

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Стефан В. Петровић

Конструкција ветрогенератора

мастер рад

Крагујевац, 2018.

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Мастер академске студије

Модул: Машинске конструкције и механизација

Предмет: Примена рачунара у развоју производа

Број индекса: 331/2015

Стефан В. Петровић

Конструкција ветрогенератора

мастер рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. **Др Ненад Марјановић - ментор**

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог мастер рада кандидат треба да:

- Опише улогу и примену ветрогенератора
- Објасни правила за прорачун и конструисање ветрогенератора
- Да препоруке за конструисање
- Кроз конкретан пример прикаже ток конструисања једног ветрогенератора мале снаге
- У склопу рада приложи цртеже свих компоненти система

Препоручена литература:

[1] Марјановић Н., Јовичић С.; Основи конструисања, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2011

[2] Hemami A.; Wind Turbine Technology, *Associate of McGill University*, Montreal, Canada

[3] Плазинић С.; Приручник за постављање малих ветрогенератора, АМГ књига, Београд, 2011

Крагујевац, Јун 2018

ментор:

Др Ненад Марјановић, редовни професор

Резиме:

Обновљиви извори енергије су постали доминантан извор електричне енергије јер необновљивих извора има све мање, а и њихов штетни утицај је све израженији у последњих неколико година. Енергија која се све више користи у свету, па самим тим има све већу примену и на територији наше земље је енергија ветра. Истраживања су показала да је код нас најпогодније подручје за постављање ветрењача на подручју источне Србије и у овом случају би се добијена електрична енергија користила у најзабаченијим локацијама. У оквиру овог рада је извршено прикупљање, систематизација и анализа података везаних за ветрогенераторе, затим и поступак пројектовања ветрогенератора мале снаге. Циљ рада је да се конструише модел ветрењаче чија би намена била производња електричне енергије која би се користила за напајање малих потрошача, одређене намене.

Кључне речи: енергија, ветар, ветрогенератор.

Abstract

Renewable energy sources have become the dominant source of electricity, as non-renewable sources have less and their detrimental effect has been more pronounced in the last few years. Energy that is becoming more and more used in the world, and consequently there is increasing application and the energy of the wind is on the territory of our country. Research has shown that the most suitable area for windmills in the eastern part of Serbia is in our country, and in this case the received electricity would be used in the most famous locations. Within this paper, the collection, systematization and analysis of data related to wind generators, and the low-power wind turbine design process were carried out. The aim of this paper is to construct a wind turbine model whose purpose would be to generate electricity that would be used to power small consumers for a specific purpose.

Key words: energy, wind, wind turbine.

Садржај

1. Увод.....	1
2. Ветар.....	2
2.1. Утицај храпавости површине на јачину ветра	2
2.2. Параметри ветра	3
3. Ветрогенератори	5
3.1. Ветротурбине са хоризонталном осом ротора	5
3.1.1. Ротор	6
3.1.2. Лопатице	6
3.1.3. Средиште ротора	6
3.1.4. Гондола.....	7
3.1.5. Кочиони механизам.....	7
3.1.6. Спороходно и брзоходно вратило	7
3.1.7. Зупчасти преносник (Мењач).....	8
3.1.8. Генератор	8
3.1.9. Анемометар.....	9
3.1.10. Стуб	9
3.1.11. Механичке карактеристике ветротурбина	10
3.2. Ветротурбине са ветрикалном осом ротора.....	13
3.2.1. Даријусов тип	13
3.2.2. Савонијусов тип	15
4. Анализа примене ветротурбина.....	17
4.1. Ветротурбине у свету.....	17
4.2. Енергетски потенцијал ветра у Србији	19
5. Развој производа – мали вертикални ветрогенератор	20
5.1. Енергетски утрошак породице.....	20
5.2. Дефинисање техничког задатка	21
5.3. Структура функција система.....	22
5.4. Генерисање концепта	23
5.5. Дизајн делова ветрогенератора	27
5.5.1 Ротор	27
5.5.2 Главно вратило.....	29
5.5.3 Мало вратило.....	30
5.5.4 Спојнице	31
5.5.5 Генератор	32

5.5.6	Кућиште генератора	33
5.5.7	Постоље ветрогенератора	33
5.5.8	Коначан изглед модела ветрогенератора.....	34
5.6.	Прорачун делова конструкције	35
5.7.1.	Одређивање обртног момента	36
5.7.2.	Прорачун главног вратила	37
5.7.3.	Прорачун одабраних лежајева	38
5.8.	Радионичка документација	42
6.	Закључак	43
	Литература	44

Списак слика

Слика 1. Пораст брзине са повећањем висине ветра [5]	2
Слика 2. Анемограф [6]	3
Слика 3. Анемометар [7].....	3
Слика 4. Основни елементи ветротурбине са хоризонталном осом [8].....	5
Слика 5. Повећање димензија и снаге ветротурбина [10]	9
Слика 6. Врсте торњева [9].....	10
Слика 7. Дијаграм сила које делују на лопатицу турбине [6].....	10
Слика 8. Преламање ветра у ветротурбини [10].....	11
Слика 9. Годишња расподела брзина ветра [5]	12
Слика 10. Даријусов тип ветротурбине [14]	13
Слика 11. Тип Н [14]	14
Слика 12. Тип са закривљеним лопатицама [14].....	14
Слика 13. Изглед Савонијусове турбине [14].....	15
Слика 14. Потрошња електричне енергије у свету	17
Слика 15. Инсталирана снага ветрогенератора у свету [15]	17
Слика 16. Модерни облици ветрикалних ветротурбина [14].....	18
Слика 17. Типичне снаге ветра на територији Србије [6]	19
Слика 18. Општа функцијска структура	22
Слика 19. Ветрогенератор са закривљеним лопатицама [14]	23
Слика 20. Даријусова ветротурбина [14]	24
Слика 21. Савонијус ветротурбина [17]	25
Слика 22. Прелиминарни модел ветрогенератора	26
Слика 23. Склоп ротора	27
Слика 24. Изглед једне лопатице	28
Слика 25. Носач лопатица	28
Слика 26. Главно вратило	29
Слика 27. Ушица за ношење ветрогенератора	29
Слика 28. Приказ улежиштења главног вратила	30
Слика 29. Мало вратило.....	30
Слика 30. Крута спојница са наглавком	31
Слика 31. Круте спојнице са ободом	31
Слика 32. Генератор.....	32
Слика 33. Кућиште генератора; Лево - постолје; Десно - поклопац	33
Слика 34. Постолје ветрогенератора	33
Слика 35. Коначан изглед ветрогенератора.....	34
Слика 36. Склоп турбине без генератора	35
Слика 37. Модел вратила за које се врши прорачун	37
Слика 38. Оптерећење вратила	38
Слика 39. Конусни ваљкасти лежај	40
Слика 40. Буричасти дворедни лежај	41

Списак табела

Tabela 1. Највећи произвођачи ветрогенераторау свету	18
Tabela 2. Уређаји у домаћинству са пописаном потрошњом	20
Tabela 3. Потрошња једног домаћинства на годишњем нивоу	21
Tabela 4. Технички задатак	21
Tabela 5. Потребе корисника	22
Tabela 7. Основне карактеристике генератора	32

1. Увод

Последњих деценију и по, свет је био забринут због гасова стаклене баште, климатских промена и недостатка извора енергије. Последице ефекта стаклене баште укључују екстремно велике промене времена, као и топљење глечера што за последицу има ширење разних болести.

Све је већа потреба за новим начинима искоришћења енергије. Потребна је алтернатива како би се смањио притисак на тренутно најзаступљеније изворе енергије попут фосилних горива, који ће у будућности вероватно бити исцрпљени и не могу се обновити. Обновљиви извори енергије могу спречити трајно уништавање животне средине [1].

Период фосилних горива је далеко од краја, али њихов доминантан ефекат опада. Док се потражња за енергијом повећава, удео фосилних горива благо опада на глобалном нивоу. Технологије обновљиве енергије чине половину нових капацитета инсталираних да задовоље све већу потражњу енергије последњих година. Водеће технологије су хидроенергија и ветар. Повећање обновљиве енергије се мења ценом нафте. Високе цене нафте резултирају у повећању удела обновљиве енергије, посебно ветра и сунчевог зрачења. Иако је цена нафте висока, смањује се удео осталих фосилних горива попут угља и гаса, а ниске цене нафте резултирају мањим уделом обновљивих извора [2]. Стога, енергија ветра постаје све популарнија као енергетски извор великог обима, пошто се цена нафте не глобалном тржишту повећава.

Ветар је можда најлакше доступни извор обновљиве енергије на Земљи и не изазива никакво загађење. Међутим, како би ветар постао поуздан извор енергије, неопходан је дизајн ветрогенератора.

Ветрогенератор је машина која може претворити кинетичку енергију добијену од ветра у електричну енергију [3]. За савремене ветрогенераторе са хоризонталном осом обртања, енергија ветра изазива обртање две, три или више лопатица око ротора. Стварни процес конверзије користи основну аеродинамичку потисну силу да би произвела позитиван обртни момент на вратилу. То резултира производњом механичке снаге која се мења у електричну енергију у генератору. Ове машине могу да генеришу енергију само ако постоји ветар који је већ доступан у том тренутку.

2. Ветар

Ветар је хоризонтално струјање ваздушних маса настало услед разлике температуре, односно просторне разлике у ваздушном притиску [4]. Ветар је последица Сунчевог зрачења тј. енергија ветра је трансформисани облик сунчеве енергије, а на његове карактеристике у великој мери утичу и географски чиниоци. Ветрови се грубо могу дефинисати на глобалне (сталне) и локалне. Постоје делови Земље на којима дувају такозвани стални ветрови и на тим подручјима је искоришћење енергије ветра најисплативије.

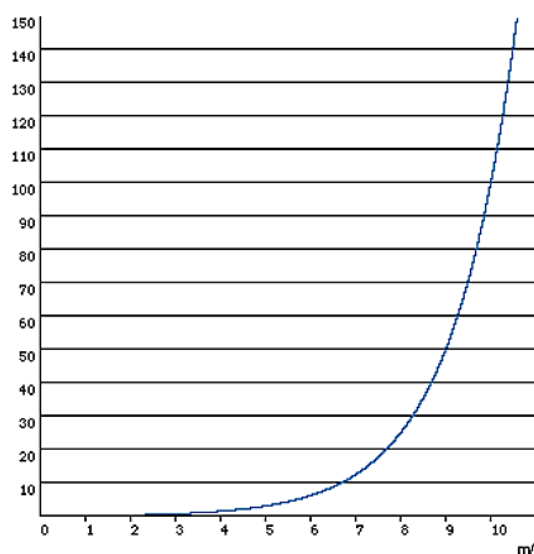
Глобални ветрови дувају од екватора према хладнијим Земљиним половима а како је топао ваздух лакши од хладног, он се подиже на веће висине и путује према северном и јужном полу.

Локални ветрови се појављују услед разлике у температури копна и мора, односно долина и висоравни. Ови, такозвани површински ветрови зависе од тла, до 100 метара висине, и управо су они битни за анализу енергетске исплативости ветра која је потребна за ветрогенераторе.

2.1. Утицај храпавости површине на јачину ветра

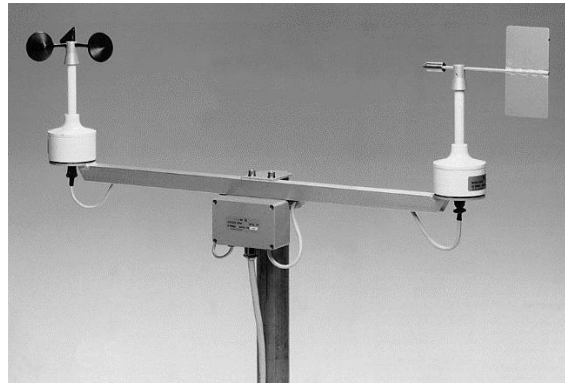
На самом тлу брзина ветра једнака је нули због силе трења која успорава струјање флуида, док на висинама од преко једног километра тло нема готово никакав утицај на брзину ветра.

Храпавост површине има велики утицај на брзину ветра (слика 1) па тако с порастом храпавости расте и отпор услед чега се ветар успорава. Шуме и велики градови су места велике храпавости док путеви и бетонске површине стварају врло мали отпор таласању ветра. Водене површине стварају најмање отпора ветру док са друге стране травнате површине пуне грмља значајно успоравају ветар [5].



Слика 1. Пораст брзине са повећањем висине ветра [5]

Мерење брзине ветра се врши анемографом (слика 2.) или анемометром (слика 3.) и изражава се у километрима на сат. Најчешћу примену има Фусов анемограф који може мерити правац, средњу и тренутну брзину ветра.



Слика 2. Анемограф [6]



Слика 3. Анемометар [7]

2.2. Параметри ветра

Према Бернулијевој једначини која описује закон о очувању енергије честице флуида одређене масе следи [5]:

$$z + \frac{p}{\rho \cdot g} + \frac{v^2}{2g} = C$$

где су:

$$z + \frac{p}{\rho \cdot g} \quad - \text{потенцијална енергија}$$

$$\frac{v^2}{2g} \quad - \text{кинетичка енергија}$$

Потенцијална енергија је због мале масе ваздуха занемарљива па из горње једначине следи да струја ветра има само кинетичку енергију.

$$E_k = \frac{mv^2}{2}$$

Маса ваздуха која струји кроз неки пресек A брзином v , густине ρ , једнака је:

$$m = \rho Av$$

Када се једначина (3) уврсти у једначину (2) добија се снага ветра:

$$P = \frac{1}{2} \rho v^2 A$$

Постоји и параметар који дефинише ветар, а то је удар ветра који се може дефинисати као брзина ветра у трајању од неколико секунди. Код нас је веома позната кошава која има честе ударе великог интензитета.

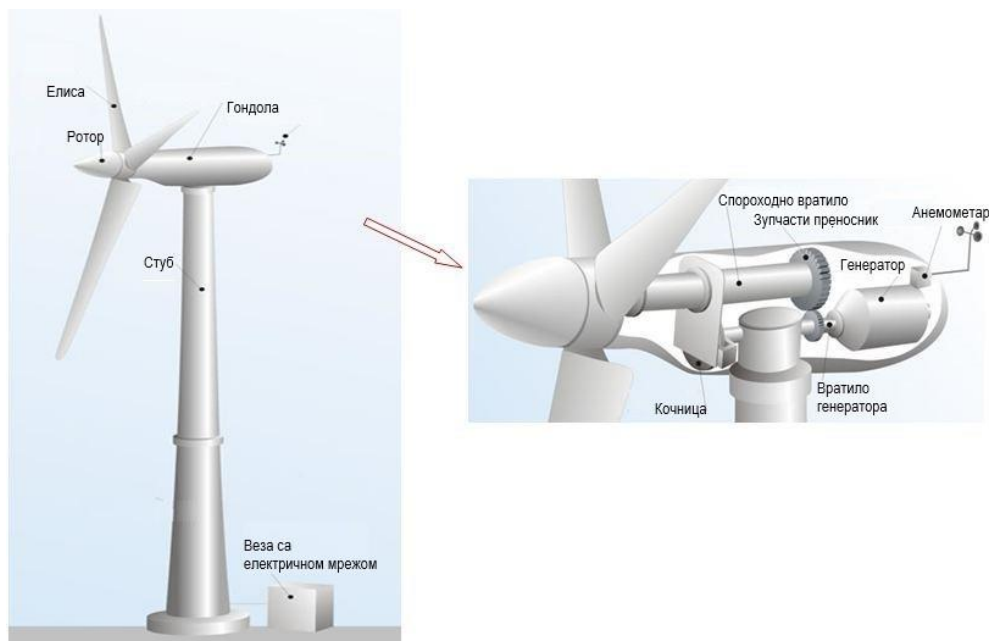
3. Ветрогенератори

Ветрогенератори (ветротурбине) се појављују у разним дизајнима са различитим излазима и ефикасностима, али сви претварају кинетичку енергију садржану у ваздуху у механички рад. Основни задатак је да се постигне максимални степен искоришћења и стабилан рад у што ширем опсегу брзина ветра. Предвођени побољшањима у аеродинамичком и конструкцијском дизајну, технологији материјала и механичком, електричном и контролном инжењерингу, модерни ветрогенератори су способни да произведу неколико мегавата електричне енергије. Постоје две врсте ветротурбина, и то:

- са хоризонталном осом ротора
- ветрикалном осом ротора

3.1. Ветротурбине са хоризонталном осом ротора

Најчешћи тип ветротурбине је са хоризонталном осом. Ови типови турбина углавном су намењени комерцијалној употреби. Основне компоненте су ротор, зупчасти преносник, анемометар, генератор, управљачки систем и стуб (слика 4.).



Слика 4. Основни елементи ветротурбине са хоризонталном осом [8]

Турбине овог типа могу бити постављене уз ветар или низ ветар. Турбине постављене низ ветар се саме прилагођавају ветру. Велики недостатак им је што стварају буку и механичке вибрације током рада јер лопатице пролазе кроз заветрину стуба. Пречник ротора, број и угао окретања лопатица ротора, висина гондоле, као номинална електрична снага су главни фактори који утичу на дизајн.

Да би се оптимизовале перформансе излазне снаге, потребно је пажљиво размотрити избор односа између пречника ротор и висине главчине. Како би се избегло оштећење, систем контроле мора осигурати да номинална снага мотора ветротурбине не прелази максималну снагу дозвољену за генератор.

Главне предности су високи производни капацитети, побољшана ефикасност, капацитети сечива са променљивим тачкама и високи торањ за хватање велике количине енергије ветра. Такође постоје недостаци, као што су бука при раду, убијање птица, сметње на радио станицама, ТВ преносима и радарима, коришћење земљишта.

3.1.1. Ротор

Овај део елемент ветротурбине. Ротор се састоји од роторских лопатица и средишта. Производња електричне енергије зависи од интеракције ротора са ветром. Брзину ротације ротора зависи уско зависи од пречника, што значи да треба прилагодити пречник ротора према брзини ветра. Ротор мора да ради континуално, тако да мора бити дизајниран с тим на уму да је одржавање скупо [9].

Постоје неки основни параметри ротора који се морају узети у обзир, при чему је први снага P , са одређеном брзином, V . Такође, коефицијент снаге ротора, C_p и ефикасност других компонената као што су, механички преносник, генератор [9].

3.1.2. Лопатице

Већина турбина има елису са две или три лопатице. Ветар дува преко лопатица подижући их, што доводи до ротације јер су лопатице једним крајем причвршћене за ротор. Перформансе ветротурбине су у потпуности зависне од броја лопатица причвршћених на ротор и њихових геометријских димензија. Са технолошке стране гледано, јако тешко је направити их јер захтевају велику издржљивост. После првих покушаја са челиком који је исувише тежак, и алуминијумом данас се искључиво праве од композитних материјала а најчешће од стаклених влакана ојачане пластике. При изради лопатица користи се технологија која је делом позната из авио-индустрије јер се дизајн лопатица поистовећује са дизајном крила авиона. Коришћење карбонских влакана за ојачавање је могуће али је веома неекономично за велике турбине. Челичне легуре и алуминијум се због своје тежине некада користе само при изради малих ветротурбина [9].

3.1.3. Средиште ротора

Висина средишта ротора је висина од тла до центра ротора. Средиште повезује лопатице са главним вратилом при чему мора да издржи сва оптерећења која долазе из лопатица. Средиште је круто, најчешће је направљено од нодуларног лива, прекривено конусом како би се спречили спољашњи утицаји околине [9]. Материјал који се користи за конструкцију конуса има сличне композиције као што се користе у изради лопатица. Дизајн крутог средиште задржава све главне делове на месту у односу на главну осовину. Круто средиште мора бити довољно јако да издржи оптерећења која се формирају од аеродинамичких и динамички индукованих оптерећења (ротација) на лопатицама.

3.1.4. Гондола

Гондола је кућиште или кутија смештена на врху торња (стуба) и служи као заштита од околине за неке главне компоненте као што су генератор и механички преносник односно мењач. Нацрт мора бити довољно јак да се носи са великим бројем терета. Сила свих компоненти, укључујући ротор, преносе се кроз гондолу и на торањ. Главни извор оштећења гондоле је влага која се мора узети у обзир у ветротурбинама. Површина унутар турбине добро је заштићена различитим премазима и бојом, али се и даље може одржати влага, а оштећења због влаге може потрајати много година. Свака влага унутар структуре турбине повећава опасност од корозије и кондензације. Ови фактори доводе до кратког споја и оштећења електронике. Постоје и опасности од пожара када су у питању ветротурбине. Ватра се може појавити услед техничке грешке. Поклопац гондоле је обично направљен од пластике попут фибергласа који су веома запаљиви [11].

3.1.5. Кочиони механизам

Ветротурбине морају бити у могућности да се зауставе у случају кvara критичних компоненти или ако брзина ветра прелази критичну границу. Ако ветротурбина не кочи, брзина ротације може довести до губитка у целој структури. Постоје два типа кочионих система:

- аеродинамички и
- механички.

Аеродинамички кочиони систем је главни кочиони систем за ветрогенераторе. Лопатице се окрећу за 90 степени дуж њихове уздужне осе и обично су повезане са опругом. У случају нестанка струје, аутоматски се покрећу ако постоји пад притиска у хидрауличком систему. Аеродинамични кочиони систем се сматра безбедним јер ће се ротор зауставити за неколико ротација [12].

Механички кочиони систем се користи као резервни систем за аеродинамичку кочницу и користи се за заустављање ротора. Независтан кочиони капацитет мора бити обезбеђен механичким кочионим системом који зауставља ротор без помоћи аеродинамичног система. Мале турбине могу се зауставити механичком кочницом, али у већим турбинама систем између мењача и генератора је пројектован да ради као кочница за заустављање [12].

3.1.6. Спороходно и брзоходно вратило

Главна функција вратила је пренос обртног момента. Вратило са малим брзином обртања и брзоходно вратило су важне компоненте у производњи електричне енергије и њихова функција је повезана. Када се ротор ротира, вратило са ниским бројем обртаја ротира према брзини ротора. Мењач затим претвара ротацију вратила мале брзине на вратило са високом брзином. Вратило велике брзине је прикључено на генератор, који претвара механичку енергију у електричну енергију. Најчешћи проблем дизајна за вратила је замор због оптерећења која преносе. Вратила такође имају природне фреквенције са "критичним брзинама".

Те брзине се морају избећи како би се избегле велике вибрације. Најчешћи материјал који се користи за израду вратила је угљенични челик или легирани челик [9].

3.1.7. Зупчасти преносник (Мењач)

Повезује зупчаницима спороходно вратило са вратилом генератора. Сврха преносника је да убрза стопу обртаја ротора од ниске вредности (десетине обртаја у минути) до стопе обртаја довољне да покрену стандардни генератор (стотине или хиљаде обртаја у минути).

Недовољно подмазивање, или оштећење услед других фактора могу довести до оштећења зуба, а мењач ће трајно пропасти. Ово изискује велике трошкове поправке или промене мењача, па је правилно одржавање кључно питање у повећању животног века овог дела турбине [13].

3.1.8. Генератор

Електрични генератори претварају механичку снагу у електричну енергију. Генератори који се користе за овај тип ветротурбина су синхрони или индукциони генератори, али чешћу примену имају индукциони генератори. Разлог томе су цикличне варијације у обртном моменту ротора. Снага генератора достиже и до 5MW код најјачих модерних турбина. Постоји много дизајна генератора, укључујући и неке са новим снажним трајним магнетима [12].

Индукциони генератор има неротирајући део звани статор који је повезан са мрежом. Да би се смањили бука и електрични губици, статор има трофазно навијање на ламеларно челично језгро. Њихова функција је да стварају магнетно поље које ротира при константној брзини. Иако индукциони генератор и синхрони генератор имају сличне статоре, њихове конфигурације ротора су веома различите. Индукциони генератори су поузданији и нису скупи. Такође имају и механичка својства која одговарају ветротурбинама. Ротор има бројне алуминијумске шипке, а те шипке су прикључене на струју помоћу алуминијумских завршних прстена. Брзина генератора се мења према брзини ротора.

Када се промени обртни момент генератор ће повећати или смањити његову брзину. То је један од најважнијих разлога за избор асинхроног генератора, а не синхроног генератора. Мање ветротурбине такође користе индукционе генераторе из истих разлога, али углавном зато што су јефтине [9].

Синхрони генератор такође има статор са истом функцијом као индукциони генератор. Ротор за овај тип генератора има пољу намотаја да носи директну струју, што ствара магнетно поље. Ротирајуће поље, које се састоји од намотаја статора, повезује се у магнетно поље што доводи до тога да ротор ротира константном брзином. Излазни напон из генератора мора да се трансформише у једносмерну струју. Ова једносмерна струја се затим претвара у наизменичну и обликује у напон који одговара мрежи. Овај процес омогућава производњу електричне енергије из малих бројева обртаја. Али и поред тога, ова конструкција система је компликована и стога је скупа [9].

3.1.9. Анеометар

Мора постојати прецизно мерење параметра ветра за систем контроле нагиба и закретања лоптица како би се одржала динамичка стабилност и поуздан рад ветрењача. Сакупљање тачних података о брзини ветра може бити проблематично, али веома важно за турбине. Ове информације се прикупљају са анеометрима, који играју кључне улоге у пружању података систему. Анеометри се постављају врху турбине [9].

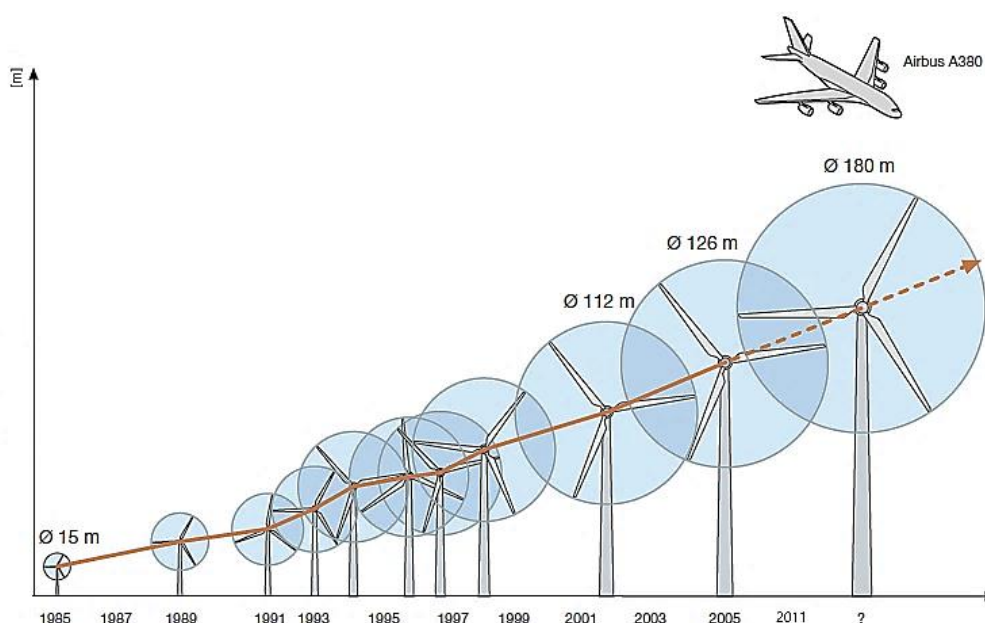
3.1.10. Стуб

Висина једног стуба је веома важна када су у питању перформансе ветрогенератора, јер брзина ветра расте са висином.

Компликована је интеракција између висине инсталације турбине и брзине ветра. На брзину ветра утичу турбуленције које настају у планинским, брдским пределима, затим густо насељеним пределима где утичу зграде, дрвеће и слично. Међутим, са повећањем висине од тла, повећава се и брзина ветра. Стога, турбине са што већом висином добијају већу брзину ветра и могуће је користити веће лопатице које повећавају производњу електричне енергије.

У случају примене турбина са хоризонталном осом, стуб мора бити довољно висок да лопатице не додирну земљу док се ротирају. Али генерално, висина је 1 до 1,5 пута већа од пречника ротора [9].

На слици 5 може се видети колико се номинална снага ветротурбине повећава пропорционално са повећањем димензија лопатица и висином торња.



Слика 5. Повећање димензија и снаге ветротурбина [10]

Постоје различите врсте торњева (слика 6). Већина великих ветрогенератора користи цевасте челичне стубове или бетонске, а цена израде торња износи око 20% укупних трошкова изградње. У примени су цевасте челичне или бетонске стубове, решеткасти, треножни,

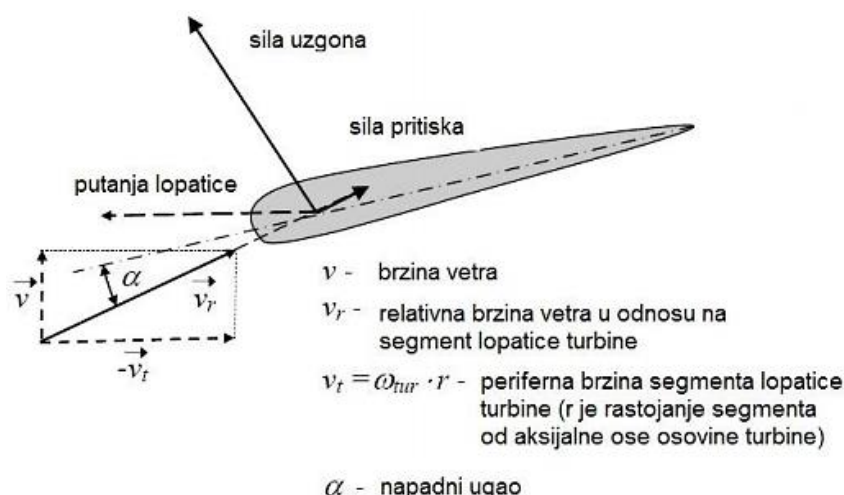


Слика 6. Врсте торњева [9]

3.1.11. Механичке карактеристике ветротурбина

Конверзија кинетичке енергије ветра у обртно кретање турбине се врши захваљујући аеродинамичком профилу лопатица ветротурбине. На слици 7 приказан је попречни профил лопатице ветротурбине и означене су силе које делују на њу. Лопатица турбине има аеродинамички профил, па ваздух са предње стране лопатице струји спорије од ваздуха са задње стране, гледано у смеру ветра. Због разлике у брзинама струјања ваздуха јавља се разлика у притисцима са задње и предње стране лопатице турбине, услед чега се јавља узгонска сила, чија пројекција на раван ротације генерише обртни момент. Осим узгонске силе, на лопатицу такође делује и сила директног притиска ветра, али је њен утицај на обртни момент доста мањи [10].

С обзиром да лопатица ротира, за силе које делују на лопатицу меродавна је брзина ветра (v) и обимна брзина (v_t) посматраног сегмента лопатице, односно релативна брзина ветра у односу на лопатицу турбине (векторска сума обимне брзине лопатице са (-) предзнаком и брзине ветра). Сваки сегмент лопатице има различиту брзину (сегменти даљи од осе ротације имају већу обимну брзину), те се и релативна брзина ветра мења дуж лопатице [6].



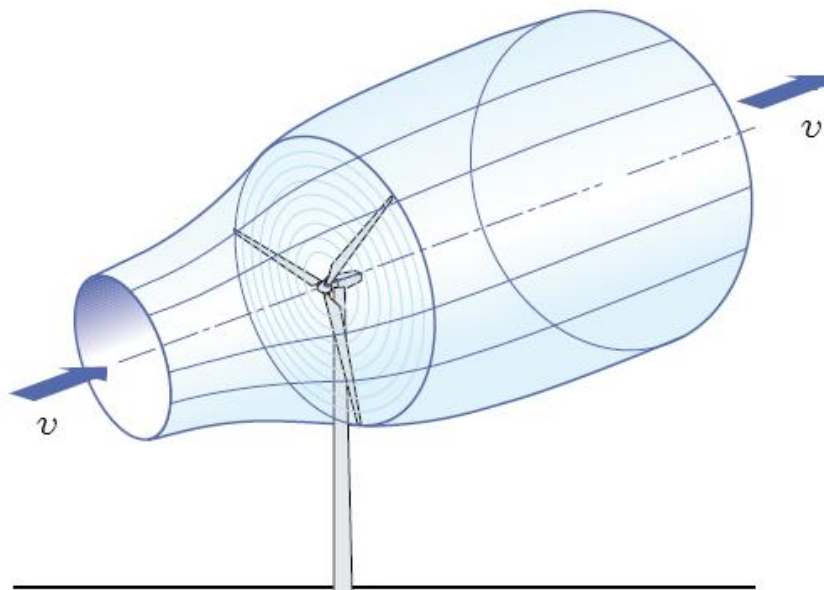
Слика 7. Дијаграм сила које делују на лопатицу турбине [6]

Дуж аксијалне осе лопатице су увијене зато што се од осе ротације ка периферији брзина ветра повећава док се њен нападни угао смањује. Сегменти лопатице блиски оси ротације имају велики угао у односу на раван ротације, док периферни сегменти имају мали угао у односу на раван ротације. Ако би сви делови лопатице турбине имали велики угао у односу на раван ротације, на периферним деловима лопатице стварао би се кочиони момент. Зато се овај ефекат користи за кочење ветротурбина при великим брзинама ветра,

На ефикасност ветротурбине утичу:

- густина ваздуха
- температура ваздуха
- влажност ваздуха
- стање лопатица
- струјање ветра и др.

При проласку ветра кроз ветротурбину један део његове кинетичке енергије се предаје ротору. Количина ваздуха која уђе у ветротурбину једнака је количини ветра која излази из ветротурбине. Приликом проласка ваздуха кроз ветротурбину јавља се ефекат преламања ветра јер је улазна брзина ветра већа од излазне што доводи до тога да ваздух који излази има већи пречник од ваздуха који улази у ветротурбину (слика 8) [10].



Слика 8. Преламање ветра у ветротурбини [10]

У реалности преламање ветра наступа пре него што ветар дође до ветротурбине. Како ветар прилази ветротурбини притисак испред ње постепено расте јер се она понаша као баријера која је на путањи ветра.

Ветротурбина смањује енергију ветра и та енергија је једнака разлици енергија ветра пре и после проласка кроз ветротурбину. Снага којом се врши конверзија ветра, односно снага коју развија ветротурбина на свом вратилу је:

$$P_{meh} = \frac{1}{2} C_p \rho \pi R^2 v^3$$

где су: v – брзина ветра на улазу у ветротурбину,

R – радијус ветротурбине,

ρ – густина ваздуха

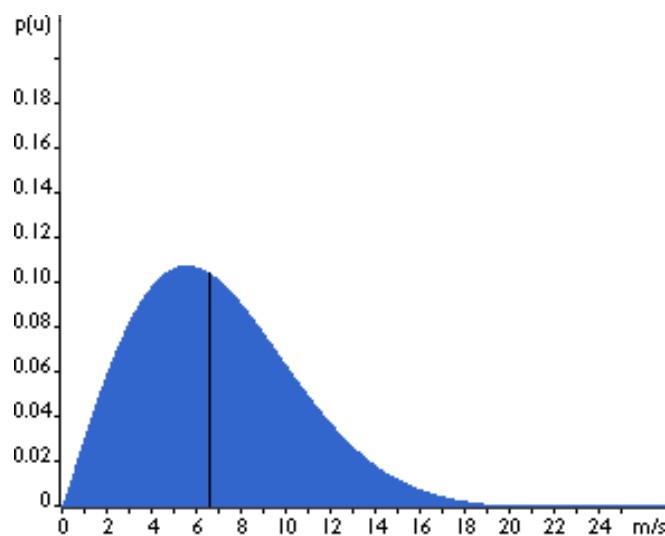
$C_p = \frac{P_{meh}}{P_v}$ – коефицијент искоришћења снаге ветротурбине

Теоријски максимум степена искоришћења (Бецов закон) енергије ветра је 59%. У стварности ова цифра је обично око 45% за велике ветротурбине, док се за мање ветрењаче креће у границама од 30 до 40%.

Стандардна густина ваздуха износи $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ па из тога следи да је:

$$P_0 = 0,369 \pi R^2 v^3$$

Да би се проценила снага која се може добити из ветра, најпре је потребно имати статистичку расподелу брзина ветра током целе године. На слици 9 приказана је статистичка расподела која одговара ветру са средњом годишњом брзином од 7 m/s [5].



Слика 9. Годишња расподела брзина ветра [5]

Она визуелно показује колико су ниски и умерени ветрови веома чести, те да су јаки ветрови релативно ретки. Линија на 6,6 метара у секунди означава средњу брзину ветра. 50% времена ветра је нижа од средње вредности и 50% времена је већа од средње вредности.

3.2. Ветротурбине са ветрикалном осом ротора

Ветротурбине овог типа примену налазе у урбаним подручјима. Једна од главних предности овог типа у односу на тип са хоризонталном осом обртања јесте чињеница да су то уређаји са унакрсним протоком ваздуха и стога прихватају ветар из било ког правца. Такође, погонски систем, који укључује генератор, мењач и кочницу, често се налази на тлу, чиме се олакшава одржавање.

Специфичне предности везане за ветротурбину са вертикалном осом се углавном односе на једноставност дизајна. Предност је и што се зупчасти преносник и генератор могу поставити на тло. Међутим, предности турбине са вертикалном осом такође су праћене неким већим недостацима, као што је мали коефицијент брзине кретања [10].

Ове ветротурбине се тренутно не сматрају економски атрактивним, али пружају енергетска решења за одвојена подручја далеко од мрежних система и подручја где ветрогенератори великих димензија не могу бити смештени.

Ветротурбине са вертикалном осом обртања се класификују у две главне категорије према њиховим аеродинамичким и механичким карактеристикама:

- Даријусов тип
- Савонијусов тип

3.2.1. Даријусов тип

Први овакав патент и најчешћи тип вертикалне турбине 1931. године осмислио је француски инжењер Жорж Даријус по коме је таква ветротурбина (слика 10) и добила назив, а према којој су се касније развијали други модели.



Слика 10. Даријусов тип ветротурбине [14]

Око ротирајућег вратила распоређене су параболичне лопатице, а генератор и мултипликатор су смештени у подножју саме конструкције па је њихово одржавање олакшано. Даријусова ветротурбина је у теорији ефикасна ако је брзина ветра константна, али због физичког напрезања и ограничења дизајна, та ефикасност је у пракси веома ретка [5].

Поред модела са заобљеним лопатицама, постоји тип Н (слика 11) који користи лопатице повезане на вертикалној оси уместо заобљених. Лопатице постављене паралелно с обзиром на осу обртања. Оваква турбина је једноставнија од класичне Даријусове, али је проблем што је лопатица одмакнута у односу на осу носивог стуба па лопатице морају бити чвршће.



Слика 11. *Тип Н* [14]

Поред наведених, постоје и спиралне ветротурбине (слика 12) Лопатице имају облик спирале па тако омогућују добар нападни угао ветра са обе стране. Момент је тако уједначен током обртања и нема наглих промена, а како се аксијалне силе поништавају оптерећење на лежајеве је мање у односу на остале типове Даријусових турбина [5].



Слика 12. *Тип са закривљеним лопатицама* [14]

Главне карактеристике турбине типа Даријус су:

- "брза" турбина
- смањена ефикасност у поређењу са турбинама хоризонталне осовине
- прилагодљива варијацијама у погледу промене смера ветра
- погодна за ниске вредности брзине ветра и за ограничени распон
- немогућност смањења аеродинамичке површине у случају брзине која прелази критичну вредност због фиксних лопатица
- конструкција која није изузетно робусна може да издржи екстремне ветрове
- ниска бука и са вибрацијама ограниченим на темеље, стога погодна за уградњу на зграде
- способност да ради и под турбулентним условима ветра
- мењач и електрични генератор могу бити постављени на тло.

3.2.2. Савонијусов тип

Још један дизајн ветротурбине са вертикалном осом је 1922. године смислио инжењер Сигурд Савонијус. Овај тип турбине (слика 13) се сам покреће из позиције мировања независно од смера ветра. Има заобљене лопатице и ради на принципу отпора ваздуха, тако што једна лопатица хвата ветар и има већи отпор него друга која иде против ветра.



Слика 13. Изглед Савонијусове турбине [14]

Основне карактеристике Савонијусове турбине су:

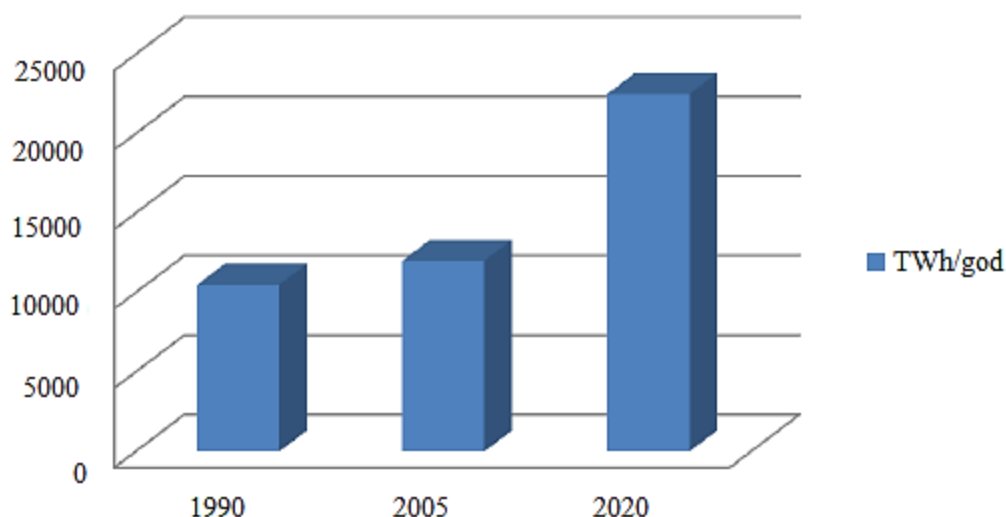
- "спора" турбина
- ниска ефикасност
- погодност за ниске вредности брзине ветра
- неопходне адекватне контроле брзине како би се задржала ефикасност унутар прихватљивих вредности
- неопходност робусне структуре да издржи екстремне ветрове (висока изложена површина лопатица)
- погодне само за мале апликације
- низак ниво буке.

Савонијусове ветротурбине се примењују на местима на којима ефикасност није у првом плану већ поузданост. Веома је једноставна за израду и поуздана. Тренутно концепти вертикалне осовине ротора углавном нису конкурентни хоризонталним ветровним турбинама.

4. Анализа примене ветротурбина

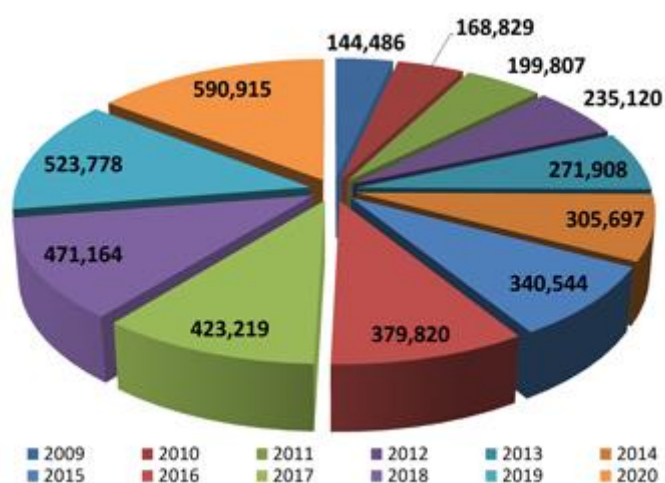
4.1. Ветротурбине у свету

Како је потрошња електричне енергије у сталном порасту (слика 14), све је већа потреба за постројењима која производе електричну енергију.



Слика 14. Потрошња електричне енергије у свету

Иако је на глобалном тржишту и даље најзаступљенији вид производње електричне енергије управо из необновљивих извора енергије, тенденција развоја производа усмерена је на обновљиве изворе енергије, па тај тренд прати и развој ветротурбина како у већим постројењима тако и у приватним поседима. На слици 15 може се видети досадашња инсталирана снага ветрогенератора у свету и предвиђање у наредне две године.



Слика 15. Инсталирана снага ветрогенератора у свету [15]

У табели 1 су приказани највећи произвођачи ветрогенератора на свету, са уделом тржишта које покривају.

Табела 1. Највећи произвођачи ветрогенераторау свету

Компанија	Држава	Удео тржишта
Вестас (Vestas)	Данска	13,2 %
Голдвинд (Goldwind)	Кина	10.3 %
Енеркон (Enercon)	Немачка	10.1 %
Сименс (Siemens)	Немачка	8 %
Гамеза (Gamesa)	Шпанија	6,3 %
Џи Енерџи (GE Energy)	САД	4,9 %
Ј.П (United Power)	Кина	3.9 %
Минг Јанг (Ming Yang)	Кина	3.7 %

У табели се може видети да је појединачно, највећи део тржишта покрива компанија Вестас из Данске, док највећи део тржишта као држава заузима Кина са око 19% удела тржишта. Све ове компаније производе ветротурбине са хоризонталном осом обртања која је уједно у овој области преседан у свету [16].

Према доступним информацијама може се закључити да на тржишту ветротурбина доминирају хоризонталне ветротурбине због могућности генерисања велике количине електричне енергије. Усмерење тржишта ка развоју нових, мањих и исплативијих система за производњу ел. енергије појавила су се нова решења где преовлађују вертикалне ветротурбине.

Према наведеним особинама у поглављу 3 може се закључити да вертикалне ветротурбине имају добар потенцијал за генерисање електричне енергије за индивидуалне кориснике тј. за мање захтеве потрошача (напајање кућних апарата, расвета и слично). Управо због те предности да се могу користити у приватне сврхе уз мање трошкове, вертикалне ветротурбине су изазов за улагаче у производњу електричне енергије путем ветра. На слици 16 се могу видети неки нови облици вертикалних ветрогенератора.

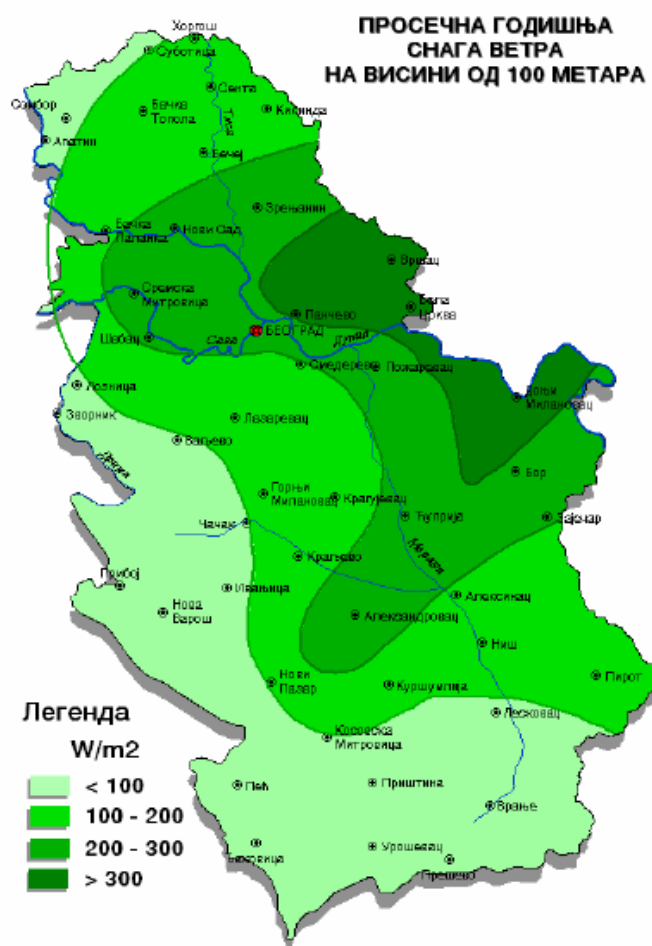


Слика 16. Модерни облици вертикалних ветротурбина [14]

4.2. Енергетски потенцијал ветра у Србији

Проучавајући резултате мерења хидро-метеоролошког завода добијени су подаци који говоре да подручје Балкана има капацитет у ветровима од 1300 MW или око 2.3-2.4 TW/год. Наша земља се налази на јужној граници зоне западних ветрова, али због специфичног положаја планинских система велики значај имају ветрови са источном компонентом као што су бура, кошава и слични.

Ако посматрамо територију Србије (слика 17) и узимајући у разматрање надморске висине погодне за овакву употребу, може се закључити да су за изградњу ветрогенератора погодна подручја источне Србије, Војводине. Такође, добре услове за постављању ветрогенератора имају и сва планинска узвишења, као и подручја уз реке где се ствара тзв. тунел ефекат, а отпор површине је јако мали. Дакле, пре изградње ветрогенератора пожељно је имати што више информација о брзини ветра на датој локацији.



Слика 17. Типичне снаге ветра на територији Србије [6]

Ова, може се рећи релативно позитивна оцена енергетског потенцијала ветра у нашој земљи треба да омогући још већи обим истраживања искоришћења ветрова.

5. Развој производа – мали вертикални ветрогенератор

Узимајући у обзир да је намена ветротурбине производња електричне енергије за индивидуалне потрошаче, односно напајање кућне расвете и основних електричних уређаја који су готово у свакодневној примени извршиће се анализа потрошње електричне енергије током једног дана.

5.1. Енергетски утрошак породице

Овај део се састоји од свих електричних уређаја и осветљења у домаћинству која су свакодневно у употреби. Узимајући у обзир да сви уређаји неће радити истовремено, постоји коефицијент истовремене потрошње који одређује минималну потребну снагу.

У табели 2 налазе се сви уређаји за домаћинство стандардне породице, са својом снагом, дневном потрошњом у сатима.

Tabela 2. Уређаји у домаћинству са пописаном потрошњом

Електрични уређаји	Снага (W)	Сати потрошње (h/dan)	Укупно (Wh/dan)
Фрижидер	250	24	6000
Машина за веш	2000	3	6000
Тостер	400	0.25	100
Микроталасна	600	0.25	250
Телевизор	100	4	400
Пегла	1200	0.5	600
Усисивач	1500	0.25	375
Рачунар	250	4	1000
Осветљење	Снага (W)	Сати потрошње (h/dan)	Укупно (Wh/dan)
Дневна соба	150	5	750
Спаваћа соба	100	1	100
Дечија соба	100	2	200
Купатило	100	1.5	150
Ходник	100	0.5	50
УКУПНО	6850		15975

Ако се узму у обзир резултати у претходној табели, за које се може рећи да су просечни за једно домаћинство на дневном нивоу. Када се то прерачуна у недељну потрошњу, а затим месечну и годишњу добију се резултати дати у табели 3.

Tabela 3. Потрошња једног домаћинства на годишњем нивоу

	Дневно	Недељно	Месечно	Годишње
Укупна потрошња (kWh)	15.97	111.79	447.16	5365.92

Након ове анализе, за напајање једног домаћинства дневно је потребно приближно 16 kWh. Користећи коефицијент истовременог рада (F) од 50%, коначна снага ће бити:

$$P_{in} = F \cdot P = 0,5 \cdot 6850 \text{ W} = 3425 \text{ W} \approx 3,5 \text{ kW}$$

5.2. Дефинисање техничког задатка

За детаљнији развој овог производа потребна је јасна дефиниција циља самог производа како би се ограничила могућа решења и да би се испитала исплативост и употребљивост самог производа. На самом почетку поставља се технички задатак (табела 4) који је уједно и улаз у процес конструисања.

Tabela 4. Технички задатак

Дефиниција техничког задатка	
Ветрогенератор номиналне снаге 3,5 kW	
Опис производа:	Ветрогенератор за индивидуалну употребу
Примарно тржиште:	Напајање расвете и електричних уређаја на стамбеним или пословним објектима
Секундарно тржиште:	Напајање расвете сеоског имања и појединих већих електричних потрошача
Карактеристике:	- Производња ел. енергије - Могућност спајања на електричну мрежу - Радни век 20 година - Једноставна употреба и одржавање
Правци развоја:	- Облик ротора ветрогенератора - Одабир генератора - Избор материјала - Компактност уређаја
Ограничења:	- Вертикална изведба - Довољна производња ел. енергије - Коришћење што више стандардних елемената

Након постављеног задатка за развој производа потребно је дефинисати потребе потенцијалних корисника. Потребне корисника су дефинисане анкетањем 15 људи различитих занимања (табела 5).

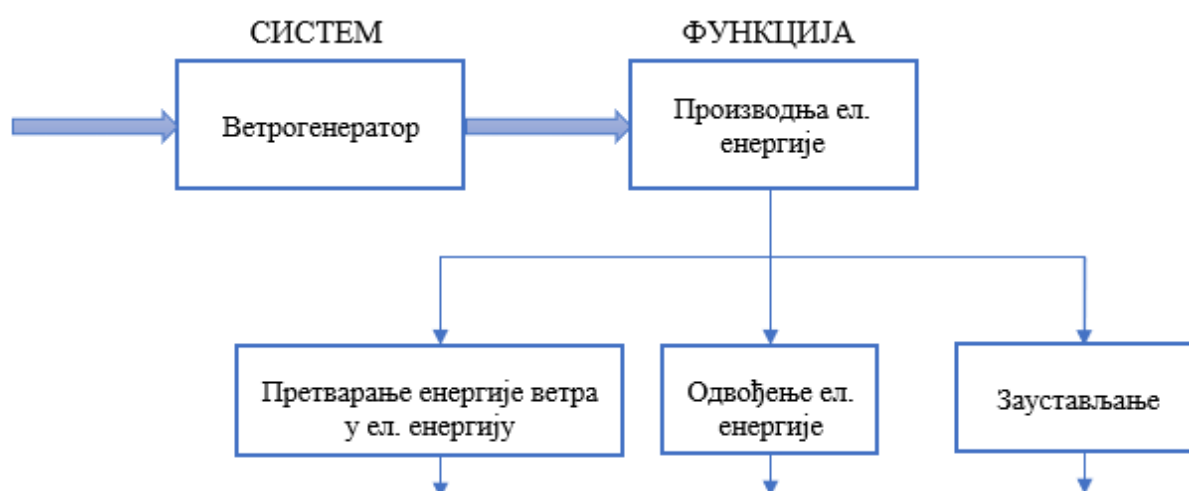
Табела 5. Потребе корисника

Потребе корисника	Оцена важности
Довољна количина ел. енергије	10
Инвестицијски трошкови	9
Поузданост у раду	8
Трошкови одржавања и сервисирања	7
Радни век	6
Бука при раду	5
Габаритне димензије	4
Естетика	3
Избор материјала	2
Могућност повезивања на комуналну мрежу	1

У табели се може видети да је најважније да вертикална ветротурбина буде адекватна односно да производи довољно електричне енергије за потребе корисника. Поред овога, може се видети да је јако битан фактор цена, тј. инвестицијски трошкови и цена одржавања и сервисирања. Велику улогу има и поузданост ветротурбине односно могућност да константно производи електричну енергију. Битан фактор је и производња буке при раду јер се ради о већем склопу са покретним деловима који могу изазвати нежељене звукове. Нешто мања заинтересованост испитаних људи била је усмерена ка естетском изгледу, димензијама и избору материјала, као и могућности повезивања на комуналну мрежу.

5.3. Структура функција система

Након постављања техничког задатка и дефинисања потреба корисника приступа се изради функцијске структуре на којој ће се приказати главне функције система (слика 18).



Слика 18. Општа функцијска структура

Из функцијске структуре се може закључити да су главне функције система да:

- производи електричну енергију
- одведе електричну енергију
- да се заустави

5.4. Генерисање концепта

Концепт 1 – Ветрогенератор са закривљеним лопатицама (слика 19)



Слика 19. Ветрогенератор са закривљеним лопатицама [14]

Захватање енергије ветра:

- 3 просторно закривљене аеродинамичке лопатице
- Лопатице заварене на вратило
- Улежиштење само са доње стране
- Вертикалан положај вратила

Сигурносни систем:

- Дигитални мерач брзине
- Кочница

Предности:

- Релативно мали број делова
- Мала маса уређаја
- Уједначен момент, смањене вибрације

- Могућност хватања турбулентних струјања изнад кровова
- Овакав облик лопатица смањује отпор ротацији
- Самопокретање

Недостаци:

- Аеродинамички профил лопатица
- Лопатице просторно закренуте – отежана израда
- Поприлично велике брзине обртања
- Велики инвестицијски трошкови

Концепт 2 – Даријусова ветротурбина (слика 20)



Слика 20. Даријусова ветротурбина [14]

Захватање енергије ветра:

- Аеродинамичке лопатице на једнаким размацама
- Лопатице заварене на вратило
- Улежиштење само с доње стране
- Вертикалан положај вратила

Сигурносни систем:

- Дигитални мерач брзине
- Кочница (механичка и електрична)

Предности:

- Велика ефикасност због аеродинамичког профила лопатица
- Радни учинак независтан од смера ветра
- Самопокретање
- Могућност хватања турбулентних струјања изнад кровова
- Поприлично тих рад

Недостаци:

- Поприличан број делова
- Аеродинамички профил лопатица – пуно већа цена
- Већи број лопатица (изведба са 5 или више лопатица) може стварати заветрину једна другој
- Уређај нема могућност закретања лопатица

Концепт 3 – Савонијус тип ветротурбине (слика 21)



Слика 21. Савонијус ветротурбина [17]

Захватање енергије ветра:

- Лопатице заварене на вратило
- Вертикалан положај вратила
- Крути спој мотора и турбине
- Улежиштење само са доње стране

Сигурносни систем:

- Дигитални мерач брзине

- Кочница

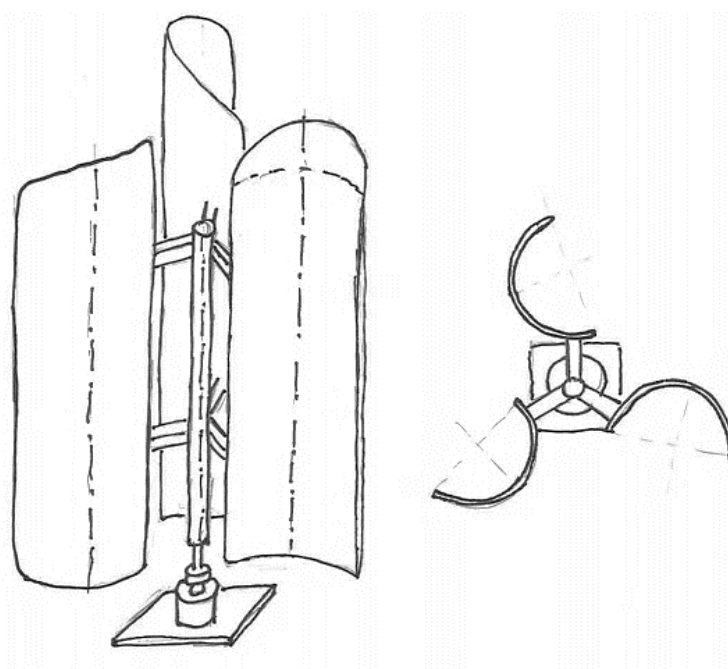
Претварање енергије ветра у механичку енергију:

- Лопатице везане за вратило варом уз додатне делове

Предности:

- Радни учинак независтан од смера ветра
- Уједначен момент
- Хватање турбулентних струја изнад кровова
- Самопокретање при малим брзинама ветра
- Мала брзина обртања

На темељу потреба потенцијалних корисника и генерисања концепата, бира се концепт 3 као најбољи. Наиме, овакав концепт ветрогенератора огледа се у нешто већем броју делова. Међутим, велику предност добија по питању поузданости у раду и радног века преко 20 година. Такође, има могућност самопокретања при мањим брзинама ветра (између 3 и 4 m/s) уз максималну ефикасност. Предност овог концепта се огледа и у великом естетском потенцијалу где је допуштена слобода модификовања облика лопатица што овакве ветрогенераторе чини занимљивим за модерне архитекте. Једини недостатак овог концепта је укупна цена израде али узимајући у обзир све већу цену како електричне енергије, тако и необновљивих извора енергије, на дугорочном плану овај концепт је исплативо решење. На слици 22 је приказан је прелиминарни модел одабраног концепта.



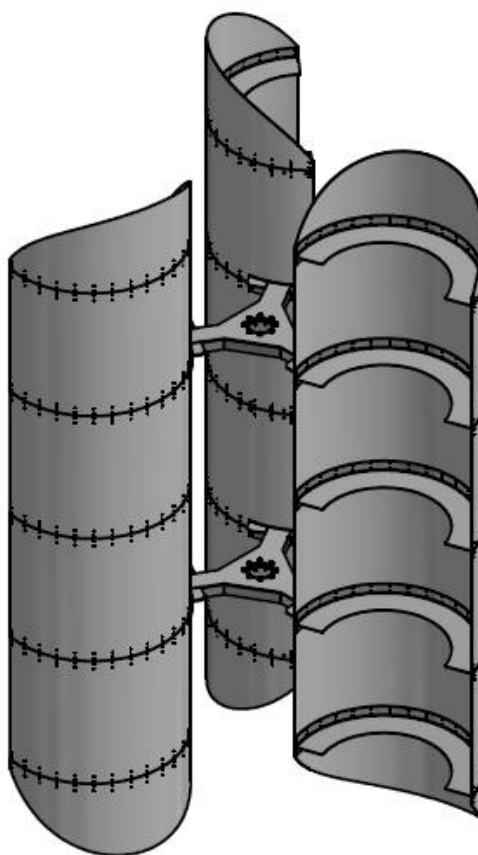
Слика 22. Прелиминарни модел ветрогенератора

5.5. Дизајн делова ветрогенератора

Дизајн ветрогенератора снаге 3,5 kW засниван је на технологији где лопатице преко вратила покрећу одговарајући електрични генератор. На моделу су детаљно приказани сви делови који су у саставу конструкције, осим генератора који је моделиран поједностављено при чему су испоштоване габаритне димензије потребне за моделирање носеће конструкције.

5.5.1 Ротор

Из досадашње анализе очигледно је да је за постизање максималне доступне ефикасности систем са три лопатице нејделотворнија опција (слика 23) при чему се оне помоћу вијака монтирају на предвиђене челичне носаче. Формирањем склопа ових делова добија се ротор ветрогенератора.

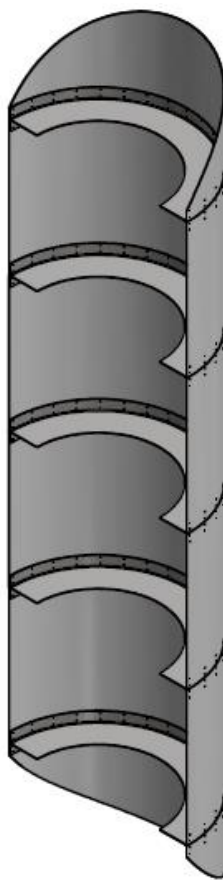


Слика 23. Склоп ротора

Како би искоришћење ветрогенератора достигало максималне могуће вредности осмишљен је облик лопатица који ће прихватити што већу количину ветра, а при томе задржати своју крутост. На слици 24 посебно је приказан модел једне лопатице.

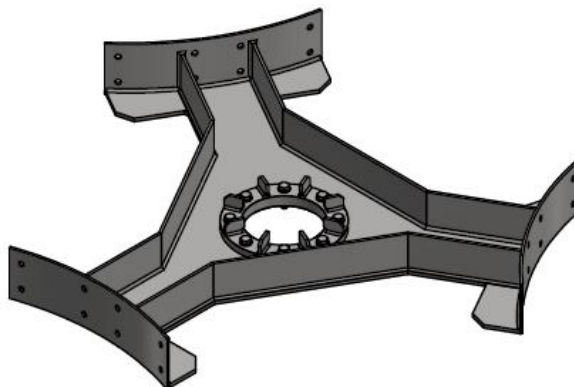
Да би се олакшала цела конструкција, лопатица се састоји од више делова у комбинацији алуминијум – челик.

Такозвани омотач лопатица израђује се од алуминијума, док елементи од конструкционог челика служе да остваре везу између појединачних делова омотача лопатице а уједно имају и улогу укрућења. Повезивање алуминијумских делова лопатице и укрућења остварује се помоћу блок заковица.



Слика 24. Изглед једне лопатице

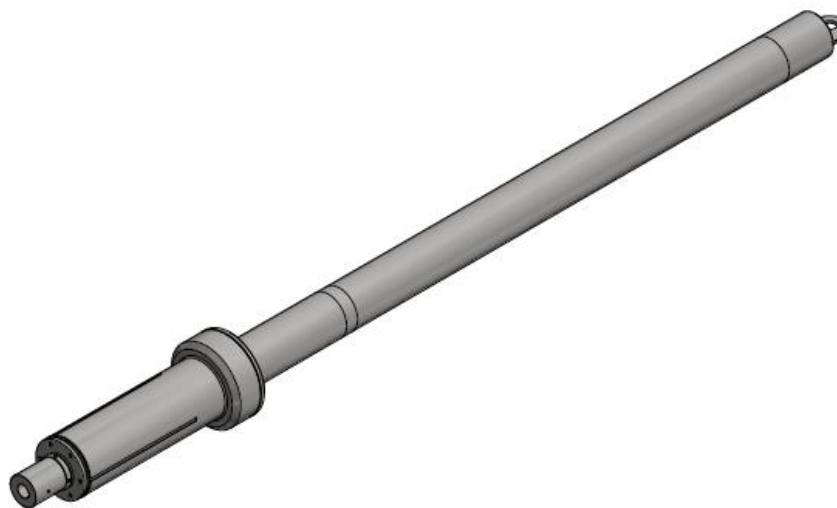
На слици 25 приказан је трокраки челични носач лопатица. На крајевима овог носача заварују се перфориране плоче на које се монтирају лопатице. Веома вазно је да се ови елементи помоћу ваљака савију тако да прате радијус лопатице ветротурбине, јер у случају великог одступања не може се остварити чврста веза носача и лопатице.



Слика 25. Носач лопатица

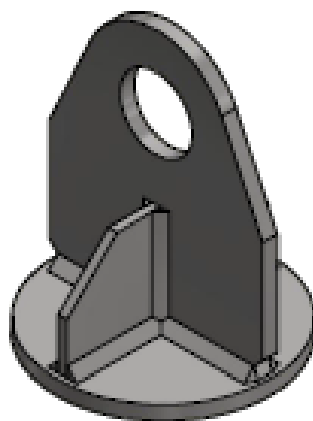
5.5.2 Главно вратило

Овај део конструкције има највећу улогу у систему. Задатак главног вратила је да механичку енергију обртања насталу услед деловања ветра пренесе на суседни елемент. На слици 26 приказано је главно вратило ветрогенератора.



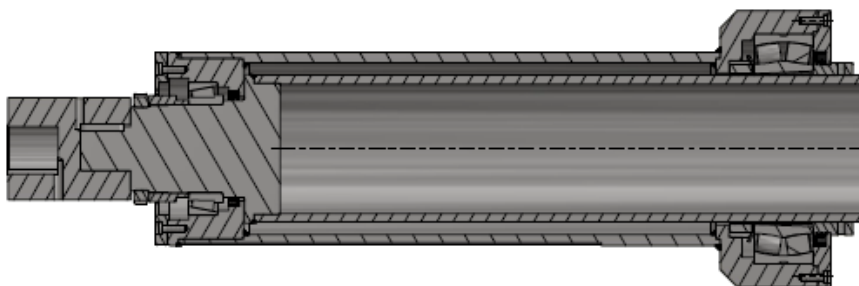
Слика 26. Главно вратило

Овај тип такозваног шупљег вратила одабран је да би се смањила маса конструкције, а да при томе не дође до нежељених деформација приликом оптерећења. На врху вратила постављена је ушица за ношење целокупне конструкције ветрогенератора (слика 27), док је у доњем делу вратило улежиштено са два лежаја.



Слика 27. Ушица за ношење ветрогенератора

На слици 28 приказан је пресек доњег дела вратила где се могу видети сви делови који спадају у склоп кућишта за улежиштење вратила.



Слика 28. Приказ улежиштења главног вратила

Може се приметити да је на шупље вратило заварено кратко степенасто вратило како би се лакше остварила веза са генератором. Уз то, поједностављено постављање лежаја у доњој зони главног вратила а одабран је конусни ваљкасти лежај који може пренети комбинована оптерећења. Са друге стране, у горњој зони кућишта за улежиштење вратила изабран је буричасти дворедни лежај који поседује велику радијалну носивост и има могућност изравнавања одступања у саосности. Одабрани лежајеви су из каталога произвођача SKF, док се кућишта израђују према димензијама одабраних лежајева.

5.5.3 Мало вратило

Да би се механичка енергија, односно обртно кретање пренело на генератор, потребно је у склоп додати још једно вратило помоћу кога ће се остварити веза са генератором. На слици 29 приказано је такозвано мало вратило које повезује главно вратило са генератором електричне енергије.



Слика 29. Мало вратило

Потребно је напоменути да постављени клинови имају функцију остваривања везе са спојницама како би се пренело обртно кретање главног вратила. За израду конструкционих делова овог типа најчешће се користе угљенични челици за побољшање које одликују висока вредност динамичке чврстоће и велика жилавост. За овај модел вратила изабран је челик са ознаком Č1530.

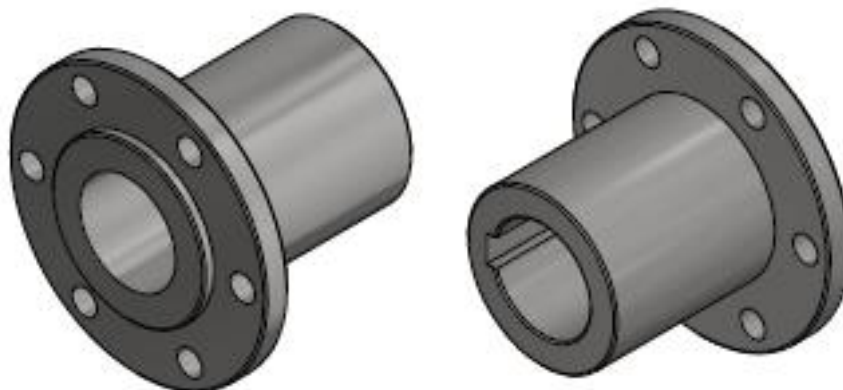
5.5.4 Спојнице

Елементи који имају улогу да пренесу обртни момент и кретање између коаксијалних вратила. За потребе ветрогенератора потребне су две спојнице како би се остварило преношење обртног кретања од главног вратила до вратила генератора електричне енергије. У првом делу израде модела, а за остваривање везе између главног и малог вратила одабрана је крута спојница са наглавком (слика 30) која се везује за крајеве вратила помоћу уздужних клинова.



Слика 30. Крута спојница са наглавком

За преношење механичке енергије са мало вратила на вратило генератора електричне енергије, за овај модел се користе круте спојнице са ободима (слика 31). Овај тип спојница се састоји од два обода (диска) спојена вијцима, док се веза са вратилима остварује помоћу уздужних клинова.

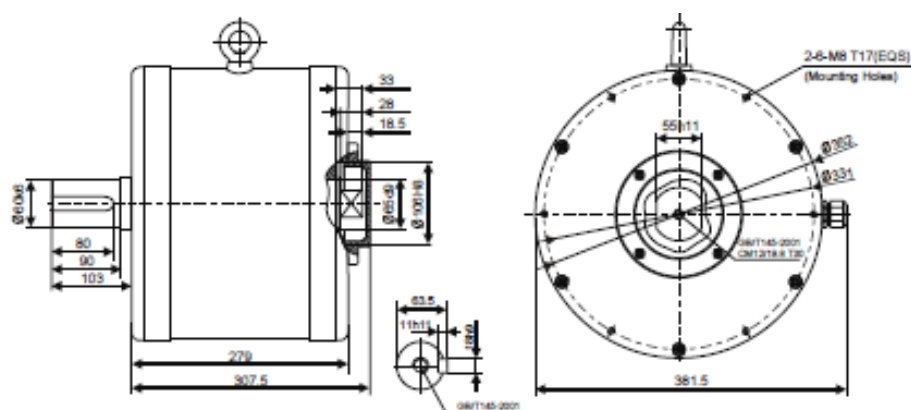


Слика 31. Круте спојнице са ободом

5.5.5 Генератор

Концепт предложен у овом раду користи генератор постављен на дну. Предложени дизајн има вратило турбине директно спојено са ротором генератора без употребе било ког механичког преносника (мултипликатора). Такав концепт елиминира губитке и могуће проблеме везане за одржавање механичког преносника. Генератор ће имати релативно мале брзине обртања што значи да је дизајниран са великим бројем полова да би се постигла довољна индукција и ефикасност. Дизајниран је синхрони генератор који користи перманентне магнете.

Према овим подацима одабран је генератор GL-PMG-3500 (слика 24) произвођача ГИНЛОНГ који се бави израдом генератора за мање мале ветрогенераторе. Предност овог произвођача је у томе што постоји могућност израде генератора према жељи купца.



Слика 32. Генератор

Основне карактеристике изабраног генератора дате су у табели 7.

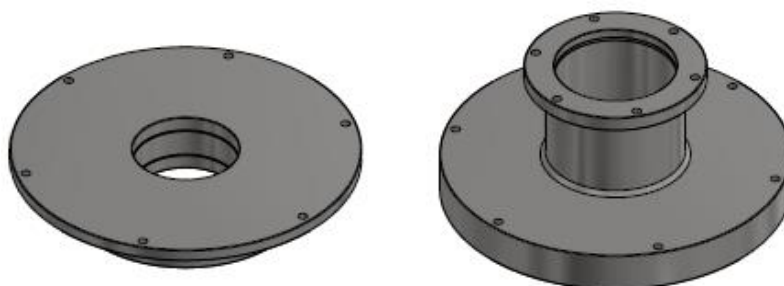
Табела 6. Основне карактеристике генератора

GLP – PMG - 3500	
Називна снага (W)	3500
Максимални број обртаја (o/min)	200
Маса (kg)	75,5
Материјал осовине	Č.1531
Материјал кућишта	Al
Магнети	NdFeB
Век трајања	>20 год.

Одабрани ти генератора има могућност аутоматског заустављања након достизања критичне брзине обртања ротора, где се време мировања дефинише приликом самог поручивања. Представљени модел тако елиминира додатне сигурносне системе у виду механичких или електромагнетних кочница чиме се умањује могућност појаве проблема везаних за одржавање таквих система.

5.5.6 Кућиште генератора

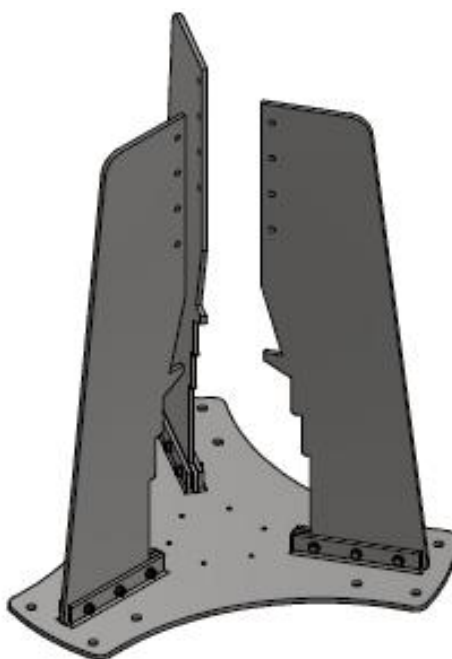
Ради лакшег постављања генератора на тло или постоље израђено је такозвано кућиште које се састоји од постоља и поклопац (слика 33) повезаних вијцима. На постољу су предвиђени отвори за вијке, уз помоћ којих се генератора са кућиштем причвршћује за предвиђено постоље.



Слика 33. Кућиште генератора; Лево - постоље; Десно - поклопац

5.5.7 Постоље ветрогенератора

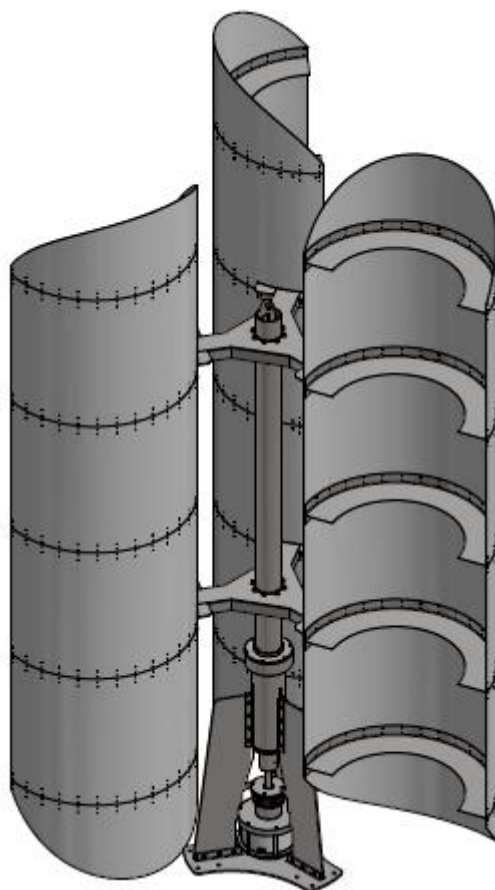
Да би се ослонила целокупна конструкција потребно и ветрогенератор фиксирао за неку површину потребно је да има своје постоље. Према томе, на слици 34 приказан је модел постоља за тип ветрењаче представљен у досадашњем делу рада.



Слика 34. Постоље ветрогенератора

5.5.8 Коначан изглед модела ветрогенератора

На слици 7 приказан је коначан изглед ветрогенератора номиналне снаге 3,5 kW. Конструкција се састоји из неколико подсклопова који се рашчлањују на још мање подсклопове или делове, чиме би се у великој мери олакшала монтажа. Приликом формирања склопова у великој мери су примењивани стандардни елементи како би се проблеми приликом монтаже свели на минималне вредности.

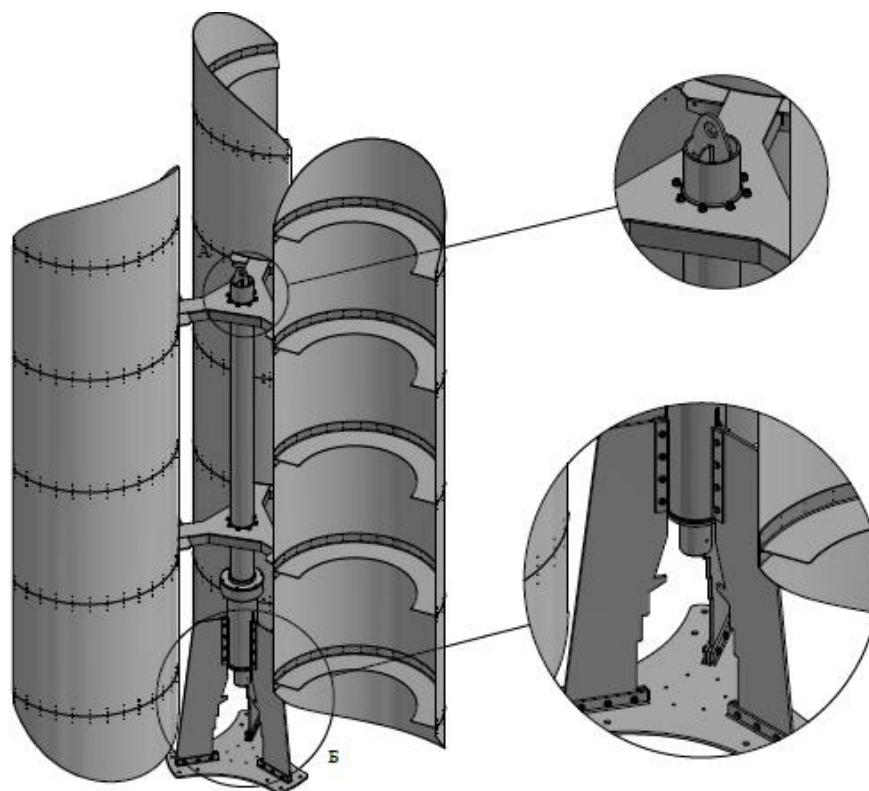


Слика 35. Коначан изглед ветрогенератора

На слици 36 приказан је склоп без генератора електричне енергије. Склоп приказан на слици је универзални склоп а елементи који улазе у склоп могу се производити и склапати без обзира на врсту генератора и мултипликатора који би се уграђивали.

Код постоља ветрогенератора то није случај јер се елементи морају прилагодити генератору и мултипликатору ако се уграђује, а наручује од добављача.

Подизање и манипулација ветрењачом могући су уз помоћ ушице постављене на самом врху конструкције. Према томе, конструкција се у потпуности може склопити на тлу а затим подићи на место предвиђено за постављање ветрењаче.



Слика 36. Склоп турбине без генератора

5.6. Прорачун делова конструкције

Имајући у виду наведене захтеве, дефинишу се улазни технички подаци карактеристични за подручје где би ветрогенератор могао бити постављен.

ТЕХНИЧКИ ПОДАЦИ:

Брзина ветра	$v = 10 \text{ m/s}$
Пречник ротора	$D = 3,6 \text{ m}$
Висина лопатице	$H = 5,23 \text{ m}$
Густина ваздуха	$\rho = 1,23 \text{ kg/m}^3$
Коефицијент брзине обртања	$\lambda = 2$
Коефицијент искоришћења	$C_p = 0,35$

Да би се одредила стварна снага ветрогенератора користи се израз:

$$P_{meh} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \cdot A_l \cdot C_p$$

$$P_{meh} = \frac{1}{2} \cdot 1,23 \cdot 10^3 \cdot 10,2 \cdot 0,35 = 2196 \text{ W} \approx 2,2 \text{ kW}$$

Овим изразом добијена је стварна снага ветротурбине јер је узет у обзир коефицијент искоришћења (Бецов закон).

5.7.1. Одређивање обртног момента

За израчунавање обртног момента на ротору примењује се израз:

$$T = \frac{P_{meh}}{\omega}$$

Где је:

ω - угаона брзина лопатица

P_{meh} - стварна снага ветротурбине

Угаона брзина се рачуна према изразу:

$$\omega = \frac{\lambda \cdot v}{r}$$

Где је:

λ - коефицијент брзине обртања, ($\lambda = 2$) према [2]

v - брзина ветра ($v = 10 \text{ m/s}$)

r - полупречник ротора ($r = 1,8 \text{ m}$)

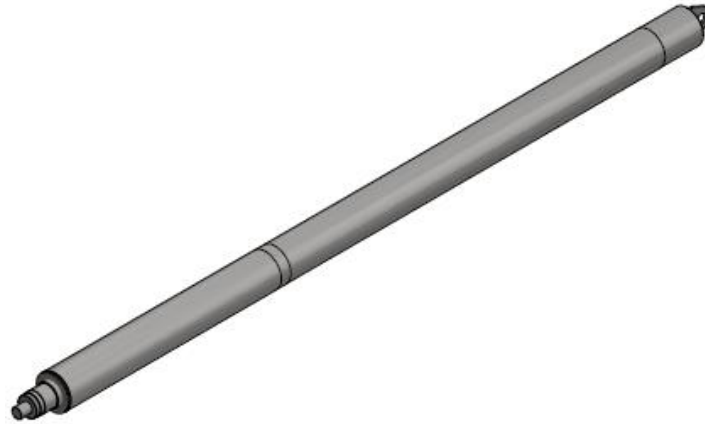
$$\omega = \frac{2 \cdot 10}{1,8} = 11,1 \text{ s}^{-1}$$

Сада се може израчунати обртни момент:

$$T = \frac{2196}{11,1} = 197,8 \text{ Nm}$$

5.7.2. Прорачун главног вратила

За димензионисање главног вратила (слика 37) у обзир се узима снага ветра коју треба да пренесе при броју обртаја који се добија из образаца 10. Примениће се тип шупљег вратила $d/D=0,9$ како би се додатно олакшала конструкција. Материјал вратила је конструкциони челик Č.0361.



Слика 37. Модел вратила за које се врши прорачун

Број обртаја се добија:

$$n = \frac{30 \cdot \omega}{\pi} = 106 \text{ o/min}$$

Затим следи израчунавање тангенцијалног напона. Максимални дозвољени напон за задати материјал, и променљива оптерећења износи: $\tau \leq \tau_d = 10 \text{ Мра}$

$$\tau = \frac{M \cdot R}{I_0} = \frac{M_t}{W_0} \leq \tau_d \Rightarrow W_0 = \frac{M_t}{\tau_d} = \frac{D^3 \pi}{16} (1 - \psi^4)$$

$$M = \frac{P}{\omega} = \frac{2196}{11,1} = 0,197 \cdot 10^3$$

Из овога следи:

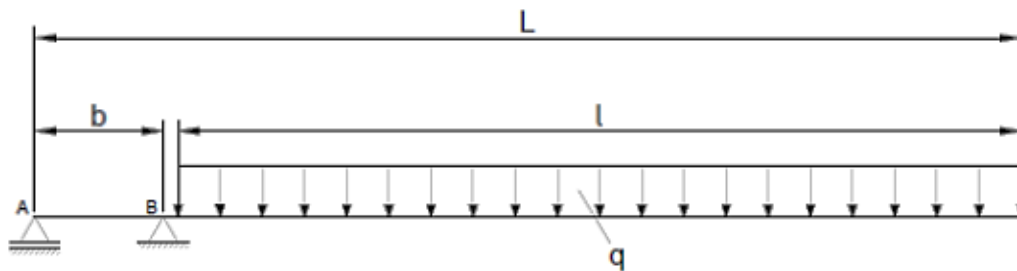
$$D = \sqrt[3]{\frac{16 \cdot M_t}{\pi(1 - \psi^4) \cdot \tau_d}} = \sqrt[3]{\frac{16 \cdot 0,197 \cdot 10^3}{\pi(1 - 0,95^4) \cdot 10 \cdot 10^6}} = 0,081 \text{ m} = 81 \text{ mm}$$

Према овоме следи да је минимални пречник $D=88 \text{ mm}$, а унутрашњи пречник $d=72,9 \text{ mm}$

Узимајући у обзир димензије лопатица ветрогенератора, усвојено се шупље вратило димензија $D/d=168/148$ mm које се израђује из припремке дебелозидне цеви 168,3 x 11 mm

5.7.3. Прорачун одабраних лежајева

За проверу одабраних лежајева потребно је одредити реакције у ослоњцима вратила. Сила ветра која делује на лопатице ротора ветрогенератора у овом случају се посматра као континуално оптерећење на вратилу у хоризонталној равни (слика 22).



Слика 38. Оптерећење вратила

Континуално оптерећење на вратилу дефинише се изразом:

$$q = \frac{F_s}{l}$$

Где је:

F_s - сила ветра на средњем промеру лопатица

l - дужина вратила на којој делује оптерећење

Сила ветра на средњем промеру лопатица рачуна се према изразу:

$$F_s = \frac{T}{r}$$

Где је:

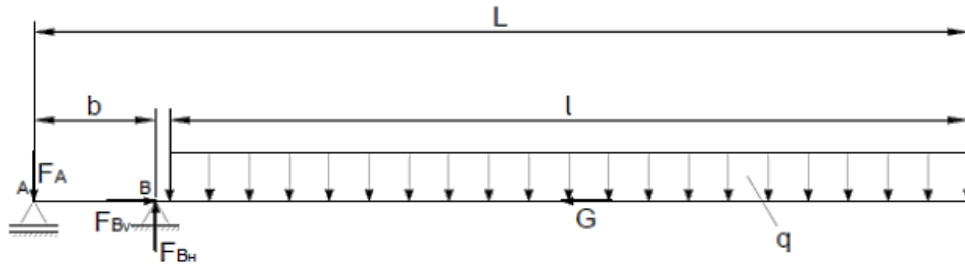
T - обртни момент ротора ветрогенератора

r - полупречник средњег промера лопатица

Према томе следи:

$$F_s = \frac{T}{r} = \frac{197,8 \text{ Nm}}{1,16 \text{ m}} = 171 \text{ N}$$

$$q = \frac{F_s}{l} = \frac{171}{2,7} = 64 \text{ N/m}$$



Слика 24. Реакције у ослонцима

Да би се одредиле хоризонталне компоненте силе примењују се изрази:

$$\Sigma M_B = -q \cdot l \cdot \left(L - \frac{l}{2} - b \right) + F_A \cdot b = 0$$

$$\Sigma F_H = F_A - F_{BH} + q \cdot l = 0$$

$$\Sigma F_V = G_{lop} - F_{BV} = 0$$

Из ових образаца следе изрази за реакције у ослонцима А и В:

$$F_A = \frac{q \cdot l \cdot \left(L - \frac{l}{2} - b \right)}{b}$$

$$F_{BH} = F_A + q \cdot l$$

$$F_{BV} = G_{lop}$$

Где је:

q - континуално оптерећење

F_A - сила у ослонцу А

F_{BH} - хоризонтална сила у ослонцу В

F_{BV} - вертикална сила у ослонцу В

G_{lop} - тежина лопатица

У претходне изразе који се односе на слику 23 уносе се вредности:

$$q = 64 \text{ N/m}$$

$$l = 2,7 \text{ m}$$

$$L = 3,4 \text{ m}$$

$$b = 0,65 \text{ m}$$

$$G_{lop} = 4650 \text{ N}$$

Сада се могу израчунати реакције у ослоцима:

$$F_A = \frac{64 \cdot 2,7 \cdot \left(3,4 - \frac{2,7}{2} - 0,65\right)}{0,65} = 372,2 \text{ N} \approx 373 \text{ N}$$

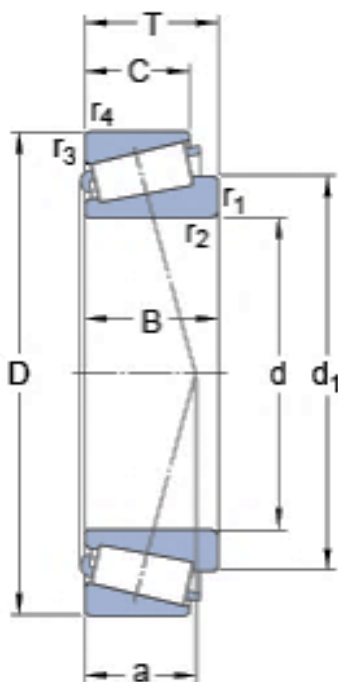
$$F_{BH} = F_A + q \cdot l = 373 + 64 \cdot 2,7 = 545,8 \text{ N} \approx 546 \text{ N}$$

$$F_{BV} = G_{lop} = 4650 \text{ N}$$

За ослонац А који је уједно и непокретан ослонац изабран је конусни ваљкасти лежај произвођача **SKF**, са ознаком **3302**, димензија $d \times D \times B = 100 \times 150 \times 39$ (слика 39)

Ослонац А је оптерећен радијалном силом F_r

$$F_r = F_A = 373 \text{ N}$$



Слика 39. Конусни ваљкасти лежај

Динамичка носивост одабраног лежаја износи:

$$C_1 \leq C = 27800 \text{ N}$$

$$C_1 = 373 \text{ N} \leq 27800 \text{ N}$$

Према израчунатим оптерећењима закључује се да одабрани конусни лежај задовољава задате услове рада. Усваја се лежај **SKF 3302**, димензија $d \times D \times B = 100 \times 150 \times 39$

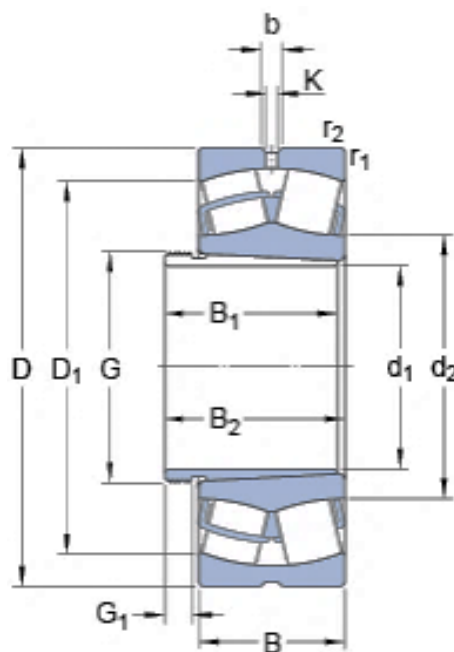
Ослонац В покретан, а према промеру пречника главног вратила одабран буричасти дворедни лежај (слика 40) произвођача **SKF**, ознаком **23034** и димензијама $d \times D \times B = 150 \times 260 \times 101$

Ослонац В је оптерећен радијалном силом F_r и аксијалном силом услед тежине лопатица.

$$F_r = F_{BH} = 546 \text{ N}$$

$$F_a = F_{BV} = 4650 \text{ N}$$

Одабран је лежај



Слика 40. Буричасти дворедни лежај

Динамичка носивост одабраног лежаја износи:

$$C = 74500 \text{ N}$$

Еквивалентно оптерећење лежаја се одређује помоћу израза:

$$P = F_r + y \cdot F_a$$

Где је:

$$F_r = 546 \text{ N} \quad - \text{ радијална сила}$$

$$F_a = 4650 \text{ N} \quad - \text{ аксијална сила}$$

$y = 2,8$ - аксијални фактор лежаја

$$P = 546 + 2,5 \cdot 4650 = 12171 \text{ N} \leq C = 74500 \text{ N}$$

Израчунато оптерећење лежаја је неколико пута мање од његове динамичке носивости, што значи да одабрани лежај може пренети и знатно већа оптерећења. Усваја се лежај произвођача SKF, ознаком **23034** и димензијама $d \times D \times B = 150 \times 260 \times 101$

5.8. Радионичка документација

Модел ветрогенератора представљен је и радионичком документацијом. Кроз цртеже је извршена оптимизација свих подсклопова и делова система и дефинисана су места на којима се спајање елемената врши заваривањем. Такође, у склопу документације дате су одређење препоруке за технологију израде делова.

6. Закључак

Производња електричне енергије из ветра је тренд који прати глобално тржиште, али још увек се главни део тако добијене енергије троши за већа постројења док је са друге стране, мањи акценат на употреби у приватне сврхе.

Мали системи ветрогенератора су ефикасан еколошки извор енергије за кућне и друге примене. Иако су подложни климатским променама и не пружају увек константно снабдевање електричном енергијом, они се могу прилагодити јединицама за складиштење енергије. За производњу електричне енергије је најповољније су ветротурбине чији се ротори налазе на одређеним висинама а систем са три лопатице се показао као најефикаснији у погледу чврстоће конструкције као и расподела брзина.

У овом раду представљен је ветрогенератор чија је функција генерисање електричне енергије довољне за потребе једног домаћинства. Главна предност овог концепта је могућност покретања при релативно малим брзинама ветрова, што је омогућено великом ширином лопатица. Теоријски испраћено, генерисања веће количине електричне енергије при мањим брзинама обртања у поређењу са досадашњим моделима ставља овај тип ветротурбине у сам врх листе.

Главни недостатак, може се рећи, је управо складиштење генерисане електричне енергије која би се складиштила у акумулаторе или велике литијум-јонске батерије (веома скупе). Овај проблем се може решити директним спајањем на електричну мрежу. Што се тиче самоодрживих објеката који немају могућност спајања на електричну мрежу, овакав извор енергије је веома добро решење.

Конструкција ветрењаче израђене у овом раду својом ценом може конкурисати на тржишту али је потребно додатно тестирање и оптимизација којом би се одредила тачна снага и евентуална употреба других материјала. Након извршеног тестирања може се одредити да ли је овакав ветрогенератор исплатива инвестиција.

Литература

- [1] https://www.investopedia.com/terms/r/renewable_resource.asp, последњи приступ: Јануар 2018
- [2] Krozer Y.; Cost and benefit of renewable energy in Europe, Sweden, 2011
- [3] <https://www.dasolar.com/wind-power>, последњи приступ: Јануар 2018
- [4] <http://obnovljiviizvorienergije.rs/energija-vetra>, последњи приступ: Јануар 2018
- [5] Мамић А., Караулић С.; семинарски рад, Енергија ветра, Технички факултет Чачак, 2011
- [6] Јовановић М.; мастер рад, Енергија ветра и ветротурбине, Универзитет Сингидунум, Београд, 2016
- [7] <https://www.njuskalo.hr/sve-ostalo/anemometar-senzor-brzine>, последњи приступ: Јануар 2018
- [8] <http://www.enerjibes.com/ruzgar-enerjisinin-avantajlari-ve-dezavantajlari>, последњи приступ: Јануар 2018
- [9] Jha A., Wind Turbine Technology, New York: CRC Press - Taylor & Francis Group, 2011
- [10] ABB, Technical Application Papers, Wind Power Plants, Bergamo, Italy, 2011
- [11] J. Manwell, M. J.G. and L. Rogers A, Wind Energy Explained - Theory, Design and Application, New York: John Wiley & Sons, LTD, 2002
- [12] T. Burton, N. Jenkins, D. Sharpe and E. Bossanyi, Wind Energy Handbook – Second Edition, West Sussex: John Wiley & Sons, Ltd, 2011
- [13] A. Hemami, Wind Turbine Technology, New York: Cengage Learning, 2012
- [14] <http://www.windies-online.com/darrieus-wind-turbine/939>, последњи приступ: Фебруар 2018
- [15] <http://www.vetrogeneratori.co.rs>, последњи приступ: Фебруар 2018
- [16] <https://www.energydigital.com/top-10/top-10-wind-turbine-suppliers>, последњи приступ: Март 2018
- [17] <https://eolupjv.wordpress.com/les-types-deoliennes>, последњи приступ: Март 2018
- [18] Марјановић Н., Јовичић С.; Основи конструисања, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2011
- [19] Николић В., Машински елементи – теорија, прорачун, примери, Крагујевац, 2004
- [20] Плазенић С.; Приручник за постављање малих ветрогенератора, АМГ књига, Београд, 2011

[21] <http://www.skf.com/group/products/index.html>, последњи приступ: Март 2018