

SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET
Preddiplomski stručni studij elektrotehnike

Završni rad

**IZVEDBA VJETROAGREGATA S VERTIKALNOM OSI
VRTNJE**

Rijeka, srpanj 2015.

Edi Mađar
0069056983

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski stručni studij elektrotehnike

Završni rad

**IZVEDBA VJETROAGREGATA S VERTIKALNOM OSI
VRTNJE**

Mentor: mr. sc. Marijana Živić Đurović, v. pred.

Rijeka, srpanj 2015.

Edi Mađar
0069056983

TEHNIČKI FAKULET

Povjerenstvo za završne ispite
preddiplomskog stručnog studija elektrotehnike
Br.: 602-04/15-14/03
Rijeka, 06.03.2015.

Z A D A T A K
za završni rad

Pristupnik: Edi Mađar

Matični broj: 0069056983
Lokalni matični broj: 12800003

Naziv zadatka: **IZVEDBA VJETROAGREGATA S VERTIKALNOM OSI VRTNJE**


Naziv zadatka na
engleskom jeziku: **CONSTRUCTION OF VERTICAL AXIS WIND TURBINES**

Sadržaj zadatka:

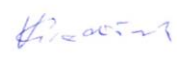
Podjela vjetroagregata prema principima iskorištavanja energije vjetra. Konstrukcijski oblici vjetroagregata. Vjetroagregati s vertikalnom osi vrtnje. Napraviti manji vjetroagregat s vertikalnom osi vrtnje te ispitati karakteristike (napon, snaga, brzina vrtnje) pri različitim brzinama vjetra i različitim lokacijama postavljanja vjetroagregata (naseljena mjesta (neboderi, kuće), nenaseljena mjesta).

Zadano: 17.03.2015.


Mentor:


V. pred. mr. sc. Marijana Živić-Đurović

Predsjednica Povjerenstva:


Izv. prof. dr. sc. Vera Gradišnik

Zadatak preuzeo dana: 17.03.2015.


(potpis pristupnika)

Dostaviti:

- Predsjednica Povjerenstva
- Mentor
- Djelovođa Povjerenstva
- Evidencija studija
- Pristupnik
- Arhiva Zavoda

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

IZJAVA

Sukladno članku 9. Pravilnika o završnom radu, završnom ispitu i završetku stručnih studija Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci od lipnja 2011. godine, izjavljujem da sam samostalno izradio završni rad pod naslovom „Izvedba vjetroagregata s vertikalnom osi vrtnje“, prema zadatku broj 602-04/15-14/03, uz konzultacije s mentorom mr. sc. Marijanom Živić Đurović, v. pred.

Rijeka, srpanj 2015.

Edi Mađar

0069056983



SADRŽAJ

1.	UVOD.....	1
2.	PODJELA VJETROAGREGATA PREMA PRINCIPIMA ISKORIŠTAVANJA VJETRA....	2
2.1.	Vjetroagregati na principu otpora.....	3
2.2.	Vjetroagregati na principu uzgona.....	4
3.	KONSTRUKCIJSKI OBLICI VJETROAGREGATA.....	6
3.1.	Vjetroagregati s horizontalnom osi vrtnje	6
3.1.1.	Broj lopatica.....	9
3.1.2.	Prednosti i nedostaci vjetroagregata s horizontalnom osi vrtnje.....	9
3.2.	Vjetroagregati s vertikalnom osi vrtnje	10
3.2.1.	Izvedbe vjetroagregata s vertikalnom osi vrtnje	10
3.2.1.1.	Darrieusova turbina	11
3.2.1.2.	Savoniusova trubina	13
3.2.2.	Prednosti i nedostaci vjetroagregata s vertikalnom osi vrtnje.....	15
4.	PRAKTIČNI DIO: IZRADA MALOG VJETROAGREGATA.....	16
4.1.	Planiranje i pripreme	16
4.2.	Korišteni materijali i alati	17
4.3.	Postupak izrade.....	18
4.3.1.	Izrada postolja i ostalih drvenih dijelova.....	18
4.3.2.	Izrada osovine	19
4.3.3.	Izrada statora i rotora	21
4.3.4.	Konstruiranje i ugradnja lopatica.....	26
4.3.5.	Izrada ispravljača	29
4.4.	Ispitivanje i analiza rezultata	30
5.	ZAKLJUČAK.....	38
6.	LITERATURA	39
7.	SAŽETAK	40

POPIS SLIKA:

Slika 2.1.: Promjena koeficijenta korisnosti s promjenom koeficijenta brzohodnosti.....	2
Slika 2.2.: Princip djelovanja otpora.....	3
Slika 2.3.: Princip djelovanja uzgona	4
Slika 2.4.: Dobivanje rotacijskog gibanja na principu uzgona	5
Slika 3.1.: Izvedba sa stupom iza lopatica i sa stupom ispred lopatica.....	7
Slika 3.2.: Glavni dijelovi vjetroagregata s horizontalnom osi vrtnje.....	8
Slika 3.3.: Izvedbe prema broju lopatica	9
Slika 3.4.: Darrieusova turbina s dvije lopatice	11
Slika 3.5.: Prikaz sila koje djeluju na turbinu	12
Slika 3.6.: Primjeri modela lopatica.....	13
Slika 3.7.: Klasična i moderna izvedba Savoniusove turbine	14
Slika 3.8.: Princip rada Savoniusove turbine	14
Slika 4.1.: Primjer Lenz2 vjetroagregata kućne izrade	16
Slika 4.2.: Nacrti drvenih dijelova	18
Slika 4.3.: Gotovi drveni dijelovi.....	19
Slika 4.4.: Osovina ugrađena u drveno postolje.....	20
Slika 4.5.: Drveni disk s nastavcima i kugličnim ležajem	21
Slika 4.6.: Improvizirani alat za namatanje.....	22
Slika 4.7.: Namatanje statora	23
Slika 4.8.: Gotovi statorski namoti	23
Slika 4.9.: Pravilno spajanje namota.....	24
Slika 4.10.: Stator na postolju	24
Slika 4.11.: Položaj i polovi magneti	25
Slika 4.12.: Rotor s neodimijskim magnetima.....	26
Slika 4.13.: Izrada kostura lopatice	26
Slika 4.14.: Kosturi lopatica	27
Slika 4.15.: Dovršene lopatice	27
Slika 4.16.: Nacrt dimenzija i pravilnog pozicioniranja lopatica.....	28

Slika 4.17.: Dovršeni model malog vjetroagregata.....	28
Slika 4.18.: Princip rada Grecovog spoja.....	29
Slika 4.19.: Ispravljač ugrađen na postolje	30
Slika 4.20.: Digitalni tahometar i anemometar	30
Slika 4.21.: Skupni prikaz svih rezultata	36
Slika 4.22.: Brzina vrtnje pri različitim brzinama vjetra.....	36
Slika 4.23.: Inducirani napon pri različitim brzinama vrtnje rotora.....	37
Slika 4.24.: Brzine vrtnje na dvije visine postavljanja vjetroagregata.....	37

POPIS TABLICA:

Tablica 4.1.: Rezultati prvog ispitivanja	31
Tablica 4.2.: Rezultati drugog ispitivanja	32
Tablica 4.3.: Rezultati trećeg ispitivanja.....	33
Tablica 4.4.: Rezultati četvrtog ispitivanja	34
Tablica 4.5.: Rezultati petog ispitivanja	35

1. UVOD

Svijest ljudi o potrebnim promjenama u načinu dobivanja energije u zadnje vrijeme sve se više budi. Električna energija je oblik energije bez kojeg je život u današnje teško i zamisliti, a problematična je njena proizvodnja. Proizvodnja je problem jer se najveći dio proizvedene električne energije dobiva korištenjem fosilnih goriva (termoelektrane) koja značajno zagađuju atmosferu, a osim toga fosilna goriva su ograničen resurs. Stoga se javlja potreba za novim, obnovljivim izvorima energije.

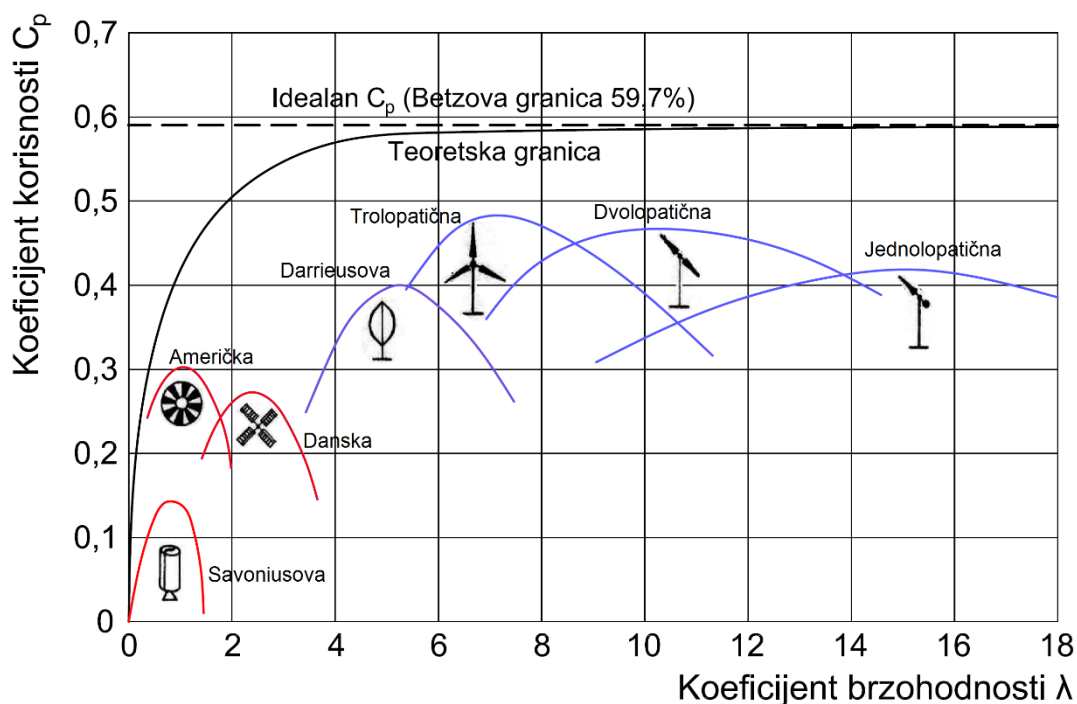
Energija vjetra je jedan oblik obnovljivog izvora energije koji se nalazi svuda oko nas i predstavlja veliki potencijal. Pretvorba energije vjetra u električnu energiju odvija se u vjetroelektranama. Vjetroelektrana predstavlja niz blisko smještenih vjetroagregata priključenih na elektroenergetski sustav. Vjetroagregati, odnosno vjetroagregati s vertikalnom osi vrtnje su i predmet istraživanja ovog završnog rada.

U drugom poglavlju prvo je navedena osnovna podjela vjetroagregata prema principima iskorištavanja vjetra. Zatim su navedeni načini iskorištavanja vjetra detaljnije opisani te međusobno uspoređeni. U trećem poglavlju opisani su mogući konstrukcijski oblici vjetroagregata, a zatim se svakoj izvedbi detaljnije opisao princip rada te odgovarajuće prednosti i mane. Četvrto poglavlje pokriva praktični dio ovog završnog rada, a to je izrada malog vjetroagregata s vertikalnom osi vrtnje. U tom poglavlju opisan je cjelokupni proces sve od planiranja do izrade, a na kraju i terenskog ispitivanja te analize dobivenih rezultata.

2. PODJELA VJETROAGREGATA PREMA PRINCIPIMA ISKORIŠTAVANJA VJETRA

Vjetroagregati se prema principima iskorištavanja vjetra u osnovi mogu podijeliti u dvije skupine. Tako imamo vjetroagregate koji rade na principu otpora (eng. drag devices) i vjetroagregate koji rade na principu uzgona (eng. lift devices), a neke izvedbe kombiniraju oba navedena principa.

Na slici 2.1. prikazana je ovisnost koeficijenta korisnosti o koeficijentu brzohodnosti pojedinih izvedbi vjetroagregata. Koeficijent brzohodnosti je omjer kutne brzine vrha rotora i brzine vjetra. Crvenom bojom označene su izvedbe koje rade temeljno na principu otpora, a plavom bojom koje rade na principu uzgona. Može se uočiti znatno veća učinkovitost vjetroagregata koji rade na principu uzgona.



Slika 2.1.: Promjena koeficijenta korisnosti s promjenom koeficijenta brzohodnosti

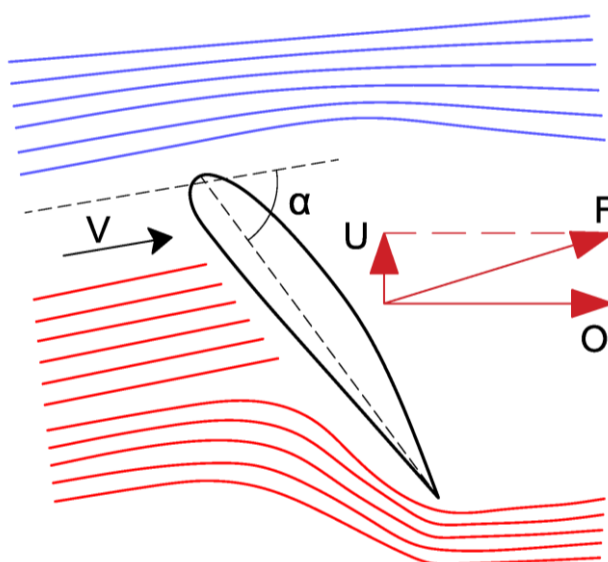
Na slici 2.1. spominje se i Betzova granica korisnosti od 59,7%. Ta granica dobivena je teorijom koja definira najveći mogući stupanj učinkovitosti vjetroagregata, a naziva se Betzov zakon. Njime se definira maksimalna energija koja se može dobiti od fluida (u ovom slučaju zraka) koji struji određenom brzinom kroz beskonačno tanki rotor.

2.1. Vjetroagregati na principu otpora

Najjednostavniji način iskorištavanja energije vjetra može se ostvariti po principu otpornog djelovanja.

Kada vjetar opstrujava lopatice vjetroagregata, na njih vrši silu. Ukupna sila se sastoji od dvije komponente, a otpor je sila paralelna sa smjerom udara vjetra u lopatice.

Princip rada se zasniva na djelovanju sila otpora na lopatice rotora pri čemu se ostvaruje njihovo gibanje. Svaka površina koja je prepreka vjetru pruža neki otpor. Ukoliko te prepreke, u ovom slučaju lopatice rotora, oblikujemo na način da jedna strana lopatice pruža manji otpor, a druga veći te ih pravilno usmjerimo prema vjetru dobije se rotacijsko gibanje rotora.



Slika 2.2.: Princip djelovanja otpora

gdje je:

V smjer puhanja vjetra,

α kut udara vjetra,

U sila uzgona,

O sila otpora,

F rezultatna sila.

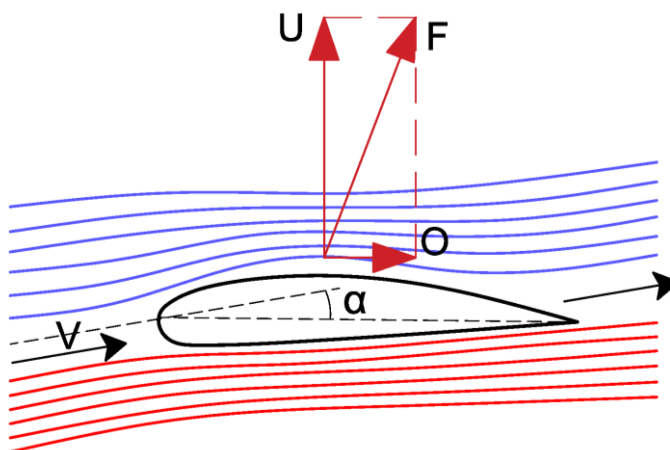
Vjetroagregati koji rade na principu otpora su niske učinkovitosti i danas se vrlo rijetko koriste kod većih izvedbi. No, zbog jednostavnije konstrukcije ova vrsta vjetroagregata se često koristi za male vjetroagregate kućne izrade.

2.2. Vjetroagregati na principu uzgona

Ukoliko je oblik lopatica takav da uspješno iskorištava silu aerodinamičkog uzgona, može se postići znatno veća učinkovitost no što je to slučaj kod vjetroagregata na principu otpora.

Kada vjetar opstrujava lopatice vjetroagregata, na njih vrši silu. Ukupna sila sastoji se od dvije komponente, a uzgon je komponenta okomita na smjer udara vjetra u lopatice.

Aerodinamički uzgon je sila koja nastaje uslijed gibanja tijela kroz zrak zbog razlike tlakova na površini tijela uzrokovane oblikom tijela i usmjerena je prema gore. Oblik tijela je takav da pruža vrlo mali otpor zraku zahvaljujući činjenici da ih strujnice obilaze uz najmanje moguće skretanje. Na slici 2.3. strujnice vjetra višeg tlaka prikazane su crvenom, a nižeg plavom bojom. Može se primijetiti i kut udara α koji mora biti malen kako bi se uspješno iskoristila sila uzgona.



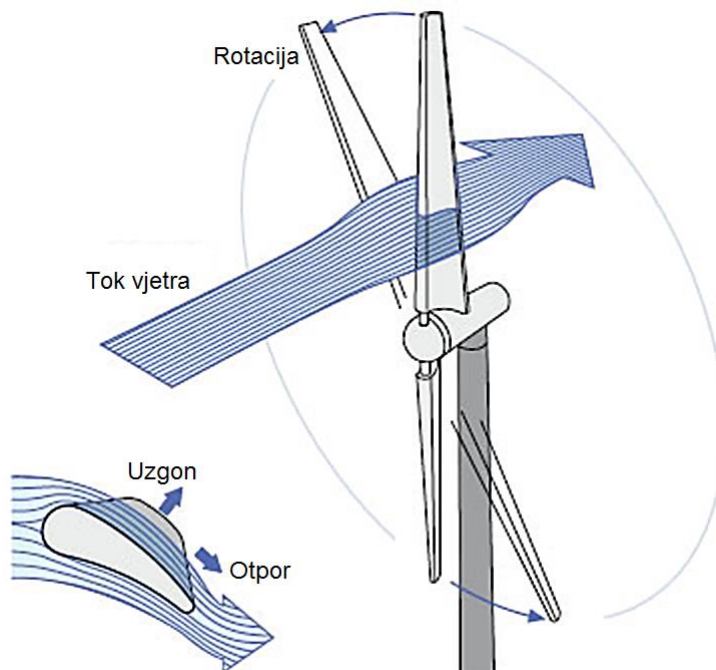
Slika 2.3.: Princip djelovanja uzgona

gdje je:

- V smjer puhanja vjetra,
- α kut udara vjetra,
- U sila uzgona,
- O sila otpora,
- F rezultatna (ukupna) sila.

Svi moderni vjetroagregati dizajnirani su da rade na principu sile uzgona. Vjetroagregati s horizontalnom osi vrtnje s rotorom u obliku propelera najbolje iskorištavaju ovaj princip. Neke vrste rotora kao što je Savoniusov mogu biti izvedene tako da rade čisto na principu otpora, a mogu i tako da dijelom koriste i uzgon kako bi se povećala učinkovitost.

Na slici 2.4. prikazan je princip dobivanja rotacijskog gibanja kod dvolopatičnog rotora vjetroagregata s horizontalnom osi vrtnje.



Slika 2.4.: Dobivanje rotacijskog gibanja na principu uzgona

3. KONSTRUKCIJSKI OBLICI VJETROAGREGATA

Vjetroagregati su rotacijski strojevi koji vrše pretvorbu kinetičke energije vjetra prvo u mehaničku, a zatim u električnu energiju. Kinetička energija vjetra okreće rotor vjetroagregata i na taj se način pretvara u mehaničku energiju. Mehanička energija se putem osovine prenosi s rotora na generator pomoću kojeg se pretvara u električnu energiju.

Prema konstrukciji razlikujemo dvije izvedbe vjetroagregata. Najčešće korištena izvedba su vjetroagregati s horizontalnom osi vrtnje kod kojih je os rotacije horizontalno postavljena. Druga manje poznata izvedba su vjetroagregati s vertikalnom osi vrtnje kod kojih je os rotacije vertikalno postavljena.

3.1. Vjetroagregati s horizontalnom osi vrtnje

Kod ovakve izvedbe rotor je zajedno s generatorom i ostalom opremom postavljen na vrhu tornja te mora biti usmjeren prema vjetru kako djelovao učinkovito. Mali vjetroagregati ovakve vrste za usmjeravanje koriste lopatice, dok veći uglavnom koriste senzor i elektromotor kako bi se odredio smjer strujanja vjetra te usmjerio rotor. Ovisno o tipu električnog generatora dodaje se i prijenos (multiplikator) kako bi se brzina vrtnje povećala ukoliko se rotor vrti presporo za proizvodnju električne energije.

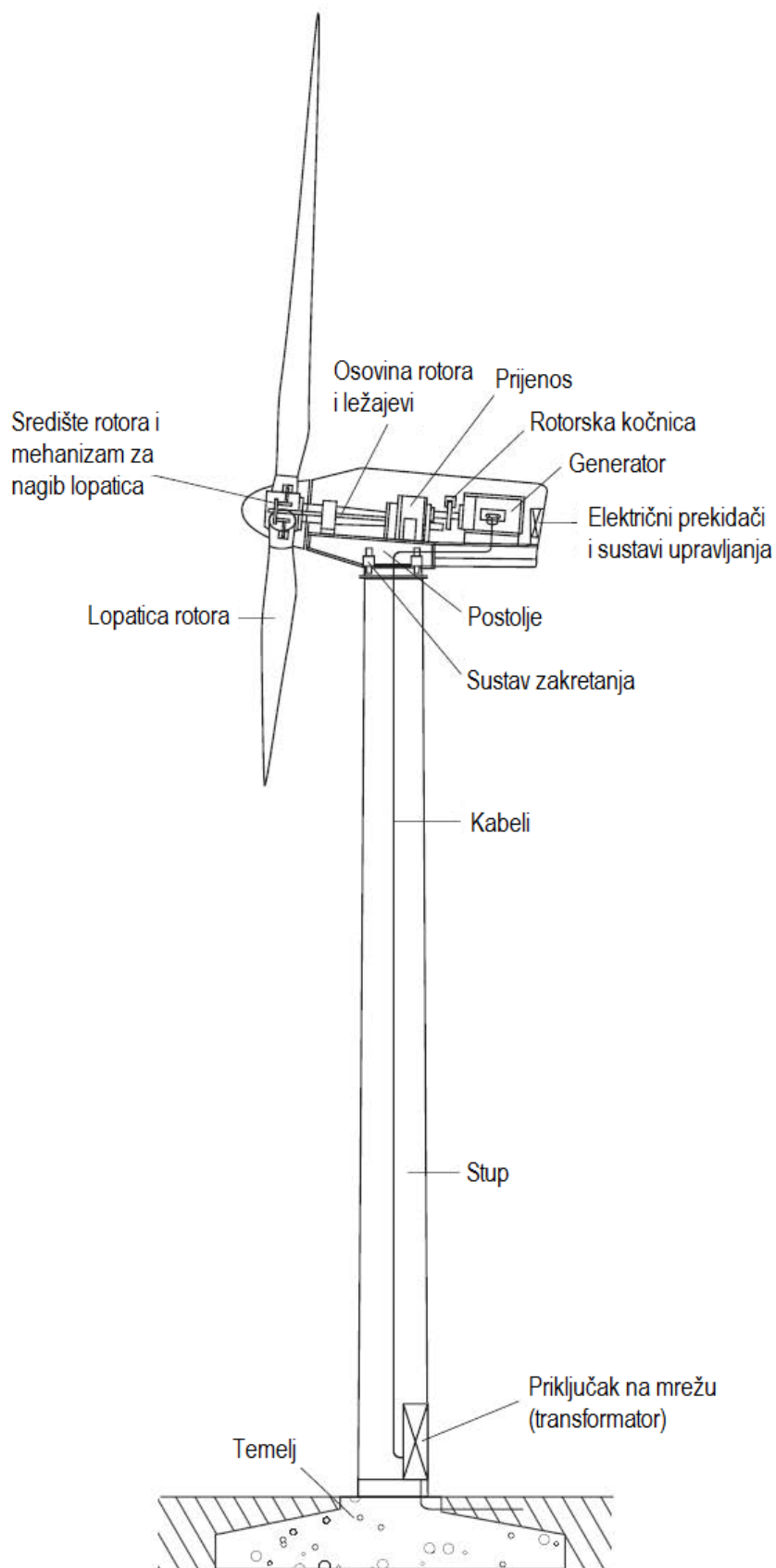
Rotor može biti postavljen ispred ili iza stupa kao što je prikazano na slici 3.1. [1]. No, pošto se zbog stupa stvaraju turbulencije u vjetru, najčešće je postavljen ispred. Lopatice rotora se postavljaju na popriličnoj udaljenosti od stupa te su izrađene da budu vrlo čvrste kako se pod udarima jakog vjetra ne bi savijale prema stupu. Ponekad se i malo dodatno nakose prema naprijed kako bi bile još izdržljivije.



Slika 3.1.: Izvedba sa stupom iza lopatica i sa stupom ispred lopatica

Iako se izvedba s rotorom postavljenim iza stupa rijetko koristi, ima nekoliko prednosti. Pošto su lopatice postavljene iza stupa, nema opasnosti da će one zbog savijanja doći u kontakt sa stupom te zbog toga ovakva izvedba može podnijeti jače udare vjetra. Druga prednost je samousmjeravanje rotora prema vjetru pa nema potrebe za mehanizmom za zakretanje. No, kod većih vjetroagregata ovo predstavlja problem zbog toga što se rotor može okrenuti mnogo puta u istom smjeru pa to stvara probleme s kabelima koji povezuju gornji dio vjetroagregata s tlom.

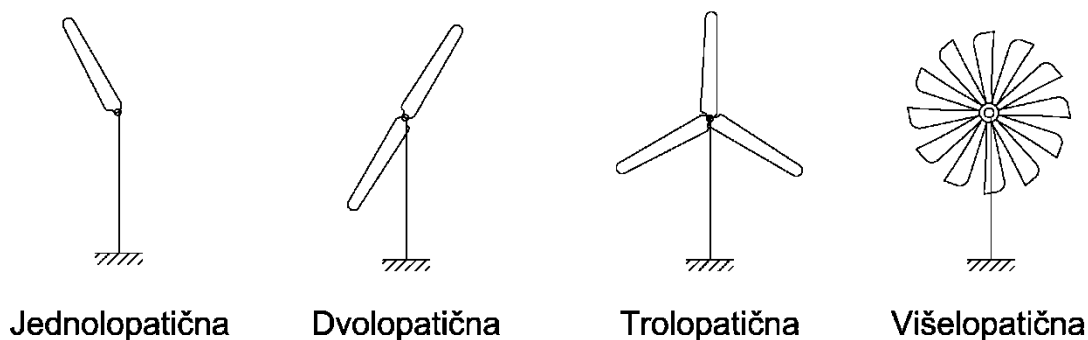
Osnovni dijelovi vjetroagregata s horizontalnom osi vrtnje prikazani su na slici 3.2. [1].



Slika 3.2.: Glavni dijelovi vjetroagregata s horizontalnom osi vrtnje

3.1.1. Broj lopatica

Izgled rotora ovakvih vjetroagregata temelji se na dizajnu propelera. Broj lopatica kod horizontalnih izvedbi vjetroagregata uvelike utječe na njihove karakteristike. Na slici 3.3. prikazano je nekoliko izvedbi s različitim brojem lopatica. Kao najučinkovitija pokazala se izvedba s tri lopatice te se ona najčešće i koristi.



Slika 3.3.: Izvedbe prema broju lopatica

Vjetroagregatima s dvije lopatice potrebna je veća brzina vrtnje kako bi se razvila jednaka količina energije kao kod izvedbe s tri lopatice. Zbog povećanja brzine vrtnje povećava se i buka pa je ovakva izvedba manje popularna. Postoje i vjetroagregati s jednom lopaticom, ali takva se izvedba nije pokazala kao dobra zbog dodatnog povećanja brzine, a time i buke, za jednaku količinu energije.

Rotori s većim brojem lopatica najčešće se koriste na farmama kao pogon pumpi za vodu, a zbog male brzine vrtnje imaju i malu učinkovitost. Primjeri takvih rotora su „američke“ s velikim brojem lopatica ili poznate „danske“ vjetrenjače s četiri velike lopatice. Zbog male učinkovitosti i brzine vrtnje vrlo rijetko se upotrebljavaju kao vjetroagregati.

3.1.2. Prednosti i nedostaci vjetroagregata s horizontalnom osi vrtnje

Najveća prednost vjetroagregata s horizontalnom osi vrtnje jest njihova visoka učinkovitost u proizvodnji električne energije i to naročito izvedbe s trolopatičnim rotorom. Imaju mogućnost iskorištavanja većih brzina vjetra pošto su postavljeni na stupovima velike visine. Iako se moraju manualno usmjeravati prema vjetru, to daje veću kontrolu i mogućnost maksimalnog

iskorištavanja energije vjetra. U slučaju olujnog vjetra imaju mogućnost fiksacije lopatica kako bi se spriječila odnosno umanjila potencijalna šteta.

Iako se zbog svojih dobrih karakteristika najčešće koriste, vjetroagregati s horizontalnom osi vrtnje imaju određene nedostatke. Visoka cijena im je glavni nedostatak. Zbog veličine tornja i lopatica sami transportni troškovi jednog većeg vjetroagregata mogu iznositi i do 20% ukupnih troškova opreme. Problematične su za postavljanje zbog potrebe vrlo visokih i skupih dizalica. Potreba sustava za zakretanje rotora još dodatno poskupljuje izvedbu. Imaju problema kod rada na malim nadmorskim visinama gdje su vjetrovi često turbulentni. Generator s ostalom opremom smješten je na vrhu tornja čime je otežan pristup i održavanje.

Iako ih karakteriziraju visoki troškovi, njihova visoka učinkovitost i ostale prednosti su razlog zbog kojeg se najčešće koriste za proizvodnju električne energije.

3.2. Vjetroagregati s vertikalnom osi vrtnje

Glavna značajka ovakve izvedbe je vertikalno postavljena os vrtnje. Pošto je rotor postavljen vertikalno nema potrebe za njegovim usmjeravanjem prema vjetru jer iz kojeg god da smjera vjetar puše, vjetroagregat je jednako učinkovit. To je posebno korisno na lokacijama gdje je smjer puhanja vjetra promjenjiv. Navedena značajka je i najveća prednost ovakve izvedbe vjetroagregata.

Vjetroagregati s vertikalnom osi vrtnje nemaju potrebe za visokim stupom te se postavljaju bliže tlu zbog čega im je jednostavnije održavanje. Također, generator i ostala oprema mogu biti smješteni u podnožju čime je toranj manje opterećen. Negativna strana nižeg postavljanja je ta da su brzine vjetra na nižoj visini manje, a javljaju se i turbulencije pogotovo ako u okolici vjetroagregata postoje drugi objekti. Turbulencije uzrokuju niz problema kao što su pojava vibracija i brže trošenje ležajeva.

3.2.1. Izvedbe vjetroagregata s vertikalnom osi vrtnje

Postoji niz različitih konstrukcijskih izvedba ovakvih vjetroagregata. Međutim, najčešće korištene izvedbe su Darrieusove i Savoniusove turbine, a zadnje vrijeme sve češće se javljaju i novi koncepti vertikalnih vjetroagregata.

3.2.1.1. Darrieusova turbina

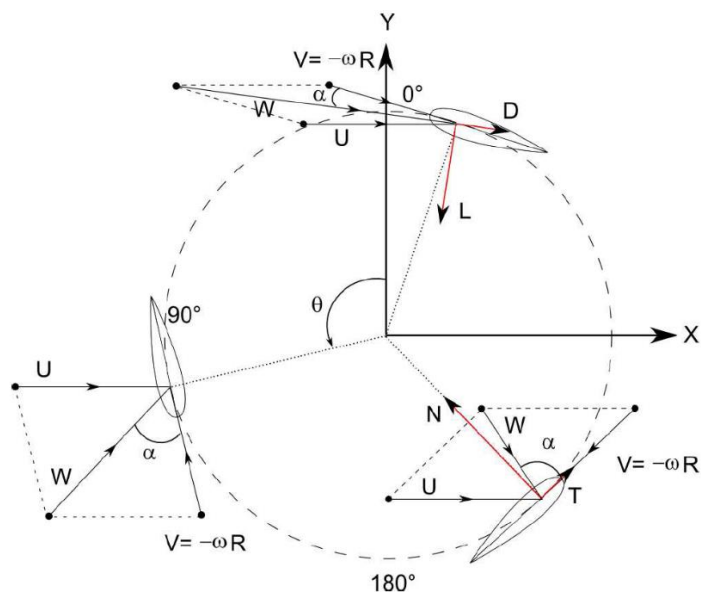
Darrieusovu turbinu patentirao je francuski inženjer Georges Jean Marie Darrieus 1931. godine. Ova izvedba jedna je od najčešće korištenih izvedbi vjetroagregata s vertikalnom osi vrtnje, a ona je i početna točka daljnjih istraživanja ove vrste vjetroagregata. Konstrukcija lopatica je u obliku grčkog slova Φ , s najčešće dvije ili ponekad tri lopatice. Karakteristična izvedba Darrieusove turbine prikazana je na slici 3.4.



Slika 3.4.: Darrieusova turbina s dvije lopatice

Jedan problem ovakvog dizajna je ta da se kut napada vjetra mijenja kako se rotor okreće pa svaka lopatica razvija najveći moment u dvije točke tokom jednog ciklusa. Ovo dovodi do sinusne promjene razvijene snage koja komplicira izvedbu.

Drugi problem stvara se zbog toga što je veći dio mase rotora smješten u periferiji, a ne u središtu kao što je to slučaj kod vjetroagregata s horizontalnom osi vrtnje što dovodi do vrlo velikog centrifugalnog stresa na cijeli mehanizam. Prikaz sila koje je javljaju na lopaticama rotora prikazane su na slici 3.5.



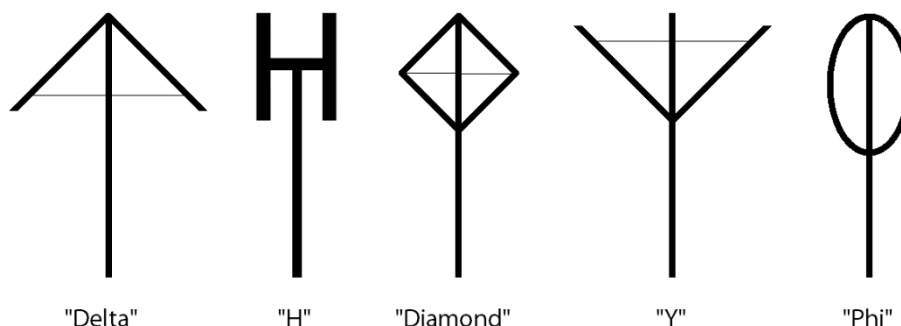
Slika 3.5.: Prikaz sila koje djeluju na turbinu

gdje je:

- α kut između rezultatnog vektora brzine i vektora brzine lopatice,
- θ kut između lopatica,
- U vektor brzine vjetra,
- V vektor brzine lopatice,
- W rezultatni vektor brzine,
- D vektor otpora zraka,
- L vektor uzgona,
- N normalna komponenta,
- T tangencijalna komponenta.

Lopatice Darrieusove turbine mogu biti izvedene na način da su spiralno zakrenute po duljini. Na taj način vjetar na obje strane lopatice ima dobar napadni kut bez obzira na njen položaj. Ova izvedba ima mnogo prednosti nad klasičnom kao što je ujednačavanje momenta tijekom okreta, a time i uklanjanje pulsacija. Imaju manje opterećenje na ležajeve što im produžuje vijek trajanja. Vjetroagregati sa spiralno zakrenutim lopicama često se postavljaju na krovove objekata jer im turbulentne struje koje se tamo javljaju ne predstavljaju problem.

Postoje i razne druge varijacije koje se temelje na konceptu Darrieusove turbine, a razlikuju se u načinu konstrukcije i postavljanja lopatica. Svi prikazani modeli sa slike 3.6. temelje se na sličnom principu rada kao Darrieusova turbina, a svaka izvedba ima svoje prednosti i mane.



Slika 3.6.: Primjeri modela lopatica

Među poznatijim izvedbama je H-tip kod kojega su lopatice postavljene paralelno s osi vrtnje pa izgledom podsjeća na slovo H. Ova je izvedba nešto jednostavnija od klasične Darrieusove turbine, ali joj lopatice moraju biti čvršće konstrukcije. H-tip vjetoagregata može biti izveden i na način da lopatice imaju sustav zakretanja. Time se omogućava zakretanje lopatica kako bi se povećala učinkovitost vjetoagregata. Nedostatak ovakvih vjetoagregata je kompliciranija izvedba i veća cijena.

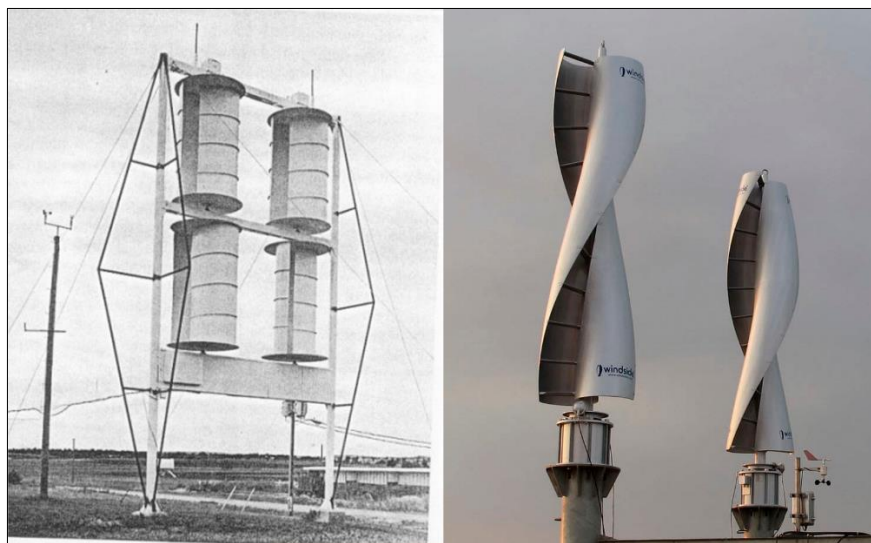
Darrieusova turbina može biti postavljena i u horizontalan položaj čime se smanjuje opterećenje ležajeva, no zbog nemogućnosti iskorištavanja vjetra iz svih smjerova spektar njihove primjene je manji.

3.2.1.2. Savoniusova turbina

Savoniusovu turbinu razvio je finski inženjer S. J. Savonius 1922. godine. Postoji mnogo raznih izvedbi ove vrste turbine, a u najjednostavnijoj se izvedbi sastoji od dvije polovice bubnja ili čašica učvršćenih u suprotnim smjerovima na središnju osovinu. Gledajući presjek odozgo, turbina ima oblik slova „S“.

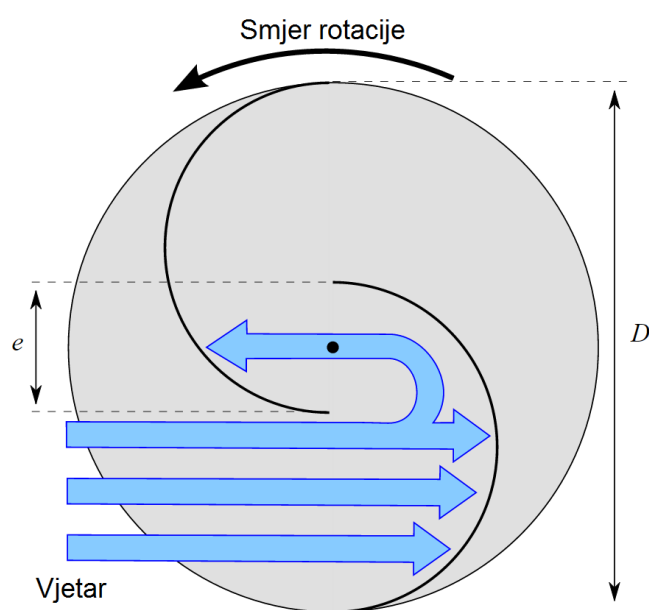
Moderne Savoniusove turbine razvile su se u naprednije izvedbe kod kojih su spiralno zakrenute lopatice po duljini. Kod takvih turbina dijelom se iskorištava i uzgon čime se povećala

učinkovitost te smanjile vibracije. Usporedba izgleda klasične i spiralne izvedbe Savoniusove turbine prikazana je na slici 3.7.



Slika 3.7.: Klasična i moderna izvedba Savoniusove turbine

Savoniusova turbina radi na principu potisne sile. Gledajući turbinu iz smjera puhanja vjetra jedna lopatica je ispupčena dok je druga ulegnuta. Zbog toga je potisak uvijek jači u ulegnutoj lopatici i na taj način dolazi do rotacije kao što je prikazano na slici 3.8. Ovakvi vjetroagregati imaju puno manji učinak nego vjetroagregati čiji se rad temelji na sili uzgona.



Slika 3.8.: Princip rada Savoniusove turbine

gdje je:

D promjer rotora,

e širina otvora.

Ova vrsta turbine se koristi kada je cijena i pouzdanost bitnija od učinkovitosti kao što je to slučaj kod instrumenata za mjerenje brzine vjetra (anemometri), a koriste se i za pogon pumpi za vodu ili manjih generatora.

3.2.2. Prednosti i nedostaci vjetroagregata s vertikalnom osi vrtnje

Glavna prednost vjetroagregata s vertikalnom osi vrtnje je mogućnost iskorištavanja vjetra iz svakog smjera bez potrebe zakretanja. Zbog toga turbulencije vjetra ne predstavljaju veliki problem pa su pogodne i za postavljanje na urbane lokacije kao što je na primjer krov građevine. Pogodni su za korištenje na lokacijama gdje je brzina vjetra velika na maloj visini kao što su klisure, udoline i razni prolazi. Općenito su jeftinije izvedbe pošto nemaju potrebe za sustavom zakretanja niti im je potreban visoki toranj. Jednostavniji su za održavanje jer je velika većina dijelova smještena blizu tla.

Veliki nedostatak im je upola manja učinkovitost od vjetroagregata s horizontalnom osi vrtnje. Smanjenje učinkovitosti većinom je uzrokovano dodatnim otporom koji nastupa zbog lopatica koje se rotiraju u vjetar. Većina vjetroagregata vertikalne izvedbe ima problem s malim početnim okretnim momentom pa su im potrebni vanjski izvori energije kako bi započeli okretanje. Također, moraju biti postavljeni na relativno ravno tlo, tako da su im strmije lokacije na koje se obično postavljaju vjetroagregati s horizontalnom osi vrtnje većinom nedostupne.

Vjetroagregati s vertikalnom osi vrtnje najpogodniji su za lokacije gdje horizontalne izvedbe nisu učinkovite kao što su područja gdje postoji velika brzina vjetra na manjoj visini ili mjesta na kojima postoje turbulencije u vjetru kao što su urbana područja.

4. PRAKTIČNI DIO: IZRADA MALOG VJETROAGREGATA

Praktični dio ovog završnog rada sastoji se od izrade modela malog vjetroagregata s vertikalnog osi vrtnje. U ovom poglavlju opisati će se cjelokupni proces izrade od planiranja i potrebnog materijala do terenskog ispitivanja vjetroagregata i analize dobivenih rezultata.

4.1. Planiranje i pripreme

Prije no što se krenulo u samu izradu vjetroagregata, bilo je potrebno dobro razmisliti i napraviti kvalitetan plan toka izrade. Prije svega bilo je potrebno ideju prenijeti na papir. Pretraživanjem interneta i crtanjem grubih skica raznih modela vjetroagregata odlučilo se kako će otprilike izgledati i funkcionirati vjetroagregat. U ovoj fazi odlučilo se da će se konstrukcija temeljiti na Darrieusovoj turbini i to na „H“ modelu.

Daljnijim pretraživanjem interneta naišlo se na izvedbu koja je jednostavna i vrlo dobrih karakteristika te je odlučeno da će se izraditi takav vjetroagregat. Spomenuta izvedba je takozvani Lenz2 model vjetroagregata prikazan na slici 4.1. [5]. Značajka ove izvedbe jest jednostavnost te kombinacija iskorištavanja otpora i uzgona na temelju čega ostvaruje visoku učinkovitost.



Slika 4.1.: Primjer Lenz2 vjetroagregata kućne izrade

Lenz2 model pripada čovjeku po imenu Ed Lenz koji ga je razvio na temelju vlastitih opsežnih istraživanja vjetroagregata s vertikalnom osi vrtnje. Zbog izuzetno dobrih karakteristika, ovaj je model vrlo popularan kod malih vjetroagregata kućne izrade.

4.2. Korišteni materijali i alati

U izradi ovog vjetroagregata korišten je velik broj raznih materijala i alata kako bi rezultat bio što bolji. U nastavku su navedeni svi korišteni materijali i alati.

Korišteni materijali:

- Drvo bukve i drvena ploča
- Drvene letvice
- Aluminijski profil – ravni 30x2 mm
- Pocinčana željezna (FeZn) navojna šipka M10x1000 mm
- Radijalni kuglični ležajevi – unutarnji i vanjski promjer: 10 i 30 mm
- Neodimijski magneti – dimenzije: 5x20 mm i 5x30 mm
- Bakrena lakirana žica – promjer: 0.5 mm
- Lemna žica
- Dvokomponentni epoksid „Bison“
- Super ljepilo „Pattex“
- Kontaktno ljepilo „Neostik Universal“
- Ljepljiva traka
- Plastična folija – debljina 1 mm
- Razni vijci, čavli, matice i šajbe
- Diode 1N4007
- Tiskana pločica
- Redne stezaljke

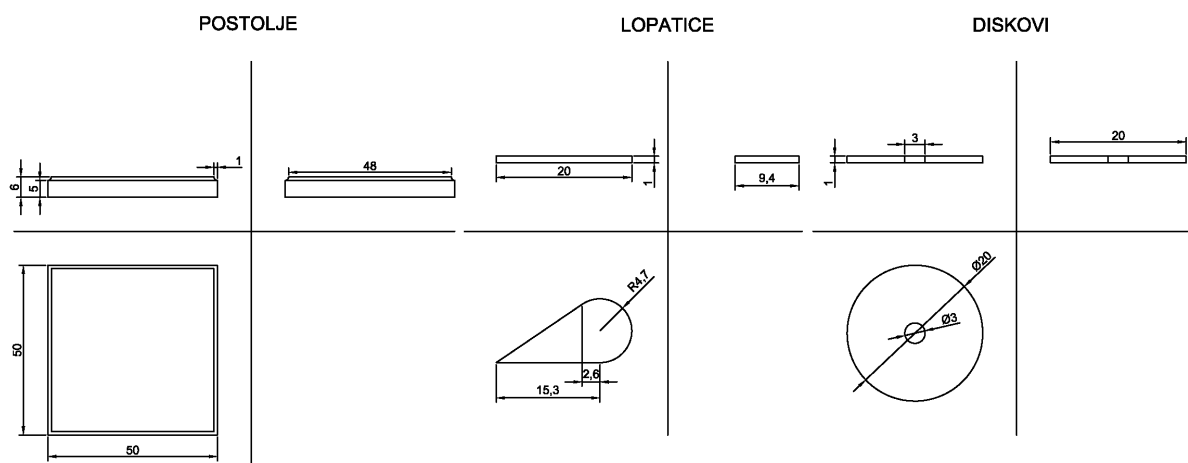
Korišteni alati:

- Lemilica
- CNC stroj za obradu drva
- Pištolj za vruće ljepljenje
- Brusilica
- Bušilica
- Odvijači
- Čekić
- Pila
- Kliješta

4.3. Postupak izrade

4.3.1. Izrada postolja i ostalih drvenih dijelova

Svi drveni dijelovi izrađeni su CNC strojem za obradu drva. Prvo su se izradili nacrti u mjerilu i s označenim dimenzijama u programu AutoCAD 2015. Nacrti prikazani na slici 4.2. su se isprintali i koristili kao referenca u daljnjoj obradi. Zatim su se u programu prilagodili za CNC stroj na način da su se izbrisale sve oznake dimenzija te linije koje nisu linije rezanja. Nacrti su se spremili u .dxf formatu i kasnije koristili za navođenje stroja kod rezanja drva.



Slika 4.2.: Nacrti drvenih dijelova

Za postolje je korištena bukva zbog svoje težine i tvrdoće, dok se za diskove i predloške lopatica koristila vodootporna drvena ploča. Nakon što je stroj obradio drvo dobiveni su drveni dijelovi potrebni za izradu vjetroagregata prikazani na slici 4.3.



Slika 4.3.: Gotovi drveni dijelovi

4.3.2. Izrada osovine

Za osovinu korištena je FeZn navojna šipka M10x1000 mm. Oznaka M10x1000 mm označava promjer od 10 mm i duljinu od 1 m. Odabrana je navojna šipka zbog toga što je vrlo čvrsta i što se pomoću šajbi i matica može bilo što vrlo lako učvrstiti na osovinu.

Šipku je prvo trebalo što bolje učvrstiti u drveno postolje. Prvo se u središtu postolja bušilicom i odgovarajućim svrdlom izbušila rupa dubine 4 cm te debljine iste kao promjer šipke. Prilikom bušenja rupe trebalo je bušiti vrlo oprezno kako bi rupa bila izbušena pod kutom od 90° u odnosu na postolje što je vrlo teško bez stolne bušilice.

Nakon što se izradila osovina, učvrstila se u postolje na način da se prvo u rupu stavilo epoksida, a zatim se navojna šipka zavidala u izbušenu rupu. Gotova osovina s postoljem prikazana je na slici 4.4.



Slika 4.4.: Osovina ugrađena u drveno postolje

Nakon izrade same osovine potrebno je izraditi element kojim će se lopatice spojiti s osovinom. Za to će se iskoristiti prethodno izrađeni drveni diskovi, radijalni kuglični ležajevi i ravni aluminijski profil.

Prvo je potrebno ugraditi kuglične ležajeve u drvene diskove. Kod izrade drvenih diskova već se unaprijed izbušile rupe promjera 3 cm u sredini u koju će se ugraditi ležajevi. Na rubove rupa drvenih diskova nanesen je sloj epoksida, a zatim su umetnuti i ležajevi te se pustilo 12 sati kako bi se epoksid učvrstio.

Nakon ugrađenih ležajeva, potrebno na diskove je potrebno dodati nastavke na koje će se spojiti lopatice. Za te nastavke odabran je ravni aluminijski profil koji je vrlo lagan, a istovremeno i čvrst. Prvo je potrebno od dva metra dugačkog aluminijskog profila izrezati šest komada duljine 25 cm. Zatim su se u izrezanim komadima izbušile rupe kojima će se učvrstiti na disk i lopatice. Za to je korištena bušilica i odgovarajuće svrdlo za bušenje metala.

Nakon izbušenih rupa u aluminijskim profilima, izbušile su se rupe i na drvenim diskovima na način da se na svaki disk urade po tri nastavka međusobno zamaknuta za 120° . Na kraju su se vijcima i maticama ugradili aluminijski profili što je prikazano na slici 4.5.



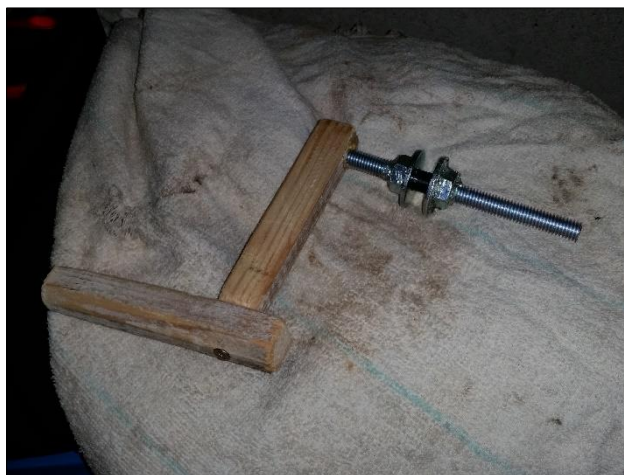
Slika 4.5.: Drveni disk s nastavcima i kugličnim ležajem

4.3.3. Izrada statora i rotora

Kako bi se izradio stator prvo je bilo potrebno namotati lakiranu bakrenu žicu u namote u kojima će se inducirati napon. Namoti moraju biti namotani što kompaktnije i svi moraju biti jednake širine kako bi se mogli postaviti što bliže magnetima rotora.

Stator se namatao od bakrene žice debljine 0.5 mm sa slojem izolacijskog laka. Sastoji se od osam namota bakrene žice od kojih je svaki unutarnjeg promjera 10 mm, vanjskog promjera 30 mm te debljine 12 mm. Svaki namot ima otprilike 400 zavoja.

Za svrhu namatanja žice izradio se improvizirani alat kojim će namatanje biti jednostavnije, preciznije i brže. Improvizirani alat izradio se na način da se prvo izrezao komad navojne šipke duljine 10 cm koji će poslužiti kao malena osovina. Od komada drvene letvice izrađena je ručka u koju se učvrstila navojna šipka. Spoj šipke i drvene ručke dodatno se ojačao pomoću pištolja za vruće lijepljenje. Kako bi se osovina na kojoj će se namatati što lakše okretala, u škrip je učvršćen jedan kuglični ležaj na kojeg se maticama kasnije stegne navojna šipka. Na kraju je izrađen i kalup u kojem će se namatati žica od dvije matice i dvije široke šajbe. Na slici 4.6. prikazan je alat s kalupom.



Slika 4.6.: Improvizirani alat za namatanje

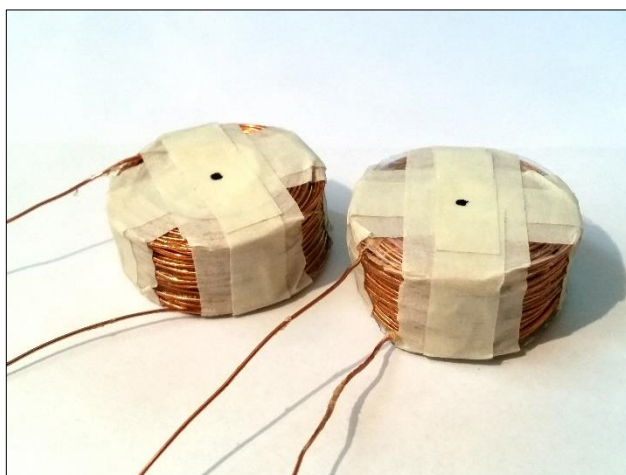
S izrađenim alatom, moglo se započeti s namatanjem. Prvo se jedan dio kalupa zavidao i trajno učvrstio na osovinu pomoću pištolja za vruće lijepljenje. Zatim se ubacio umetak u obliku cjevčice izrađene od papira i ljepljive trake oko kojeg će se namatati žica. Na kraju se zavidao i drugi dio kalupa te se šublerom osiguralo da širina između dva dijela kalupa bude točno 12 mm. Također, između ruba kalupa i prostora gdje će se namatati žica umetnuo se komad plastične folije koja će osigurati da se namoti ne zalijepe za kalup i da se pri vađenju namota iz kalupa on ne raspadne.

Prije samog početka namatanja, pustilo se oko 10 cm nenamotane žice koja će biti jedan kraj namota. Namatanje je ispalo mnogo teže od očekivanog. Prva dva pokušaja namatanja bila su bezuspješna jer se za lijepljenje koristilo super ljepilo radi kojeg bi na kraju namot bilo vrlo teško odvojiti od kalupa te se raspadao. Nakon dva neuspješna pokušaja odlučilo se za promjenu vrste ljepila s manje agresivnim i elastičnijim univerzalnim ljepilom. Namatalo se sporo i oprezno, a ljepilo se kapnulo svakih tridesetak namotanih zavoja. Kada se namotala odgovarajuća debljina također se ostavilo oko 20 cm žice viška kao drugi kraj namota. Na kraju se sve još jednom premazalo ljepilom i pustilo nekoliko sati da se osuši. Proces namatanja prikazan je na slici 4.7.



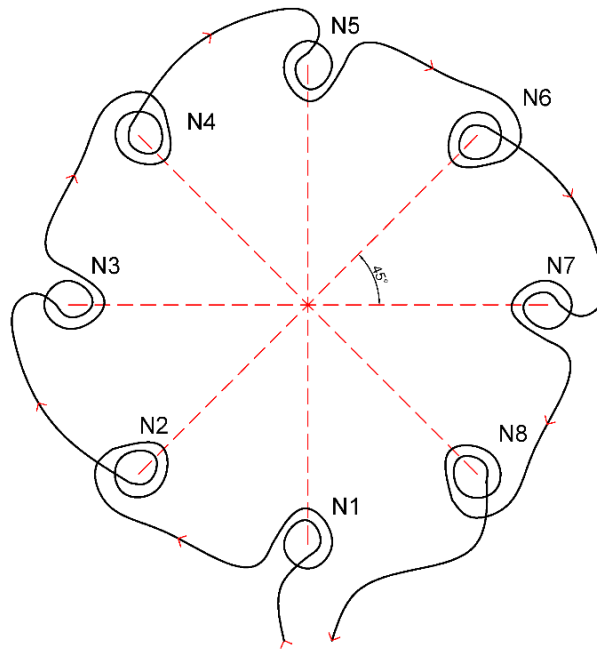
Slika 4.7.: Namatanje statora

Nakon što se ljepilo osušilo namot se oprezno izvadio iz kalupa i na kraju oblijepio ljepljivom trakom radi dodatne čvrstoće. Na prethodno opisan način namotalo se svih osam namota. Primjer dva gotova namota prikazan je na slici 4.8. Zbog dugog trajanja namatanja i sušenja te potrebnom oprezu pri namatanju, izrada statora bila je jedan od većih izazova u izradi vjetroagregata.



Slika 4.8.: Gotovi statorski namoti

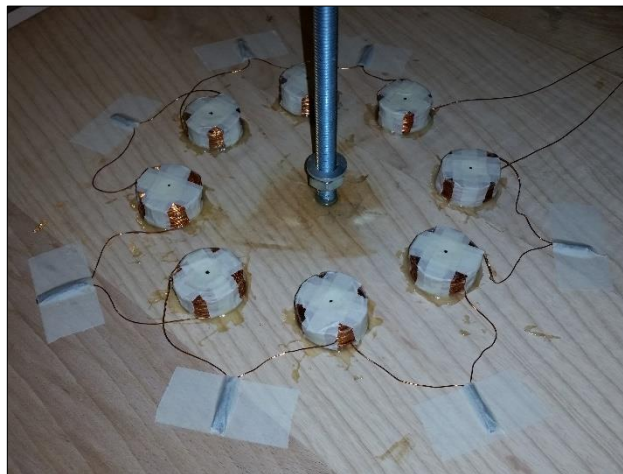
Namotane statorske namote potrebno je postaviti na drveno postolje i odgovarajuće međusobno spojiti kako bi se pravilno inducirano napon. Slikoviti prikaz načina spajanja namota prikazan je na slici 4.9.



Slika 4.9.: Pravilno spajanje namota

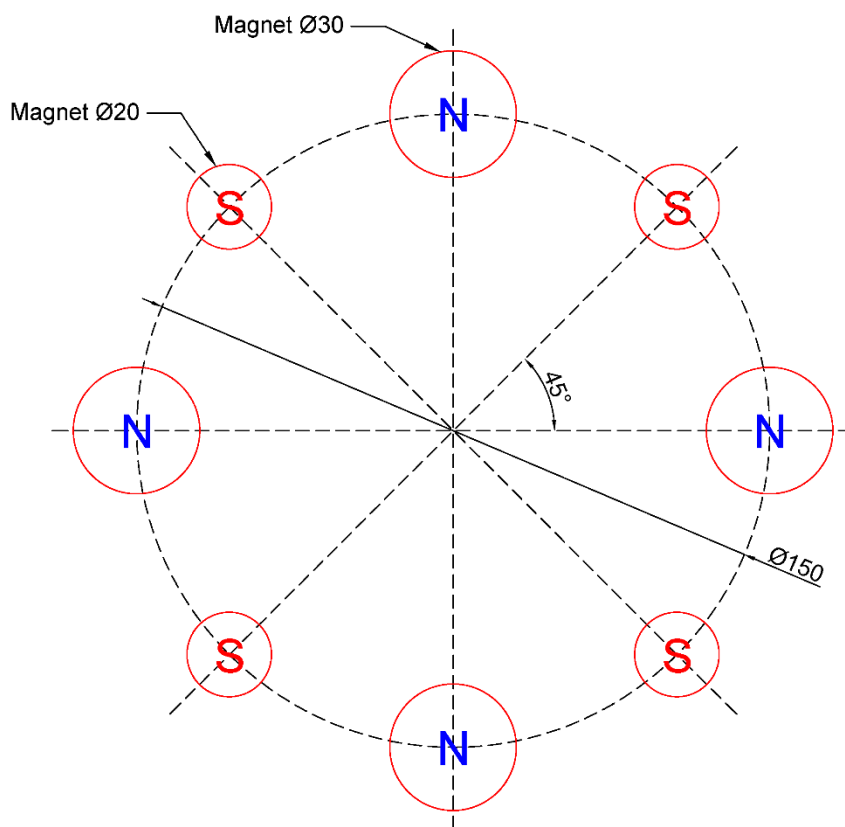
Prvo se s krajeva namota brusnim papirom skinuo sloj izolacijskog laka, a zatim su se za probu krajevi samo zamotali jedan s drugim. Nakon što su se odgovarajuće spojili na osovinu se probno postavio rotor s magnetima, a dva kraja statorskih namota spojili su se na multimeter koji se namjestio na mjerenje izmjeničnog napona. Rotor se rukom brzo zavrteo, a na zaslonu multimetra prikazala se vrijednost koja je varirala, ali se kretala od vrijednosti 3 V ka nižoj što je pokazuje da je stator ispravno spojen.

Nakon probe krajevi svakog namota su se trajno zalemili i oblijepili izolacijskom trakom, a namoti su se epoksidom trajno zalijepili za postolje. Dovršeni stator prikazan je na slici 4.10.



Slika 4.10.: Stator na postolju

Za izradu rotora upotrijebili su se neodimijski (NdFeB) magneti, najsnažnija vrsta permanentnih magneta. Kod rada s ovom vrstom magneta potrebno je biti vrlo oprezan jer su toliko snažni da mogu nanjeti i manje ozljede. Izrada rotora je jednostavnija od statora jer se magneti samo treba pravilno rasporediti i zalijepiti na način koji je prikazan na slici 4.11.



Slika 4.11.: Položaj i polovi magneta

Magneti se postavljaju na jedan od prethodno izrađenih drvenih diskova s aluminijskim nastavcima. Međutim, ni postavljanje magneta nije prošlo bez poteškoća. Problem bio je snažno međudjelovanje magneta jer su magneti postavljeni relativno blizu jedni drugima. Kod prvog pokušaja postavljanja koristio se epoksid koji je vrlo snažan ali sušenje traje do 12 sati i zbog toga su me magneti kod lijepljenja pomicali jedni od drugih. Nakon neuspjelog pokušaja odlučilo se za korištenje super ljepila koje počne djelovati već nakon nekoliko sekundi.

Novo rješenje pokazalo se mnogo bolje od prvog i na taj način su se magneti s lakoćom učvrstili na disk. Nakon što su se magneti super ljepilom zalijepili na drveni disk, dodatno su se učvrstili dodavanjem epoksida oko rubova. Dovršeni rotor prikazan je na slici 4.12.



Slika 4.12.: Rotor s neodimijskim magnetima

4.3.4. Konstruiranje i ugradnja lopatica

Prethodno izrađeni drveni predlošci za lopatice sada se koriste kako bi se izradio kostur lopatica. Za izradu kostura koriste se tri predloška po lopatici na način da se međusobno spoje letvicama kao što je prikazano na slici 4.13. Optimalna visina lopatica dobije se na način da se promjer rotora pomnoži s koeficijentom 1,4 i na taj se način u ovom slučaju dobije visina 70 cm.



Slika 4.13.: Izrada kostura lopatice

Kostur mora biti čvrst i stabilan kako bi lopatice mogle podnijeti jače udare vjetra, a srednji predložak znatno povećava čvrstoću konstrukcije. Na slici 4.14. prikazani su završeni kosturi svih triju lopatica.



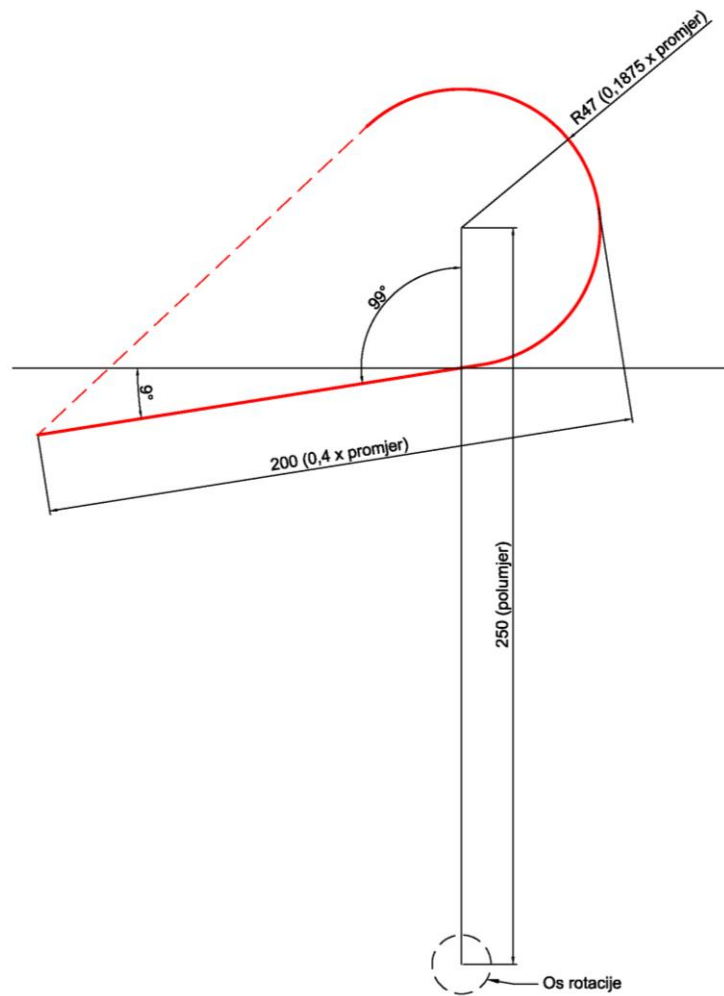
Slika 4.14.: Kosturi lopatica

Nakon što se izradio kostur, potrebno ga je obložiti oplatom kako bi lopatice dobile konačan oblik. Oplata mora što lakša, a ujedno i čvrsta kako bi izdržala jači vjetar. U ovom je slučaju korištena gipka plastika debljine 1 mm koja osigurava malu težinu i dovoljnu čvrstoću. Dovršene lopatice s oplatom prikazane su na slici 4.15. Mogu se koristiti i neki drugi materijali kao što je tanki lim koji je mnogo čvršći, ali i teži od plastike.



Slika 4.15.: Dovršene lopatice

Kod ugradnje lopatica rotora vrlo je važno pravilno ih pozicionirati u odnosu na os rotacije kako bi rotor imao što bolja aerodinamička svojstva. Tri lopatice moraju biti međusobno zakrenute za 120° . Istraživanjem i pokusima zaključilo se da ih je najbolje postaviti na način da budu zakrenute pod malim kutom prema osi rotacije kako je prikazano na slici 4.16. Dimenzije lopatica su također određene u odnosu na promjer rotora.



Slika 4.16.: Nacrt dimenzija i pravilnog pozicioniranja lopatica

Nakon što se ugrade lopatice, vjetroagregat dobiva konačan izgled prikazan na slici 4.17.

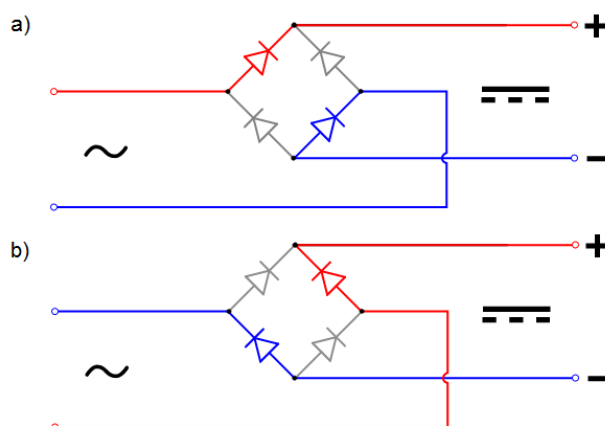


Slika 4.17.: Dovršeni model malog vjetroagregata

4.3.5. Izrada ispravljača

Napon koji se dobiva na izlazu statora vjetroagregata je izmjeničan, a kako bi se pretvorio u istosmjerni potrebno je izraditi punovalni ispravljač. Za punovalni ispravljač će se iskoristiti Grečov spoj tj. spoj četiri diode koji na izlazu daje istosmjernan napon.

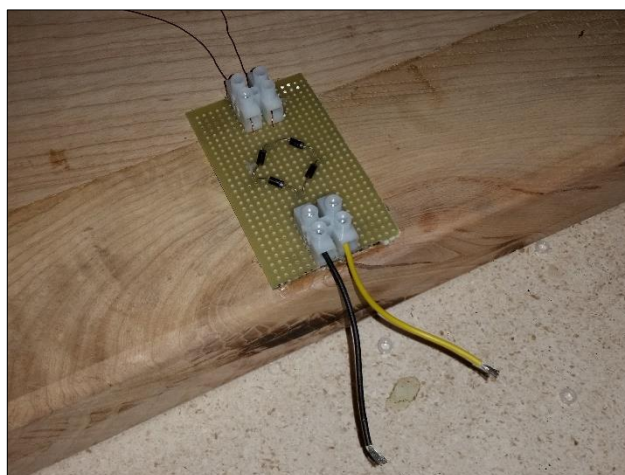
Princip rada Grečovog spoja prikazan je na slici 4.18. Shema *a* prikazuje stanje spoja za vrijeme pozitivne poluperiode, a shema *b* stanje za vrijeme negativne poluperiode.



Slika 4.18.: Princip rada Grečovog spoja

Diode su se prvo postavile na tiskanu pločicu na odgovarajući način. Kontakti su se raširili na van kako ne bi ispale s pločice dok se lemi. Koristeći lemnicu i lemnu žicu, kontakti dioda su se zalemili na pločicu i na kraju kliještima skratili na odgovarajuću duljinu. Nakon što su se zalemile diode, na spojeve su se dodatno zalemile lakirane bakrene žice koje su se zatim spojile ulazne i izlazne stezaljke zalijepljene vrućim ljepilom na tiskanu pločicu.

Time je ispravljač dovršen i još je ostalo samo ugraditi ga na postolje vjetroagregata i spojiti na izlaze statora. Vrućim ljepilom pločica se zaljepila na postolje, izlazi statora su se zavidali u stezaljke, a na izlazne stezaljke ispravljača zavidale su se dvije žice na koje će se spajati multimeter kod mjerenja. Ugrađena pločica prikazana je na slici 4.19.



Slika 4.19.: Ispravljač ugrađen na postolje

4.4. Ispitivanje i analiza rezultata

S kompletno dovršenim modelom malog vjetroagregata vrijeme za provođenje ispitivanja njegovih karakteristika i analize dobivenih rezultata. Za ispitivanje su korišteni sljedeći uređaji: digitalni laserski tahometar (CEM DT-6234B) za mjerenje brzine vrtnje, digitalni anemometar (VA893) za mjerenje brzine vjetra i multimeter (UNI-T UT60) za mjerenje napona i struje. Na slici 4.18. prikazani su tahometar (lijevo) i anemometar (desno).




Slika 4.20.: Digitalni tahometar i anemometar

Lokacije ispitivanja odabrane su na način da svaka ima nešto karakteristično, odnosno nešto što bi moglo imati utjecaj na rad vjetroagregata.


Također, na svakoj lokaciji vjetroagregat je postavljen na nekoliko različitih visina kako bi se uočio utjecaj turbulencija vjetra.

U nastavku su dani tablični pregledi dobivenih rezultata svih provedenih ispitivanja.


Tablica 4.1.: Rezultati prvog ispitivanja

1. ISPITIVANJE		
<i>Datum i vrijeme ispitivanja:</i>	04.07.2015.	
Pregled detalja o lokaciji		
<i>Lokacija:</i>	Crikvenica	
<i>Opis lokacije:</i>	Predgrađe, okruženo kućama, vjetroagregat postavljen uz cestu	
Pregled vremenskih prilika tijekom ispitivanja		
<i>Vremenske prilike:</i>	Sunčano s naoblakom	
<i>Brzina vjetra:</i>	1,9 m/s	
<i>Vrsta vjetra:</i>	Konstantan s malim turbulencijama	
Pregled dobivenih rezultata		
<i>Visina postavljanja:</i>	Na razini tla	2 m
<i>Brzina vrtnje:</i>	14 o/min	16 o/min
<i>Inducirani napon:</i>	0,05 V	0,06 V


Tablica 4.2.: Rezultati drugog ispitivanja

2. ISPITIVANJE		
<i>Datum i vrijeme ispitivanja:</i>	04.07.2015.	
<i>Pregled detalja o lokaciji</i>		
<i>Lokacija:</i>	Crikvenica	
<i>Opis lokacije:</i>	Vrh rive, u okolini nema objekta koji bi mogao izazvati turbulencije	
<i>Pregled vremenskih prilika tijekom ispitivanja</i>		
<i>Vremenske prilike:</i>	Sunčano s naoblakom	
<i>Brzina vjetra:</i>	4,5 m/s	
<i>Vrsta vjetra:</i>	Konstantan i bez turbulencija	
<i>Pregled dobivenih rezultata</i>		
<i>Visina postavljanja:</i>	Na razini tla	2 m
<i>Brzina vrtnje:</i>	48 o/min	49 o/min
<i>Inducirani napon:</i>	0,33 V	0,34 V


Tablica 4.3.: Rezultati trećeg ispitivanja

3. ISPITIVANJE		
<i>Datum i vrijeme ispitivanja:</i>	05.07.2015.	
Pregled detalja o lokaciji		
<i>Lokacija:</i>	Breze	
<i>Opis lokacije:</i>	Livada u brdima, vjetroagregat postavljen na osami	
Pregled vremenskih prilika tijekom ispitivanja		
<i>Vremenske prilike:</i>	Sunčano	
<i>Brzina vjetra:</i>	6,7 m/s	
<i>Vrsta vjetra:</i>	Konstantan s povremenim refulima, bez turbulencija	
Pregled dobivenih rezultata		
<i>Visina postavljanja:</i>	Na razini tla	2 m
<i>Brzina vrtnje:</i>	64 o/min	64 o/min
<i>Inducirani napon:</i>	0,45 V	0,45 V

Tablica 4.4.: Rezultati četvrtog ispitivanja

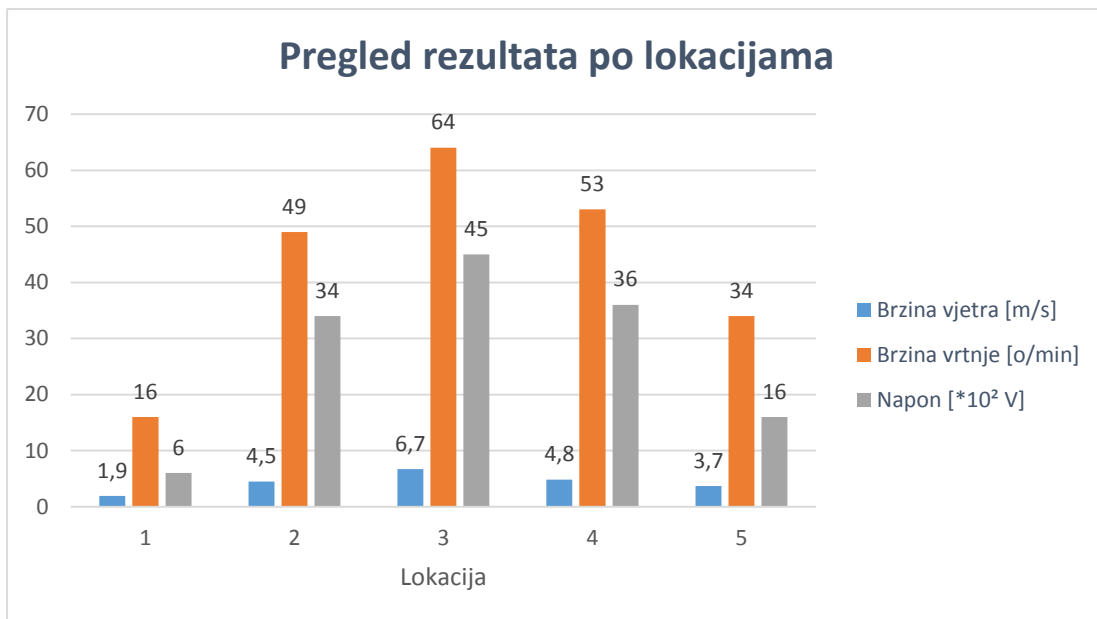
4. ISPITIVANJE		
<i>Datum i vrijeme ispitivanja:</i>	05.07.2015.	
Pregled detalja o lokaciji		
<i>Lokacija:</i>	Novi Vinodolski	
<i>Opis lokacije:</i>	Centar grada, vjetroagregat postavljen između dvije veće zgrade	
Pregled vremenskih prilika tijekom ispitivanja		
<i>Vremenske prilike:</i>	Sunčano	
<i>Brzina vjetra:</i>	4,8 m/s	
<i>Vrsta vjetra:</i>	Konstantan, manje turbulencije	
Pregled dobivenih rezultata		
<i>Visina postavljanja:</i>	Na razini tla	2 m
<i>Brzina vrtnje:</i>	49 o/min	53 o/min
<i>Inducirani napon:</i>	0,34 V	0,36 V

Tablica 4.5.: Rezultati petog ispitivanja

5. ISPITIVANJE		
<i>Datum i vrijeme ispitivanja:</i>	05.07.2015.	
Pregled detalja o lokaciji		
<i>Lokacija:</i>	Crikvenica	
<i>Opis lokacije:</i>	Vrh rive, u okolini nema objekta koji bi mogao izazvati turbulencije	
Pregled vremenskih prilika tijekom ispitivanja		
<i>Vremenske prilike:</i>	Sunčano	
<i>Brzina vjetra:</i>	3,7 m/s	
<i>Vrsta vjetra:</i>	Konstantan i bez turbulencija	
Pregled dobivenih rezultata		
<i>Visina postavljanja:</i>	Na razini tla	2 m
<i>Brzina vrtnje:</i>	33 o/min	34 o/min
<i>Inducirani napon:</i>	0,16 V	0,16 V

Nakon provedenih ispitivanja i zabilježenih rezultata, rezultati su se ubacili u tablice i iz njih napravili grafovi u programu Microsoft Excel 2013. Pomoću dobivenih grafova najlakše se mogu vidjeti karakteristike i performanse vjetroagregata pri različitim brzinama vjetra. Za dobivanje grafova kao referentni rezultati odabrani su oni dobiveni vjetroagregatom postavljenom na visini od 2 m.

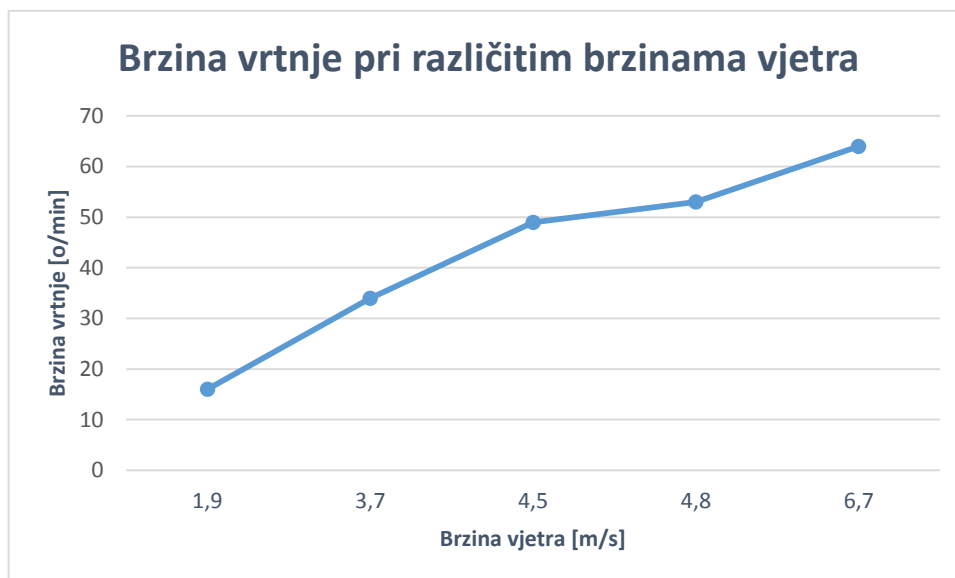
Na slici 4.21. prikazan je skupni prikaz svih dobivenih rezultata. Vrijednosti dobivenih napona su radi boljeg prikaza pomnožene sa 100.



Slika 4.21.: Skupni prikaz svih rezultata

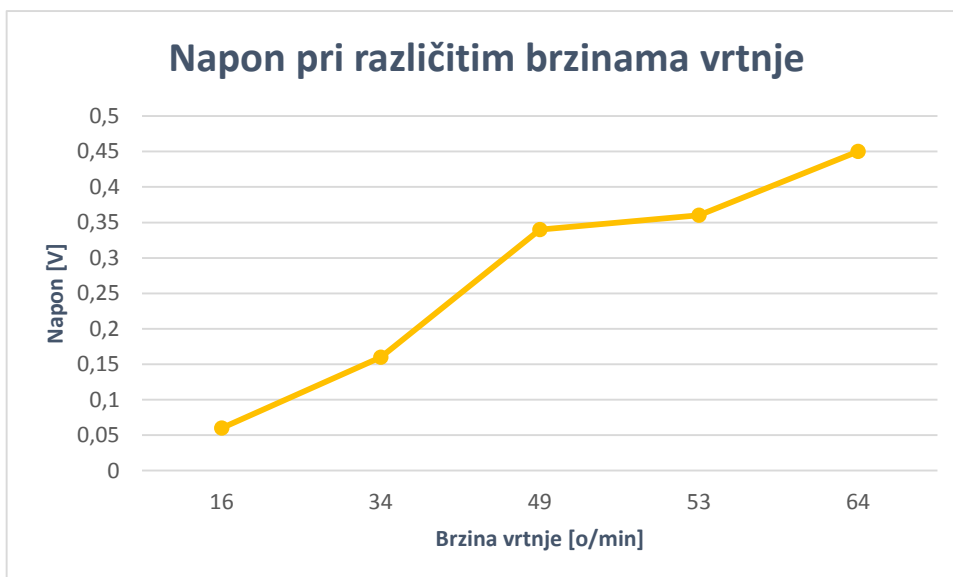
Konstrukcija lopatica je takva da je rotor pogodniji za veće brzine vjetra pri kojima se vrlo brzo okreće dok je za sam početak vrtnje rotora potreban vjetar brzine oko 1,5 m/s.

Grafički prikaz ovisnosti brzine vrtnje rotora o brzini vjetra prikazan je na slici 4.22.



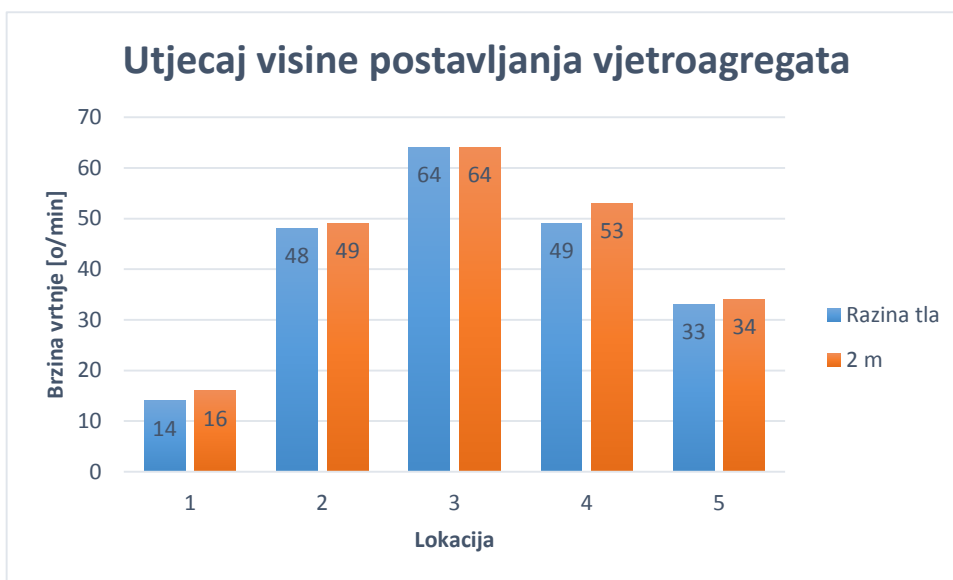
Slika 4.22.: Brzina vrtnje pri različitim brzinama vjetra

Napon koji se inducira u statoru mijenja se približno linearno s promjenom brzine vrtnje rotora. Promjena napona u ovisnosti o brzini vrtnje rotora prikazana je na slici 4.23.



Slika 4.23.: Inducirani napon pri različitim brzinama vrtnje rotora

Kako bi se uočila razlika između dvije visine postavljanja vjetroagregata izrađen je graf prikazan na slici 4.24. Iz grafa se može uočiti da na lokacijama kod kojih nisu prisutne turbulencije u vjetru, razlika u brzini vrtnje praktički nema dok na lokacijama kod kojih postoje određene turbulencije u vjetru razlika je jasno vidljiva.



Slika 4.24.: Brzine vrtnje na dvije visine postavljanja vjetroagregata

5. ZAKLJUČAK

U završnom radu opisana je osnovna podjela vjetroagregata prema principima iskorištavanja vjetra. Navedena su i postojeća konstrukcijska rješenja vjetroagregata. Svako izvedbi detaljno je opisan način konstrukcije i princip rada te opisane pripadajuće prednosti i mane, a izvedbe su međusobno i uspoređene.

Praktični dio rada opisuje izradu modela malog vjetroagregata s vertikalnom osi vrtnje. Početak obuhvaća planiranje, izradu nacрта te razvoj ideje. Kod opisa izrade navedene su sve poteškoće i problemi s kojima se susreće u izradi raznih dijelova vjetroagregata. S dovršenom izradom vjetroagregata započela su ispitivanja njegova rada. Na kraju su se dobiveni rezultati i analizirali te se time dobio uvid u karakteristike vjetroagregata.

Vjetroagregati s vertikalnom osi vrtnje sa svim svojim prednostima predstavljaju veliki potencijal u području vjetroenergetike. Potencijali same energije vjetra jako su veliki i danas je to izvor energije s najvećim porastom. Energija vjetra svuda je oko nas i potrebno je samo pravilno je iskoristiti.

6. LITERATURA

- [1] Hau, E.: „Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics“, Springer, München, 2013.
- [2] Burton, T.; Sharpe, D.; Jenkins, N.; Bossanyi E.: „Wind Energy Handbook“, Wiley, Chichester, 2001.
- [3] Ragheb, M.: „Vertical Axis Wind Turbines“, 2008.

Internet stranice:

- [4] Wind Stuff Now, <http://www.windstuffnow.com/>
- [5] Instructables, <http://www.instructables.com/>
- [6] ECOS Pilot School, <http://www.ecos-psa.hr/novosti-i-zanimljivosti/>
- [7] The Back Shed, <http://www.thebackshed.com/>
- [8] Green Rhino Energy, <http://www.greenrhinoenergy.com/>
- [9] Clean Energy Brands, <http://www.cleanenergybrands.com/>

7. SAŽETAK

Završni rad pokriva područje vjetroagregata. Opisana je podjela vjetroagregata prema principima iskorištavanja vjetra. Zatim su opisani postojeći konstrukcijski oblici vjetroagregata koji se dijele na vjetroagregate s horizontalnom i vjetroagregate s vertikalnom osi vrtnje. Praktični dio završnog rada sastoji se od izrade malog vjetroagregata s vertikalnom osi vrtnje. Praktični dio pokriva cjelokupnu izradu vjetroagregata te ispitivanje i analizu dobivenih rezultata.