

# Regulacija vjetrogeneratora u kritičnom području

---

**Matošević, Vjekoslav**

**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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:730457>

*Rights / Prava:* [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-10**

*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



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

**Sveučilišni studij**

**REGULACIJA VJETROGENERATORA U  
KRITIČNOM PODRUČJU**

**Diplomski rad**

**Vjekoslav Matošević**

**Osijek, 2018.**

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**Obrazac D1: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za obranu diplomskog rada**

Osijek, 27.09.2018.

Odboru za završne i diplomske ispite

**Imenovanje Povjerenstva za obranu diplomskog rada**

<b>Ime i prezime studenta:</b>	Vjekoslav Matošević
<b>Studij, smjer:</b>	Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika, smjer Elektroenergetika
<b>Mat. br. studenta, godina upisa:</b>	D-492, 02.10.2017.
<b>OIB studenta:</b>	92564359603
<b>Mentor:</b>	Prof.dr.sc. Tomislav Mrčela
<b>Sumentor:</b>	Prof.dr.sc. Zoran Baus
<b>Sumentor iz tvrtke:</b>	
<b>Predsjednik Povjerenstva:</b>	Prof.dr.sc. Srete Nikolovski
<b>Član Povjerenstva:</b>	Izv. prof. dr. sc. Marinko Barukčić
<b>Naslov diplomskog rada:</b>	Regulacija vjetrogeneratora u kritičnom području
<b>Znanstvena grana rada:</b>	<b>Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)</b>
<b>Zadatak diplomskog rada:</b>	
<b>Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (diplomskog rada):</b>	Izvrstan (5)
<b>Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:</b>	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 2 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 2 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 2 bod/boda Razina samostalnosti: 3 razina
<b>Datum prijedloga ocjene mentora:</b>	27.09.2018.
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, 15.10.2018.

**Ime i prezime studenta:**

Vjekoslav Matošević

**Studij:**

Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika, smjer Elektroenergetika

**Mat. br. studenta, godina upisa:**

D-492, 02.10.2017.

**Ephorus podudaranje [%]:**

22

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Regulacija vjetrogeneratora u kritičnom području**

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

i sumentora Prof.dr.sc. Zoran Baus

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:

## SADRŽAJ

<b>1. UVOD</b> .....	1
<b>2. POVIJEST</b> .....	2
<b>3. ENERGIJA VJETRA</b> .....	3
<b>4. SASTAVNI DIJELOVI VJETROAGREGATA</b> .....	5
4.1. Temelj .....	7
4.2. Veza na električnu mrežu .....	7
4.3. Nosivi stup .....	7
4.4. Ljestve za pristup dijelovima u kućištu .....	7
4.5. Regulacija usmjerenja vjetroturbine (YawControl) .....	7
4.6. Kućište vjetroagregata .....	8
4.7. Električni generator .....	8
4.10. Multiplikator .....	8
4.11. Lopatica rotora .....	8
4.12. Regulacija napadnog kuta lopatice (PitchControl) .....	8
4.13. Kućište vjetroturbine .....	9
<b>5. VRSTE VJETROTURBINA</b> .....	11
5.1. Vjetroturbine s horizontalnom osi vrtnje (HAWT) .....	11
5.2. Vjetroturbine s vertikalnom osi vrtnje (VAWT) .....	13
5.2.1. Darrieusova turbina .....	13
5.2.2. Spiralna Gorlov-a turbina .....	13
5.2.3. Savoniusova turbina .....	14
<b>6. OPIS RADA VJETROAGREGATA</b> .....	14
6.1. Osnovni princip rada vjetroagregata .....	14
6.2. Fizikalne osnove vjetroagregata .....	14
<b>7. NADZOR I KONTROLA RADA VJETROAGREGATA</b> .....	20
7.1. Sustav za praćenje vjetra (Yawing) .....	20
7.2. Stall kontrola .....	21
7.3. Pitch kontrola .....	21
7.4. Oprema za zakretanje .....	22
7.5. Kočni sustav .....	22
<b>8. OSNOVNI PRINCIPI UPRAVLJANJA VJETROAGREGATOM</b> .....	23
8.1. Upravljanje iznad nazivne brzine vjetra .....	24

8.2. Upravljanje ispod nazivne brzine vjetra .....	26
8.3. Zahtjevi na sustav regulacije vjetroagregatom .....	30
<b>9. OPĆENITA KONFIGURACIJA KONTROLE .....</b>	<b>30</b>
<b>10. GLAVNA KONTROLA SUSTAVA .....</b>	<b>31</b>
10.1. Rad pri djelomičnom opterećenju .....	31
10.2. Rad pri potpunim opterećenjem .....	35
10.3. Zvijezda trokut spoj .....	35
10.4. Vanjska kontrola snage .....	36
10.5. Kontrola buke .....	36
10.6. Kontrola potiska .....	37
10.7. Individualni nagib .....	37
10.8. Aktivno prigušenje tornja .....	38
10.9. Pokretanje i isključivanje .....	38
10.10. Pitch regulacija .....	39
<b>11. ZAKLJUČAK .....</b>	<b>41</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>42</b>
Popis korištenih kratica i oznaka .....	43
Popis slika .....	44
<b>SAŽETAK .....</b>	<b>45</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>45</b>
<b>ŽIVOTOPIS .....</b>	<b>46</b>

# 1. UVOD

Dok nerazvijene zemlje, koristeći prirodna bogatstva teže za što jeftinijim oblicima proizvodnje električne energije, razvijeniji dio svijeta se trudi da što manje ugrozi životnu sredinu.

Vrlo blizu savršenom rješenju za proizvodnju električne energije izdvajaju se vjetrogeneratori, kao jeftiniji i zdraviji sistemi. Odmah iza energije vode, drugi najzastupljeniji obnovljivi izvor energije koji se koristi za proizvodnju električne energije je upravo energija vjetra.

Razvoj vjetrogeneratora bilježi vrlo dinamičan rast posljednjih godina.

Upravo se energija vjetra tretira kao najpogodnija mogućnost za smanjenje ugljičnog dioksida i drugih opasnih spojeva za životnu sredinu. Uzmemo li u obzir samo da jedan manji vjetrogenerator snage 600 (kW) na lokaciji s prosječnom brzinom vjetra, kroz svoj vijek eksploatacije smanji emisiju štetnih plinova i materija-čestica u okoliš za oko 20 do 40 000 (tona) dolazimo do vrlo povoljne situacije. [1]

Prednosti vjetro-elektrane u odnosu na termo-elektrane ili hidro-elektrane su u tome da vjetro-elektrane zauzimaju manje površine koje se nakon njihove izgradnje mogu i dalje koristiti, dok u slučaju hidro-elektrana najčešće potapaju određeni dijelovi plodnog zemljišta.

Rast industrije koja prati proizvodnju vjetro-generatora se može usporediti s industrijom računalne opreme, što dovoljno govori o brzini kojom napreduje kao i isplativosti i ulaganju u takav izvor energije.

Trenutno se u Republici Hrvatskoj nalazi pedeset vjetro-elektrana od kojih su dvadesetak u funkciji. Uglavnom se one nalaze uz Jadransku obalu.

S obzirom na to da na tom području često dolazi do variranja jačine vjetra nužna je visoka pouzdanost cjelokupnog sustava vjetroelektrane.

Od generatora, zakretanja gondole, zakretanja krilaca, sve do zaustavljanja položajem i kočnicom.

## 2. POVIJEST

Energija vjetra je na početku korištena prvenstveno za pokretanje čamaca, a kasnije i jedrenjaka na kojima se temeljio sav pomorski transport, sve do pojave parnog stroja.

U VII. stoljeću p.n.e. stanovnici Perzije su gradili vjetrenjače, odnosno jednostavne mehanizme s vertikalnom osi za mljevenje žita.

Najraniji poznati slučaj korištenja energije vjetra za pokretanje stroja putem rotorna je iz I. stoljeća grčkog inženjera Herona Aleksandrijskog, a prve vjetrenjače za praktičnu primjenu se pojavljuju između Afganistana i Irana oko VII. stoljeća, te se koriste za mljevenje i pumpanje vode. To su bile vjetrenjače s vertikalnom osi vrtnje i pravokutnim lopaticama s jedrima.

Prva vjetrenjača s horizontalnom osi vrtnje pojavljuje se u Sjeverozapadnoj Europi 1180-ih godina. Poznato je da se u to doba vjetrenjače koristili i za pumpanje morske vode za dobivanje soli u Kini i na Siciliji.

Zanimljivo je da Europske vjetrenjače s horizontalnom osi konstrukcijski su bile značajno različite od Afganistanskih i Iranskih vjetrenjača s vertikalnom osi vrtnje te se smatra da su ta dva otkrića u potpunosti bila odvojena i neovisna.

Do 14. stoljeća nizozemske vjetrenjače se koriste za isušivanje delte Rajne. Prvi vjetro-agregat visine 10 (m) s platnenim jedrima koji je pretvarao energiju vjetra u električnu je konstruirao 1887. godine škotski profesor James Blyth. Služio mu je za osvjetljavanje vikendice, koja je ujedno bila i prva kuća na svijetu napajana električnom energijom proizvedenom iz energije vjetra.

U to vrijeme u SAD-u Charles F. Brush konstruirao vjetro-agregat s promjerom rotora 17 m, postavljenim na 18 m visoki stup, ukupne snage 12 (kW), ono što je zanimljivo je velik broj lopatica, njih čak 144 u usporedbi s današnjim modernim vjetro-agregatima.

Danski znanstvenik Poulla Cour je prvi zaključio da vjetro-agregat s manjim brojem lopatica se brže vrti te je učinkovitiji od prethodnih. On je 1891.godine razvio prvi vjetro-agregat sa značajno smanjenim brojem lopatica na koji je primijenio značajke aerodinamike.



Do kraja prvog svjetskog rata, jeftina i lako dostupna fosilna goriva, te znatno veće snage termoelektrana bile su prevelika konkurencija za novi razvoj vjetro-agregata, koji je bio značajno usporen.

Korištenje vjetrenjača u manjoj mjeri, kroz razne svrhe nastavljeno je do velike energetske krize sedamdesetih godina prošlog stoljeća. Tada je svijest o nedostatku nafte promijenila energetska sliku svijeta, te naglo povećala interes za alternativne izvore energije. To otvara put ponovnog ulaska na velika vrata vjetrenjača kao generatora električne energije. Tijekom godina vjetrenjače su prerasle u sofisticirane uređaje kojima je namjena bila proizvodnja električne energije. Od tada pa do današnjih dana, dimenzije vjetro-agregata kao i njihova snaga su u stalnom porastu.[2]

### 3. ENERGIJA VJETRA

Vjetar predstavlja energetski resurs koji se ne može uskladištiti, a po svojoj prirodi je nepredvidljiva pojava, dok je njegova snaga odnosno brzina vrlo promjenjiva. Nastanak vjetra je složen proces do kojeg dolazi radi uslijed razlika u gustoći zračnih masa. Zrak struji s mjesta veće gustoće ka mjestu manje gustoće te traje dok se gustoće ne izjednače. Većina energije strujanja vjetra je na velikim visinama, gdje brzina može prelaziti i 160 (km/h). Izračuni navode da je 72 (TW) energije iskoristivo u komercijalnu svrhu. Dovoljna je i mala promjena lokacije koja može rezultirati velikom promjenom brzine vjetra. Važno je reći da ni u praksi ni teoretski nije iskorištena ukupna snaga vjetra.

S obzirom na nemogućnost uskladištenja potrebno je definirati uvjete pogona sustava za pretvorbu energije vjetra u elektroenergetskom sustavu. Usprkos tomu, na određenim područjima Zemlje, njegovu energiju je moguće koristiti za proizvodnju električne energije. Za energetska iskorištavanje optimalan je vjetar do *srednje jačine*, koji ima što veću učestalost a što manje velikih oscilacija. Energija vjetra koja se može upotrijebiti na koristan način ovisi o *trećoj potenciji* srednje brzine vjetra koji puše, ali gustoći zraka, koja dalje ovisi o temperaturi i nadmorskoj visini.

Energija vjetra ovisno o specifičnoj snazi vjetra u određenom vremenskom intervalu može se zapisati;

$$E_{k,vj} = \int_0^t P_{vj}(t) dt \quad (3-1)$$

gdje je  $E_{k,vj}$  predstavlja kinetičku energiju vjetra,  $P_{vj}$  snaga vjetra, a  $t$  vremenski interval u kojem vjetar puše, jednostavnije, ako kažemo da vjetar puše jednoliko u određenom vremenskom intervalu  $T$  jednadžba će glasiti:

$$E_{k,vj} = \frac{\rho \times v^3 \times T}{2} \quad (3-2)$$

gdje je  $P_{vj}$  zamijenjen sa:

$$P_{vj} = \frac{\rho \times v^3}{2} \quad (3-3)$$

pri čemu je  $\rho$  gustoća zraka, a  $v^3$  treća potencija brzine vjetra.

Kako je već spomenuto, gustoća zraka<sup>1</sup> ovisi o nadmorskoj visini (tj. tlaku) i temperaturi. Tako gustoću zraka za određeno područje i vremenski period možemo odrediti kao:

$$\rho = \rho_0 \times \frac{288 P_b}{760 T} \quad (3-4)$$

pri čemu je  $\rho_0$  gustoća zraka pri standardnim uvjetima,  $P_b$  barometarski tlak, a  $T$  temperatura zraka.

Iskoristivost energije vjetra je ograničena, te se u slobodnoj struji zraka samo jedan njen dio može pretvoriti u korisnu energiju. Razlog je u činjenici da u slobodnoj struji vjetra isti mora nastaviti svoje strujanje da bi omogućio dolazak vjetru iza sebe. To ograničenje naziva se Betzov zakon. On se izražava kroz stupanj aerodinamičke pretvorbe koji je ograničen Betzovom granicom, a koja iznosi 0,593.

Drugim riječima to znači da se maksimalno 59,3% energije vjetra može pretvoriti u korisnu energiju aerodinamičkom pretvorbom u slobodnoj struji vjetra.

---

<sup>1</sup> Zrak je smjesa plinova što je kao omotač vezana uz zemlju pretežno gravitacijskim silama, sudjeluje u njenoj vrtnji, tvori njenu zemljinu atmosferu i nužna ja za život na zemlji (Hrvatska enciklopedija)

## 4. SASTAVNI DIJELOVI VJETROAGREGATA

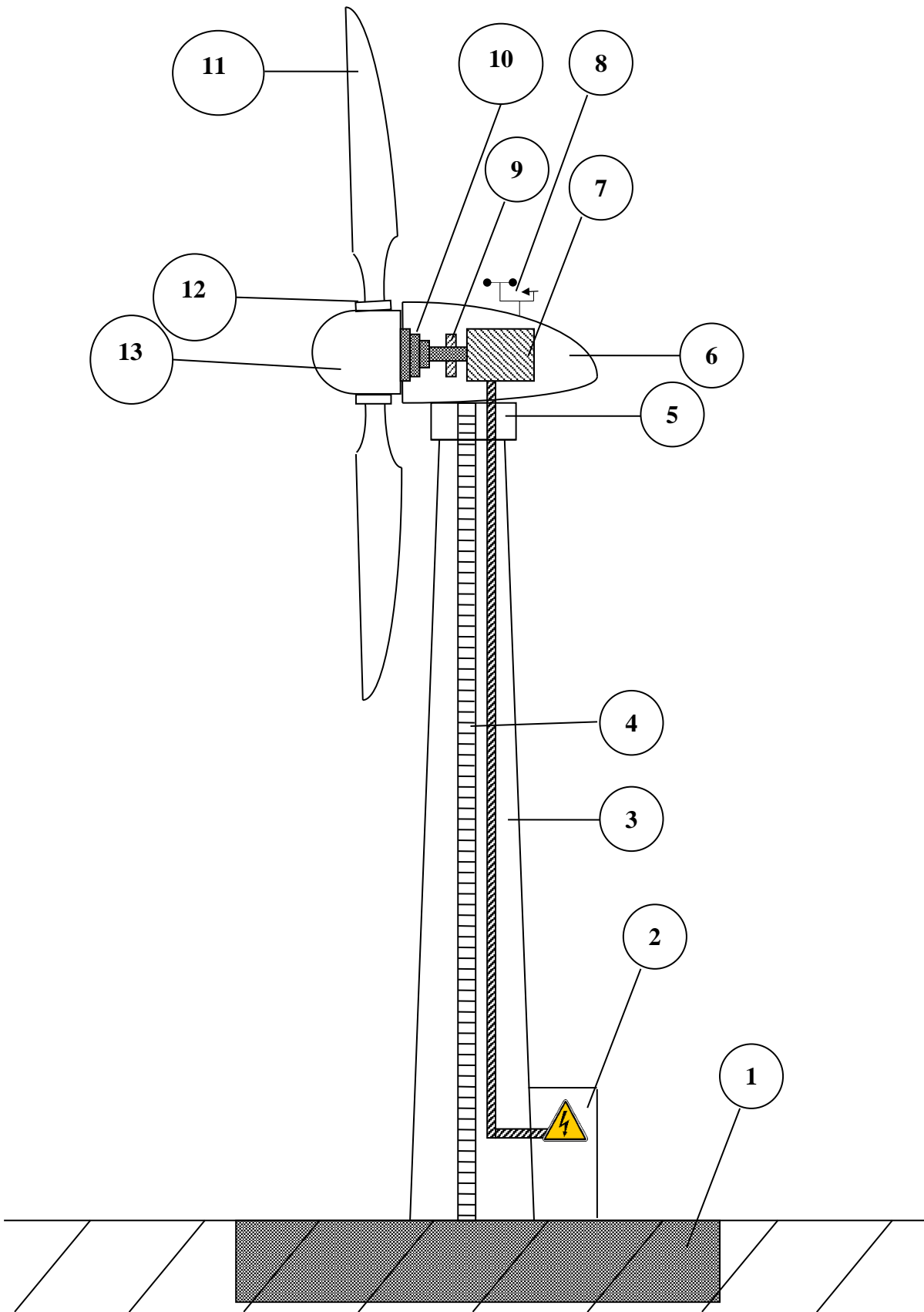
Svaki vjetroagregat sastoji se od rotora i generatora. Oni su povezani pogonskim vratilom a između njih može se nalaziti multiplikator (prijenosnik snage) što bi značilo da kod većine manjih vjetroagregata kao i onih s direktnim pogonom nema prijenosnog sustava.

Sklop je zatvoren u gondolu koja je smještena na stup određene visine s ciljem iskorištavanja energije koja je veća na višim visinama. Također, svaki vjetroagregat posjeduje sustav za upravljanje, hlađenje i kontrolu.

Suvremeni vjetroagregati su kompleksni uređaji koji se sastoje od niza sofisticiranih dijelova odgovornih za pouzdan i siguran rad. To su sustav za zakretanje i kočenje, sustav za uležištenje, elektronički uređaj za pretvorbu i prilagodbu el.energije i sustava za regulaciju rada vjetroagregata.[3]

Na prikazu vidljiva konstrukcija tipičnog vjetroagregata sa horizontalnom osi vrtnje (pogled.sl.br.4.1.)

1. Temelj
2. Veza na električnu mrežu
3. Nosivi stup
4. Ljestve za pristup dijelovima u kućištu
5. Regulacija usmjerenja vjetroturbine (YawControl)
6. Kućište vjetroagregata
7. Električni generator
8. Anemometar, uređaj za mjerenje brzine i smjera vjetra
9. Električna ili mehanička kočnica
10. Multiplikator
11. Lopatica rotora
12. Regulacija napadnog kuta lopatice (PitchControl)
13. Kućište vjetroturbine



Slika broj 4.1. (izvor autor)

#### **4.1. Temelj**

Za kvalitetnu izvedbu svakog vjetroparka potrebno je ispitati podlogu na kojoj se ona gradi jer o njoj ovisi kvaliteta temelja. Tako se u temelj kvalitetnije (tvrđe) podloge utroši oko 650 metara kubičnih betona, dok u dijelove gdje bi podloga bila mekša više od 800 kubika.

#### **4.2. Veza na električnu mrežu**

Unutarnjim kabliranjem stvara se sustav zajedničkih sabirnica kojima su svi vjetroagregati međusobno povezani, te zajedničkim kablom spojeni na transformatorsku stanicu.

#### **4.3. Nosivi stup**

U podnožju svakog stupa nalazi se transformator koji povezuje vjetroagregat sa srednje naponskom mrežom, mjerna i kontrolna jedinica. Katkada se transformator nalazi u zasebnoj građevini u podnožju stupa. Stup može biti izveden na više načina : cjevasti , konusni, rešetkasti, teleskopski, učvršćeni i povezani. Najčešće se koristi cjevasta konstrukcija jer ima najveću otpornost na vibracije i visoke je čvrstoće. Koristi se i rešetkasta konstrukcija stupa zbog svoje jednostavnosti. Moguće je rastaviti na manje dijelove a i prikladnija je za prijevoz i ugradnju.

#### **4.4. Ljestve za pristup dijelovima u kućištu**

Unutar stupa nalaze se stube ili ljestve za pristup dijelovima u kućištu, a kod visokih stupova se ugrađuje dizalo.

#### **4.5. Regulacija usmjerenja vjetroturbine (YawControl)**

Zakretnik koji služi za regulaciju usmjerenja vjetroturbine nalazi se ispod kućišta turbine na vrhu stupa, a sustav za mjerenje vjetra smješten na kućištu. On mjeri i izračunava brzinu i smjer vjetra i prema tim podacima upravljački sustav odlučuje kada, za koliko i u kojem smjeru zaokrenuti kućište i rotor vjetroturbine. Kada su kućište i rotora u optimalnome položaju, pokreće se horizontalna kočnica koja drži vjetroturbinu u tom položaju. Zakretanje zapravo vrši

motor koji na sebi ima ugrađenu kočnicu koja onemogućuje zakretanje kućišta zbog naleta vjetra. U stvarnosti postoji uvijek malo odstupanje od smjera vjetra i optimalnog položaja rotora.

To odstupanje se zove "*yawangle*" i iznosi cca. 5%.

#### **4.6. Kućište vjetroagregata**

Kućište se nalazi na tornju, a osnovni dijelovi od kojih se sastoji su mjenjač, osovina velike brzine, osovina male brzine, generator, kontroler i kočnica. Komponente unutar kućišta štiti poklopac. Mogu biti dimenzija dovoljnih da unutar njih tehničar može stajati dok radi.

#### **4.7. Električni generator**

Uloga generatora u sustavu vjetroturbine je pretvorba mehaničke u električnu energiju. Može biti sinkroni ili asinkroni. Tip generatora se izabire ovisno o načinu spajanja na mrežu.

#### **4.8. Anemometar**

Uređaj za mjerenje brzine vjetra koji podatke prikuplja i šalje prema kontroleru. Anemometar koji se najčešće koristi se sastoji od tri čašice koje se nalaze na vrhu osovine te okreću u smjeru vjetra. Broj okretaja registrira se elektronički, a uz anemometar se postavlja i mehanizam koji registrira smjer vjetra. Pomoću podataka o brzini i smjeru, izrađuje se ruža vjetrova nekog područja.

#### **4.9. Električna ili mehanička kočnica**

Kada brzina naleta vjetra prijeđe maksimalnu vrijednost dolazi do izrazitog dinamičkog opterećenja. Zato mora postojati sustav kočenja kako ne bi došlo do oštećenja. Najčešća izvedba

sustava kočenja je s disk kočnicom koja laganim kočenjem regulira broj okretaja rotora kao ispomoć aero dinamičkom kočenju.

#### **4.10. Multiplikator**

Multiplikator se koristi za povećanje brzine vrtnje ako je brzina vrtnje lopatica premala za proizvodnju električne energije. Za usklađivanje broja okretaja vjetroturbine s brojem okretaja ugrađenog generatora potreban je multiplikator s automatskom regulacijom brzina generatora.

#### **4.11. Lopatica rotora**

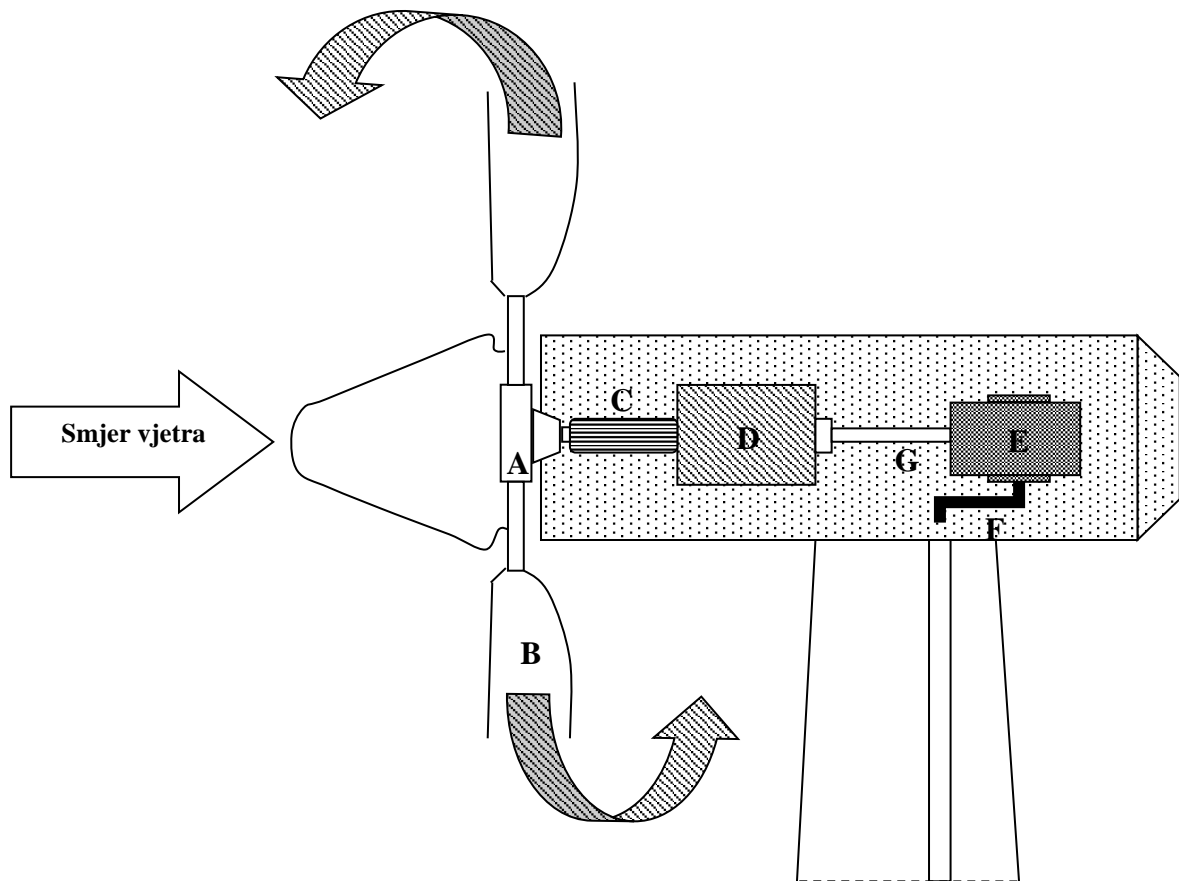
Lopaticе suvremenih vjetroturbina su izrazito vitke i lagane. Konstrukcijski nalikuju krilu zrakoplova. Tradicionalne vjetroturbine su rađene s različitim brojem lopatica, no suvremene vjetroturbine se grade s tri lopaticе. Materijali koji se koriste za izradu lopatica su većinom kompozitni materijali pa je stoga moguće proizvesti lopaticе kompleksne geometrije.

#### **4.12. Regulacija napadnog kuta lopaticе (Pitch Control)**

Kontroler turbine provjerava izlaznu snagu turbine nekoliko puta u sekundi i kada postane previsoka naređuje mehanizmu za nagib da trenutno okrene lopaticu od vjetra. Lopaticе se okreću prema vjetru čim brzina vjetra padne. Njihovim okretanjem upravlja kompjuter kako bi maksimizirali izlaznu snagu pri svim brzinama vjetra.

#### **4.13. Kućište vjetroturbine**

Štiti okoliš od buke samog sustava, kao i generatorski sustav od okolišnih utjecaja.



Slika broj 4.2. (izvor autor)

- (1) smjer vjetra,
- (2) vjetar pokreće rotor (A) i lopatice (B),
- rotor i lopatice okreću osovinu (C),
- osovina aktivira zupčanike unutar prijenosa (mjenjača) (D) zbog povećanja brzine,
- druga osovina (G) se okreće unutar generatora gdje elektromagnetizam generira ele. energiju,
- ele. kabel (F) prenosi ele. energiju iz generatora niz toranj.



## 5. VRSTE VJETROTURBINA

U literaturi [1] D. Rajković daje podjelu i izvedbe suvremenih vjetroturbina.

Tako imamo:

1. Vjetroturbine koje rade na principu otpornog djelovanja (drag devices),
2. Vjetroturbine koje rade na principu potiska (lift devices)
3. Vjetroturbine koje rade na kombiniranju obaju principa.

Vjetroturbine se najčešće dijele na dva osnovna principa rada. One koje rade na principu otpornog djelovanja te samim time imaju manju iskoristivost energije vjetra, te na one vjetrenjače koje rade na principu potiska. Često je da se danas kombiniraju oba principa.

D. Rajković dalje u tekstu vjetroturbine dijeli i prema konstrukcijskim i radnim značajkama:

- a) položaju osi turbinskog kola: vjetroturbine s vodoravnom osi i okomitom osi,
- b) omjeru brzine najudaljenije točke rotora i brzine vjetra: brzohodne i sporohodne,
- c) broju lopatica: višelopatične, s nekoliko lopatica i s jednom lopaticom,
- d) veličini zakretnog momenta: visokomomentne i niskomomentne,
- e) načinu pokretanja: samokretne i nesamokretne,
- f) efikasnosti pretvorbe energije vjetra u zakretni moment: nisko i visoko efikasne i
- g) načinu okretanja rotora prema brzini vjetra: promjenjive i nepromjenjive.

### 5.1. Vjetroturbine s horizontalnom osi vrtnje (HAWT)

Vjetroturbine s horizontalnom osi vrtnje jesu turbine čija je os vrtnje paralelna sa smjerom struje vjetra i tom, ujedno je to i najčešće zastupljena vrsta turbine. Često su izvedene s tri lopatice katkada se mogu vidjeti i sa dvije.

Sastavljene su od rotora, vratila i električnog generatora smještenog u kabini na vrhu stupa. Turbine s horizontalnom osi moraju biti okrenute direktno prema vjetru te se zbog toga koristi senzor uparen sa servo motorom. Turbine se dijele na one koje su okrenute prema vjetru

i na one koje gledaju od vjetra. Najčešće su one okrenute prema vjeru jer se tako izbjegava utjecaj turbulencija koje eventualno mogu nastati iza turbina.

Prednost turbina koje gledaju od vjetra je ta što se u njima ne moraju ugrađivati mehanizmi za zakretanje, a mana je to što nisu toliko pouzdane i trajne.

Najčešće vjetroturbine sa horizontalnom osi vrtnje, kao što je već spomenuto, imaju tri lopatice i elektronički sustav koji ih usmjerava prema vjetru te je njihova obodna brzina nekoliko puta veća od brzine vjetra, imaju visok stupanj iskoristivosti te su pouzdane.

Lopatice se u uglavnom boje u sivu boju da bi se stopile s okolnim oblacima. Duge su od dvadeset do pedeset i na više metara.

Tornjevi variraju visinom od šezdeset do sto i na više metara. Dizajn tornja je važan faktor kod vjetroturbine sa horizontalnom osi, jer na višoj nadmorskoj visini vjetar struji brže.

S dvostrukim povećanjem nadmorske visine, brzina vjetra se povećava za 10% po danu a po noći za 20 do 60 %. Vjetroturbine sa horizontalnom osi vrtnje moraju imati visinu tornja dva do tri puta veću od duljine lopatica. One se vrte brzinom od deset do dvadeset dva okretaja u minuti.

Brzina se pomoću prijenosnog sustava (reduktor) uvećava i predaje električnom generatoru.

#### Prednosti:

- veća učinkovit u proizvodnji ele. energije,
- visoki tornjevi omogućavaju pristup većim brzinama vjetra,
- bolja stabilnost zbog lopatica koje se nalaze sa strane,
- bolja kontrola zbog mogućnosti zakreta lopatica to omogućuje namještanje optimalnog kuta te tako vjetroturbina iskorištava maksimum energije vjetra i
- minimalna potencijalna šteta zbog mogućnosti fiksacije lopatica u oluji.

#### Nedostatci:

- skuplja izvedba jer većina turbina zahtjeva sustav za zakretanje turbine,
- problematična rad u vjetrovima na malim nadmorskim visinama,
- transport (visoki tornjevi i duge lopatice turbine jesu problematični za transport kako na moru tako i na kopnu te zbog toga troškovi mogu zauzimati i do 20% ukupnih troškova,
- postavljanje (zahtijevaju visoke i skupe kranove),

- trajnost (izvedbe koje gledaju od vjetra pate od smanjene trajnosti i pouzdanosti zbog turbulencija kojima su izložene).

## **5.2 Vjetroturbine s vertikalnom osi vrtnje (VAWT)**

Glavna značajka vjetroturbine sa vertikalnom osi vrtnje jest vertikalno postavljena os vrtnje. Prednost ovakve konfiguracije je ta da turbina ne mora biti uperena direktno u vjetar, što je korisno na mjestima gdje je smjer vjetra promjenjiv. Razlika od HAWT može biti postavljena bliže tlu i nisu potrebni visoki tornjevi, a samim time su pristupačnije za održavanje.

Negativna strana ovakvih turbina je ta što je na nižim nadmorskim visinama, manje vjetra te je automatski manje energije raspoloživo za transformaciju, osim u slučaju kada su postavljene na krov zgrada te se strujanje vjetra povećava. Osim navedenog imaju kraći životni vijek zbog istrošenih ležajeva tj. vibracija uzrokovanih turbulencijama koje se događaju na nižim nadmorskim visinama.

VAWT turbine se najčešće dijele na Darrieusove i Savoniusove turbine.

### **5.2.1. Darrieusova turbina**

Karakteristika Darrieusove turbine je da su lopatice u obliku slova C spojene na vrhu i dnu vertikalne osi, te joj daju jajast izgled. Zbog toga je dobila nadimak (*eng. Eggbeater turbine*). Izrađuje se sa dvije ili tri lopatice i imaju dobru efikasnost, ali proizvode ciklička naprezanja što dovodi do slabije pouzdanosti. Potreban im je eksterni izvor električne energije pri pokretanju radi slabog početnog okretnog momenta.

### **5.2.2. Spiralna Gorlov-a turbina**

Gorlov turbina je unaprijeđena Darrieusova turbina. Razlikuje se po tome što ima spiralne lopatice, te se može sama pokrenuti bez eksternog izvora električne energije. Smanjena je buka i vibracija.

### 5.2.3. Savoniusova turbina

Savoniusova turbina je karakteristična po obliku slova S. Karakterizira ju oblik slova S ako se gleda odozgora. Ova turbina se okreće poprilično sporo, ali stvara značajan okretni moment. Zbog svoje male okretne brzine nije pogodna za proizvodnju električne energije u većim količinama. Međutim, proizvedene su male Savoniusove turbine pretežno za kućnu upotrebu.[1]

## 6. OPIS RADA VJETROAGREGATA

### 6.1. Osnovni princip rada vjetroagregata

Energija gibanja sadržana u vjetru korištenjem rotora vjetroagregata se pretvara u mehaničku energiju vrtnje. Putem pogonske osovine mehanička energija vrtnje rotora se prenosi na električni generator. Mehanička energija vrtnje, pomoću električnog generatora, pretvara se u električnu energiju.

### 6.2. Fizikalne osnove vjetroagregata

Strujanje vjetra uz lopatice vjetroagregata, zbog karakteristične aerodinamičke konstrukcije, uzrokuje razliku u statičkom tlaku čiji je rezultat zakretni moment na osovini generatora. Na vjetroagregat djeluje komponenta sile u smjeru rotacije lopatica, i komponenta koja svojim djelovanjem pobuđuje oscilacije tornja. Snaga vjetra koji se giba brzinom  $v_{vj}$  unutar presjeka polumjera  $R$  jednakom dužini lopatice iznosi:

$$P_{vj} = \frac{1}{2} \rho_z R^2 \pi v_{vj}^3 \quad (6.1)$$

Vjetar koji prolazi kroz rotor vjetroagregata ne gubi svu snagu. Uvodi se koeficijent snage vjetroagregata  $C_p$ , a dobiva se eksperimentalnim postupkom.

On predstavlja stupanj iskorištenja snage vjetra.

izraz za mehaničku snagu vjetroagregata:

$$P_m = \frac{1}{2} C_p \rho_z R^2 \pi v_{vj}^3 \quad (6.2)$$

Koeficijent snage  $C_p$  je statička funkcija ovisna o kutnoj brzini vrtnje  $\omega$ , brzini vjetra  $v_{vj}$  i kutom zakreta lopatica  $\beta$ , kao ulaznim varijablama. Maksimalni teoretski iznos koeficijenta snage je poznat pod nazivom Betzov koeficijent. [4] On iznosi  $16/27 \approx 59.3\%$  i postiže se kada je brzina vjetra iza rotora jednaka trećini ulazne brzine vjetra u rotor.

Koeficijent snage se kod današnjih vjetroagregata kreće oko 50%. Relacija za aerodinamički moment slijedi iz izraza (6.2) i dobiva se dijeljenjem mehaničke snage vjetroagregata i brzine vrtnje vjetroturbine:

$$M_a = \frac{1}{2} \frac{C_p \rho_z R^2 \pi v_{vj}^3}{\omega} \quad (6.3)$$

U matematičkim opisima vjetroagregata koristi se omjer obodne brzine rotora na vrhu lopatice i brzine vjetra:

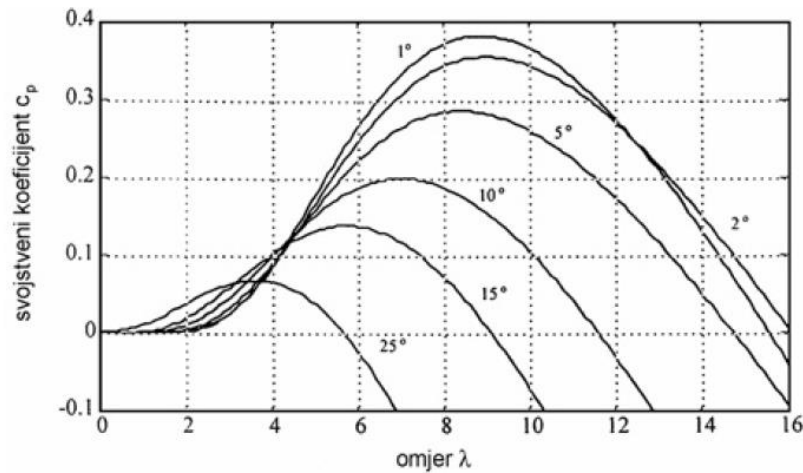
$$\lambda = \frac{|\omega R|}{v_{vj}} \quad (6.4)$$

Koeficijent  $\lambda$  je u engleskoj literaturi poznat kao *tip speed ratio*.

Na slici broj 6.1 prikazan je tipični oblik krivulje svojstvenog koeficijenta dobiven analitičkom aproksimacijom.[5]

Uvođenjem dodatne proporcionalno-integracijske povratne veze po snazi (ponekad i brzini vrtnje) agregata, izvodi se stabilizacija odziva vjetroturbine putem kuta zakreta krila propelera  $\beta$ . Sustav regulacije kuta zakreta krila propelera  $\beta$  potrebno je pravilno modelirati s obzirom da kut zakreta samoga krila, jer izravno utječe na ulaznu mehaničku snagu te time i na električnu snagu koju isporučuje generator. Ovaj sustav se osim za stabilizaciju odziva koristi i za ograničavanje snage koja se predaje mreži u uvjetima visokih brzina vjetra. Kako se

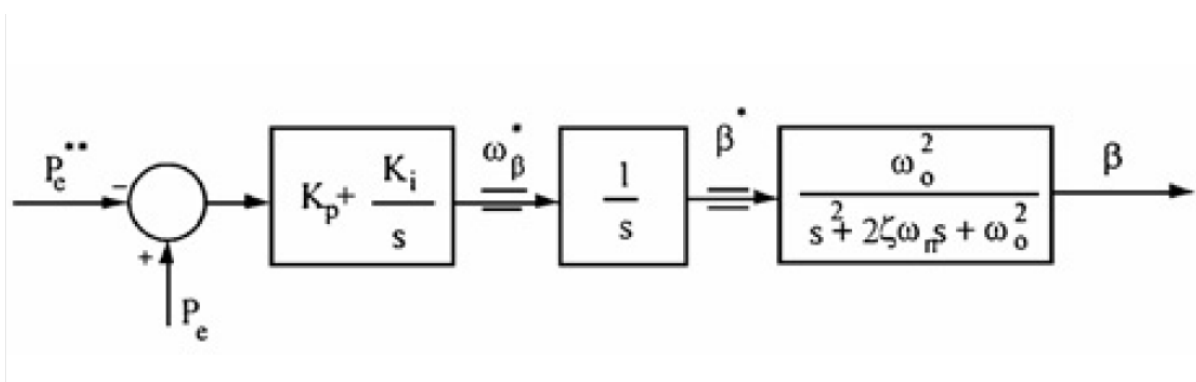
povećavaju vrijednosti kuta zakreta  $\beta$ , koriste se niže krivulje sa slike broj 6.1. čime se dobivaju smanjene vrijednosti svojstvenog koeficijenta  $C_p(\beta, \lambda)$ .



Slika broj 6.1. Svojstveni koeficijent snage ovisan o  $(\beta, \lambda)$

Stoga je u uvjetima otočnog pogona regulator brzine vrtnje/frekvencije moguće izvesti putem sustava regulacije kuta zakreta. Na slici 6.2. prikazan je model sustava regulacije kuta zakreta s povratnom vezom po izlaznoj snazi generatora  $P_e^{**}$ . Proporcionalno-integracijski član stvara referentnu brzinu promjene kuta  $\omega_\beta^*$  koja se ograničava u svrhu izbjegavanja preopterećenja mehanizma. Izlaz iz integratora također je ograničen, a predstavlja referentni kut zakreta  $\beta^*$ .

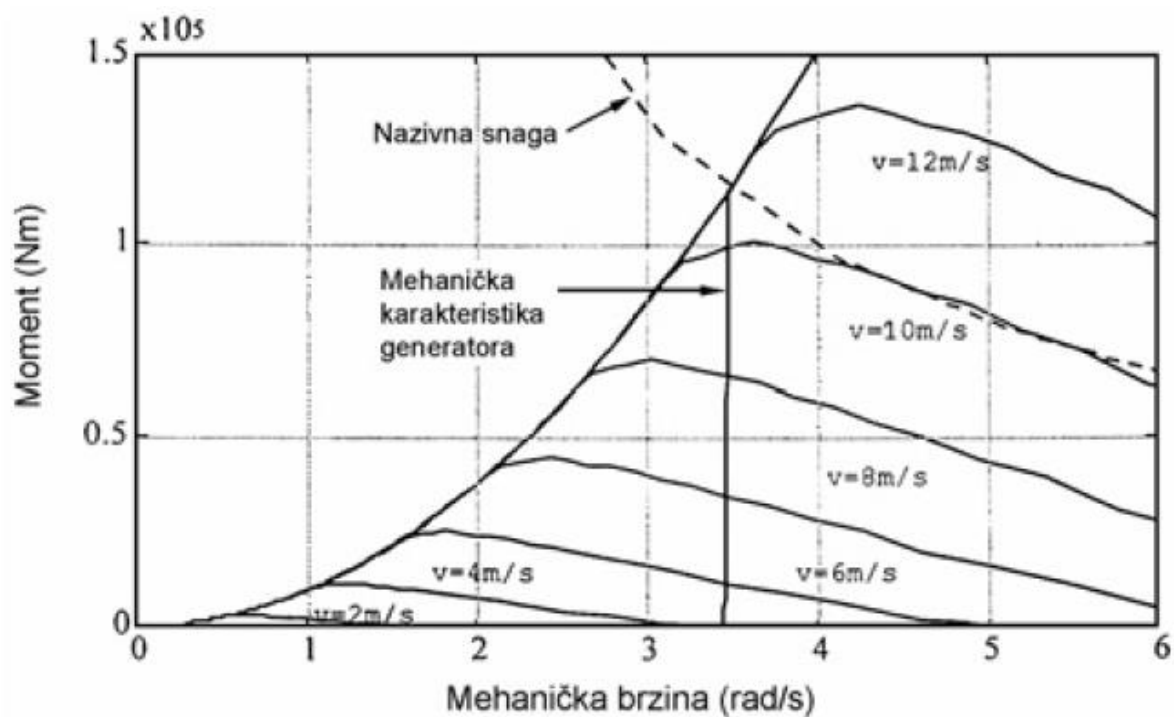
Regulacijskim članom drugog reda predstavljen je aktuator te dinamika propelera.



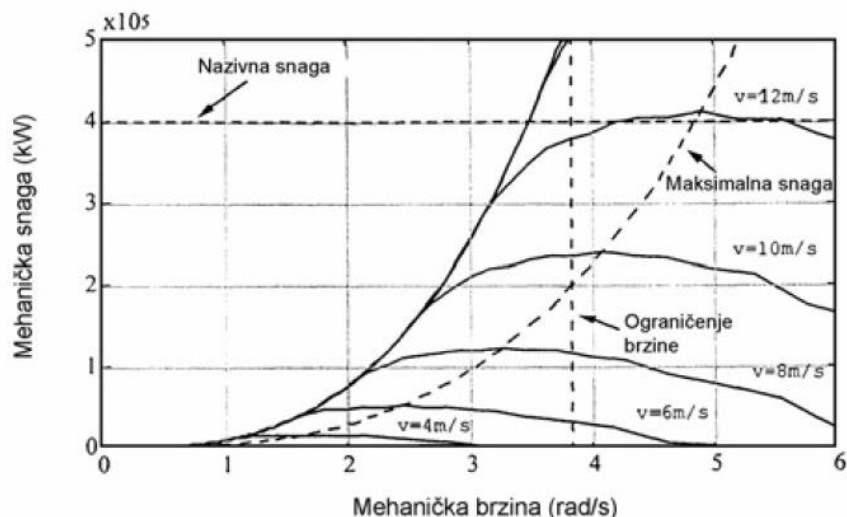
Slika broj 6.2. Sustav regulacije kuta zakreta elisa  $\beta$

Na temelju svojstvenog koeficijenta  $C_p(\beta, \lambda)$  te nazivnih veličina vjetroturbine i generatora moguće je definirati pogonsku točku na temelju mehaničkih karakteristika vjetroturbine. Na slici broj 6.3. predočene su karakteristike 400 (kW) vjetroturbine i asinkronog generatora u okviru izvedbe sa stalnom brzinom vrtnje i konstantnom frekvencijom. **Pogonska točka vjetroturbine nalazi se u sjecištu između jedne od karakteristika vjetroturbine (u ovisnosti o brzini vjetra) i karakteristike generatora.**

Sustav upravljanja kod vjetroturbine s promjenjivom brzinom vrtnje poprima vrlo različite oblike. Prema najrasprostranjenijem obliku, aerodinamička učinkovitost optimira se iskorištavanjem najveće raspoložive snage pri svakoj brzini vjetra. Na slici 6.3. prikazano je upravljanje prema najvećoj raspoloživoj snazi. Crtkanom linijom spojeni su maksimumi krivulja snage, odnosno optimalne pogonske točke s obzirom na različite brzine vrtnje.



Slika broj 6.3. Karakteristika 400 kW vjetroturbine i asinkronog generatora – stalna brzina vrtnje –



Slika broj 6.4. Upravljačka strategija zasnovana na najvećoj snazi – promjenjiva brzina vrtnje

U uvjetima niske brzine vjetra, prate se vrijednosti krivulje snage u potrazi za maksimumom energije koju predaje vjetroturbina. Pri većim brzinama vjetra javljaju se izvjesna pogonska ograničenja poput ograničenja kutne brzine, nazivnog momenta i ograničenja snage sustava.

U tom je području potrebno modificirati upravljačku strategiju na odgovarajući način kako se ne bi narušila ograničenja. Modifikaciju je prema jednom od pristupa moguće izvesti upravljanjem momentom generatora kako bi se ograničila brzina vrtnje rotora kod vjetroturbina bez sustava za regulaciju kuta zakreta.

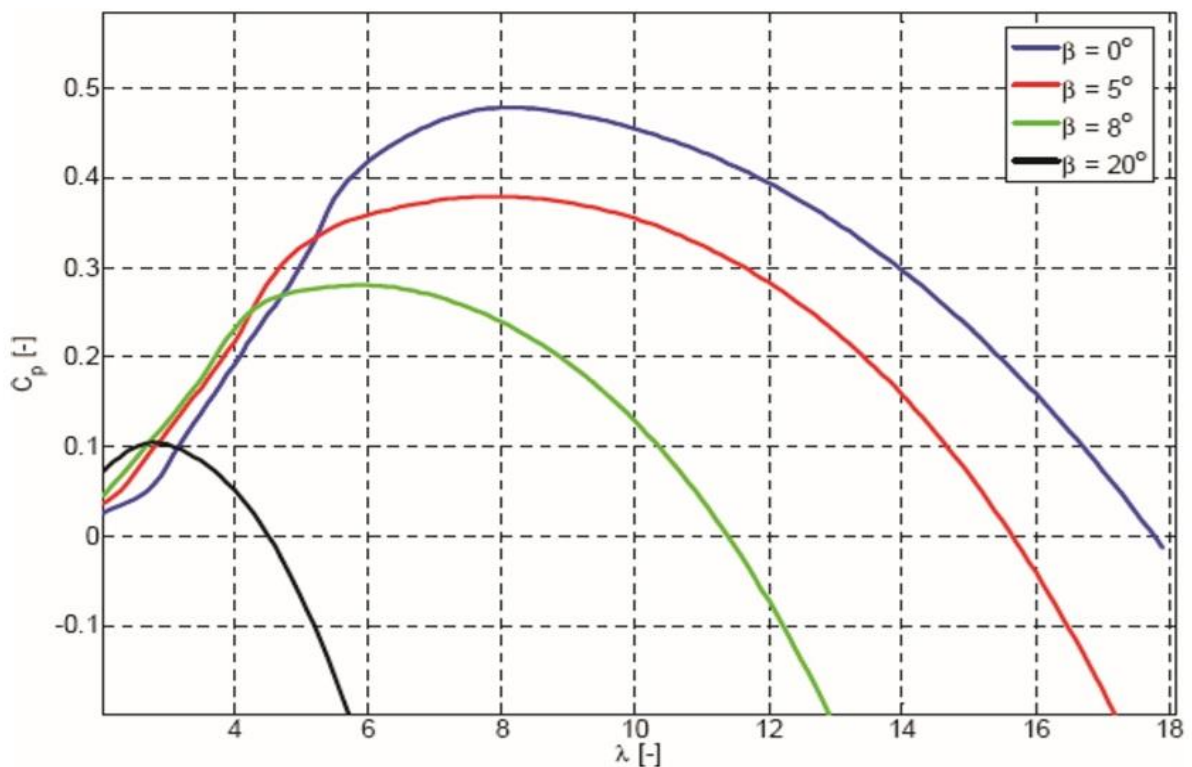
Prema drugom pristupu, upravlja se brzinom vrtnje putem regulacije kuta zakreta elisa propelera i postavlja referentna veličina momenta generatora na nazivnu vrijednost. Općenito, izvedbe s promjenjivom brzinom vrtnje imaju ulaznu referentnu snagu prema kojoj se izvodi regulacija njihove izlazne snage, ali samo pri vrijednostima koje su niže od najveće raspoložive snage vjetra.

Kao što se može vidjeti na slici broj 6.1. je prikazana ovisnost koeficijenta snage  $C_p$  o  $\lambda$  uz različite iznose kuta zakreta. **Na snagu turbine utječu brzina vjetra, brzina okretaja rotora i nagib lopatica.**

**Brzina vjetra je nekontrolirani ulazni signal koji se može smatrati smetnjom.** U drugu ruku brzina rotora i kut nagiba možemo kontrolirati kao promjenjive varijable. Maksimalna korisnost se postiže za kut zakreta  $\beta = 0^\circ$ , a povećanjem kuta zakreta se korisnost smanjuje i pomiče prema području s manjim iznosima koeficijenta  $\lambda$ .



Funkcija koeficijenta snage proizlazi iz aerodinamičkih karakteristika vjetroagregata i moguće ju je eksperimentalno odrediti mjerenjem zakretnog momenta turbine uz poznate iznose brzine vjetra, kuta zakreta i brzine vrtnje. Izmjereni zakretni moment se množi s brzinom vrtnje  $\omega$  kako bi se dobila mehanička snaga na vjetroturbini. Djeljenjem dobivenog iznosa snage s izračunatom snagom vjetra se dobije iznos koeficijenta snage. Na sličan način moguće je eksperimentalno odrediti krivulje sile potiska na rotor  $F_t$  u ovisnosti o  $\lambda$  i  $\beta$ .



Slika broj 6.5. Krivulje ovisnosti koeficijenta snage  $C_p$  o  $\lambda$  uz fiksni  $\beta$

Jednadžba na početku poglavlja pokazuje ovisnost snage vjetra o trećoj potenciji brzine. Takva drastična nelinearnost uvjetuje potpuno različite strategije upravljanja za brzine vjetra ispod i iznad nazivne. Pritom je nazivna brzina vjetra minimalna brzina uz koji vjetroagregat postiže nazivnu snagu. Kako bi se stvorili preduvjeti za sintezu upravljačkog mehanizma potrebno je poznavati matematički model procesa kojim se upravlja.[6]

## **7. NADZOR I KONTROLA RADA VJETROAGREGATA**

Vjetroagregati su uređaji koji su konstruirani za proizvodnju električne energije iz energije vjetra. Obično se nazivna snaga stroja dostiže pri brzini od oko 15 m/s. Oni nisu optimirani za veće brzine je su veće brzine vjetra rijetkost. Međutim kada se takve brzine vjetra dogode, onda je nužno žrtvovati dio energije u vjetru i zaštititi vjetroagregat od mogućih oštećenja. U tu svrhu svaki vjetroagregat ima neku vrstu kontrole snage. Postoje dva osnovna načina kontrole snage kod modernih vjetroagregata, stall i pitch kontrola.

Mikroprocesorski upravljani sustav je u osnovi zadužen za cjelokupno upravljanje i nadziranje rada vjetroturbinsko – generatorskog sustava. Ako ovakav sustav nije u cijelosti smješten na vjetroelektrani (kao što može biti slučaj), već je jednim dijelom na nekom udaljenijem mjestu, onda sustav zahtjeva i posebnu telekomunikacijsku opremu. [3]

### **7.1. Sustav za praćenje vjetra (Yawing)**

Sustav za praćenje vjetra može se svrstati u sustave za povećanje iskoristivosti vjetroturbina i u sustave za zaštitu vjetroturbina sa vodoravnom (horizontalnom) osi. Ovaj sustav radi na principu horizontalnog zakretanja vjetroturbina. Vjetroturbine sa vodoravnom (horizontalnom) osi, za razliku od vjetroturbina sa vertikalnom osi, moraju uvijek svojom orijentacijom pratiti smjer vjetra.

Orijentacija lopatica rotora uvijek mora biti tako namještena da su lopatice rotora okrenute prema vjetru pod optimalnim kutom. Ovo može biti problem za vjetroturbine sa promjenjivim kutom lopatica rotora ako su postavljene na mjestu gdje dolazi do vrlo brze promjene smjera vjetra zbog toga jer može doći do velikih fluktacija u snazi o čemu se mora voditi računa prilikom horizontalnog zakretanja vjetroturbina i prema tome se korigirati brzina rotora. Za zakretanje vjetroturbina u horizontalnom smjeru cijelo kućište vjetroturbine sa rotorom, prijenosom i generatorom mora biti pomično postavljeno na vrhu stupa.

## 7.2 Stall kontrola

Stall kontrola je pasivna kontrola snage. Lopatice rotora vjetroturbine pričvršćene su za glavčinu rotora pod fiksnim kutom. Princip rada temelji se na aero-dinamičkom oblikovanju lopatica koje su tako napravljene i montirane pod određenim kutom da kada brzina vjetra postane prevelika, dolazi do pojave turbulentnog strujanja.

Ova pojava se naziva "stall" u engleskom jeziku i označava gubitak sile uzgona. Kako se brzina vjetra mijenja, tako se mijenja i upadni kut na profil lopatice, a brzina vrtnje rotora ostaje ista. Napadni kut na lopaticu postaje sve strmiji.

Potlačna strana u tom slučaju gubi uzgon, a povećava se otpor zbog turbulentnog strujanja. To je pasivna progresivna regulacija snage koja osigurava da se generator ne preoptereći kako se povećava brzina vjetra. U idealnom slučaju snaga bi se trebala povećavati s brzinom do maksimuma i onda ostati ista neovisno o brzini vjetra. Međutim stvarne turbine nisu idealne.

Konstantna brzina vrtnje postiže se spajanjem generatora na električnu mrežu. Mreža se ponaša kao veliki zamašnjak i drži brzinu konstantnom, neovisno o promjenama u vjetru. Glavna prednost „stall“ kontrole snage je jednostavnost, odnosno izbjegavanje pokretnih dijelova unutar rotora i kompliciranih regulacijskih sustava. Međutim postoje i ozbiljni nedostaci. Radna krivulja ovisna je o aerodinamici lopatice. Ponašanje, odnosno radnu krivulju, teško je predvidjeti nakon što „stall“ počne.

„Stall“ profil lopatice također slabo prigušuje vibracije što izaziva savijanje i zamor materijala. „Stall“ je pojava koja inače u aerodinamici nije poželjna (nepoželjno svojstvo za zrakoplovna krila i lopatice helikoptera). Jedino je u industriji vjetra našla korisnu primjenu.

## 7.3 Pitch kontrola

Glavna značajka pitch regulacije snage jest mogućnost zakretanja lopatica oko vlastite uzdužne osi korištenjem hidraulike. Ova karakteristika omogućuje postavljanje lopatica tako da se uvijek osigurava optimalan kut upada struje zraka na lopatice, što znači da se mijenja geometrija rotora u pogonskom stanju. Elektronički regulatori provjeravaju položaj lopatica

nekoliko puta u sekundi. Kada brzina vjetra postane previsoka, lopatice rotora se lagano zakreću od vjetra. Isto tako kad uvjeti vjetra postanu opet optimalni, lopatice se zakrenu u vjetar. Osnovne prednosti su: lakši start, moguće je lopatice postaviti "na nož" (90°) pri visokim brzinama vjetra i smanjiti opterećenja na cijeli agregat. *Glavni nedostaci su nepouzdanost i cijena.* Zahtijeva elektroničku regulaciju koja mora znati u kojem su položaju lopatice i prilagoditi ih trenutnom vjetru.

#### **7.4. Oprema za zakretanje**

Služi za zakretanje turbinsko – generatorskog sustava. Nalazi se ispod kućišta vjetroelektrane, na vrhu stupa. Preko pužnog prijenosa (omjera reda veličine 1:1000) s velikim zupčastim prstenom, učvršćenim na stup, izravna se os osovine vjetroturbine s pravcem vjetra. Zakretanje vrši motor. On ima ugrađenu kočnicu koja onemogućuje zakretanje kućišta zbog naleta vjetra. Zakretanje kućišta regulira sustav koji je izvan funkcije kad su poremećaji smjera vjetra manji (u prosjeku jednom u deset minuta dogodi se zakretanje kućišta). [4]

#### **7.5. Kočni sustav**

Kočni sustav osigurava zaštitu i sigurnost rada vjetroelektrana. Kada generator ispadne iz mreže, odnosno brzina naleta vjetra prijeđe maksimalnu vrijednost (isključnu vrijednost, npr. 25 m/s) dolazi do izrazitog dinamičkog opterećenja, mora postojati kočni sustav kako bi rasteretio prijenosnik snage, odnosno zaustavio rotor.

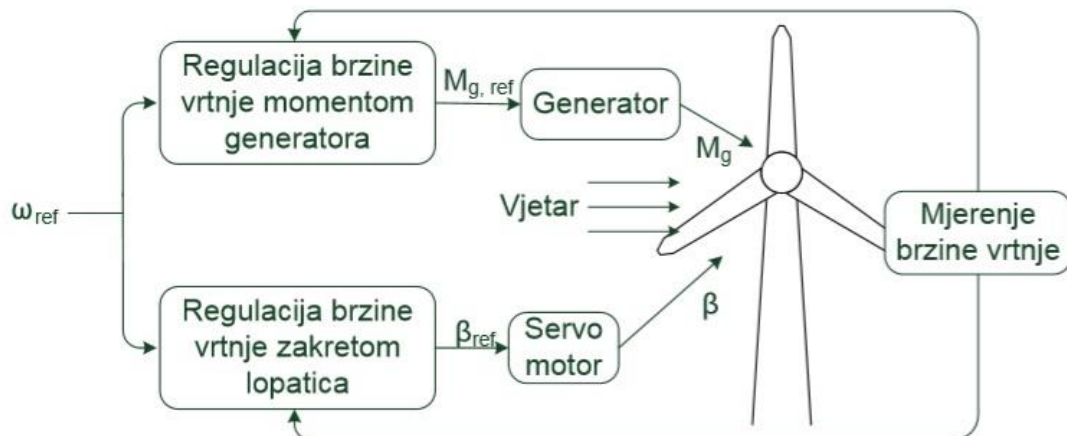
Zadatak ovog sustava je održati projektnu brzinu konstantnom, odnosno osigurati sustav čije je djelovanje dinamički uravnoteženo. Disk kočnica je najčešća izvedba kočnog sustava (kojima se na suvremenim strojevima upravlja mikroprocesorima), a smještena je na sporo-okretnoj osovini prije prijenosnika ili na brzo-okretnoj osovini generatora. [7]

## 8. OSNOVNI PRINCIPI UPRAVLJANJA VJETROAGREGATOM

Vjetroagregatom se upravlja s ciljem maksimiziranja proizvedene energije uz poštivanje nazivnih vrijednosti generatora vjetroturbine. Radna područja vjetroagregata su određena brzinom vjetra u odnosu na nazivnu brzinu koja predstavlja minimalnu brzinu vjetra uz koju se postiže nazivna snaga vjetroagregata.

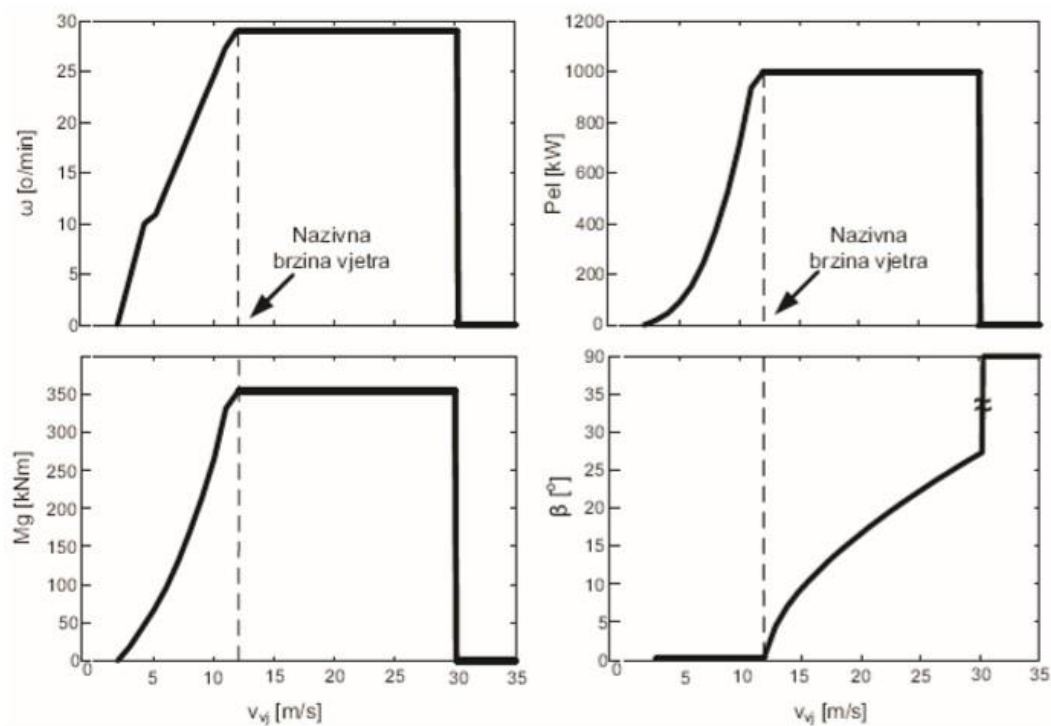
Ovisno o radnom području, regulacijski sustav ima različito djelovanje u cilju ispunjenja upravljačkih ciljeva. Ispod nazivne brzine vjetra se upravlja momentom generatora kako bi se sustav doveo u radnu točku s maksimalnim stupnjem aero-dinamičke pretvorbe s obzirom na dostupnu brzinu vjetra. Pritom je potrebno pripaziti na minimalnu i maksimalnu dopuštenu brzinu vrtnje koja je određena karakteristikama generatora. Na području iznad nazivne brzine vjetra generator proizvodi nazivnu snagu te se zakretanjem lopatica propušta višak energije vjetra i održava se nazivna brzina vrtnje rotora vjetroagregata. [8]

Načelna shema sustava upravljanja je prikazana na slici.



Slika broj 8.1. Načelna shema sustava upravljanja

Na slici broj 8.1. su prikazane statičke karakteristike vjetroagregata snage 1,0 (MW). Statičke karakteristike su rezultat momenta generatora ispod nazivne brzine vjetra i zakretom lopatica iznad nazivne brzine vjetra. Prekoračenje maksimalne dopuštene brzine vjetra  $v_{vj,max} = 30[m/s]$  rezultira aktiviranjem sigurnosnog signala koji povećanjem zakreta lopatica na  $90^\circ$  osigurava iščezavanje aero-dinamičkog momenta na rotoru vjetroagregata i njegovo zaustavljanje.



Slika broj 8.2 Statičke karakteristike vjetroagregata snage 1(MW)

### 8.1. Upravljanje iznad nazivne brzine vjetra

Na brzinama vjetra iznad nazivne je snaga koja se može dobiti iz vjetra veća od nazivne snage za koju je projektiran generator vjetroagregata. Zadatak sustava upravljanja je zakretanjem lopatica ograničiti snagu koju generator preuzima iz vjetra.

Upravljanje kutom zakreta se najčešće realizira u kaskadnoj strukturi. U podređenoj regulacijskoj petlji se nalazi servo-pogon zakreta lopatica, a referentni iznos zakreta zadaje nadređena regulacijska petlja po brzini vrtnje rotora vjetroagregata.

Vrtnja rotora vjetroagregata se nastoji zadržati na nazivnoj vrijednosti uz djelovanje promjenjivog iznosa brzine vjetra. Za regulaciju se najčešće koriste P i PI regulatori, zbog njihove jednostavnosti i razvijenih postupaka sinteze. Izražena nelinearnost sustava upravljanja uvjetuje uključenje adaptacije parametara regulatora ovisno o radnoj točki u kojoj se regulator nalazi.

Sintezu regulatora moguće je izvesti na više načina.

Parametriranje regulatora brzine vrtnje je najosjetljiviji zadatak u sklopu projektiranja sustava upravljanja vjetroagregata.

Uz postojanje nelinearnosti sustava upravljanja koja komplicira postupak sinteze regulatora, nepravilno podešen regulator zakreta lopatica može prouzročiti prekomjerno njihanje tornja u desnu poluravninu čime sustav ulazi u područje nestabilnosti. Fizikalna pozadina mogućnosti prelaska sustava u stanje nestabilnosti leži u spregnutosti sustava regulacije brzine vrtnje s njihanjem tornja vjetroagregata.

Stoga je pri parametriranju potrebno pripaziti na raspored polova zatvorenog kruga upravljanja. Preveliko pojačanje regulatora može imati za posljedicu prelazak slabo prigušenih polova dinamike tornja u desnu poluravninu čime sustav ulazi u područje nestabilnosti. Fizikalna pozadina mogućnosti prelaska sustava u stanje nestabilnosti leži u spregnutosti sustava regulacije brzine vrtnje s njihanjem tornja vjetroagregata.

Naime, njihanje tornja vjetroagregata u smjeru suprotnom od smjera puhanja vjetra ima za posljedicu veću efektivnu brzinu koju osjeća rotor vjetroagregata, a samim time i ubravanje rotora. Regulator će u cilju održavanja nazivne brzine povećati kut zakreta lopatica što uzrokuje smanjenje sile potiska.

S obzirom da sila potiska djeluje na toranj u smjeru puhanja vjetra, njeno smanjenje ima za posljedicu dostizanje većeg stupnja nagnutosti tornja. Nakon što toranj nastavi njihanje u smjeru vjetra, efektivna brzina vjetra se smanjuje, a zajedno se njom i brzina vrtnje rotora. Regulator lopatica djeluje smanjenjem kuta zakreta čime se povećava sila potiska na rotor. Povećanje sile potiska ima za posljedicu veći nagib tornja u smjeru vjetra. Očito je kako se iz periode u periodu amplitude oscilacija povećavaju te je stoga potrebno osigurati dovoljno malo pojačanje regulatora brzine vrtnje kako bi on bio neosjetljiv na promjene u brzini koje nastaju uslijed njihanja tornja vjetroagregata.

U praksi se primjenjuju različite metode parametriranja regulatora brzine vrtnje.

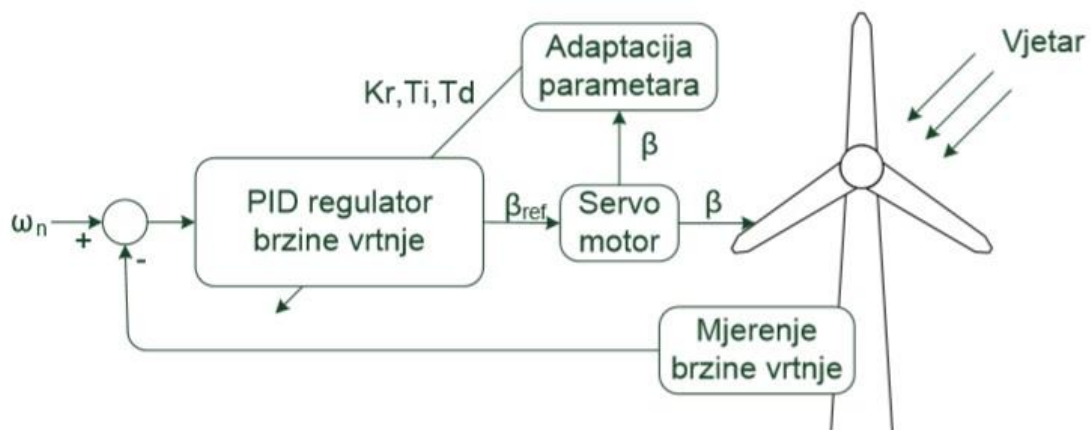
Kako bi karakteristike sustava upravljanja bile zadovoljavajuće u čitavom radnom području, nužno je uključiti adaptaciju parametara regulatora. Stoga je sustav potrebno linearizirati u više radnih točaka i za svaku radnu točku provesti sintezu regulatora.

Parametri regulatora se zapisuju u preglednu tablicu. Radna točka u kojoj se nalazi vjetroagregat je određena iznosom brzine vjetra. S obzirom da je mjerenje brzine vjetra nepouzdan, u praksi se pokazalo kako je identifikaciju radnog područja moguće izvesti korištenjem informacije o zakretu lopatica vjetroagregata.

Naime, pod pretpostavkom ispravnog rada regulatora brzine vrtnje, kut zakreta lopatica je u direktnoj vezi s brzinom vjetra što slijedi iz statičke karakteristike vjetroagregata (slika 8.2.).

Pokazuje se kako je i u dinamičkim uvjetima moguće koristiti navedenu vezu u svrhu parametriranja regulatora.

Blokovska shema regulacije brzine vrtnje zakretom lopatica je prikazana na slici broj 8.3.



Slika broj 8.3. Blokovska shema upravljanja brzinom vrtnje iznad nazivne brzine vjetra

## 8.2. Upravljanje ispod nazivne brzine vjetra

Upravljanjem ispod nazivne brzine vjetra se nastoji maksimalno iskoristiti energija dostupna u vjetru. U poglavlju 6.2. je pokazana ovisnost koeficijenta iskoristivosti snage vjetra  $C_p$  o kutu zakreta  $\beta$  i omjeru brzina  $\lambda$ . S obzirom da je ispod nazivne brzine vjetra kut zakreta lopatica fiksiran, koeficijent snage ima maksimum za poznati iznos optimalnog omjera brzina  $\lambda_{opt}$ .

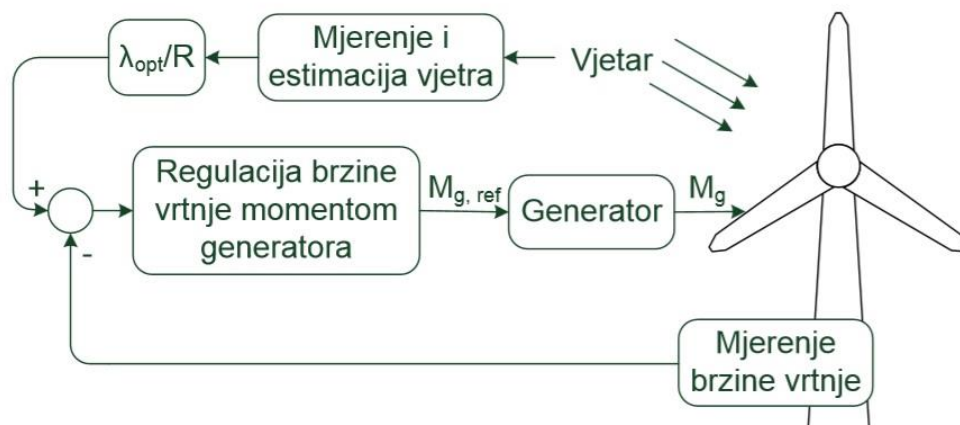
Prema tome, brzina vrtnje uz koju će se postići optimalno iskorištenje je određena brzinom vjetra. Promjenjivi iznos brzine vjetra rezultira zahtjevom za jednako promjenjivim iznosima brzine vrtnje. S obzirom na veliku tromost rotacijske mase na generatoru, vjetroagregat u takvim uvjetima ne može dostići maksimalnu efikasnost.



Sa stajališta prijenosa energije u mrežu, moderni vjetroagregati su opremljeni frekvencijskim pretvaračima s istosmjernim međukrugom te je bez obzira o brzini vrtnje rotora moguće osigurati mrežnu frekvenciju na priključku vjetroagregata na elektroenergetski sustav.

Postoji više načina upravljanja vjetroagregatom u cilju postizanja maksimalne iskoristivosti. Prvi način, koji koristi MPC regulator realiziran u ovom primjeru, podrazumijeva mjereni/estimirani iznos brzine vjetra. Regulator brzine vrtnje ovisno o dostupnoj informaciji o brzini vjetra generira odgovarajući upravljački signal momenta generatora. Blokovska shema sustava upravljanja je prikazana na slici broj 8.4.

Nedostatak ovog načina upravljanja je što brzinu vjetra nije moguće pouzdano mjeriti s obzirom da su anemometri postavljeni na gondoli vjetroagregata, nekoliko metara iza rotora. Vjetar kojeg mjeri anemometar predstavlja zakašnjeni mjerni signal koji je uz to degeneriran zbog prolaska vjetra preko lopatica rotora. Stoga je za uspješnu realizaciju ovakvog načina upravljanja potrebno implementirati odgovarajući estimator brzine vjetra.



Slika broj 8.4. Blokovska shema upravljanja momentom generatora ispod naz. brzine vjetra

Većina modernih vjetroagregata za optimiranje proizvedene snage ispod nazivne brzine vjetra koristi upravljački zakon koji se izvodi u nastavku. Iz dostupne brzine vjetra  $v_{vj}$  slijedi optimalan iznos brzine vrtnje prema relaciji:

$$\omega_{opt} = \frac{\lambda_{opt} v_{vj}}{R} \quad (8-1)$$

Uz optimalan iznos brzine vrtnje i poznatu brzinu vjetra, moguće je izračunati optimalan iznos aerodinamičkog momenta koji u stacionarnim uvjetima odgovara iznosu momenta generatora:

$$M_{a,opt} = M_{g,opt} = \frac{1}{2} \frac{\rho_z R^3 \pi v_j^2 c_p(\lambda_{opt}, \beta_{opt})}{\lambda_{opt}} = \frac{1}{2} \frac{\rho_z R^5 \pi c_p(\lambda_{opt}, \beta_{opt})}{\lambda_{opt}^3} \omega_{opt}^2 \quad (8-2)$$

Budući da su iznosi  $\lambda_{opt}$  kao i  $\beta_{opt}$  kojima se postiže maksimalan stupanj iskorištenja poznati, koeficijent  $C_p(\lambda_{opt}, \beta_{opt})$  zapravo predstavlja konstantu  $C_{p,max}$  te je izraz iznad moguće zapisati kao:

$$M_{g,opt} = K_\lambda \omega_{opt}^2 \quad (8-3)$$

gdje je koeficijent optimalnog momenta  $K_\lambda$  definiran kao:

$$K_\lambda = \frac{1}{2} \frac{\rho_z R^5 \pi c_{p,max}}{\lambda_{opt}^3} \quad (8-4)$$

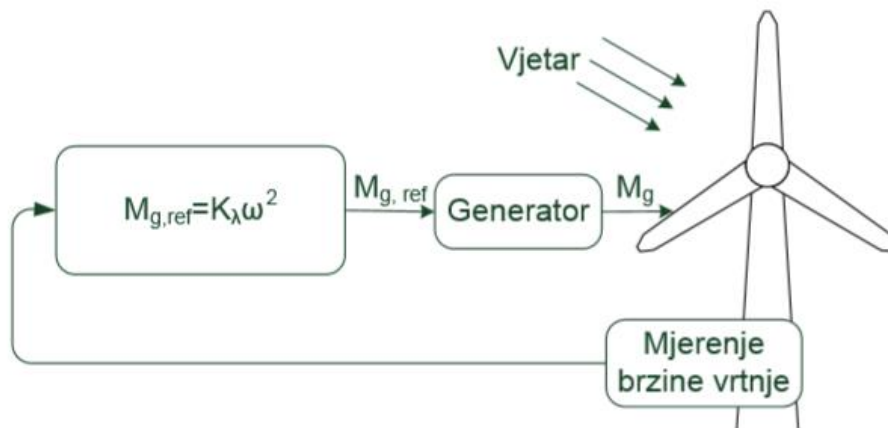
Koeficijent optimalnog momenta ima konstantnu vrijednost. Premda izvedeni optimalni upravljački zakon podrazumijeva postavljanje brzine vrtnje na optimalnu vrijednost s obzirom na dostupnu brzinu vjetra, brzina vjetra se u algoritmu eksplicitno ne koristi.

Naime, algoritam se bazira na pretpostavci da je uz optimalan omjer brzina  $\lambda_{opt}$  postignut optimalan aerodinamički moment. S obzirom da u stacionarnim uvjetima aerodinamički moment mora odgovarati momentu generatora, optimalan iznos momenta generatora ima za posljedicu postizanje optimalnog iznosa brzine vrtnje rotora.

U skladu s navedenim, upravljački zakon je izveden uvažavajući pretpostavke stacionarnosti. Međutim, pokazuje se kako je i u dinamičkim uvjetima moguće koristiti izraz (8-3) za upravljanje brzinom vrtnje s ciljem maksimiziranja iskorištenja energije sadržane u vjetru.

Povećanje brzine vrtnje iznad optimalne vrijednosti ima za posljedicu povećanje momenta generatora što ima kočni efekt na vrtnju rotora. S druge strane, smanjenje brzine vrtnje ispod optimalnog iznosa ima za posljedicu smanjenje momenta generatora što ima za posljedicu

ubrzavanje rotora vjetroagregata. Očito je kako je upravljanjem u otvorenom krugu uz statički izveden kvadratni upravljački zakon (8-3) postignut stabilan sustav upravljanja. Blokova shema sustava upravljanja je prikazana na slici 8.5.



Slika broj 8.5. Blokova shema upravljanja momentom generatora ispod naz. brzine vjetra

S obzirom da je dinamika regulacije brzine vrtnje koja se postiže primjenom upravljačkog zakona (8-3) poprilično spora, u regulacijski algoritam se dodaje dodatni derivacijski član kojim se fiktivno smanjuje moment tromosti vjetroturbine. Nadalje, upravljanjem ispod nazivne brzine vjetra je potrebno paziti na minimalno i maksimalno dopušten iznos brzine vrtnje rotora. Stoga se na rubovima radnog područja ispod nazivne brzine vrtnje ne slijedi optimalan upravljački zakon već se upravlja brzinom vrtnje s ciljem poštivanja zadanih ograničenja.

Za upravljanje na rubovima radnog područja se najčešće koriste PI ili (D) regulatori. Regulacija brzine vrtnje ispod nazivne brzine vjetra također mora osigurati preskakanje kritičnih frekvencija na kojima sustav može doći u rezonanciju.

Do rezonancije može doći ako se frekvencija vrtnje rotora ili njen višekratnik podudara s vlastitom frekvencijom tornja ili neke druge komponente sustava. Dodatne komponente sustava upravljanja koje je potrebno nadodati optimalnom upravljačkom zakonu ovdje su samo ukratko navedene te se čitatelja za više detalja upućuje na dodatnu literaturu.

### 8.3. Zahtjevi na sustav regulacije vjetroagregatom

Primarni ciljevi upravljanja vjetroagregatom su svakako maksimiziranje proizvodnje električne energije i poštivanje ograničenja zbog tehničkih karakteristika generatora. Pri ispunjavanju primarnih ciljeva treba pripaziti i na štetan utjecaj koji regulacija može imati na strukturalna opterećenja. Postoji dakako još mnogo čimbenika koje je potrebno imati u vidu. Potpuniji popis zahtjeva na regulator slijedi u nastavku. Projektni zahtjevi koje sustav regulacije mora ispunjavati su:

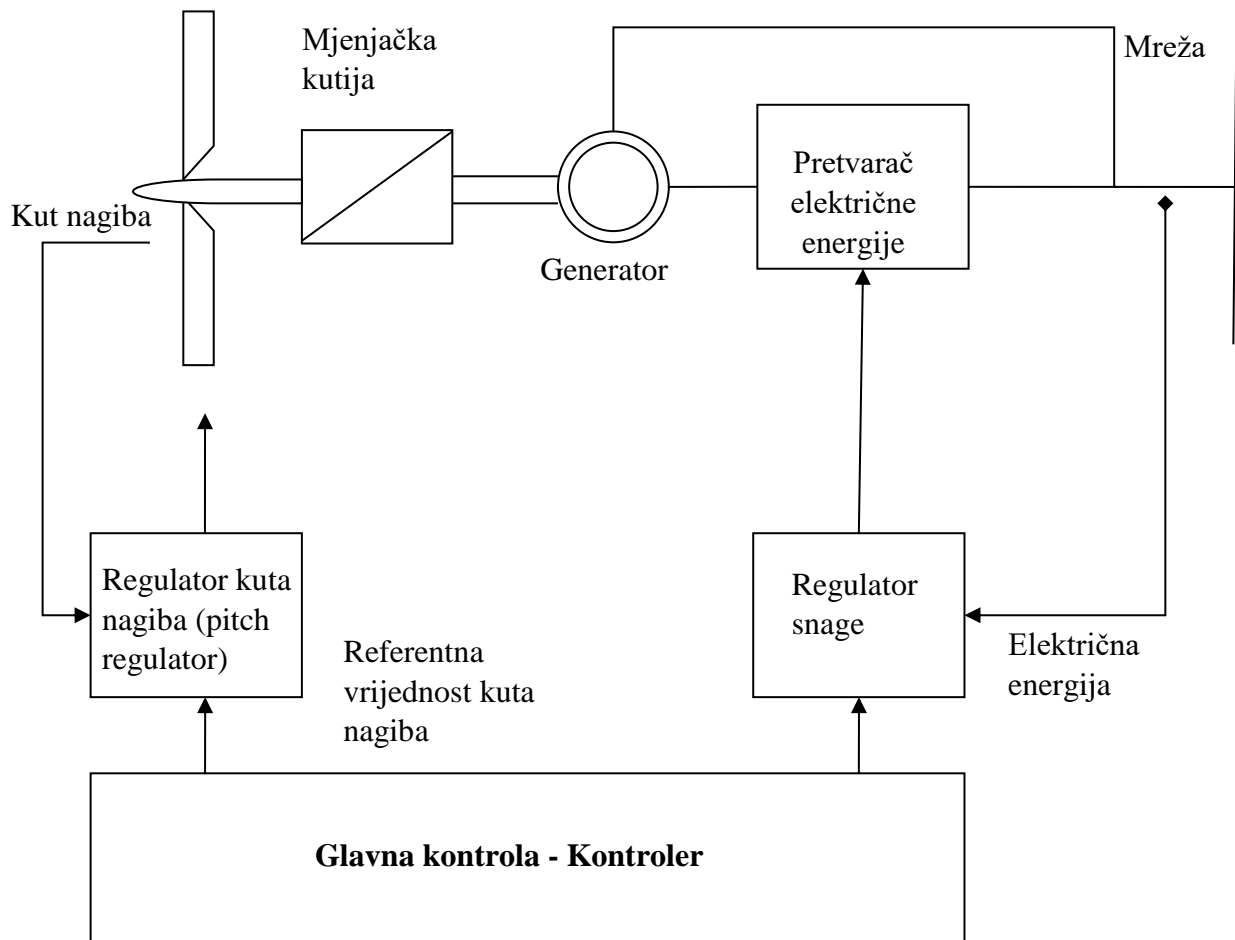
1. regulacija aerodinamičkog momenta na brzinama vjetra iznad nazivne;
2. minimiziranje "špiceva" u momentu generatora;
3. spriječiti pretjeranu aktivnost zakretanja lopatica;
4. minimiziranje opterećenja baze tornja kontroliranjem oscilacija tornja;
5. smanjivanje opterećenja na korijenu lopatica

## 9. OPĆENITA KONFIGURACIJA KONTROLE UPRAVLJANJA

Glavna kontrola nadzire cjelokupne funkcije upravljanja, pitch regulator i regulator snage su podređene jedinice. Glavna kontrola generira referentnu vrijednosti za kut nagiba (**referentni kut**) i za proizvedenu električnu energiju (**referentna snaga**). Slika broj 9.1.. prikazuje apstraktnu shemu Vestas Optispeed kontrolnog sustava.

Kontrolne funkcije su podijeljene u 3 dijela, glavna kontrola, pitch regulator i regulator snage.

Zadatak pitch regulatora je podesiti kut nagiba prema referentnoj vrijednosti, osiguravajući dovoljno brzu promjenu stanja vrijednosti. Gledajući sa strane mreže, regulator snage regulira električnu energiju isporučenu na mrežu prema zadanim vrijednostima.



Slika broj 9.1. Apstraktna shema VestasOptispeed kontrolnog sustava

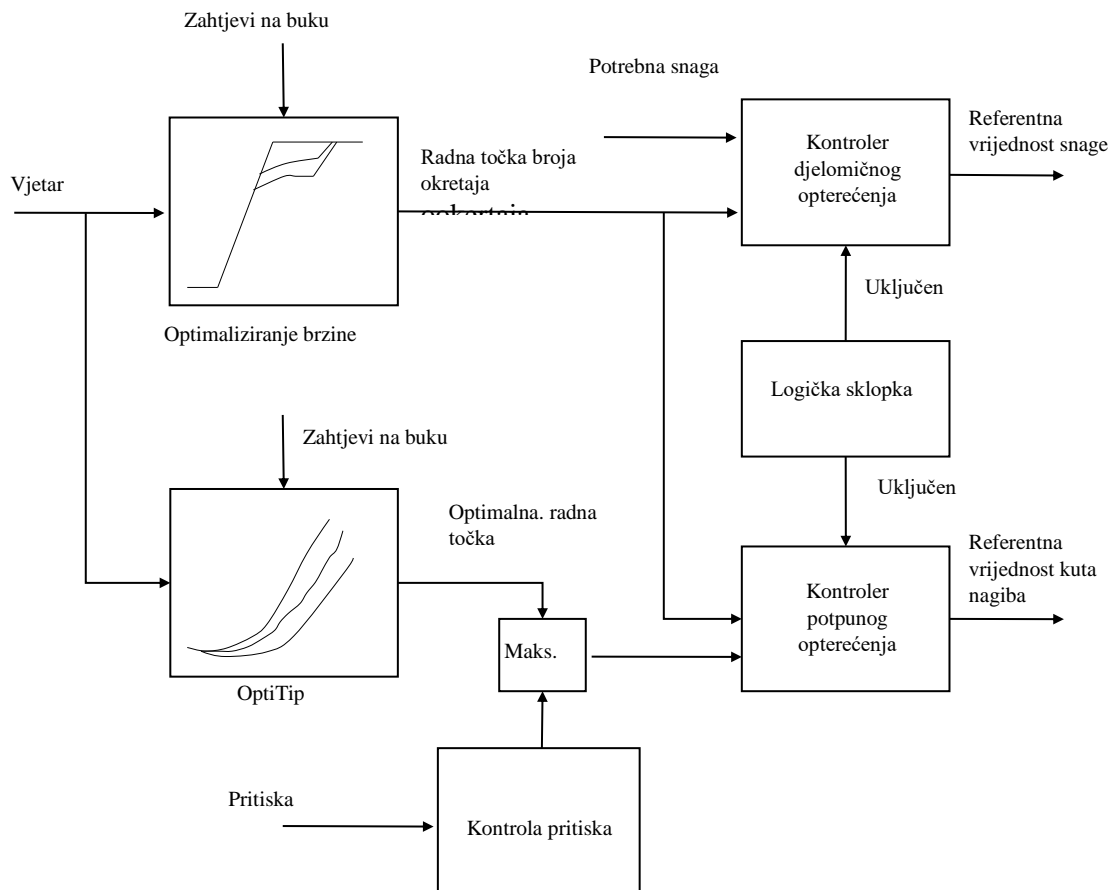
## 10. GLAVNA KONTROLA SUSTAVA

Glavna kontrola sadrži sve kontrolne petlje i veći dio nadzora algoritama. Zadatak joj je osigurati da turbina u bilo kojem trenutku zadovoljava sljedećim zahtjevima izvedbe:

- Maskimizira količinu proizvedene energije,
- Ograniči snagu buke,
- Održi visoku kvalitetu energije i
- Ograniči mehanička naprezanja

Slika broj 10.1. prikazuje opći blok dijagram glavne kontrole i najvažnijih funkcija. S lijeve strane nalaze se dva bloka pod nazivom OptiSpeed i OptiTip, koji služe za izračun optimalne brzine vrtnje i zadane vrijednosti kuta nagiba lopatica, ovisno o brzini vjetra i trenutnom smanjenju buke.

Optimalna zadana vrijednost definirana je kao radna točka, gdje turbina proizvodi maksimalnu električnu energiju, a da pri tome i dalje održava buku ispod dopuštene razine.



Slika broj 10.1. Opća blok shema glavne kontrole i najvažnijih funkcija regulacije

Blokovi na desnoj strani su odgovorni za kontrolu turbine na zadanoj radnoj točki, dok istodobno prate proizvedenu električnu energiju s obzirom na potražnju u određenom trenutku.

Ako se brzina vjetra povećava iznad određene razine, kut nagiba će se povećati iznad optimalne radne točke. U slučaju, kada je tražena snaga jednaka nazivnoj snazi, brzina vjetra se zove nazivna brzina vjetra ili "rated wind speed".

Pri brzinama vjetra ispod nazivne brzine, turbina nije u stanju proizvesti nazivnu snagu. U tom slučaju logički prekidač će aktivirati kontrolu za djelomično opterećenje osiguravajući uvjete da turbina proizvodi električnu energiju sa optimalnom efikasnošću.

Ako je brzina vjetra iznad nazivne brzine kontrola za terećenje je aktivirana osiguravajući nazivnu snagu. Osim toga, sustav kontrole sadrži kontrolu potiska za ograničavanje aero-dinamičkog pritiska na rotor i na toranj elektrane.

Slika broj 10.2. prikazuje krivulje stacionarnog stanja za snagu, broj okretaja generatora i na kut nagiba ovisno o brzini vjetra. Pretpostavka je da turbina radi sa maksimalnom snagom i bez prigušenja buke.

### 10.1. Rad pri djelomičnom opterećenju

Ako je brzina vjetra između minimalne brzine vjetra i nazivne brzine vjetra, proizvedena električna energija će biti ispod nazivne snage. U ovom slučaju turbina je kontrolirana da proizvede maksimalnu količinu električnu energije unutar ograničenja buke.

Kao što se može vidjeti na slici broj 10.2.. područje djelomičnog opterećenja može se podijeliti na tri dijela:

#### 1. Rad na niskoj brzini ( $v_{on} < v <= v_1$ )

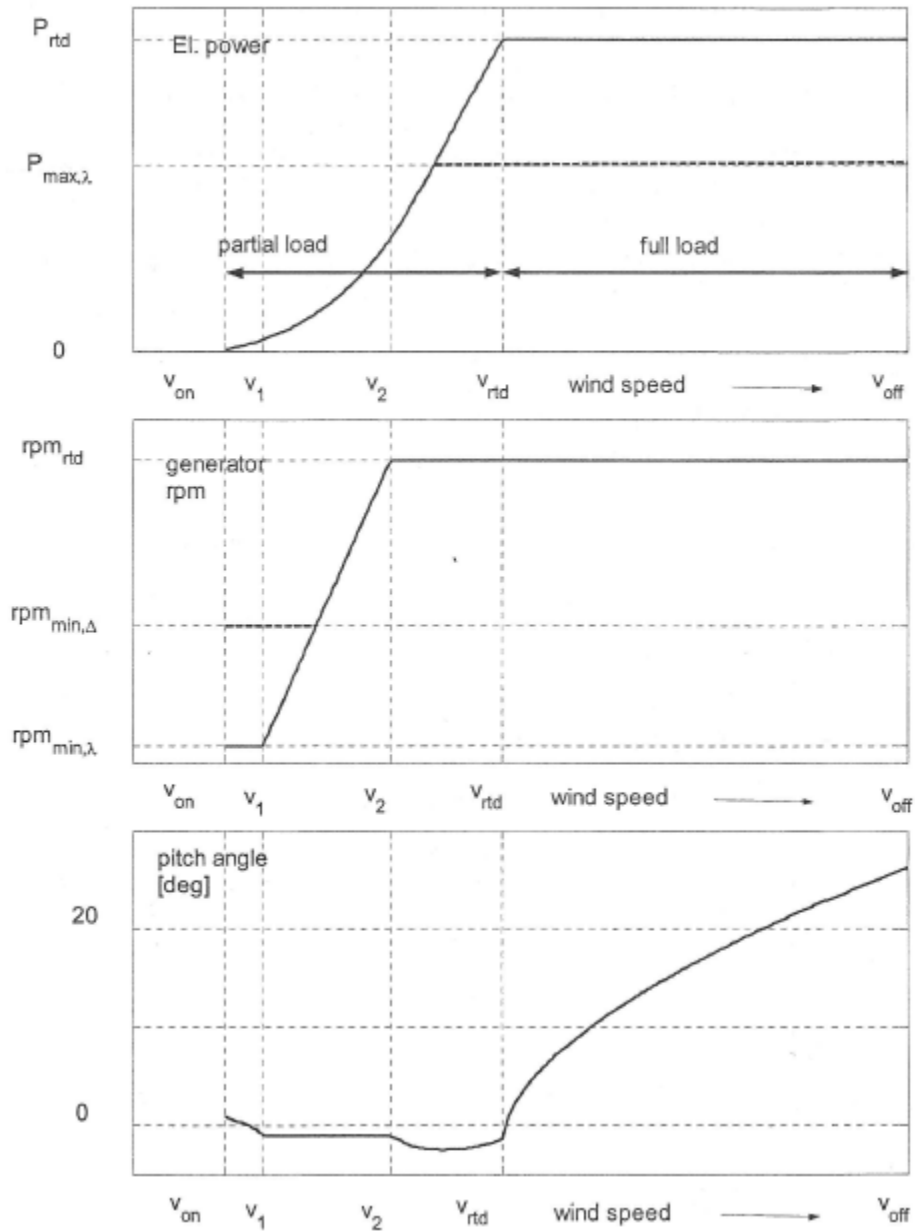
Broj okretaja se drži na najnižoj mogućoj vrijednosti, određen maksimalno mogućim klizanjem (*rad ispod sinkrone brzine*).

#### 2. Rad s optimalnom učinkovitošću ( $v_1 < v <= v_2$ )

U ovom području brzine vjetra, sustav Optispeed održava broj okretaja rotora proporcionalno brzini vjetra koja rezultira maksimalnom aerodinamičkom učinkovitošću rotora. Kut nagiba se održava konstantnim.

#### 3. Rad pri nominalnim brojevima okretaja ( $v_2 <= v <= V_{rtd}$ )

Ako je brzina vjetra veća od  $v_2$ , turbina stacionarno djeluje na nazivnom broju okretaja. Pri pojavi turbulencije, broj okretaja će dinamički oscilirati oko stacionarne zadane vrijednosti.



Slika broj 10.2. Krivulje stacionarnog stanja za snagu, broj okretaja generatora i kuta nagiba ovisno o brzini vjetra



## 10.2. Rad pri potpunim opterećenjem

Ako je brzina vjetra između nazivne i povišene brzine vjetra, turbina će se normalno nalaziti u punom stanju opterećenja, karakterizirano time što je izlazna snaga turbine jednaka traženoj snazi.

Međutim, pod utjecajem turbulencije, može se dogoditi da kontrolni sustav povremeno prebaci u djelomično opterećenje, iako je brzina vjetra iznad nazivne.

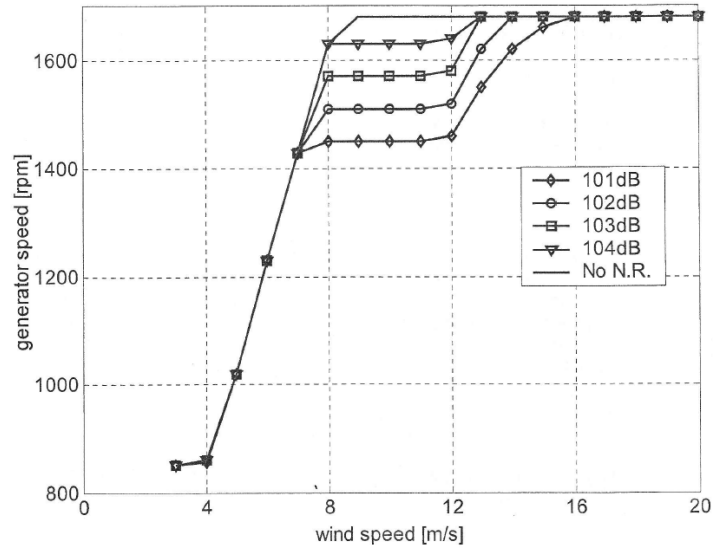
Kontroler punog opterećenja automatski se aktivira pomoću logičke sklopke čim izlazna snaga počne dostizati vrijednost jednaku potražnji u tom trenutku. To znači da broj okretaja generatora se kontrolira kutem nagiba iznad optimalne vrijednosti. Ako brzina vjetra ponovo padne, uzrokujući da se kut nagiba smanji na vrijednost koja je blizu optimalnog kuta nagiba, regulator punog opterećenja ponovno se deaktivira i kontroler djelomičnog opterećenja preuzima kontrolu.

## 10.3. Zvijezda trokut spoj

Kako bi se povećala učinkovitost, stator generatora može biti spojen na dva načina:

- a) Spoj zvijezda
- b) Spoj trokut

Pri spoju zvijezda, broj okretaja generatora može pokriti cijelo područje od  $rpm_{min}$  do  $rpm_{rtd}$ , dok je snaga generatora ograničena na  $P_{max,\lambda}$  (vidi sliku 10.2.).



Slika broj 10.3. Stacionarno stanje generatora i brzine vjetra u funkciji buke

Na spoju trokut, snaga je neograničena, a broj okretaja je ograničen da bude veći od  $rpm_{min,\Delta}$ . Upravljački sustav odabire vezu generatora ovisno o brzini vjetra. Kako bi se spoj promijenio, turbina se podešava na odgovarajuću brzinu spajanja, dok se snaga pomiče na nulu. Tada je generator odspojen, ponovno sinkroniziran s mrežom i spojen u novu konfiguraciju. Naposljetku, snaga se ponovno podiže.

#### 10.4. Vanjska kontrola snage

Moguće je kontrolirati izlaznu snagu putem VestasRemote Panel (VRP) ili podešavanjem parametara interne kontrole ExtPowRefPx, u tom slučaju, kontrolni sustav će tumačiti danu energiju kao "puno opterećenje", tj. kontroler će se prebaciti u rad pri punom opterećenju ako je postignuta tražena snaga.

#### 10.5. Kontrola buke

Vestas Optispeed turbine se proizvode sa različitim postavkama buke. Postavke buke imaju utjecaj na krivulje rada u prostoru bez tereta. Ako turbina radi u području sa smanjenom potrebom za kontrolu buke, broj okretaja se smanjuje i kut nagiba se povećava. Zajedno s

smanjenjem buke, također se smanjuje i aero-dinamička učinkovitost, što dovodi do niže krivulje snage i povećanja nazivne brzina vjetra.

## **10.6. Kontrola potiska**

Funkcija kontrole potiska je održavanje aero-dinamičkog potiska na fiksnoj maksimalnoj vrijednosti. U tu svrhu, regulator procjenjuje potisak rotora iz mjerenja snage, broja okretaja generatora i kutova nagiba, te izračunava kut nagiba koji osigurava da je potisak ispod specificiranog ograničenja.

*Kontrola potiska se uglavnom aktivira pri visokoj turbulenciji kako bi se izbjeglo vršno opterećenje na elise i toranj.*

## **10.7. Individualni nagib**

Kako bi se kompenzirala nesimetrična opterećenja na rotoru, upravljački sustav može biti konfiguriran za upravljanje vjetroturbinom s cikličkim pojedinačnim rasporedom. Ova je opcija dostupna samo za pojedine tipove turbina.

Nesimetrična opterećenja mogu biti uzrokovana:

- 1. Neravnomjernom raspodjelom vjetra u ravnini rotora i**
- 2. Visokom turbulencijom.**

U tu svrhu mjerni senzori koji se postavljaju na korijen svake elise mjere opterećenje rotora.

U slučaju da regulator otkrije nesimetričnu raspodjelu opterećenja, uključuje 3 sustava nagiba za obavljanje sinusoidalnih kretanja oko prosječnog nagiba unutar zadanih vrijednosti.

Slika 10.1. prikazuje tipični kontrolni uzorak za pojedinačni rad pitch regulacije. Na slici, kut nagiba svake lopatice A, B, C prikazan je kao funkcija kuta azimuta rotora. Kao što se može vidjeti, kut nagiba svake lopatice se sinusno pomiče oko prosječne zadane vrijednosti,

sinkronizirano sa rotorovom kutnom rotacijom. Među pomičnim kretnjama pojedinačnih lopatica nalazi se fiksna faza od  $120^\circ$ , što odgovara fizičkom kutu između dvije lopatice.

### **10.8. Aktivno prigušenje tornja**

Da bi se smanjile oscilacije tornja u smjeru potiska (naprijed / natrag), kontrolni sustav može biti postavljen za obavljanje aktivnog prigušenja. Ova je opcija dostupna samo za V90-3.0 (MW).

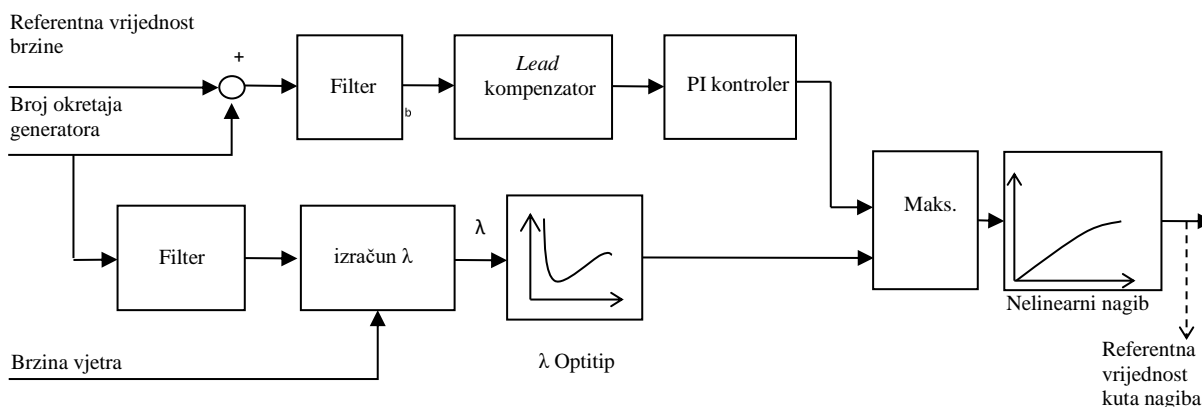
U modu aktivnog prigušenja tornja, ubrzanja potisne mase su mjerena pomoću akcelerometra. Ovisno o izmjerenom oscilacijski signal, sustav prigušenja generira upravljačke signale koji vode do pozitivnog prigušenja oscilacije. Aktivno prigušenje poboljšava aerodinamička prigušenja vjetroturbina.

### **10.9. Pokretanje i isključivanje**

Tijekom pokretanja (PAUSE > RUN), normalno isključivanje (RUN > PAUSE) ili u razdobljima s brzinom vjetra ispod smanjene brzine vjetra, turbina se upravlja sa isključenim generatorom, tj. bez stvaranja snage.

U ovom slučaju se koristi regulator brzine za upravljanje brojem okretaja turbine (slika brpj 10.1.).

Kontroler je konvencionalni kompenzator sa prethodnjem povezan u seriju sa PI kontrolerom, koji smanjuje jačinu s povećanjem nagiba. Ovim načinom se kompenzira nelinearna aerodinamika.



Slika broj 10.4. Regulacija brzine vrtnje s odspojenim generatorom

Kada nema vjetra, turbina je spremna za pokretanje održavanjem optimalnog kuta nagiba prema funkciji Lambda Optitip ( $\lambda$ ). Kada se poveća brzina vjetra i brzina generatora, kut nagiba će ostati optimalan do referentnog broja okretaja.

Regulator broja okretaja započinje s povećanjem broja okretaja u spoju zvijezda (1250 okretaja za 50 Hz mrežu). Kad je brzina u spoju zvijezda postignuta, dva kriterija moraju biti ispunjena prije početka postupka spajanja:

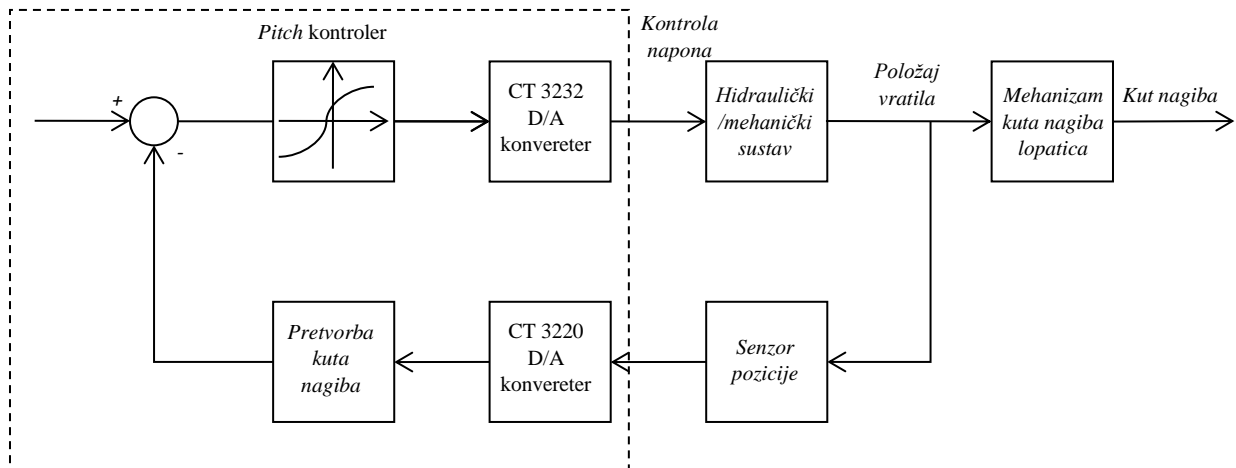
Kut nagiba mora biti najmanje 3 stupnja kako bi se osiguralo dovoljno energije u vjetru i broj okretaja generatora mora biti unutar područja od  $\pm 15$  okretaja / min u odnosu na brzinu spajanja duže od 1 sekunde.

Ako je vjetar jak, a kut nagiba je veći od 14 stupnjeva u zvijezda spoju, referentni broj okretaja se pomiče do brzine u spoju trokut (1450 okretaja / min za mrežu od 50 Hz) prije početka spajanja u frekvencijskom pretvaraču. Kada je generator priključen na mrežu, referentna snaga se povećava za 50 kW/sekundi dok se ne postigne optimalna razina snage.

## 10.10. Pitch regulacija

Vestas Optispeed vjetro turbine imaju pitch sustav za regulaciju nagiba lopatica. Svaki sustav pitch regulacije je servo petlja koja kontrolira nagib da slijedi navedenu referentnu vrijednost što je brže moguće, održavajući dovoljno prigušenje.

Pitch regulator je nelinearni P-kontroler koji kompenzira mrtvo područje i ograničenja u proporcionalnom ventilu. Pretvorba od položaja vratila do nagiba postiže se linearnom aproksimacijom u VMP kontroleru. Odnos između kuta nagiba, položaja vratila i napona senzora položaja prikazani su u tablici 10.1.



Slika 10.5. Pitch sustav regulacije

tablica broj 10.1. Odnos između kuta nagiba, položaja vratila i napona senzora položaja

Pitch [deg]	V52	
	Position [mm]	Position [V]
-5	0	0,040
0	27	0,460
5	56	0,970
10	87	1,500
15	119	2,050
20	152	2,620
25	185	3,190
30	218	3,760
35	251	4,320
40	282	4,870
45	313	5,400
50	344	5,920
55	373	6,430
60	402	6,930
65	430	7,410
70	458	7,890
75	486	8,370
80	514	8,850
85	542	9,350
90	572	9,860

## 11. ZAKLJUČAK

Regulacija vjetro turbine u kritičnoj fazi rada je složen i izuzetno zahtjevan proces s tehničkog, regulacijskog i općeg pouzdanog gledišta.

Svi vjetro sustavi optimalno funkcioniraju u rasponu brzine vjetra od 12 (m/s) do 25 (m/s), definirano područje regulacije rada vjetro turbine moguće je pouzdano kontrolirati dobro poznatim regulatorima oblika P i PI koji su za definirano područje više nego pouzdani i sigurni.

U oba načina regulacije moguća je precizna kontrola i to na dva načina:

- I. Regulacijom pomoću generatora tj. optimiranjem snage na mreži, napominjem da je ova regulacija pouzdana i precizna, sa svim karakteristikama mrežne regulacije sustava.
- II. Regulacijom zakretanja lopatica, kako bi se postigao optimalni kut između smjera vjetra i upadnog kuta lopatice s obzirom na smjer vjetra. Ova regulacija je složena i može se odvijati pomoću P regulatora ili PI regulatora. U kritičnoj fazi rada, a to je faza kad brzina vjetra prelazi 25 (m/s) regulacija rada vjetro turbine isključivo je u funkciji postavljanja lopatica u položaj okomito na smjer vjetra kako bi se okretni moment turbine sveo na stanje mirovanja. U trenutku samog procesa postavljanja lopatica u tzv. „prazan hod“, i drugi sustavi reagiraju da stabiliziraju proces koji vodi ka ne stacionarnom stanju i konačno u stanje havarije.

*/ precizan prikaz regulacije daju slike broj 9.1 i 9.2 /*

Procesi regulacije vjetro turbina su složeni i zahtijevaju izuzetnu pažnju u fazi održavanja i servisiranja, u prvoj fazi razvoja regulacijskih sustava izvršni članovi bili su hidraulički, ali radi ekonomskih razloga prešlo se na električne sustave koji su kombinacija električnog i mehaničkog / elektro motor – planetarni prijenosnik / no spomenuti sustav zahtjeva precizne postupke održavanja u koliko to izostane njegova pouzdanost drastično pada. Oba navedena sustava imaju svoje prednosti i nedostatke, ali jedno je sigurno kod naglih promjena vjetra, pouzdaniji je hidraulički sustav koji može brzo i pouzdano da reagira na pobudu u smislu snažnih i nepredvidivih udara vjetra.

U radu sam analitički pokazao sve elemente jednog regulacijskog procesa kod izuzetno složenog tehničkog sustava kakav je vjetro – agregat. O njegovov budućnosti nema potrebe posebno se osvrutati, jer to su dokazani sustavi koji kroz povijest dovoljno govore o opravdanost njihove primjene.

## LITERATURA

- [1] D. Rajković, Proizvodnja i pretvorba energije, *Rudarsko-geološko-naftni fakultet*, Zagreb, 2011.
- [2] E. Jerkić, Energija vjetra, 2013. , <http://www.vjetroelektrane.com/povijest>. [pristup 22.2.2018.].
- [3] L. Horváth, Energija vjetra, Tehnička škola Ruđer Bošković, Zagreb,
- [4] G. M. Masters, Renewable and Efficient Electric Power Systems, *JohnWiley&sons*, Hoboken, New Jersey, 2004..
- [5] N. Dizdarević, Pogon vjetroelektrana, Energetski institut "Hrvoje Požar", Zagreb,
- [6] M. Jelavić, Wind turbine control for structural dynamic load reduction, *Sveučilište Zagreb*, Zagreb, 2009..
- [7] D. Šljivac, Obnovljivi izvori energije, 2009., <http://oie.mingorp.hr/UserDocsImages/OIE%20Tekst.pdf>. [pristup 27. 03. 2018.].
- [8] T. Burton, Wind Energy Handbook, *John Wiley & sons*, Engleska, 2001.



## Popis korištenih kratica i oznaka

$E_{k,vj}$  - kinetička energija vjetra

$P_{vj}$  - snaga vjetra,

$t$  - vremenski interval

$\rho$  - gustoća zraka

$v$  - brzina vjetra

$c_{p, \text{Betz}}$  – Betzov koeficijent

$\rho_0$  - gustoća zraka pri standardnim uvjetima

$P_b$  - barometarski tlak

$T$  - temperatura zraka

$P_m$  - mehanička snaga

$\omega$  – kutna brzina vrtnje

$\beta$  – kut zakreta lopatica

$F_t$  – sila potiska na rotor

$K_\lambda$  – koeficijent optimalnog momenta

$\lambda$  – omjer obodne brzine rotora i brzine vjetra

$R$  – polumjer

$P_e$  – izlazna snaga generatora

## Popis slika

4.1. Konstrukcija tipičnog vjetroagregata sa horizontalnom osi vrtnje.....	6
4.2. Osnovni princip rada vjetroagregata.....	10
6.1. Svojtveni koeficijent snage ovisan o $(\beta, \lambda)$ .....	16
6.2. Sustav regulacije kuta zakreta elisa $\beta$ .....	16
6.3. Karakteristika 400 kW vjetroturbine i asinkronog generatora, stalna brzina vrtnje.....	17
6.4. Upravljačka strategija zasnovana na najvećoj snazi – promjenjiva brzina vrtnje .....	18
6.5. Krivulje ovisnosti koeficijenta snage $C_p$ o $\lambda$ uz fiksni $\beta$ .....	19
8.1. Načelna shema sustava upravljanja.....	23
8.2. Statičke karakteristike vjetroagregata snage 1(MW).....	24
8.3. Blokowska shema upravljanja brzinom vrtnje iznad nazivne brzine vjetra.....	26
8.4. Blokowska shema upravljanja momentom generatora ispod naz. brzine vjetra.....	27
8.5. Blokowska shema upravljanja momentom generatora ispod naz. brzine vjetra.....	29
9.1. Apstraktna shema VestasOptispeed kontrolnog sustava.....	31
10.1. Opća blok shema glavne kontrole i najvažnijih funkcija regulacije.....	32
10.2. Krivulje stac. stanja snage, broja okretaja generatora, kuta nagiba.....	34
10.3. Stacionarno stanje generatora i brzine vjetra u funkciji buke.....	36
10.4. Regulacija brzine vrtnje s odspojenim generatorom.....	39
10.5. Pitch sustav regulacije.....	40

## **SAŽETAK**

U ovom diplomskom radu je dan kratak opis kroz povijest o razvoju vjetroelektrana. Objasnjeni su osnovni pojmovi vezani uz vjetroturbine i vjetroelektrane, kao i način rada. Opisane su pojedine razine regulacije, njihov međusobni odnos i područja djelovanja. Ispod nazivne brzine vjetra se upravlja momentom generatora kako bi se sustav doveo u radnu točku s maksimalnim stupnjem aero-dinamičke pretvorbe s obzirom na dostupnu brzinu vjetra. Na području iznad nazivne brzine vjetra zakretanjem lopatica se propušta višak energije vjetra i održava se nazivna brzina vrtnje rotora vjetroagregata. Bitna stvar u procesu regulacije vjetro turbina je pravovremeno servisiranje i održavanje kako ne bi došlo do havarije.

Ključne riječi: generator, vjetar, vjetroelektrana, regulacija

## **ABSTRACT**

This thesis gives a brief description of the history of wind power development. The basic concepts related to wind turbines and wind power plants, as well as the mode of operation, are explained. Also some levels of regulation, their relationship and areas of action are described. Below the rated wind speed is controlled torque of the generator to the system brought in the operating point with the maximum degree of aero-dynamic conversion based on the available wind speed. In the area above the rated wind speed, by rotating the blade, the excess wind power passes and the rotor rotation speed of the wind turbine is maintained. An important thing in the wind turbine control process is timely servicing and maintenance so that there are no failures.

Key words: generator, wind, wind power plants, wind turbines, regulation

## **ŽIVOTOPIS**

Vjekoslav Matošević rođen je 10. srpnja 1986. godine, u Osijeku. Živi u Beketincima, dok je osnovnu školu „Milko Cepelić“ pohađao u Vuki.

Nakon osnovne škole, 2001. godine, upisuje „Elektrotehničku i prometnu školu Osijek“ za smjer elektrotehničar. 2003. godine sudjelovao je na županijskom natjecanju iz elektrotehnike. 2005. godine upisuje „Elektrotehnički fakultet Osijek“.

U slobodno vrijeme radi u jednoj privatnoj firmi u odjelu za elektrousluge koja se bavi servisiranjem elektromotora i strojeva