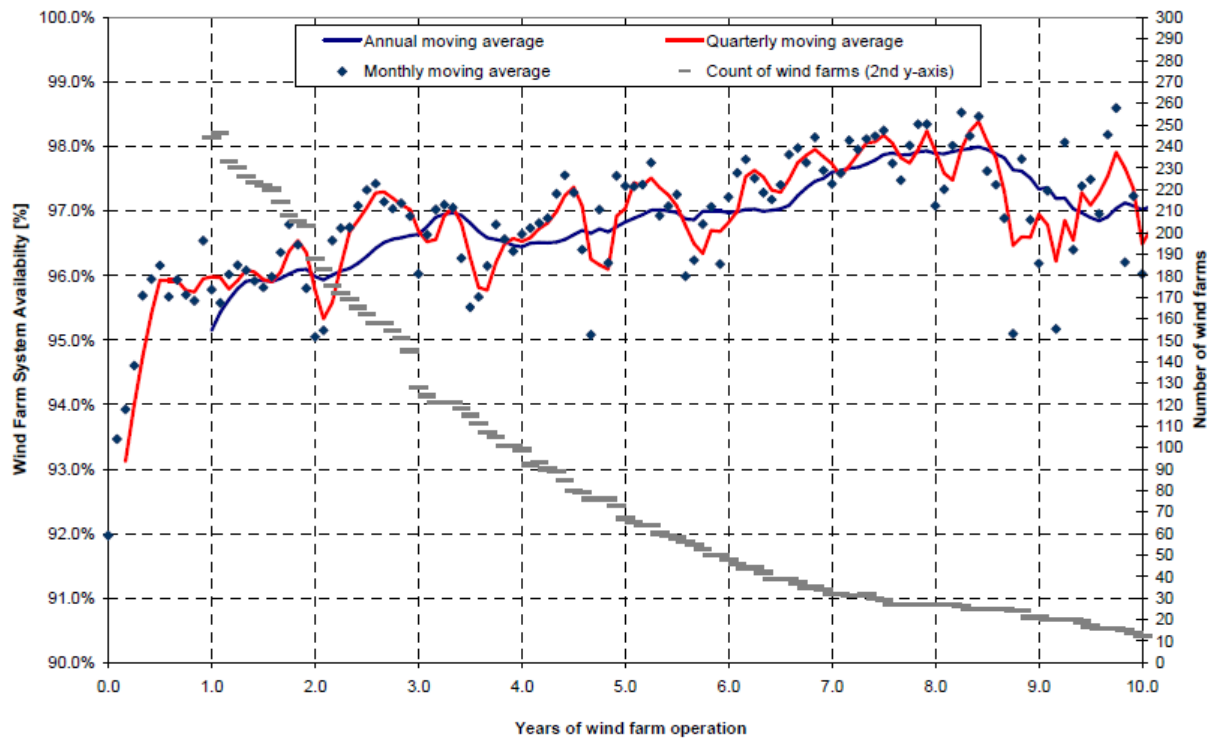


Slika 8 Raspodjela prosječne godišnje raspoloživosti, [4]

Na x-osi je prikazana godišnja raspoloživost elektrana, a na y-osi broj elektrana. Srednja raspoloživost je 96,4% što je malo manje od standarda: 50% vjetroelektrana ima raspoloživost veću od 97,5%; 90% vjetroelektrana ima raspoloživost veću od 92,5 %, a samo 1% raspoloživost ispod 80%.

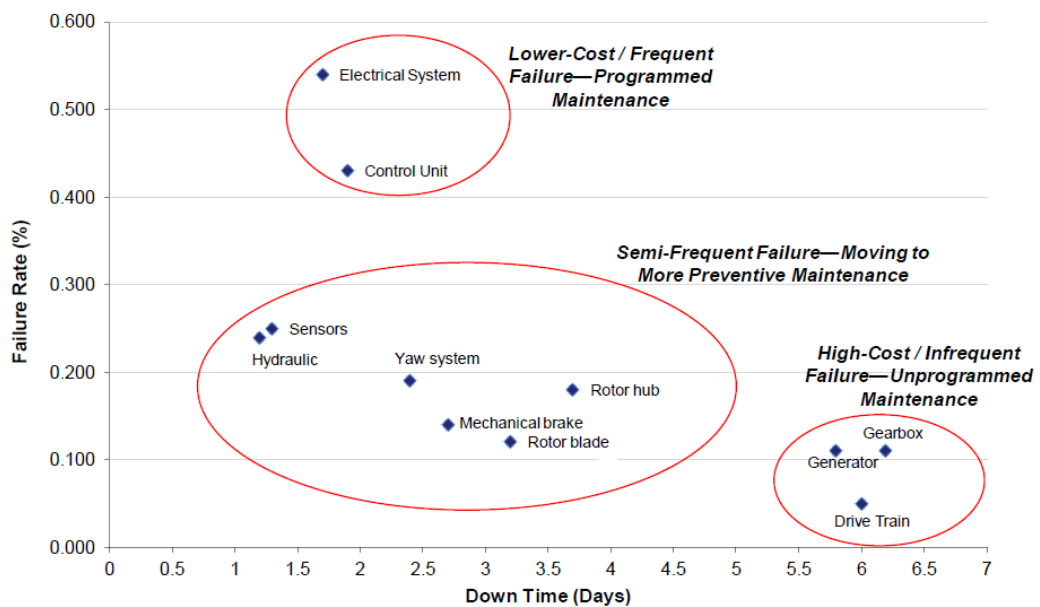
Raspoloživost vjetroelektrana varira kroz njihov životni ciklus (slika 9). Na početku rada vjetroelektrana ima raspoloživost oko 93%, do kraja druge godine rada raspoloživost naraste na 96%, a nakon toga se ustali na 97 – 98%.

Iako je raspoloživost vjetroelektrana vrlo visoka, popriličan broj kvarova uzorkuje neplanirane prekide rada, do deset prekida godišnje, što uzorkuje velike napore pri održavanju, gubitke u proizvodnji i velike novčane gubitke.

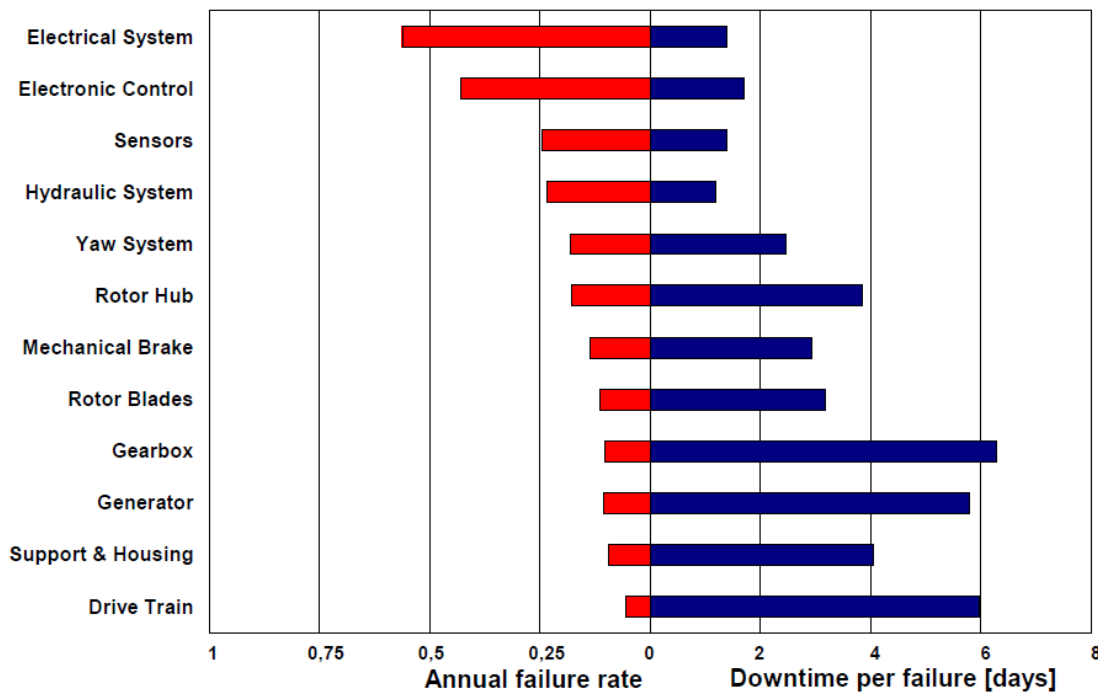


Slika 9 Raspoloživost kroz životni ciklus, [4]

Na slici 10 i 11 je prikazana učestalost kvarova pojedinih komponenti i broj dana prekida rada vjetroelektrane uzrokovanih tim kvarovima.



Slika 10 Učestalost kvara komponenti, [5]

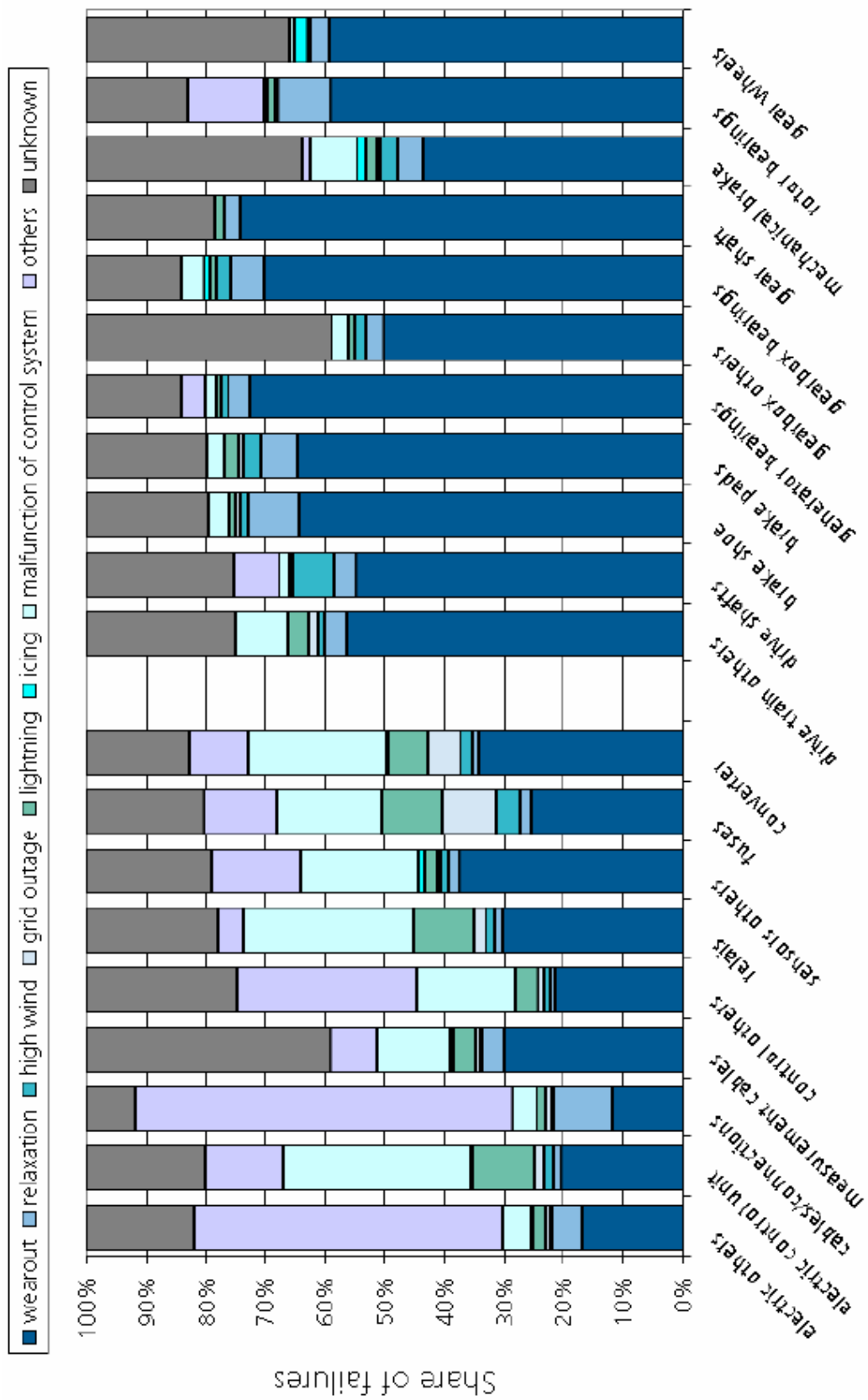


Slika 11 Učestalost kvara komponenti i broj dana prekida rada, [18]

Na slikama je vidljivo da najveću učestalost kvara imaju elektroničke komponente. Dok mehaničke komponente imaju duže vrijeme prekida nakon kvara.

Uzroci kvarova komponenti mogu biti različiti. U manje od četvrtine svih slučajeva kvarovi su uzrokovani vanjskim utjecajima. Nadalje, oluje, munje, nanosi leda i ispadi mreže, češće uzrokuju kvarove elektroničkih komponenti nego mehaničkih. Na slici 12 su prikazani uzroci kvarova na elektroničkim (lijevo) i mehaničkim (desno) komponentama. Ipak, u većini slučajeva vanjske uzroke i kvarove vezane uz njih je teško predvidjeti i veća vjerojatnost da se spriječe je optimiziranjem izvedbe ili sigurnosnim mjerama. Međutim, za to je potrebno duboko znanje o različitim kvarovima.

Uzorci kvarova se mogu podijeliti u 2 skupine; prema učestalosti kvara i prema ozbiljnosti kvara. Postoje manji kvarovi koje se može otkloniti za nekoliko sati i ozbiljniji kvarovi, koji se pojavljuju rjeđe, ali mogu uzrokovati prekid rada i do nekoliko dana. Manji kvarovi se mogu predvidjeti unaprijed i može ih se spriječiti optimizacijom izvedbe. Većinu teških kvarova uzrokuje neočekivana trošenja i stoga ih se više ili manje može predvidjeti sa sofisticiranih sustavima za praćenje stanja.



Slika 12 Uzroci kvarova za različite komponente, [6]

Tablica 1 Uzroci kvarova i mogućnosti njihovog sprečavanja

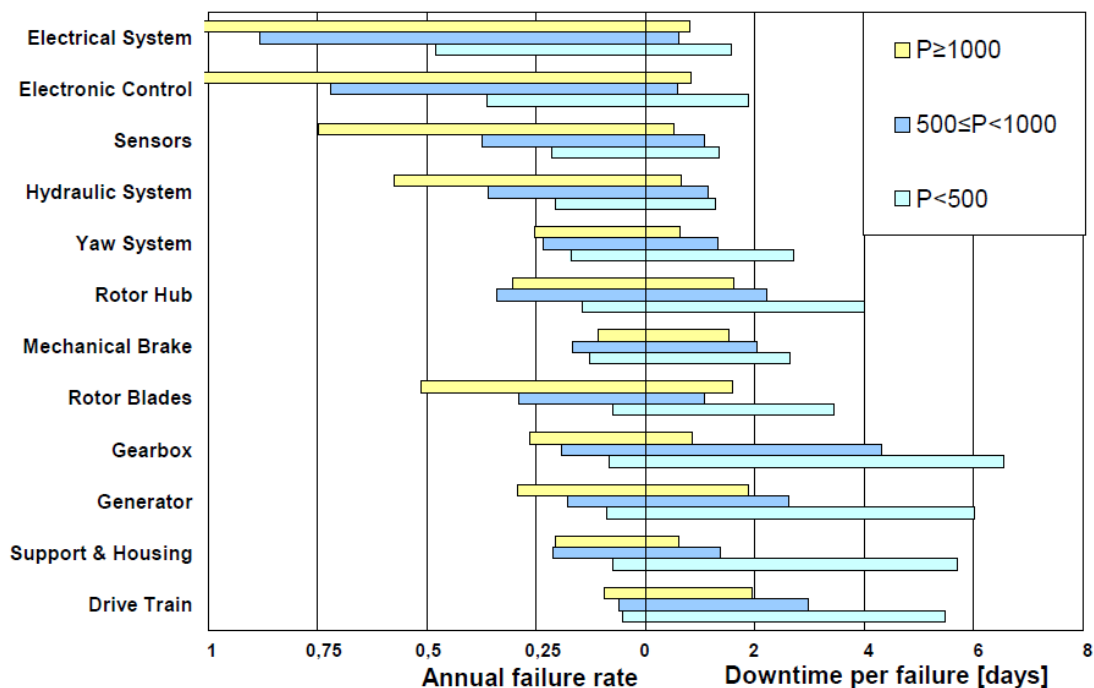
UZROK KVARA	NAČIN SPRJEČAVANJA
MUNJE	OPTIMIZIRANJE IZVEDBE
ISPAD MREŽE	
KVAR SUSTAVA ZA UPRAVLJANJE	
ZALEĐIVANJE	
OLUJE	
TROŠENJE	PRAĆENJEM STANJA
SLABLJENJE	
DRUGI	NEPOZNATO
NEPOZNATO	

#### 4.1. Izbor tehnologije

Pravilan izbor tehnologije uvelike utječe na pouzdanost. Različite tehnologije mogu uzrokovati povećanje ili smanjivanje pouzdanosti komponenti, a time i raspoloživost cijelog sustava. U nastavku će biti prikazane osnovne razlike između različitih tehnologija.

##### 4.1.1. Veličina turbine

Jedan od parametara koji utječe za raspoloživost je veličina turbine. Turbine su po snazi podijeljene u 3 grupe: do 500 kW, 500 – 1000 kW i više od 1000 kW. Na slici 13 su prikazane tipične vrijednosti i razlika među njima.



Slika 13 Pouzdanost turbina ovisno o veličini, [7]

Vidljivo je da postoji velika razlika između turbina različitih veličina. U jednu ruku se učestalost kvara povećava povećanjem turbine, dok se u drugu ruku trajanje prekida poslije kvara smanjuje povećanjem turbine. Moguće objašnjenje za ovaj slučaj je da službe za održavanje brže obavljaju svoj posao na većim turbinama.

#### 4.1.2. Ograničavanje izlazne snage

Energija koja može biti preuzeta od vjetra ovisi o brzini vjetra. Poslije dostizanja nominalne snage, snaga vjetrogeneratora bi trebala ostati konstantna kod svih brzina vjetra većih od nominalne brzine zbog toga jer turbina i generator ne mogu podnijeti više energije. Zbog toga, vjetroelektrana mora limitirati snagu pomoću jedne od slijedeće dvije metode:

- Metoda zavjetrine (*Stall control*)
- Metoda promjene kuta lopatica rotora (*Pitch control*)

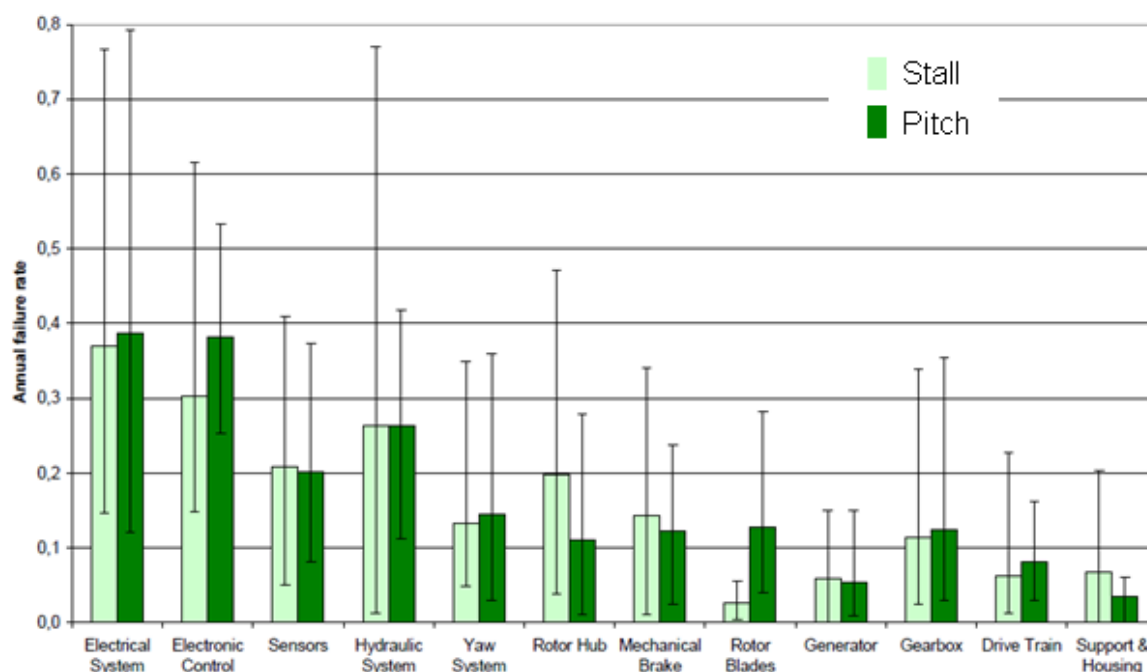
#### **Metoda zavjetrine (*Stall control*)**

Metoda zavjetrine se bazira na efektu stvaranja vrtložnih struja, a sa time i zavjetrine kod velikih upadnih kutova koji se sami povećavaju pri povećanju brzine vjetra. Ovaj efekt smanjuje uzgon na površini zahvaćenoj ovim efektom te na taj način limitira snagu koju vjetar prenosi na lopatice rotora. Kod ovoga načina zaštite vjetrogeneratora lopatice rotora se ne pomiču, te kut pod kojim su postavljene uvijek ostaje konstantan. Ovakav način zaštite vjetrogeneratora se realizira samom konstrukcijom lopatica te ne zahtijeva napredne tehničke sustave za njezin rad. Negativna strana ovakvog načina zaštite vjetrogeneratora je u tome što ne omogućava nikakvo naknadno upravljanje zbog toga što je ovaj način zaštite isključivo pasivan. Maksimalnu snagu novodizajniranog rotora nije lako procijeniti zbog kompliciranog matematičkog proračuna strujanja fluida. Nakon dostizanja maksimalne snage, izlazna snaga generatora zaštićenog ovom metodom opada. Ovako zaštićeni sustavi moraju imati još dodatne aerodinamičke kočnice koje pomažu vjetrogeneratorima sa ovakvim načinom zaštite da prežive oluje.



## Metoda promjene kuta lopatica rotora (*Pitch control*)

Mnogi proizvođači vjetroagregata preferiraju metodu zaštite svojih vjetroagregata pomoću promijenjivog kuta lopatica rotora, iako je ovu metodu zaštite tehnički puno teže izvesti. Međutim, pošto je ova metoda zaštite aktivna metoda, ona se može prilagoditi različitim uvjetima. Zaštita metodom promjene kuta lopatica rotora automatski prilagođava kut lopatica rotora, a samim time i upadni kut, smanjujući ga ili povećavajući, ovisno o prilikama. Lopatice rotora se okreću u vjetar prilikom većih brzina vjetra, smanjujući upadni kut i tako se aktivno smanjuje ulazna snaga na lopaticama rotora. Izrada ovako zaštićenih i kontroliranih vjetrogeneratora je kompliciranija, zato jer lopatice rotora moraju biti pomično učvršćene na vrh osovine, i mora postojati još dodatni motor koji bi upravljao nagibom lopatica. Manji sustavi uobičajeno upotrebljavaju mehanički kontroliran mehanizam promjene kuta lopatica rotora oslanjajući se na centrifugalnu silu. Ako se vjetrogenerator kompletno isključen zbog zaštite od oluje i ako postoji mogućnost zakretanja kuta lopatica rotora, mogu se lopatice rotora okrenuti u položaj pera (najmanja moguća silueta koja stoji na putu vjetra), te se tako smanjuje njen otpor vjetru i mogućnost oštećenja.



Slika 14 Učestalost kvara ovisno o načinu upravljanja snagom, [7]

Pitch upravljanje se koristi za povećanje efikasnosti i smanjenje naprezanja mehaničkih komponenti pogonskih nizova. Međutim, pitch upravljanje povećava mogućnost kvarova. Na slici 14 je prikazana razlika između pitch i stall upravljanja.

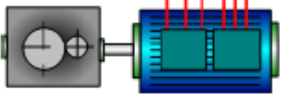
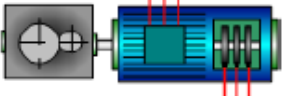
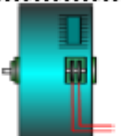
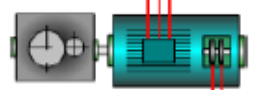
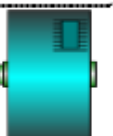
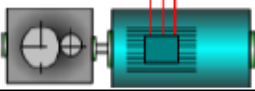
Čini se da komponente vezane uz pitch upravljanje, povećavaju učestalost kvara. Dok se u drugu ruku mehaničke kočnice češće moraju popravljati kod stall upravljanja. Ova prednost pitch upravljanje je zbog toga što se prvo smanji sila i moment rotoru, a zatim se aktivira mehanička kočnica. Osim kočnice i glava rotora se češće mora popravljati kod stall upravljanja. Električni sustavi, multiplikator, upravljačka jedinica i lopatice imaju manju pouzdanost kod pitch upravljanja. U ostalim segmentima nema velikih razlika.

#### 4.1.3. Generatori

S obzirom da su brzine vrtnje vjetrove turbine prirodno niske, približno u rasponu od 5-30 o/min, bez obzira kako se reguliraju, izbor vrste generatora ovisi o tome da li se koristi multiplikator brzine i kakav je priključak na mrežu. U suvremenim izvedbama se koriste generatori izmjenične struje, asinkroni i sinkroni u više varijanti. Istosmjerni generatori koriste se za snage reda nekoliko kW. Za turbine fiksne brzine koriste se obično asinkroni generatori, kavezni i klizno-kolutni i direktno se spajaju na mrežu (bez električkog pretvarača frekvencije). Neophodan je multiplikator brzine vrtnje kojemu je prijenosni omjer toliko veliki da se može izabrati 4 ili 6 polni asinkroni generator. Po svojim svojstvima asinkroni generator s mnogo polova ( $2p > 20$ ) je praktički neprihvatljiv za primjenu zbog lošeg faktora snage  $\cos \phi$  (0,6 ili još manje bez kompenzacije) i zbog toga relativno slabih energetske pokazatelja.

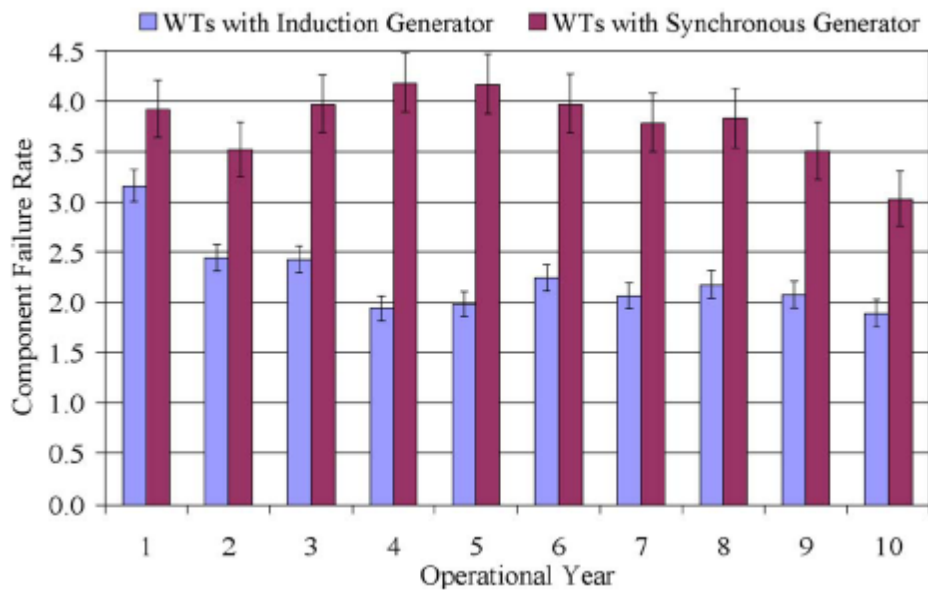
U tablici 2 je prikazana usporedba osnovnih svojstava, relativnih prednosti i nedostataka za šest izvedbi najčešće primjenjivanih agregata u vjetroelektranama.

Tablica 2 usporedba različitih tehnologija generatora za vjetroagregate, [2]

Generator	Prednosti	Nedostaci
<p><b>Asinkroni kavezni jedno ili dvovrzinski generator (<math>2p=4</math> ili <math>6</math>)</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- jednostavnost izrade</li> <li>- jednostavno održavanje</li> <li>- prigušenje pulzacija momenta turbine</li> <li>- niska nabavna cijena</li> <li>- izravni spoj na mrežu</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- potrebna jalova energija</li> <li>- potreban soft start uređaj za prvo priključenje na mrežu</li> <li>- primjenjivo samo za fiksne brzine turbine</li> <li>- upotreba multiplikatora</li> <li>- neupotrebljivo za mnogo polova (<math>&gt;20</math>)</li> </ul>
<p><b>Asinkroni klizno-kolutni dvostrano hranjeni generator</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- bitno smanjena snaga i cijena pretvarača</li> <li>- mogućnost regulacije brzine vrtnje (tipično <math>\pm 20-25\%</math>) za optimalno korištenja energije</li> <li>- jalova snaga za magnetiziranje stroja iz pretvarača</li> <li>- moguć podsinkroni i nadsinkroni rad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- klizni koluti i četkice, trošenje, održavanje</li> <li>- složeno upravljanje agregatom</li> <li>- izravni spoj na mrežu otežan</li> </ul>
<p><b>Sinkroni generator s uzбудnom strujom na rotoru</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- jednostavno upravljanje jalovom snagom</li> <li>- široko područje brzina vrtnje</li> <li>- jednostavan za upravljanje</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- potreban pretvarač za ukupnu snagu</li> <li>- potreban uzbudni sustav</li> <li>- klizni koluti i četkice, trošenje i održavanje</li> </ul>
<p><b>DIREKTAN POGON</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- jednostavnija izvedba cijelog vjetroagregata jer nema multiplikatora koji se smatra kompliciranim za izradu i održavanje,</li> <li>- veća korisnost agregata</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- velike dimenzije i masa, problemi izrade, transporta i montaže generatora</li> </ul>
<p><b>S MULTIPLIKATOROM</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- male dimenzije i masa generatora</li> <li>- standardni generator</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- visoka cijena, gubici (2-3) % i problemi održavanja multiplikatora</li> </ul>
<p><b>Sinkroni generator s trajnim magnetima</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- jednostavan rotor bez potrošnih dijelova i uzbudnog namota</li> <li>- nema gubitaka u rotoru, veća korisnost agregata</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- visoka cijena trajnih magneta</li> <li>- mogućnost razmagnetiziranja</li> <li>- nema regulacije struje uzbude</li> </ul>
<p><b>DIREKTAN POGON</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- jednostavnija izvedba cijelog vjetroagregata jer nema multiplikatora koji se smatra vrlo kompliciranim za izradu i održavanje, veća korisnost agregata</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- velike dimenzije i masa, problemi izrade, transporta i montaže</li> </ul>
<p><b>S MULTIPLIKATOROM</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- male dimenzije i masa generatora,</li> <li>- standardni generator</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- visoka cijena, gubici (2-3) % i problemi održavanja multiplikatora</li> </ul>

Prema WMEP<sup>1</sup> podacima više se koriste asinkroni nego sinkroni generatori, u odnosu 73% prema 27%. Od sinkronih generatora, 23% koristi direktan pogon.

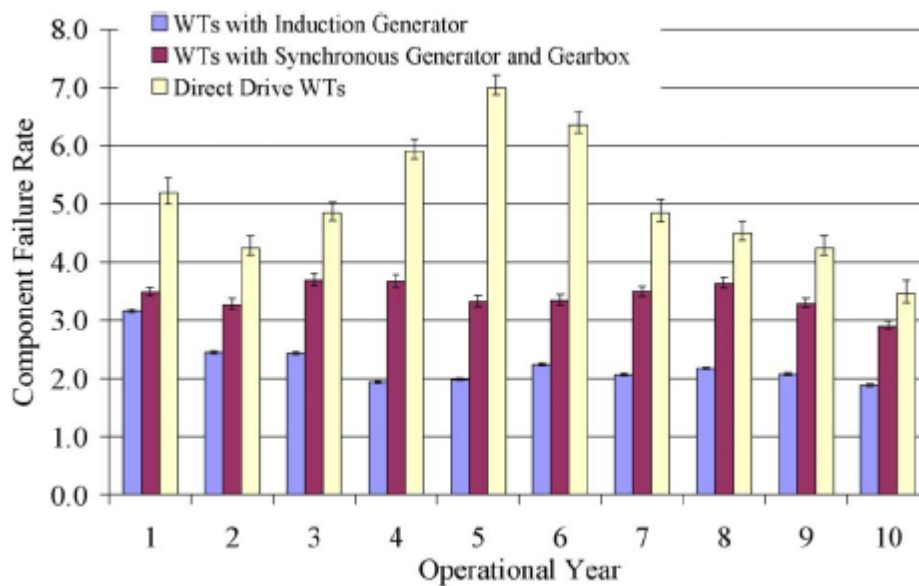
<sup>1</sup> Wissenschaftlichen Mess - und Evaluierungsprogram



Slika 15 Učestalost kvara vjetroagregata ovisno o vrsti generatora, [8]

Na slici 15 je prikazan odnos učestalosti kvarova vjetroagregata koji koriste sinkrone i asinkrone generatore. Vidljivo je da veću učestalost kvara imaju vjetroagregati sa sinkronim generatorom. Podaci za asinkrone generatore pokazuju veću učestalost u prvoj godini koja zatim pada i nakon treće godine je relativno konstantna od kraja desetogodišnjeg rada. Dok je u drugu ruku kod sinkronih generatora vidljiva povećana učestalost kvara nakon prve godine (više od 5 godina). Uzrok tomu može biti uvođenje direktnog pogona na tržište. Zadnjih nekoliko godina podaci pokazuju tendenciju smanjenja učestalosti, ukazujući na razvoj koncepta direktnog pogona kao i otklanjanje početnih problema. Međutim, podaci pokazuju, da se prosječno 31% kvarova odnosi na vjetroagregate sa direktnim pogonom, a kako je ranije spomenuto, taj koncept predstavlja samo 23% sinkronih generatora.

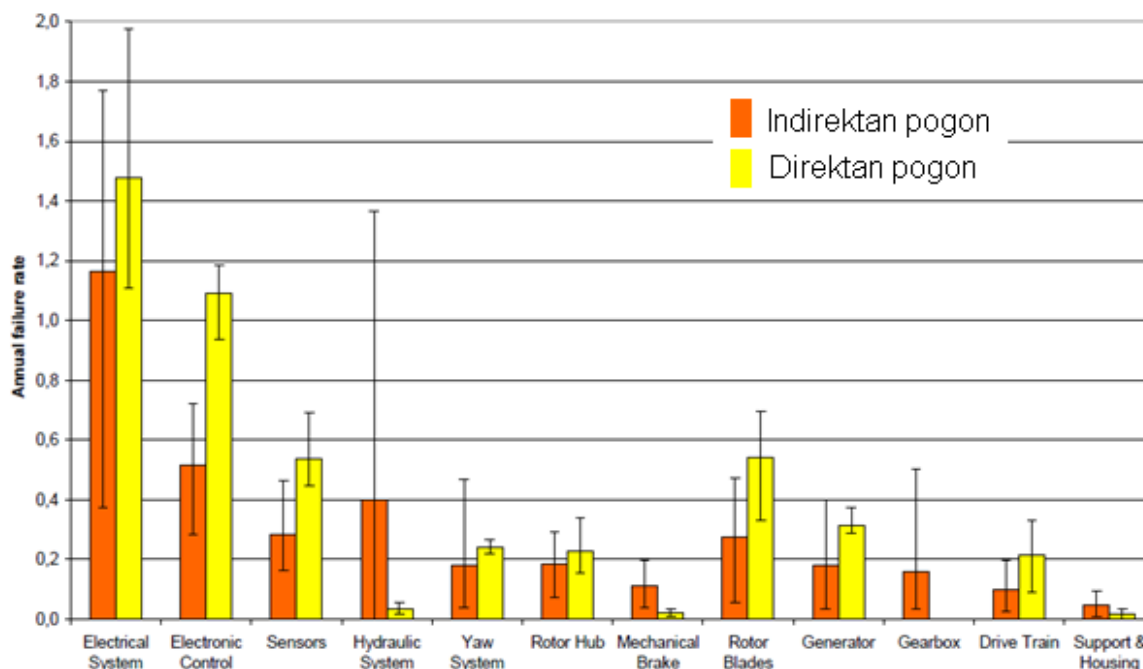
Na slici 16 je prikazana dodatna razlika između vrsta sinkronog generatora, sa direktnim (eng. *direct drive*) i indirektnim (sa multiplikatorom) pogonom. I dalje je učestalost kvara vjetroagregata sa asinkronim generatora najmanja. Kao što je vidljivo učestalost kvara, kroz desetogodišnje razdoblje, sa i bez multiplikatora je promjenjiva. Podaci o direktnom pogonu na neki način potvrđuju pretpostavku izrečenu iznad. Ponašanje vjetroagregata koji koriste sinkroni generator sa slike 16 je slično ponašanju vjetroagregatima koji koriste direktan pogon sa slike 17.



Slika 16 Učestalost kvara vjetroagregata ovisno o vrsti generatora, [8]

#### 4.1.4. Indirektan i direktan pogon

Pošto je multiplikator dio opreme koji je najosjetljiviji, na njega odlazi znatan dio troškova za održavanje. Kod direktnog pogona taj problem je otklonjen. Dodatni problem multiplikatora kod konvencionalnih turbina je buka na koju postoje pritužbe. Na slici 17 je prikazana razlika između učestalosti kvara pogona sa multiplikatorom i bez njega.

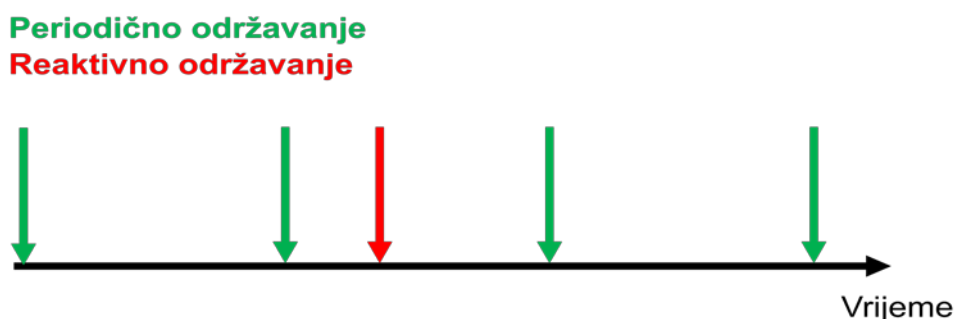


Slika 17 Učestalost kvara ovisno o načinu pogona, [7]

Osim što nema kvara na multiplikatoru (jer ga nema) direktni pogon ima i veću pouzdanost hidrauličkog sustava i mehaničke kočnice. Pouzdanost ostalih komponenti, pogotovo električnih komponenti, direktnog pogona je lošija nego kod pogona sa multiplikatorom.

## 4.2. Održavanje

Svrha održavanja je postići što veću raspoloživost, a da se troškovi ne povećavaju pretjerano. Mjere održavanja se dijele na reaktivne i preventivne. Reaktivno održavanje se izvodi kad se određena komponenta pokvari. Dok se preventivne održavanje izvode nakon određenog razdoblja, najčešće polugodišnje. Na slici 18 je prikazan raspored mjera održavanja



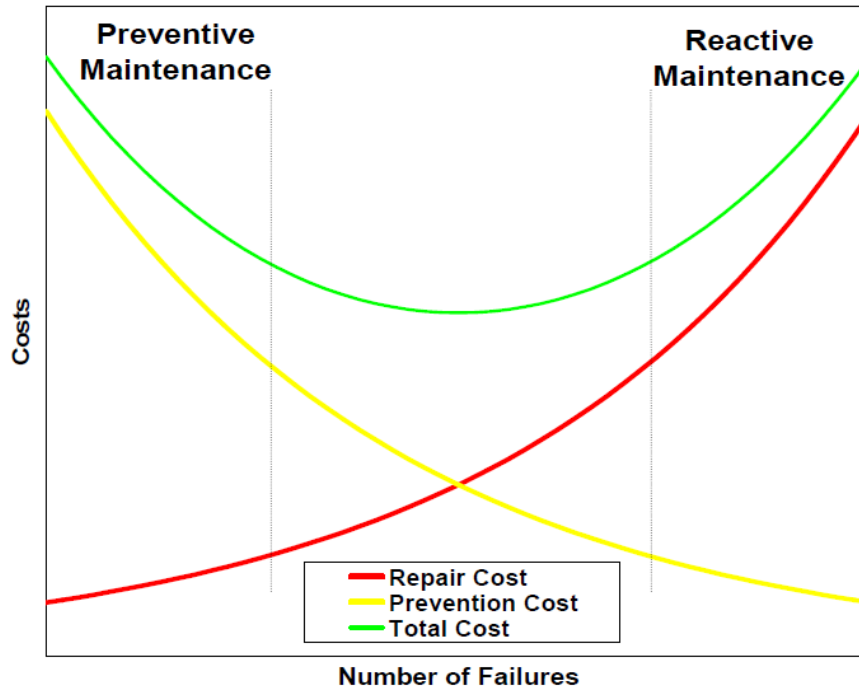
Slika 18 Raspored mjera održavanja

Reaktivno održavanje doprinosi manjoj pouzdanosti i višim troškovima zbog propuštanja mogućnosti otkrivanja i popravka prije nego se dogodi kvar, sekundarne štete te gubitaka u proizvodnji dok se komponenta ne popravi. Troškovi reaktivnog održavanja su prikazani na desnoj strani slike 19.

Preventivne mjere održavanja mogu povećati pouzdanost povremenim popravkom opreme prije nego dođe do njihovog trošenja. Kako bi se izbjegli kvarovi komponenti, preventivno održavanje se mora izvesti prije srednjeg vremena do kvara. Stoga, se veća pouzdanost preventivnim održavanjem se postiže povremenim prekidom rada. Troškovi preventivnog održavanja su prikazani na lijevoj strani slike 19.

Sofisticiranije preventivne mjere održavanja se temelje na stanju i pouzdanosti sustava. Obje imaju za cilj pronaći optimalnu točku u vremenu za obavljanje potrebnih radnji na održavanju. Održavanje na temelju pouzdanosti pokušava naći pravo vrijeme za mjere održavanja kroz analizu široke baze podataka i iskustva o

pouzdanosti iz prošlosti. Održavanje na temelju stanja pokušava pronaći pravo vrijeme održavanja na temelju trenutnog stanja komponenti.



Slika 19 Troškovi povezani sa načinima održavanja

Održavanje na temelju pouzdanosti je kombinacija između preventivnog i reaktivnog održavanja. Temelji se na podacima o prošlosti skupine komponenti. Međutim ti podaci ne daju uvid u svaku pojedinu komponentu. Stoga, održavanje na temelju pouzdanosti može dovesti do popravka potpuno ispravne komponente, a isto tako i do rizika od neočekivanog kvara.

Održavanje na temelju stanja, u drugu ruku, omogućava visoku pouzdanost i male troškove, otklanjajući nepotrebne popravke, a istovremenom omogućavajući planirane popravke. Održavanje na temelju stanja daje uvid u stanje pojedine komponente, tako da se odluke o održavanju donose od slučaja do slučaja, a ne na temelju statistike skupine podataka. Detekcija kvara u ranijoj fazi omogućava narudžbu komponente, pripremu osoblja, gašenje opreme prije većeg kvara i minimiziranje prekida proizvodnje.

#### 4.2.1. Sustavi za praćenje stanja

Sustavi praćenja stanja se ubrzano instaliraju u vjetroagregate sa ciljem pružanja informacija o sustavu rukovoditelju pogona, koji na temelju tih informacija može odrediti potrebne mjere te time povećati raspoloživost vjetroelektrane. Rukovoditelji su željni upravljati pogonom što je moguće ekonomičnije, stoga izabiru mjere održavanja koje utječu na to. Bilo koje mjere održavanja bazirane na informacijama sustava za praćenje stanja moraju imati jasnu financijsku korist inače se početna ulaganja u sustav za praćenje stanja i pridruženi troškovi ne mogu opravdati.

Moderni vjetroeagrati se proizvode sa instaliranim sustavom za praćenje stanja. Najčešći oblik praćenja stanja je mjerenjem vibracija pomičnih dijelova, kao što su mehanički pogonski nizovi, glavna osovina, multiplikator, generator. Na temelju promjena u amplitudi vibracije se može utvrditi što se događa u sustavu.

Dvije komponente koje je najbitnije pratiti su generator i multiplikator. Razlog tomu su:

- visoki troškovi i dugo vrijeme potrebno za zamjenu
- poteškoće pri zamjeni na licu mjesta
- veličina i težina
- smješteni su na vrhu tornja
- moguće duže vrijeme prekida rada zbog lošeg vremena

#### 4.2.2. Rezervni dijelovi

Upravljanje rezervnim dijelovima je od ključne važnosti pri upravljanju vjetroelektranama. Bilo kakva odgoda zamjene neispravne komponente će uzrokovati velike gubitke u proizvodnji a time i velike novčane gubitke. Držanjem optimalnog broja rezervnih dijelova raspoloživost se može povećati. Najveći rizik pri skladištenju rezervnih dijelova je nedovoljan broj rezervnih dijelova kada se određena komponenta pokvari. Taj rizik se otklanja procjenom inženjera na temelju prijašnjih iskustava i ne dostupnosti komponente

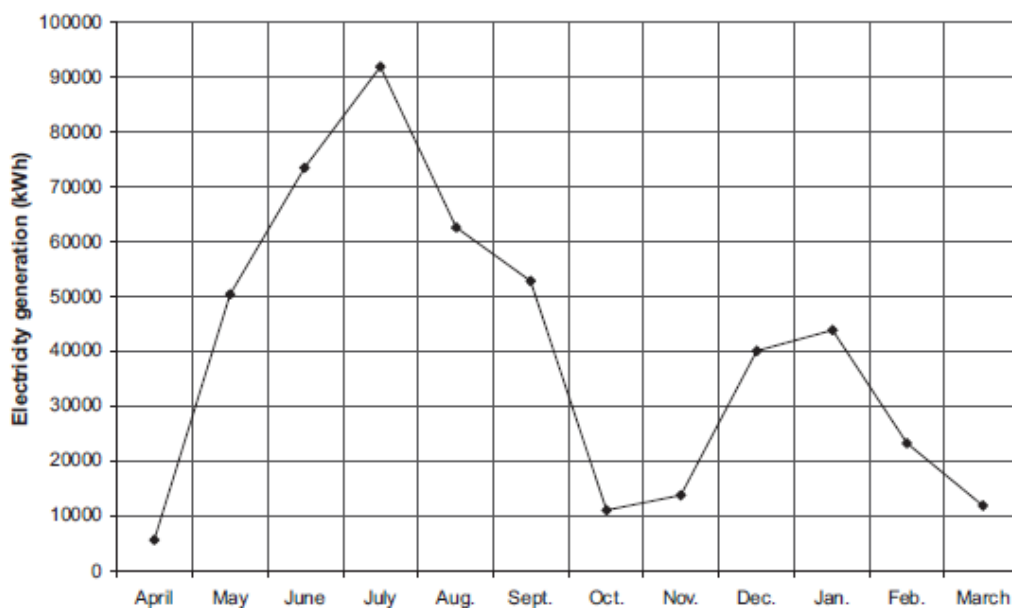


## 5. Analiza rada

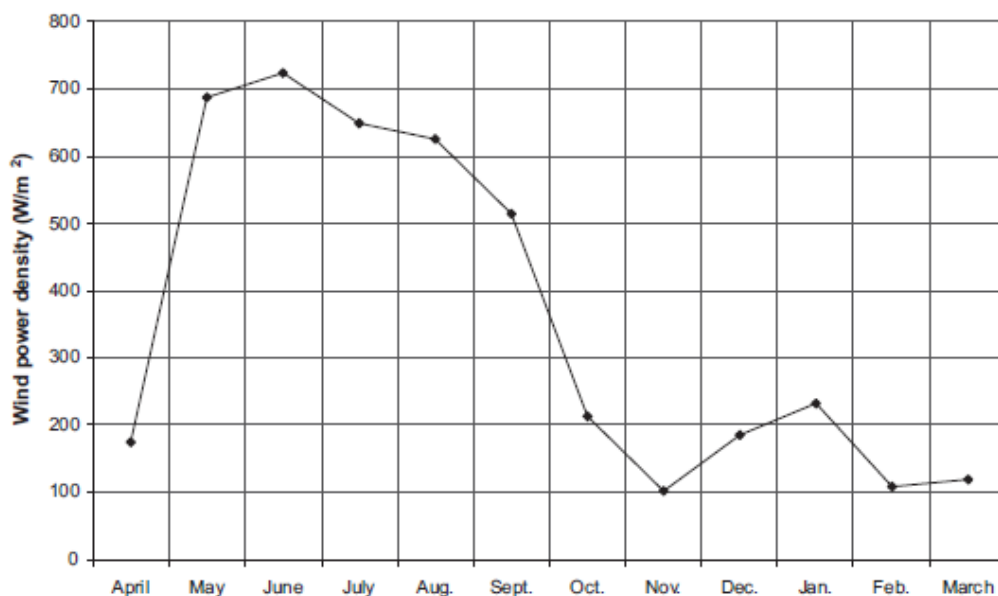
Analiza rada VE se provodi radi ispravljanja kvarova i poboljšanja pouzdanosti komponenti, odnosno raspoloživosti vjetroelektrane. U ovu svrhu su analizirani dostupni podaci o VE Muppandal, Indija [11]. Vjetroelektrana se sastoji od 15 jednakih vjetroagregata ukupne instalirane snage 3375 kW. Tehničke karakteristike agregata su:

- 3 lopatice
- promjer rotora 29,8 m
- visina 45 m
- cjevasti toranj,
- asinkroni dvobrzinski generator
- nazivna brzina vjetra 15 m/s
- stall regulacija
- Brzina uključanja 4 m/s
- brzina isključenja 25 m/s

Podaci su prikupljeni kroz petogodišnje razdoblje (2000 – 2004). Odnose se na ukupnu proizvedenu energiju, kvarove, brzinu vjetra i održavanje. Krivulja proizvodnje vjetroagregata, od travnja 2002 do ožujka 2003, je prikazana na slici 20. Krivulja proizvodnje je u korelaciji sa krivuljom snage vjetra (slika 21).



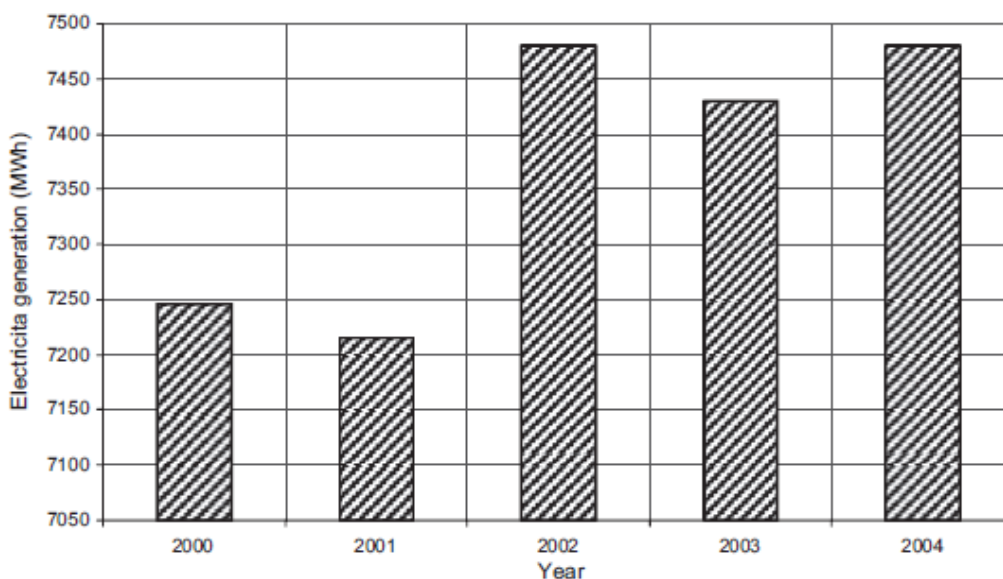
Slika 20 Mjesečna proizvodnja za 2002 – 2003 godinu, [11]



Slika 21 Krivulja snage vjetra za pojedini mjesec, [11]

Da bi vjetroagregati radili neprekidno i proizvodili optimalnu količinu energije potrebno ih je pravilno održavati, a također je potreban i nesmetan protok zraka do njih.

Godišnja proizvodnja energije je prikazana na slici 22. Proizvodnja oscilira iz godine u godinu ovisno o klimatskim i tehničkim faktorima. Maksimalna proizvodnja je dosegnuta 2002. godine, zbog velike raspoloživosti turbina, i iznosila je 7480 MWh, a minimalna 2001 godine, zbog povećanog vremena kvarova i održavanja, i iznosi 7215 MWh. Prosječna godšnja proizvodnja je 7370 MWh.

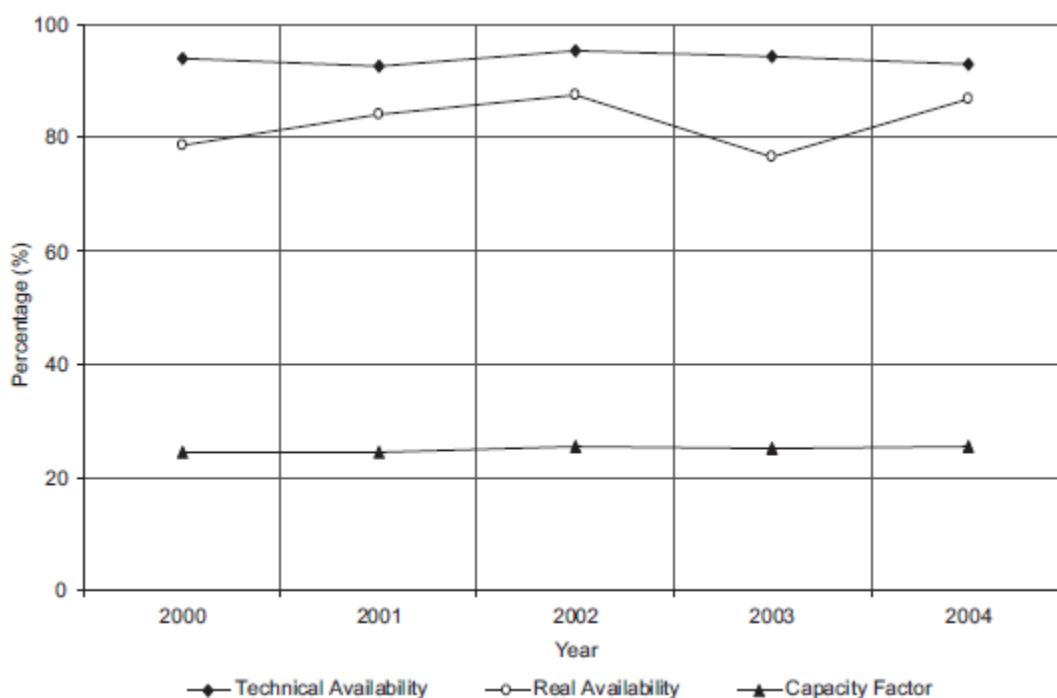


Slika 22 Godišnja proizvodnja vjetroelektrane, [11]

Nakupljena prašina, prljavština i naslage kukaca na lopaticama uzrokuju smanjenu i oslabljenu proizvodnju. Stoga bi lopatice povremeno trebalo očistiti sa sredstvom za čišćenje za bazi silikona kako bi se smanjile naslage kukaca.

Faktor opterećenja, stvarna raspoloživost i tehnička raspoloživost su izračunati i prikazani na slici 23. Tehnička raspoloživost je skoro konstantna kroz petogodišnje razdoblje i prosječna vrijednost iznosi 94%. Tehničku raspoloživost je moguće povećati smanjenjem tehničkih kvarova vjetroelektrane. Prosječna stvarna raspoloživost je manja od tehničke raspoloživosti i iznosi 82,9%. Turbine ne rade cijelo vrijeme zbog kvarova i slabog vjetra, te je zbog toga stvarna raspoloživost manje od tehničke. VE Muppandal 2003. godine ima vrlo nisku stvarnu raspoloživost zbog povećanog vremena kvara mreže i vremena slabog vjetra.

Smanjenjem broja kvarova mreže i kvarova komponenti, stvarna raspoloživost se može povećati što vodi i do boljeg faktora pouzdanosti.



Slika 23 Usporedba tehničke raspoloživosti, stvarne raspoloživosti i faktora opterećenja, [11]

Faktor opterećenje varira iz godine u godinu, od 24,41% (2001. godine) do 25,3% (2002. godine). Prosječni faktor opterećenja je 24,9%. Povećanjem raspoloživosti električne mreže i raspoloživosti turbine može se poboljšati rad vjetroagregata. Raspoloživost se može povećati pravilnim održavanjem.

Vrijeme prekida rada se koristi za identificiranje potreba za održavanjem. Tablica 3 prikazuje godišnji odnos ukupnog vremena, efektivnog vremena proizvodnje i vremena prekida rada. Zbroj efektivnog vremena proizvodnje (517 394 sati) i vremena prekida rada (140 326 sati) daju ukupno vrijeme (657 720 sati) kroz 5 godina. U vrijeme prekida rada su uključeni prekidi zbog slabog vjetra, kvara električne mreže, kvara kontrolne ploče, električnih i mehaničkih kvarova te održavanja.

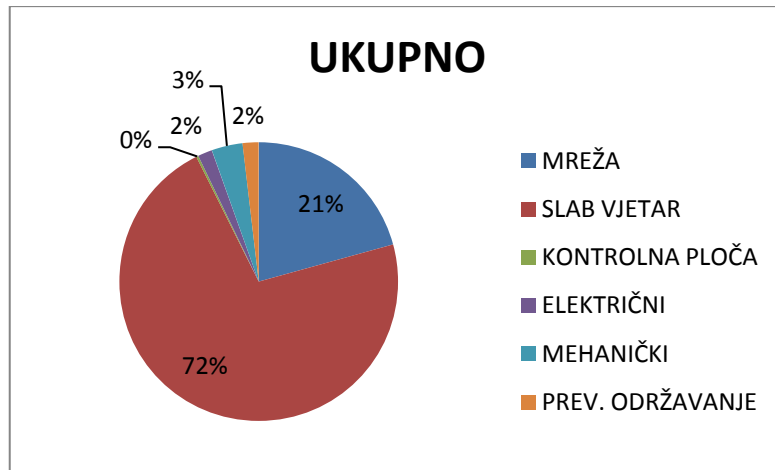
**Tablica 3 Godišnji odnos ukupnog vremena, efektivnog vremena proizvodnje i vremena prekida**

Godina	Ukupno vrijeme	Efektivno vrijeme rada	Vrijeme prekida rada
2000	131.760	103.943 79%	27.817 21%
2001	131.400	101.625 77%	29.775 23%
2002	131.400	106.558 81%	24.842 19%
2003	131.400	100.694 77%	30.706 23%
2004	131.760	104.574 79%	27.186 21%
Ukupno	657.720	517.394 79%	140.326 21%

Vremena trajanja određenih pogonskih stanja su prikazana u tablici 4. Ukupno vrijeme trajanja prekida rada VE iznosi 21%. Najduže trajanje vremena prekida je zbog slabog vjetra. Vrijeme prekida zbog kvara mreže iznosi 21%. Dok ostali uzorci iznose tek 7% vremena. Postotna raspodjela uzroka vremena prekida rada je prikazana na slici 24.

**Tablica 4 Podaci o radu vjetroelektrane**

Godina	2000	2001	2002	2003	2004	Ukupno
Proizvedena energija (kWh)	7.246.119	7.215.905	7.480.740	7.430.162	7.480.229	36.853.155
Efektivno vrijeme rada (h)	103.943	101.625	106.558	100.694	104.574	517.394
Trajanje kvara mreže (h)	5.924	5.963	4.796	6.165	6.216	29.065
Trajanje slabog vjetar (h)	20.188	20.126	19.179	23.409	17.986	100.887
Trajanje kvara kontrolne ploče (h)	39	91	63	107	59	358
Trajanje električnih kvarova (h)	736	634	233	268	477	2.349
Trajanje mehaničkih kvarova (h)	381	2.280	216	352	1.826	5.056
Vrijeme preventivnog održavanja (h)	547	679	354	404	621	2.607



Slika 24 Postotna raspodjela uzroka prekida rada

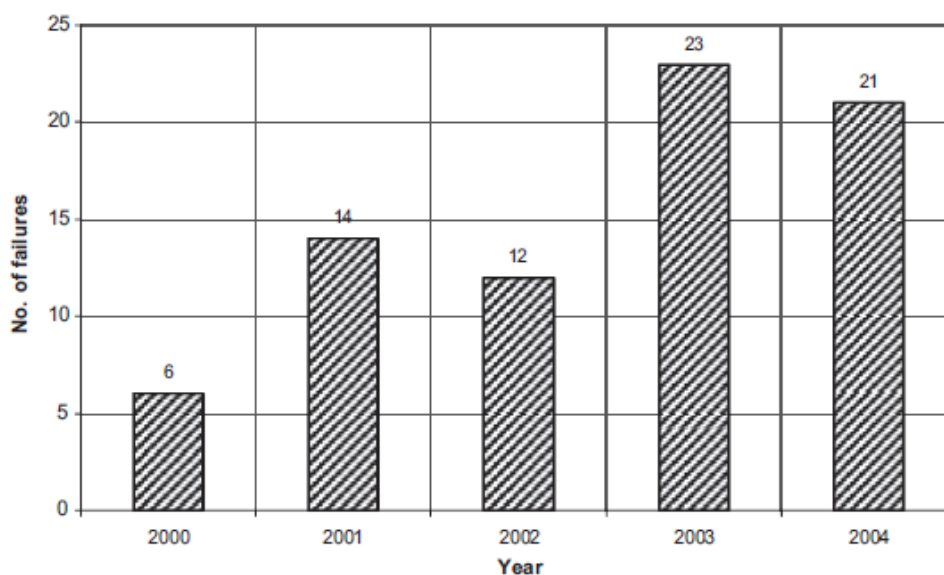
Vrijeme potrebno za promjenu elektroničke komponente je puno manje nego vrijeme potrebno za promjenu mehaničke komponente. Prosječno vrijeme prekida zbog mehaničkog kvara iznosi 4%, elektroničkog kvara 2% i kvara mreže 21%. Glavni uzorci kvara mreže su pad mreže, visok napon, nizak napon, asimetrične struje i promjena frekvencije.

Proizvodnja se može povećati boljim upravljanjem i održavanjem.

### 5.1. Analiza kvarova

Kvar je događaj pri kojem element ne obavlja svoju funkciju unutar specificiranih ograničenja. Svrha analize kvarova je otkriti razloge kvarova. Broj kvarova unutar jedne godine je prikazan na slici 25. Učestalost kvarova, 2000 godine, je 6, što je nisko za petogodišnji period. Broj kvarova se povećava iz godine u godinu. Broj kvarova 2003. Godine je 3,8 puta veći nego 2000 godine. Velik broj kvarova je bio 2004 godine zbog kvara lopatica. Broj kvarova kroz godine nije konstantan zbog promjena vanjskog opterećenja. Kvarovi su uzrokovali smanjenu proizvodnju i produženo vrijeme prekida rada.

Mehaničkim kvarovima se smatraju kvarovi na lopatici, multiplikatoru, hidraulici, sklopu za zakretanje lopatica i kočnici. Dok se elektroničkim kvarovima smatraju kvarovi na kontrolnoj ploči i kvarovi generatora. Kvarovi zbog mehaničkih komponenti iznose 79%, a elektronički samo 21% ukupnog broja kvarova. Možemo zaključiti da su češći mehanički kvarovi od elektroničkih kvarova. Pouzdane komponente i efektivne mjere održavanja mogu smanjiti broj kvarova.



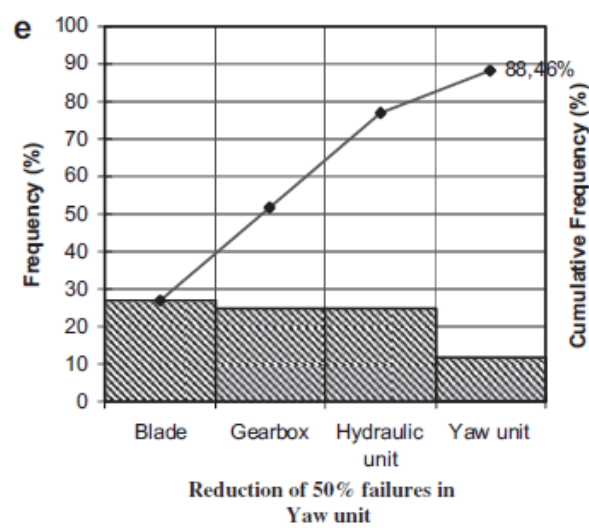
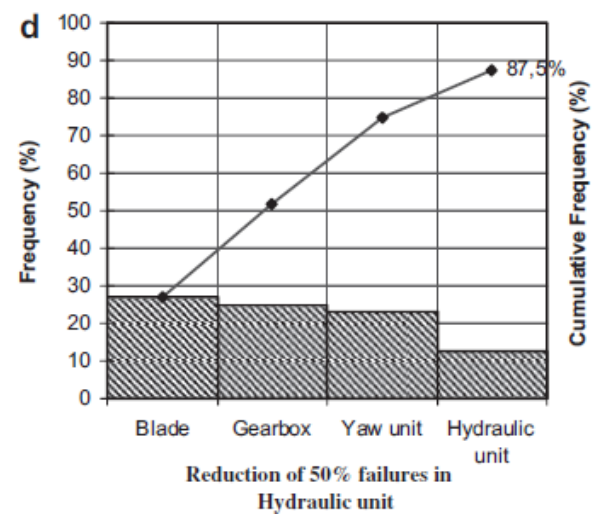
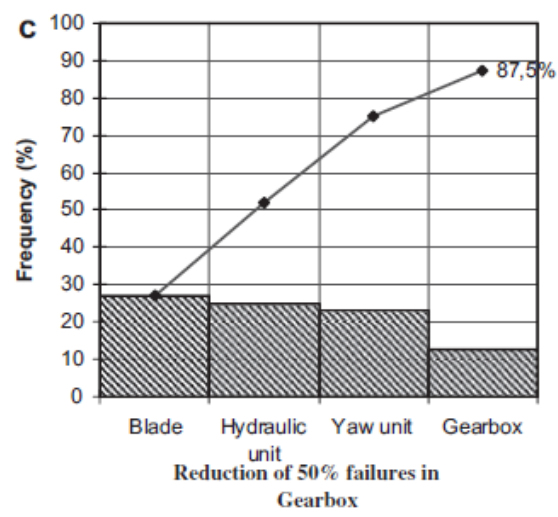
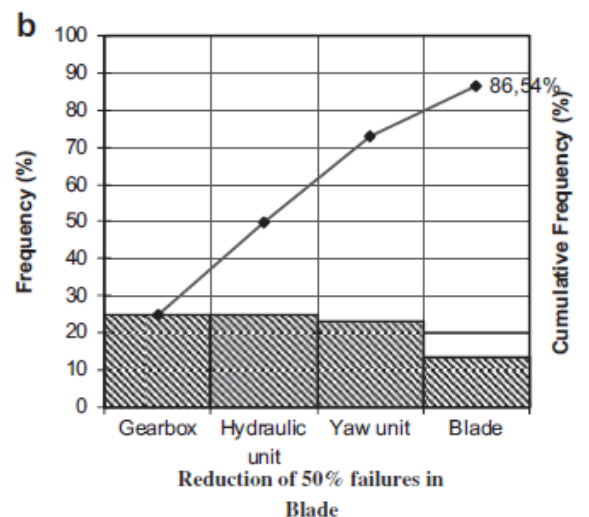
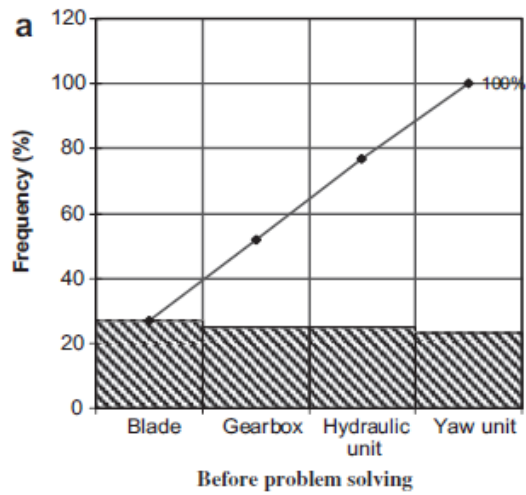
Slika 25 Broj kvarova kroz godinu, [11]

Velike temperature koje se razvijaju u multiplikatoru se mogu izbjeći korištenjem kvalitetnih maziva i adekvatnim hlađenjem ulja. Uvijek se mora držati dovoljna količina kvalitetnog ulja kako bi se povremeno zamjenilo staro ulje.

Dovoljno hlađenje i konstantan protok zraka između statora i rotora, i odgovarajuće usklađivanje pogonskog sklopa i osovine te opskrba mreže bez isključenja će smanjiti broj kvarova generatora. Pružajući dovoljno hlađenje i zaštitu elektroničkim komponentama može produžiti njihov život. Život vjetroagregata se može produžiti pravilnim održavanjem i pravilnim upravljanjem.

## 5.2. Pareto analiza

Pareto analiza je korištena za slaganje prioriteta ključnih uzroka kvarova sustava. Analiza je proširena na pronalaženje smanjenja problema kad se jedan problem riješi potpuno ili djelomično. Kvarovi znatno utječu na raspoloživost vjetroelektrane i na njezinu proizvodnju. Rješavanjem nekoliko ključnih kvarova, vrijeme kvarova se može smanjiti u velikoj mjeri. Analiza je napravljena za četiri ključne komponente vjetroagregata: lopatice, multiplikator, hidraulika i sustav za zakretanje. Na slici 26a je prikazana frekvencija kvarova. Frekvencija kvarova navedenih komponenti kroz petogodišnje razdoblje je 26.9%, 25%, 25% te 23.1%. Pareto dijagram stanja nakon rješavanja 50% problema je prikazan na slici 26b-e. Ako bi se otklonilo 50% kvarova lopatica, multiplikatora, hidraulike i sustava za zakretanje, frekvencija kvarova bi se smanjila na 13.5%, 12.5%, 12.5% te 11.54%



Slika 26 Pareto analiza vjetroelektrane, [11]

### 5.3. Financijski gubici

Vjetroelektrana je radila 79% od ukupnog vremena i proizvela 36,8 milijuna kWh tijekom 5 godina. Ukupno vrijeme stajanja tijekom 5 godina je 140326 sati, a glavni uzrok stajanja je slab vjetar. Gubici zbog slabog vjetra iznose 7,2 milijuna kWh odnosno 687500 \$. Preporučljivo je da se periodično održavanje odvija tijekom slabog vjetra. Glavni uzroci prekida, vrijeme prekida, te gubici u kWh i \$ su prikazani u tablici 5.

Tablica 5 Gubici u proizvodnji i financijski gubici zbog prekida rada

Uzroci prekida	Vrijeme prekida (h)	Gubici u milijunima kWh	Gubici u \$
Slab vjetar	100887,9	7,2	687500
Kvar mreže	29065,01	2,1	197916
Kvar kontrolne ploče	358	0,025	2.292
Električni kvar	2349,78	0,17	16042
Mehanički kvar	5056,73	0,36	34583
Održavanje	2607,04	0,19	17917
Ukupno	140324,46	10,045	956250

Ukupni gubici tijekom 5 godina iznose 10045 milijuna kWh odnosno 956250 \$. Ako bi se mehanički kvarovi smanjili za 50% dobit bi se povećala za 17291 \$. U tablici 6 je prikazan ukupan broj kvarova i trošak njihova održavanja.

Tablica 6 Broj kvarova i troškovi njihove zamjene

Komponenta	Broj kvarova	Troškovi zamjene (\$)
Lopatica	14	85458
Multiplikator	13	2129
Sustav za zakretanje	12	1306
Hidraulika	13	779
Ostalo	24	4871
Ukupno	76	94543

Poboljšanjem električne mreže i prilagođavanje održavanja vremenu slabog vjetra uvelike se može smanjiti gubitke energije, a time i financijske gubitke.



## 6. Zaključak

Tijekom godina bilo je mnogih pokušaja u poboljšanju određenih komponenata vjetroagregat. Neke od njih su pokazale visoku učestalost otkazivanja te teške kvarove. No neke komponente nisu dovoljno testirane ili nisu testirane od različitih proizvođača, te je time smanjena mogućnost za njihov razvoj.

Osim inovativnih komponenti, pokušane su različite kombinacije standardnih komponenti. Na primjer, vjetroagregat može koristiti *stall* ili *pitch* upravljanje, sa sinkronim ili asinkronim generatorom, ili može koristiti direktan ili indirektan pogon, aerodinamičnu kočnicu itd. Još uvijek postoji manjak razumijevanja koja je najbolja kombinacija, no određeni zaključci se mogu donijeti.

Znatno veću učestalost kvara pokazuje pitch upravljanje u odnosu na stall. Međutim, pitch upravljanje ima manju učestalost kvara za hidrauličke sisteme i mehaničku kočnicu od stall upravljanja, u drugu ruku kvar rotora je učestaliji. U slučaju vrste generatora, vjetroagregati sa sinkronim generatorom pokazuju veću učestalost kvara od vjetroagregata sa asinkronim generatorom. Gledajući kvar komponenti, električne komponente se češće kvare kod vjetroagregata sa sinkronim generatorom. Korištenje direktnog pogona pokazuje veću učestalost kvara nego korištenje indirektnog pogona. Međutim, učestalost kvara sinkronog generatora sa direktnim pogonom je konstantna nakon prve godine rada. Iz toga se može zaključiti da druge komponente utječu na visoku učestalost kvara direktnog pogona.

Polovica kvarova vjetroagregata je zbog elektroničkih komponenti i upravljačkog sustava. Ovi kvarovi predstavljaju u većini slučajeva kratko vrijeme prekida rada, za razliku od ostalih komponenti, kao što su generator i multiplikator.

Dodatan aspekt koji utječe na raspoloživost je povećanje vjetroagregata, a osnovni koncept je ostao isti. Povećanjem vjetroagregata se povećala i učestalost kvara.

Važno je napomenuti da iako nema dovoljno podataka o životnom vijeku vjetroagregata, učestalost kvara se generalno smanjuje s vremenom. Prema prikupljenim podacima može se očekivati da kvarovi zbog trošenja vjetroagregata manjih od 1MW neće početi prije jedanaeste godine rada.

Raspoloživost vjetroagregata se povećala s vremenom i danas doseže 98%. Međutim, manji vjetroagregati se pokvare bar jednom godišnje, a veći i više puta. Kako se u budućnosti misli više graditi *offshore* vjetroelektrane, pouzdanost komponenti se mora popraviti. Inače se može očekivati smanjena raspoloživost zbog povećanog vremena prekida rada zbog kvarova, kombiniranih sa smanjenom mogućnošću pristupa vjetroelektranama.

Sakupljanje i analiziranje podataka o radu vjetroelektrana daje pouzdane smjernice za poboljšanje pouzdanosti komponenti. Prikazano je da mehaničke kočnice od vjetroagregata sa stall upravljanjem imaju veću učestalost kvara. S obzirom da moderni megavatni vjetroagregati uglavnom koriste aerodinamične kočnice, ova vrsta kvara se uvelike može smanjiti. Osim toga, na pouzdanost komponenti utječe i uvođenje novih koncepata i tehnologija. Iako nove komponente mogu imati visoku pouzdanost, one mogu utjecati na smanjenje pouzdanosti ostalih komponenti.

U budućnosti, osim smanjenja učestalosti kvara, biti će potrebno i razvijanje novih metoda održavanja, kao što je praćenje stanja kritičnih komponenti. Na taj način će se smanjiti broj kvarova i neplaniranih popravaka, planirati održavanje za vrijeme slabog vjetera i ukupno vrijeme prekida rada će se smanjiti.

## 7. Literatura

- [1] European Wind Energy Association (EWEA) statistics, [www.ewea.org](http://www.ewea.org)
- [2] Ban D., Žarko D., Mađerčić M., Čulig Z., Petrinić M, Tomičić B., Študir J.:  
Generatori za vjetroelektrane, trendovi u primjeni i Hrvatska proizvodnja;  
Cigre, 2007
- [3] Bilić Z.: Napajanje udaljenog stambenog objekta pomoću energije vjetra i  
sunčevog; Diplomski rad, Osijek, 2006
- [4] Harman K., Wilkinson M.: Availability Trends Observed At Operational Wind  
Farms; EWEC, 2008
- [5] Sala de Vedruna E.: O&M Strategies in Europe: An Overview; EWEC, 2010.
- [6] Faulstich S.: Component reliability ranking with respect to WT concept and  
external environmental conditions; Upwind, 2010
- [7] Faulstich S., Hahn B.: Comparison of different wind turbine concepts due to  
their effects on reliability; Upwind, 2009
- [8] Echavarria E., Hahn B., van Bussel G. J. W., Tomiyama T.: Reliability of Wind  
Turbine Technology Through Time; Journal of Solar Energy Engineering,  
2008
- [9] Škrlec D., Mađerčić M., Mužinić F.: Modeliranje rizika u projektima  
vjetroelektrane; Cigre, 2007
- [10] McMillan D., Ault G.: Towards Quantification of Condition Monitoring Benefit  
for Wind Turbine Generators; EWEC, 2007
- [11] Herbert G. M. J., Iniyar S., Goic R.: Performance, reliability and failure  
analysis of wind farm in developing Country; Renewable energy, 2010
- [12] R. F. Orsagh, H. Lee, M. Watson, C. S. Byington: Advanced Vibration  
Monitoring for Wind Turbine Health Management
- [13] Vinković I., Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2009

- [14] Bukarica V.: Usporedba metoda za ocjenu pouzdanosti; Diplomski rad, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2001
- [15] United Nations Environment Programme Division of Technology, Industry and Economics: Scoping Study on Financial Risk Management Instruments for Renewable Energy Projects; UNEP, 2004.
- [16] Cleijne H., Ruijgrok W.: Modelling Risks of Renewable Energy Investments; Report of the Green-X Project within the 5th framework programme of the EC, 2004.
- [17] European wind energy association: Large Scale Integration of Wind Energy in the European Power Supply: Analysis, Assues and Recommendations; EWEA, 2006
- [18] Hahn B., Durstewitz M., Rohrig K.: Reliability of Wind Turbines; ISET, 2008.

## 8. Sažetak

U prvom dijelu rada su opisani tehnički rizici pri planiranju vjetroelektrane. Tehnički rizici se dijele na rizike vezane uz vjetar, rizike vezane uz opremu te rizike vezane uz integriranje vjetroelektrana u elektroenergetski sustav. U drugom dijelu rada su prikazane osnovne razlike u korištenju različitih tehnologija te je analiziran rad VE Muppandal. Prikazano je da učestalost kvara raste s porastom snage vjetroagregata. Vjetroagregati sa pitch upravljanjem imaju veću pouzdanost od vjetroagregata sa stall upravljanjem. Također, vjetroagregati sa indirektnim pogonom su pouzdaniji od onih sa direktnim, te asinkroni generatori imaju veću pouzdanost od sinkronih. Kako bi se povećala raspoloživost potrebno je prikupljati i analizirati podatke te razvijati nove tehnologije. Također je bitno i razvijati nove metode održavanja i sustave za praćenje stanja.

**Ključne riječi:** Pouzdanost, raspoloživost, vjetroagregat, održavanje, kvar

## 9. Abstract

### **Risk and availability of wind power plants**

First part of this study describes the technical risks in the wind power plant planning. Technical risks are divided on the risks associated with the wind, the risks associated with equipment, and risks associated with integrating wind power plants into the power system. The second part presents a basic difference in using various technologies and also was analyzed performance of wind farm Muppandal. It was shown that bigger wind turbines have higher failure rate. Wind turbines with pitch control are more reliable than wind turbines with stall control. Also, wind turbines with gearbox are more reliable than those with direct drive, and asynchronous generators are more reliable than the synchronous. To increase the availability it is necessary to collect and analyze more data, and develop new technologies. It is also important to develop new methods of maintenance and systems monitoring.

**Key words:** reliability, availability, wind turbine, failure, maintenance