

SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski stručni studij elektrotehnike

Završni rad

**UTJECAJ IZVEDBE LOPATICA NA BRZINU VRTNJE
MANJIH VJETROAGREGATA S VERTIKALNOM OSI
VRTNJE**

Rijeka, lipanj 2015.

Romano Šćulac

0069060514

SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski stručni studij elektrotehnike

Završni rad

UTJECAJ IZVEDBE LOPATICA NA BRZINU VRTNJE
MANJIH VJETROAGREGATA S VERTIKALNOM OSI
VRTNJE

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

Rijeka, lipanj 2015.

Romano Šćulac

0069060514

TEHNIČKI FAKULET

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

ZADATAK

za završni rad

Pristupnik: Romano Šćulac

Matični broj: 0069060514
Lokalni matični broj: 12800040

Naziv zadatka: **UTJECAJ IZVEDBE LOPATICA NA BRZINU VRTNJE MANJIH
VJETROAGREGATA S VERTIKALNOM OSI VRTNJE**


Naziv zadatka na
engleskom jeziku: **THE IMPACT OF BLADE CONSTRUCTION OF A VERTICAL AXIS WIND
TURBINE ON A ROTATION SPEED**

Sadržaj zadatka:

Opisati manje vjetroagregate s horizontalnom i vertikalnom osi vrtnje. Navesti prednosti i nedostatke. Opisati postojeće izvedbe lopatica za vjetroagregate manjih snaga s vertikalnom osi vrtnje. Napraviti manji vjetroagregat s vertikalnom osi vrtnje te ispitati i usporediti karakteristike (napon, snaga, brzina vrtnje) za dvije različite izvedbe lopatica.

Zadano: 17.03.2015.

Mentor:



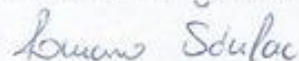
V. pred. mr. sc. Marijana Živić-Đurović

Predsjednica Povjerenstva:



Izv. prof. dr. sc. Vera Gradišnik

Zadatak preuzeo dana: 17.03.2015.



(potpis pristupnika)

Dostaviti:

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

IZJAVA

Sukladno s člankom 9. Pravilnika o završnom radu, završnom ispitu i završetku stručnih studija Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, od lipnja 2011., izjavljujem da sam samostalno izradio završni rad prema zadatku br. 602-04/14-14/34 od 06.03.2015.

Rijeka, lipanj 2015.

Romano Šćulac

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. ULOGA VJETRA U RADU VJETROAGREGATA	3
2.1. Uporaba vjetroenergetskih mogućnosti	3
2.2. Mogućnosti vjetra za manje vjetroagregate	5
2.3. Iskorištavanje vjetra u Hrvatskoj	6
2.4. Budućnost energije vjetra	7
3. KONSTRUKCIJSKI OBLICI VJETROTURBINA	8
3.1. Vjetroturbine s horizontalnom osi vrtnje	8
3.2. Vjetroturbine s vertikalnom osi vrtnje	11
3.3. Prednosti i mane	12
3.4. Vjetroturbine s horizontalnom ili vertikalnom osi vrtnje?	14
4. IZVEDBE LOPATICA VJETROAGREGATA S VERTIKALNOM OSI VRTNJE	15
4.1. Darrieusov model	16
4.2. Savoniusov model	20
4.3. Utjecaj lopatica na brzinu vrtnje vjetroagregata s vertikalnom osi vrtnje .	24
4.4. Primjeri	26
4.4.1. Ropatec	26
4.4.2. Solwind	27
5. STRUČNI DIO.....	29
5.1 Izrada vjetroagregata.....	30

5.1.1 Postolje i drvene komponente.....	30
5.1.2 Osovina.....	31
5.1.3 Izrada statora.....	32
5.1.4 Izrada rotora.....	35
5.1.5 Izrada lopatica.....	36
5.1.6 Izrada diskova.....	37
5.1.7 Gotov vjetroagregat.....	39
5.1.8 Izrada pločice.....	40
5.1.9 „Lenz 2“ lopatice.....	41
5.2 Ispitivanja i usporedba lopatica.....	42
6. ZAKLJUČAK	47
SAŽETAK	48
LITERATURA	49
POPIS SLIKA I TABLICA	52

1. UVOD

Energija vjetra već je odavno zamijećena kao područje kojeg je potrebno bolje i pomnije istražiti. Od samih početaka razvoja tehnologija, ljudima je bilo jasno kako je najbolji i najzdraviji način iskorištavanje prirodne energije – vode i vjetra. Ta činjenica posebno vrijedi danas, u ovo moderno i razvijeno doba, kada je zbog pretjerane industrije došlo do pretjeranog zagađenja kompletnog okoliša i atmosfere. Upravo iz tog razloga ljudi se danas sve više okreću prirodnim izvorima energije kako bi smanjili već preveliko zagađenje te spriječili svako novo.

Prve vjetroelektrane bile su veoma primitivnih oblika, no s razvojem postajale su sve funkcionalnije, iskoristivije i estetski ljepše. Njihov rad danas u mnogočemu se razlikuje od nekadašnjih vjetroelektrana.

Osnovni princip rada vjetroelektrane jest taj da vjetroagregati primaju energiju vjetra i pretvaraju je u neku drugu vrstu energije – a to je najčešće električna energija. Svaka vjetroelektrana se sastoji od određenog broja lopatica, koje mogu biti postavljene na više različitih načina. One hvataju vjetar, tj. vjetar njih okreće, a lopatice pokreću osovinu koja je direktno vezana za generator koji ima zadaću proizvesti električnu energiju.

Ono što se među vjetroelektranama razlikuje, osim po broju i položaju njezinih lopatica, jest njihov konstrukcijski oblik. Vjetroelektrane se po konstrukcijskom obliku mogu podijeliti na vjetroelektrane s horizontalnom osi vrtnje i vjetroelektrane s vertikalnom osi vrtnje. Svaki od ova dva navedena oblika ima svoje karakteristike, svoje prednosti i mane, te funkcije o kojima će više riječi biti u daljnjem dijelu rada.

Ono što je veoma zanimljivo jest činjenica da i same lopatice, njihov broj i njihov položaj u vjetroelektrani direktno utječu na brzinu okretaja vjetro turbine. Upravo tome posvetiti će se ovaj rad, a za što bolje shvaćanje ove problematike poslužiti će i nekoliko primjera iz prakse.

U prvome poglavlju ovoga rada govoriti će se o ulozi vjetra u radu vjetroelektrana – o načinu funkcioniranja vjetroelektrana, o njihovim sposobnostima i mogućnostima, te će se dati uvid u iskorištavanje energije vjetra u Hrvatskoj, kao i konstatacija o tome kako bi se ova znanost mogla razvijati u budućnosti.

Drugo poglavlje govori o konstrukcijskim oblicima vjetroelektrana – vjetroelektrane s horizontalnom osi vrtnje i vjetroelektrane s vertikalnom osi vrtnje. Navesti će se njihove prednosti i mane, te će se dati razmatranje koje od njih su bolje i prikladnije za uporabu.

Treće poglavlje razmatra izvedbe lopatica vjetroatregata s vertikalnom osi vrtnje. Osnovni modeli su Darrieusov i Savoniusov model, koji će biti pojašnjeni, a dati će se i neki primjeri ovih izvedbi, kao što su Ropatec i Solwind. Razmotriti će se na koji način lopatice utječu na brzinu vrtnje vjetroatregata s vertikalnom osi vrtnje.

Zaključak će sumirati cjelokupan rad u nekoliko osnovnih zaključaka, te slijedi sažetak, popis slika i tablica, te popis literature u kojem su navedeni svi korišteni izvori informacija.

2. ULOGA VJETRA U RADU VJETROAGREGATA

Vjetar igra osnovnu ulogu u pokretanju i radu vjetroagregata. Računica je jednostavna – ukoliko nema vjetra, nema niti proizvodnje električne energije. U ovome poglavlju pojasniti će se na koji način i u kolikoj mjeri se danas iskorištava energija vjetra i koje su njegove mogućnosti. Dotaknuti će se teme iskorištavanja vjetra u Hrvatskoj i situaciji na našem području, te će se zagledati u budućnost ove zanimljive grane.

2.1. Uporaba vjetroenergetskih mogućnosti

Iskorištavanje energije vjetra danas je postao svjetski i nacionalni trend.

Njegova osnovna obilježja i zadaće jesu:

1. Svakoj zemlji potrebna je određena količina energije. Isto tako, većina zemlja koje nemaju dovoljno proizvodnih pogona za proizvodnju električnu energiju osuđeni su tu energiju uvoziti iz drugih zemalja. Zadaća vjetroelektrana jest nadoknaditi taj dio energije koja nedostaje [1]. Vjetar ovdje ima veliku prednost, jer čak i kada određena zemlja nije bogata vodama za rad i razvoj hidroelektrana, vjetra joj nikada neće nedostajati.
2. Vjetroelektrane imaju za jedan od svojih ciljeva i zaštitu okoliša. Proizvodnja energije putem pretvorbe i razgradnje fosilnih energenata u velikoj mjeri šteti i zagađuje okoliš, kao i atmosferu. Uporaba vjetra kao energije mnogo je bolji i ekonomičniji izbor, upravo iz razloga što nema nikakvih oblika nusprodukata koji bi mogli naštetiti okolišu.
3. Područja u kojima se proizvodi energija u većini slučajeva su zagađena i onečišćena na sve moguće načine – od zemlje, tla i vode do zraka i atmosfere. Uklanjanjem takvih zagađujućih vrsta proizvodnih pogona i uvođenjem onih prirodnih koje za svoje pokretanje koriste vjetar postići će se, kroz određen period, veća čistoća kompletnog područja, što ne da će pridonjeti samo okolišu i zdravlju ljudi već može potpomoći i u razvijanju turizma.

4. Razvoj vjetroelektrana doprinosi cijeloj industrijskoj grani. Otvoriti će se nova radna mjesta i nove pozicije za rad u sklopu vjetroelektrana, ljudi će se obučavati za ovakvu vrstu rada, može doći do otvorenja novih smjerova u školama ili pak do otvaranja posebnih škola, tu su također i razne vrste edukacija itd. Razvoj ove grane na veoma pozitivan način pridonosi ekonomskoj i industrijskoj situaciji u određenoj zemlji na razini svih aspekata.
5. Vjetroelektrane potiču razvoj ruralno izdvojenih područja, na način da se na njima izgrađuju vjetroelektrane, te time osiguravaju energiju onim kućanstvima koja su bila predaleko od centralnog energetskeg sustava te nisu mogle koristiti električnu energiju.

Na cijenu električne energije proizvedene na ovaj način utječe nekoliko faktora. Jedan od bitnih, ako ne i najvažnijih faktora jest i cijena same izgradnje ovakve vrste pogona, koja zahtijeva veliku prirodnu površinu gdje će se elektrane moći postaviti, prema zahtjevima mora biti izdvojena od gradova i naseljenih mjesta, te mora biti povezana cestama ili je potrebno izgraditi nove puteve, itd.

Lokaciju je potrebno veoma pomno izabrati, jer ne puše vjetar u istoj količini i istoj jakosti na svakome području. Izgradnja vjetroelektrane na području gdje je vjetar slab i ne puše često je uzaludno trošenje i novca, i vremena. Najčešće lokacije za izgradnju vjetroelektrana su područja tik uz more, a nerijetko se dešava da ih se postavi upravo i u samo more, gdje je intenzitet puhanja vjetra najsnažniji.

Upravo takav slučaj je u Hrvatskoj gdje se najveći broj vjetroelektrana nalazi upravo uz more, na mnogim otocima i poluotocima, kao što su npr. Pag, Kaštela, Vis, i mnogi drugi.



Slika 2.1. More je odlična lokacija za postavljanje vjetrenjača [2]

2.2. Mogućnosti vjetra za manje vjetroagregate

Ponekada je teško odrediti koji vjetroagregati se smatraju manjima. Vjetroagregati koji su nastali prije 10-20 godina sada se već smatraju manjima, a tada su bili najveći, stoga je to vrlo relativan pojam.

Ipak, neke osnovne karakteristike manjih vjetroagregata jesu:

- ✓ da imaju snagu do nekoliko kW,
- ✓ da imaju snagu do nekoliko desetaka kW. [3]

Manji vjetroagregati danas se već mogu naći u prodaji u gotovo svakom malo većem lancu tehničke robe. Pone se pomoću akumulatora, i to od 12 ili 24V. Najčešće se njihova snaga kreće oko 50kW pa na dalje.

Primjer jednog manjeg agregata koji se tako može kupiti, s vertikalnom osovinom, promjera je 510 mm, sastoji se od šest komada lopatica, a svoju snagu od 50 kW može dosegnuti kada vjetar puše 18 m/s [4]. Ovakve vrste vjetroagregata najbolje proizvode energiju u doba jeseni, zime i proljeća, dok ljeti nešto slabije. Tu se ljudi često znaju odlučiti da još kupe i solarni modul koji će najbolje raditi po ljeti.

Kada su u pitanju velike vjetroagregatorske jedinice, one se za svoje okretanje prema vjetru služe specifičnim elektromotornim pogonima. Kod manjih vjetroagregata to nije slučaj, već se tu koriste permanentni magneti, smješteni na rotoru ili statoru, te usmjeravanje prema vjetru provode putem repne peraje. [5]

Danas su popularniji maleni vjetroagregati koji imaju horizontalnu osovinu i veći broj lopatica iz razloga što se njima povećava faktor iskorištenja. Na područjima gdje su vjetrovi specifični i „nezgodniji“ postavljaju se vjetroagregati s vertikalnom osovinom.

Manji vjetroagregati mogu se postaviti na udaljena područja te ih samostalno opskrbljivati energijom. [6] Pri samom izboru testiranih sustava i podsustava treba biti veoma oprezan i birati samo one najkvalitetnije.

Slika 2.2. – Primjer manjih vjetroagregata [7]



2.3. Iskorištavanje vjetra u Hrvatskoj

Iako se vjetar počeo sve više i više iskorištavati u Hrvatskoj, to ipak nije dovoljno da Hrvatska bude jedna od vodećih zemalja u ovome području.

Najviše vjetroelektrana u Hrvatskoj nalazi se upravo na otocima i poluotocima.

Pomoću doljnje tablice prikazati će se situacija iskorištavanja vjetra u Hrvatskoj.

Tablica 2.1. Iskorištavanje vjetra na jadranskim otocima [8]

Naziv lokacije	Ime lokacije	250 kW		500 kW		750 kW	
		Broj turbina	MWh/god.	Broj turbina	MWh/god.	Broj turbina	MWh/god.
PAG	Kolan	59	22.460,15	40	36.553,65	37	47.817,77
KAŠTELA	Kozjak	63	31.412,58	42	49.324,09	39	63.931,91
VIS	Široko brdo	9	5.465,43	7	10.086,49	6	12.238,35
LASTOVO	Hum	7	3.777,09	5	6.486,13	5	9.265,82
KORČULA	Blato	26	12.900,69	18	21.650,85	17	29.159,25
PELJEŠAC	Supetar	62	31.556,12	42	51.618,08	39	68.241,22

1978. godine prvi puta se u Hrvatskoj započelo ozbiljnije promatrati nauku o iskorištavanju vjetra. U periodu nakon te godine nastale su gotovo sve veće i poznatije hrvatske vjetroelektrane, kao što su npr. vjetroelektrana Ravne na Pagu, Trtar – Krtolin kod Šibenika, Vrataruša kod Senja, Bruška kod Benkovca itd.. One se sve više razvijaju i šire, a najčešće područje njihova lociranja jesu hrvatski otoci i poluotoci.

Slika 2.3. Primjer vjetroelektrane na Pelješcu [9]



2.4. Budućnost energije vjetra

U Hrvatskoj bi se putem vjetroelektrana moglo proizvesti između 5 i 10% ukupne potrebne količine električne energije. [10] Kada su u pitanju svjetski razmjeri, vjetroelektrane mogu pokriti okvirno 20% ukupnih potreba za električnom energijom, a u dijelovima s razvijenijom vjetroenergetikom okvirno između 25 i 40%. [11]

Danas u razvoju vjetroenergetike vodećim zemljama smatraju se Danska i Njemačka, dok ostatak zemalja dosta zaostaje iza njih. Razvijanje ove grane pomoglo bi svima – i bogatijim i siromašnijim zemljama. Ipak, siromašnije zemlje teško će uspjeti u naumu o razvitku vjetroenergetike ukoliko im bogatije zemlje ne pomognu, koliko financijski toliko i iskustvom.

3. KONSTRUKCIJSKI OBLICI VJETROTURBINA

Kada je riječ o konstrukcijskim oblicima vjetroturbina možemo ih podijeliti s obzirom na položaj njihova vratila (koji može biti horizontalno ili vertikalno) te prema broju lopatica (koje mogu biti višelopatične ili s 1 – 3 lopatice).

Ovo poglavlje pozabaviti će se prvom podjelom – s položajem njihova vratila, navesti će se osnovne karakteristike, njihova obilježja i prepoznatljivosti, navesti će se njihove vrline i mane te dati krajnje razmišljanje koji je izbor između njih dvoje bolji.

3.1. Vjetroturbine s horizontalnom osi vrtnje

Rotor vjetroturbine s horizontalnom osi vrtnje rotira se oko horizontalne osi, te tijekom svoga rada rotacijski dio je horizontalno usmjeren naspram smjera puhanja vjetra. Lopatice ove vjetroturbine instalirane su okomito naspram rotacione osi, te formiraju određeni kut.

Broj lopatica kod vjetroturbina s horizontalnom osi vrtnje varira od jedne vjetroturbine do druge. [12] Oni zavise o tome koja je početna funkcija vjetroturbine. Vjetroturbine koje imaju

veći broj lopatica često se nazivaju i sporim vjetroturbinama. One rade na način da hvataju i sporiji i slabiji vjetar, čime se dobiva veliki postotak iskorištenja energije vjetra. Vjetroturbine koje se sastoje od manjeg broja lopatica često se nazivaju i brzim vjetroturbinama, jer najbolje love vjetar velikih brzina i snaga. Uvjet za njihovo pokretanje jest taj da početna brzina vjetra mora biti poprilično brza i snažna kako bi uopće došlo do njihova pokretanja. Sporije vjetroturbine su poprilično lakše naspram ovih brzih, stoga su dosta pogodnije kada je u pitanju proizvodnja energije. [13]

Kao najbolji izbor pri biranju broja lopatica pokazao se takozvani Danski koncept lopatica koji se sastoji od 3 komada lopatica. Općepoznato je kako je neparni broj lopatica mnogo bolji izbor od parnog, iz razloga što pridonosi što boljoj uravnoteženosti cijele vjetroturbinske konstrukcije.

Pokušalo se napraviti vjetroturbinu i sa samo jednom lopicom, no to se nije pokazalo poprilično uspješno. Ovakve vjetroturbine proizvode vrlo velike količine buke, a i potrebno je na drugoj strani lopatice postaviti određeni uteg koji će služiti kao protuteža.



Slika 3.1. Vjetroturbina s jednom lopicom [14]

Pri izboru vjetroturbine s dvije lopatice važno je znati da je za njihovo pokretanje potrebna mnogo veća brzina i snaga vjetra nego što je to slučaj kod vjetroturbine s tri lopatice, a sve za

dobivanje jednake količine energije. Sukladno većoj brzini vrtnje raste i količina buke koju te lopatice proizvode.

Postoji i takozvana „Američka vjetroturbina“ [15] koja se ističe većim brojem lopatica. Njihove izvedbe su poprilično jednostavne, ali velike, te nisu poprilično učinkovite.

Kod vjetroturbina s horizontalnom osi vrtnje karakterističan je njihov rotor koji se nalazi horizontalno na samome vrhu stupa. Visina stupa je stavka na koju je uvijek potrebno računati, a ona se određuje tako da iznosi otprilike 1,5 do 2 promjera lopatica. To je važno kako bi se moglo loviti vjetrove što veće brzina i na što višim brzinama.

Vjetroturbine s horizontalnom osi vrtnje moraju imati mogućnost zakretanja trupa kako bi mogle loviti vjetar iz više smjerova. Manje vjetroturbine sadrže posebna krilca koja okreću vjetroturbinu u smjeru puhanja vjetra, a za velike vjetroturbine tu su servo motori na koje utječu senzori za identifikaciju puhanja smjera vjetra.

Vjetroturbine s horizontalnom osi vrtnje mogu biti napravljene na dva načina – mogu imati stup iza lopatica ili ispred lopatica. Bolji izbor zasigurno je kada se stup nalazi ispred lopatica iz razloga što u tom slučaju nije potrebno imati određeni mehanizam koji će zakretati, već se stup sam po sebi postavlja u smjeru vjetra. Ipak, ovo nije dobar odabir kada su u pitanju velike vjetroturbine jer može doći do problema s provođenjem kablova kroz stup. Ova vrsta izvedbe podnosi snažniji vjetar jer ima veću moć savijanja lopatica bez mogućnosti da će zakačiti stup. Jedini nedostatak ove izvedbe je taj što se lopatice nalaze pod velikim opterećenjem.

Najkorištenija izvedba je s stupom iza lopatica. Ona ne koristi vjetar iza stupa, te joj je potreban uređaj koji će se prilagođavati smjeru puhanja vjetra. Nedostatak ove izvedbe jest veoma krut rotor turbine koji mora biti na određenoj udaljenosti od samoga stupa što automatski podiže cijenu cijele izvedbe. [16]



Slika 3.2. Vjetroturbina s horizontalnom osi vrtnje [17]

3.2. Vjetroturbine s vertikalnom osi vrtnje

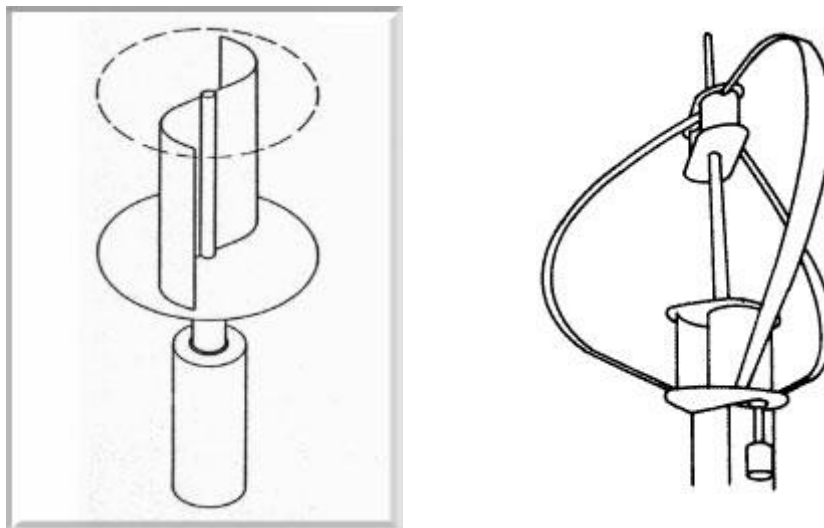
Jednostavne vjetroturbine s vertikalnom osi vrtnje imaju dugu povijest. Upravo ova vrsta korištena je kao prvi elekto napajajući izvor energije putem korištenja energije vjetra. 1887. škotški profesor James Blyth koristio je ovu vrstu vjetroturbine za napajanje svoje kuće za odmor. [18]

Čak i tada bile su uočljive prednosti ove vrste vjetroturbina, posebice kada je 1891. godine njemački znanstvenik Paul la Cour osmislio prvu vjetroturbinu s horizontalnom osi vrtnje koja je imala aerodinamičke lopatice. U proteklih 130 godina proizvelo se i konstruiralo preko 300,000 vjetroturbina s horizontalnom osi vrtnje.

Osnovne značajke ovih vjetroturbinu jesu te da je vratilo položeno vertikalno. Sukladno tome generator se nalazi u podnožju stupa, pa je stupanj pod manjim opterećenjem. Ovakve vrste vjetroturbinu su u prednosti naspram horizontalnih iz razloga što ih nije potrebno usmjeravati u smjeru puhanja vjetra [19].

Unatoč varijacijama, kojih je do danas osmišljeno nebrojeno puno, postoje dva osnovna tipa ovih vjetroturbinu. To su Savoniusov i Darrieusov oblik. O njihovim karakteristikama i specifičnostima više riječi biti će u poglavlju 4. (4.1., 4.2.).

Slika 3.3. Savoniusov (lijevo) i Darrieusov (desno) oblik vjetroturbinu [20]



3.3. Prednosti i mane

Svaki od konstrukcijskih oblika, bio to s horizontalnom ili vertikalnom osi vrtnje, sadrži svoje prednosti i mane.

Vjetroturbinu s horizontalnom osi vrtnje

Prednosti:

- ✓ Lopatice su smještene sa strane, što pridonosi boljoj stabilnosti
- ✓ Imaju veću učinkovitost kada je u pitanju proizvodnja električne energije

- ✓ Lopatice je moguće fiksirati, što smanjuje potencijalnu štetu koja može nastati u oluji ili kakvom nevremenu
- ✓ Može se doći do velikih brzina vjetra pozicioniranjem na visoke stupove
- ✓ Lopatice imaju sposobnost zakretanja lopatica, što vjetroturbini pruža mogućnost što boljeg iskorištenja energije vjetra, kroz veću kontrolu i podešavanje idealnog kuta [21]

Nedostatci:

- ✓ Njihova montaža je veoma skupa i poprilično su komplicirane za montiranje
- ✓ Traže poseban sustav koji će zakretati lopatice u smjeru vjetra, što dodatno povisuje samu cijenu izvedbe
- ✓ Trošak visokih stupova i velikih, dugačkih lopatica zahtijeva velike troškove prijevoza
- ✓ Izvedba ima smanjen rok trajanja zbog snažnih turbulencija
- ✓ Dolazi do problema u radu na niskim nadmorskim visinama [22]
- ✓ Trošak visokih stupova i velikih, dugačkih lopatica zahtijeva velike troškove prijevoza
- ✓ Izvedba ima smanjen rok trajanja zbog snažnih turbulencija
- ✓ Dolazi do problema u radu na niskim nadmorskim visinama

Vjetroturbine s vertikalnom osi vrtnje

Prednosti:

- ✓ Nije im nužan poseban mehanizam za zakretanje, što pojednostavljuje izvedbu i snižava joj cijenu
- ✓ Stup ne mora biti previše visok, što također pojeftinjuje cijelu izvedbu
- ✓ Jednostavnije su za održavanje jer su svi važniji dijelovi smješteni blizu tla
- ✓ Uspješno su se pokazale u radu na mjestima gdje je uz samo tlo prisutna velika brzina vjetra

- ✓ Nije nužno da se okreću u smjeru gdje puše vjetar
- ✓ Konstrukcijski mogu biti dosta veće od horizontalnih, bez sukladnih povećanja troškova same izvedbe

Nedostatci:

- ✓ Njihova iskoristivost je dosta manja od iskoristivosti vjetroturbina s horizontalnom osi vrtnje, do čega dolazi zbog dodatnog otpora
- ✓ Dijelovi smješteni uz tlo veoma često su pod velikim pritiskom same strukture i konstrukcije iznad njih, što često zna izazvati probleme i poteškoće pri zamjeni određenih dijelova novijima
- ✓ Imaju veoma maleni startni okretni moment, te im je zbog toga potreban još jedan izvor energije koji će započeti njihovo okretanje
- ✓ Za svoj rad i postavljanje iziskuju ravno tlo [23] što mnoge prirodne lokacije čini nepristupačnim za ovu vrstu vjetroturbina

3.4. Vjetroturbine s horizontalnom ili vertikalnom osi vrtnje?

Veoma često postavlja se pitanje koja vrsta vjetroturbina je bolja. Obje vrste vjetroturbina imaju svoje prednosti i mane, a upravo pomoću njih izabire se najbolji mogući način izvedbe, sukladno potrebama i željama. Nije za svaku namjenu idealna ista vrsta i ista izvedba vjetroturbine. [24]

Vjetroturbina s horizontalnom osi vrtnje dominira u vjetroindustriji. U izvedbama velikih vjetroturbinama, one s horizontalnom osi vrtnje su gotovo jedine koje se ovdje mogu primjetiti. Ipak, u malenim vjetroturbinama glavnu ulogu igraju one s vertikalnom osi vrtnje.

Prednost vjetroturbine s horizontalnom osi vrtnje jest ta da je sposoban proizvesti više električne energije od iste količine uhvaćenog vjetra. Dakle, ako je u pitanju što veća proizvodnja električne energije, vjetroturbine s horizontalnom osi vrtnje su dakako najbolji mogući izbor. Ipak, treba imati na umu da su ovakva postrojenja mnogo teža nego ona kao kod vjetroturbina s vertikalnom osi vrtnje, stoga teško podnose nevremena i snažne, turbulentne vjetrove.

Kao što je gore navedeno, vjetroturbine s vertikalnom osi vrtnje najčešće se koriste za manje vjetroturbine, u sklopu manjih projekata i osobnih izvedbi. Ove vrste vjetroturbina su veoma specifične jer imaju mogućnost hvatanja vjetra sa apsolutno svih strana, a neke vjetroturbine čak imaju mogućnost hvatanja vjetra koji puše od vrha do dna, ili obrnuto. Upravo iz tih razlika ove vjetroturbine su idealne za postavljanje na onim lokacijama koje su poznate da imaju veoma neredovit i problematičan smjer puhanja vjetra.

Teško je reći koja je vjetroturbina bolja od druge – jer sve zavisi o njezinoj namjeni, poziciji, lokaciji i svrsi. Tek poznavanjem svih od ovih kriterija moguće je uspješno odrediti koju vjetroturbinu bi bilo najpoželjnije i najisplativije izgraditi na određenoj lokaciji.

4. IZVEDBE LOPATICA VJETROAGREGATA S VERTIKALNOM OSI VRTNJE

U ovome poglavlju posvetiti će se glavna riječ vjetroatregatima s vertikalnom osi vrtnje te izvedbom njegovih lopatica. Govoriti će se o dva osnovna tipa vjetroturbina s vertikalnom osi vrtnje – o Savoniusovom i Darrieusovom modelu. Prikazati će se na koji način utječu lopatice na brzinu vrtnje, te će se navesti neki konkretni primjeri vjetroturbina s vertikalnom osi vrtnje – i to Ropatec i Solwind.

4.1. Darrieusov model

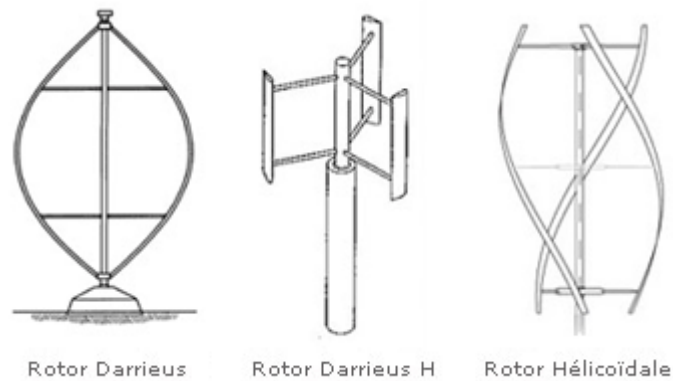
Darrieusov model vjetroturbine s vertikalnom osi vrtnje koristi se u svrhu pretvorbe energije vjetra u električnu energiju. Njegova turbina se sastoji od niza zakrivljenih lopatica, koje su montirane na okomitoj rotirajućoj osovini te okvira. Zakrivljenost lopatica dopušta lopicama da bude pod opterećenjem jedino pri visokim brzinama vrtnje lopatica. Postoji nekoliko usko povezanih vjetroturbina koje koriste ravne oštrice.

Ovu vrstu vjetroturbine osmislio je Georges Jean Marie Darrieus, prema kojem je ova vrsta vjetroturbine dobila i svoje ime. On je bio francuski aeronautički inženjer dvadesetog stoljeća. Imao je mnoge svoje izume, patente i ideje, no zasigurno je najpoznatiji upravo po Darrieusovoj vjetroturbini, koja je sposobna iskoristiti vjetar sa svih strana. Njegov izum opisan je u US patentu. [25]

Kada se Darrieusov rotor vrti, lopatice se kreću kroz zrak u kružnom pravcu. Izvedba ove vjetroturbine je veoma korisna, te ne ovisi o smjeru puhanja vjetra, kao što je slučaj kod vjetroturbina s horizontalnom osi vrtnje. Ono što je zanimljivo kod ove vrste vjetroturbine jest činjenica da se lopatice vrte mnogo većom brzinom nego što ju ima sam vjetar u tom trenutku. Ipak, ovu vjetroturbinu nije moguće pokrenuti bez pomoći. Kako bi lopatice započele samostalno vrtjeti one moraju dosegnuti određenu brzinu vrtnje. Ukoliko je brzina vjetra mala, moguće je da do njihova pokretanja neće doći, a i kada dođe, moguće je da se vrtnja prekine.

Darrieusov tip turbine može doseći brzinu vrtnje svojih lopatica čak do 220 kilometara po satu i to u bilo kojem smjeru. Postoji nekoliko osnovnih podvrsta Darrieusove turbine prikazanih na sljedećoj slici.

Slika 4.1. Podvrste Darrieusove vjetroturbine [26]



Prvi oblik je onaj klasičan oblik Darrieusove turbine. Drugi oblik je i takozvani H – tip Darrieusove vjetroturbine. Iako je njegova izvedba poprilično jednostavnija od klasičnog oblika, njegove lopatice moraju biti puno čvršće jer je težina lopaticama pomjerena naspram simetrale stupa.

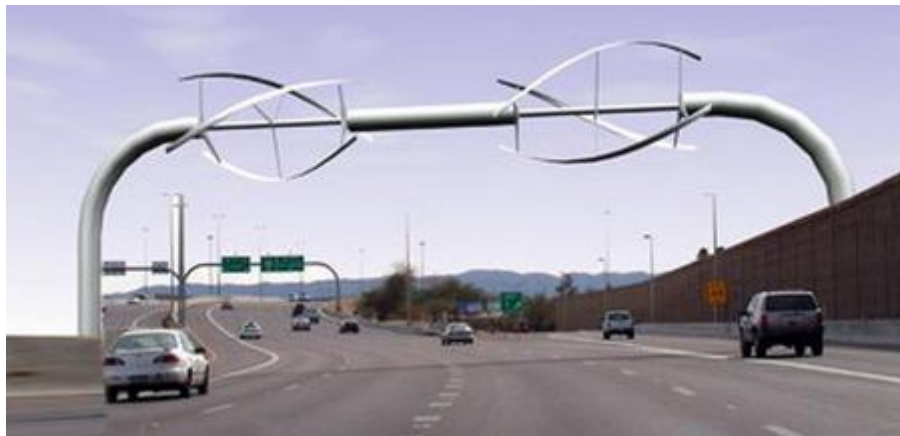


Slika 4.2. H – tip Darrieusove vjetroturbine [27]

Treći oblik prikazuje tip Darrieusove vjetroturbine, samo s spiralnim lopaticama. Ova vjetroturbina je pogodna jer vjetar ima dobar napadni kut na njezine lopatice, i to s obje strane, bez obzira na to u kojoj se poziciji lopatica nalazi. Uzrok tome je spiralni oblik lopatica. Moment je jednak u cijelom okretaju te ne dolazi do pulsiranja, a poništavanjem sila dolazi do mnogo manjeg opterećenja ležajeva nego što je to slučaj kod ostalih oblika Darrieusovih vjetroturbina. Ono što je revolucionarno kod ovog oblika vjetroturbine jest to da je problem sa samopokretanjem lopatica riješen.

Kao što postoje vertikalne izvedbe Darrieusove turbine, tako postoje i one horizontalne. Njihove dobre strane su te da su ležajevi smješteni na bolji način te su opterećeni u manjoj količini. Ova vrsta vjetroturbina postavlja se na zadanu visinu na kojoj će hvatati jednako raspoređenu brzinu vjetra, čime se izbjegava problem hvatanja malih brzina puhanja vjetra koje se nalaze uz tlo. Njihova mana jest ne hvatanje vjetra iz svih smjerova puhanja, što joj automatski smanjuje primjenu.

Slika 4.3. Horizontalni oblik Darrieusove turbine [28]



Prednosti Darrieusove vjetroturbine jesu:

- osnovni dijelovi mogu biti smješteni uz samo tlo (uglavnom, zavisi o modelu),
- lako ih je moguće integrirati u zgrade, ugodne su oku.

Nedostaci Darrieusove vjetroturbine jesu:

- nemaju mogućnost samopokretanja (osim izvedbe s spiralnim lopaticama)
- imaju nisku efikasnost.



Slika 4.4. „Farma“ Darrieusovih vjetroturbina [29]

Veoma je zanimljiva izvedba „Wind – it“ projekta u kojem su Darrieusove vjetroturbine integrirane direktno u konstrukciju strujnih stupova.



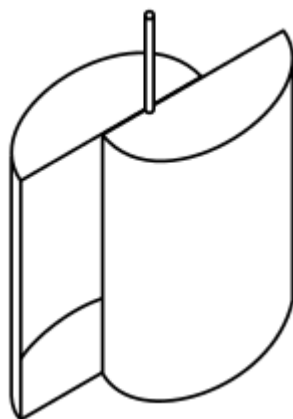
Slika 4.5. „Wind – it“ projekt [30]

4.2. Savoniusov model

Savoniusov model je prvi ikada osmišljeni model vjetroturbine s vertikalnom osi vrtnje. Osmislio ga je finski znanstvenik Siguars Johannes Savonius 1922. godine. [31]

Savoniusov model vjetroturbine osmišljen je s ciljem da pretvara energiju vjetra u odgovarajući oblik energije putem rotacione osovine. Ova vjetroturbina je jedna od najjednostavnijih vjetroturbina ikad osmišljenih. Sastoji se od dvije ili tri lopatice. Gledajući rotor odozgora može se primijetiti kako se ocrta u „S“ oblik. Zbog zakrivljenosti lopatica, one su manje opterećene kada se pomiču protiv vjetra nego kada se okreću zajedno s njim. Iz toga razloga što je opterećenje uvijek veće u jednom smjeru pojavljuje se rotacija. Takav način rada proizvodi dosta manje energije, nego što to proizvode turbine sličnih dimenzija.

Slika 4.6. Savoniusov model vjetroturbine [32]



Savoniusov model vjetroturbine zbog svoje jednostavnosti veoma često se koristi upravo u onim slučajevima kada je važnija cijena i pouzdanost u sistem nego što je važna njegova učinkovitost. Ovaj princip vjetroturbine koristi se u takozvanom Flettnerovom ventilatoru.

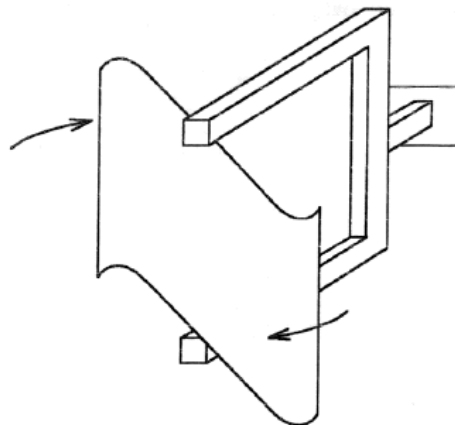
Flettnerov ventilator koristi se u situacijama kada je potrebna filtracija zraka – najčešće je to u autobusima, autima i kamionima, no i na svim ostalim prijevoznim sredstvima. [33]

Slika 4.7. Primjena Flettnerova ventilatora [34]



Još jedno mjesto gdje Savoniusova turbina ima svoju namjenu jest rotirajući reklamni oglasi, koji su napravljeni po principu ove vjetroturbine, te se pojavom vjetra vrte, tvoreći veoma atraktivan i uočljiv način oglašavanja.

Slika 4.8. Rotirajući reklamni znak [35]



Kada je u pitanju Savoniusov model vjetroturbine, nije važno u kojem smjeru vjetar puše. Uvijek će jedna od lopatica biti okrenuta u ispravnom smjeru, te će tako doći do njezina pokretanja, kao i pokretanja svih ostalih lopatica. Ovaj model je upravo iz tog razloga idealan za područja koja karakterizira veoma turbulentan i nepredvidiv vjetar.

Nedostatak ovoga modela jest taj da je postotak iskorištenja vjetra samo 15%, što bi značilo da se samo 15% vjetra koji zahvati lopatice može korisno iskoristiti za dobivanje energije. U ovome slučaju Darrieusov model predstavlja mnogo bolji izbor.

Savoniusova vjetroturbina najprikladnija je za postrojenja koja služe transportu vode ili mljevenju žitarica. Tu su poželjni visoki okretni momenti i spora rotacija, što ovu turbinu čini idealnom za ovakvu namjenu. Ova vrsta vjetroturbine veoma često se koristi u zemljama Trećeg svijeta gdje se proizvode od stare, iskorištene bačve nafte, zavarenog stupa i dijelova uzetih iz starih, istrošenih auta.

Zbog velikog opterećenja ležajeva ove vjetroturbine moraju biti veoma čvrste i sigurne, te svakih nekoliko godina zahtijevaju temeljit servis.

Slika 4.9. Primjer Savoniusove vjetroturbine [36]



Veoma je zanimljiv primjer ove konstrukcije s Tajvana, gdje su u jednu konstrukciju ukomponiran i Darrieusov i Savoniusov model vjetroturbina.



Slika 4.10. Darrieus – Savonius vjetroturbina [37]

4.3. Utjecaj lopatica na brzinu vrtnje vjetroatregata s vertikalnom osi vrtnje

Broj lopatica je često glavna diskusija pri skiciranju vjetroturbine. Jedan od osnovnih parametara koji se koriste pri odabiru jest utjecaj lopatica na brzinu vrtnje vjetroatregata.

Vjetroturbine su efikasne iz razloga što lopatice generiraju potisak, a potisak dopušta lopaticama da se vrte mnogo brže nego što je trenutna brzina vjetra. Ovaj parametar koristi određene matematičke izračune za njegovo dobivanje, no njegova optimalna vrijednost iznosi oko 10.

Maksimalna učinkovitost vjetroturbine ima svoj limit koji, teoretski gledano, iznosi oko 59%. Kada bi se izgradila vjetroturbina s jednom lopaticom koja bi imala parametar 10, vrlo vjerojatno bi se od silne snage raspala, a ukoliko nebi – njezina učinkovitost iznosila bi 51%. Vjetroturbinu s samo jednom lopaticom smatra se najefikasnijom vjetroturbinom, jer njezina lopatica veoma brzo prolazi krug od punih 360 stupnjeva. Ipak, ova konstrukcija je strukturno i dinamički veoma zahtjevna, te se unatoč svojoj efikasnosti rijetko koristi.

Kada su u pitanju vjetroturbine s tri lopatice, učinkovitost se penje na 55% [38]. Veći broj lopatica ne znači nužno i veću brzinu vrtnje, već sasvim suprotno.

Ipak, unatoč svim ovim podacima, postoje i eksperimentalni dokazi za manje vjetroturbine gdje je dokazano kako ponekada dodavanje većeg broja lopatica može povećati brzinu vrtnje. No, iza ovakvog podatka ne stoji konkretna teorija, to je samo eksperimentalni podatak kojeg je zasigurno potrebno dodatno istražiti. Ukoliko bi se to pokazalo ispravnim, prve vjetroturbine koje su se koristile za pumpanje vode, a sastojale su se od velikog broja lopatica, više ne bi bile smatrane primitivnim početnim pokušajima, već bi zasigurno bile pravo otkriće i poticaj da se takve vjetroturbine sve više ubace u svakidašnju uporabu.



Slika 4.11. Prve vjetroturbine s velikim brojem lopatica, tzv. američke vjetroturbine [39]

4.4. Primjeri

U narednom potpoglavlju prikazati će se dva sustava vjetroturbina s vertikalnom osi vrtnje – Ropatec i Solwind. Cilj je kroz konkretni primjer ukazati kako izgledaju i funkcioniraju ovakve vjetroturbine.

4.4.1. Ropatec

Ropatec vjetroturbina osmišljena je u Italiji, i teško je reći pripada li Savoniusovom ili Darrieusovom modelu, više je specifična sadržavajući karakteristike oba modela, te ju se može nazvati nekom vrstom hibrida. Rotori su napravljeni na isti način kao što je to slučaj kod krila aviona. Centralni panel između krila ponaša se kao difuzer i usmjerava vjetar prema lopaticama, što pokreće rotor i pri veoma malim brzinama vjetra.

Slika 4.12. Ropatec model [40]



Njegov centralni dio sadrži električni generator, koji je smješten na vrhu. Kada se vjetrom pokrene rotor, automatski se pokreće i električni generator.

Njegov rotor početi će se okretati već na laganom povjetarcu, brzine 7km/h.[41] Rotor također ima poseban oblik koji je posebno dizajniran i koncipiran kako bi mogao podnijeti i jako velike brzine vjetra. Ovakva vrsta rotora proizvedena je kako bi mogla iskoristiti vjetar brzine i do 230 km/h, koji već spadaju pod uragane, bez oštećenja za cijelu konstrukciju. Garancija za njihovo ispravno funkcioniranje iznosi 15 godina.

Karakteristike Ropatec modela jesu:

- ✓ Hvata vjetar bez obzira u kojoj poziciji se nalazio
- ✓ Njegovo funkcioniranje nije vezano za smjer puhanja vjetra
- ✓ Ima niske troškove održavanja
- ✓ Proizvodi neznatne količine buke, čak i pri velikim brzinama vjetra
- ✓ Lako podnosi velika nevremena
- ✓ Ima dug i pouzdan životni vijek

Ono što ovaj model čini posebnim jest činjenica da sam sistem već može proizvoditi električnu energiju.

4.4.2. Solwind

Ova vertikalna vjetroturbina, smještena na Novom Zelandu, osmišljena je kako bi započela s svojom vrtnjom pri brzini vjetra od 1.5m/s, a proizvoditi električnu energiju već na brzini vjetra od samo 3.7 m/s.

Ove vjetroturbine su veoma tihe pri radu. To se može zahvaliti njihovim lopaticama koje su smještene na takav način koji ne proizvodi onaj specifični zvuk udaranja vjetra u lopatice, kao što je to slučaj kod horizontalnih vjetroturbina.

Lopatice su uvijek na jednakoj udaljenosti od sredine, te su napravljene od posebnog stakla, čelika i aluminijske, što ih čini izuzetno čvrstim i jednostavnima za rukovanje.

Električni generator se nalazi u podnožju konstrukcije, veoma je lako doprijeti do njega, te ono što ga čini posebno laganim za rukovanje jest činjenica da njegovi kablovi i žice ne idu po cijeloj konstrukciji te ne otežavaju njezinu izvedbu.

Slika 4.13. Solwind model [42]



5. STRUČNI DIO

U ovom će se poglavlju govoriti i o samoj izradi mini vjetroagregata, potpunom postupku izrade, korištenim elementima, korištenim alatima i metodama izrade. Opisat će se izrada cjelokupnog projekta, te će se govoriti o rješavanju problematike konstruiranja vjetroagregata

Prije početka izrade vjetroagregata trebalo je cjelokupni projekt osmisliti i staviti na papir. Internetskom pretragom i proučavanjem literatura posvećenih ovoj temi, te crtanjem rukom grubih skica osmislio se kompletan plan izrade. Odlučilo se da će se konstrukcija temeljiti na Darrieusonovoj turbini i to prema H – modelu. Sam tijek izrade sastoji se od nekoliko koraka te će se svaki od koraka detaljno opisati u nastavku.

Materijal potreban za izradu vjetroagregata:

- Drveno postolje
- Vodonepropusna iverica
- Metalna osovina
- Kuglični ležajevi
- Plastične cijevi
- Lim
- Plastična folija
- Magneti
- Nit za izradu statora
- Vijci
- Matice
- Dvokomponentno lijepilo
- Super lijepilo
- Lemna nit
- Tiskana pločica

Alat korišten za izradu vjetroagregata:

- CNC stroj
- Bušilica

- Brusilica
- Pila za metal
- Lemilica
- Kliješta
- Škare za lim

5.1 Izrada vjetroagregata

Izrada vjetroagregata je vrlo složen i kompleksan zadatak. U njegovu izradu je utrošeno jako puno vremena, truda i materijalnog sredstva. Početak izrade sastoji se od izrade postolja i ostalih drvenih dijelova.

5.1.1 Postolje i drvene komponente

Sve drvene komponente koje su potrebne za izradu agregata rađene su na CNC stroju zbog njegove visoke preciznosti izrade i estetike. Točno definirana dimenzija svakog elementa dana je stolaru koji je prema tim uputama programirao stroj.

Postolje vjetroagregata mora biti čvrsto i stabilno da podnosi nalete vjetra bez prevrtanja agregata, a i dovoljno lagano radi njegovog nošenja odnosno prenašanja sa lokacije A na lokaciju B. Imajući tu o vidu postolje je napravljeno od drva i to od drva bukve iz razloga što je to iznimno čvrsto i kvalitetno drvo. Dimenzije postolja su 50 cm x 50 x 6 cm te na sredini ima urezbanu rupu promjera 1 cm i dubine 5 cm na koju se postavlja osovina.

Slika 5.1.1.1 Drveno postolje



Jedne od lopatica koje su izrađene imaju također drvenu konstrukciju iako su one rađene od puno lakšeg materijala, napravljene su od vodonepropusne iverice. Materijala koji je vrlo kompaktan i čvrst, a vrlo pogodan za oblikovanje. Od istog su materijali izrađeni i diskovi koji služe za povezivanje lopatica. Diskovi su promjera 20 cm i središtu imaju izbušenu rupu promjera 3 cm u koju se ugrađuje kuglični ležaj.

Slika 5.1.1.2 Svi drveni elementi zajedno



5.1.2. Osovina

Osovina je okosnica cijelog vjetroagregata, na nju se pričvršćuju gotovo sve komponente potrebne za rad agregata. Uzeta je FeZn šipka promjera 1 cm koja na sebi već ima iztokarene navoje. Navedena šipka posjeduje zavidnu čvrstoću i bez problema će podnositi sva opterećenja. Najpogodnija je iz razloga jer ima navoje na sebi pa se kuglični ležajevi koji dolaze na šipku ne moraju variti nego se samo stisnu maticama s gornje i donje strane ležaja. Pomno planirajući rad na postolju je ranije izbušena rupa promjera također 1 cm, te se osovina relativno lako ubada u postolje i primjenom dvokomponentnog ljepila postoje jedna cjelina sa samim postoljem.

Slika 5.1.2 Osovina pričvršćena za postolje



5.1.3 Izrada statora

Stator je izrađen od bakrene lakom međusobno izolirane žice debljine 0.5 mm. Namot je veličine vanjskog promjera 30 mm, unutarnjeg promjera 10 mm i visine 12 mm. Izrađeno je 8 istih namota i u svakom namotu ima 400-tinjak zavoja. Za namatanje namota izrađen je improvizirani alat kućne izrade koji je osmišljen radi preciznijeg namatanja.

Slika 5.1.3 Alat za namatanje



Od drva sve naprave dvije male poluge pod pravim kutem i na kraju jednog dijela učvrstimo šipku sa navojima. Šipka s navojima je najpogodnija zato što se ne moraju variti

ostali elementi na nju nego samo podloške koje služe kao kalupi za namote učvrstimo maticama s jedne i druge strane i namatanje može početi. Pri namatanju treba pripaziti da se ne pomiješaju početak i kraj zavojnice jer je to jako važno kod spajanja statora.

Namatanje se izvodi na način da se kuglični ležaj učvrsti u škrip, a navojna šipka improviziranog alata maticama s obje strane pričvrsti se za ležaj. Kada se improvizirani alat u obliku slova L učvrsti za ležaj dobije se idealna spravica za namatanje zavojnice. Bakrena nit od koje se izrađuje statorski namot postavlja se između dvije podloške koje služe kao namotajni kalup i laganim zakretanjem ručice počinje namatanje zavojnice. Svakih par slojeva bakrene niti tekućim ljepilom stavlja se sloj lijepila kako bi namot bio čvrst te se ne bi rasipao nakon vađenja iz kalupa. Na slici 5.1.3.1 pokazan je postupak namatanja zavojnice.

Slika 5.1.3.1 Izrada namota statora



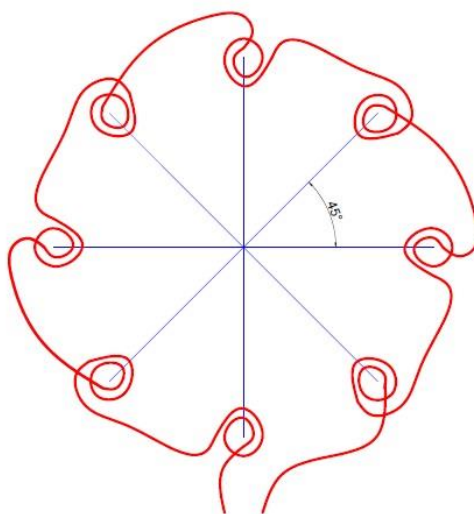
Kada se namota 8 jednakih namota, namoti postavljaju se u krug na udaljenost od 15 cm od središta, te ih se postavlja tako da su međusobno jednako udaljeni jedan od drugog. Kada je sigurno da su svi namoti na 15 cm od središta i da su jednako međusobno razmaknuti mogu se učvrstiti za postolje. Epoxidom, dvokomponentnim jakim ljepilom lijepi ih se na ranije određeno mjesto i ostavlja ih se 12 sati koliko je ljepilu potrebno za postizanje maksimalne čvrstoće. Izgled samog statora, odnosno namota fiksnih za postolje prikazano je na slici 5.1.3.2.

Slika 5.1.3.2 Stator vjetoragregata



Nakon što je lijepilo odradilo svoje, brusnim papirom ili nekim oštrim predmetom skida se izolacija s bakrene niti s početka i kraja namota te se lemilcom lemi kraj jednog namota sa krajem drugog namota i početak drugog s početkom sljedećeg i tako u kruh svih osam kao što je prikazano na slici. (Slika 5.1.3.2).

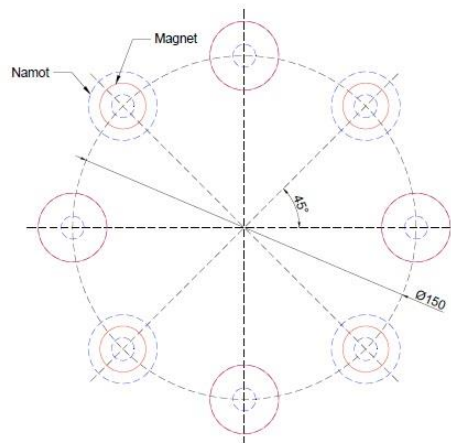
Slika 5.1.3.2 Spajanje zavojnica



5.1.4 Izrada Rotora

Rotor se sastavlja od dva dijela. Prvi dio je drveni disk koji je stolar napravio pa zadanim mjerama. Drveni disk je izrađen po dimenzijama vanjskog promjera 20 cm i u središtu ima izbušenu rupu promjera 3 cm. U rupu koja je u središtu diska umeće se kuglični ležaj koji se pričvršćuje jakim dvokomponentnim ljepilom za disk i s njim čini jednu cijelu. Od iznimne je važnosti da u kuglični ležaj tijekom izrade agregata ne uđe nikakva prljavština i prašina kako bi se mogao bez poteškoća rotirati. Drugi dio i najvažniji dio rotora čine neodimijski magneti (NdFeB), najjači permanentni magneti koji se postavljaju na 15 cm od središta isto kao i zavojnice. Postavljaju se u krug međusobno jednako razmaknuti jedan od drugoga. Svu pozornost kod njihovog postavljanja treba usmjeriti na polove magneta. Postavlja se tako da se magnet koji se postavlja odbija od susjednih, odnosno tako da svaki magnet ima sa svoje lijeve i svoje desne strane suprotan pol magneta u odnosu na svoj pol kao što je prikazano na slici. (Slika 5.1.4.).

Slika 5.1.4.1 Postavljanje magneta



Postavljanje magneta nije nimalo jednostavan zadatak kao što se čini zato što magneti zbog svoje blizine cijelo vrijeme silama djeluju jedan drugog i pomiču ga sa zadanog mjesta. U početku se planiralo magnete učvrstiti za drveni disk dvokomponentni lijepilom iz razloga jer je to ljepilo iznimne čvrstoće, međutim zbog njegovog sporog sušenja moralo se osmisлити neko drugo rješenje. Za učvršćivanje se idealno pokazalo super lijepilo zbog svog brzo sušenja, odnosno suši se u roku od par sekundi pa magneti jednostavno nemaju kada poremetiti vaše planove.

Slika 5.1.4.2 Izgled rotora



5.1.5 Izrada lopatica

Za izradu lopatica odlučilo se uzeti dvije PVC – poliviniklorid cijevi promjera 200 mm i dužine 1 m, prvobitne namjene za kanalizaciju u domaćinstvu. Cijevi su pogodne za izradu lopatica jer su čvrste, a relativno lagane, težine od oko 3.5 kg. Cijevi se prvo mjere i označuju na 70 cm dužine koliko je dogovoreno da će biti velike lopatice. Nakon što smo ih izmjerili i označili režemo ih po zadanim mjerama. Počelo se rezati ručnom pilom za plastiku ali su se cijevi pokazale poprilično teške za rezanje pa se prešlo na rezanje sa brusilicom. Kada se dobe dvije jednake cijevi po 70 cm, onda se pažljivo označuje sredina cijevi ali po dužini. Cijevi se režu po dužini na pola tako da dobijemo četiri jednake lopatice, međutim kako su potrebne samo tri jedna ostaje kao rezerva u slučaju da dođe do nekakve pogreške u daljnjoj izradi. Na slici 5.1.4.1 prikazane su cijevi spremne za rezanje.

Slika 5.1.5.1 Označavanje cijevi



Sada za 3 jednake lopatice treba napraviti kapu i podnožje kako bi se zrak bolje zavlacio u same lopatice i stvarao veću silu na njih. Kapu i podnožje odličilo se napraviti od lima, točnije od limenih plehova. Škarama za lim odrezala su se 6 jednaka komada lima dovoljne veličine da prekrije početak i kraj cijevi. Odreže se malo više lima nego što je potrebno prekrivanje početka odnosno kraja cijevi jer se lim mora saviti uz rub lopatice kako bi ga mogli pričvrstiti za samu lopaticu. Na savijeni dio lima bušilicom se izbuše rupe i vijcima se pričvrsti za lopaticu. Kada se isti postupak ponovi za sve 3 lopatice, kapa i podnožje se može pričvrstiti za cijev i dobili smo lopatice.

Kroz središte kape i podnožja treba izbušiti rupu kako bi se lopatice mogle pričvrstiti za drveni disk odnosno za osovinu. Nakon što se cijeli mehanički dio obavi kreće se na farbanje. Sprejem za farbanje oboje se svi dijelovi lopatica, farbanje se izvodi čisto iz estetskih razloga zato što su lopatice plastične odnosno od PVC materijala pa im nije potrebna nikakva posebna zaštita od korozije ni drugih vanjskih utjecaja. Slikom 5.1.5.2 prikazane su gotove lopatice.

Slika 5.1.5.2 Gotove lopatice



5.1.6 Izrada diskova

Diskovi su izrađeni od kompaktne vodonepropusne iverice kao što je ranije već objašnjeno. Izrađena su dva ista diska vanjskog promjera 20 cm i unutarnje promjera 3 cm u središtu diska. Jedan disk ujedno služio i kao rotor i kao veza između lopatica sa osovinom, a drugi samo kao veza između osovine i lopatica. U izbušenu rupu u središtu diska pričvršćuje se kuglični ležaj, pričvršćuje ga se „Epoxid“-om, dvokomponentni lijepom i pušta ga se 12 sati koliko je ljepilu potrebno da se potpuno osuši.

Drugi je korak bio izrada ekstenzija diskova, njih je najjednostavnije napraviti iz plosnatih aluminijskih lajsni. Tri jednako izrezane aluminijske lajsne duljine 25 cm i širine 4 cm postavljaju se na disk međusobno razmaknute pod kutem od 120° . Na disk se pričvršćuju duplim vijcima i maticama kako ne bi dolazilo do pomicanja prilikom većih djelovanja sile na lopatice, a za lopatice je dovoljno pričvrstiti samo jednim vijkom. Na slici 5.1.6 prikazan je disk sa kugličnim ležajem i aluminijskim ekstenzijama s ispravnim međusobnim razmakom.

Slika 5.1.6 Diskovi sa ekstenzijama



5.1.7 Gotov vjetroagregat

Kada se izrade svi elementi potrebni za rad vjetroagregata po prethodno objašnjenim koracima može se prijeći na slaganje agregata. Uzima se postolja sa osovinom i na osovinu se pričvršćuje rotor. Rotor se spušta niz osovinu sve do namota stator i matica se s obje strane stiže i fiksira na osovinu na nekoliko milimetara razmaka od namota statora. Gleda ga se staviti što je moguće bliže namotima ali opet dovoljno daleko da ne dođe do dira prilikom rotiranja.

Drugi korak je postavljanje lopatica. Lopatice se fiksiraju s donje strane na aluminijske ekstenzije rotora i s gornjem strane za ekstenzije gornjeg diska. Gornji se disk također fiksira maticama za osovinu s obje strane ležaja.

Sada je sve spremno za pokusni pokušaj vrtnje vjetroagregata i mjerenje prvih dobivenih rezultata induciranog napona i dobivene struje. Dobiva se relativno mali izmjenični napon ali zbog malih premanentnih magneta i velikih udaljenosti između zavojnica ne mogu se ni očekivati neki veliki naponi. Na slici 5.1.7 je prikazan gotov vjetroagregat.

Slika 5.1.7 vjetroagregat

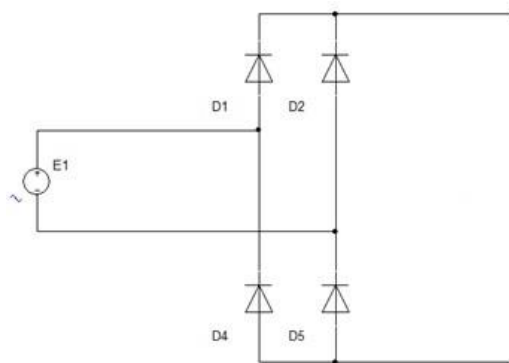


5.1.8 Izrada pločice

Nakon što je vjetroagregat gotov potrebno je osmisliti električni sklop koji će biti spojen na izlaze namota.

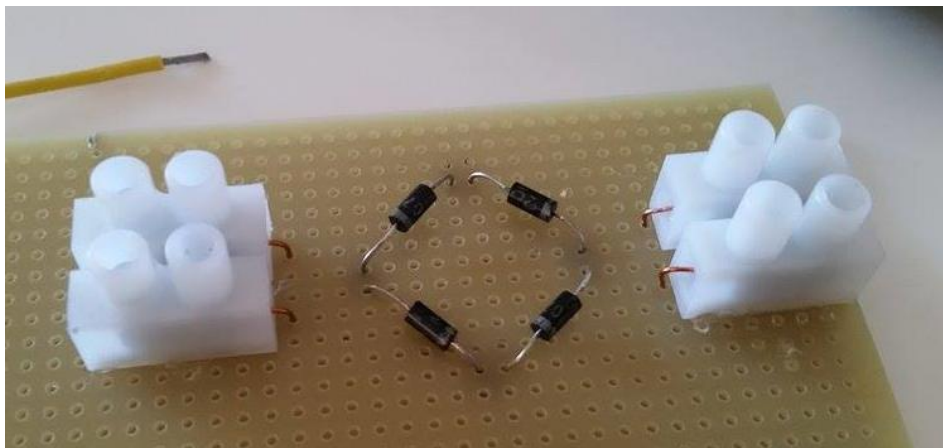
Na statorskom izlazu inducira se izmjenični napon pa se ispravljačem ispravlja u istosmjerni. Na pločici se sa 4 poluvodičke diode napravi Grecov spoj. Grecov spoj sastoji se od četiri poluvodičke diode tako da po dvije diode propuštaju u svakoj poluperiodi te se na njegovom izlazu dobiva istosmjernan napon. Shema pločice prikazana je na slici 5.1.8.1.

Slika 5.1.8.1 Shema spoja



Pločica se izvodi na način da se na plastičnu pločicu koja je namijenjena za spajanje elemenata nabode 4 poluvodičke diode i umeću se umetci za spajanje niti statora s jedne strane i s druge strane pločice umeću se umetci na kojima se izvode mjerenja. Kada se svi elementi postave na odgovarajući način, lemnom niti i lemilicom zaleme se elementi. Na slici 5.1.8.2 prikazana je gotova pločica sa svim zalemljenim elementima spremna za učvršćivanje na postolje.

Slika 5.1.8.2



5.1.9 „Lenz 2“ lopatice

Kako je zadatak u ovom radu utjecaj izvedbe lopatica na brzinu vrtnje manjih vjetroagregata s vertikalnom osi vrtnje potrebno je imati barem dvije vrste lopatica te za svake lopatice napraviti ispitivanja i mjerenja te obrazložiti kako se koje lopatice ponašaju s obzirom na brzinu vjetra. Prve lopatice, odnosno lopatice izrađene od PVC cijevi detaljno su objašnjene prethodno u ovom radu, a druge lopatice uzete su gotove samo za potrebe usporedbe. Druge lopatice možemo naći pod nazivom „Lenz 2“ lopatice, te su one prema istraživanjima koje se lako mogu naći u raznim literaturama lopatice s idealnim rezultatima za ovakav tip vjetroagregata s vertikalnom osi. Na slici 5.1.9.1 je prikazan vjetroagregat sa „Lenz 2“ lopaticama

Slika 5.1.9.1 „Lenz 2“ lopatice



5.2 Ispitivanja i usporedba lopatica

Ispitivanja se provode tako da se na 5 različitih lokacija proizvoljno odabranih, a svaka na svoj način specifična anemometrom izmjeri brzina vjetra, tahometrom izmjeri brzine vrtnje vjetroagregata, a multimetrom izmjeri inducirani napon.

Slika 5.2.1 Mjerni instrumenti: a) anemometar, b) tahometar




a)




b)

Na svakoj od odabranih lokacija izmjeri se brzina vjetra i brzina okretaja vjetroagregata sa 2 m visine u odnosu na razinu tla. Svi rezultati unesu se u tablicu, te se iz tih podataka naprave grafovi pomoću kojih se dobije grafički prikaz specifikacija pojedinih lopatica.


Tablica 1. Ispitivanje sa prve lokacije

1. Ispitivanje		
Lokacija:	Predgrađe grada	
Vrijeme	Sunčano sa naoblakom	
Brzina vjetra:	1,9 m/s	
	PVC lopatice	„Lenz 2“ lopatice
Brzina vrtnje (o/min)	25	16
Inducirani napon (V)	0,12	0,06


Tablica 2. Ispitivanje sa druge lokacije

2. Ispitivanje		
Lokacija:	Mol, 2m nadomrske visine	
Vrijeme	Sunčano sa naoblakom	
Brzina vjetra:	4,5 m/s	
	PVC lopatice	„Lenz 2“ lopatice
Brzina vrtnje (o/min)	41	49
Inducirani napon (V)	0,26	0,34


Tablica 3. Ispitivanje sa treće lokacije

3. Ispitivanje		
Mjesto:	Otvoreno polje u brdima	
Vrijeme	Sunčano sa naoblakom	
Brzina vjetra:	6,7 m/s	
	PVC lopatice	„Lenz 2“ lopatice
Brzina vrtnje (o/min)	52	64
Inducirani napon (V)	0,36	0,45

Tablica 4. Ispitivanje sa četvrte lokacije

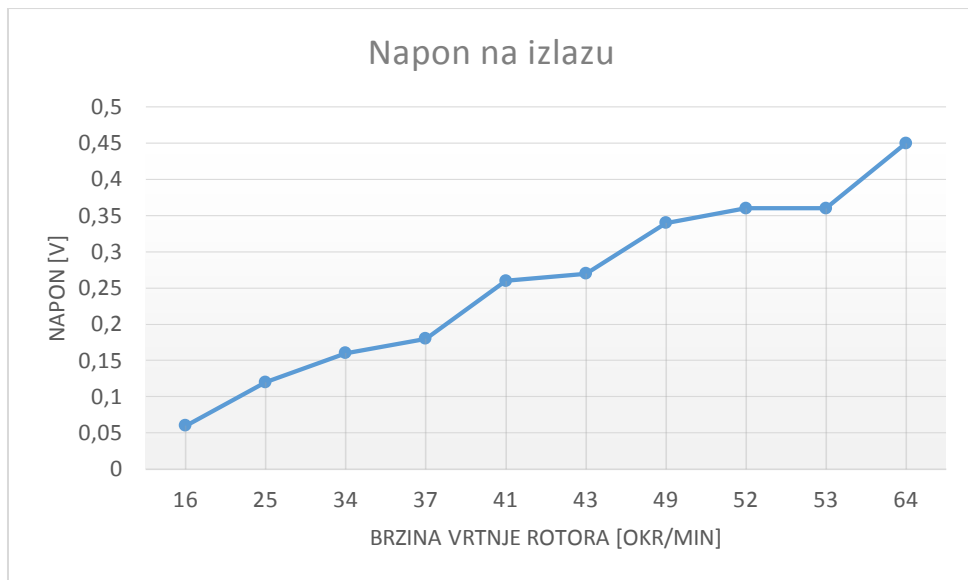
4. Ispitivanje		
Mjesto:	Središte grada, između kuća	
Vrijeme	Sunčano sa naoblakom	
Brzina vjetra:	4,8 m/s	
	PVC lopatice	„Lenz 2“ lopatice
Brzina vrtnje (o/min)	43	53
Inducirani napon (V)	0,27	0,36

Tablica 5. Ispitivanje sa pete lokacije

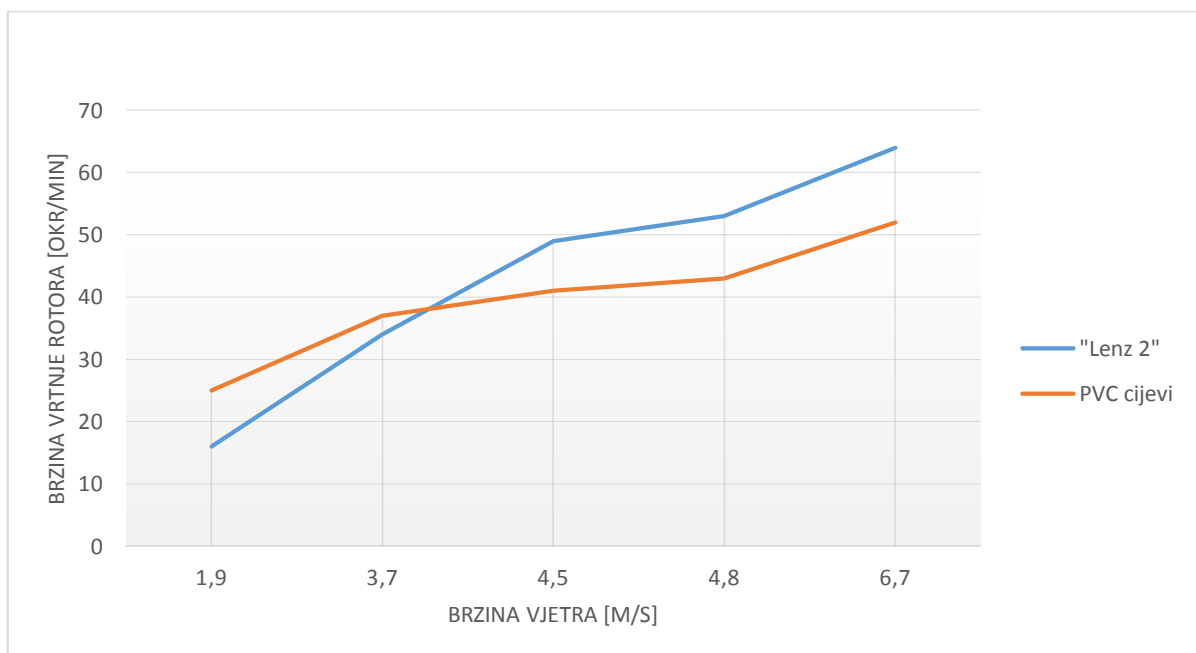
5. Ispitivanje		
Mjesto:	Mol, 2m nadomorske visine	
Vrijeme	Sunčano sa naoblakom	
Brzina vjetra:	3,7 m/s	
	PVC lopatice	„Lenz 2“ lopatice
Brzina vrtnje (o/min)	37	34
Inducirani napon (V)	0,18	0,18

Iz priloženih tablica mogu se očitati vrijednosti induciranog napona u ovisnosti brzine vjetra i brzina vrtnje rotora u ovisnosti brzine vjetra na 2 metra visine od razine tla. Uzimajući dobivene rezultate dizajnira se grafikon kojim je puno ljepše i jasnije prikazana razlika između ove dvije vrste lopatica. Grafom 1., prikazana je ovisnost brzine vrtnje rotora o brzini strujanja vjetra, a na grafu 2 prikazana je brzina vrtnje rotora svakih lopatice zasebno pri izmjerenoj brzini vjetra.

Graf 1. Ovisnost brzine vrtnje rotora i induciranog napona



Graf 2. Ovisnost brzine vrtnje rotora o brzini vjetra



Analiziranjem prvog i drugog grafa može se zaključiti da su lopatice izrađene od PVC cijevi pogodnije za područja s manje vjetra. Iz karakteristike je vidljivo da se i s vrlo malo vjetra postiže relativno dobra brzina vrtnje rotora ali im je krajna brzina nešto slabija nego kod drugih lopatica. Može se zaključiti da će one prije početi inducirati nekakav mali napon ali će pri većim brzinama vjetra njihova korisnost biti nešto manja.

Lopatice izrađene prema „Lenz 2“ modelu pokazale se da su pogodnije za mjesta sa više vjetra kao što su planine ili mjesta sklona jakim vjetrovima zato što se pri maloj brzini vjetra relativno loše okreću, dok se u okolini sa puno vjetra postižu zavidni rezultati u odnosu na druge lopatice.

6. ZAKLJUČAK

Iz svega navedenog veoma je jednostavno zaključiti kako su vjetroelektrane budućnost energetike. Njihova popularnost i upotreba rastu iz dana u dan, sukladno s porastom ljudske svijesti o obnovljivim izvorima energije.

Vjetroturbine se po svom konstrukcijskom obliku dijele na vjetroturbine s horizontalnom osi vrtnje i na one s vertikalnom osi vrtnje, a u ovome završnome radu posebnu pažnju posvetilo se upravo onima s vertikalnom osi vrtnje.

Osnovni modeli vjetroturbina s vertikalnom osi vrtnje su Darrieusov i Savoniusov model. Svaki od ova dva modela ima svoje prednosti i mane, te je sukladno s potrebama i željama njihovih osnivatelja potrebno izabrati prikladniji model. Veoma često osmišljaju se hibridni primjerci u kojima se nalaze najbolje karakteristike oba modela, kao što je npr. slučaj u navedenom primjeru Ropateca.

Veoma važnu ulogu u izgradnji vjetroelektrana ima i izbor broja lopatica. Što je lopatica manje, dolazi do veće brzine vrtnje, no isto tako takve konstrukcije su nepredvidljive i veoma

često nisu sigurne. Iz tog razloga najbolje su se pokazale vjetroturbine s tri lopatice, koje pružaju zadovoljavajuću brzinu vrtnje lopatica, a istovremeno su stabilne i sigurne.

Ne smije se zaboraviti napomenuti priključenje vjetroelektrana na elektroenergetsku mrežu. Tehnička rješenja za ovaj problem već su donjeta i propisana Zakonom, te će se njihovom primjenom smanjiti poteškoće s priključenjem za koje se do nedavno čekalo i po nekoliko godina.

Sve vodi k tome da sustav sve više ide u korist vjetroelektrana, što je veoma ohrabrujuće i daje dodatni poticaj za razvijanje ove grane.

SAŽETAK

U uvodu ovoga rada dane su osnovne uvodne rečenice, koje ukazuju na osnovnu tematiku ovoga rada i daju osnovne informacije o vjetroturbinama.

Prvo poglavlje daje uvid u ulogu vjetra u radu vjetroagregata. Prikazan je način korištenja vjetra i njegove mogućnosti, kao i na koji način se iskorištava vjetar u Hrvatskoj i koja je budućnost ove vrste energije.

U idućem poglavlju pojašnjuju se konstrukcijski oblici vjetroturbina, a osnovna podjela su vjetroturbine s horizontalnom i vjetroturbine s vertikalnom osi vrtnje. Ukazalo se na njihove prednosti i mane, te raspravilo koje su bolji i prikladniji izbor.

Posljednje poglavlje govori o izvedbi lopatica vjetroturbina s vertikalnom osi vrtnje, a kao osnovni modeli predstavljeni su Darrieusov i Savoniousov model. Dan je uvid u to na koji način lopatice utječu na brzinu vrtnje, a prikazani su i neki primjeri iz stvarnoga života – Ropatec i Solwind.

Stručni dio rada prikazuje i opisuje izvedbu izrade vjetroagregata, dok zaključak sumira sve informacije ovoga rada svodeći ih u nekoliko osnovnih činjenica.

LITERATURA

- [1] Granić, G., Enwind – program korištenja energije vjetra, Energetski institut Hrvoje Požar, Zagreb, 1998., str. 12.
- [2] Slika preuzeta s web stranice Copenhagen Photographer, <http://copenhagenphotographer.com> (datum preuzimanja 04.05.2015.)
- [3] Granić, G., Enwind – program korištenja energije vjetra, Energetski institut Hrvoje Požar, Zagreb, 1998., str. 99.
- [4] D., Pešut, Uvođenje regionalnog planiranja energetike u hrvatske županije, 6.forum HEDA, Zagreb, prosinac 1997.
- [5] Pilić – Rabadan, Lj., Standardizacija u području vjetroenergetskih postrojenja, Zbornik Energija i zaštita čovjekove okoline, Opatija, 1992., I, 93 - 98
- [6] Podatci preuzeti s web stranice Bioregio, <http://www.bioregio.link/hr> (datum preuzimanja 08.05.2015.)
- [7] Slika preuzeta s web stranice Croenergo, <http://www.croenergo.eu> (datum preuzimanja 08.05.2015.)
- [8] Podatci za izradu tablice preuzeti iz Pilić – Rabadan, Lj., Studija o mogućnostima proizvodnje električne energije iz energije vjetra u RH, Hrvatska elektroprivreda, FESB, Split, 1996.

- [9] Slika preuzeta s web stranice Stav, <http://stav.cenzura.hr> (datum preuzimanja 09.05.2015.)
- [10] Pilić – Rabadan, Lj., Vodne turbine i pumpe, vjetroturbine, Sveučilište u Splitu, Split, 2000., str. 370.
- [11] Mays, J., The status and prospects for Wind Energy, EU WEC, Goteborg, 1996.
- [12] Milborrow, D., Wind turbine Output and Efficiency, Wind Stats Newsletter, Vol 10, No.3., 1997.
- [13] Klarin, B., Izbor optimalne vjetroturbine pomoću ekspertnog sustava, Magistarski rad, FSB, Zagreb, 1995.
- [14] Slika preuzeta s web stranice ODT, <http://www.odt.co.nz> (datum preuzimanja 13.05.2015.)
- [15] Chadwick, H., Accessing the Wind Resource Using Modelling Techniques, De Montfort University, Amset Wind Energy Training Course, 1997.
- [16] Vinković, I., Vjetroturbine, Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2009.
- [17] Slika preuzeta s web stranice Powered by Mother Nature, <http://www.poweredbymothernature.com> (datum preuzimanja 14.05.2015.)
- [18] Podatak preuzet s web stranice Clean Technica, <http://cleantechnica.com> (datum preuzimanja 15.05.2015.)
- [19] Pilić – Rabadan, Lj., Vodne turbine i pumpe, vjetroturbine, Sveučilište u Splitu, Split, 2000., str. 212.
- [20] Slika preuzeta s web stranice ReUK, <http://www.reuk.co.uk> (datum preuzimanja 15.05.2015.)
- [21] Dizdarević, N., Mrežna pravila za vjetroelektrane, Energetski institut Hrvoje Požar, Graditeljska škola, Čakovec, 2007., str. 91.
- [22] Karadža, N., Primjena i korištenje energije vjetra, Energetski institut Hrvoje Požar, Graditeljska škola, Čakovec, 2007., str. 113.
- [23] Gaudiosi, G., Offshore Wind Energy Potential in the Mediterranean, Proc. 2nd World Renewable Congress Reading, 1993., 1622 - 1633

- [24] Podatak preuzet s web stranice Wind Power Engineering, <http://www.windpowerengineering.com> (datum preuzimanja 17.05.2015.)
- [25] Podatak preuzet s web stranice Wikipedia, <http://en.wikipedia.org> (datum preuzimanja 23.05.2015.)
- [26] Slika i podatci preuzeti s web stranice Eco Sources, <http://www.ecosources.info> (datum preuzimanja 27.05.2015.)
- [27] Slika preuzeta s web stranice Pes Wiki, <http://peswiki.com> (datum preuzimanja 27.05.2015.)
- [28] Slika preuzeta s web stranice Such a Blog, <http://www.suchablog.com> (datum preuzimanja 02.06.2015.)
- [29] Slika preuzeta s web stranice Wind Works, <http://www.wind-works.org> (datum preuzimanja 03.06.2015.)
- [30] Slika i podatci preuzeti s web stranice Eco Sources, <http://www.ecosources.info> (datum preuzimanja 06.06.2015.)
- [31] Podatak preuzet s web stranice ReUK, <http://www.reuk.co.uk> (datum preuzimanja 22.06.2015.)
- [32] Slika preuzeta s web stranice Wikipedia, <http://en.wikipedia.org> (datum preuzimanja 22.06.2015.)
- [33] Podatak preuzet s web stranice Flettner, <http://flettner.co.uk> (datum preuzimanja 24.06.2015.)
- [34] Slika preuzeta s web stranice Flettner, <http://flettner.co.uk> (datum preuzimanja 24.06.2015.)
- [35] Slika preuzeta s web stranice Antonine Education, <http://www.antonine-education.co.uk> (datum preuzimanja 25.06.2015.)
- [36] Slika preuzeta s web stranice Whirlopedia, <http://www.whirlopedia.com> (datum preuzimanja 25.06.2015.)
- [37] Podatci i slika preuzeti s web stranice Wikipedia, <http://en.wikipedia.org> (datum preuzimanja 26.06.2015.)

[38] Podatak preuzet s web stranice Quora, <http://www.quora.com/> (datum preuzimanja 26.06.2015.)

[39] Slika preuzeta s web stranice Renewegy, <http://renewegy.com/> (datum preuzimanja 26.06.2015.)

[40] Slika preuzeta s web stranice Soe Townsville, <http://www.soe-townsville.org> (datum preuzimanja 28.06.2015.)

[41] Podatak preuzet s web stranice Mragheb, <http://mragheb.com/> (datum preuzimanja 28.06.2015.)

[42] Slika preuzeta s web stranice Soe Townsville, <http://www.soe-townsville.org> (datum preuzimanja 28.06.2015.)

POPIS SLIKA I TABLICA

1. Slika 2.1. More je odlična lokacija za postavljanje vjetrenjača, str. 4.
2. Slika 2.2. Primjer manjih vjetroagregata, str. 5.
3. Slika 2.3. Primjer vjetroelektrane na Pelješcu, str. 7.
4. Slika 3.1. Vjetroturbina s jednom lopaticom, str. 9.
5. Slika 3.2. Vjetroturbina s horizontalnom osi vrtnje, str. 10.
6. Slika 3.3. Savoniusov (lijevo) i Darrieusov (desno), str. 11.
7. Slika 4.1. Podvrste Darrieusove vjetroturbine, str. 16.
8. Slika 4.2. H-tip Darrieusove vjetroturbine, str. 16.
9. Slika 4.3. Horizontalni oblik Darrieusove? str. 17.
10. Slika 4.4. „Farma“ Darrieusovih vjetroturbina, str. 18.
11. Slika 4.5. „Wind it“ projekt, str. 18.
12. Slika 4.6. Savoniusov model vjetroturbine, str. 19.
13. Slika 4.7. Primjena Flettnerova ventilatora, str. 20.
14. Slika 4.8. Rotirajući reklamni znak, str. 20.
15. Slika 4.9. Primjer Savoniusove vjetroturbine, str. 21.
16. Slika 4.10. Darrieus – Savonius vjetroturbina, str. 23.
17. Slika 4.11. Prve vjetroturbine s velikim brojem lopatica, tzv. američke vjetroturbine, str. 23.
18. Slika 4.12. Ropatec model, str. 24.

19. Slika 4.13, Solwind model, str. 26.

1. Tablica 2.1. Iskorištavanje vjetra na jadranskim otocima, str. 6.