

# Dizajn malih vjetroturbina

---

Cegledi, Irena

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

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:200:824292>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-19**

Repository / Repozitorij:

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



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

**Sveučilišni studij**

**DIZAJN MALIH VJETROTURBINA**

**Završni rad**

**Irena Cegledi**

**Osijek, 2023.**

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK****Obrazac Z1P - Obrazac za ocjenu završnog rada na preddiplomskom sveučilišnom studiju**

Osijek, 12.09.2023.

Odboru za završne i diplomske ispite

**Prijedlog ocjene završnog rada na preddiplomskom sveučilišnom studiju**

<b>Ime i prezime Pristupnika:</b>	Irena Cegledi
<b>Studij, smjer:</b>	Sveučilišni prijediplomski studij Elektrotehnika i informacijska
<b>Mat. br. Pristupnika, godina upisa:</b>	4799, 28.07.2020.
<b>OIB Pristupnika:</b>	11792868286
<b>Mentor:</b>	izv. prof. dr. sc. Danijel Topić
<b>Sumentor:</b>	dr. sc. Matej Žnidarec
<b>Sumentor iz tvrtke:</b>	
<b>Naslov završnog rada:</b>	Dizajn malih vjetroturbina
<b>Znanstvena grana rada:</b>	<b>Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)</b>
<b>Zadatak završnog rad:</b>	SUMENTOR: Dr.sc. Matej Žnidarec - za ve upite oko teme javiti se sumentoru. Opisati princip pretvorbe energije vjetra u električnu energiju posredstvom vjetroelektrana. Napraviti pregled trenutnog stanja razvoja malih vjetroagregata s naglaskom na dizajn lopatica vjetroturbina. Opisati fizikalne prilike na lopaticama različitih tipova malih vjetroturbina s vertikalnom i horizontalnom osi vrtnie.
<b>Prijedlog ocjene završnog rada:</b>	Vrlo dobar (4)
<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: 1 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 1 bod/boda Razina samostalnosti: 3 razina
<b>Datum prijedloga ocjene od strane mentora:</b>	12.09.2023.
<b>Datum potvrde ocjene od strane Odbora:</b>	
Potvrda mentora o predaji konačne verzije rada:	Mentor elektronički potpisao predaju konačne verzije.
	Datum:

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA**

Osijek, 13.09.2023.

**Ime i prezime studenta:**

Irena Cegledi

**Studij:**

Sveučilišni prijediplomski studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija

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

4799, 28.07.2020.

**Turnitin podudaranje [%]:**

11

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Dizajn malih vjetroturbina**

izrađen pod vodstvom mentora izv. prof. dr. sc. Danijel Topić

i sumentora dr. sc. Matej Žnidarec

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> .....	<b>5</b>
1.1. Zadatak završnog rada .....	5
<b>2. PREGLED PODRUČJA TEME</b> .....	<b>6</b>
<b>3. VJETAR KAO IZVOR ENERGIJE</b> .....	<b>7</b>
3.1. Nastanak vjetra .....	7
3.2. Snaga vjetra i vjetroturbine .....	8
3.3. Ruža vjetrova.....	9
<b>4. VJETROELEKTRANE</b> .....	<b>11</b>
4.1. Dijelovi malih vjetroatregata.....	11
4.2. Princip rada .....	13
4.3. Prednosti i nedostaci vjetroelektrana.....	14
4.4. Osnovni tipovi vjetroelektrana .....	15
4.4.1. Podjela vjetroelektrana obzirom na snagu .....	15
4.4.2. Podjela prema osi vrtnje .....	16
4.4.3. Podjela prema vrsti generatora .....	22
4.4.4. Podjela prema lokaciji.....	26
4.4.5. Podjela prema brzini vrtnje.....	27
4.5. Primjena malih vjetroatregata .....	27
4.6. Lokacija malih vjetroatregata.....	28
4.7. Vjetroelektrane u RH .....	29
4.8. Tržište malih vjetroelektrana u Hrvatskoj .....	30
<b>5. PRAKTIČNI DIO: IZRADA MALIH VJETROTURBINA</b> .....	<b>36</b>
5.1. Materijali i alati za izradu.....	36
5.2. Postupak izrade makete vjetroturbine.....	37
5.3. Postupak izrade lopatica .....	41
5.4. Testiranje lopatica i mjerenja .....	41
<b>6. ZAKLJUČAK</b> .....	<b>48</b>
<b>Literatura</b> .....	<b>50</b>

**Sažetak..... 52**

# 1. UVOD

U ovome radu obrađena je energija vjetra kao jedan od obnovljivih izvora električne energije. U drugome poglavlju predstavljen je pregled literature, odnosno opisani su radovi koji se bave ovom ili sličnom tematikom. Treće poglavlje za zadatak ima opis vjetra, općenito, kao izvora energije, bavi se njegovim nastankom, snagom, potencijalom te sistematički opisuje što je to ruža vjetrova. Četvrto poglavlje opisuje proces pretvorbe energije vjetra u vjetroelektrani te поближе opisuje dijelove male vjetroelektrane, posebice malog vjetroagregata koji kao takav čini elementarnu osnovu ove vrste pretvorbe energije. Nadalje, u petom poglavlju detaljno i sistematički su opisane i razvrstane vrste turbina vjetroagregata koje su glavna tema ovoga rada. Predstavljene su, i prednosti, i nedostaci svake od pojedinačnih kategorija te su u konačnici u petom poglavlju empirijski testirana i ispitana svojstva i karakteristike u vidu izlazne snage na samostalno izrađenoj maketi vjetroagregata s vertikalnom osi vrtnje. U konačnici su predstavljeni i raščlanjeni dobiveni rezultati simulacije.

## 1.1. Zadatak završnog rada

Opisati princip pretvorbe energije vjetra u električnu energiju posredstvom vjetroelektrana. Napraviti pregled trenutnog stanja razvoja malih vjetroagregata s naglaskom na dizajn lopatica vjetroturbina. Opisati fizikalne prilike na lopaticama različitih tipova malih vjetroturbina s vertikalnom i horizontalnom osi vrtnje.

## 2. PREGLED PODRUČJA TEME

Jedan od održivih izvora energije koji se smatra obnovljivim je energija vjetra. Međutim, postavljanje vjetroelektrana velikih razmjera može potencijalno utjecati na klimatske uvjete, stoga su decentralizirani mali vjetroagregati održiva opcija.

U literaturi [1] predstavljen je pregled različitih vrsta malih vjetroagregata, to jest vjetroagregata s horizontalnom i vertikalnom osi. Ispitivanjem malih vjetroagregata otkriveno je da pružaju održivu mogućnost proizvodnje energije za domaćinstva bez negativnih utjecaja na klimu. Ključni zaključci uključuju potrebu za optimizacijom profila krila, proučavanje oscilacija brzine vjetra te istraživanje boljih aerodinamičkih oblika lopatica kako bi se smanjila buka.

Radovi [2] i [3] bave se opisom i karakteristikama vjetroturbina s horizontalnom osi vrtnje. Konkretno, u literaturi [2] autori testiraju performanse malih vjetroturbina pri maloj brzini vjetra. U radu su korišteni i uspoređeni rotori s dvije i tri lopatice te je izveden zaključak da pri malim brzinama vjetra (3 - 7 m/s) rotor s dvije lopatice ima znatno veću učinkovitost što je u praksi vidljivo jer proizvodi dvostruko više snage nego rotor s tri lopatice pri istoj brzini vjetra. Za razliku od literature [2], u literaturi [3] obrađena je i testirana vrlo mala vjetroturbina s 4 lopatice. Autori su na ovom tipu turbine proveli široku paletu testova parametara kao što su izlazna snaga, brzina vrtnje, i dr. Obradom rezultata izveden je zaključak da ovakav tip turbine pokazuje dobru učinkovitost pri manjim brzinama vjetra. Autori su uspoređujući očekivane i dobivene rezultate zaključili da je protok zraka u realnom slučaju 20% sporiji nego u idealnom. Ovakvi rezultati uzrokovani su utjecajem turbulencija koje djeluju na lopatice prilikom vrtnje turbine što je u konačnici bio glavni cilj promatranja ovog rada.

Za razliku od prije spomenutih radova, radovi [4] i [5] bave se vjetroturbinama s vertikalnom osi vrtnje. U literaturi [4] vršeni su eksperimenti nad Savonniousovom rotorom dodavajući mu polucilindrične diskove na centralnu osovinu u svrhu povećavanja učinkovitosti i popularizacije te vrste turbine u komercijalne svrhe. Rezultati su pokazali da bi se ovakav tip turbine mogao koristiti za osobne potrebe.

Zaključno, autori literature [5] istraživali su aerodinamiku visokopouzdanih vjetroturbina s vertikalnom osi vrtnje koristeći testove u vjetro-tunelima. Uspoređivane su aerodinamične karakteristike nagnutih i ravnih lopatica. Pokazalo se da se performanse nagnutih lopatica razlikuju od performansi ravnih lopatica što se objašnjava različitom brzinom vrtnje i vršnom snagom.

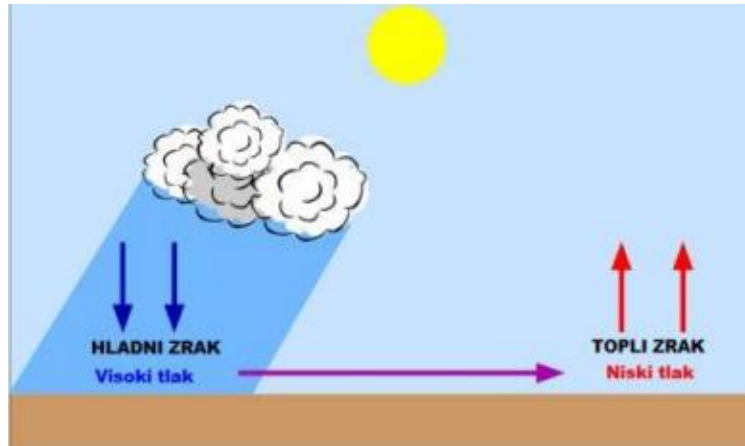


### **3. VJETAR KAO IZVOR ENERGIJE**

Energija vjetra spada pod obnovljivi izvor energije koji nema izravnih emisija stakleničkih plinova, stoga se koristi kao alternativa fosilnim gorivima koja imaju negativan utjecaj na okoliš. Prednosti energije vjetra su obnovljivost, besplatna energija i niska emisija stakleničkih plinova u usporedbi s drugim vrstama energije. Međutim, glavni nedostaci su varijabilnost i nepredvidljivost, uključuju potrebu za velikom površinom zemlje za izgradnju vjetroelektrane, oslanjanje na vjetrovite uvjete i probleme povezane s bukom i vizualnim utjecajem na okoliš. Buka je uzrokovana aerodinamičkom pojavom koja nastaje zbog rotacije lopatica i njihovom brzinom rotacije. Brzi prodor energije vjetra na tržišta diljem svijeta poprimio je mnoge oblike. U nekim slučajevima, energija vjetra se proizvodi u velikim industrijskim vjetroelektranama pomoću velikih vjetroturbina s horizontalnom osi (HAWT) koje predaju električnu energiju izravno u mrežu. U drugim slučajevima, energija vjetra proizvodi se više lokalno, na ili blizu mjesta potrošnje energije. U tim slučajevima, vjetar obično proizvode manje vjetroturbine koje su u instalacijama s jednom jedinicom ili u skupinama jedinica. Bez obzira na manifestaciju sustava vjetroturbina, potrebno je mnogo razmišljati o odabiru turbine, ekonomskoj isplativosti instalacije i integraciji sustava u elektroenergetsku mrežu. Bez obzira na to, energija vjetra smatra se jednim od najbrže rastućih izvora energije u svijetu i očekuje se da će igrati glavnu ulogu u budućoj globalnoj proizvodnji energije [6, 7].

#### **3.1. Nastanak vjetra**

Vjetar je pokretna masa zraka i oblik sunčeve energije i uključuje kretanje zraka duž Zemljine površine od područja visokog tlaka do područja niskog tlaka. Nastaje izjednačavanjem tlakova zbog razlike temperature između slojeva atmosfere. Zemlja neravnomjerno ispušta u atmosferu toplinu dobivenu od Sunca. U zonama hladnog zraka gdje se oslobađa manje topline, tlak atmosferskih plinova se povećavaju. Za razliku gdje se oslobađa više topline, zrak se zagrijava, a smanjuje se tlak plina. To sve uzrokuje stvaranje makro-cirkulacije zbog konvektivnih gibanja. Atmosfera konstantno nastoji uravnotežiti tlakove. Zrak kruži iz područja većeg tlaka prema smjeru nižeg pritiska, takvo kretanje zračne mase nazivamo vjetar. Vjetar se kreće više ili manje brzo između zona koje su pod različitim tlakom. Tamo gdje je veća razlika tlaka, protok zraka je brži, a vjetar jači. Vjetar puše kružno oko centara visokog tlaka u smjeru kazaljke na satu, a oko niskog tlaka zraka u suprotnom smjeru (Slika 3.1) [8].



Slika 3.1 Nastanak vjetra [9]

### 3.2. Snaga vjetra i vjetro turbine

Energija vjetra je kinetička energija pa se ona može iskazati formulom:

$$W = \frac{m \cdot v^2}{2} \quad (3-1)$$

Međutim ukupna teorijska energija vjetra jednaka je:

$$W = \frac{m \cdot v^2}{2} = \frac{\rho \cdot V \cdot v^2}{2} = \frac{\rho \cdot A \cdot l \cdot v^2}{2} \quad (3-2)$$

Gdje su:

$m$  (kg) - masa zraka

$v$  (m/s) - brzina strujanja zraka

$\rho$  ( $\approx 1.25 \frac{kg}{m^3}$ ) – gustoća zraka

$V$  ( $m^3$ ) – volumen zraka

$A$  ( $m^2$ ) – površina koju opisuje rotor vjetroelektrane

$l$  (m) – promatrana duljina

Snaga vjetra predstavlja prolazak molekula zraka brzinom  $v$  tijekom vremena  $t$  kroz površinu rotora  $A$ . Uvrštavanjem brzine vjetra kao derivacije promatrane duljine  $l$  po vremenu  $t$  dobije se izraz za snagu vjetra:

$$P = \frac{dW}{dt} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (3-3)$$

Približna teorijska snaga vjetra dobije se uvrštavanjem gustoće zraka i izraza za teorijsku energiju vjetra:

$$P \approx 0.625 \cdot A \cdot v^3 \quad (3-4)$$

Kod računanja snage (3-4) vjetra veliku ulogu nosi brzina vjetra, koja se konstantno mijenja u jedinici vremena. Brzinu vjetra iskazujemo vektorski, jačinom i smjerom, a mjeri se anemometrom i mjerna jedinica je m/s. Brzina vjetra ovisi o reljefu, njegovoj hrapavosti i geografskom položaju.

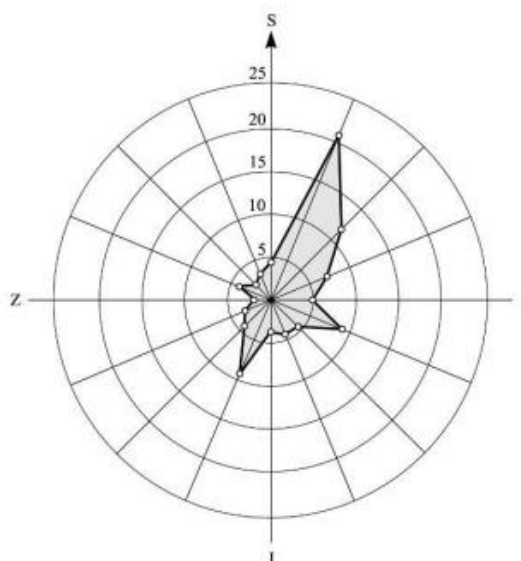
Kod snage vjetroturbine treba uzeti u obzir da vjetroturbina može iskoristiti maksimalno 59,3% ukupne snage vjetra jer zrak struji i nakon što prođe kroz turbinu. Turbina iskrivljuje putanju vjetra što znači da će jedan dio zaobići lopatice vjetroturbine zbog čega je korisnost vjetroelektrana oko 31% od ukupne kinetičke energije vjetra za proizvodnju električne energije [10].

Najočitija upotreba male energije vjetra je za proizvodnju ograničene količine električne energije, obično do nekoliko kW. Budući da strujanje vjetra nije konstantno, proizvodnja električne energije izražava se kao prosjek povezan s prosječnom brzinom vjetra na lokaciji. Povećavanjem i smanjivanjem brzine vjetra, snaga proizvodnje električne energije također se povećava i smanjuje. Ova se snaga može koristiti u područjima gdje opskrba električnom energijom iz elektroenergetske mreže nije pouzdana, gdje električna energija iz mreže uopće nije dostupna, gdje su troškovi električne mreže visoki ili za osobe koje teže proizvoditi električnu energiju bez oslanjanja na elektroenergetsku mrežu i bez emisija stakleničkih plinova koji prirodno proizlaze iz konvencionalne proizvodnje električne energije. Kao posljedica položaja malih vjetroagregata u urbanim ili ruralnim područjima, gdje prostori mogu biti ograničeni i gdje postoje prepreke strujanju vjetra, mali vjetroagregati obično manje ovise o brzini vjetra, razinama turbulencije i smjeru vjetra za razliku od velikih vjetroagregata [7].

### **3.3. Ruža vjetrova**

Ruža vjetrova predstavlja dijagram koji prikazuje jakost vjetra i smjer kretanja vjetra na nekome području kojom tijekom određenog vremenskog perioda gdje se opisuje brzina vjetra iz dvanaest različitih smjerova koji su razdijeljeni po trideset stupnjeva. Dobiva se stalnim mjerenjem vjetra u kratkim intervalima tijekom određenog vremenskog perioda gdje se podaci

sortiraju prema smjeru vjetra i koristi se na morskim, zrakoplovnim kartama i u meteorologiji kako bi se prikazalo i analiziralo kretanje vjetra [11].



Slika 3.2 Ruža vjetrova [12]

## 4. VJETROELEKTRANE

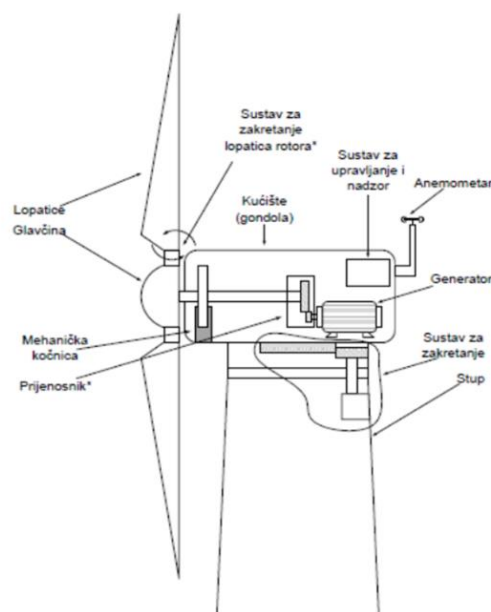
Vjetroelektrane su niz istih vjetroagregata postavljeni jedan pored drugog kako bi proizveli električnu energiju (Slika 4.1). Sastoje se od visokih stupova s elisama koje se okreću puhanjem vjetra. Vjetroagregat je stroj koji stvara mehaničku energiju putem vjetra iz čega se dobiva električna energija pomoću generatora. Za vjetroelektrane se može reći kako proizvode čistu i obnovljivu energiju jer ne proizvode nikakve štetne plinove i ne troše fosilna goriva, a samim postavljanjem vjetroagregata na odgovarajuća mjesta proizvest će velike količine energije s minimalnim troškovima.



Slika 4.1 Vjetroelektrana Korlat [13]

### 4.1. Dijelovi malih vjetroagregata

Osnovni dijelovi malog vjetroagregata s horizontalnom osi vrtnje su prikazani na slici (Slika 4.2).



Slika 4.2 Dijelovi vjetroagregata s horizontalnom osovinom [8]

Lopaticice – spojene su na glavčinu i rotiraju se kada vjetar udara u njih. Razlikujemo one s krilcima ili sa zakretnim vrhovima na kojima se energija vjetra pretvara u kinetičku energiju. Lopaticice se sastoje od dva dijela: prednje i stražnje strane. Prednja strana je zakrivljena kako bi lakše bilo hvatanje vjetra, a stražnja strana je ravnija iz razloga da se smanji otpor. Općenito se dizajniraju da u dodiru s vjetrom svojim oblikom maksimiziraju aerodinamičku učinkovitost. Lopaticice zakretanjem vrha stvaraju moment kočenja te mogu poslužiti i kao kočni mehanizam u slučaju kada kočnica ne radi [8, 14].

Rotor – rotor uključuje lopaticice i glavčinu koji su najvažniji dijelovi vjetroagregata. Trenutno, većina vjetroagregata je s tri lopaticice s konfiguracijom rotora uz vjetar. Za male HAWT-ove koriste se fiskni nagib oštrice izgrađene od stakloplastike, metala ili fiberglass-a i kontrola zastoja. On ima ključnu ulogu u stvaranju kinetičke energije koja se kasnije pretvara u električnu energiju. Razlikujemo dvije inačice podešavanja snage rotora:

- Podešavanje rotora okretanjem lopaticica
- Regulacija rotora aerodinamičkim efektom
- Kombinacija prethodna dva [7,8,14].

Gondola i sustav zakretanja – zadaća je da štiti generatorski sustav od okolišnih utjecaja, a i sam okoliš od buke. Nalazi se na vrhu tornja sadržava osovine za male i velike brzine, mjenjač, generator i kočnicu. Sustav slobodnog zakretanja se najčešće koriste u malim vjetroturbinama za podešavanje orijentacije rotora vjetroturbine u vjetar. Sastoji se od valjkastog ležaja povezanog tornja, gondole i propele. Rep zakreće rotor u vjetar stvarajući zakretni moment na gondoli[7, 8, 14].

Generator – predstavlja sustav za proizvodnju električne energije. Pomicanje osovine uzrokovano je kretanjem vjetra preko lopaticica rotora. Najčešće se koristi sinkroni i asinkroni generator s visokom učinkovitosti u širokom rasponu opterećenja i brzine. Konstruirani su s visokom otpornošću i izdržljivošću na velikim opterećenjima. Kako bi se postigla najveća učinkovitost pretvorbe energije generatori se prilagođavaju na način da se održi stalan napon i frekvencija izlazne struje prilikom promjenjive brzine vjetra. Ovisno o primjeni, sinkroni generator se koristi u prijenosnim mrežama, a asinkroni generator u distribucijskoj mreži [8,14].

Generatore možemo također podijeliti prema vrsti struje (istosmjerni, izmjenični) i prema vrtnji na sinkrone i asinkrone.

Stup – razlikujemo stupasti, cjevasti, teleskopski itd. Najčešće je izrađen od cjevastog čelika, gdje podupire strukturu turbine. Budući da se brzina vjetra povećava s visinom, viši stupovi omogućuju turbinama da uhvate više energije i proizvedu više električne energije. Visina je obično najmanje 1 do 1.5 puta veća od promjera rotora. Za male vjetroturbine koriste se uski stupovi sa zategnutim žicama. Ovakva konfiguracija ima prednost manjih težina, što smanjuje troškove [7, 8, 14].

Upravljački sustav - male vjetroturbine koriste regulator za pretvaranje varijabilnog trofaznog izlaza generatora u istosmjernu struju pri odgovarajućem naponu za punjenje baterija. Sastoji se od električnih krugova, prekidača i senzora za mjerenje protoka [7].

## **4.2. Princip rada**

Vjetroelektrane pretvaraju kinetičku energiju vjetra u električnu energiju bez korištenja goriva. To se postiže putem mehaničke rotacije lopatica koje prenose energiju vjetra. Turbine se mogu podijeliti na uzgonske i otporne, ovisno o sili koju vjetar generira.

Kako bi prikazali princip rada vjetroturbina, za primjer smo uzeli najraširenije vjetroturbine, a to su turbine uzgona. Kod turbina uzgona vjetar teče s obje površine lopatica koje imaju različite profile te se stoga s gornje površine stvara područje ulegnuća u odnosu na tlak na nižoj površini.

Ta razlika u tlaku na površini vjetroturbine stvara silu nazvanu aerodinamički uzgon, slično krilima zrakoplova. Uzgon na krilima aviona može avion podići s tla i omogućiti let, dok kod vjetroelektrane, gdje su lopatice pričvršćene za glavčinu i spojene na vratilo, uzgon uzrokuje rotaciju oko osi glavnog vratila turbine. Istovremeno se generira i otporna sila koja se suprotstavlja kretanju i djeluje okomito na silu uzgona.

U pravilno dizajniranim turbinama, omjer između sile uzgona i otpora je visok tijekom normalnog rada. Vjetroturbina zahtijeva minimalnu brzinu vjetra (brzinu uključenja od 3 - 5 m/s kako bi započela s radom i postiže nazivnu snagu pri brzini vjetra od 12 - 14 m/s. Kako bi se osigurala sigurnost, turbina se obično blokira pri visokim brzinama vjetra koje prelaze 25 m/s (brzina isključenja) putem sustava kočnja. Blokada se može postići upotrebom mehaničkih kočnica koje usporavaju rotor ili, za različite nagibne oštrice, sakrivanje oštrica od vjetra postavljenjem u položaj zastave.

Vjetroturbine su najčešće postavljene na mjestima koja omogućuju jake i konstantne vjetrove kako bi se povećala proizvodnja električne energije. Svaka vjetroturbina ima vjetrokaz na vrhu koji označava smjer vjetra. Vjetar udara u lopatice rotora vjetroturbine te se one počinju rotirati

oko vertikalne ili horizontalne osi gdje se pretvara kinetička energija vjetra u mehaničku energiju rotora. Rotacija rotora pokreće glavnu osovinu vjetroturbine koja je povezana s generatorom koji pretvara mehaničku energiju rotora u električnu energiju. Električna energija se zatim transportira putem kabela do transformatora. Transformatori primaju izmjeničnu struju na jednom naponu i povećavaju ili smanjuju napon za isporuku električne energije. Vjetroelektrana će koristiti blok transformator za povećanje napona (smanjujući potrebnu struju) da bi se postavio u električnu mrežu i transportirao do krajnjih potrošača, što smanjuje gubitke snage koji se događaju prilikom prijenosa velikih količina struje na velike udaljenosti s dalekovodima. Transformator smanjuje napon kako bi učinili sigurnom i korisnom za zgrade i domove [6,8].

### **4.3. Prednosti i nedostaci vjetroelektrana**

Glavne prednosti vjetroelektrana su:

- Rasprostranjena proizvodnja električne energije
- Efikasna proizvodnja električne energije putem vjetra od 30%
- Ekološki prihvatljiva proizvodnja električne energije
- Održivi resurs
- Ne proizvodi stakleničke plinove
- Smanjeni troškovi održavanja
- Štednja fosilnih goriva

Nedostaci vjetroelektrana su:

- Utjecaj na životinje i poremećaji staništa
- Prostorni zahtjevi
- Isprekidanost proizvodnje
- Nepredvidljivost brzine vjetra

Potrebno je istaknuti da su neki od ovih nedostataka subjektivni i mogu se umanjiti kroz adekvatno planiranje, tehničke inovacije i odabir optimalnih lokacija za postavljanje vjetroelektrana [6].



## 4.4. Osnovni tipovi vjetroelektrana

Općenito, vjetroelektrane možemo podijeliti na nekoliko tipova: prema osi vrtnje, snazi, vrsti generatora, brzini vrtnje i prema lokaciji.

### 4.4.1. Podjela vjetroelektrana obzirom na snagu

Vjetroelektrane obzirom na izlaznu snagu možemo dijeliti na male, srednje i velike. Male vjetroelektrane su namijenjene za proizvodnju električne energije za kućanstva čija je izlazna snaga do 20 kW. Srednje vjetroelektrane su one elektrane čija se izlazna snaga kreće od 20 pa do 200 kW čija je namjena proizvodnja električne energije za prodaju. Velike vjetroelektrane su one koje imaju nazivnu snagu veću od 200 kW. Takve se vjetroelektrane koriste za opskrbu potrošača na velikim udaljenostima od njih. Postoje i vjetroelektrane ultra velike snage do 8000 kW koje se ugrađuju na pučini jer je tamo veliki potencijal energije vjetra, takve su vjetroelektrane u razvoju [8, 15].

Male vjetro turbine iskorištavaju malu energiju vjetra za proizvodnju električne energije, obično s nazivnom snagom od nekoliko kW. One su povezane direktno na uređaje koje zahtijevaju električnu energiju ili su povezane na stanicu za punjenje poput niza baterija. Potreba za sustavom pohrane energije je vidljiva kada je snaga vjetra isprekidana. Čest je slučaj da je električna energija dostupna kada korisniku nije potrebna ili kada je potrebna, ali nije proizvedena. Sustavi za pohranjivanje pomažu riješiti to stanje pohranjivanjem energije. Male vjetroelektrane često su u kombinaciji sa komplementarnim izvorima energije. Najčešća kombinacija je mala energija vjetra sa energijom sunca. Ova kombinacija omogućuje konstantniju proizvodnju energije. Ostale kombinacije su energija vjetra sa dizelskim generatorima u slučaju kada je potrebno više energije korisniku nego što sustav isporučuje [7].

Male vjetroelektrane se još mogu podijeliti prema:

- Načinu rada: samostalni ili u sinergiji s drugim izvorima energije
- Namjeni: samostalna mreža, crpljenje vode, pravljenje leda, proizvodnja električne energije za vlastite potrebe, katodna zaštita...
- Sustavima u kojem rade: hibridni sustavi, samostalna mreža i priključak za javnu elektroenergetsku mrežu [16].

Postoje brojne prednosti malih vjetroelektrana, najočitija je proizvodnja električne energije bez oslanjanja na elektroenergetski sustav. Omogućuju dostupnost energije koja se često ne postiže elektroenergetskom mrežom, osobito u zemljama u razvoju. Energija vjetra može biti dostupna

na udaljenim mjestima koja nisu u mogućnosti spajanja na mrežu te moraju sama proizvoditi električnu energiju. Sustavi vjetroelektrana moraju biti robusni. Pokretni dijelovi vjetroturbine, ako su pravilno izrađeni i dizajnirani, mogu izdržati godinama bez oštećenja. Prijetnja klimatskih promjena privukla je pozornost svijeta. Emisije stakleničkih plinova, osobito ugljikovog dioksida zagrijevaju planet. Stoga, razvojem vjetroturbina nema daljnjeg zagađenja jer energija vjetra predstavlja čisti izvor električne energije [7].

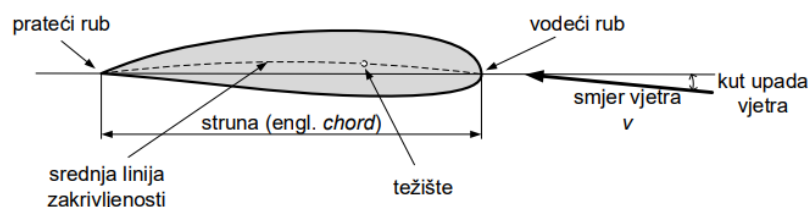
#### 4.4.2. Podjela prema osi vrtnje

Vjetroelektrane možemo podijeliti ovisno o tome kako je konstruirana osovinu, stoga razlikujemo:

- Vjetroelektrane s horizontalnom osi vrtnje
- Vjetroelektrane s vertikalnom osi vrtnje

Vjetroelektrane s horizontalnom osi vrtnje imaju osovinu koja leži vodoravno i na nju je spojen rotor vjetroelektrane gdje su lopatice slične krilima aviona. Generator se postavlja na vrh stupa, a visina stupa mora biti veća do 2 puta od promjera lopatica. Lopatice su dizajnirane da koriste silu uzgona za pokretanje rotora. Rotori se mogu razlikovati po broju lopatica, načinu zakretanja gondole, postavljanje stupa i sadržava li rotor difuzor ili ne.

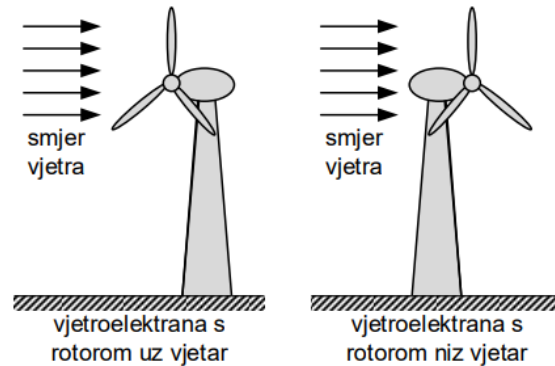
Puhanjem vjetra na lopatice vjetroturbine djeluju dvije sile koje su međusobno okomite i nazivaju sila uzgona i otpora zraka. Sila otpora zraka djeluje u smjeru puhanja vjetra, a sila uzgona djeluje okomito na smjer strujanja vjetra. Od iznimne je važnosti postići što bolja aerodinamička svojstva lopatica kako bi se maksimizirala korist energije dobivene iz vjetra i smanjili rashodi izrade vjetroturbine. Aerodinamična svojstva i mali gubici mogu se postići uz sljedeće zadovoljene uvjete: rub lopatice mora biti zaobljen i vrlo oštar, površina lopatice mora biti glatka, a omjer navedenih sila mora biti što veći (Slika 4.3) [8, 15].



Slika 2.3 Svojstva lopatice [8]

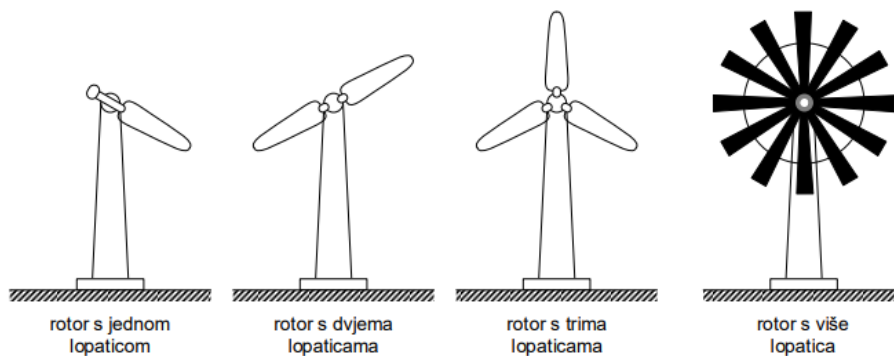
Postoje dvije vrste ovakvih vjetroturbina ako se gleda položaj stupa u odnosu na lopatice (Slika 4.4). Moguće je da stup bude ispred ili iza lopatica, a glavna razlika je da vjetroturbine s lopaticama iza stupa podnose snažniji vjetar. Stup je postavljen u smjeru vjetra, no glavni

nedostatak je da lopatice prolaze kroz visoko opterećenje. Učestalije su vjetroturbine s lopaticama ispred stupa bez obzira na visoke rashode izvedbe. Kod takvih vjetroturbina potreban je mehanizam koji će imati mogućnost zakretanja turbine u smjeru vjetra.



Slika 4.4 Primjer položaja rotora u odnosu na toranj [8]

Na slici (Slika 4.5) su prikazane konstrukcije vjetroturbine s različitim brojem lopatica. Broj lopatica kod vjetroturbina s vodoravnom odnosno horizontalnom osi vrtnje ovisi o samoj "zadaći" vjetroturbine. Vjetroturbine s većim brojem lopatica imaju mogućnost hvatanja slabijeg i sporijeg vjetra, a samim time imaju veću stopu iskorištenja energije vjetra. Dok vjetroturbine s manjim brojem lopatica hvataju brži i jači vjetar viših snaga s uvjetom velike početne brzine pokretanja. Najpogodniji je neparan broj lopatica zbog ravnoteže konstrukcije, najčešće se koristi Danski koncept vjetroatagata s tri lopatice na rotoru.



Slika 4.5 Konstrukcije vjetroturbine obzirom na broj lopatica [8]

Ovakve vjetroelektrane imaju veću učinkovitost, bolju stabilnost, ne trebaju pogon za pokretanje i njihovi visoki stupovi doprinose većim brzinama. Međutim, visoki stupovi problematični su za prijevoz do mjesta građenja elektrane što rezultira velikim troškovima i troškovima za instalaciju istih jer su potrebne visoke dizalice i poseban sustav za zakretanje

lopatica u smjeru vjetra. Dolazi do problema kada su u pitanju niske nadmorske visine i mogući su problemi deformacije prilikom snažnih turbulencija.

Slika 4.6 prikazuje vjetroturbinu koja je trenutno instalirana na krovu zgrade na Sveučilištu Western u Kanadi. Ima nazivnu izlaznu snagu od 900 W pri 13 m/s i vršnu izlaznu snagu od 1200 W pri 17 m/s. Ova vjetroturbina ima tipičan dizajn i konfiguraciju za male vjetroeletreane s horizontalnom osi vrtnje.



Slika 4.6 Mala vjetroeletrana Sveučilišta Western u Kanadi [7]

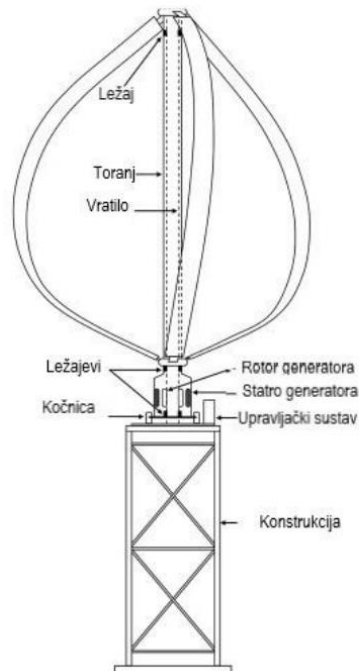
Vjetroeletreane s okomitom osi vrtnje imaju okomito postavljenu osovinu. Prednost vjetroeletreane s okomitom osi vrtnje je u tome što mogu iskoristiti vjetar iz svih smjerova, za razliku od vjetroeletreane s vodoravnom osi vrtnje koje zahtijevaju sustav za zakretanje kako bi se uvijek okrenule prema vjetru. Generator kod ovakvih vjetroeletreane može biti smješten u podnožju stupa, što olakšava pristup generatoru. Manji omjer brzine između lopatice i vjetra doprinosi lakšem kočenju rotora prilikom velikim brzina. Imaju niži stupanj učinkovitosti u usporedbi s vjetroeletreanama s vodoravnom osi vrtnje. Razlikuju se dva osnovna modela: Savoniusov i Darrieusov model [8, 15].

Francuski inženjer Georges Jean Marie Darrieus 1927. godine je izveo osnovnu izvedbu vjetroturbine koja je prikazana na slici (Slika 4.7). Vjetroturbina iskorištava energiju vjetra neovisno smjeru puhanja vjetra. Razlikuju se klasični model, H-tip i tip sa spiralnim lopaticama. Lopatice Darrieusovog tipa pokreću sile uzgona. Turbina se sastoji od više lopatica u obliku aeroprofila koje su pričvršćene na rotirajući središnji stup ili okomitu osovinu. Protok zraka preko lopatica VAWT-a stvara aerodinamički uzgon koji rotira lopatice. I vjetroturbine s horizontalnom osi (HAWT) i VAWT Darrieusovog tipa imaju svoje prednosti i slabosti. Dvije glavne prednosti Darrieusovog tipa u odnosu na vjetroeletreane sa horizontalnom osi vrtnje su:

- mogu raditi s dolaznom brzinom vjetra iz bilo kojeg smjera za razliku od HAWT-ova, koji zahtijevaju mehanizam skretanja
- generator i mjenjač VAWT-a Darrieusovog tipa može se postaviti na tlo

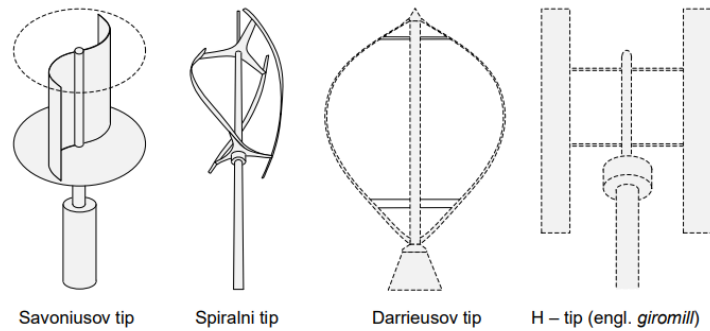
Dva glavna nedostatka VAWT-ova Darrieusovog tipa su

- problem samopokretanja
- oscilirajuća opterećenja na potpornim konstrukcijama [7, 8, 15]



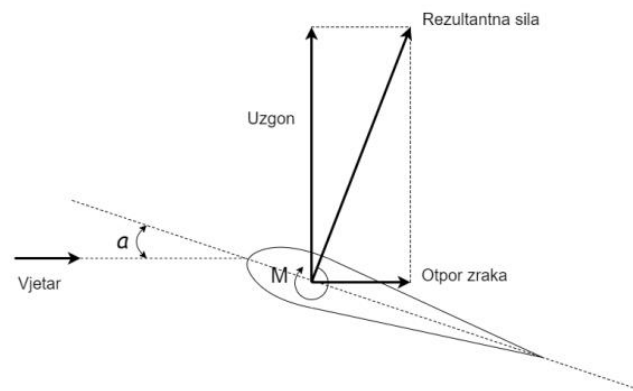
Slika 4.7 Darrieus klasični model vjetroturbine [17]

Na slici su prikazani osnovni tipovi Darieusove vjetroturbine (Slika 4.8). H-tip vjetroturbine prikazana je s lopaticama postavljenim paralelno s tornjem. Nedostatak ovog tipa vjetroturbine je znatan udaljenost lopatica od tornja, što zahtijeva robustne lopatice. To je najosnovniji oblik vjetroturbine s vertikalnom osi vrtnje. Tip vjetroturbine sa spiralnim lopaticama ima lopatice zakrenute za  $60^\circ$  u odnosu na H-tip. Zbog spiralnog oblika lopatica, pružaju se bolji kut udara vjetra. Zahvaljujući dizajnu lopatica, moment je konstantan tijekom cijelog kruga rotora, što rezultira manjim opterećenjem na konstrukciju. Ovakav tipu vjetroturbine nije potreban mehanizam za samopokretanje [8, 15].



Slika 4.8 Tipovi vjetroturbine s vertikalnom osi vrtnje [8]

Darrieusove vjetroturbine imaju učinkovitost iznad 0,3 i rade omjerom brzine vjetra 6 m/s. Okretanjem turbine mijenja se udarni kut lopatica. Svaka lopatica zasebno stvara svoj najveći okretni moment (Slika 4.9) na prednjoj i stražnjoj strani.

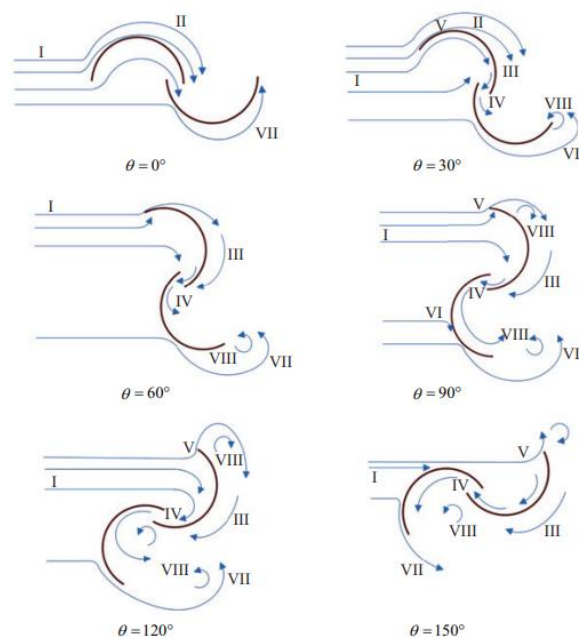


Slika 4.9 Prikaz sila na lopatici [17]

Savoniusova vjetroturbina je dobila naziv po finskom inženjeru Siguaru Johanessu Savoniusu, a nastala je 1922. Ovakva turbina ima lopatice u obliku slova S i zbog toga su lopatice manje opterećene u slučaju rotiranja suprotnog smjera od vjetra. Stoga, se uvijek javlja rotacija smjera gdje se nalazi veći otpor. Ovakav model poželjan je područjima gdje je vjetar nepredvidiv iz razloga jer će vjetar uvijek uhvatiti jednu lopaticu koja je okrenuta u smjeru puhanja vjetra. Ovakve se vjetroturbine koriste kada nije toliko važna učinkovitost nego cijena i pouzdanost [8, 15].

Vjetroturbine Savoniusovog tipa uglavnom se okreću zbog djelovanja sile otpora vjetra između konveksnih i konkavnih dijelova lopatica turbine kada se okreću oko okomite osovine. Međutim, uzgon također doprinosi stvaranju snage u različitim rotacijskim kutnim položajima. Tijekom potpunih rotacijskih ciklusa Savoniusovih turbina, oko lopatica turbine opažaju se

različiti tipovi uzoraka strujanja kao što su slobodno strujanje, tip Coanda, preklapanje, odvajanje, stagnacija i vrtložna strujanja. Na slici (Slika 4.10) prikazane su različite vrste uzoraka protoka sa različitim kutnim položajima. Slobodno strujanje vjetra (I) nastavlja prema različitim uzorcima strujanja nakon što djeluje na Savoniusove turbine kao što je prikazano na slici 4.4. Protok tipa Coanda (II), prvenstveno odgovoran za stvaranje sila uzgona na lopaticama turbine, istaknut je na kutnim položajima u rasponu od  $0^\circ - 45^\circ$ . Otpor tlaka na konveksnim stranama povratnih lopatica pri  $60^\circ - 150^\circ$  obnavlja se vučnim protokom (III) i preklapajućim protokom (IV) na lopaticama turbine. Protoci (III) i (IV) stvaraju povratni učinak na konkavnoj strani povratne lopatice, što zauzvrat pomaže u obnavljanju negativnih sila otpora tlaka koje djeluju protiv konveksne strane povratne lopatice. Dakle, tipovi protoka (II), (III) i (IV) doprinose povećanju prosječnog koeficijenta snage. Protok (V) odvaja priključeni tok od lopatica turbine i uzrokuje stvaranje vrtloga (VIII) [7].

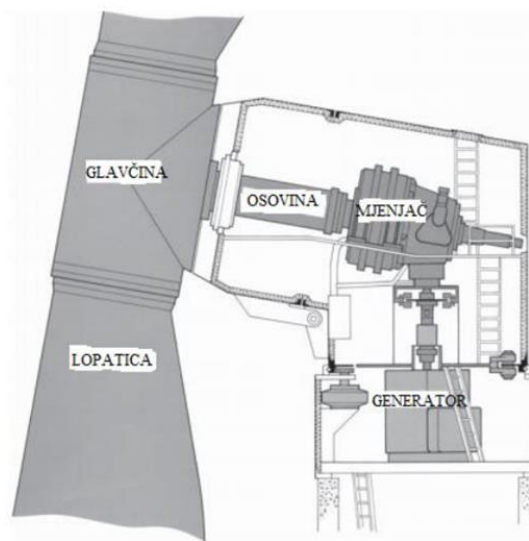


Slika (4.10) Različiti obrasci strujanja oko vjetroturbine Savoniusovog tipa (I: slobodno strujanje, II: Coanda strujanje, III: vučno strujanje, IV: preklapajuće strujanje, V: razdvajanje strujanja, VI: stagnacija strujanja, VII: povratno strujanje, VIII: vrtložno strujanje) [7]

Općenito, prednosti vjetroturbine s vertikalnom osi vrtnje je niža cijena, jednostavnost, okretanje nije nužno u smjeru puhanja vjetra. Međutim, za rad ovakvih vjetroturbina potrebno je ravno tlo, imaju vrlo male startne okretne momente i manja je iskoristivost od vjetroelektrana s horizontalnom osi vrtnje [8, 15].

### 4.4.3. Podjela prema vrsti generatora

Generator u sustavu vjetroturbine služi za pretvorbu mehaničke energije u električnu. Najčešće se koriste sinkroni i asinkroni generator jer najviše zadovoljavaju zahtjeve kojima treba težiti prilikom odabira, a to su: jednostavnost, dugotrajnost, niski troškovi održavanja i niža početna cijena. Kako bi generator postigao visoku učinkovitost, mora imati male gubitke praznog hoda i uzbude. Dodatan zahtjev prilikom odabira generatora je i brzina vrtnje koja može biti stalna i promjenjiva. Generator, ovisno o tipu vjetroelektrane se najčešće postavlja u glavčini stupa ili u gondoli gdje ima najmanje oscilacija i upravo radi tih oscilacija se postavljaju navedeni zahtjevi kako bi se smanjilo opterećenje na generator (Slika 4.11).



Slika 4.11 Generator u vjetroturbini [18]

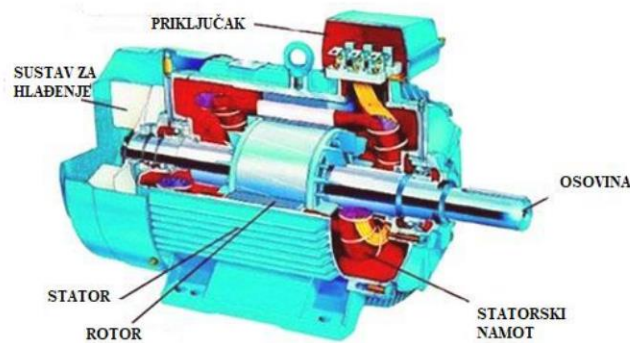
Vjetroelektrane možemo dijeliti i prema vrsti generatora koje se najčešće koriste:

- Asinkroni generatori: asinkroni kavezni, kliznokolutni, OptiSlip kliznokolutni i dvostrano napajani asinkroni generator
- Sinkroni generator: generatori s namotnim rotorom i permanentnim magnetom
- Ostali tipovi generatora: visokonaponski generatori i generatori s poprečnim tokom

Asinkroni generator sadrži stator, rotor, osovinu, kućište, ležaj i kavezni namot (Slika 4.12). Takav generator je vrsta električnog induksijskog stroja koji se uglavnom koristi u vjetroelektranama jer omogućuje jednostavna konstrukciju, čvrstoću i otpornost na vibracije, ekonomičniji je od ostalih vrsta generatora i omogućuje brže i jednostavnije spajanje na mrežu. Pretvara mehaničku energiju u električnu pri čemu se brzina rotora razlikuje od sinkrone brzine

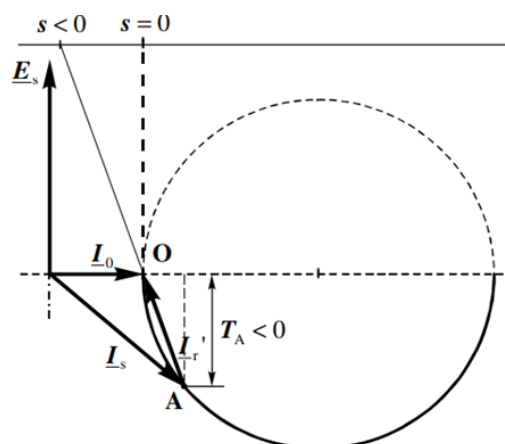


stroja i ovisi o opterećenju. Asinkronome generatoru se dodaje uređaj za upravljanje i regulaciju jer generirana struja sadrži promjenjive vrijednosti frekvencije i napona te se na taj način pokušava osigurati da napon i frekvencija ostaju unutar utvrđenih standarda. Ovakav generator se koristi u vjetroelektranama spojene na krutu mrežu uz kondenzatorske baterije i uređaja za sinkronizaciju generatora s mrežom, te je takav sustav jednostavniji u usporedbi s onim koji sadrži sinkroni generator. U usporedbi sa sinkronim generatorom, asinkroni generator je robusniji i jeftiniji, a održivost je znatno fleksibilnija [19].



Slika 4.12 Presjek asinkronog generatora [20]

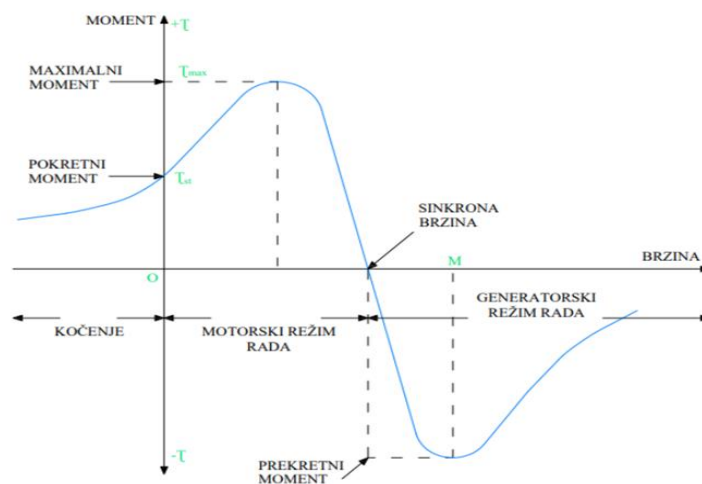
Asinkroni stroj spojen na krutu mrežu, vrtimo vanjskim momentom, tada on radi nadsinkrono i predaje električnu energiju u mrežu. Na slici je prikazan kružni dijagram (Slika 4.13) na kojemu se radna točka A nalazi na donjoj polovini kružnice. Stroj se ponaša kao prigušnica jer uzima induktivnu energiju iz mreže. Asinkroni stroj za razliku od sinkronog nije u mogućnosti da se uzbudom mijenja jalova snaga. U generatorskom radu potrebna je jalova energija iz mreže, ako je stroj bez mreže, da bi nastalo magnetsko polje potrebna je induktivna struja koja se dobije iz kondenzatora [14].



Slika 4.13 Radna točka asinkronog generatora [21]

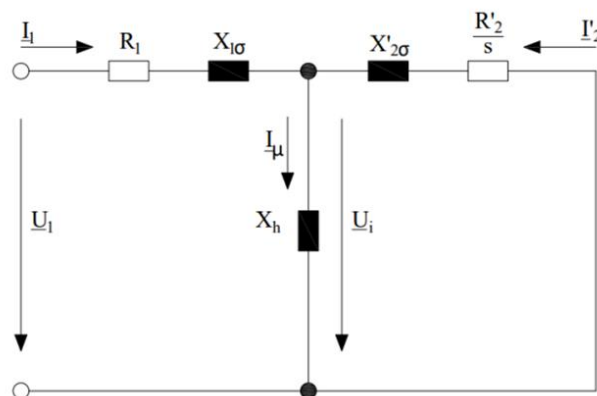
Kod motornog rada asinkronih generatora kroz namot statora poteći će struje koje stvaraju magnetsko polje. Magnetsko polje rotira sinkronom brzinom te prilikom rotacije presijeca vodiče statorskog i rotorskog namota gdje se inducira napon kada se takav stroj poveže na izmjenični simetrični trofazni izvor. Ovakve vjetroelektrane možemo pronaći na Pagu gdje se mehanička energija rotora vjetroturbine prenosi na rotor generatora preko osovine i prijenosnika. U slučaju gdje se nalaze vjetroturbine s promjenjivom brzinom vrtnje rotora dodaje se diodni ispravljač u mosnom spoju kako bi se regulirao djelatni otpor rotora. Maksimalna radna snaga generatora ovisi o brzini vrtnje generatora odnosno mehaničkoj snazi, napon i frekvenciju ovakvog generatora određujemo iz napona i frekvencije mreže. Kod ovakvih generatora nije potreban uzбудni sustav nego uređaj koji će kontrolirati brzinu vrtnje kako ne bi došlo do preopterećenja odnosno kvara [19].

Na slici (Slika 4.14) prikazana je karakteristika momenta asinkronog stroja u cijelom području rada.



Slika 4.14 Ovisnost momenta o brzini vrtnje u cijelom području rada [19]

Na slici (Slika 4.15) prikazana je nadomjesna shema asinkronog generatora.



Slika 4.15 Nadomjesna shema asinkronog generatora [19]

Parametri nadomjesne sheme asinkronog generatora su:

$R_1$  – otpor statorskog namota

$R'_2$  – otpor rotor u odnosu na stator

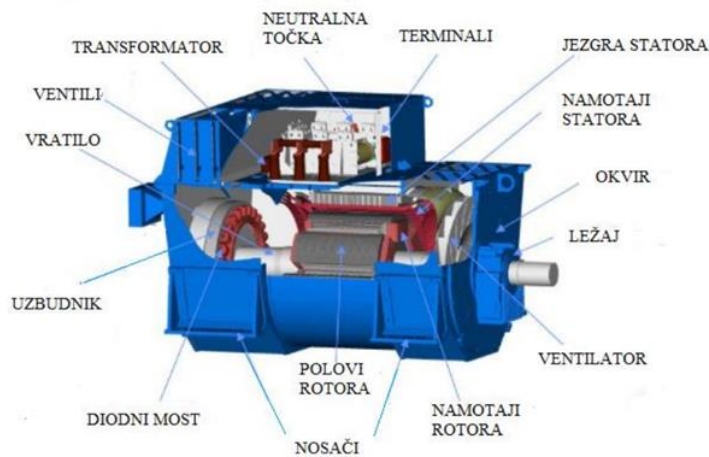
$X_{1\sigma}$  – reaktancija gubitaka statorskog namota

$X_{2\sigma}$  – reaktancija gubitaka rotora u odnosu na stator

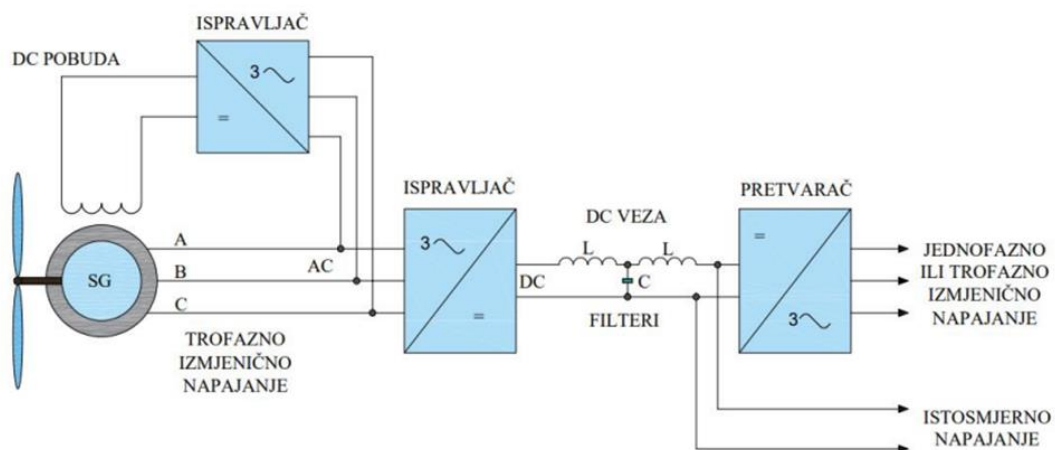
$X_h$  - gubici praznog hoda

$X_{Fe}$  – gubici željeza u jezgri

Na slici (Slika 4.16) je prikazan presjek sinkronog generatora. Za razliku od asinkronog generatora sinkroni generator je mehanički složeniji i kompleksniji. To je stroj izmjenične struje čija brzina je čvrsto povezana broju pari polova i frekvenciji napona. Sinkrone generatore primjenjujemo u vjetroelektranama koje imaju stalnu brzinu vrtnje jer je sinkrona brzina konstante vrijednosti. Kako bi se mogao održavati napon i frekvencija potreban je uzбудni sustav i regulator brzine. Kada dođe do poremećaja brzine vrtnje ili poremećaja u mreži teško održavaju sinkronizam, međutim imaju veći stupanj djelovanja kada do poremećaja ne dođe. Kod vjetroelektrana sa promjenjivom brzinom vrtnje, kako bi se izbjegle nestabilnosti napona potrebno je sinkroni generator unaprijediti sa frekvencijskim pretvaračem. Prednosti ovakvog generatora kada su povezani na naponski slabiju mrežu je sposobnost proizvodnje jalove snage. Osim toga, magnetsko polje može nastati korištenjem konvencionalnih namota ili permanentnog magneta zbog toga sinkroni generatori nemaju potrebu za strujom magnetiziranja. Kako bi se postigla maksimalna snaga upravljanja dodaje se energetska pretvarač prilikom povezivanja generatora u mrežu. Energetska pretvarač mora biti u mogućnosti ponašati se kao spremnik koji će pohraniti energiju vjetra. On se koristi za izbjegavanje problema u mreži odnosno kontroliranje magnetiziranja. Najprije transformira struju promjenjive frekvencije preko ispravljača u istosmjernu struju koju kasnije preko pretvarača ponovno ju vraća u izmjeničnu struju frekvencije prikladne za mrežu (Slika 4.17).



Slika 4.16 Presjek sinkronog generatora [22]



Slika 4.17 Shema rada sinkronog generatora [19]

Sinkroni generator se može koristiti za direktan pogon kada ima točno određen broj pari polova i to bez prijenosnika snage. Kod vjetroelektrana koriste se dva klasična tipa sinkronih generatora, a to su sinkroni generator s namotnim rotorom i s permanentnim magnetom [19].

#### 4.4.4. Podjela prema lokaciji

Prema lokaciji, vjetroagregati se dijele na:

- Vjetroagregati na kopnu
- Vjetroagregati na pučini

Vjetroagregati na pučini imaju duži vijek trajanja iz razloga jer tamo ima manje turbulencija nego na kopnu. Manja je nepravilnost na morskoj površini, stoga se vjetar znatno ne mijenja te nije potrebna velika visina osovine turbine kao što bi na kopnu trebala biti. Ovakvi vjetroagregati daju veću izlaznu snagu, ne stvaraju buku, međutim postavljanje ovakvih vjetroelektrana je znatno skuplje nego na kopnu, slana voda izaziva koroziju i udaranje morskih vjetrova izaziva potrebu za dodatnom zaštitom. Vjetroagregati na kopnu najčešće se nalaze u područjima okruženim planinama i brdima jer je tamo potencijal energije vjetra vrlo velik i brzina vjetra raste. Prednosti ovih vjetroagregata je jednostavnija izvedba i postavljanje, veća dostupnost, jeftiniji su, imaju dobru iskoristivost. Općenito, najbolje je postaviti vjetroelektrane duž obale jer imaju manje nepravilnosti terena i samim time ne usporavaju vjetar za razliku u područjima blizu šuma i velikih gradova vjetar se usporava ili dolazi do turbulencije [8].

#### **4.4.5. Podjela prema brzini vrtnje**

Vjetroelektrane možemo podijeliti i na vjetroelektrane sa stalnom i promjenjivom brzinom vrtnje. Vjetroelektrane sa stalnom brzinom vrtnje imaju rotor koji se uvijek vrti istom brzinom, neovisno o jačini puhanja vjetra. Brzina vrtnje rotora ovisi isključivo o frekvenciji mreže i o omjeru prijenosnika. U sebi sadrže asinkroni generator i kondenzatorsku bateriju koja služi za kompenziranje jalove snage. Imaju dobru iskoristivost energije vjetra, jednostavna im je izvedba, lako se rješavaju kvarovi, ali isto tako ih karakterizira nepouzdanost, mehanička naprezanja, prenaponski uvjeti koji štete samim instalacijama za vjetroagregat i ostatak mreže. Međutim, vjetroelektrane sa promjenjivom brzinom proizvode kvalitetnu električnu energiju neovisno o brzini vrtnje rotora, nema naprezanja, a ni disperzije brzine vjetra jer se kompenzira promjenom brzine vrtnje rotora. Kod ovakvih vjetroelektrana povećani su gubici, veliki su troškovi izvedbe i instalacija i imaju više određenih komponenti koje uzrokuju pad pouzdanosti u rad [8].

#### **4.5. Primjena malih vjetroagregata**

Pri postavljanju malih vjetroelektrana najvažniji parametar je srednja godišnja brzina vjetra. Oni su najčešće smješteni na krovove kuća i imaju rotor promjera 2 m, visinu stupa od 3 – 5 m, a nazivna snaga varira od 0,5 do 3 kW. Mali vjetroagregati se mogu koristiti u svrhu uštede energije i za smanjivanje energetske ovisnosti čime se postiže opskrba električnom energijom kućanstava koja nisu priključena na elektroenergetski sustav. Koriste se za punjenje baterija i rasvjetu, a osim tog i za specijalne namjene poput navigacijskih i telekomunikacijskih postaja, na vikendicama i brodovima za rasvjetu i sl. [16].

## 4.6. Lokacija malih vjetroagregata

Kriteriji koji se trebaju zadovoljiti prilikom postavljanja malih vjetroagregata su: velika površina, mala hrapavost terena, zadovoljavajuća srednja godišnja brzina vjetra. Mali vjetroagregati mogu biti samostalni u prostoru ili montirani na konstrukciju. Ključne stavke kojih se treba pridržavati prilikom montaže vjetroagregata su:

- Udaljenost stupa i susjedne konstrukcije u iznosi od jedne visine stupa radi sigurnosti
- Lokacija montaže treba biti velike površine kako bi olakšalo podizanje stupa i servisiranje
- Horizontalna udaljenost oko 100 m od susjednih objekata slične visine
- Vršenje montaže na mjestima s pristupom dominantnih vjetrova
- Izbjegavanje zavjetrine
- Za smanjivanje gubitaka prijenosa snage potrebna je što manja udaljenost turbine i električnog razvoda
- Postavljanje izmjenjivača bliže izvoru istosmjerne struje radi smanjena gubitaka u vodičima
- Postavljanje vjetroagregata na stupove je učinkovitije jer imaju veću proizvodnju električne energije za razliku od onih koji su postavljeni na krovove kuća. Montiranje vjetroagregata na krovove kuća zahtijeva pažljivo planiranje radi sigurnosti rada vjetroagregata i kućanstva
- Ulaganje u veće stupove rezultira povećanju iskoristivosti vjetroagregata i snage jer na većim visinama vjetrovi su manje turbulentniji
- Postavljanje malih vjetroagregata u ruralna područja proizvodi više električne energije
- Postavljanje se preporuča se uz ravnu cestu gdje je paralelan smjer strujanja vjetra [23]

Temeljem rezultata simulacije zaključuje se da postavljanje vjetroagregata 3 m iznad visine kuće koje su 10 m visine u homogenom nizu, maksimalna brzina vjetra na visini vjetroagregata izjednačava se sa otprilike polovicom srednje godišnje brzine vjetra [24].

## 4.7. Vjetroelektrane u RH

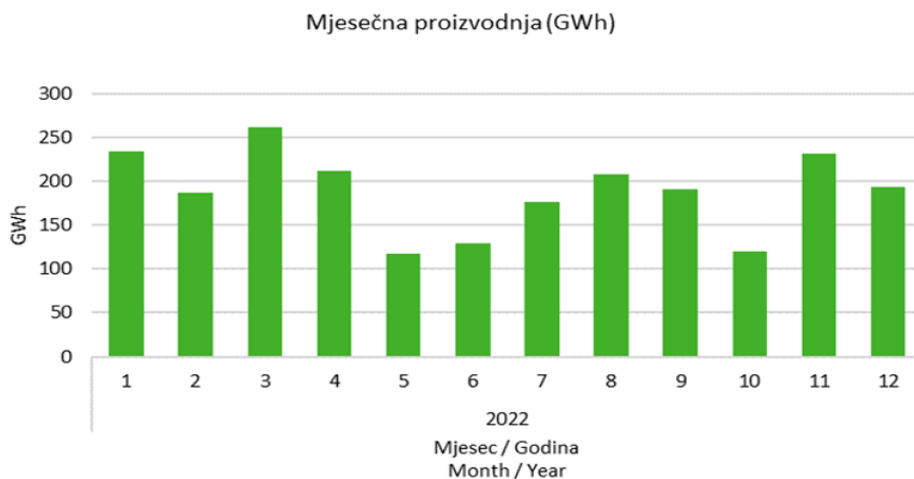
U tablici (Tablica 4.1) prikazan je popis svih vjetroelektrana u Republici Hrvatskoj i njihova ukupna proizvodnja električne energije.

Tablica 4.1 Popis vjetroelektrana u RH [25]

Broj	Naziv	Lokacija (županija/općina)	Instalirana snaga (MW)	Snaga priključenja (MW)	Napon priključenja (kV)	U pogonu od
1	Ravne	Zadarska/Pag	5,95	5,95	10	2005.
2	Trtar Krtolin	Šib-Knin/Šibenik	11,2	11,2	30	2007.
3	Orlice	Šib-Knin/Šibenik	9,6	9,6	30	2009.
4	Vrataruša	Lič-Senj/Senj	42	42	110	2010.
5	Velika Popina	Zadarska/Gračac	53,4	54	110	2011./2017.
6	Pametno Brdo	Split-Dalm/Split	20	20	110	2010./2011./2012./2015.
7	Crno Brdo	Šib-Knin/Šibenik	10,5	10	10	2011.
8	Bruška	Zadarska/Benkovac, Obrovac	36,8	36	110	2011.
9	Ponikve	Dub-Neret/Ston	38,8	34	110	2012.
10	Jelinak	Šib-Knin/Marina, Seget	30	30	110	2013.
11	Voštane	Split-Dalm/Trilj	42	40	110	2013.
12	Zadar4	Zadarska/Benkovac	9,2	9,2	10	2013.
13	Velika Glava	Šib-Knin/Drniš, Šibenik, Unešić	43,7	43	110	2014.
14	Zelengrad	Zadarska/Obrovac	42	42	110	2014.
15	Ogorje	Split-Dalm/Muč	42	44	110	2015.
16	Rudine	Dub-Neret/Dubrovačko primorje	34,2	35	110	2015.
17	Glunča	Šib-Knin/Šibenik	20,7	22	110	2016.
18	Katuni	Split-Dalm/Šestanovac	34,2	39	110	2016.
19	Lukovac	Split-Dalm/Cista Provo	48,75	48	110	2018.
20	Kom-Orjak-Greda	Split-Dalm/Blato na Cetini	10,25	10	35	2020.
21	Jasenice	Zadarska-Jasenice	11,5	10	35	2020.
22	Krš Padene	Šib-Knin/Ervenik	144	142	220	2021.
23	Korlat	Zadarska/Korlat	63	58	110	2021.
24	Ljubač	Šib-Knin/Vrbnik	21,6	20	35	2022.
25	Ljubač II	Šib-Knin/Vrbnik	10,8	9,9	35	2022.
	UKUPNO	834,15	824,85			

U 2022. godini ukupna proizvodnja električne energije putem vjetroelektrana iznosi 188,59 GWh [25].

Na slici (Slika 4.18) prikazana je mjesečna proizvodnja svih vjetroelektrana u Hrvatskoj 2022. godine. Proizvodnja električne energije se kreće u rasponu od 117,64 GWh do 262,23 GWh [25].



Slika 4.18 Proizvodnja električne energije putem vjetroelektrana u RH 2022. godine [25]

#### 4.8. Tržište malih vjetroelektrana u Hrvatskoj

U Hrvatskoj je vrlo mala ponuda malih vjetroagregata. Neki od vjetroagregata koji su u ponudi je Southwest Windpower koji proizvodi snagu od 200W do 5kW. Razlikuju se nekoliko serija: Whisper 100, Whisper 200 i Whisper 500, Skystream 3.7, AIR breeze, AIR 40 i AIR 30. AIR breeze i AIR 40 ne zahtijevaju velike početne brzine poput AIR 30 koji može postići i do dva puta veću snagu. AIR 40 i AIR 30 su namijenjeni na kopnenim lokacijama, a AIR breeze sadrži antikoroziivnu zaštitu stoga se može ugraditi i na mjestima uz more. Southwest Windpower serije AIR sadrže regulatore koji imaju nadzor punjena baterije i štite vjetroagregat od jakih vjetrova [26]. Slika 4.19 prikazuje Southwest Windpower vjetroagregat.





Slika 4.19 Southwest Windpower vjetroagregat [26]

U tablici (Tablica 4.3) se nalazi detaljan opis Southwest Windpower vjetroagregata.

Tablica 4.3 Karakteristike AIR serija Southwest Windpower vjetroagregata [26]

Seriya	AIR breeze	AIR 40	AIR 30
Energija/mjesečno	38 kWh (6m/s)	40 kWh (6m/s)	30 kWh (6m/s)
Napon baterije (V)	12, 24, 48	12, 24, 48	12, 24, 48
Brzina pokretanja (m/s)	2,7	2,7	2,7
Promjer elise (m)	1,17	1,17	1,17
Broj lopatica	3	3	3
Masa [kg]	6,0	6,0	6,0

Seriya Whisper (Slika 4.20) namijenjena su za područja gdje su pretežito veće brzine vjetrova. Seriya Skystream 3.7 (Slika 4.21) ima jedini ugrađen izmjenjivač, koristi se kao izvor punjenja baterija, ali je i namijenjen za povezivanje javnom električnom mrežom. Ova serija ima mogućnost postizanja nazivne snage pri brzini vjetra od 9,4 m/s [26].



Slika 4.20 Whisper vjetroagregat [26]



Slika 4.21 Skystream vjetroagregat [26]

Tablica 4.4 prikazuje karakteristike serija Whisper i Skystream vjetroagregata.

Tablica 4.4 Karakteristike Whisper i Skystream serija vjetroagregata[26]

Seriya	WHISPER 100	WHISPER 200	WHISPER 500	SKYSTREAM 3.7
Nazivna snaga [W]	900	1000	3000	1900
Napon baterije [V]	12, 24, 48	12, 24, 48	24, 32, 48	12, 24, 48
Brzina vjetra (Pn) [m/s]	12,5	11,6	10,5	9,4
Promjer elise	2,1	2,7	4,5	3,7
Broj lopatica	3	3	2	3
Masa [kg]	23	39	70	77

BWC (Bergey Windpower Co) (Slika 4.22) razlikuje se od ostalih po visokoj pouzdanosti čije je održavanje minimalno. Ima robusnu konstrukciju i malo pokretnih dijelova. Sadrže generator malog broja okretaja s permanentnim magnetom. Razlikuju se serije: BWC EXCEL-R i BWC XL, koji su predviđeni za rad s baterijama u istosmjernim sustavima neovisno o mreži te BWC EXCEL-S koji je namijenjen za rad u javnu mrežu [26].



Slika 4.22 Bergey vjetroagregat [26]

Tablica 4.5 prikazuje karakteristike serije BWC vjetroagregata.

Tablica 4.5 Karakteristike BWC serija vjetroagregata

Seriya	BWC EXCEL-R	BWC EXCEL-S	BWC XL1
Nazivna izlazna snaga [W]	7500	10000	1000
Nazivni napon baterije [V]	48	-	24
Nazivni izmjenični napon [V]	-	230	-
Brzina vjetra (Pn) [m/s]	13,6	13,6	11
Brzina vjetra ("furling") [m/s]	16,1	16,1	13
Promjer elise [m]	7	7	2,5
Broj lopatica	3	3	3
Masa [kg]	475	475	34

Superwind (Slika 4.23) zakreće pojedine elise oko vlastite osi te time vršni regulaciju čime postiže smanjenje vibracije, nesmetanu proizvodnju energije iz čega proizlazi da se energija ne gubi. Koriste se najbolji materijali za izradu ove serije, a postavljanje je jednostavno. Rade ekstremnim uvjetima pri jakim vjetrovima [26].



Slika 4.23 Superwind vjetroagregat [26]

Tablica 4.6 opisuje karakteristike Superwind vjetroagregata.

Tablica 4.6 Karakteristike serija Superwind vjetroagregata [26]

Seriya	SW 350-12	SW 350-24
Nazivna izlazna snaga [W]	350	350
Nazivni napon baterije [V]	12	24
Brzina vjetra (Pn) [m/s]	12,5	12,5
Promjer elise [m]	1,22	1,22
Broj lopatica	3	3
Masa [kg]	11,5	11,5

Ruihua Energy vjetroagregati (Slika 4.24) su karakteristični po velikim površinama elisa koje omogućuju pokretanje pri malim vjetrovima od svega 1 m/s [26].



Slika 4.24 Ruihua Energy vjetroagregat

U tablici 4.7 prikazane su karakteristike Ruihua Energy vjetroagregata.

Tablica 4.7 Karakteristike Ruihua Energy serija vjetroagregata [26]

Seriya	RW300 (Black 300)	RW600 (Black 600)
Nazivna snaga [W]	300	600
Napon baterije [V]	24	12, 24
Startna brzina vjetra [m/s]	1	1
Promjer elise [m]	1,22	1,66
Broj lopatica	3	3
Masa [kg]	16	20

## 5. PRAKTIČNI DIO: IZRADA MALIH VJETROTURBINA

U ovome poglavlju opisan je postupak izrade makete vjetroturbine s vertikalnom osi vrtnje i izrada lopatica za vjetroturbinu s horizontalnom osi vrtnje, popis materijala i alata, ispitivanje i analiza dobivenih rezultata.

### 5.1. Materijali i alati za izradu

Za izradu makete vjetroturbine s vertikalnom osovinom koristili su se sljedeći materijali:

- Plexiglas 5mm
- PVC cijev fi 30
- Ležaj 6203 - 2 komada
- Navojna šipka M10
- Navojna šipka M6
- Matica M10 – 2 komada
- Matica M6 – 8 komada
- Loctite 403 ljepilo za plastiku
- Podloške široke M6 i M10
- Bijeli autolak

Svi korišteni alati za izradu su:

- Električna bušilica
- Tanka rezna ploča
- Brusna ploča sa lamelastim šmirglom
- Bušilica
- Svrđlo M6
- Svrđlo M10

Za izradu lopatica korišteni su sljedeći materijali:

- PVC cijev fi 30
- Svjetlo vučena čelična šipka fi 6

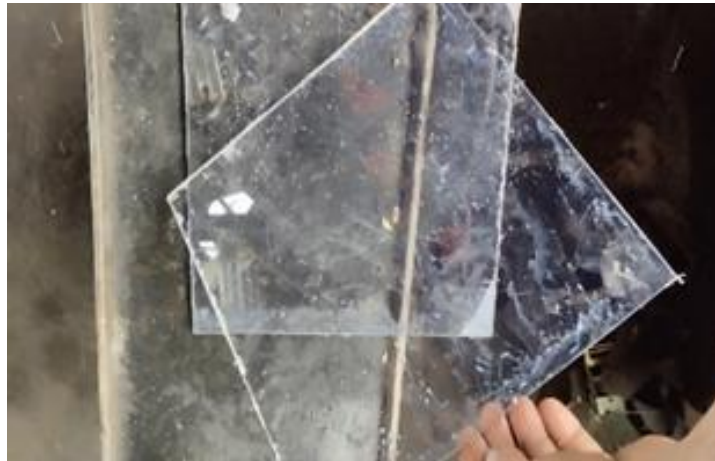
Alati za izradu lopatica su:

- Električna brusilica

- Rezna ploča
- Brusna ploča sa lamelastim šmirglom
- Loctite brzo ljepilo 406
- Bijeli autolak

## 5.2. Postupak izrade makete vjetroturbine

Za izradu postolja i osovine korišten je pleksiglas 5mm koji se najprije reza u određene dimenzije 30×30 tankom reznom pločom (Slika 5.1). Od iste ploče napravljene su dva postolja. Zatim se reže pleksiglas 5mm reznom pločom dimenzije  $\varnothing 25$ , potrebna su 2 diska (Slika 5.2). Diskovi od pleksiglasa služe kao postolje na kojima se ucrtavaju mjere i označavaju linije za potrebe postavljanja lopatica turbine. Buše se kružne rupe na postolju i na diskovima (Slika 5.3), te se lijepi ležaj 6203 na oba komada ploče postolja (Slika 5.4).



Slika 5.1 Postolje vjetroturbine



Slika 5.2 Kružni diskovi vjetroturbine s označenim mjestima za položaj lopatica



Slika 5.3 Bušenje rupa na postolju



Slika 5.4 Lijepljenje ležajeva 6203 na postolje

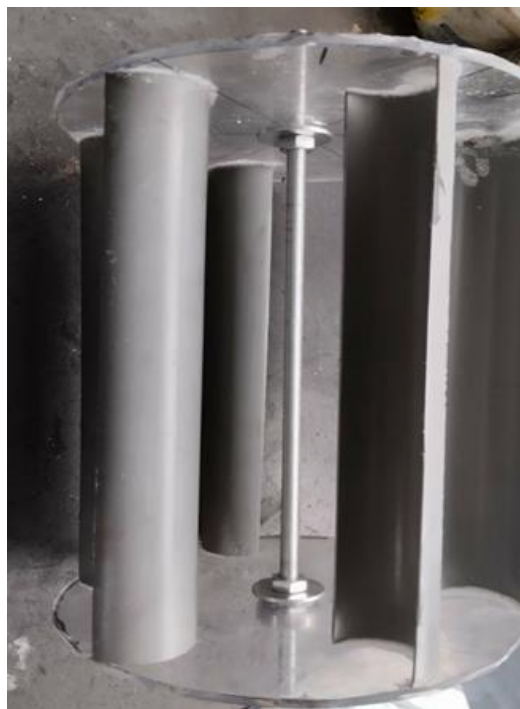
Za izradu lopatica vjetroturbine najprije se koristi PVC cijev koja se reže na dužinu 250mm. Cijev se dodatno reže kroz pola svake cijevi kako bi se dobilo 6 komada iste veličine i dužine. Lopatice napravljene od cijevi pričvršćuju se na diskove na ucertana područja Loctite 403 ljepilom (Slika 5.5).





Slika 5.5 Lijepljenje lopatica

Kako bi se učvrstila maketa provlači se osovina (Slika 5.6). Navojna šipka M10 predstavlja osovinu koja se provlači kroz sredinu postolja sa lopaticama i učvršćuje se maticom M10 I podloškom M10 S obje strane navojne šipke.



Slika 5.6 Učvršćivanje makete navojnom šipkom M10

Za dovršavanje makete fiksiraju se kvadratna postolja provlačenjem navojne šipke M10 kroz ležaje i učvršćuju se kontra maticama (Slika 5.7).



Slika 5.7 Fiksiranje kvadratnih postolja

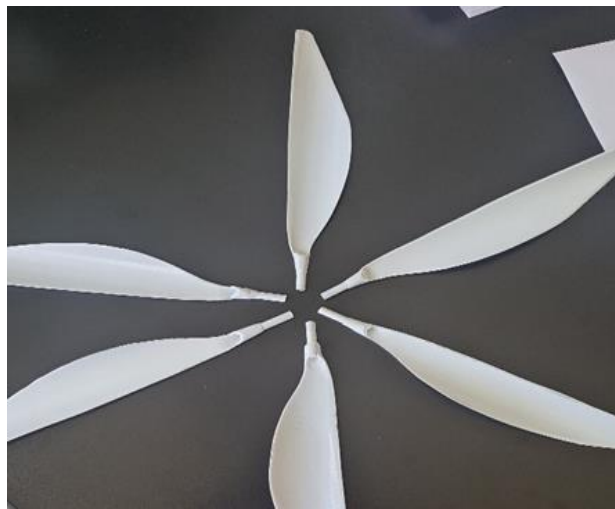
Cijela maketa odnosno kvadratna postolja učvršćuju se sa navojnim šipkama M6 i maticama M6. Za kraj se obrađuju rubovi brusilicom i finom brusnom pločom. Maketa se boja zaštitnom bojom i autolakom za ljepši izgled (Slika 5.8).



Slika 5.8 Prikaz završene makete

### 5.3. Postupak izrade lopatica

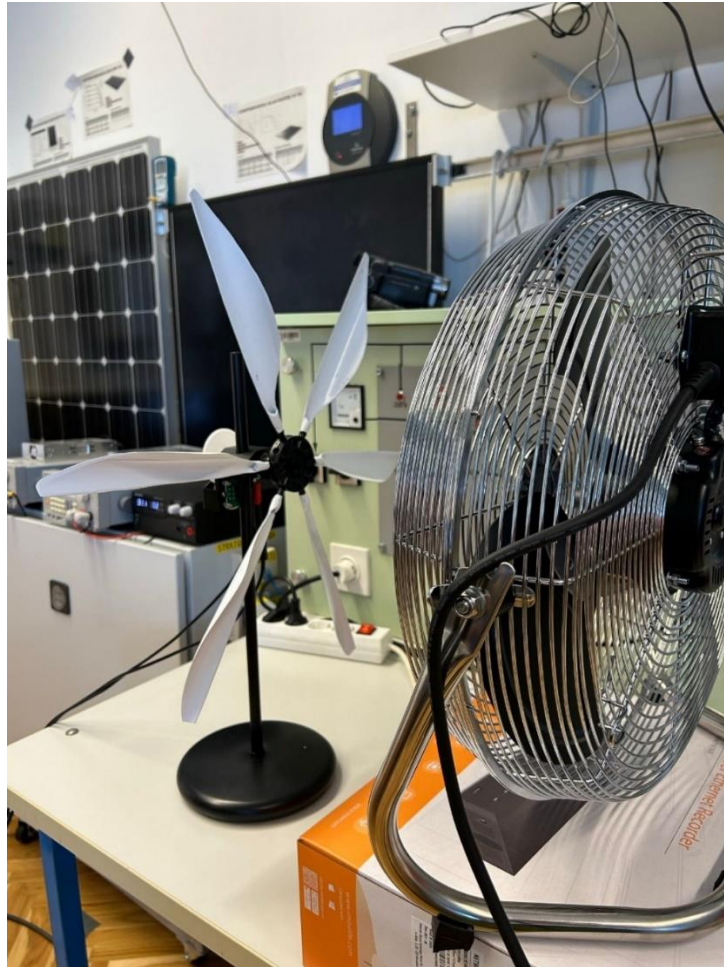
Za izradu lopatica koristi se PVC cijev fi 30 koja se najprije reže na dužinu od 250 mm. Potrebno nam je 6 komada. Zatim se svaka cijev reže kroz sredinu na dvije polovice reznom pločom. Lopatice se režu u obliku pera električnom brusilicom po papirnatom šablonu. Lopatice zatim grijemo i oblikujemo na okrugloj cijevi kako bi dobili spiralni oblik. Potrebno je dodatno izrezati svjetlovučenu čeličnu šipku fi 6 na dužinu 25mm. Ista šipka postavlja se u donji dio zagrijanje lopatice na kojoj se oblikuje otvor od 6 mm. U njega se stavlja materijal odnosno šipka fi 6 dužine 25mm i fiksira se Loctite 406 brzim ljepilom kroz otvor. Svaka strana lopatice obrađuje se lameliranom brusnom pločom te se bojaju autolakom (Slika 5.9).



Slika 5.9 Prikaz svih šest lopatica

### 5.4. Testiranje lopatica i mjerenja

U ovome dijelu završnog rada ispitane su lopatice u laboratoriju odnosno utjecaj kuta i broja lopatica rotora na izlaznu snagu vjetroagregata. Za postavu mjerenja koristila se vjetroturbina s horizontalnom osi vrtnje na udaljenosti od 30 cm od ventilatora koji predstavlja izvor vjetra (Slika 5.10). Vršila su se četiri mjerenja pod različitim kutovima postavljenih lopatica.

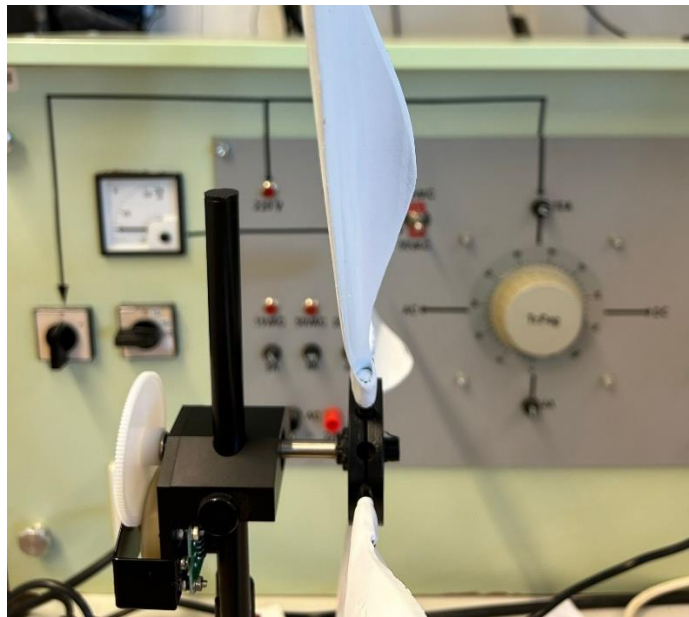


Slika 5.10 Postava vjetroelektrane u laboratoriju

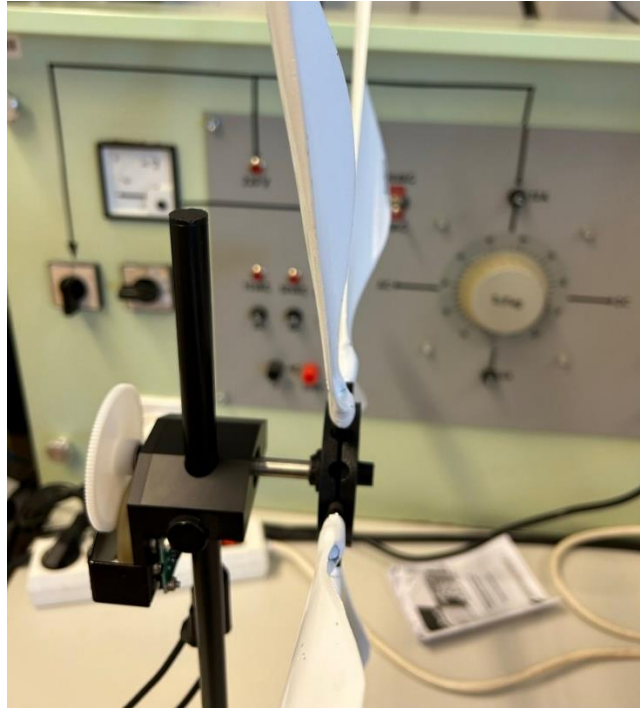
Za mjerenja odabrani su različiti kutovi odnosno položaji lopatica. Kutove je bilo teško izmjeriti, iz prikazanog je vidljiva grafička interpretacija korištenih kutova lopatica. Slika 5.11 predstavlja prvi položaj lopatica, slika 5.12 predstavlja drugi položaj lopatica, a slika 5.13 predstavlja treći položaj lopatica.



Slika 5.11 Prvi položaj lopatica



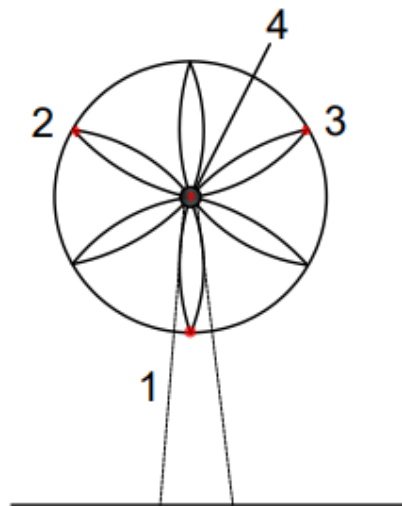
Slika 5.12 Drugi položaj lopatica



Slika 5.13 Treći položaj lopatica

Za sva tri položaja postavljenih lopatica vršila su se mjerenja brzine vjetra (anemometrom) i strujno-naponska karakteristika vjetrogeneratora iz koje se odredila maksimalna izlazna električna snaga.

Anemometrom se mjerila brzina vjetra u četiri točke na rotoru prikazane na slici (Slika 5.14).



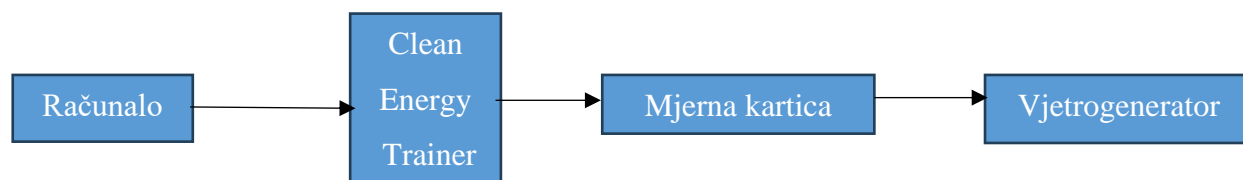
Slika 5.14 Točke mjerenja brzine vjetra

U Tablici (Tablica 5.1) prikazane su prosječne vrijednosti brzine vrtnje vjetrogeneratora za sva tri postavljena kuta lopatica.

Tablica 5.1 Mjerene vrijednosti brzine vjetra po točkama

Točke	Prosječna brzina vjetra po naznačenim točkama vjetrogeneratora
Dolje	10 km/h
Sredina	5,8 km/h
Gore desno	9,4 km/h
Gore lijevo	9,3 km/h

Za svaki kut lopatica putem programa Clean Energy Trainer snimane su  $P-U$  karakteristike za vjetrogenerator sa šest lopatica. U blokovskoj shemi je prikazan način povezivanja svih elemenata potrebnih za mjerenje.

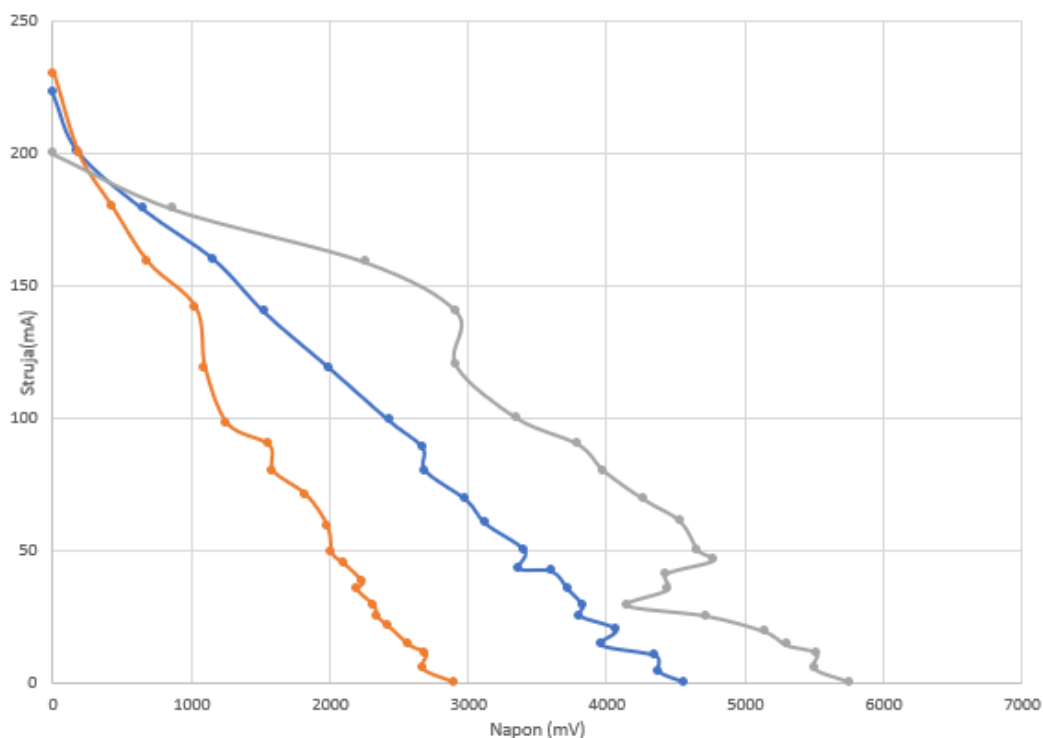


U tablici (Tablica 5.2) ispisane su vrijednosti mjerenja struje i napona.

Tablica 5.2 Mjerene vrijednosti struje i napona

Broj	Prvi položaj		Drugi položaj		Treći položaj	
	Napon (mV)	Struja (mA)	Napon (mV)	Struja (mA)	Napon (mV)	Struja (mA)
1	4565	0	2899	0	5762	0
2	4385	4	2676	5	5509	5
3	4360	10	2696	11	5522	11
4	3971	14	2579	14	5305	14
5	4075	20	2430	21	5152	19
6	3815	25	2341	25	4729	25
7	3834	29	2321	29	4156	29
8	3730	35	2201	35	4448	35
9	3609	42	2236	38	4439	41
10	3372	43	2103	45	4776	46
11	3411	50	2016	49	4666	50
12	3132	60	1985	59	4537	61
13	2991	69	1831	71	4280	69
14	2697	80	1594	80	3987	80
15	2673	89	1560	90	3802	90
16	2434	99	1260	98	3356	100
17	2000	119	1098	119	2916	120
18	1533	140	1031	142	2923	140
19	1168	160	689	159	2262	159
20	657	179	429	180	877	179
21	181	201	187	200	3	200
22	2	223	8	230		

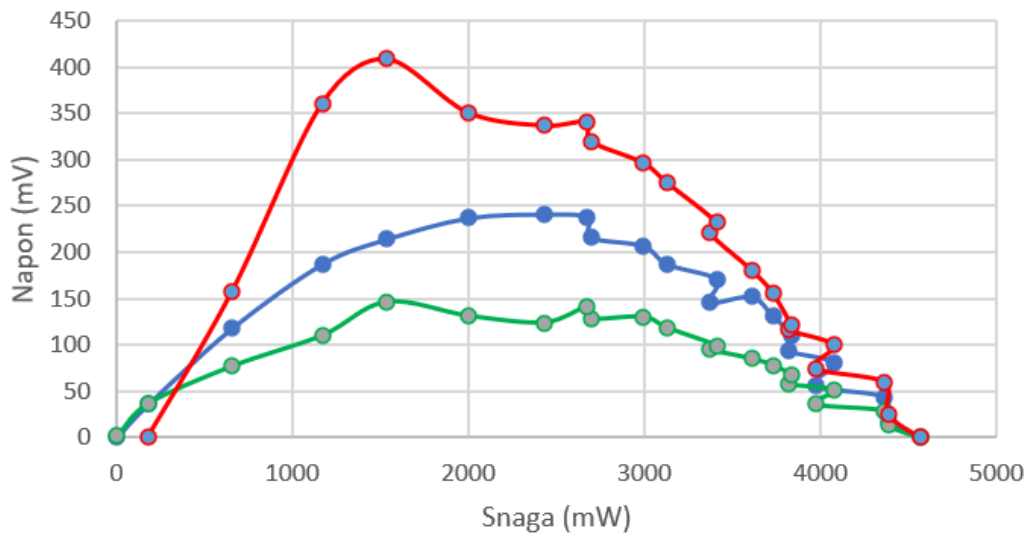
Na slici ispod (Slika 5.15) prikazana je  $I-U$  karakteristika za sva tri mjerenja pod različitim kutovima. Narančastom bojom prikazan je graf za drugi položaj, plavom bojom prvi položaj i sivom bojom treći položaj.



Slika (5.15)  $I-U$  karakteristike sva tri položaja

Na slici (Slika 5.16) ispod prikazan je  $P-U$  karakteristika za sva tri položaja mjerenja. Crvenom bojom označene su vrijednosti za treći položaj lopatica. Iz grafa se može iščitati kako treći položaj (označen crvenom bojom) daje ujedno i maksimalnu vrijednost snage od sva tri položaja i iznosi 409 mW. Plavom bojom označen je prvi položaj lopatica, a zelenom bojom drugi položaj lopatica. Mjerenje se radilo i s manjim brojem lopatica, međutim mjerenje se nije moglo izvršiti jer je brzina vjetra bila premala kako bi pokrenila vjetroturbinu.





Slika 5.16  $P-U$  karakteristike sva tri položaja

U tablici (Tablica 5.3) ispisane su sve mjerene vrijednosti snage za sva tri položaja.

Tablica 5.3 Mjerene vrijednosti snage za sva tri položaja

Prvi položaj	Drugi položaj	Treći položaj
Snaga (mW)	Snaga (mW)	Snaga (mW)
0	0	0
17	13	25
44	29	60
56	36	75
81	51	100
94	58	116
111	67	121
131	78	156
152	85	181
146	95	221
171	99	232
187	118	275
207	130	297
216	128	320
238	141	341
241	124	337
237	131	351
214	146	409
187	110	360
118	77	157
36	37	1
0	2	

## 6. ZAKLJUČAK

Vjetar, kao obnovljiv izvor energije, ima ključnu ulogu u oblikovanju održive energetske budućnosti. Razmotrimo tehničke aspekte vjetra kao izvora energije. Vjetar je neiscrpan resurs koji kontinuirano nudi dostupnost energije, suprotno ograničenjima koja prate fosilna goriva. Dodatno, vjetar predstavlja čistu i ekološki prihvatljivu alternativu za proizvodnju električne energije. Vjetroelektrane pružaju pouzdan izvor energije koji se integrira u električnu mrežu i smanjuje ovisnost o fosilnim gorivima, pridonoseći tako globalnoj borbi protiv klimatskih promjena. U ovome radu detaljno se razmatra priroda vjetra kao izvora električne energije s fokusom na njegove karakteristike, nastanak, snagu i potencijal. Sustavski je opisana ruža vjetrova kako bi se bolje razlikovali vjetrovi u različitim geografskim područjima. Razumijevanje ovih varijacija ključno je za planiranje i postavljanje vjetroelektrana radi optimizacije njihove učinkovitosti. Poseban fokus stavljen je na proces pretvorbe energije vjetra u električnu energiju putem vjetroelektrana. Detaljno su opisani dijelovi male vjetroelektrane, s naglaskom na vjetroagregat koji sam po sebi predstavlja ključnu komponentu ovog procesa. Kategorizirane su različite vrste turbina vjetroagregata, s posebnim naglaskom na male vjetroturbine. Razumijevanje prednosti i nedostataka ovih turbina ključno je za njihovu praktičnu primjenu. Male vjetroturbine mogu biti ekonomičnije, ali imaju manju stabilnost pri niskim brzinama vjetra. S druge strane, turbine s više od tri lopatice pružaju veću učinkovitost, ali s povećanim troškovima proizvodnje i održavanja. Eksperimentalno su testirana svojstva lopatica, što omogućuje dublje razumijevanje performansi različitih vjetroturbina u stvarnosti i pruža analitičku osnovu za njihovu optimizaciju. Iako je pokušaj prikazivanja ovisnosti broja lopatica o proizvodnji električne energije ostao neriješen zbog izazova poput težine lopatica i niskih brzina vjetra, rješavanje ovog problema zahtijeva dodatne inženjerske analize. Rješenje ovog problema uključuje teorijsku analizu koja matematički opisuje vezu između broja lopatica i proizvodnje električne energije. Prilikom analize uzimaju se u obzir faktori kao što su brzina vjetra, površina lopatica, aerodinamika i učinak otpora. Nakon analize prikupljenih podataka, problem se rješava kroz kombinaciju teorije, prakse i kontinuiranog praćenja kako bi se postigla maksimalna učinkovitost. Iako teorijski nije moguće definirati "najbolji" broj lopatica, razumijevanje karakteristika vjetra i precizno inženjersko projektiranje vjetroagregata ključno je za maksimiziranje njihove učinkovitosti. U budućnosti, uloga vjetra kao obnovljivog izvora energije će značajno rasti uz podršku tehnološkog napretka i smanjenje troškova proizvodnje vjetroturbina. To će rezultirati većom dostupnošću održive energije i smanjenjem emisija

stakleničkih plinova, čime će vjetar zadržati svoju ključnu ulogu u stvaranju čiste i održive energetske budućnosti.

## Literatura

- [1] Abhishiktha Tummala, Ratna Kishore Velamati, Dipankur Kumar Sinha, V. Indrajaya, V. Hari Krishna, A review on small scale wind turbines. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015.
- [2] Singh RK, Ahmed MR. Blade design and performance testing of a small wind turbine rotor for low wind speed applications. Renew Energy 2013;50:812–9.
- [3] Hirahara H, Hossain MZ, Kawahashi M, Nonomura Y. Testing basic performance of a very small wind turbine designed for multi-purposes. Renew Energy 2005;30(8):1279–97.
- [4] Mohamed MH, Janiga G, Pap E, Thévenin D. Optimization of Savonius turbines using an obstacle shielding the returning blade. Renew Energy 2010;35 (11):2618–26.
- [5] Armstrong S, Fiedler A, Tullis S. Flow separation on a high Reynolds number, high solidity vertical axis wind turbine with straight and canted blades and canted blades with fences. Renew Energy 2012;41:13–22.
- [6] Technical Application Papers No.13, Wind power plants, poveznica na internetskoj stranici: <https://library.e.abb.com/public/92faf0c1913f5651c1257937002f88e8/1SDC007112G0201.pdf> (pristupila 27.3.2023.)
- [7] J. Abraham, B. Plorude, Small-Scale wind power: Design, Analysis, and Environmental Impacts, Momentum Press, LLC, 2014.
- [8] D. Topić, D. Šljivac, Obnovljivi izvori električne energije, Osijek: Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računalstva i informacijskih tehnologija Osijek, 2018.
- [9] Andreja Lucić, Energija vjetra, dostupno na internetskoj poveznici: <http://www.bioteka.hr> (pristupila 28.3.2023.)
- [10] Z. Kraus, Pokus 2., Pretvorba kinetičke energije vjetra u mehaničku i električnu energiju, Fakultet elektrotehnike, računalstva i informacijskih tehnologija Osijek
- [11] Danish wind industry association, poveznica na inernetskoj adresi: <http://xn--drmsttre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/en/tour/wres/rose.htm> (pristupila 5.4.2023.)
- [12] P. Jain, Wind Energy Engineering, McGraw Hill professional, 2010.

- [13] HEP, poveznica na internetskoj stranici: <https://www.hep.hr/projekti/obnovljivi-izvori-energije/vjetroelektrana-korlat/3468> (pristupila 1.7.2023.)
- [14] A. Hemami, Wind Turbine Technology, Cengage Learning, 2012.
- [15] R. Glogoški [Završni rad], Usporedba energetske performansi malih vjetroagregata, FERIT, 2022.
- [16] B. Klarin, Mogućnost primjene manjih vjetroturbina u proizvodnji energije na Hrvatskoj obali i otocima, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Splitu, poveznica na internetskoj adresi: [http://marjan.fesb.hr/~bklarin/Rad001/Mogucnosti\\_primjene\\_manjih\\_vjetroturbina\\_CLANAK.html](http://marjan.fesb.hr/~bklarin/Rad001/Mogucnosti_primjene_manjih_vjetroturbina_CLANAK.html) (pristupila 4.9.2023.)
- [17] V. Grokša [Završni rad], Konstrukcijsko rješenje vjetrotrubine, Međimursko veleučilište u Čakovcu, 2018.
- [18] Siegfried Heier, Grid integration of wind energy, Onshore and offshore conversion systems, 2014. , 3rd Edition, Wiley
- [19] L. Pavlica [Diplomski rad], Usporedba generatora u vjetroelektranama, FERIT, 2021.
- [20] EsperantoTv, Generator i motor, poveznica na internetskoj stranici: [www.hr.esperantotv.net/generator-i-motor-kako-se-razlikuju](http://www.hr.esperantotv.net/generator-i-motor-kako-se-razlikuju) (pristupila 20.6.2023.)
- [21] I. Mandić, V. Tomljenović, M. Pužar, Sinkroni i asinkroni električni strojevi, Zagreb: Tehničko veleučilište u Zagrebu, Elektrotehnički odjel, 2012.
- [22] Qdoc Synchronous Generator, poveznica na internetskoj stranici: <https://qdoc.tips/synchronous-generator-pdf-free.html> (pristupila 6.7.2023.)
- [23] N. Karadža, A. Bačan, L. Horvath, S. Knežević, Mali vjetroagregati i fotonaponski moduli za autonomne aplikacije na otocima Primorsko-goranske županije, EIHP, Zagreb, 2009.
- [24] S. Watson, D. Infield, M. Harding, Predicting the Performance of Small Wind Turbines in the Roof-Top Urban Environment, EWEC, Milano, 2007
- [25] HOPS, poveznica na internetskoj stranici: <https://www.hops.hr/izvjestaji-o-proizvodnji-ve-u-rh> (pristupila 4.7.2023.)
- [26] Veneko Zagreb, dostupno na internetskoj adresi: <http://www.veneko.hr/proizvodi-vjetroelektricni-agregati.html>, (pristupila 6.9.2023.)

## **Sažetak**

U ovom završnom radu opisan je nastanak električne energije putem energije vjetra, te važnost vjetra kao jednog od glavnih obnovljivih izvora energije. Razrađene su ključne stavke izrada lopatica koje služe za empirijsko testiranje. U prvome dijelu završnog rada opisan je vjetar, njegov nastanak, te prijenos energije vjetra u električnu energiju. U drugome dijelu završnog rada detaljnije su opisane vrste vjetroelektrana te prednosti i nedostaci istih. Ključni dio ovoga dijela je smišljanje i razrada plana dizajna maketa koje se koriste za daljnje testiranje i analizu rada. U zadnjem dijelu rada uspoređeni su dobiveni rezultati obzirom na utjecaj promjene kuta lopatica koji su mjereni pomoću programa Clean Trainer Energy te su prikazani grafički i tablično.

**Ključne riječi:** vjetar, vjetroturbina, vjetroelektrana, lopatice, energija vjetra

## **Abstract**

This thesis describes the generation of electrical energy through wind power and the importance of wind as one of the main renewable energy sources. The key points of blade production for empirical testing are elaborated upon. The first part of the thesis discusses wind, its formation, and the conversion of wind energy into electrical power. The second part of the thesis provides a detailed description of types of wind turbines and their advantages and disadvantages. The crucial aspect of this section involves the conception and development of model designs used for further testing and performance analysis. In the final section of the paper, the obtained results are compared regarding the impact of changing blade angles, which were measured using the Clean Trainer Energy program, and are presented graphically and in tabular form.

**Keywords:** wind, wind turbine, wind farm, blades, wind energy