



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Машинске конструкције и механизација

Предмет: Машински елементи 2

Број индекса: 129/2017

Снежана М. Јоксић

Конструкција и анализа елемената погонског дела ветротурбина

завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. др Зорица Ђорђевић, ред. проф. - ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог завршног рада кандидат треба да прикаже историјски развој ветротурбина, да опише и објасни различите концепције ветротурбина, да наведе и објасни основне компоненте ветротурбина са посебним освртом на елементе погонског дела турбина.

Препоручена литература:

[1] Гузуровић З, *Ветротурбине-конструкција и компоненте*, Презентација, Загреб, 2010.

[2] Степић С, *Анализа добијања електричне енергије из енергије ветра на локацији Смедеревске Паланке*, Семинарски рад, Факултет техничких наука, Чачак, 2016

[3] Nau E, *Wind Turbines*, Book, Springer, Munich, 2013.

Крагујевац, септембар 2020.

ментор:

др Зорица Ђорђевић, ред. проф.

Резиме

Циљ овог рада била је анализа ветротурбине и њених саставних елемената, као и улога истих током историје све до данас. Такође, разматрана је могућност замене коришћења енергије фосилних горива енергијом ветра за производњу електричне енергије.

Први део рада посвећен је значају искоришћења енергије ветра као вида обновљиве енергије и њена распрострањеност широм света. Такође, у првом делу говори се о историјском развоју ветротурбина чији је значај препознат од почетака првих цивилизација, чије су се намене мењале заједно са потребама људског друштва.

У другом делу описани су саставни делови, на основу чега се може закључити колико ветротурбина представља комплексну и сложену конструкцију. Поред тога, приказани су погонски делови који имају главну улогу за нормално функционисање и рад ветротурбине, како различите концепције распореда делова могу утицати на рад.

Поред свих предности, сагледани су и недостаци који могу значајно да утичу на даљи развој и ширење ветроелектрана и чија решења још увек представљају главни предмет истраживања и развоја ветротурбина.

Кључне речи: *ветротурбине, ветар, елементи ветротурбина, погонски делови, енергија*

Abstract

The goal of this work was to analyze the wind turbine and its structural elements, as well as their role throughout the history until today. Also, the possibility of replacing the use of fossil fuel energy with wind energy for electricity production was considered.

In the first part it talks about the importance of using wind energy as a type of renewable energy and its distribution around the world. Also, the first part talks about the historical development of wind turbines whose importance has been recognized since the beginning of the first civilizations, whose purposes have changed along with human society.

The second part describes the components, on the basis of which it can be concluded how is complex the wind turbine. In addition, the drive parts that play a major role in the normal operation and operation of the wind turbine are shown, as different concepts of part layout can affect operation.

In addition to all the advantages, the disadvantages that can significantly affect the further development and expansion of wind farms and whose solutions are still the main subject of research and development of wind turbine.

Key words: *wind turbines, wind, wind turbine elements, drive parts, energy*

Садржај

Резиме	4
Abstract	4
1. Увод	6
2. Историјски развој ветротурбина	8
3. Опис различитих концепција ветротурбина	16
3.1 Ветротурбине са хоризонталном осовином	16
3.2 Ветротурбине са вертикалном осовином	18
3.3 Концепције савремених ветротурбина	21
4. Основне компоненте ветротурбина	23
4.1 Анеометар, мерач правца ветра и контролер	23
4.2 Ротор	24
4.3 Торањ	28
5. Елементи погонског дела турбина	30
5.1 Кочнице	31
5.2 Мењач	32
5.3 Преносник снаге	33
5.4 Генератор	34
6. Закључак	37
Литература	38

1. Увод

Енергија ветра спада у обновљиве изворе енергије, која не загађује ваздух и представља бесплатан, неисцрпан еколошки извор за којим се у садашњем времену јавља све већа потреба.

Како се забринутост и даље повећава због исцрпљивања ресурса, цене енергије, утицаја на животну средину и светског раста становништва, производња обновљиве енергије постаје најважнија у одржавању тренутних потреба за енергијом и испуњавању будућих потреба.

До 18. века ветар је био један од највећих извора енергије. Користио се за покретање бродова, млинова и пумпи за воду. Производња електричне енергије из ветра почела је да се развија тридесетих година прошлог века. Због изградње нуклеарних електрана, хидроелектрана и термоелектрана, овај вид производње енергије је био запостављен. Међутим због исцрпивости резерви фосилних горива и проблема емитовања штетних честица у последње време долази до све већег развоја ветроагрегата.

Модерне ветротурбине, које користе савремене технологије дизајна и производње су развијене у последњих неколико деценија. Оне се тренутно користе за производњу електричне енергије. На слици 1 приказан је изглед једне од модерних ветротурбина. Ветротурбине (ветрогенератори) су повезане са системом за пренос и дистрибуцију електричне енергије, које могу напајати енергијом и веома удаљене потрошаче [1].



Слика 1. Ветрењаче [2]

Енергија ветра је кинетичка енергија коју поседује ваздух који струји. Количина енергије зависи од јачине ветра, али и од густине ваздуха, која зависи од температуре, притиска ваздуха и висине. Да би се добила што већа количина енергије из ветрењача, потребна је што већа брзина ветра. Међутим, брзина ветра је на било којој локацији променљива у износу и трајању.

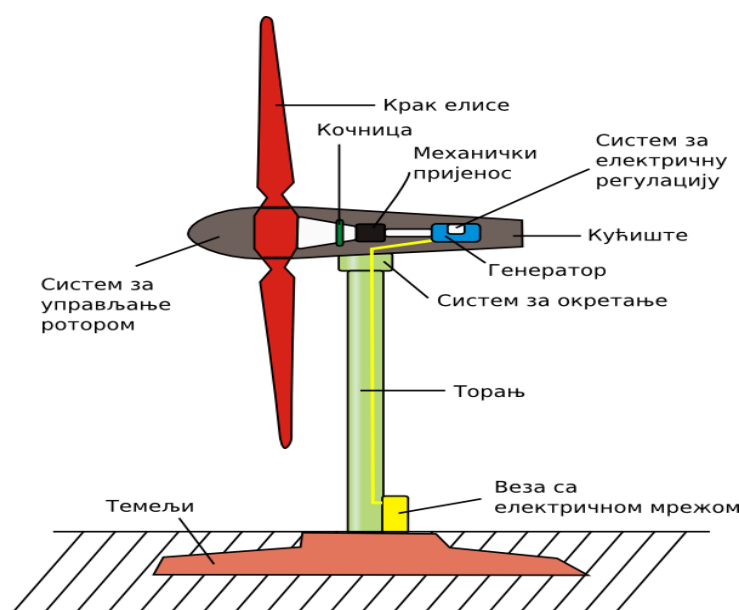
Ветрогенератори производе око 40% номиналне снаге, међутим при већој брзини ветра, овај проценат може достићи чак 60% [3].

Ветротурбине се користе за претварање кинетичке енергије ветра у механичку енергију. Оне су групно постављене на локацијама, названим ветроелектране. Постоји много конструкцијских решења ветротурбина, али је доминантан тип који се данас користи хоризонтална аксијална машина, постављена на вертикални носач (кулу), која може слободно да се ротира како би увек била у оси правца струјања ветра [1]. На слици 2 приказана је ветрењача са њеним саставним деловима.

Многе како развијене, тако и земље у развоју прелазе на нови вид производње електричне енергије, међу којима је најзначајнија енергија ветра. Главна предност овог извора енергије је та, да може да се постави где год има ветра, што значи да се могу поставити на земљиштима која нису искоришћена тј. где земља није плодна. Као једна од предности наводи се и то да овај вид производње енергије не ремети животну средину, као и то да не заузима много простора. Што се тиче недостатака, један од главних је производња буке, због чега су непожељне у близини насељених подручја. Затим, ветрењаче представљају велику опасност за птице које покушавају да прелете кроз турбинско коло.

Пораст изградње ветроелектрана бележи се у Северној Америци, Азији и Европи, док Кина представља доминантно тржиште са 19,5 GW капацитета, док друго и треће место заузимају Сједињене Америчке Државе и Немачка са 7 GW и 6,5 GW [4].

Србија се убраја у земље са великим потенцијалом када је реч о енергији ветра. Постоје погодне локације за изградњу ветрогенератора, на којима би се у перспективи могло инсталирати око 1.300 MW ветрогенераторских производних капацитета и годишње произвести око 2.300 GWh електричне енергије [5]. Као најпогодније локације за изградњу ветроелектрана су: источни делови Србије, Златибор, Копаоник и Панонска низија.



Слика 2. Делови ветрењаче [6]

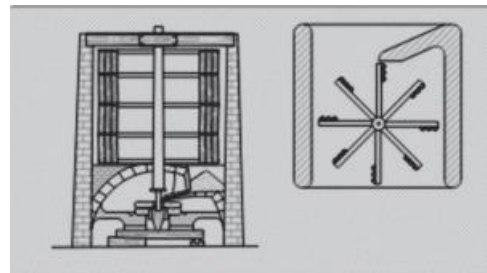
2. Историјски развој ветротурбина

Енергија ветра је један од најраспрострањенијих обновљивих извора енергије на земљи, која је током историје била доста коришћена. Ветар је коришћен за вађење воде из бунара, млевење зрна и то је разлог зашто се говори о „ветрењачама“, иако се оне данас не користе за те сврхе.

Не постоји тачан податак у ком периоду је почела да се користи енергија ветра, међутим постоји претпоставка да је она почела да се користи око 5000. године п.н.е. Најранији приказ коришћења овог вида енергије је пронађен на једној египатској вази на којој је приказан једрењак (возило које се кретало помоћу снаге ветра) из 3500. године п.н.е [7].

Прва забележена употреба ветрењача се бележи у Хамурабијевом закону из 1700. године п.н.е које су се користиле за наводњавање равница Месопотамије [8].

Прво забележено коришћење ветрењаче у Авганистану потиче из 7. века. Ове ветрењаче су називане панемоне и доста су се разликовале од данашњих. Имале су вертикалну осовину и шест до дванаест једара. Коришћене су за вађење воде из бунара и за млевење житарица. На сликама 3, 4 и 5 приказани су изгледи ових ветрењача [9].

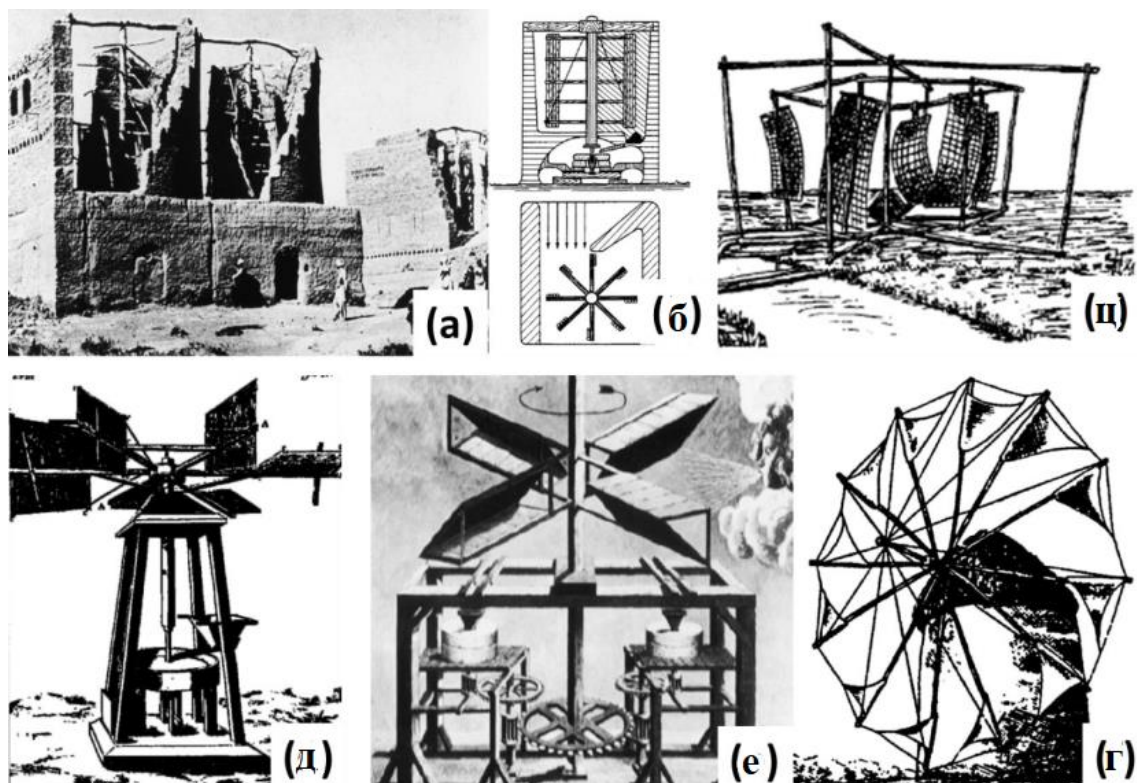


Слике 3, 4 и 5. Ветрењаче из 7. века на подручју данашњег Авганистана [9]

Већина најстаријих модела ветрењача из старих периода имала је вертикалну осу ротације. Оне су биле једноставне, посебно са аспекта изградње. Плетене простирке или једра кориштена су за стварање вуче и на тај начин долазило је до покретања ветрењача око средишње осе. Оне нису зависиле од смера ветра. Модел таквих ветрењача приказани су на слици 6.(а) (ц). Слика 6 (ц) представља модел кинеске ветрењаче.

На слици 6. (д) и (е) приказане су неке касније верзије млинова вертикалне осе развијене у Француској и Италији. На слици 6. (д) млински камен је причвршћен директно на вертикално погонско вратило без икаквог средњег зупчаника или другог механизма за преусмеравање ротационог покрета. Слика 6. (е) приказује једну од напредних ветрењача

коју је створио Фаусто Веранзио у Италији. Може се видети да је ова ветрењача дизајнирана са ротором у облику чашица, што побољшава ефикасност уређаја. Веранзио је такође развио механизам зупчаника за своје ветрењаче који омогућава да се млинови крећу много већом брзином, иако су ротори дизајнирани за мали однос брзине [10].



Слика 6. Модели старих ветрењача [9]

Ветрењаче са хоризонталном осовином представљају новији изум у односу на ветрењаче са вертикалном осовином. Иако појава прве ветрењаче са хоризонталном осовином датира још од 12. века, она је тек развијена у 20. веку. Једна од најпопуларнијих ветротурбина хоризонталне осовине биле су торњи, приказани на слици 6 (г), који су постојали у Европи.

Једна од првих иновација када су у питању средњовековне ветрењаче било је веће искоришћење снаге ветра тако што су се ветрењаче могле окретати у правцу дувања ветра. У средњовековној Европи, управљач ветрењаче је могао ручно да окрене ветрењачу и на тај начин искористи и ухвати сваки поветарац [9].

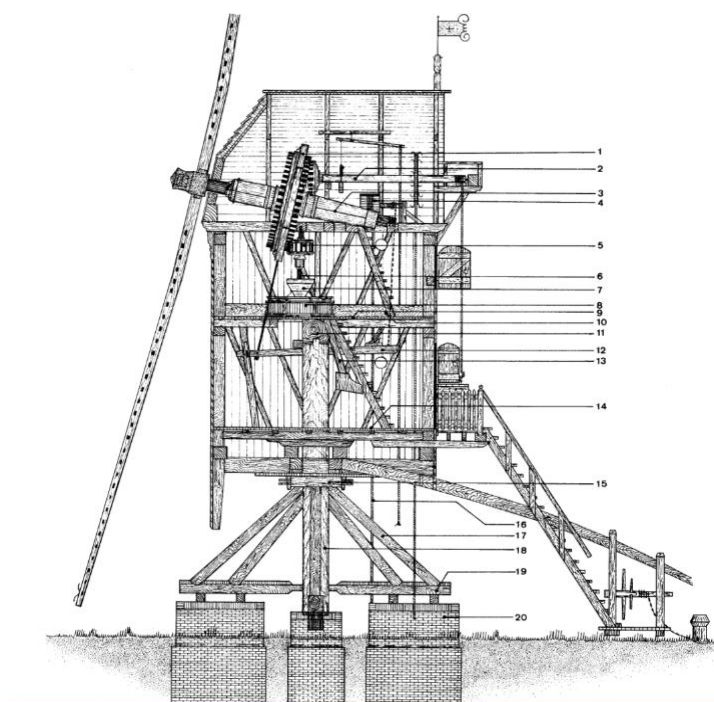
Холанђани су у 14. веку конструисали прву ветрењачу код које се само врх торња окреће (слика 7). Оне су имале фиксну дрвену конструкцију у којој се налазио механизам за млевење и покретни кров који су чинили једра, кров, вратило и кочнице [9]. На овај начин, средњовековна ветрењача, која је морала цела да се окреће да би се прилагодила дувању ветра, је унапређена. У овом случају, само врх ветрењаче би се окретао и прилагођавао ветру. Овакав тип конструкције омогућио је то да ветрењаче постану веома велике и да имају могућност обављања више послова истовремено. Наиме, ако би ветрењаче биле веће и снага ветра би била више искоришћена. Поред свих ових унапређења ветрењаче, Холанђани су први измислили лопатике које би се користиле уместо једара, као што је приказано на слици 7.

У данашњој Холандији, ветрењаче су се најчешће користиле за наводњавање, док су у осталим деловима Европе, оне углавном коришћене за млевење жита.



Слика 7. Холандска ветрењача [9]

Као још једна врста ветрењаче, појавила се стубна ветрењача, која је тек у 20. веку унапређена. Имала је облик квадратне конструкције која је могла да ротира око своје средишње осе, кроз коју је пролазио вертикални стуб. Захваљујући полузи за окретање, она се окретала према ветру заједно са ротором. Главна осовина са ротором је готово хоризонтална. Зупчато коло преко зупчаника погони вертикалну осовину са млинским каменом. Изглед ове ветрењаче приказан је на слици 8. Она се састојала из: 1-зупчато коло; 2-осовина дизалице; 3-ручна дизалица; 4-осовина са ротором; 5-зупчаник; 6-држач; 7-левак за пуњење; 8- млински камен; 9-попречна греда; 10-кочиона полуга; 11-кочионо уже; 12-уже за управљање дизалицом; 13-спремиште брашна; 14-лежај; 15-полуга за окретање; 16- централни стуб; 17-дизалица за вреће; 18,19-ослонац; 20- темељи [8].

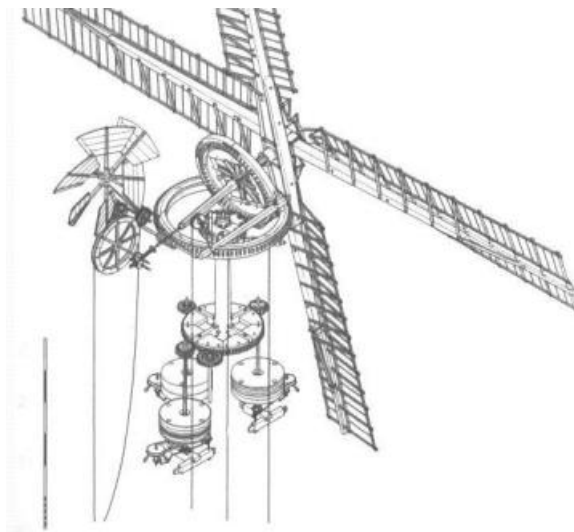


Слика 8. Стубна ветрењача [11]

Рад старих ветрењача захтевао је стално присуство млинара који су поред млевења жита морали да брину о раду ветрењача. Они су морали да окрећу ротор у смеру дувања ветра и да контролишу рад ветрењача, као и да заустављају њихов рад у случају великих олуја.

Један од тежих задатака била је регулација снаге млина у односу на јачину ветра. То се радило уз помоћ прилагођавања површине платна која прекрива лопатице ротора. Пошто се радило о субјективној процени јачине ветра, често је долазило до грешака. У случају погрешне процене јачине ветра, млинар је морао да заустави рад ветрењаче како би се платно додатно увило. Пошто се кочење вршило помоћу кочнице на зупчастом колу, која је била израђена од дрвета, услед трења приликом кочења често би долазило до пожара због топлоте која се стварала услед трења.

Као једна од иновација била је ветрењача са конопцима који су прилагођавали платно јачини ветра, која се појавила почетком 17. века. Прилагођавање платна вршило се једноставним спуштањем и подизањем полуге. У случају олује, ветрењача се могла лако зауставити захваљујући потпуним увијањем платна у унутрашњост млина. На тај начин ветар би једноставно пролазио кроз дрвену унутрашњост лопатица. Пример једног оваквог решења дат је на слици 9 [8].



Слика 9. Управљачки механизам ветрењаче [8]

Године 1759. дошло је до открића у погледу већег искоришћења ветрењача. Како би искоришћење ветра било што веће, дошло је до предлога да се лопатице турбине увију у односу на раван ротације за 18° у корену и за 7° при врху лопатица [8].

Након 1800. године стубне ветрењаче су унапређене, тако да су имале два зупчаста кола како би се омогућило паралелно млевење са два млинска камена [8].

Следећи тип ветрењаче који је развијен половином 19. века је такозвана „америчка фармерска ветрењача“ која је настала на фармама у Северној Америци и служила је за снабдевање пијаћом водом. Штавише, коришћена је за снабдевање водом парних локомотива нових железница које су се шириле на Запад. Једна од предности ових ветрењача је била то што оне нису захтевале присуство млинара, као и то што су израђиване за серијску производњу. Најважнија компонента ове ветрењаче је ротор, који се због структуралног дизајна назива и „роторском розетом“. Његов пречник варира између 3 m и 5 m и има више од 20 металних лопатица. Састоји се и од наставка који омогућава да се ротор аутоматски окреће. Такође, постоји и полуга за покретање клипне

пумпе. Амерички млинови још увек постоје и неколико њих је инсталирано са скоро непромењеним дизајном у Аустралији, Аргентини и САД-у. Слика 10 приказује једну од таквих ветроелектрана које користе америчке млинове за пумпање воде [10].



Слика 10. Америчка „фармерска“ ветрењача [10]

Прва ветротурбина која је почела да производи електричну енергију, била је ветротурбина са вертикалном осовином коју је 1887. године пројектовао Џејмс Блајт. Конструкција је била висока 18 m, док је ротор био пречника 17 m и производила је 12 kW енергије. Међутим ова идеја није била спроведена због тадашњег неповерења у електричну енергију.

Прве ветротурбине које су се у већој мери користиле за производњу електричне енергије била је ветротурбина коју је конструисао Чарлс Барш у САД-у. Она је имала сличне карактеристике као и Блајтова ветротурбина, са том разликом што је имала хоризонталну осовину и вишеструке лопатице [9].

Након овог периода, ветрењаче почињу нагло да се развијају. Године 1891. дански научник Пол ла Кур развија ветроелектране које генеришу електричну енергију и касније разматра како да обезбеди стални ток енергије из ветротурбине користећи регулатор. Затим, наредних година, користи електричну енергију за осветљење села Асков. Он је такође, прва позната особа која је открила да су ветротурбине са мање лопатица које се брже окрећу ефикасније од турбина са већим бројем лопатица које се споро окрећу. До 1908. године постојало је 72 система ветра који производе електричну енергију широм Данске. Ветрењаче су производиле енергију од 5 kW до 25 kW [12].

Прва високоенергетска ветротурбина појавила се у Русији 1931. године. Имала је генератор од 1000 kW и радила је две године. Након десет година, изграђена је ветротурбина од 1,25 MW са елисама дужине 50 m у Вермонту. Она је радила само неколико стотина сати, а након тога дошло је до пуцања ротора због огромне конструкције и неправилно конструисаног ротора [7].

Модеран дизајн турбине, која доста личи на данашњу, са три лопатице на врху високог, затвореног торња појавио се 1956. године и радио је је једанаест година, без одржавања. Изглед овакве ветротурбине приказан је на слици 11 [7].

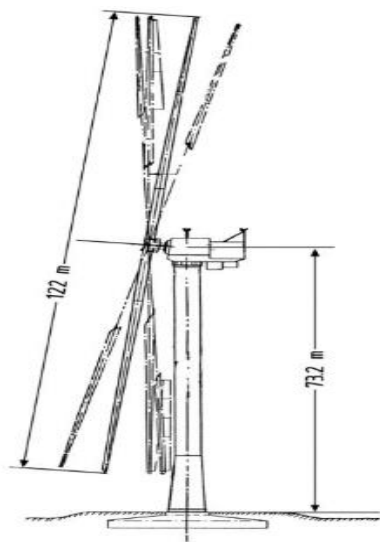


Слика 11. Модеран дизајн ветротурбине са три лопатице [7]

Коришћења ветрењача за разне намене, али не у великим размерама наставља се све до велике енергетске кризе седамдесетих година прошлог века. Тада је недостатак нафте повећао свест о алтернативним изворима енергије и променила енергетску слику света. То је учинило да ветрењаче буду у том периоду један од највећих извора енергије.

Године 1975. почиње програм који је покренула НАСА. Овај истраживачки и развојни програм покренуо је многе технологије са мулти-мегаватним турбинама које се данас користе, укључујући: куле од челичних цеви, генераторе са променљивом брзином, композитне материјале, делимично распон управљања, као и аеродинамичко, структурно и акустичко инжењерство дизајнерске могућности. Велике ветроелектране развијене у оквиру овог напора поставиле су неколико светских рекорда у пречнику и излазу снаге[12].

За време развоја који је почео у Сједињеним Државама постављене су и тестиране разне експерименталне турбине. Последњи и највећи пројекат, MOD-5A није никада реализован у пракси. Предвиђено је да турбина има пречник ротора од 122 m и називну снагу од 7300 kW. Модел овакве турбине приказан је на слици 12. Као посебна карактеристика коришћен је такозвани ротор са двоструким ножевима. Пројект је отказан 1993. године у корист MOD-5B јер је његов дизајн у великој мери заснован на претходним турбинама и могао би се брже и јефтиније имплементирати. Он је имао пречник ротора 97 m, и називну снагу од 3800 kW. Модел ове турбине приказан је на слици 13. [11].



Слика 12. Турбина ознаке MOD-5A [11]



Слика 13. Турбина ознаке MOD-5B [11]

Недостатак нафте је учинио то да САД буду један од светских лидера по производњи електричне енергије која је заснована на коришћењу енергије ветра 1980. године [7]. Крајем августа 1985. године, на Светској конференцији о ветроенергетици одржана је свечаност приликом које је струја из ветрогенератора достигла вредност енергије у вредности од милион барела нафте [3]. Већ деведесетих година прошлог века, почела је да се смањује потрошња енергије која је потицала од ветрењача јер је цена нафте појефтинила.

У периоду деведесетих година прошлог века конструисане су и мале експерименталне турбине које су испробане у удаљеним регионима у комбинацији са дизел генераторима. Програм је достигао врхунац у изградњи највећег ротора *Darrieus*. Имао је екваторијални пречник од 64 m, висину од 100 m и снагу генератора од 4 MW (Слика 14). Међутим, резултати испитивања нису били задовољавајући, па је турбина демонтирана и објављено је само неколико резултата испитивања [11].



Слика 14. Мала експериментална турбина, *Darrieus* [11]

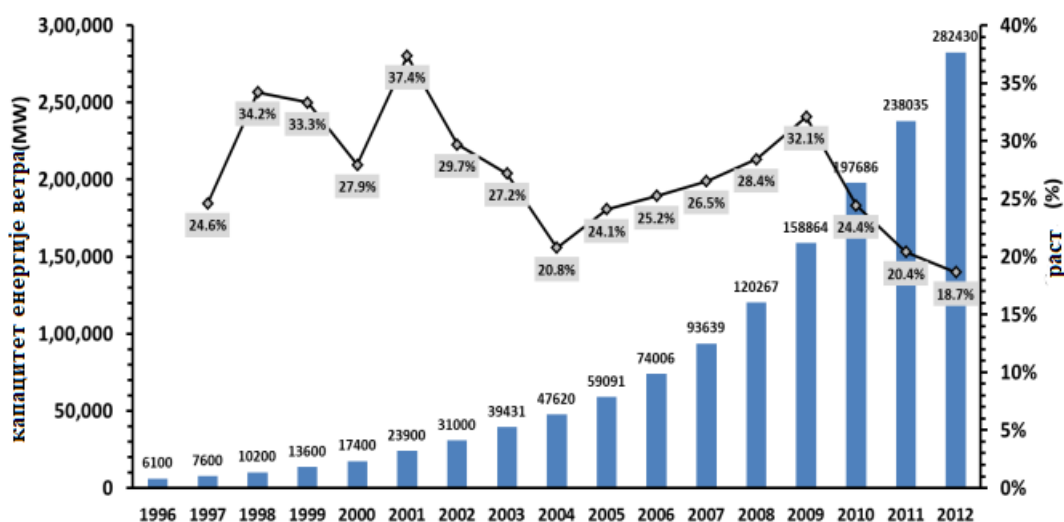
Варијација *Darrieus*-овог ротора је такозвани "Н-ротор". Уместо закривљених лопатица ротора користе се равне лопатице повезане шипкама ротора. Покушаји реализације ове ветротурбине су били у Великој Британији, Сједињеним Државама и Немачкој. Пречник ротора је 35 m, а номинална снага 300 kW.



Слика 15. Ветротурбина са Н-ротором [11]

Н-ротори са променљивом геометријом ротора такође су тестирани како би се омогућио бар груби степен контроле снаге и брзине. Међутим, до данас, производни трошкови ових система и даље су толико високи да се не могу такмичити са роторима хоризонталне осе. Изглед ових турбина приказан је на слици 15 [11].

Од 2000-их година бележи се све већи раст коришћења енергије ветра. Према истраживањима последњих година, ветроелектране имају удео 3,5% светске потражње за електричном енергијом, међутим до краја 2020. године очекује се да тај удео буде чак 12% (слика 16). Крајем 2012. године, укупна светска снага ветра била је 282 гигавата, што представља раст од око 18,7% у односу на претходну годину. Такође 73,7% укупног енергетског капацитета у 2012. години допринело 5 држава: Кина, САД, Немачка, Шпанија и Индија. Кинески капацитет ветроелектране наставио је да расте преко 21% у 2012. години. Сједињене Државе су такође стекле замах и приказале годишњу стопу раста од 27,9% у 2012. години, што је највиша стопа раста у последње три узастопне године. Америчко Министарство за енергетику предвиђа да до 2030. испоручује 20% електричне енергије из ветра[10].



Слика 16. Укупни инсталирани капацитет ветроелектране (MW) и стопа раста светске енергије ветра (%) [10]

Данас постоји на хиљаде различитих дизајнираних ветрењача, са хоризонталном и вертикалном осовином. Најшире коришћен је дански концепт ветрењаче, са три ротора и хоризонталном осом.

Већина елиса ветротурбине прави се од фибергласа или од мешавине дрвета и епоксида, док се торњеве праве од нерђајућег челика [10].

До сада најјача турбина на свету је *Enercon E-126* у Немачкој. Торањ је висок 138 m, док ротор има пречник 126 m и потребно му је 5 секунди да обрне пун круг [10].

У Северном мору је 2009. године постављена прва плутајућа ветрењача и тиме су се избегли проблеми заузимања земљишта, а обезбеђена је и заштита птица [13].

3. Опис различитих концепција ветротурбина

Постоји много различитих концепција ветротурбина, које се и данас све више развијају. Циљ је да се постигне што већи степен искоришћења и стабилан рад у што ширем опсегу брзине ветра. Основна подела је на ветротурбине са хоризонталном осовином и ветротурбине са вертикалном осовином.

Поред основне поделе, ветрењаче се могу поделити према: раду генератора турбине, капацитету турбине, режиму рада генератора, режиму напајања и према месту постављања [14].

3.1 Ветротурбине са хоризонталном осовином

Већина комерцијалних ветротурбина данас припада типу са хоризонталном осовином. Типична хоризонтална ветротурбина има осовину постављену хоризонтално у односу на земљу и скоро паралелно са струјањем ветра. У случају да су постављене низ ветар, саме се прилагођавају смеру ветра. Један од недостатака је то што лопатице приликом ротације око хоризонталне осовине пролазе кроз заветрину стуба чиме се стварају вибрације и бука.

Могу имати ротор пречника од 20 m за снагу од 200 kW, до чак 120 m пречника ротора за снагу од 5 MW. Ветротурбина је постављена на вертикални стуб који се израђује најчешће као челични конични стуб и може бити висине до 120 m, у зависности од пречника ротора [16].

Модерне ветротурбине могу бити постављене уз или низ ветар, јер имају систем за закретање осовине у смеру дувања ветра. Такође, оваква концепција има облик лопатица које су сличне авионским пропелерима. Могу имати различит број лопатица, али се за веће снаге користе три лопатице јер оне имају највећи степен искоришћења [15].

Све мрежно постављене турбине су постављене са пропелером ротора на хоризонталној оси. Ротор служи за претварање линеарног кретања ветра у ротациону енергију која служи за покретање генератора. Ветротурбине углавном користе синхроне или асинхроне генераторе. Оваква конструкција подразумева скоро константне обртаје ротора када је генератор директно прикључен на комуналну мрежу.

Многе концепције ветротурбина користе кавезне индукционе генераторе, који раде у малом опсегу брзина, нешто брже од синхроних генератора. Њихова главна предност је то што се могу лако прикључити на електричну мрежу и релативно ниска цена.

Све популарнија опција је ветротурбина са променљивом брзином. Оне имају много предности као што су: смањење хабања ветротурбине, максимална ефикасност у широком опсегу брзине ветра, као и повећано искоришћење енергије ветра [16].

Постоје два типа оваквих ветротурбина: са стубом постављеним испред лопатица или са стубом постављеним иза њих. Ветротурбине са стубом постављеним испред лопатица не захтевају механизам за закретање, јер се њихова конструкција сама поставља према ветру.



Слика 17. *Ветротурбина са лопатицама испред стуба [5]*

Овакве конструкције ветротурбине подnose јакe ветрове јер могу имати већа савијања лопатица, без могућности додиривања стуба. Као још једна од предности је то да овакве ветротурбине представљају лаку конструкцију. Изглед овакве ветротурбине приказан је на слици 17 [5].

Једна од највећих мана овог типа конструкције је то што лопатице пролазе кроз турбуленцију насталу од торња што изазива велико оптерећење лопатица. Такође, ако се ради о великим ветротурбинама, могу се јавити одређени проблеми јер се горњи део може закретати више пута у истом смеру, што може пореметити и изазвати проблеме са вођењем каблова кроз стуб.

У пракси, најчешће се користе ветротурбине са стубом постављеним иза лопатица (слика 18).



Слика 18. *Ветротурбине са стубом постављеним иза лопатица [5]*

Код овакве концепције, постоји мала могућност појаве турбуленције око стуба, па тако при сваком проласку лопатице испред стуба, долази до малог пада снаге. Једна од главних мана овакве концепције је то што је ротор удаљен од стуба, што доводи до сложеније израде саме ветротурбине, као и до већих трошкова. Поред тога, захтевају и уграђивање уређаја за прилагођавање смеру ветра.

Као посебан тип ветротурбина са хоризонталном осовином издвајају се Darrieus-ове ветротурбине (Слике 19 и 20). Оне могу решити проблем турбулентних струја које настају изнад кровова објекта, лежају су боље смештени на конструкцији и аксијалне силе су занемарљиве. Њихов негативан аспект представља немогућност хватања ветра из свих смерова, па им је примена ограничена [17].



Слике 19. и 20. Darrieus-ове ветротурбине постављене на различитим објектима [17]

3.2 Ветротурбине са вертикалном осовином

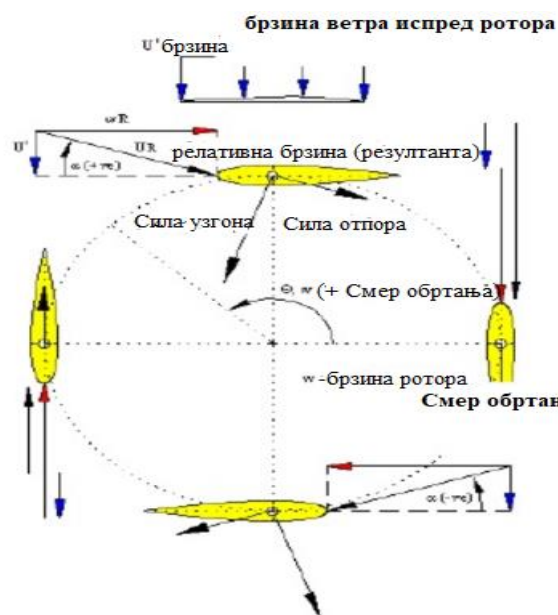
Ветротурбине могу бити постављене тако да се лопатице обрћу око централне вертикалне осе. У овом случају, ветар струји нормално на осу ротације, па се оне не морају усмеравати ка смеру дувања ветра. Генератор је смештен у подножју ветротурбине што их чини лакшим за одржавање и нису им потребни торњеве. Поред тога, нису им потребни мењачи, генератори и остали делови који се могу поставити на земљу.

Међутим, њихова аеродинамичка ефикасност је мања у односу на ветротурбине са хоризонталном осовином и постоји ограничена могућност ротора да се сам покрене, па је потребна почетна сила пре самог покретања. Затим, оваква концепција захтева жичану подршку, брзина ветра је мала при самом тлу, па је на доњем делу ротора брзина ветра мала. Упркос могућности одсуства торња, да би се достигла ефикасност као код турбина са хоризонталном осовином, потребна је уградња торња.

Као један од главних примера овакве концепције ветротурбине, наводи се већ поменута Darrieus-ова ветротурбина, која може бити различитих конструкција. Она има облик параболе и састоји се од централног суба на коме су повезане две или више флексибилних лопатица. Darrieus-ов генератор најчешће захтева мали електрични мотор као погон са сензором за ветар како би се ускладила брзина ветра са брзином окретања ротора (Слика 22). Мотор се након одређеног времена потребног да ротор достигне потребну брзину зауставља.

Основни принцип рада се заснива на претпоставци да ветар који наилази на лопатицу дува равно. Лопатице се окрећу много брже од брзине дувања ветра. На слици 21. приказан је вектор брзине лопатица у различитим положајима у односу на ветар. Са великом променом положаја лопатица и са њиховом великом брзином, лопатице ће пресецати ветар са малим нападним углом. Резултујућа сила погона покреће ротор, док је отпорна сила увек супротног смера. Када је на левој страни сила узгона под углом од

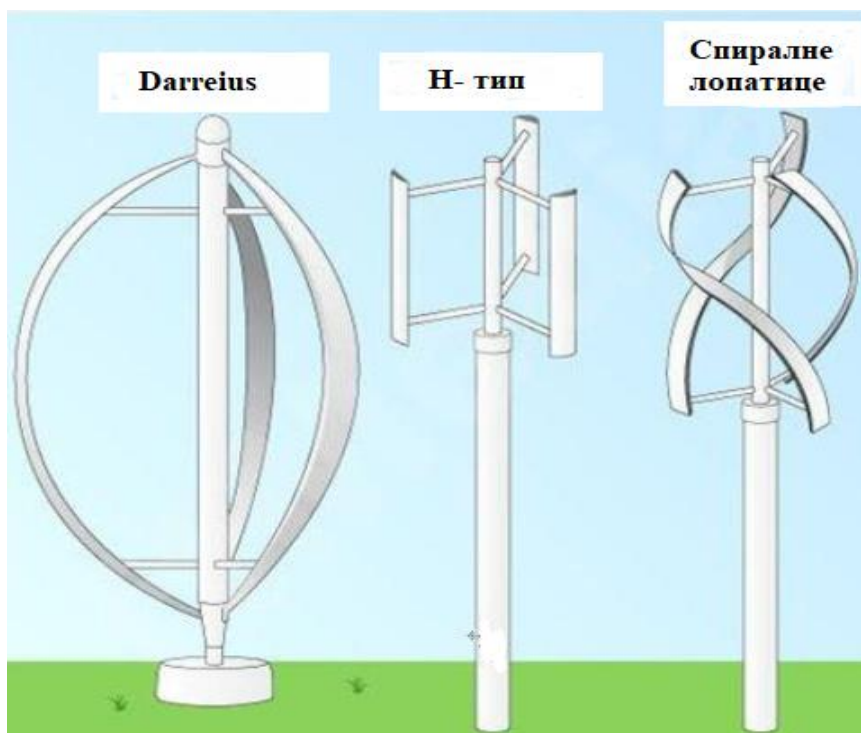
0° , на десној страни лопатице се покрећу у смеру ветра и налазе се под углом од 180° где је момент негативан [17].



Слика 21. Брзине и силе на пресеку лопатица [17]

Када се лопатице налазе под углом од 90° , сила узгона је много већа од силе отпора, што ће резултирати тиме да се лопатице покрећу у смеру позитивног момента. Након сваког обртаја, укупни момент је позитиван и ротор се тада врти у правом смеру.

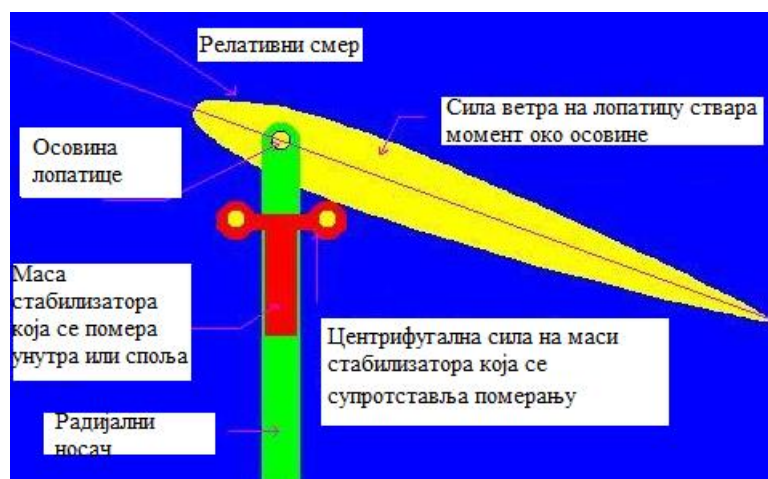
Поред класичне конструкције Darrius-ове ветротурбине, постоји и ветротурбина Н-типа, чије су лопатице постављене паралелно у односу на осу ротације (Слика 22). Она представља једноставнију конструкцију, а главни проблем представља то што су лопатице постављене удаљено у односу на симетралу торња, па се оне морају израђивати чвршће.



Слика 22. Изглед различитих концепција Darrius-ове ветротурбине [16]

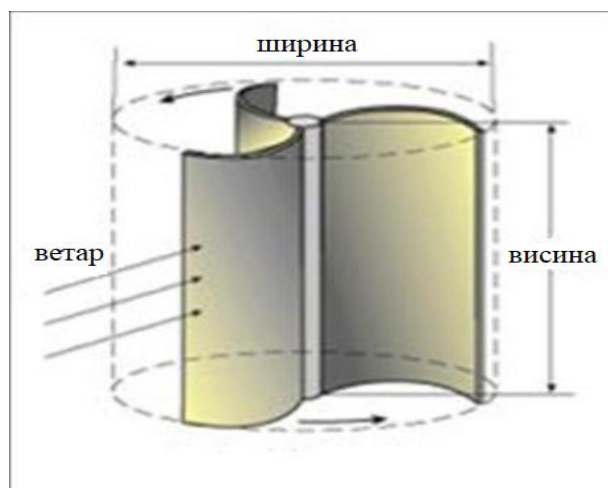
Неки типови Dargius-ових турбина могу имати лопатице спирално увијене под одређеним угловима (најчешће под углом од 60°) [17]. У том случају, ветар може имати добар нападни угао са обе стране лопатица, независно од тога у ком се положају налазе. Момент је током целог рада уједначен, тако да нема великих промена, а пошто се аксијалне силе са обе стране поништавају, не постоји велико оптерећење лежаја. Овакав облик је повољан због смањења отпора ротације и проблем окретања према смеру ветра је отклоњен. Изглед ове концепције приказан је на слици 22.

Као посебан тип ветротурбине који се развио на основу Dargius-ове H-ветротурбине су циклотурбине (Слика 23). Разлика у односу на H-тип је то што лопатице имају могућност окретања око своје осе. То омогућава лопатицама да захватају ветар под било којим углом, без обзира на положај у ком се налазе. Због оваквог система захватања ветра оне имају константан, велики момент што доводи до веће ефикасности и великог степена искоришћења. Оне су најчешће конструисане са три или четири лопатице. Систем самоокретања је позитиван са аспекта генерисања што веће силе узгона у погодном положају, али он са друге стране захтева сложену израду и уградњу одређених сензора за одређивање смера ветра [17].



Слика 23. Принцип рада циклотурбина [18]

Други познати тип ветротурбина је Savonius-ов тип који ради по принципу отпора који је комбинован са потиском. Оне имају две полуцилиндричне лопатице (у неким случајевима и три) које су отворене на супротим странама (Слика 24).



Слика 24. Изглед Savonius-ове ветротурбине [16]

Лопатице су спојене, тј. преклапају се у близини осе ротације тако да се ветар који је захваћен једном лопатицом, може без сметњи пренети у другу лопатицу. Оваква концепција има већи степен искоришћења од ротора који су базирани само на принципу отпора, али има мањи степен искоришћења од ротора који су засновани на принципу потиска.

Захваљујући заобљеним лопатицама, једна страна лопатице (отворена страна) захвата ветар која има већи отпор од друге (заобљене) стране која не захвата ветар, већ га одбија. На тај начин, захваљујући разлици у отпорима, ветротурбина се покреће и није потребан ротациони механизам. Такође, она представља веома поуздану конструкцију.

Savonius-ове ветротурбине могу радити при малим брзинама ветра, али као један од главних недостатака им је то што је потребно доста уложеног материјала за израду [18].

3.3 Концепције савремених ветротурбина

Helix Wind је савремена ветротурбина која је конструисана и тестирана у Лас Вегасу и Сан Дијегу. Она даје константне моменте при великом опсегу брзине ветра и тешким условима рада. Није потребно заустављање при јаким ветровима и постављање је једноставно. Намењена је за рад у урбаним срединама и захвата ветар у свим смеровима. Њен изглед приказан је на слици 25 (а).

Quiet revolution турбина је конструкција британске компаније која се бави развојем ветротурбина Darrieus-овог типа (Слика 25 (б)). Радни век је 25 година, а лопатице и држачи се израђују од карбонских влакана и епоксидне смоле. Као једна од предности ове концепције је то што је безбедна за птице [18].



(а)



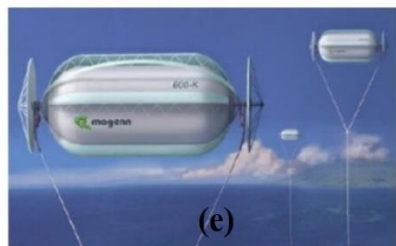
(б)



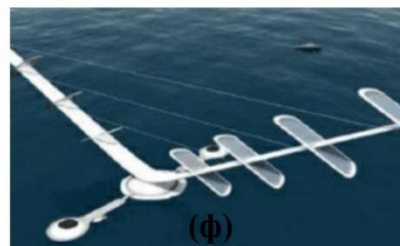
(ц)



(д)



(е)



(ф)

Слика 25. Изгледи савремених концепција ветротурбина [17]

Wing ветротурбине представљају унапређену концепцију Darrieus-ове и Savonius-ове турбине коју производи јапанска компанија, која је приказана на слици 25 (ц). Пошто је највећи проблем Darrieus-ове ветротурбине самоокретање, они су облик лопатица прилагодили тако да се тај проблем што више избегне. Наиме, лопатице имају облик сличан као код Savonius-ове ветротурбине и користе принцип силе потиска како би се извршило самоокретање. На овај начин се постигла могућност покретања при брзинама око 1 m/s. Што значи да се оне покрећу и при поветарцу и имају степен искоришћења као Darrieus-ове ветротурбине [17].

Ветротурбина компаније Tenisic представља комбинацију Теслине и Darrieus-ове ветротурбине. Она спада у групу ветротурбина са вертикалном осом и састоји се од 200 дискова дебљине 2 mm који су наслагани један на други, као што је приказано на слици 25 (д). На спољашњој страни налазе се лопатице аеродинамичког профила које усмеравају ветар на површину дискова. Око ротора налази се склоп статора који имају улогу да захватају што већу количину ветра. Ову концепцију карактерише мала маса, па се могу поставити на кров.

Magenn Power је канадска компанија која се бави проучавањем напредних материјала и структура. Истраживања су почела конструисањем ваздушне летелице сферног облика која је имала назив Magnus. Принцип рада ове летелице се применио на модерну ветротурбину MARS, која је приказана на слици 25 (е). Она представља лагану ветротурбину на поводцу, која ротира око хоризонталне осе у односу на ветар, генеришући тако електричну енергију [17]. Електрична енергија преноси се помоћу поводца и управо захваљујући њему, ове ветротурбине се налазе на великим висинама од 180 m до 300 m. Једна од главних предности је могућност инсталације на разним подручјима.

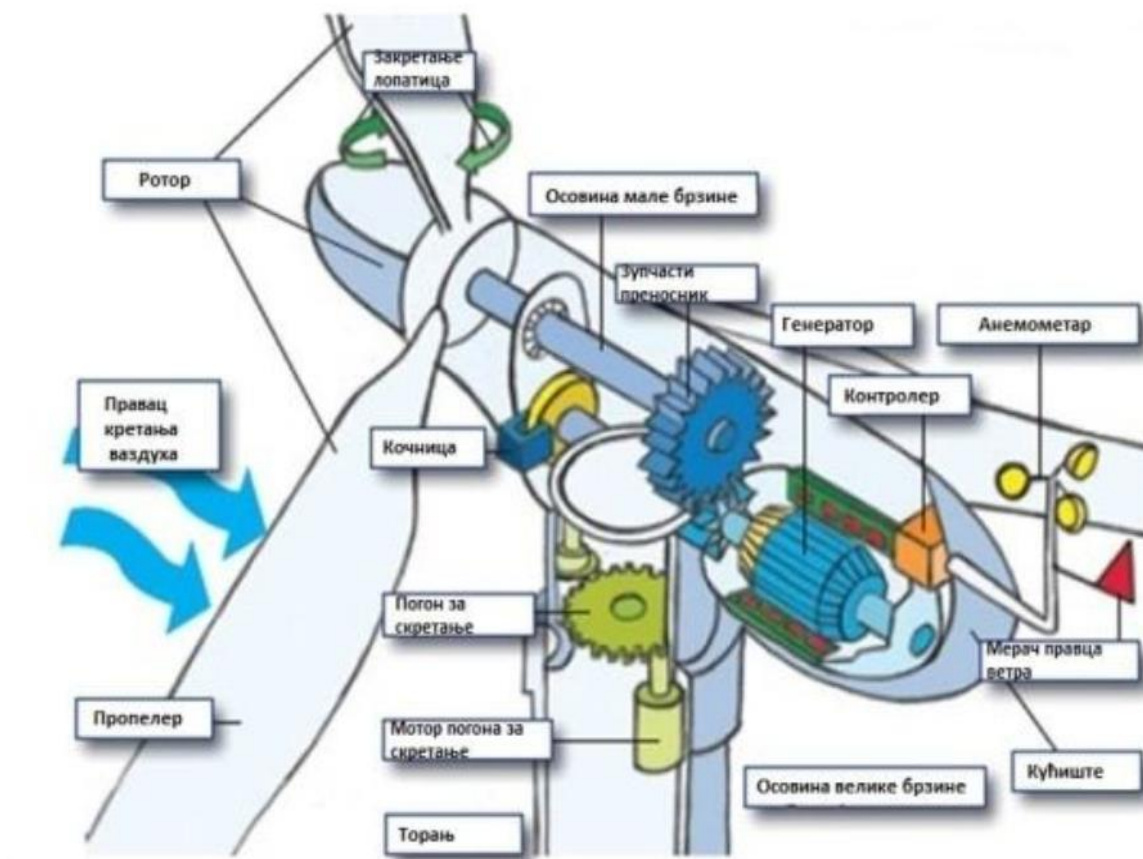
Аерогенератор је настао као потреба Велике Британије за коришћењем енергије из обновљивих извора. Висина ове ветротурбине износи 140 m, а снага 9 MW. Оваква ветротурбина представља Darrieus-ову верзију ветротурбине без горњег дела уз додата крилца на лопатицама. Код оваквог типа конструкције елиминише се потреба за средишњим стубом, а готово највећи део масе се налази на дну ветротурбине чиме је олакшана израда (Слика 25 (ф)) [17].

4. Основне компоненте ветротурбина

Ветротурбина служи за претварање кинетичке енергије ветра у механичку енергију. У случају да се механичка енергија ветра користи директно у машинама за млевење жита или пумпама реч је о млиновима на ветар. Ако се механичка енергија ветра претвара у електричну, онда је реч о ветрогенераторима.

Тренутно су најчешћи ветрогенератори са хоризонталном осом, са три лопатице и снагом од 1 MW до 6 MW. Код оваквог типа ветрогенератора се преносни систем – редуктор и електрични генератор, налазе на врху носећег торња. Конструкција се покреће помоћу сензора правца ветра и сервомотора, тако што су елисе постављене управно на правац дувања ветра. Најсложенији део представља мењачка кутија, која претвара неуједначено и лагано окретање елисе у брзе окрете генератора сталне учестаности [3].

Свака ветротурбина се састоји од стуба, на чијем врху се налази гондола која држи елису, и у којој се налазе најбитније механичке и електричне компоненте.



Слика 26. Елементи ветротурбине [5]

4. 1 Анеометар, мерач правца ветра и контролер

Анеометар служи за мерење брзине ветра и тај податак прослеђује до контролера. С обзиром на то да ветротурбине раде само у одређеним распонима брзине дувања ветра, анеометар одређује када је ветар у дефинисаним распонима. Може да провери укупну

брзину кретања ветра у хоризонталној равни или у одређеним смеровима. Представља један од најважнијих инструмената за постављање и рад ветротурбина. Најчешће су велике куле постављене са већим бројем анеометара како би се добиле што поузданије информације о количини и брзини ветра [19].

Поред анеометара, за мерење брзине ветра у одређеним случајевима користе се и анемографи. Један од најпознатијих анемографа је Фусов анемограф, који мери правац, средњу и тренутну брзину ветра [16].

Да би се обезбедио што ефикаснији рад, ветрењаче су постављене у смеру дувања ветра, док су лопатице управљене према јачини ветра. Како би се ускладио овакав начин рада ветра и ветротурбина, анеометар се поставља на врх ветротурбине и на такав начин врши важну функцију код управљања. У склопу анеометра најчешће се налази мерач правца ветра који одређује смер ветра и комуницира са погоном за скретање ради исправне оријентације турбине у односу на ветар.

Контролер покреће турбину при брзини ветра од око 13-26 km/h и зауставља при брзини од око 100 km/h. Турбина не сме да буде у погону при брзинама већим од 100 km/h због могућности прегревања [5].

Као што је већ речено, сигнал са анеометра може имати функцију у самом управљању турбином, а у најчешћим случајевима он сигнализира контролеру да је ветар достигао довољну брзину и да треба покренути турбину или у случају прејаког ветра да турбину треба искључити [20].

Анеометар, контролер и мерач правца ветра су компоненте приказане на слици 26, које омогућавају сигуран рад ветротурбине. Ове три компоненте обезбеђују сигурност и чине ветротурбину јефтинијом за рад. Такође, уз помоћ њих, могуће је предвидети и решити кварове, што повећава ефикасност и продужење рада. Поред тога, имају важну улогу у обезбеђивању тачних података турбине. Најважнији делови турбине ослањају се на податке које долазе из ове три компоненте, па је важно да је турбина опремљена висококвалитетним сензорима [21].

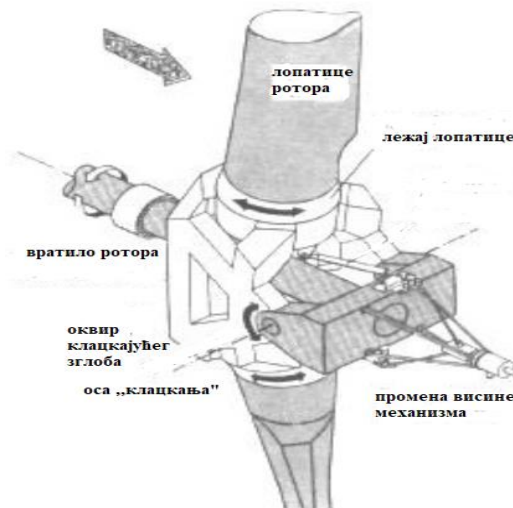
4.2 Ротор

Ротор се састоји од два основна дела: лопатица и главчине. Они се често сматрају најважнијим компонентама турбине.

Иако постоје бројне варијанте различитих система, већина модерне опреме састоји се од хоризонтално постављеног погонског склопа с два или три ножа причвршћена на ротор који је окренут на доле. Ротор се налази на врху куле и има најмање један лежај ротора и главно вратило које покреће систем генератора за претварање енергије [14].

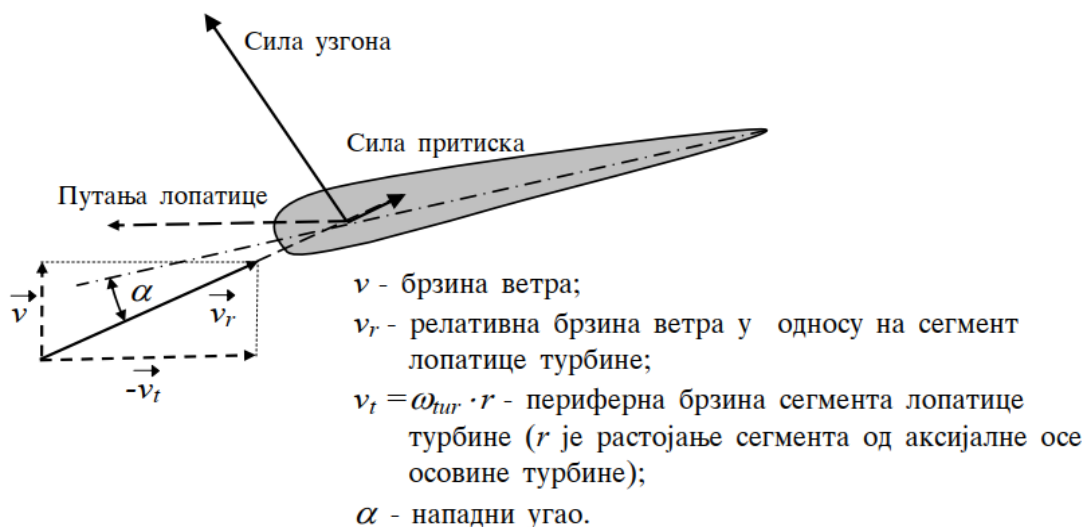
Ротор има више различитих конструкцијских извођења. Ротор са покретним зглобом на одређеној лопатици растеређује вратило ротора и корен лопатица од свих оптерећења и савијања око свих покретних оса. Оптерећења савијањем су узрокована потиском, односно деловањем ветра на лопатицу и просторним нестационарним струјањем ветра. У случају да струјање ветра не пролази кроз ротор, главчина такође изазива савијање вратила, што је такође избегнуто покретним зглобом [23].

Ротор може бити направљен са фиксним увијајућим углом и може бити са „клацкајућом главчином“. Ротор са „клацкајућом главчином“ је намењен великим ветротурбинама са две лопатице и он има улогу у смањењу оптерећења која су изазвана нестационарним дувањем ветра. Оваквом изведбом смањена су оптерећења на савијање на вратилу, док је на корену лопатица смањен само динамички удео момента савијања (слика 27) [23].



Слика 27. Ротор са клацкајућом главчином [23]

Већина турбина данас има ротор са три лопатице. Постоје разне врсте ветротурбина са различитим бројем лопатица. Ветротурбине са једном лопатицом грађене су у прошлости, али се више не производе. Лопатице код већине турбина израђене су од композита, пре свега пластике ојачане стакленим или карбонским влакнима, а понекад се користе и дрвени / епоксидни ламинати [24].



Слика 28. Изглед лопатице ветротурбине и силе које делују на њу [22]

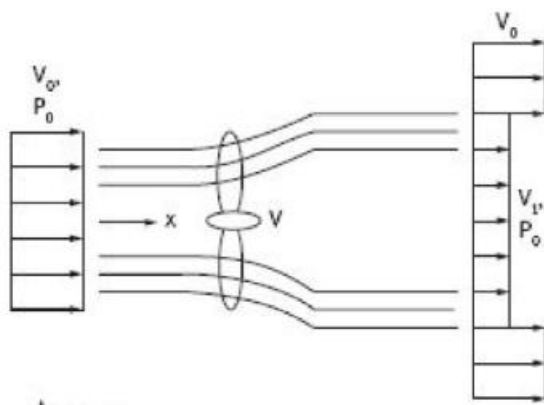
Претварање кинетичке енергије ветра у обртно кретање турбине врши се захваљујући лопатицама које су аеродинамичког профила. Захваљујући овом облику, ветар са задње стране лопатице струји брже у односу на предњу страну. Услед разлике у брзинама струјања ветра, јавља се разлика у притисцима на предњој и задњој страни лопатица, што

узрокује појаву силе узгона, захваљујући којој долази до покретања лопатица, тј. услед пројекције силе узгона на раван долази до појаве обртног момента [1].

Поред силе узгона, јавља се и сила директног притиска на лопатице, али њен утицај на обртни момент је знатно мањи. Изглед аеродинамичког профила лопатица, као и силе које делују на њу приказане су на слици 28.

Када се иде од осе ротације према периферији лопатица, релативна брзина ветра се повећава док се нападни угао смањује. Из тог разлога лопатице ветротурбине су закривљене у односу на хоризонталну раван. Ако би сви делови лопатице били једнаки, односно када не би постојала разлика између нападних углова целом дужином лопатице, тада би дошло до негативне појаве, тј. на периферним деловима лопатице стварао би се негативан кочиони момент.

Када ветар пролази кроз ветротурбину, један део његове кинетичке енергије се предаје ротору. Количина ваздуха који уђе у ветротурбину једнак је количини ваздуха који изађе из ветротурбине, док је брзина ветра већа на уласку у ветротурбину, а мања на изласку. Ова појава, која се назива преламање ветра се дешава због веће површине, односно пречника кроз који ветар пролази на самом изласку из ветротурбине [22].



Слика 29. Преламање ветра у ветротурбини [25]

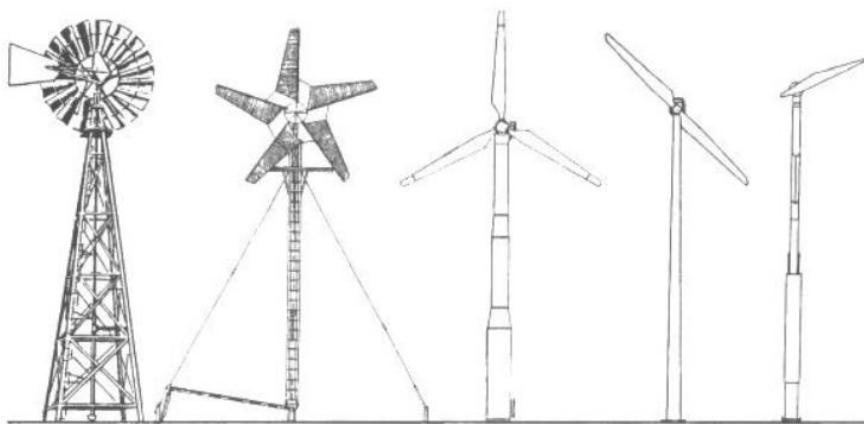
Наиме, ротор се састоји из већег броја прстенова, односно подељен је на сегменте различитног пречника дуж радијалног смера, као што је приказано на слици 29 [25].

До појаве вреламања ветра долази пре уласка у ветротурбину, јер непосредно испред ветротурбине долази до наглог пораста притиска због тога што ветротурбина представља баријеру. Струјнице ветра се тада закрећу покушавајући да обиђу ветротурбину. Услед тога, притисак иза ветротурбине опада, а затим расте све док не достигне вредност атмосферског притиска.

Број лопатица ротора директно је повезан са односом, тј. коефицијентом брзина. Услед ниског односа брзина, ветротурбине захтевају велику чврстоћу и имају велики почетни обртни момент. Када је ветротурбина искључена ствара се велико оптерећење на ротору, па он приликом искључивања мора бити окренут на супротној страни од дувања ветра.

Код ниског односа брзина потребна је конструкција ветротурбине са неколико танких лопатица. Овакав тип се више не гради због велике буке коју производе.

Ветротурбине са променљивом брзином окретања раде у широком опсегу брзина и у зависности од тога постоје различите варијанте, као и различит број лопатица ветротурбина као што је приказано на слици 30 [23].



Слика 30. Конструкцијске разлике ветротурбина са различитим односом брзина на врху лопатица [23]

Ветротурбине са три лопатице, које представљају дански концепт показале су се као најефикасније и оне су динамички уједначене због једнаке поделе оптерећења по површини захвата ротора. Такође непаран број лопатица се показао као боље решење у односу на паран број због уравнотежености.

Када је реч о конструкцији са две лопатице, ту долази до појаве великог инерцијског момента, као и потребу за већом брзином да би се произвела иста количина енергије као са три лопатице. Потреба за већом брзином доводи до стварања веће буке што доводи до главног недостатка оваквог типа ветротурбине. Конструкција са једном лопатицом има велики динамички дисбаланс јер аеродинамичке силе које делују на једну лопатицу нису компензоване другом лопатицом. Упркос уштеди када је у питању број лопатица, ова концепција се није показала као добра због произвођења високог нивоа буке [23].

Поред стандардног броја лопатица, постоје ветротурбине са већим бројем лопатица које се називају *Америчке* ветротурбине. Оне се користе на фармама за погон пумпи за воду. Имају велики почетни момент и малу брзину окретања, али и малу ефикасност [30].

Конструкција лопатице ротора одређена је аеродинамичким профилем, геометријом и материјалима који се користе за њихову израду. Различити односи брзина захтевају различито обликоване врхове лопатица аеродинамичког профила.



Слика 31. Попречни пресек лопатице ветротурбине [23]

Профили лопатица код брзоходних ветротурбина су углавном ламеларни и израђени од полиестера који је ојачан стакленим влакнима, а савремене ветротурбине све чешће имају лопатице израђене од пластике ојачане карбонским влакнима. Попречни пресек 12 m дуге лопатице израђене од различитих материјала приказан је на слици 31 [23].

Лопатице могу бити причвршћене за главчину на крут или флексибилан начин. Већина произвођача се одлучује за крут начин причвршћивања јер је сигурнији и смањује ризик од кварова. Међутим, један од недостатака представља велика маса целе конструкције.

Ротирањем лопатица око уздужне осе мења се угао удара, као и нападне и аеродинамичке силе. Закретање лопатица може да служи за ограничавање снаге и контролу јер утиче на излазну снагу ротора [23].

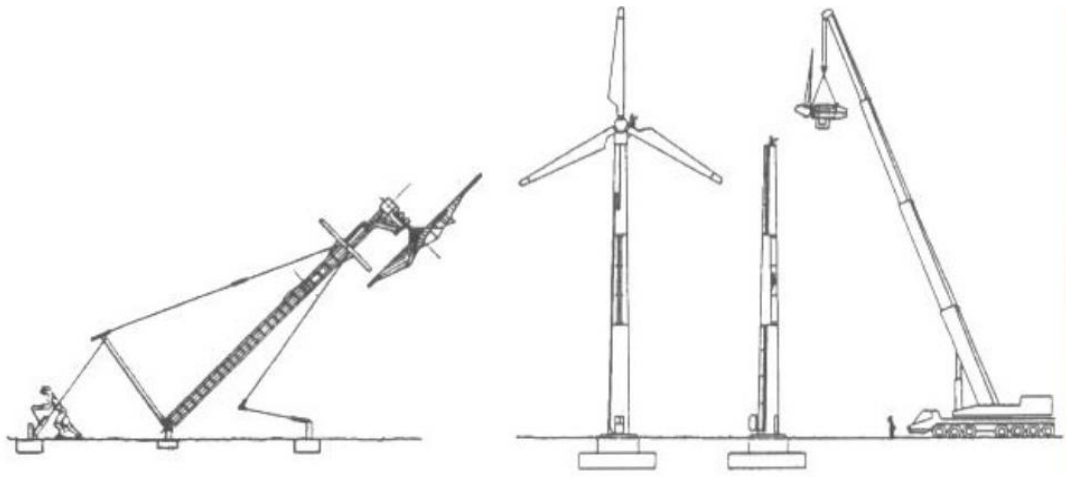
4.3 Торањ

Стуб, односно торањ представља један од најважнијих делова када је у питању статичка стабилност и динамичко понашање ветротурбине. Осим тога, торањ има важну улогу када је у питању цена израде. Од укупне цене израде ветротурбине, за торањ је потребно од 15 до 20%. Из тог разлога торањ је компонента која је претрпела највише промена у последњих неколико година. На слици 32 приказано је монтирање ветротурбине на торањ [23].

Конструкција торња може бити еластична и крута. Такође, цевasti торњеви могу имати кружни или полигонски попречни пресек. Затим, могу се сужавати према врху конусно или степенасто што доводи до мањег савијања на врху торња. Због уштеде материјала, већи пречници користе се у корену торња без аеродинамичког ометања ротора.

Цевasti тоњеви се углавном израђују од челика, али неки произвођачи израђују и бетонске торњеве због ниже цене израде, међутим то ствара додатне трошкове када је у питању монтажа и транспорт због тежине конструкције.

Мале и средње ветротурбине користе круте конструкције торњева, док се за велике ветротурбине користе еластични торњеви због уштеде материјала.

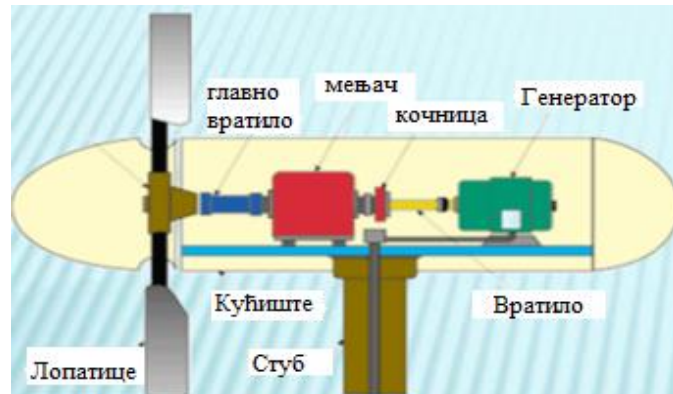


Слика 32. Конопци за учвршћивање и монтирање ветротурбине на торањ [23]

Пошто са порастом висине расте и брзина ветра, потребно је ветротурбине поставити на што више торњеве. Иако је теоретски повољније поставити ветротурбину на што виши торањ, већи инвестициони трошак за вишу кулу можда неће надокнадити јефтинија турбина мањих димензија. Генерално висина торња је пропорционална пречнику турбине, па се оса турбине налази на висини од једног до два пречника изнад земље [1].

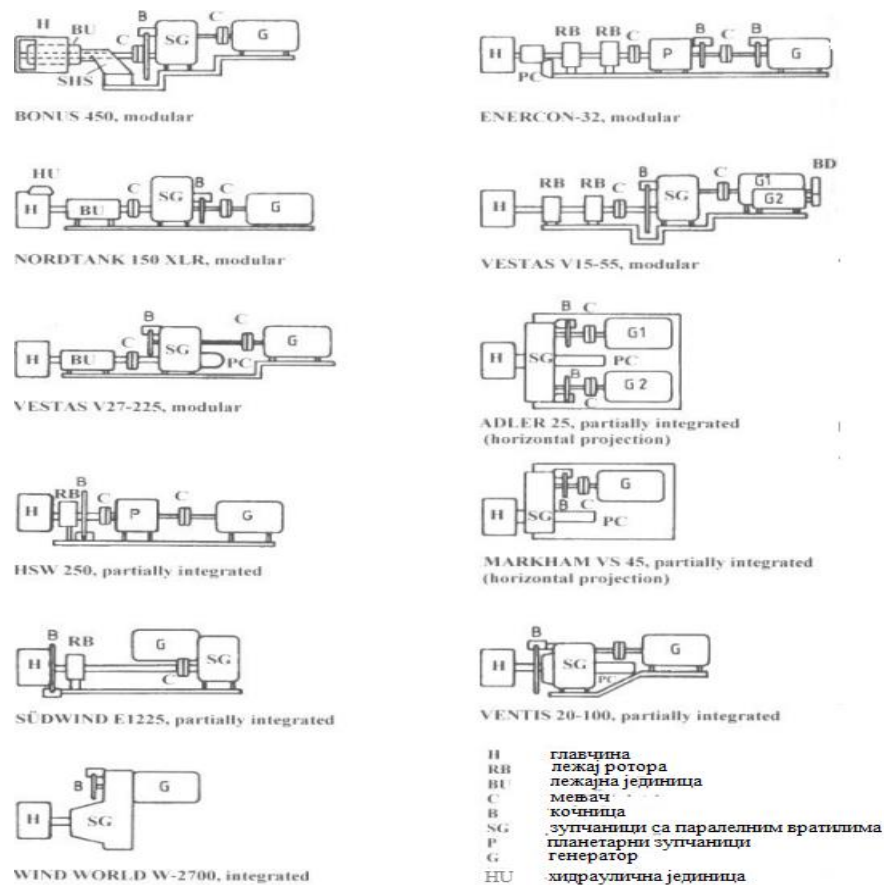
5. Елементи погонског дела турбина

Погонски део ветротурбина састоји се од вратила са лежајима, генератора, кочница, редуктора и мењача који су смештени у кућиште ветротурбине. На слици 33 приказани су основни погонски делови ветротурбине.



Слика 33. Ветротурбина са погонским деловима [26]

Постоји много различитих верзија ветротурбина када је у питању распоред погонских компоненти, као и много расправа која је верзија најбоља, односно технички и економски најпогоднија. Неке од примера распореда погонских компоненти приказани су на слици 34.



Слика 34. Шематски приказ распореда погонских делова ветротурбина [23]

Прве генерације данских ветротурбина конструсане су тако да се сви делови појединачно монтирају на оквир постоља, која су најчешће торзијски крута, заварена конструкција и припадају модуларној структури. Прилагођавање лежајева ротора такође припада модуларној структури и користио се у модернијим верзијама ветротурбина. Предност модуларне структуре у односу на друге је то што при олујним ветровима моментна оптерећења су механички апсорбована [23].

Код ветротурбина које припадају интегрисаној структури је једна од компонената погона, најчешће редуктор, претворена у примарну компоненту. Све друге компоненте су повезане на њу. На тај начин долази до олакшања када су у питању повезивања и подешавања прикључака вратила спојкама и међуосовинама, а конструкција може бити без оквира и постоља. У случају оштећења неког од делова овакве структуре, потребно је скидање комплетне гондоле са стуба, па редуктор представља скуп и специјалан део, што представља један од главних недостатака овакве структуре. Поред тога, због интегрисаних лежајева вратила ротора, кућиште редуктора захтева различите дебљине зидова у односу на оне које се производе код стандардних серијских турбина [23].

Код ветротурбина са променљивим кораком за производњу регулационе снаге постоји хидраулични цилиндар, тако што је спојен са гондолом и регулационо гирање се преноси преко клипњаче на шупље вратило ротора, а затим на заклетни механизам.

Код неких врста ветротурбина хидраулични цилиндар регулише врхове лопатица преко којих се врши кочење.

5.1 Кочнице

Кочнице служе да зауставе ротор у случају опасности и могу бити механичке, електричне или хидрауличне. Постоји разлика у томе да ли се кочнице налазе на погонском или гоњеном вратилу. Кочница на вратилу мале брзине мора имати већи кочиони обртни момент. Ако се кочница све време користи као радна кочница, обртни момент се повећава са повећањем преносног односа зупчаника. Тако да обртни момент у овом случају не пролази кроз мењачку кутију и сигурније је када се кочница поставља директно на вратило.

Кочнице се могу монтирати на ротор или осовину мале брзине, на генератор (осовину велике брзине), а у неким случајевима и на обе осовине. Генерално гледано, најбоља позиција за постављање кочнице је на осовини велике брзине између мењача и генератора.

Диск кочница је најчешћи тип кочнице која се примењује код ветротурбина и којом се код модерних конструкција управља микропроцесорски. Смештена је на вратилу мале брзине, испред преносника или на вратилу велике брзине код генератора [30].

Ниво кочења је један од најважнијих услова који се морају одредити у почетним фазама конструисања кочнице. Највећи дозвољени кочиони момент на осовини ротора обично се налази на лопатицама или на улазном вратилу мењача. Кочење на осовинама велике брзине обично је повезано са највећим дозвољеним оптерећењем зупчаника. Постоји и

минимални ниво кочионог момента, испод којег променљива сила трења под различитим радним условима може угрожити роторе турбине [28].

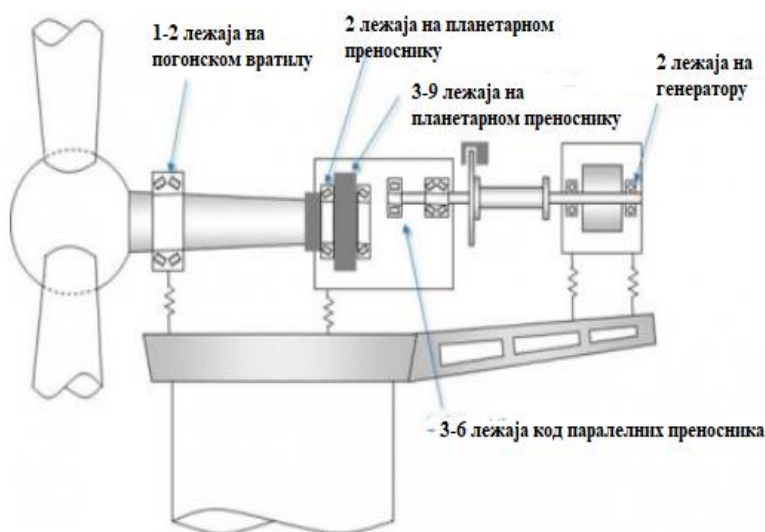
5.2 Мењач

Мењач повезује зупчаницима осовину мале брзине са осовином велике брзине и уједно повећава брзину ротације од 20-60 o/min до 1200-1500 o/min, колико захтева већина генератора за производњу електричне енергије. Мењач је врло скуп и тежак део ветротурбине и тренутно се истражују генератори који раде на нижим ротационим брзинама и не захтевају мењаче.

Некада су погонски склопови били универзални са редукторима (2 или 3 степена). Тако да су мењачи развијени за стандардне индустријске примене. Није било прилагођавања за посебно понашање ветрогенератора.

Мењач је конструисан тако да испуни тешке услове типичне за мулти-мегаватну турбину. Модерна ветротурбина обично има тростепени мењач са планетарним једностепеним преносником ниске брзине и двостепеним цилиндричним преносником. Користећи планетарне зупчанике, мењачи су довољно издржљиви да поднесу снажно оптерећење и довољно компактни што се тиче величине гондоле [27].

Прописан радни век мењача ветротурбина је око 20 година, међутим у пракси је обично много мањи. Ветротурбински погонски склопови пролазе кроз променљиво пролазно оптерећење током покретања, гашења, заустављања у хитним случајевима и прикључивања на мрежу. Оптерећење турбине зависи и од локације у ветропарку и на терену. Случајеви оптерећења који имају нагле преокрете обртног момента могу бити посебно штетни за лежаје, којих у једној ветротурбини у просеку има око 25, као што је приказано на слици 35 [27].



Слика 35. Лежаји код ветротурбина [27]

5.3 Преносник снаге

Преносник снаге има улогу да споји вратило мале брзине са вратилом велике брзине и обрнуто. Обично се код ветротурбина користе мултипликатори јер је потребно почетну обртну брзину 30-60 o/min претворити у 1200-1500 o/min. Преносници представљају скупе и тешке делове ветротурбине, па се све више врше истраживања у виду директног погона генератора без преносника [30].

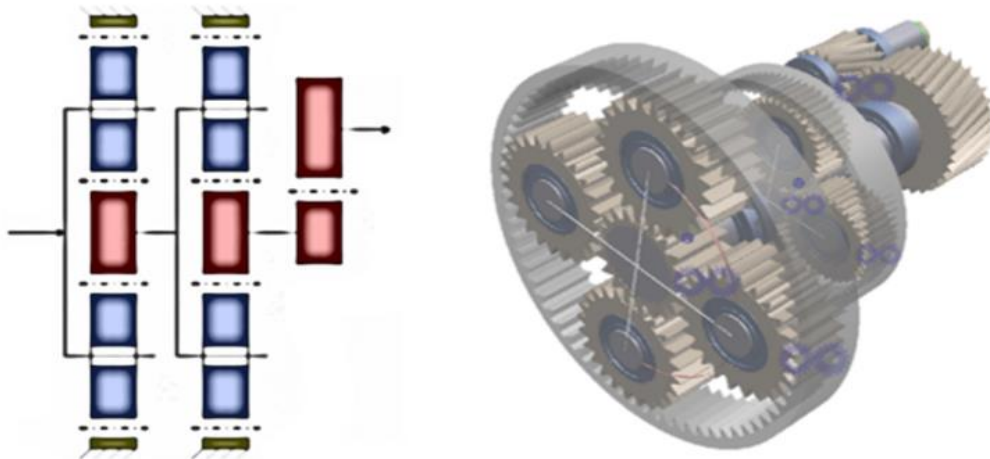
Редуктор (мултипликатор) се састоји најчешће од планетарних и цилиндричних зупчаника. Служи за прилагођавање брзине обртања ротора брзини обртања која је потребна за рад генератора. Планетарни зупчаници су компактнији и имају мању масу, производе мање буке и продуктивнији су. Недостатак им је знатно већа цена, као и потреба за хлађењем због високе специфичне снаге код неких ветротурбина.

Планетарни зупчаници имају улогу окретања лопатица у смеру дувања ветра. Наиме, након што се у анемометру измери брзина дувања ветра и смер, читава гондола се закреће уз помоћ планетарних зупчаника у смеру дувања ветра тако да ваздух пролази право кроз лопатице ветротурбине [29].

Прорачун зупчаника, посебно планетарних зупчаника, може се извршити само разматрањем утицаја читавог погонског склопа и анализом свих машинских елемената. Међутим, зупчаници представљају много више од скупа машинских елемената. Одговарајуће интеракције треба размотрити у стварним условима рада како би се у потпуности проучили.

За погон ветротурбина најчешће се користе мултипликатори. Они омогућавају остваривање великих преносних односа, поделе снаге са погонског вратила на више гоњених вратила, великог степена искоришћења, мањих габаритних димензија, добро искоришћеног унутрашњег простора конструкције јер се улазно и излазно вратило налазе на малим растојањима, као и могућности савладавања великог обртног момента, али су и лакши од класичних редуктора исте снаге и преносног односа [29].

На слици 36. приказана је концепција мултипликатора са две концепције планетарних преносника и једним паром цилиндричних зупчаника.



Слика 36. Концепција мултипликатора [29]

Стандардизовани прорачуни намењени су сигурном димензионисању машинских елемената, узимајући у обзир реалне претпоставке оптерећења. Прорачуне треба довршити проширеном анализом расподеле оптерећења, притиска на боку зубаца, напона у корену зубаца, грешке у преносу и температуре контакта [29].

Редуктори код ветрењача представљају компоненте које производе највише буке која се производи трењем између зупчаника, а при томе долази до стварања топлоте и до губитка енергије. Из тог разлога неке компаније производе специјалне ветротрубине са генераторима без зупчаника.

5.4 Генератор

Генератори код ветротурбина имају улогу претварања енергије ветра у електричну. Ветрогенератор претвара кинетичку енергију ваздуха који се креће (ветра) помоћу лопатица ротора (елисе), преносног механизма и електрогенератора у електричну енергију. Данашњи ветрогенератори почињу да производе електричну енергију већ при брзини ветра од 2,5 m/s, а заустављају се из безбедносних разлога при брзини од 25 m/s. Ветрогенератор може да обезбеди економичну производњу струје уколико је средња годишња брзина ветра већа од 6 m/s.

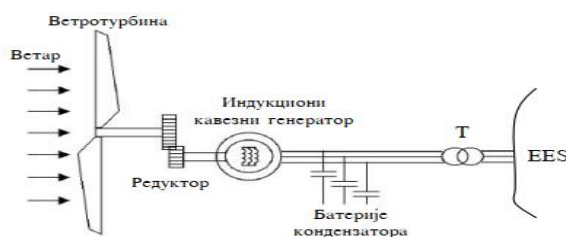
Мали и врло мали ветрогенератори снаге до 3 kW праве се директним повезивањем елисе и електрогенератора без преносног механизма (редуктора) чиме им се смањује цена. Намењени су индивидуалној употреби и најчешће служе за пуњење акумулатора тамо где не постоји електрична мрежа, а енергија се обично користи за осветљење и ТВ пријемник.

Један од највећих проблема који се јавља при њиховом раду је обезбеђивање сигурног и ефикасног рада при променљивој снази ветра. При променама јачине ветра долази до нестабилног рада ветрогенератора, као и електричних величина које он генерише. Из тог разлога се код ветротурбина не користе класични синхрони и асинхрони генератори као код хидроелектрана и термоелектрана, где је могуће унапред одредити снагу агрегата.

Постоји више врста генератора који се користе код ветротурбина. Они могу бити са променљивом (индукциони, тј. асинхрони генератор са краткоспојеним ротором) и сталном (двострано напајан индукциони – асинхрони генератор или синхрони многополни – спороходни генератор са сталним магнетима) брзином обртања [22]. Постоји, као што је већ речено, више врста генератора:

1. Ветроагрегат са индукционим кавезним ветрогенератором

Као једна од мана ове врсте ветрогенератора наводи се то да није могуће мењати брзину обртања ветротурбине. Шема ове врсте ветрогенератора приказана је на слици 37.



Слика 37. Принцип рада ветроагрегата са индукционим кавезним ветрогенератором [22]

Као друга мана наводи се брзина рада код ове врсте ветрогенератора, која се скоро не разликује у односу на синхрону брзину која зависи од мреже на коју је ветрогенератор прикључен.

Кавезни ветрогенератор троши реактивну енергију, која се компензује помоћу батерија кондензатора. Такође, ова врста ветрогенератора није погодна за локације са ударним ветровима због своје крутости карактеристике (момент-брзина), обртни момент ветротурбине се нагло преноси на вратило ветротурбине, па постоји могућност оштећења зупчаника у редуктору. Поред тога, у случају кvara на електричној мрежи, ветрогенератор губи стабилност због наглог достизања критичне брзине обртања.

Предност кавезних ветрогенератора огледа се у цени, јер се користи јефтина и велика машина која се директно прикључује на мрежу. Код ове врсте ветрогенератора, ветротурбина се регулише обликовањем лопатица или комбинацијом закретања и обликовања лопатица.

Оваква врста генератора за ветротурбине најчешће је заступљена код данских произвођача, па представља такозвани „Дански концепт“ и намењени су за називне снаге до 2 MW [22].

2. Ветроагрегат са индукционом машином са намотаним ротором као ветрогенератором

Овакав концепт сличан је „Данском концепту“ са разликом у могућности промене брзине асинхроног генератора променом механичке карактеристике момент-брзина. То се постиже применом намотаног ротора и роторског отпорника, као што је приказано на слици 38.

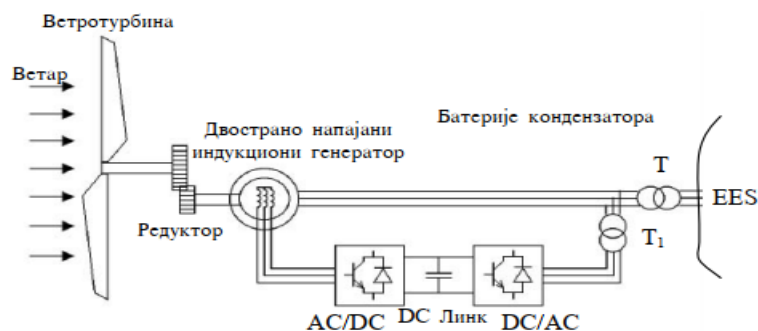


Слика 38. Ветроагрегат са индукционом машином са намотаним ротором као ветрогенератором [22]

Ова врста ветроагрегата спада у групу са делимично променљивом брзином обртања и користе се за номиналне снаге до 1,8 MW. Недостатак оваквих генератора је расипање снаге у роторском отпорнику и мали опсег промене брзине.

3. Ветроагрегат са ветрогенератором-двострано напајном индукционом машином

Овакав ветрогенератор се користи код ветротурбина велике снаге. Има могућност промене брзине у широком опсегу и на тај начин обезбеђује велики степен искоришћења ветротурбине. Изглед оваквог генератора приказан је на слици 39.



Слика 39. Ветроагрегат са ветрогенератором-двострано напаяном индукционом машином [22]

Статорски намотај је директно прикључен на мрежу, док је роторски намотај преко клизних прстенова, претварачке групе инвертор-исправљач и трансформатора прикључен на мрежу [22].

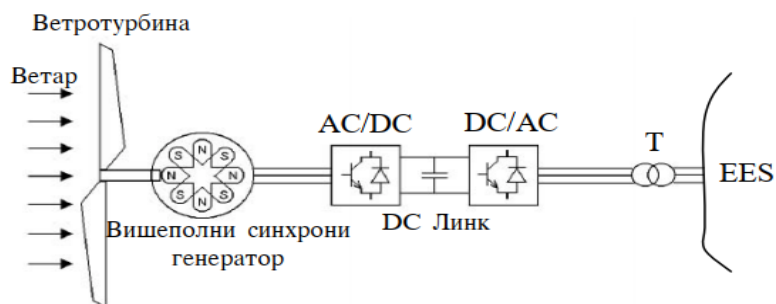
Генератор може радити при широком опсегу брзина и омогућено је потпуно прилагођавање брзине обртања агрегата брзини ветра због могућности рада у надсинхроним и подсинхроним режиму.

Двострано напаяна индукциона машина се уграђује у ветроагрегате највећих снага у оне које су намењене за рад на копну, као и оне који се налазе на приобалним појасевима. Ова врста ветроагрегата има велики степен искоришћења и могу генерисати реактивну снагу. Са друге стране, овај тип агрегата има високу цену, осетљиви су на атмосферске пренапоне и повећани су губици у генератору.

4. Ветроагрегат са ветрогенератором-монополном синхроним машином са перманентним магнетима

Код претходно поменутих ветроагрегата између турбине и генератора смештен је редуктор, што је један од основних недостатака. Тај проблем се решава код ове врсте агрегата, монополним синхроним генератором са перманентним магнетима, тако што се он директно прикључује са ветротурбином. Шема ове врсте ветрогенератора приказана је на слици 40.

Снага и брзина ветротурбине регулише се закретањем лопатица ротора. Поред тога, намењени су за ветроагрегате малих снага, као и за ветроагрегате највећих снага. Код ветроагрегата са спороходним синхроним ветрогенератором основну ману представља висока цена због конвертора велике снаге и коришћења нестандартне машине. Поред тога, због великог броја полова, генератор има велику масу и пречник [22].



Слика 40. Ветроагрегат са ветрогенератором-монополном синхроним машином са перманентним магнетима [22]

6. Закључак

Ветротурбине, односно ветроелектране имају значајну функцију када је реч о производњи електричне енергије. Оне се постављају и користе у областима које имају могућност великог искоришћења ветра.

Ветротурбине представљају сложену конструкцију која се користила и усавршавала од самих почетака цивилизација све до данас. Енергија ветра, као извор обновљиве енергије почиње се све више истраживати и усавршавати, јер је питање енергетске сигурности и стабилности једна од најважнијих тема привредног, друштвеног и економског система.

Технологија производње ветротурбина је напредовала последњих година, чинећи их ефикаснијим и исплативијим, али и сложенијим. Постоји много различитих врста ветротурбина које се тренутно користе из потребе да се произведе што ефикаснији и бољи ветрогенератор који би постао што већи конкурент енергији која се производи фосилним горивима.

Различите врсте ветротурбине зависе од саме конструкције ветрогенератора, његове снаге, али и од произвођача. Коришћење и постављање ветроелектрана зависи од ветра, па се прво морају проверити његови потенцијали на месту постављања, осигуран приступ земљишту, исплативост и многи други фактори. Модерне ветроелектране често се налазе у копненим или обалним деловима.

Постоји много проблема који још увек нису решени када је реч о коришћењу енергије ветра, тј. када је у питању рад ветрењаче и производња електричне енергије, која би у потпуности могла да замени енергију која се добија из фосилних горива.

Тренутно, постоји много различитих концепција ветротурбине, као и њених елемената. Распоред, као и различите верзије елемената ветротурбине могу значајно утицати на укупно искоришћење енергије ветра и производњу електричне енергије, што говори о сложености сваког елемента појединачно, као и целе конструкције ветротурбине.

Ветротурбине раде на једноставном принципу: велика ротирајућа лопатица ствара много енергије, чак и кад се креће споро. Што је већа елиса и брзина ветра и што је већи генератор на који је прикључена добија се више енергије. Упркос једноставном принципу рада, оне представљају сложену конструкцију. Састоје се од много различитих делова, при чему сваки од њих утиче на ефикасност и рад ветротурбине и на сваком од њих се ради на усавршавању како би се добило што веће искоришћење енергије.

Ветрењаче, тј. енергија ветра представљају један од најчистијих начина за добијање електричне енергије, јер при производњи исте не ослобађа гасове услед сагоревања који би угрозили животну средину и повећали ефекат стаклене баште, а самим тим утицали на глобално загревање. Поред тога, ветроелектране имају утицај на смањење снаге ветра у областима које су изложене јаким ветровима.

Литература

- [1] Лукић Н, *Енергија и окружење*, Скрипта, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2008.
- [2] Nationalgeographic, Интернет страница: <https://www.nationalgeographic.rs/vesti/7566-oaze-zelene-energije-na-koji-nacin-vetroparkovi-proizvode-elektricnu-energiju.html>, приступљено 20.4.2020. године
- [3] Planeta, Интернет страница: <http://www.planeta.rs/22/3energija.htm>, приступљено 20.4.2020.
- [4] Green Navigator, Интернет страница: <http://rs.green-navigator.eu/energija/energija-vetra-nastavlja-globalni-trend-rasta>, приступљено 22.4.2020. године
- [5] Степић С, *Анализа добијања електричне енергије из енергије ветра на локацији Смедеревске Паланке*, Семинарски рад, Факултет техничких наука, Чачак, 2016.
- [6] Slideshare, Интернет страница: https://www.slideshare.net/Dusica_87/prezentacijadstevanovic, приступљено 23.4.2020. године
- [7] Gradjevinarstvo, Интернет страница: <https://www.gradjevinarstvo.rs/tekstovi/1917/820/koriscenje-snage-vetra>, приступљено 23.4.2020. године
- [8] Гузовић З, *Повјесни развој вјетрењача*, Презентација, Загреб 2010.
- [9] Алексић Н, *Обновљиви извори енергије-Анализа и оцена инвестиционих улагања у енергију ветра*, Мастер рад, Универзитет Сингидунум, Београд, 2010.
- [10] Kishore A, *Small-scale wind energy portable turbine*, Book, faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, 2013.
- [11] Hau E, *Wind Turbines*, Book, Springer, Munich, 2013.
- [12] Renewableenergyworld, Интернет страница: <https://www.renewableenergyworld.com/2014/11/21/history-of-wind-turbines/#gref>, приступљено 25.4.2020. године
- [13] Gradjevinarstvo, Интернет страница: https://www.gradjevinarstvo.rs/tekstovi/806/820/prva_plutaju%C4%87a_vetrenja%C4%8Da_postavljena_u_severnom_moru, приступљено 26.4.2020. године
- [14] Tong W, *Wind Power Generation and Wind Turbine Design*, Book, WITPRESS, Kollmorgen Corp. USA, 2010.

- [15] Zbornik; Интернет страница: <http://www.gf.uns.ac.rs/~zbornik/doc/ZR26.11.pdf>, приступљено 6.5.2020.
- [16] Јовановић М, *Енергија ветра и ветротурбине*, Мастер рад, Универзитет Сингидунум, Београд, 2016.
- [17] Мамић А, *Енергија ветра*, Семинарски рад, Технички факултет, Чачак, 2011.
- [18] Винковић И, *Развој вертикалне ветроелектране*, Дипломски рад, Факултет стројарства и бродоградње, Загреб, 2011.
- [19] Wind power engineering, Интернет страница : <https://www.windpowerengineering.com/increase-in-wind-power-projects-fueling-anemometer-demands/>, приступљено 1.7.2020. године
- [20] Борисављевић А, *Ветротурбина са двоструко напајаним асинхроним генератором и back-to-back конвертором*, Дипломски рад, Електотехнички факултет, Београд, 2004.
- [21] Orbital, Интернет страница : <https://orbital.dk/wind-turbine-sensors/>, приступљено 1.7.2020.
- [22] Ветрогенератори, Интернет страница: <http://vetrogeneratori.co.rs/>, приступљено 6.5.2020.
- [23] Гузуровић З, *Ветротурбине-конструкција и компоненте*, Презентација, Загреб, 2010.
- [24] Manwell J.F, Mcgowan J.G, Rogers A. L, *Wind energy explained*, Book, WILEY, United Kingdom, 2009.
- [25] Chen J, Wang Q, *Wind turbine airfoils and blades*, Book, De Gruyter, Berlin, 2018.
- [26] Милошевић А, *Оправданост подизања ветроелектрана код нас и у свету*, Презентација, Академија техничко-васпитачких струковних студија, Ниш, 2019.
- [27] Wind Power Engineering, Интернет страница: <https://www.windpowerengineering.com/wind-turbine-gearboxes-fail-hit-20-year-mark/>, приступљено 12.8.2020.
- [28] Altra Motion, Интернет страница: <https://www.altramotion.com/newsroom/2010/05/braking-ideas-for-wind-turbines>, приступљено 12.8.2020.
- [29] Power Transmission World, Интернет страница: <http://www.powertransmissionworld.com/powerful-analysis-of-wind-turbine-gearboxes/>, приступљено 17.8.2020.
- [30] Дистрибуирани извори електричне енергије, Интернет страница: https://www.ucg.ac.me/skladiste/blog_9437/objava_23415/fajlovi/!!PrDIEE18.pdf, приступљено 17.8.2020.