

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Мастер академске студије

Модул: Енергетика и процесна техника

Предмет: Обновљиви извори енергије 1

Број индекса: 342/2012

Томислав В. Марковић

**Развој контејнерских ветрогенератора за потребе
просечног сеоског домаћинства у Србији и региону
југоисточне Европе**

**-Основе димензионисања лопатица радног кола
ветрогенератора, законске регулативе при издради
ветрогенератора, техно-економска анализа и развој
лабораторијског прототипа малог ветрогенератора-
мастер рад**

Комисија за преглед и одбрану:

1. Проф. др Вања Шуштершић - ментор

2. Проф. др

3. Проф. др

Датум одбране: _____

Оцена: _____

Резиме:

Студентски тим који сачињавају Томислав Марковић, Милош Љубисављевић, Стефан Пецић и Стефан Војиновић има задатак да развије прототип ветрогенератора за потребе просечног сеоског домаћинства у Србији и региону југоисточне Европе.

Пројекат има за циљ да се, заједничким радом и разменом знања и искустава подигне свест о потреби развоја и коришћења обновљивих извора енергије.

Задатак студентског тима је да истражи енергетски потенцијал ветра и Србији и југоисточној Европи, да истражи тржиште малих ветрогенератора, да објасни технологију рада ветрогенератора, да изнесе идеалан концепт и истражи могућа варијантна техничка решења ветрогенератора и изабере оптималну варијанту решења, да направи прототип ветрогенератора, одради техно-економску анализу, изврши потребна мерења на моделском прототипу и представи добијене резултате мерења. Након консултација са члановима тима, решено је да се у оквиру пројекта ураде четири подстудије које својим обимом и садржајем одговарају захтевима које мора да има један мастер рад на мастер студијама Енергетике и процесне технике на Факултету инжењерских наука у Крагујевцу.

Унутар тимска подела налаже студенту Томиславу Марковићу да уради сегмент студије који носи назив „Основе димензионисања лопатица радног кола ветрогенератора, законске регулативе за изградњу ветрогенератора, техно-економска анализа и развој лабораторијског прототипа малог ветрогенератора” који треба да:

- уведе читаоце у материју,
- анализира и објасни начин димензионисања лопатица радног кола ветрогенератора,
- наведе и опише законске регулативе којима је обухваћено издавање свих потребних дозвола за изградњу и пуштање у рад ветрогенератора
- изнесе закључке.

Веома је било важно да уз помоћ савремених софтверских прорачунских и пројектантских алата комплетну идеју проверимо, али и да израдимо 3D виртуалне документације свих виталних компоненти ветрогенератора, али и да утврдимо економску оправданост инвестиције у изградњу тог система.

Кључне речи: обновљиви извори енергије, ветар, ветрогенератор, лопатице, законске регулативе.

Summary:

Team consisting of students Tomislav Markovic, Milos Ljubisavljevic, Stefan Pecic and Stefan Vojinovic received a task to develop a prototype wind turbine.

Through work, knowledge and experience sharing, the project aims to raise awareness of the need for the development and use of renewable energy. Tasks of the student team include: exploring the potential of wind energy in Serbia and Southeast Europe, exploring the market of small wind turbines, explaining the technology work, presenting an ideal concept of alternative solutions, building a prototype wind turbine, techno-economic analysis, and presenting the results of the measurements obtained.

After a consultation with the team members, it was decided to divide the project into four sub-studies that in its scope and content meet the requirements of the Master Project of the Master Studies of Energy and Process Engineering at the Faculty of Engineering Sciences in Kragujevac.

The team division requires the student Tomislav Markovi to do the final segment of the study entitled „Basics of dimensioning of wind turbines, wind turbines legislation for the construction of wind turbines, techno-economic analysis and development of a laboratory prototype of small wind generators " which should:

- introduce the reader into the matter,
- analyze and explain the method of dimensioning turbines of wind turbines
- list and describe the legislation which included the issuance of all necessary permits for the construction and commissioning of wind turbines
- present findings.

It was important that with the help of modern software estimates and design tools we complete a check of the final concept, create a 3D virtual documentation of all vital components of the wind turbine, and determine the economic feasibility of investment in the construction of the system.

Keywords:

renewable energy, wind, wind turbine, propeller, regulations.

Препоручена литература:

[1] Приручник за постављање малих ветрогенератора, Слободан Плазинић, Београд, 2011.

[2] Енергија ветра, Иан Грахам, Словенија, 2000.

[3] Wind turbines, Erich Hau, 2005

Крагујевац, Август 2015

ментор:

Проф. др Вања Шуштершић

САДРЖАЈ:

1. Увод	1
2. Основе димезионисања лопатица радног кола ветрогенератора.....	2
2.1 Модел актуаторског диска	2
2.2 Модел ротирајућег диска	7
2.3 Теорија сегмената лопатице	11
3. Законске регулативе	17
3.1 Мере током изградње пројекта	20
3.2 Мере током рада пројекта	20
3.3 Мере током затварања пројекта	22
4. Израда лабораторијског прототипа ветрогенератора мале снаге	24
5. Техно-економска анализа	31
6. Закључци	45
7. Литература.....	46

1. УВОД

Савремени живот се заснива на широкој примени свих облика енергије. Незамислива је било која област делатности која не користи енергију. Потребе за енергијом стално расту. Извори класичних енергија полако се исцрпљују и морају се налазити алтернативни извори енергије.

Технички потенцијали за коришћење обновљивих извора енергије су велики и премашују све већ доступне изворе. Многобројни фактори као што су климатске промене, све већа емисије гасова стаклене баште, смањење резерви фосилних горива, као и високе цене енергената довеле су до подстицања и комерцијализације обновљивих извора енергије. Из тог разлога ветроенергетика у последње време постаје све популарнија, са значајним порастом из године у годину, јер је енергија ветра конкурентан и економски исплатив енергетски извор.

Европска Унија поставила је обавезујући циљ по коме 20% од укупне енергије треба да се произведе из енергије ветра и других обновљивих извора до 2020. године. Како би се дошло до овог циља добар део европске потражње за електричном енергијом мораће се обезбедити из обновљивих извора, при чему ће се, од укупно 20%, из енергије ветра обезбедити чак 12-14%. У Европи земље водиле у производњи електричне енергије из енергије ветра су Немачка и Шпанија са 37,500 и 36,188 TWh, док их Велика Британија следи са 9,259 TWh.

Из напред наведених разлога и у Србији ветроенергетика се намеће као нова грана за добијање електричне енергије. Познато је да и у Србији постоје локалитети са потенцијалима погодним за коришћење енергије ветра. Ветроелектране имају кратак период изградње, сезонска вршна производња поклапа се са сезонском вршном потрошњом струје, а нарушавање животне средине је минимално у поређењу са другим енергетским објектима и технологијама.

Ратификацијом Уговора о оснивању енергетске заједнице, Република Србија је прихватила, између осталог и обавезу да се донесе и реализује план примене директиве 2001/77/ЕС о промовисању производње електричне енергије из обновљивих извора енергије.

2. ОСНОВЕ ДИМЕЗИОНИСАЊА ЛОПАТИЦА РАДНОГ КОЛА ВЕТРОГЕНЕРАТОРА

Постоје 3 главне теорије које описују рад ветротурбине, теоријска ограничења која се при томе намећу (на пример максимално искоришћење енергије ветра) и физичке процесе који се одвијају приликом претварања енергије ветра у обртну кинетичку енергију радног кола ветротурбине. Познавањем закона ових процеса омогућено је постављање математичких израза који их описују, а неопходни су за пројектовање ветротурбине.

Модели који објашњавају претварање енергије ветра су: модел актуаторског диска, модел ротирајућег диска и теорија сегмената лопатице.

2.1 Модел актуаторског диска

Овај модел посматра радно коло ветротурбине као хомогени диск уметнут у струју ваздуха константне брзине. Дакле, уопште се не узима у обзир постојање одређеног броја лопатица нити обртање радног кола, већ се једноставно посматра као пропусна препрека, која преузима део енергије из струје ваздуха и притом утиче на њу. Иако тако представљено радно коло, односно диск, не обавља никакав рад, у литератури се назива актуаторским диском, јер му енергија коју преузима из струје ваздуха даје могућност да обави одређен рад.

Присутност актуаторског диска у струји ваздуха ремети њено струјање, јер се ваздух наиласком на диск успорава уз повећање притиска. Након диска струјање се наставља, али је део кинетичке енергије из струје ваздуха преузео диск. Како се он не окреће и не обавља рад, кинетичка енергија одузета из струје ваздуха се појављује на диску као потенцијална енергија и то у виду скоковитог повећања притиска ваздуха на диску јер се он понаша као баријера која је на путању ветра. Услед таквог опструјавања, притисак иза диска нагло опада, а затим постепено расте до вредности која одговара атмосферском притиску.

У реалности, због чињенице да се брзина струјања ваздуха не може нагло смањити, наиласком на диск, њена се вредност почиње постепено смањивати пре диска, а ово поступно смањење се наставља и иза диска. Тако настаје запремина ваздуха која се под утицајем актуаторског диска може посматрати као струјна цев кроз коју струји ваздух. [1]

Описано стационарно, невискозно струјање ваздуха, у присутности актуаторског диска, приказано је на сл. 1.

¹ David A. Spera, Wind turbine Technology, Fundamental Concepts of wind turbine engineering, second edition, New York, 2009

Околни ваздух изван замишљене цеви није под утицајем актуаторског диска и не подлеже описаним променама. Пошто он не продире у замишљену струјну цев, запремински проток ваздуха је константан и према једначини континуитета има следећи израз:

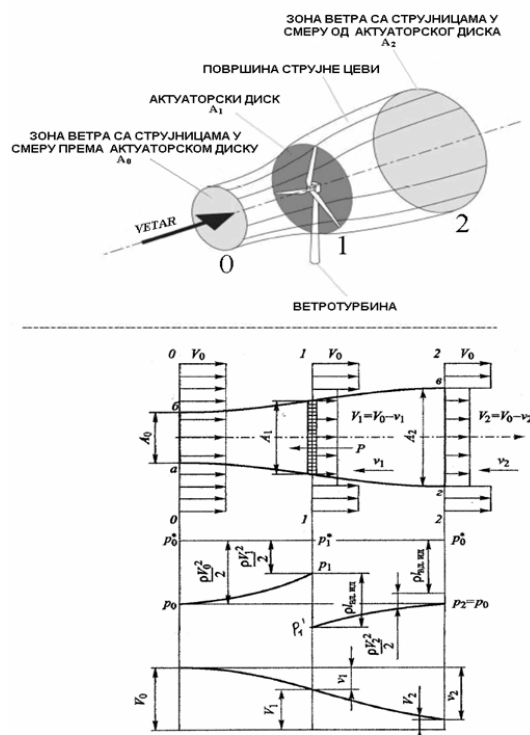
$$Q = v_0 \cdot A_0 = v_1 \cdot A_1 = v_2 \cdot A_2 = \text{const} \quad (1)$$

Масени проток ваздуха кроз струјну цев је такође константан као и запремински, односно:

$$\dot{m} = \frac{dm}{dt} = \rho \cdot \frac{d(A \cdot x)}{dt} = \text{const.} \quad (2)$$

где је:

A – пресек цеви кроз коју струји ваздух
 ρ – густина ваздуха
 x – пређени пут ваздуха у правцу струјања



Слика 1: Модел актуаторског диска¹

Како је брзина ваздуха одређена изразом:

$$v = \frac{dx}{dt} \quad (3)$$

израз (2) се може преко закона очувања масе свести опет на једначину континуитета:

$$\dot{m} = \rho \cdot A \cdot v = \text{const.} \quad (4)$$

Смањењем брзине струјања, у складу (4), расте попречни пресек запремине ваздуха. За разлику од брзине струјања, притисак ваздуха расте како се струја ваздуха приближава диску, да би непосредно након диска скоковито пао. Због тога иза актуаторског диска постоји подручје у којем је притисак ваздуха нижи од атмосферског. Далеко након актуаторског диска притисак ваздуха се враћа на вредност атмосферског притиска јер се успостављају стационарни услови, али је његова кинетичка енергија, а тиме и брзина струјања смањена.

За опис смањења брзине струјања, које уноси актуаторски диск, уводи се коефицијент наструјавања a . Смањење брзине струјања помоћу коефицијента наструјавања посматра се као појава додатне компоненте брзине струјања, која се супротставља основном струјању.

Увођењем ове компоненте, брзина струјања на диску одређује се као:

$$v_1 = (1-a) \cdot v_0 \quad (5)$$

где је:

v_0 - брзина струјања, тј. брзина ветра далеко испред актуаторског диска где се не осећа његов утицај.

Како актуаторски диск мирује, он утиче само на брзину ветра у смеру струјања, тј. у аксијалном смеру. Због тога се уведени коефицијент a назива коефицијентом аксијалног наструјавања. Гледано од пресека 0 на сл. 1 (која се налази непосредно пре подручја у којем почиње утицај диска на струјање) до крајњег пресека 2 (у коме притисак ваздуха поновно заузима вредност атмосферског притиска) укупна промена брзине струјања износи:

$$\Delta v = v_0 - v_2 \quad (6)$$

где је:

v_2 - брзина струјања након што престане утицај актуаторског диска и успостави се стационарно стање.

Са променом брзине струјања мења се и импулс ваздуха који струји, па је разлика у импулсу ваздуха од тачке 0 до тачке 2 једнака:

$$\Delta \vec{p} = \dot{m} \cdot \Delta \vec{v} = \rho \cdot A_1 \cdot v_1 \cdot (v_0 - v_2) \quad (7)$$

Како струјање ваздуха увек има исти смер, од интереса нам је само износ импулса ваздуха па ће се горњи израз у наставку третирати као скалар. Извод промене импулса ваздуха по времену гласи:

$$\frac{d(\Delta p)}{dt} = \Delta \frac{dp}{dt} = \rho \cdot A_1 \cdot \frac{dx}{dt} \cdot \Delta v = \rho \cdot A_1 \cdot v_1 \cdot \Delta v \quad (8)$$

Извод импулса ваздуха по времену представља силу, па горњи израз заправо описује укупну промену силе, условљену постојањем актуаторског диска у струји ваздуха. Ова промена силе је последица различитих притисака ваздуха испред и иза диска:

$$\Delta F_1 = \Delta \frac{dp}{dt} = \left(p_1^+ - p_1^- \right) \cdot A_1 \quad (9)$$

где су: p_1^+ и p_1^- - притисци ваздуха непосредно пре и после диска

Разлика притиска на актуаторском диску израчунава се из Бернулијеве једначине, постављене за замишљену струјну цев:

$$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_0^2 + \rho \cdot g \cdot h_0 + p_0 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_1^2 + \rho \cdot g \cdot h_1 + p_1^+ \quad (10)$$

$$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_1^2 + \rho \cdot g \cdot h_1 + p_1^- = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_2^2 + \rho \cdot g \cdot h_2 + p_2 \quad (11)$$

Средња висина струјања иста је дуж читаве цеви ($h_0 = h_1 = h_2$), па се хидростатички притисци у горњим једначинама поништавају. Како је већ споменуто, када престане утицај актуаторског диска на струјање, притисак ваздуха се враћа на вредност атмосферског. Дакле, $p_2 = p_0$, па се из израза (10) и (11) добија разлика притисака на актуаторском диску:

$$\left(p_1^+ - p_1^- \right) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (v_0^2 - v_2^2) \quad (12)$$

Заменом горњег израза у (9) добијамо:

$$\Delta \frac{dp}{dt} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (v_0^2 - v_2^2) \cdot A_1 \quad (13)$$

Горњи израз изједначавамо са (8) при чему све величине у изразу (8) посматрамо управо на актуаторском диску:

$$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (v_0^2 - v_2^2) \cdot A_1 = \rho \cdot A_1 \cdot v_1 \cdot (v_0 - v_2) \quad (14)$$

Заменом израза за брзину струјања на актуаторском диску (5) у израз (13) добија се следећи израз за брзину ветра, након што престане утицај диска на струјање:

$$v_2 = (1-2a) \cdot v_0 \quad (15)$$

Упоредивањем горњег израза са изразом (5) видимо да описани модел претпоставља да се тачно половина укупног смањења брзине струјања догађа пре актуаторског диска, а друга половина након њега.

Снага, коју из струје ваздуха преузима претпостављени актуаторски диск, рачуна се преко израза:

$$P_1 = F_1 \cdot v_1 \quad (16)$$

Из израза (5), (9), (12), (15) и (16) добијамо преузету снагу P_1 у облику:

$$P_1 = 2 \cdot \rho \cdot A_1 \cdot v_0^3 \cdot a \cdot (1 - a)^2 \quad (17)$$

Са друге стране, укупну снагу ветра, тј. ваздуха који струји, можемо рачунати као временску промену његове кинетичке енергије:

$$P_1 = \frac{d(E_{k,i})}{dt} = \frac{1}{2} \cdot \frac{d(m_i \cdot v_i^2)}{dt} \quad (18)$$

Како је цело претходно разматрање направљено за стационарно струјање, брзина струјања ваздуха на одређеној тачки је константна па је њен извод једнак нули. Стога, ако се горњи израз посматра за место на којем се налази актуаторски диск, тада се добија следећи израз, уважавајући притом (4):

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_1 \cdot v_0^3 \quad (19)$$

Овај израз представља један од најважнијих закона за рад ветрогенератора. Дељењем (17) са (19) добија се однос снаге коју преузима радно коло ветротурбине, која је овде представљена као актуаторски диск, и укупне снаге у ветру, тј. у струји ваздуха:

$$C_p = \frac{P_1}{P_v} = 4a \cdot (1 - a)^2 \quad (20)$$

Однос дефинисан горњим изразом назива се коефицијентом снаге и један је од најважнијих параметара у анализама рада ветрогенератора. Из израза (20) очито је да ветротурбина не може преузети читаву снагу садржану у ветру. Максимални износ снаге коју радно коло, односно, актуаторски диск може преузети добија се изводом горњег израза по коефицијенту аксијалног наструјавања a :

$$\frac{dC_p}{da} = 4 \cdot (1 - a)^2 - 8a \cdot (1 - a) = 0 \quad (21)$$

Из горње једнакости следе два могућа решења: $a=1$ и $a=1/3$. Прво решење није реално јер израз (5) указује да се највећа снага преузима из струје ваздуха ако се струјање на актуаторском диску заустави. Осим тога, релација (15) за $a=1$ даје, $v_0 = v_2$ што би значило да се смер струјања ваздуха мења и да након актуаторског диска ваздух струји према њему. Ово решење очито није реално, а разлог томе је и чињеница да изведени модел вреди само за вредности $a < 1/2$. За вредности коефицијента аксијалног наструјавања $a > 1/2$ у пракси се примењују емпиријски добијене апроксимације. Из свега овога произилази да је решење $a=1/3$ реално и да се за ту вредност коефицијента аксијалног наструјавања заиста постиже максимална вредност коефицијента снаге. Заменом $a=1/3$ у израз (20) добија се максимални износ коефицијента снаге:

$$C_{P_{max}} = \frac{16}{27} = 0.593 \quad (22)$$

Горњи израз познат је као Бетзов лимит и представља највећи могући део снаге, коју ветротурбина може преузети из ветра. Стварни ветрогенератори не постижу ни ову вредност већ се задовољавајућом максималном вредношћу сматрају вредности коефицијента снаге од 0.45 - 0.5. Физички разлог, због којег ветротурбине не могу преузети укупну снагу ветра, видљив је на сл. 1. Дакле, струја ваздуха након радног кола ветротурбине или актуаторског диска се мора проширити, јер се брзина струјања смањује. Због тога пресек на којем ваздух струји пуном брзином (v_0) има мању површину од површине елисе, односно актуаторског диска па, сагласно са (19), носи и мање снаге. Притом у стварности и околни ваздух, изван замишљене цеви, може имати исту брзину (v_0), али у енергетском претварању учествује само ваздух који је под утицајем актуаторског диска, а то је ваздух обухваћен замишљеном цеви, приказаној на сл. 1.

Изложени модел претварања енергије ветра, тј. струје ваздуха у други, потенцијално корисни облик енергије представља први корак у анализи посматране проблематике. Њиме се долази до неких важних закључака о физичким основама рада ветрогенератора. Ипак, описани модел је поједностављен да би се могло указати на значајне ствари ветрогенератора. Као прво, не укључује се обртање радног кола, а претварање енергије се односи само на разлику претварања кинетичке енергије у потенцијалну, којом се може обавити неки рад. Због овога је модел потребно проширити, првенствено укључивањем модела обртања елисе, као и последице које ово обртање има на струју ваздуха. То води до концепта ротирајућег диска који је објашњен у наставку.

2.2 Модел ротирајућег диска

Код овог приступа радно коло ветротурбине се и даље посматра као диск, али се у обзир узима и његово обртање. Замишљени ротирајући диск састоји се од бесконачног броја лопатица занемариве дебљине. Честице ваздуха могу струјати између таквих лопатица, али их при пролазу лопатице окрећу у смеру супротном од смера окретања диска, као што је приказано на сл. 2. Због тога струја ваздуха иза диска поседује угаону брзину различиту од нуле, што за последицу има појаву тангенцијалне компоненте брзине струјања ваздуха.

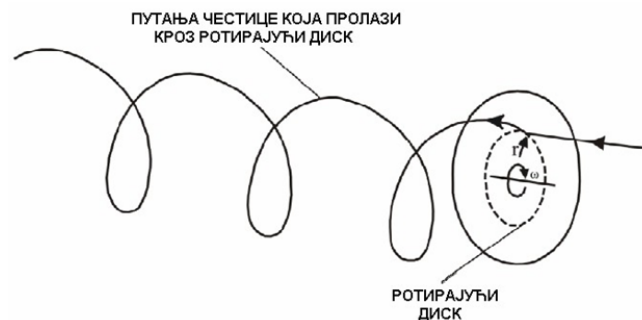
Тангенцијалну компонентну брзине струјања дефинишемо увођењем коефицијента тангенцијалног наструјавања a' односно:

$$v_{1t} = a' \cdot \omega \cdot r \quad (23)$$

где је:

ω - угаона брзина ротирајућег диска,

r - посматрани полупречник.



Слика 2: Утицај ротирајућег диска на струју ваздуха¹

Коефицијент тангенцијалног наструјавања уводи се са чињеницом да се тачно пола вредности тангенцијалне компоненте брзине струјања повећа пре диска, а пола након. Пошто ротирајући диск узрокује обртање струје ваздуха, тангенцијална компонента брзине струјања пре диска једнака је нули. Дакле, да би тангенцијална компонента брзине струјања на самом диску била одређена изразом (23), узима се да је непосредно након диска једнака $2a' \cdot \omega \cdot r$.

Сагласно томе, укупна промена тангенцијалне компоненте брзине ваздуха који струји кроз ротирајући диск износи:

$$\Delta v_t = 2a' \cdot \omega \cdot r \quad (24)$$

Последица промене брзине обртања ваздуха је промена његовог момента импулса, односно:

$$\Delta L = \vec{r} \times \Delta \vec{p} = \vec{r} \times (m \cdot \vec{v}_t) \quad (25)$$

Како промена тангенцијалне компоненте брзине струјања у горњем изразу зависи од полупречника, анализа промене момента импулса може се направити само за бесконачно танки део (кружни прстен) ротирајућег диска површине dA_1 који се налази на полупречнику r .

Маса ваздуха која пролази кроз танки кружни прстен једнака је:

$$m = \rho \cdot dA_1 \cdot x \quad (26)$$

Заменом горњег израза и израза (24) у (25) добијамо:

$$dL = \rho \cdot dA_1 \cdot x \cdot 2 \cdot a' \cdot \omega \cdot r^2 \quad (27)$$

Горњи израз представља износ промене момента импулса ваздуха, који је прошао кроз бесконачно танки део ротирајућег диска површине dA_1 па се због тога означава са dL . Дакле, ознака dL означава да се ради о моменту импулса струје ваздуха посматране на бесконачно танком делу површине диска, а не о њеној промени која је означена са ΔL у изразу (25).

Извод момента импулса једнак је моменту који га узрокује па се изводом израза (27) по времену добија:

$$\frac{d(dL)}{dt} = dM = \rho \cdot dA_1 \frac{dx}{dt} 2 \cdot a' \cdot \omega \cdot r^2 \quad (28)$$

Заменом израза за аксијалну компоненту брзине струјања ваздуха (5) у горњи израз добијамо:

$$dM = \rho \cdot dA_1 \cdot (1 - a) \cdot v_0 \cdot 2 \cdot a' \cdot \omega \cdot r^2 \quad (29)$$

Горњим изразом одређен је угаони момент струје ваздуха која пролази кроз бесконачно танки део ротирајућег диска. Како је претпостављено да је обртање струје ваздуха у потпуности узроковано обртањем диска, тако ће и угаони момент ротирајућег диска (тј. његовог бесконачно танког дела) бити одређен горњим изразом, односно:

$$dM_t = dM = \rho \cdot dA_1 \cdot (1 - a) \cdot v_0 \cdot 2 \cdot a' \cdot \omega \cdot r^2 \quad (30)$$

У складу са тим, снага посматраног дела ротирајућег диска биће једнака:

$$dP_t = dM_t \cdot \omega = \rho \cdot dA_1 \cdot (1 - a) \cdot v_0 \cdot 2 \cdot a' \cdot \omega^2 \cdot r^2 \quad (31)$$

Из горњег израза очито је да представљањем радног кола ветротурбине као ротирајућег диска његова снага, поред брзине ветра и коефицијенту аксијалног наструјавања a , постаје зависна и од угаоне брзине ω и од коефицијента тангенцијалног наструјавања a' . Снага ротирајућег диска последица је снаге, коју диск преузима из ветра. Стога се горњи израз може изедначити са изразом за снагу актуаторског диска (17) добијену у претходном подглављу. Притом је потребно заменити површину диска A_1 са површином њеног бесконачно танког дела dA_1 :

$$2 \cdot \rho \cdot dA_1 \cdot v_0^3 \cdot a \cdot (1 - a)^2 = \rho \cdot dA_1 \cdot (1 - a) \cdot v_0 \cdot 2 \cdot a' \cdot \omega^2 \cdot r^2 \quad (32)$$

Сређивањем горњег израза добија се:

$$v_0^2 \cdot a \cdot (1 - a)^2 = a' \cdot \omega^2 \cdot r^2 \quad (33)$$

Израз (33) нови је важан закључак о претварању енергије ветра, који указује на повезаност коефицијената аксијалног и тангенцијалног наструјавања. Он се може пребацити у облик:

$$a \cdot (1 - a) = \lambda_r \cdot a' \quad (34)$$

где је:

$$\lambda_r = \frac{\omega \cdot r}{v_0} \quad (35)$$

локални однос брзине.

Уколико се горњи израз посматра на укупном полупречнику ротирајућег диска, тј. $r = R$ добија се:

$$\lambda_r = \frac{\omega \cdot R}{v_0} \quad (36)$$

што се назива односом брзине врха лопатице, јер представља однос периферне брзине радног кола ветротурбине и брзине ветра далеко испред радног кола, где нема њеног утицаја на струју ваздуха.

Утицај локалног односа брзине на процес претварања енергије ветра израчуна се тако што се израчуна снага ротирајућег диска према (31) и упоређи са укупном снагом ветра датом (19). Притом површину посматраног бесконачно танког дела диска, тј. кружног прстена рачунамо као:

$$dA_1 = 2 \cdot r \cdot \pi \cdot dr \quad (37)$$

Заменом горњег израза у (31) добија се:

$$dP_t = 2 \cdot \rho \cdot r \cdot \pi \cdot dr \cdot (1 - a) \cdot v_0 \cdot 2 \cdot a' \cdot \omega^2 \cdot r^2 \quad (38)$$

Помоћу израза (35) горњи израз се може свести на:

$$dP_t = \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_0^3 \cdot 2 \cdot r \cdot \pi \cdot dr \right) \cdot 4 \cdot a' \cdot (1 - a) \cdot \lambda_r^2 \quad (39)$$

Део у загради у горњем изразу, обликом је једнак изразу (19) и представља снагу коју би имао ваздух који струји кроз кружни прстен површине $2 \cdot r \cdot \pi \cdot dr$ када не би постојало радно коло ветротурбине, односно ротирајући диск. Из тога следи да други део израза (39) одређује учинак посматраног дела ротирајућег диска. Ако се израз (39) подели са изразом за укупну снагу ветра, односно струје ваздуха кроз читаву површину диска након сређивања добија:

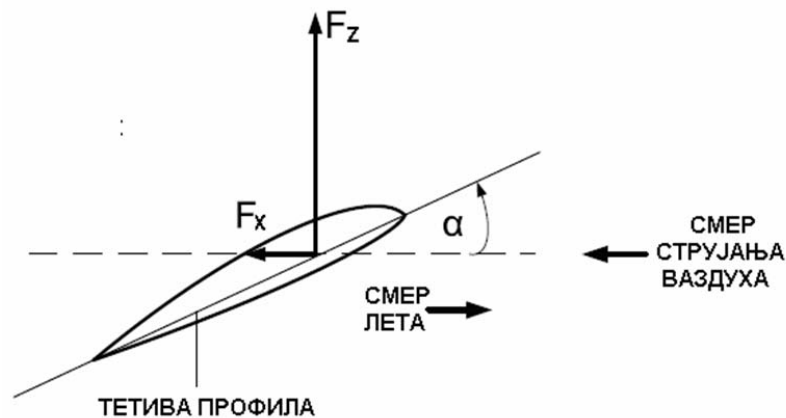
$$\frac{dP_t}{P_v} = \frac{d}{dr} C_p = \frac{8 \cdot (1-a) \cdot a' \cdot \lambda_r^2 \cdot r^2}{R^2} \quad (40)$$

Израз (39) представља линијску поделу коефицијента снаге C_p по пречнику радног кола. Из њега следи врло важан закључак, а то је зависност коефицијента снаге ветротурбине од локалног односа брзине λ_r . Другим речима, снага ветротурбине при одређеној брзини ветра може бити различита зависно од вредности брзине обртања. Наведена чињеница представља основу за оптимизацију производње енергије из ветрогенератора. Извод израза (40) по a или a' , уз замену коефицијената наструјавања (34), даје вредности коефицијената наструјавања уз које се постиже максимални коефицијент снаге.

Треба истакнути да је разматрање у овом поглављу направљено уз озбиљно поједностављење, јер је занемарен утицај обртања масе ваздуха иза радног кола на укупном енергетском билансу. Наиме, у разматрању које је направљено претпоставља се да радно коло узрокује обртање струје ваздуха која кроз њега пролази, али то обртање није узето у обзир као губитак код прорачуна момента и снаге ветротурбине. Ипак, и овакав прорачун даје прихватљиве резултате. Такође, овај модел уопште не објашњава разлог претварања енергије ветра па је за то потребно укључити модел аеродинамичких појава на лопатицама ветротурбине што је објашњено у следећем потпоглављу.

2.3 Теорија сегмената лопатице

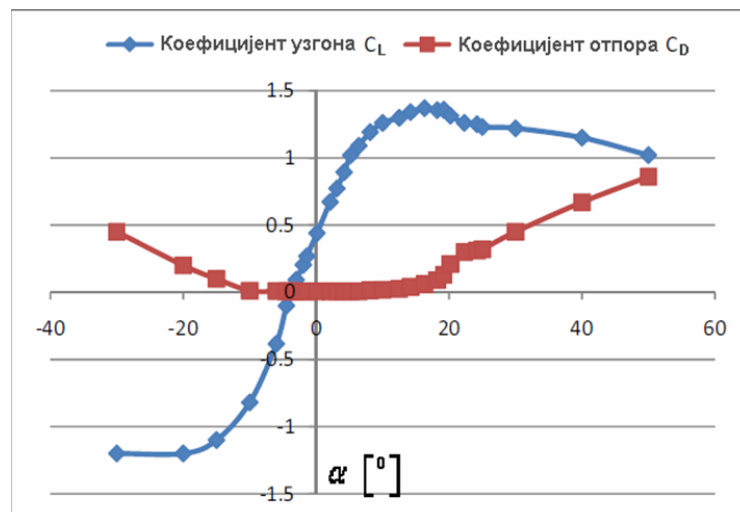
Два претходно објашњена модела претварања енергије ветра, радно коло ветротурбине третирају као хомогени диск и не узимају у обзир постојање лопатица нити појава које се догађају на њима. Иако се и таквим моделима добијају неке темељне релације које одређују рад ветрогенератора, оне нису потпуне јер занемарују сами узрок претварања енергије ветра у енергију обртања радног кола. Узрок овог претварања је управо карактеристични облик пресека лопатица радног кола, тј. њихов аеродинамички профил. Лопатице радног кола имају аеродинамичке профиле сличне профилима крила авиона, а узрок обртања радног кола ветротурбине исти је као и узрок лету авиона. Наиме, због карактеристичног профила ваздух не струји једнаком брзином са горње и доње стране крила авиона због чега се јавља разлика притисака са горње и доње стране крила. Настала разлика притисака доводи до појаве силе узгона F_z , која држи авион у лету (сл.3). Осим силе узгона, јавља се и сила отпора F_x , која се супротставља кретању крила, односно авиона.



Слика 3: Физички узрок лета авиона¹

Вредности и међусобни односи силе узгона и отпора зависе од геометрије профила, а описују се увођењем коефицијента узгона C_z и отпора C_x . Коефицијенти узгона и отпора одређени су карактеристикама појединог профила у облику функције нападног угла α .

Нападни угао α дефинише се као угао између струје ваздуха и тетиве профила. Карактеристике профила крила одређују се експериментално, мерењима у аеродинамичким тунелима или нумеричким симулацијама применом CFD метода. Пример једне карактеристике аеродинамичког профила приказан је на сл.4.



Слика 4: Карактеристика аеродинамичког профила NACA 64618¹

Уз познате коефицијенте узгона и отпора могуће је одредити силе узгона и отпора на бесконачно танком сегменту крила дебљине dr , који се налази на полупречнику r :

$$dF_z = \frac{1}{2} \cdot C_z \cdot \rho \cdot v_r^2 \cdot l_t \cdot dr \quad (41)$$

$$dF_x = \frac{1}{2} \cdot C_x \cdot \rho \cdot v_r^2 \cdot l_t \cdot dr \quad (42)$$

где је:

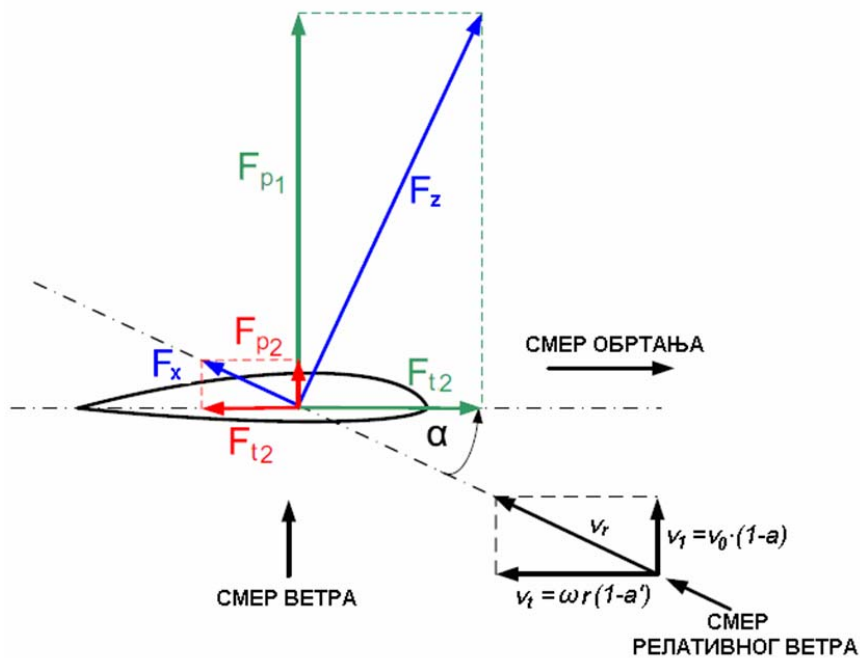
l_t - дужина тетиве сегмента крила

v_r - релативна брзина

Исти механизам појаве силе узгона и отпора постоји и на лопатици ветротурбине, која се окреће. Разлика је притом што авион сам ствара струју ваздуха потиском својих мотора, док струја ваздуха на лопатицама ветротурбине потиче од ветра. Притом је важно разумети да брзина ваздуха који струји преко лопатице није једнака брзини ветра, већ резултанти брзине ветра и тангенцијалне брзине струје ваздуха на лопатици. Ова резултанта назива се релативном брзином ветра - v_r . Настанак релативне брзине ветра приказан је на сл.5.

Притом брзина ветра на лопатици подлеже утицају радног кола на струју ваздуха, па је одређена коефицијентом аксијалног наструјавања према изразу (5). Са друге стране, обртање лопатице кроз ваздух може се посматрати као додатна струја ваздуха на лопатици са брзином једнаком периферној брзини лопатице само супротног знака. На ову брзину суперпонира се тангенцијална брзина струје ваздуха на лопатици одређена изразом (23). Како је тангенцијална компонента брзине струјања ваздуха супротног знака од периферне брзине лопатице, следи да је укупна тангенцијална брзина ваздуха на сегменту лопатице једнака $(1+a') \cdot \omega \cdot r$. Сагласно томе, релативна брзина ветра одређена је изразом [2]:

$$v_r = \sqrt{v_0^2 \cdot (1-a)^2 + \omega^2 \cdot r^2 \cdot (1+a')^2} \quad (43)$$



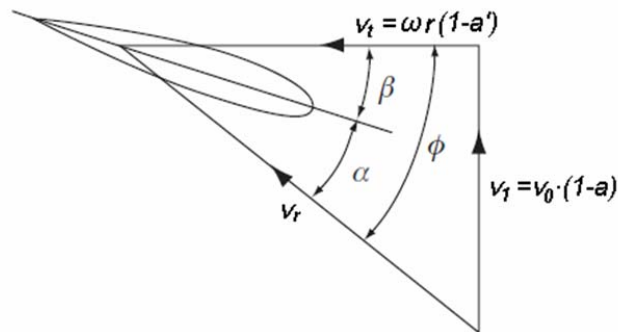
Слика 5: Растављање сила на сегменту лопатице¹

Силу узгона, која је нормална на смер релативног ветра, и силу отпора, која је паралелна са релативним ветром, могуће је раставити на силе које делују у смеру обртања елисе и нормалну на овај смер, како је приказано на сл.5. На тај начин настаје погонска (обртна) сила F_t која ће узроковати обртни момент ветротурбине и сила потиска на радно коло F_p која је главни узрок оптерећења конструкције ветрогенератора:

$$dF_t = dF_{t_1} - dF_{t_2} = dF_z \cdot \sin(\varphi) - dF_x \cdot \sin(\varphi) \quad (44)$$

$$dF_p = dF_{p_1} - dF_{p_2} = dF_z \cdot \sin(\varphi) - dF_x \cdot \sin(\varphi) \quad (45)$$

где је φ аеродинамички угао нагиба који се дефинише као угао између релативне брзине ветра и периферне брзине лопатице. Аеродинамички угао нагиба једнак је нападном углу α само ако тетива профила лопатице лежи у равни обртања елисе, као што је случај на сл.5. Оваква ситуација је ретка у пракси



Слика 6: Карактеристични углови на сегменту лопатице¹

Аеродинамички угао нагиба са сл. 6 је једнак:

$$\varphi = \alpha + \beta \quad (46)$$

где је:

α - нападни угао;

β - конструктивни угао;

Са сл. 6 следе односи:

$$\sin(\varphi) = \frac{v_0(1-a)}{v_r} \quad (47)$$

$$\cos(\varphi) = \frac{\omega \cdot r \cdot (1-a')}{v_r} \quad (48)$$

Из горња два израза следи да се аеродинамички угао нагиба може израчунати као:

$$\varphi = \arctan\left(\frac{v_0 \cdot (1-a)}{\omega \cdot r \cdot (1-a')}\right) \quad (49)$$

Заменом израза (41) и (42) у (44) и (45) добијамо:

$$dF_t = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_r^2 \cdot l_t \cdot [C_z \cdot \sin(\varphi) - C_x \cdot \sin(\varphi)] \cdot dr \quad (50)$$

$$dF_p = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_r^2 \cdot l_t \cdot [C_z \cdot \sin(\varphi) + C_x \cdot \sin(\varphi)] \cdot dr \quad (51)$$

Анализом израза (43) - (51) произлази да за израчунавање сила dF_t и dF_p на посматраном сегменту лопатице треба познавати брзину ветра без утицаја радног кола v_0 , угаону брзину радног кола ω , конструктивни угао лопатица θ , коефицијенте аксијалног и тангенцијалног наструјавања a и a' . Помоћу ових величина прво се може одредити аеродинамички угао нагиба φ , а из њега и

нападни угао α . Познавање нападног угла омогућава одређивање коефицијената узгона и отпора C_z и C_x без којих се не може израчунати тражене инфинитезималне силе, dF_t и dF_p . Интеграцијом ових сила по целој дужини свих лопатица ветротурбине добија се укупна погонска сила, односно обртни момент који ова сила ствара и укупна потисна сила на радном колу. Проблем који се притом јавља је недоступност свих потребних величина за прорачун. Наиме, од горе набројених величина, потребних за прорачун, само се брзина ветра v_0 , и конструктивни угао β могу сматрати доступнима. Због тога ни овај модел не може у потпуности представљати симулацију понашања ветрогенератора. Параметре који недостају за прорачун могуће је добити тек комбинацијом модела изложеног у овом потпоглављу и модела ротирајућег диска.

3. ЗАКОНСКЕ РЕГУЛАТИВЕ

При изради техничке документације сваког пројекта мора се водити рачуна да буде урађена у складу са законским и другим прописима, техничким нормативима, стандардима и нормама квалитета и правилима струке, као и да су међусобно усклађени сви делови техничке документације.

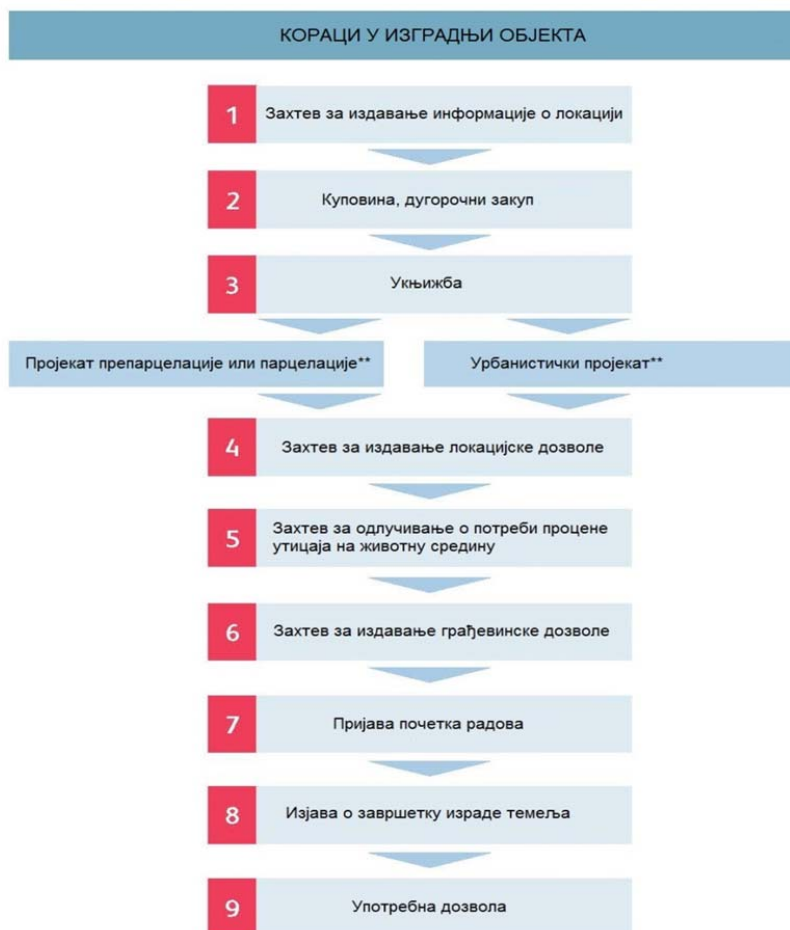
Приликом израде документације пројекта ветропарка, неопходни су следећи закони, правилници и стандарди: [2]

- Закон о планирању и изградњи („Сл. гласник РС”, бр. 72/09, 81/09 - испр., 64/10 (УС), 24/11, 121/12, 42/13 (УС), 50/13 (УС), 98/13 (УС) 132/14, 145/14);
- Закон о енергетици („Сл. гласник РС”, бр. 145/14);
- Закон о заштити ваздуха („Сл. гласник РС”, бр. 36/09, 10/13);
- Закон о заштити од буке у животној средини („Сл.гласник РС”, бр. 36/09, 88/10);
- Закон о заштити животне средине („Сл. гласник РС”, бр. 135/04, 36/09, 36/09 (др. закон), 72/09 (др. закон), 43/11 (УС));
- Закон о процени утицаја на животну средину („Сл. гласник РС”, бр. 135/04, 36/09);
- Закон о управљању отпадом („Сл. гласник РС”, бр. 36/09, 88/10);
- Закон о водама („Сл. гласник РС”, бр. 30/10, 93/12);
- Закон о безбедности и здрављу на раду („Сл. гласник РС”, бр. 101/05)
- Закон о заштити природе („Сл. гласник РС”, бр. 36/09, 88/10, 91/10-испр.);
- Правилником о техничким нормативима за електроенергетска постројења називног напона изнад 1000 V, („Сл. лист СФРЈ”, бр.4/74 и 13/78-испр, 61/95);
- Правилником о техничким нормативима за уземљења електроенергетских постројења називног напона изнад 1000 V, („Сл.лист СРЈ”, бр. 61/95);
- Правилником о техничким мерама за погон и одржавање електроенергетских постројења, („Сл. лист СРЈ”, бр. 41/93);
- Правилником о техничким нормативима за заштиту објеката од атмосферског пражњења („Сл.лист СРЈ”, бр. 11/96);

² <http://www.pravno-informacioni-sistem.rs>

- Правилником о општим мерама заштите на раду од опасног дејства електричне струје у објектима намењеним за рад, радним просторијама и на градилиштима („Сл. гласник СРС“, бр.21/89);
- Правилником о техничким нормативима за заштиту електроенергетских постројења од пренапона („Сл. Лист СФРЈ“, бр. 7/71 и 44/76);
- Правилником о техничким нормативима за електричне инсталације ниског напона („Сл. Лист СФРЈ“, бр. 53/88, 54/88, 68/88, „СЛ.лист СРЈ“ бр. 28/95);
- Уредба о условима и критеријумима за стицање статуса повлашћеног произвођача електричне енергије и критеријумима за оцену испуњености тих услова („Службени гласник РС“, бр. 72/09);
- Уредба о мерама подстицаја за производњу електричне енергије коришћењем обновљивих извора енергије и комбинованом производњом електричне и топлотне енергије, којом се ближе прописују мере подстицаја за производњу електричне енергије коришћењем обновљивих извора енергије и за откуп те енергије („Сл. гласник РС“, бр. 99/09);
- Одлука о изради стратешке процене утицаја стратегије развоја енергетике Републике Србије до 2025. са пројекцијама до 2030. године на животну средину ("Сл. гласник РС", бр. 56/2013);
- Стратегија развоја енергетике Републике Србије до 2025. године са пројекцијама до 2030. године;
- Важећим SRPS прописима и стандардима првенствено:
 1. Класа стандарда SRPS EN 61400 ветрогенератори (делови 1-27)
 2. Стандард SRPS EN 45510-5-3- упутство за набавку опреме за енергетска постројења - Део 5-3: турбине на ветар
 3. Класа стандарда SRPS EN 60034 ротационе електричне машине
 4. Класа стандарда SRPS EN 60076- енергетски трансформатори
 5. Стандард SRPS EN 50308 - ветрогенератори - заштитне мере - Захтеви за пројектовање, погон и одржавање
 6. Класа стандарда SRPS EN 60204 - безбедност машина - електрична опрема машина
- Прописима и препорукама ZEP-а и EDB-а

У складу са законом о планирању и изградњи („Сл. гласник РС”, бр. 72/09, 81/09 - испр., 64/10 (УС), 24/11, 121/12, 42/13 (УС), 50/13 (УС), 98/13 (УС) 132/14, 145/14), кораци у изградњи објекта су следћи:



** Пројекат препарцелације или парцелације се израђује када је потребно формирати парцелу/е пре издавања локацијске дозволе.

** Урбанистички пројекат се израђује уколико је предвиђено урбанистичким планом пре издавања локацијске дозволе.

Слика 7: Кораци у изградњи објекта²

Поред закона предложених овим радом, при изградњи и раду оваквог пројекта, морају се примењивати и све мере наведене у условима и сагласностима надлежних институција (које су биле укључене на путу ка издавању грађевинске дозволе). Све предвиђене мере морају бити у сагласности са важећим прописима Републике Србије.

3.1 Мере током изградње пројекта

- Носилац пројекта је у обавези да, пре почетка рада ветроелектране, изради план поступања у удесним ситуацијама који треба да садржи: план-шему одговора на удес, програм обуке и тренинга, план и програм контроле, остала упутства и обавештења. Овим Планом се утврђује које активности се предузимају у случајевима удеса, које екстерне институције се обавештавају и како се санирају последице удеса.
- За спровођење плана поступања у удесним ситуацијама потребно је ангажовање свих радника на комплексу који су задужени за управљање рада ветроелектране и локалне надлежне ватрогасне јединице.
- Потребно је да ветроелектране имају антивибрационе сензоре који ће детектовати сваку неравнотежу насталу задебљањем на лопатицама. У случају задржавања леда на лопатицама, ови сензори ће обезбедити да ветроелектрана не почне са радом док се лед не уклони са лопатица радног кола.
- На постројењу пројектовати заштиту од удара грома и појаве пожара, који ће активним и пасивним мерама осигурати да последице проузроковане ударом грома или појавом пожара буду што мање.
- Ветроелектране сместити на удаљености од најмање 500 m од најближих стамбених објеката или простора у којем људи стално раде и бораве.
- Производне јединице сместити на најмањој међусобној удаљености од 150 m, као и на удаљености од 150 m од локалних саобраћајница.
- Производне јединице пројектовати тако да издрже потресне ударне талас односно са високим фактором сигурности.

3.2 Мере током рада пројекта

- Носилац пројекта је у обавези да редовно спроводити адекватну обуку запослених која ће укључити и препознавање поремећаја у раду ветротурбине (неуобичајени звуци из стуба, гондоле или лопатица) и начине поступања у тим случајевима.
- У периодима јаких налета ветра (брзина ветра већа од 25 m/s) ветротурбине ће се аутоматски заустављати и одржавати у закоченом стању (због могућег оштећења опреме и уређаја).
- Носилац пројекта ће успоставити програм и план превентивног одржавања и праћења кључних делова ветротурбина ради смањења ризика од појаве кварова и потенцијалних удеса.
- Носилац пројекта је у обавези да обезбеди и организује редовно одржава електричних компоненти и ротирајућих делова у гондоли и тако смањи ризик од повећања температуре или варничења (и пожара) у гондоли.

- Носилац пројекта је у обавези да, у случају инцидента који се могу јавити (лом лопатице, пад ветрогенератора) настали отпад у потпуности уклони и безбедно одложи, односно уступи оператеру који поседује дозволу за управљање отпадом. Уколико постоји потреба, у обавези је да изврши санацију (рехабилитацију) оштећеног земљишта и компензацију за (евентуално) учињену штету пољопривредним усевима, шумској вегетацији или другим културама.
- Носилац пројекта је у обавези да угради аутоматски систем детекције пожара који ће обезбедити искључивање система за пренос електричне енергије у најкраћем року.
- Пожар на ветрогенераторима и трафостаници представља ризик општег типа и предмет је посебне анализе заштите од пожара коју спроводе овлашћене институције и надлежни орган. Елаборат о заштити од пожара представља засебан део пројектне документације и утврђује начин одговора у случају пожара и одговарајуће мере заштите.
- Зона непосредно око ветрогенератора је зона у којој је забрањено пушење и у складу са тимће бити и означена.
- Редовно одржавање електричних компоненти и ротирајућих делова у гондоли што ће смањити повећање температуре и варничења у гондоли, као и појаву пожара.
- Сценарио пожара на ветрогенераторима као и у трафостаници представља ризик општег типа и предмет је засебне анализе заштите од пожара коју спроводе овлашћене институције. Елаборат о заштити од пожара представља засебан део пројектне документације и утврђује начин одговора у случају пожара и одговарајуће мере заштите.
- У случају деградације земљишта и подземних вода неопходно је извршити ремедијацију или на други начин санирати деградирану животну средину у складу са пројектом санације и ремедијације.
- Носилац пројекта је у обавези да обезбеди контролисано складиштење свих потенцијално загађујућих материја (гориво, уља, лубриканти, хемикалије или течни отпад) за то наменски опремљеним просторима, опремљеним прихватима за случај изливања. Радна упутства за адекватно руковање опасним материјама морају бити доступна на радилишту и у складишном простору.
- У случају акцидентног (удесног) изливања опасних материја, искоришћени сорбент ће бити сакупљен и депонован према правилник о начину складиштења, паковања и обележавања опасног отпада („Сл.гласник РС“, бр.92/10).
- У случају акцидентног загађења земљишта (просипање горива, цурење уља и сл.) носилац пројекта је у обавези да изврши хитну ремедијацију загађене локације и предузеће све неопходне мере за заустављање ширења загађења и даље деградације животне средине. Контаминирано земљиште

мора бити уклоњено и одложено у складу са прописима о управљању опасним отпадом. Индикатори за оцену ризика као и ремедијационе вредности опасних и штетних материја у земљишту и подземним водама биће усклађени са захтевима уредбе о програму системског праћења квалитета земљишта, индикаторима за оцену ризика од деградације земљишта и методологији за израду ремедијационих програма („Сл.гласник РС“, . 88/10).

- Радном опремом сме руковати и послуживати је само запослени који је стручно оспособљен за рад на сигуран начин и распоређен за рад на њему.
- Распоред опреме и уређаја у постројењу је дат у складу са правилником о сигурности и здрављу при употреби радне опреме, уз осигуран довољан помоћни простор.
- Ради отклањања опасности и штетности радна опрема мора садржати конструкцијска решења којима се иста отклањају, а нарочито:
 1. Кретањем транспортних средстава по означеним транспортним путевима, као и кретање особља по означеним транспортним путевима за особље,
 2. Означени транспортни путеви за кретање транспортних средстава и особља увек морају бити слободни за промет и пролаз особља,
 3. При боравку у близини уређаја који производе буку већу од 80 dB(A) обавезно је коришћење личне заштитне опреме, чепови или штитници,
 4. Опасна места означити, поставити знакове упозорења или оградити заштитном оградом ради онемогућавања приступа,
 5. На радној опреми која стварају буку морају се делови обложити материјалом који упија звук или одвојити у посебну просторију,
 6. Радна опрема и помоћна радна опрема коју имају повишене радне платформе, прелазе преко транспортера морају имати чврсте заштитне ограде,
 7. Радна опрема поред натписних плочица о произвођачу, типу, серији и осталим техничким карактеристикама морају имати знакове опасности и одговарајућа трајна упозорења или упутства ако постоје одређене опасности,
 8. Сваки струјни круг или део електричне опреме, морају бити заштићени изолацијом делова и заштитним кућиштима делова под напоном од кратког споја, преоптерећења и случајног додира, те правилно уземљени.

3.3 Мере током затварања пројекта

- Просечни животни век ветроелектране се процењује на 25 година, а како промењени услови на терену, измене у прописима као и напредак технологија могу условити значајно другачији приступ. Из тог разлога пре него што отпочну радови на уклањању постројења, носилац пројекта је у

обавези да сачинити главни пројекат затварања и уклањања постројења, који ће садржати и детаљан план санације подручја ветроелектране.

- У склопу главног пројекта затварања и уклањања постројења потребно је дефинисати мере заштите животне средине, а у складу са условима на терену који су настали у то време, као и у складу са издатим условима од стране надлежних органа и институција.
- Пројекат са планом санације треба да буде прихваћен од стране надлежног органа из области заштите животне средине као и свих других заинтересованих страна (укључујући и финансијске институције које буду учествовале у финансирању пројекта).
- Пре уклањања ветроелектране и рашчишћавања предметне локације, поново извршити еколошку анализу локације ради утврђивања да ли је потребна примена посебних мера и активности, у зависности од идентификованих врста и њихових станишта.
- У случају престанка пројекта носилац пројекта је дужан да предметну локацију доведе у претходно стање уклањањем ветрогенератора и пратеће опреме.
- При извођењу радова на уређењу локације у случају престанка рада пројекта, обавезно је организовано прикупљање чврстог отпада карактеристика опасног отпада, комуналног отпада, грађевинског отпада, отпада са карактеристикама секундарних сировина, уз обавезно поступање и евакуацију у складу са правилником о начину складиштења, паковања и обележавања опасног отпада („Сл. гласник РС”, бр. 92/10) и правилником о условима и начину сакупљања, транспорта, складиштења и третмана отпада који се користи као секундарна сировина или за добијање енергије („Сл. гласник РС”, бр. 98/10).
- Бетонске темеље разградити до дубине од 1 m. Сав отпадни материјал који том приликом настане отпремити са локације и збринуту у складу са прописима закона о управљању отпадом („Сл.гласник РС”, бр. 36/09 и 88/10).
- При извођењу радова на уређењу комплекса ангажовати исправну механизацију.
- Приликом рестаурације површина користити аутохтоне биљке за сејање и сађење.
- Након извршених мера поступања у случају затварања постројења, обавезна је контрола надлежног инспектора за заштиту животне средине.

4. Израда лабораторијског прототипа ветрогенератора мале снаге

Практични део нашег заједничког дипломског рада, је у ствари био и најзанимљивији. Изградња ветрогенератора представљала је прави изазов. Али ми смо и раније били пројектни тим и у истом саставу учествовали у разним практичним пројектима, па смо били донекле и уиграна екипа и знали смо шта можемо да очекујемо једни од других. Ветрогенератор је деловао као достојна тема мастер рада, у који би могли да се упустимо. Идеју смо добили гледајући научне емисије о зеленој енергији. Пошто ми као инжењери треба да настојимо да одржимо и унапредимо изворе обновљивих ресурса, били смо више него убеђени да је тема за мастер рад право време да се и ми укључимо у целу ту причу као будући инжењери и да дамо свој скромни допринос.

Када смо се усагласили око теме, прво што нам је било потребно као основа за даљу израду, био је електромотор или генератор. Од њега нам је зависила даља конструкција и изглед кућишта, елисе и стуба. Понуда електромотора на нашем тржишту је јако сиромашна, у шта смо имали прилику да се уверимо. Контактирали смо разне људе који се баве електромоторима и сви су нам рекли да је јако тешко да се код нас нађе такав електромотор. Наиме најпогодније карактеристике електромотора за ветротурбину мале снаге су обртни момент од 350 o/min, напон од 30 до 100 V и да тај мотор буде једносмерне струје. То су карактеристике које би за почетнике као што смо ми, биле сасвим довољне да се боље упознају са могућностима ветрогенератора. Наравно напон и ампеража могу да варирају, то не мења претерано суштину, али оно што је нама од важности јесте сама тежина генератора. Са повећањем напона и ампераже расте наравно и снага, а са повећањем снаге расте и тежина.

Мотор једносмерне струје у себи садржи сталне магнете који служе за побуду и који у великој мери олакшавају рад и чини га идеалним за ову позицију. Уколико је потребна наизменична струја, проблем се решава AC/DC конвертором. Наизменични мотор нема сопствену побуду, те је потребно обезбедити је, што се изводи кондензаторима или постављањем сталних магнета у ротору, што је јако скупа и компликована инвестиција. Магнети се постављају наспрамно, са обе стране по 9 комада. Што укупно чини 18 магнета. Што се цене тиче, најповољније решење је једносмеран електромотор или у овом случају генератор који још може да се назове и динама. Електромотор за који смо се ми определили је *Emerson DC motor*, намењен америчком тржишту, а склопљен у Мексику. Радне карактеристике електромотора су: број обртаја 1725 o/min, напон 90V и струја од 3,8 A. Јасно је да овај избор није баш идеалан, али са економског погледа је најлогичнији. [3]

³ Милош Љубисављевић, Истраживање тржишта малих малих ветрогенератора и развој лабораторијског прототипа малог ветрогенератора, мастер рад, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2014



Слика 8: Електромотор/генератор Emerson DC motor³

Наизглед велики број обртаја се може надоместити мултипликатором који би повећао број обртаја са елиса на коначни број обртаја на електромотору. То је изводљиво помоћу зупчаника или ременица. Пошто ременице пружају мањи отпор и ефикасније су, одлучили смо се за тај избор. Ременице смо скинули са старе веш машине. Пречник веће ременице на елисама је 450 mm, а на електромотору је 50 mm.



а)



б)



в)

Слика 9: а) велика ременица, б) мала ременица, в) спрега преноса³

Проблем који смо имали са преносником је тај што се он сам понаша као кочница. Генерално ми смо имали проблем са лежајевима. Ротор се слабије окретао и чуло се крцкање приликом окретања. Били смо приморани да расклопимо електромотор, подмажемо лежајеве и проверимо опруге на четкицама да нису запекле. Један од два лежаја био је у лошем стању, па смо морали да га заменимо. То је радијални лежај који има ознаку 9R10 и било га је тешко наћи на нашем тржишту. Тако да смо имали велики проблем. Због већег отпора при окретању, нисмо могли да ставимо преносник, јер због великог отпора ротор не би могао да се окреће. Били смо приморани да елисе вежемо директно на ротор, што смо и урадили. Након промене плана и сасвим нове концепције, кренули смо даље са развијањем нашег пројекта. Прво смо направили држач за мотор који би

касније могао да се опкроји и да се направи кућиште. Узели смо челичну плочу дебљине 3 mm и заварили је као L профил.



Слика 10: Држач генератора³

Генератор је причвршћен на 4 завртња на вертикалној плочи. Искористили смо рупе које већ постоје на генератору, које су већ и предвиђене за причвршћивање. На доњем делу држача заварили смо главчину од задњег точка аутомобила, како би носач причврстили за стуб и како би носач био слободан да се окреће према ветру.



Слика 11: Главчина³

Округли део је стављен на носач генератора, док је шиљати део постављен на врху стуба. На носач је са задње стране заварена танка шипка, пречника 36 mm, која служи као носач репа. Дужина шипке је 1 m и расечена је на предњем и задњем крају, како би се лакше заварео носач и реп.



Слика 12: Носач репа³

Реп смо направили од челичне плоче дебљине 1 mm. Тражили смо плочу која је те дебљине, како би била лака, јер реп треба да буде лаган, како би га ветар лако померао и како не би нарушавао баланс тежине. Плоча је била димензија 40x40 cm, а од ње смо направили троугао, јер нам је тај облик деловао најзанимљивији.



Слика 13: Реп ветрењаче³

Када смо завршили са склапањем овог дела, размишљали смо како да затворимо део око генератора, ради заштите од кише, сунца, а да при том изгледа лепо и да буде аеродинамичан. Мислили смо прво да купимо цев, коју би могли да прекројимо, али би она била исувише крута да се савије, онако како смо ми мислили. Онда смо решили да пробамо са неким лимом. Најлакши лим је алуминијум и он се најлакше савија. Узели смо таблу од алуминијума дебљине 0,7 mm, али због тога што нисмо поседовали одговарајући алат за савијање лима, били смо приморани да потражимо помоћ од људи који се тиме баве. Ваљком за савијање лима добили смо жељени облик и обезбедили смо кућиште за генератор.



Слика 14: Изглед кућишта ветрогенератора³

Елисе смо направили од пластичне цеви пречника 160 см. Цев смо секли под углом и добили жељени облик. Направили смо три елисе које су идентичног изгледа и тежине. Пошто је једна елиса из неког разлога била мало лакша од остале две, залепили смо јој парченце алуминијума на врху, како би елису уравнотежили. На елисама смо пробушили по 3 рупе, како би смо их причврстили за држач.



Слика 15: Елиса ветрогенератора³

Држач елиса је направљен од брушеног челика и он има улогу да снагу са елиса пренесе на електромотор. Јако је битно да се позиционирањем држача погоди центар осе ротације, како би имало што мање померања и како приликом рада елисе не би „бацале“. Тај проблем може да дође до изражаја при великим брзинама. На држачу смо морали да извршимо неке промене, пошто је рад са мултипликатором тражио други пречник рупа. Морали смо да се обратимо стругару, како би нам он поставио нову чауру на центру држача, која би имала исти пречник као и вратило електромотора. Са стране смо на чаури избушили отвор, на коме смо урезали навој, како би завртњем притегли држач за вратило, да би елисе биле обезбеђене.



Слика 16: Држач елиса³

Стуб на коме је требало да поставимо генератор је висок 3,2 m, и он челичан, а нашли смо га у Техничко ремонтном заводу. Пречник цеви је 115 mm, а она је, иначе, састављена од три цеви, које се шрафе једна у другу, пошто имају навоје који одговарају.



Слика 17: Стуб ветрогенератора³

Када смо завршили све послове око припреме, дошао је тренутак да поставимо генератор и да измеримо његову снагу. Генератор смо поставили у Бресници у дворишту куће.

Услови за постављање нису били идеални, пошто се у кругу од неколико метара налазе два дрвета, која су далеко виша од нашег ветрогенератора, а са једне стране се налази ред кућа, које, такође, праве заветрину. па смо морали да се помиримо са ситуацијом и да покушамо да из те ситуације извучемо највише.



Слика 18: Постављање ветрогенератора³

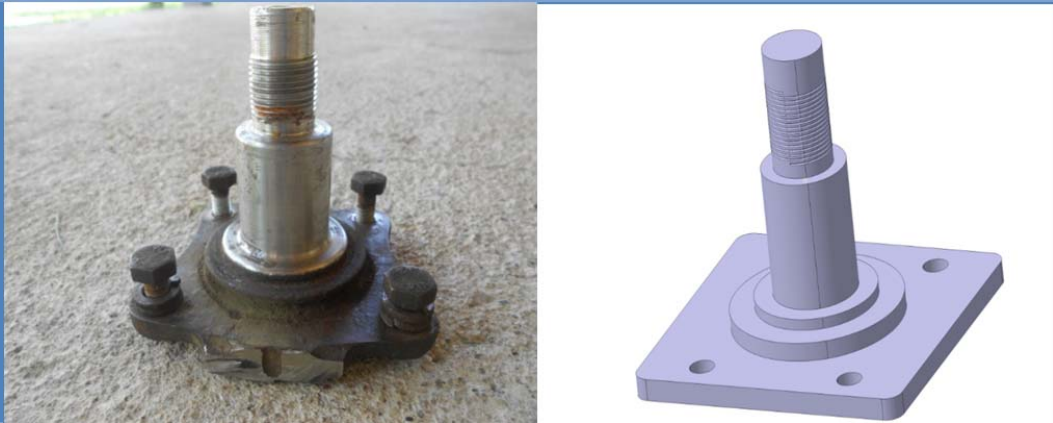
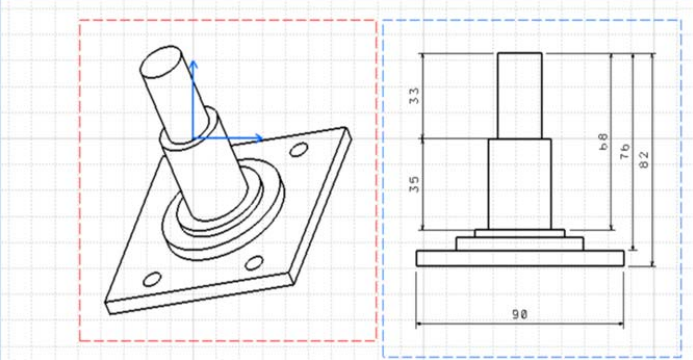


Слика 19: Изглед ветрогенератора³

5. Техно-економска анализа

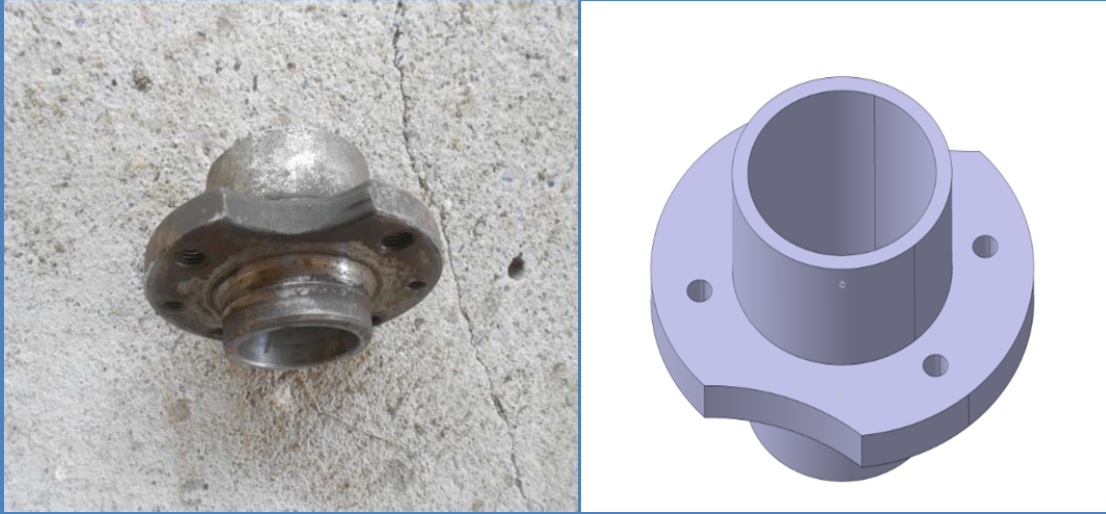
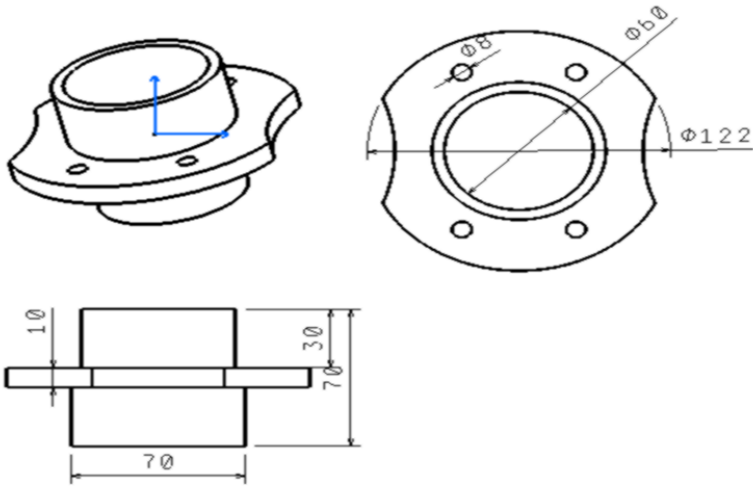
У овом поглављу бавили смо се техно-економском анализом нашег ветрогенератора мале снаге. Анализирали смо сваки део посебно, од тежине, густине, материјала, па све до цене. Делове смо моделирали у Catia софтверском програму, а слике и коментари дати су у табелама.[4]

Табела 1: 2D и 3D приказ вратила без главе и приказ његових карактеристика⁴

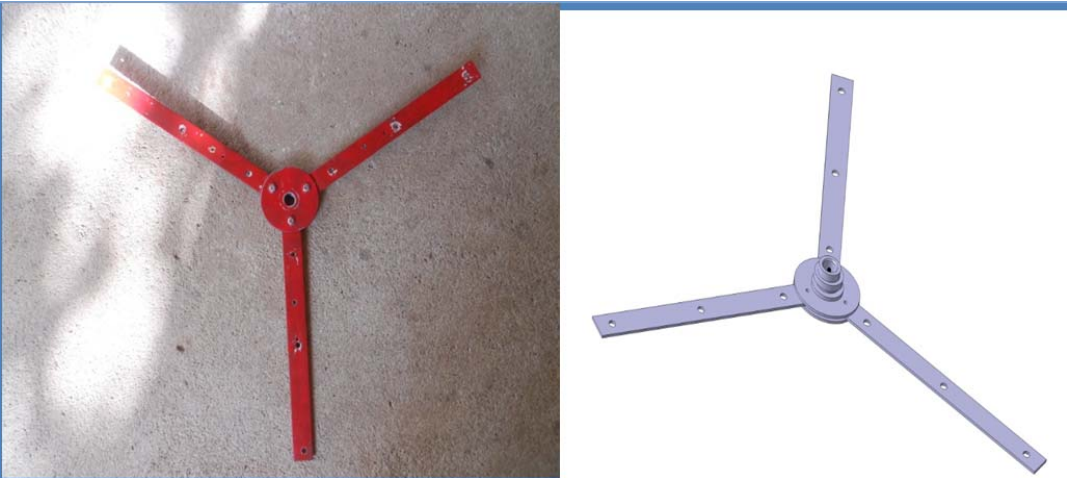
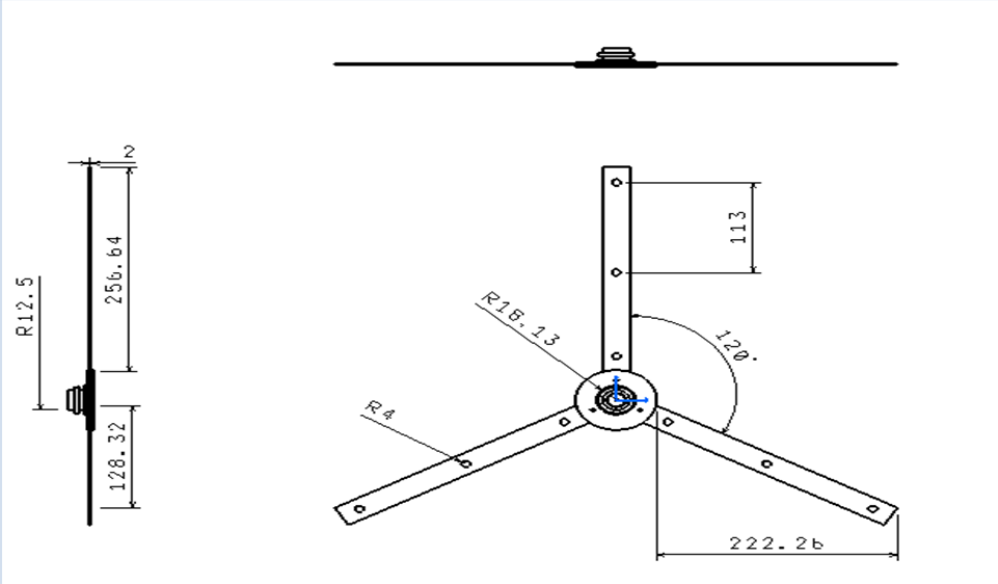
	
	
Назив производа	вратило без главе
Врста материјала	брушени челик
Површина материјала	0. 025m ²
Маса материјала	0. 725kg
Густина материјала	7870 kg/m ³
Боја материјала	Сива
Цена	600 динара

⁴ Стефан Војиновић, Истраживање енергетских потенцијала ветра у Србији и региону и развој лабораторијског прототипа малог ветрогенератора, мастер рад, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2014.

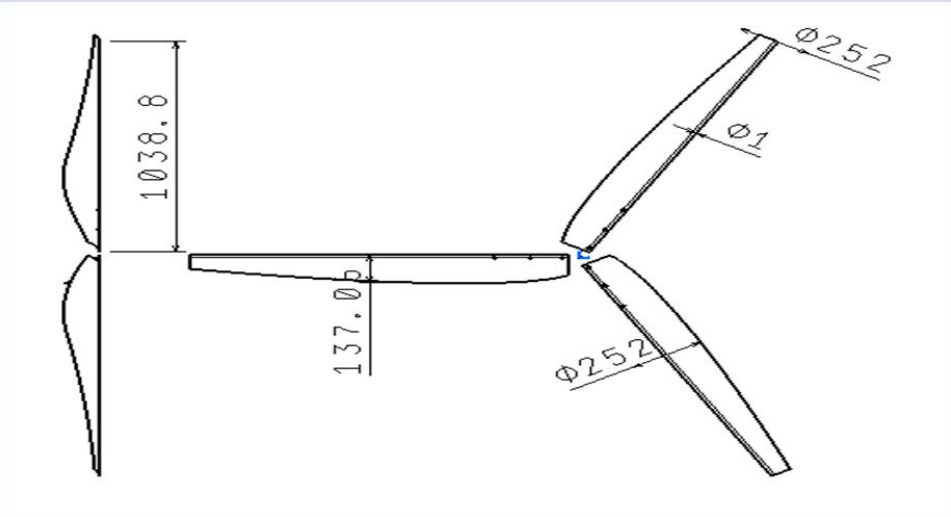
Табела 2: 2D и 3D приказ главе вратилаи приказ њених карактеристика⁴

	
	
Назив производа	Глава
Врста материјала	брушени челик
Површина материјала	0. 046m ²
Маса материјала	0. 905kg
Густина материјала	7860 kg/m ³
Боја материјала	Сива
Цена	800 динара

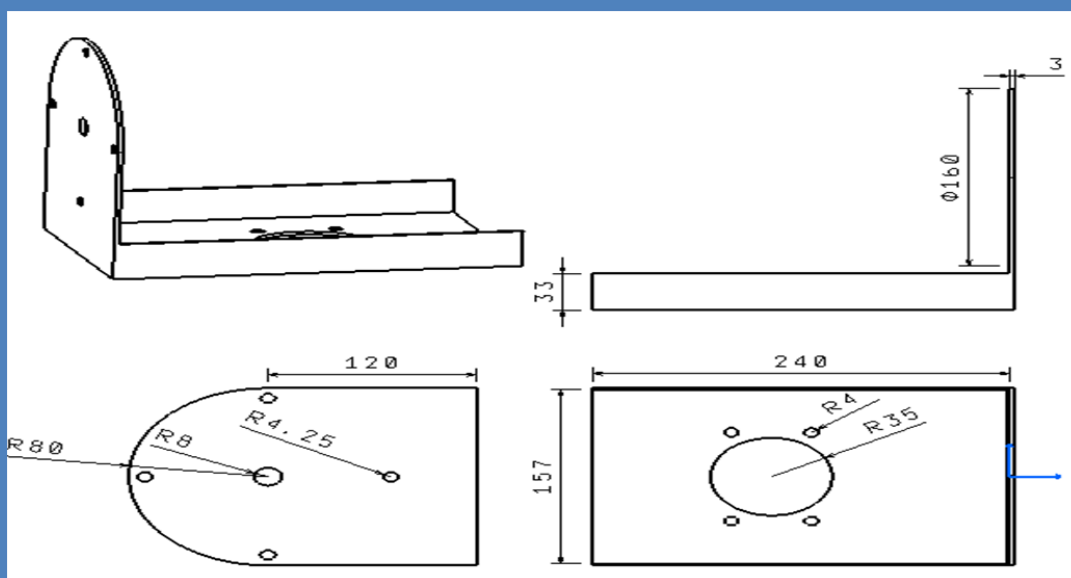
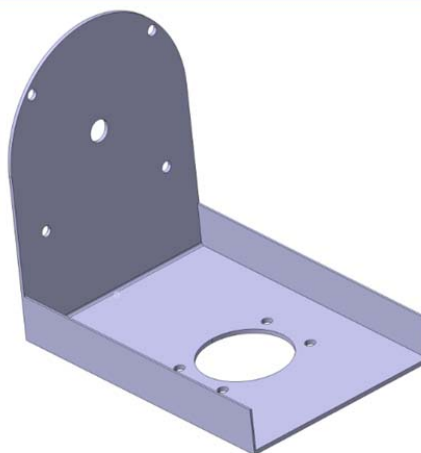
Табела 3: 2D и 3D приказ држача елисе и приказ његових карактеристика⁴

	
	
Назив производа	Држач елисе
Врста материјала	брушени челик
Површина материјала	0.059m ²
Маса материјала	0.525kg
Густина материјала	7860 kg/m ³
Боја материјала	Бела
Цена	350 динара

Табела 4: 2D и 3D приказ елиса и приказ њених карактеристика⁴

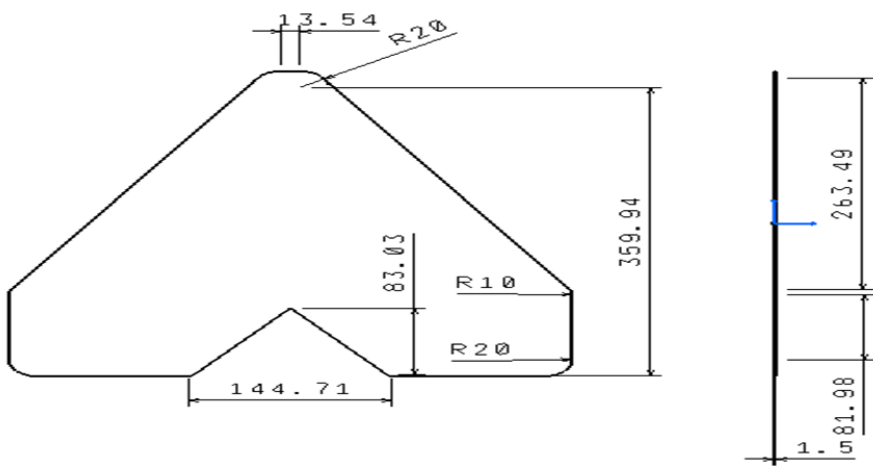
	
	
Назив производа	Елисе
Врста материјала	PVC
Површина материјала	1. 049m ²
Маса материјала	0. 73kg
Густина материјала	1400 kg/m ³
Боја материјала	Бела
Цена	215 динара

Табела 5: 2D и 3D приказ држача мотора и приказ његових карактеристика⁴

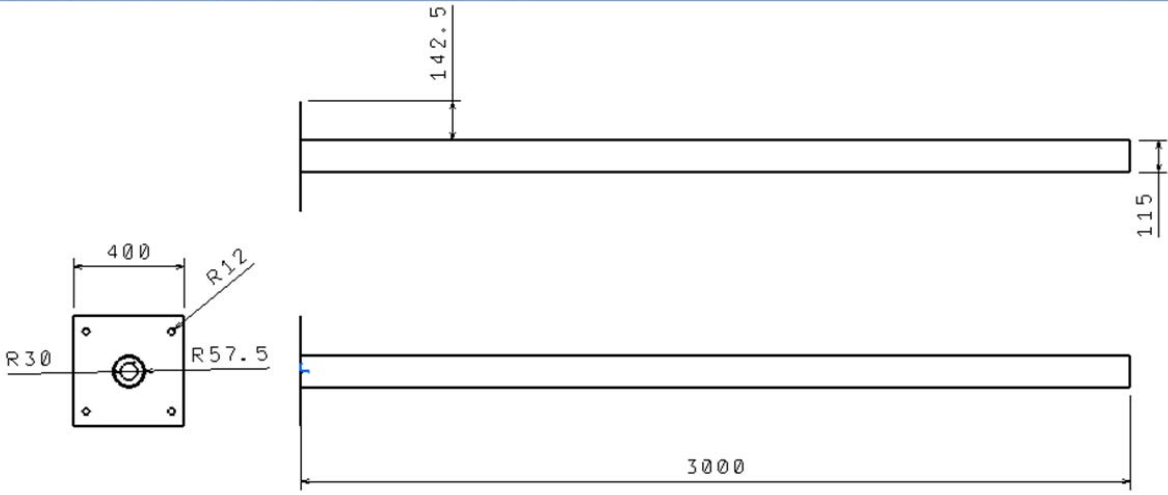


Назив производа	Држач мотора
Врста материјала	Челик
Површина материјала	0. 16m ²
Маса материјала	1. 663kg
Густина материјала	7870 kg/m ³
Боја материјала	Бела
Цена	500 динара

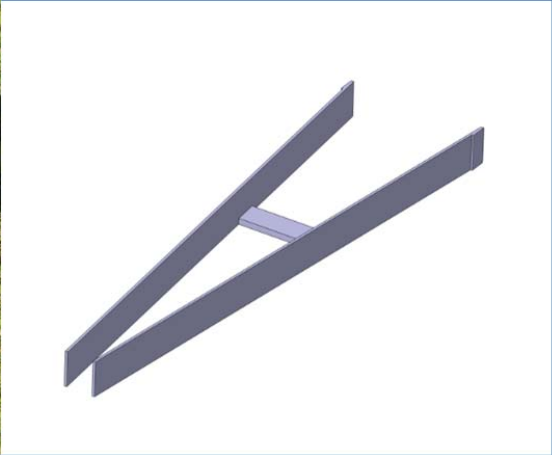
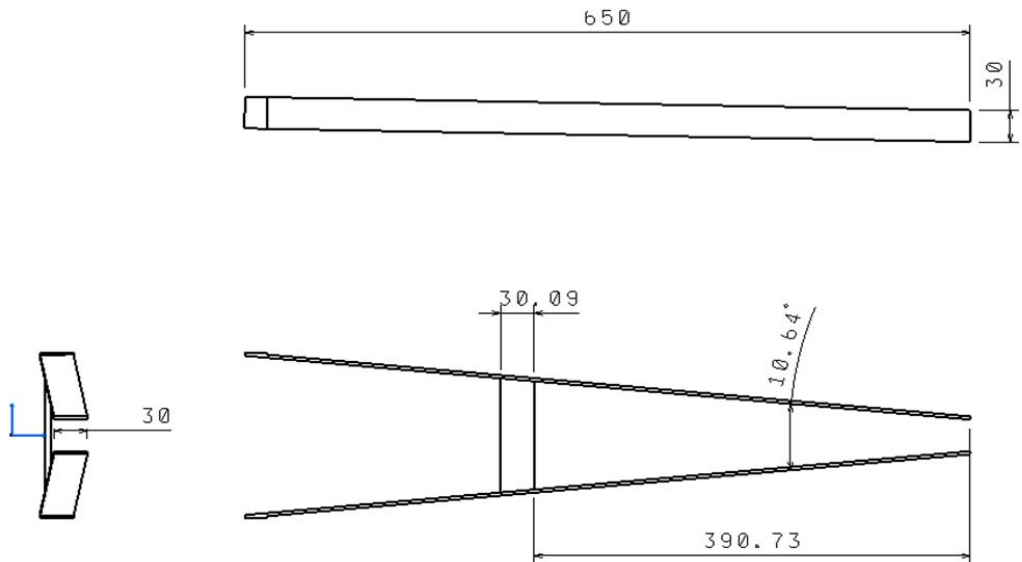
Табела 6: 2D и 3D приказ репа и приказ његових карактеристика⁴

	
	
Назив производа	Реп
Врста материјала	Челик
Површина материјала	0.193m ²
Маса материјала	1.128kg
Густина материјала	7860 kg/m ³
Боја материјала	Бела
Цена	300 динара

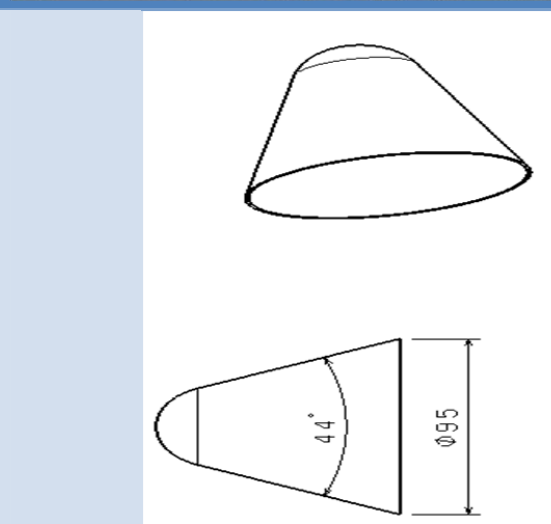
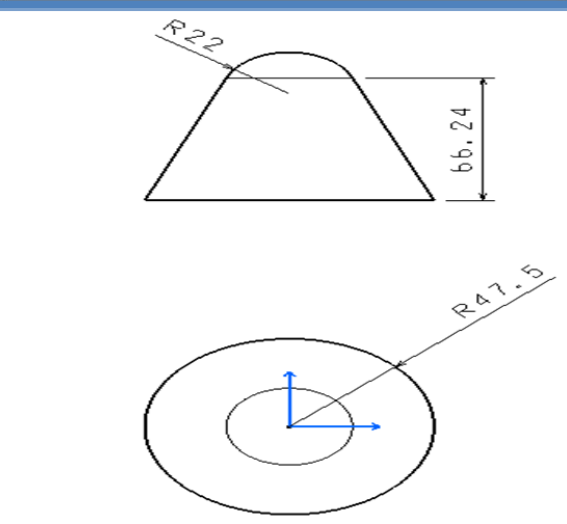
Табела 7: 2D и 3D приказ стуба и приказ његових карактеристика⁴

	
	
Назив производа	Стуб
Врста материјала	Челик
Површина материјала	2. 39m ²
Маса материјала	44. 406kg
Густина материјала	7860 kg/m ³
Боја материјала	Бела
Цена	800 динара

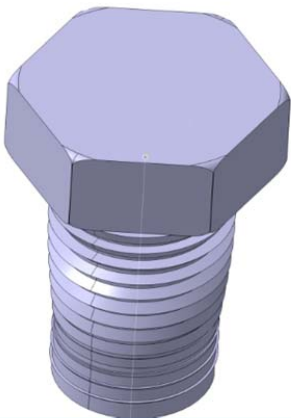
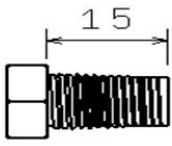
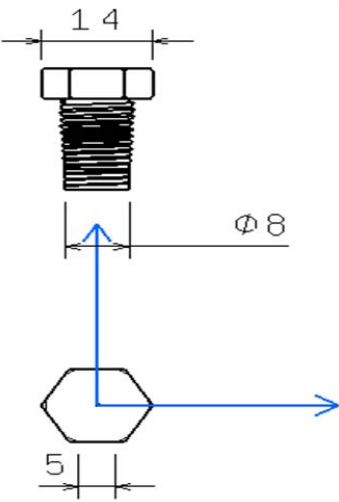
Табела 8: 2D и 3D приказ помоћног држача и приказ његових карактеристика⁴

 	
	
Назив производа	Помоћни држач
Врста материјала	Челик
Површина материјала	0.094m ²
Маса материјала	1.053kg
Густина материјала	7860 kg/m ³
Боја материјала	Сива
Цена	280 динара

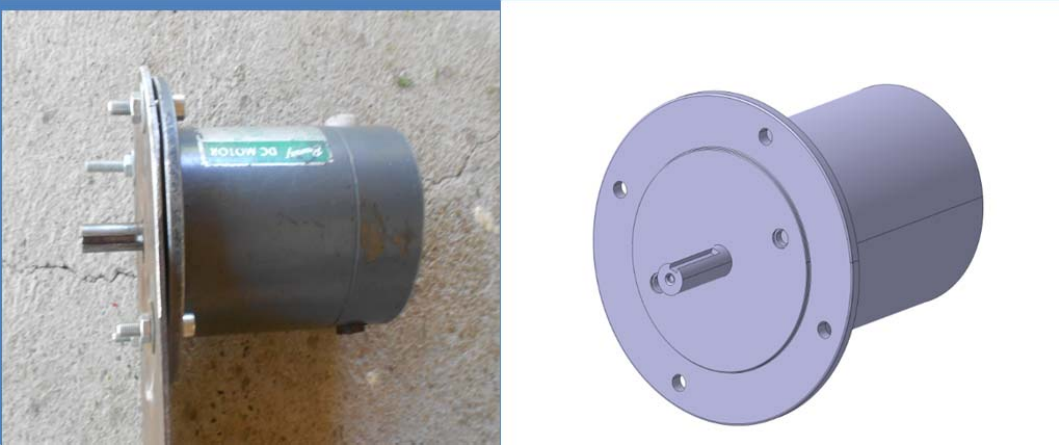
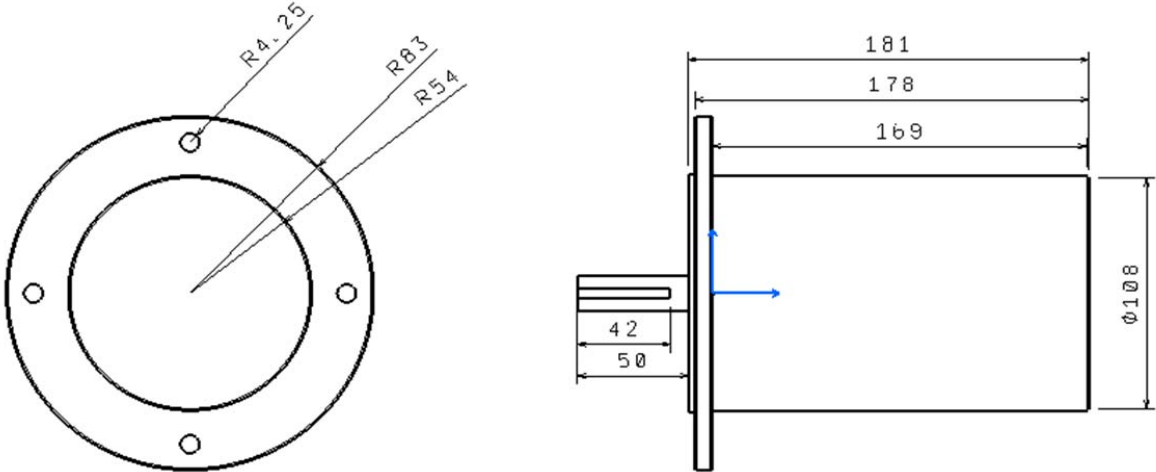
Табела 9: 2D и 3D приказ капе и приказ њених карактеристика⁴

		
		
Назив производа	Капа	
Врста материјала	Пластика	
Површина материјала	0. 034m ²	
Маса материјала	0. 014kg	
Густина материјала	849kg/m ³	
Боја материјала	Црвена	
Цена	250 динара	

Табела 10: 2D и 3D приказ шрафа и приказ његових карактеристика⁴

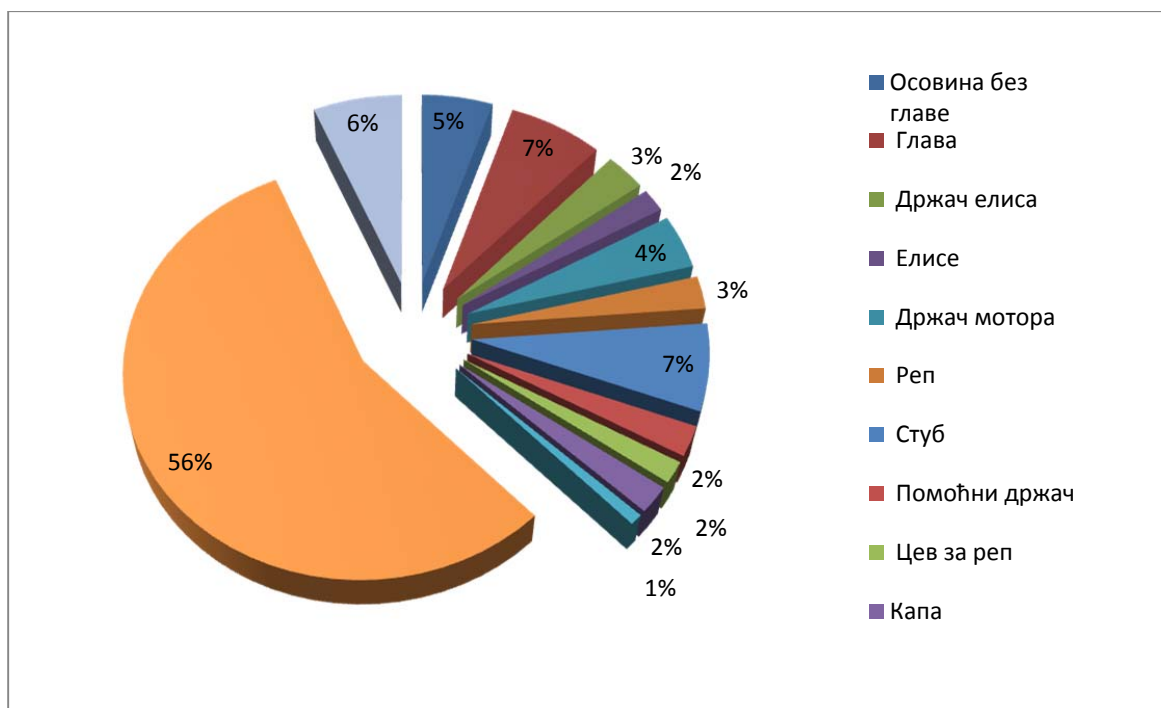
	
	
Назив производа	Шрафови
Врста материјала	Челик
Површина материјала	0. 001m ²
Маса материјала	0. 011kg
Густина материјала	7860kg/m ³
Боја материјала	Сива
Цена	50 динара

Табела 11: 2D и 3D приказ електромотора и приказ његових карактеристика⁴

	
	
Назив производа	Генератор
Врста мотора	DC MOTOR (BROWNING assembled in Mexico)
Површина материјала	0. 11m ²
RPM	1725
Струја	A 3. 6
Напон	V 90
Цена	6 500 динара

Табела 12: Врсте делова који су били потребни за изградњу ветрогенератора и њихове цене⁴

Назив производа	Цена
1. Осовина без главе	600 динара
2. Глава	800 динара
3. Држач елиса	350 динара
4. Елисе	215 динара
5. Држач мотора	500 динара
6. Реп	300 динара
7. Стуб	800 динара
8. Помоћни држач	280 динара
9. Цев за реп	200 динара
10. Капа	250 динара
11. Шрафови	100 динара
12. Генератор	6500 динара
13. Спреј за фарбање	750 динара
Укупно	11 600 динара



Укупна цена овог ветрогенератора, из сопствене израде, је око 11600 динара. Треба имати у виду да је ово студентски пројекат, да се у њему тежило ка јефтинијим деловима, од којих је већина половна. Када би се генератор на сличном принципу правио за полусеријску производњу или неку озбиљнију употребу, цена би била већа.

Пре свега због обавезне куповине новог електромотора веће снаге, који се крећу у распону од 150 до 400 €.

Конструкција би била довољно јака и квалитетна да носи било који генератор, али би сви делови, такође, морали да буду нови и да се са одређеним добављачем договори стално снабдевање материјалом. Све ово би знатно поскупело израду, а опрема која нам недостаје за неку озбиљнију производњу, такође би тражила одређену инвестицију.

На основу стеченог знања били би способни да направимо ветротурбину било које снаге и величине, а временом би се наше знање само усавршавало. Што се тиче дизајна и он би могао да се мења, као и материјали који се користе. Све, наравно, у складу са жељом и потребом купаца.

Што се тиче дизајна наше ветротурбине ФИН Крагујевац 35.250, прилагођен је дизајну електромотора. Услед коришћења неког другог електромотора, променио би се и дизајн.

Што се тиче осталих делова, сви су прилагођени једни другима и покушали смо са деловима са којима располажемо да направимо најидеалнији могући склоп. Замена сваког дела тражи одређене инвестиције.

Што се тиче припреме оваквог модела за полусеријску производњу, цена коју би ми имали према добављачима би се кретала од 300 до 600 €, у зависности од компоненти, а цена би могла да буде и већа.

У складу са приказаним расходима, формирала би се и тржишна цена нашег производа.

6. Закључци

Енергија ветра тренутно представља најзаступљенији вид коришћења обновљивих извора енергије у свету. Предности коришћења енергије ветра за претварање исте у електричну енергију су пре свега у неисцрпној количини енергије као и економској оправданости коришћењем исте. Недостатак и висока цена фосилних горива отвара широк простор за коришћење ветрогенератора тако да данас производња ветрогенератора бележи велики раст.

Све док постоји ветар, вода или сунце, имаћемо на располагању обновљиве изворе енергије. Поред тога што су обновљиви, ови извори су еколошки чисти, за разлику од нуклеарних електрана и термоелектрана. Зато мислим да, ако би бисмо те изворе користили више, или ако бисмо у садашњу производњу енергије укључили више обновљивих, алтернативних извора, то би продужило коришћење горива као што су угаљ и нафта, чије су залихе ипак ограничене.

У раду смо могли видети детаљан поступак израде прототипа ветрогенератора, резултате добијене приликом његовог рада, типове ветрогенератора, начине управљања као и техно-економску анализу целокупних трошкова за сам пројекат. Оно што се може приметити је да је највећа инвестиција била набавка генератора који чини 43.96% укупних трошкова.

Генератор за који смо се ми определили је *Emerson DC motor*, намењен америчком тржишту, а склопљен у Мексику. Радне карактеристике електромотора су : број обртаја 1725 o/min, напон 90V и струја од 3.8 A. Јасно је да овај избор није баш идеалан, али са економског погледа је најлогичнији.

Овај мастер рад нам омогућава да проширимо своја знања о ветрогенераторима, њиховој функцији, елементима и врстама.

Ветрогенератори мале снаге представљају једну грану која ће се јако развијати у будућности и која ће бити саставни део многих домаћих. Као инжењери смо имали прилику да стекнемо увид у то и стечено знање ћемо настојати да унапредимо и проширимо у истом правцу, ради побољшања стања у нашем друштву.

7. Литература

- [1] David A. Spera, Wind turbine Technology, Fundamental Concepts of wind turbine engineering, second edition, New York, 2009.
- [2] <http://www.pravno-informacioni-sistem.rs> (приступљено сајту 30.05.2014)
- [3] Милош Љубисављевић, Истраживање тржишта малих малих ветрогенератора и развој лабораторијског прототипа малог ветрогенератора, мастер рад, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2014
- [4] Стефан Војиновић, Истраживање енергетских потенцијала ветра у Србији и региону и развој лабораторијског прототипа малог ветрогенератора, мастер рад, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2014.
- [5] Енергија ветра, Иан Грахам, Словенија, 2000
- [6] Wind turbines, Erich Nau, 2005
- [7] Стефан Печић, Истраживање тржишта малих малих ветрогенератора и развој лабораторијског прототипа малог ветрогенератора, мастер рад, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2014.