

# Pretvorba energije vjetra u električnu energiju u laboratoriju za OIE

---

**Poljarević, Matej**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2019**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:973011>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-28**

*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH  
TEHNOLOGIJA**

**Sveučilišni studij**

**PRETVORBA ENERGIJE VJETRA U ELEKTRIČNU  
ENERGIJU U LABORATORIJU ZA OIE**

**Završni rad**

**Matej Poljarević**

**Osijek, 2018.**

## SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
1.1. Opis zadatka .....	1
2. NASTANAK I ISKORIŠTAVANJE VJETRA .....	2
2.1. Klimatsko-geografski uvjeti nastanka vjetra .....	2
2.2. Matematički model gibanja vjetra .....	3
2.3. Pretvorba energije vjetra .....	4
3. OPIS OPREME I RADA U PROGRAMU CLEAN ENERGY TRAINER .....	5
4. EKSPERIMENTI .....	10
4.1. Live module način snimanja.....	10
4.2. Snimanje strujno naponskih karakteristika pri različitim opterećenjima .....	11
5. OBRADA PODATAKA .....	16
6. ZAKLJUČAK .....	18
7. LITERATURA .....	19
8. ŽIVOTOPIS .....	21
9. SAŽETAK.....	22
10. ABSTRACT .....	22
POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I SIMBOLA .....	24

## 1. UVOD

Snaga vjetra počela se iskorištavati još u prapovijesti, u doba drevnih kultura na područjima tadašnje Mezopotamije, Egipta, Perzije i Kine pa sve do danas. Do otkrića električne struje i načina iskorištavanja energije vjetra u svrhu dobivanja električne energije, vjetrenjače su se koristile za dobivanje mehaničke energije kojom su bile pokretane crpke za vodu ili za pokretanje žrvnja mlina. U tome su prednjačile Nizozemska, Danska i Španjolska. Početkom 20.-og stoljeća počinje polagani razvoj modernih vjetrenjača za dobivanje električne energije. Trenutno je energija vjetra, kao i ostali oblici obnovljivih izvora energije, od značajnog interesa u modernom tehničkom svijetu pa se zbog toga sve više ulaže u njen razvoj i neovisnost o neobnovljivim oblicima energije čije je izumiranje samo pitanje vremena.

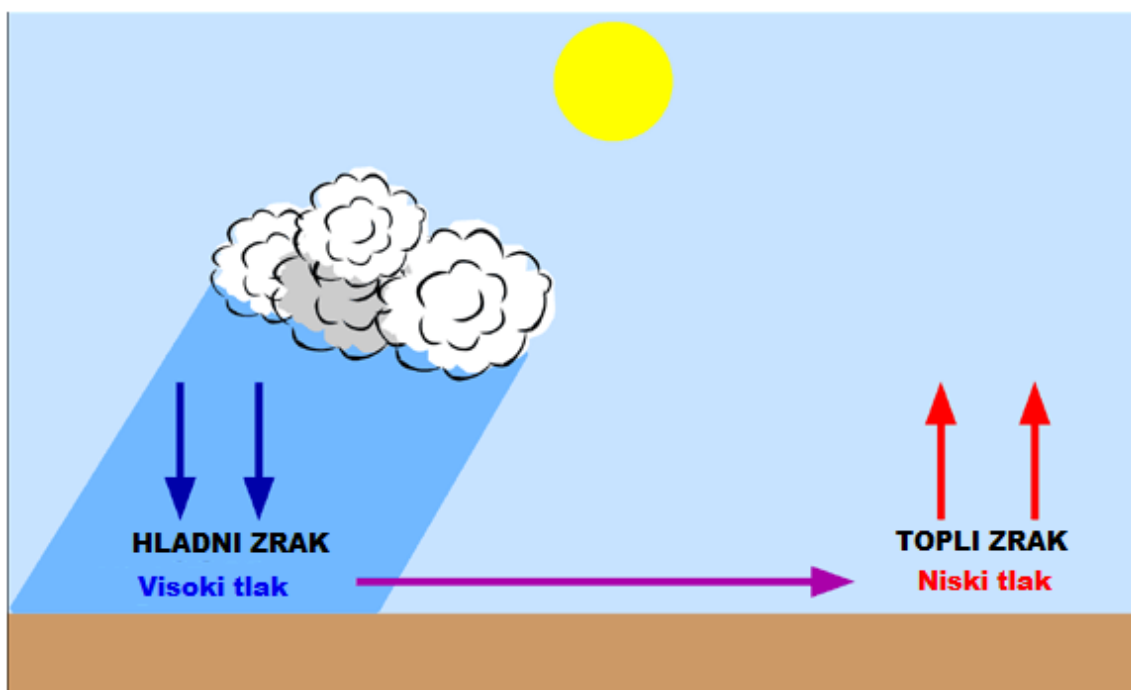
### 1.1. Opis zadatka

Fizikalno opisati princip stvaranja i iskorištavanja snage vjetra te pretvorbu kinetičke energije vjetra u električnu energiju pomoću vjetrenjača koje pokreću sinkrone generatore istosmjerne električne struje. Pomoću programskog paketa Clean Energy Trainer 2.0 i opreme koja dolazi uz to snimiti strujno naponske karakteristike različitih opterećenja generatora, proučiti ovisnost broja lopatica, kutu između lopatica i osovine generatora, kutu pod kojim vjetar upada u vjetrenjaču te utjecaju smetnji na tok vjetra o naponu dobivenog na stezaljkama generatora. Upoznati se s radom u programu te s opremom kojom provodimo eksperimente.

## 2. NASTANAK I ISKORIŠTAVANJE VJETRA

Vjetar je definiran kao gibanje atmosferskog zraka uzrokovano razlikom u tlakovima na različitim geografskim područjima. Do razlike u tlakovima dolazi zbog neravnomjernog zagrijavanja Zemljine površine što je djelomice uzrokovano razlikom u nadmorskoj visini, a djelomice blizinom, odnosno udaljenošću od veće vodene površine koja utječe na temperaturu, a time i tlak zraka.

### 2.1. Klimatsko-geografski uvjeti nastanka vjetra



**Slika 2.1.** Razlika atmosferskih tlakova uzrokovana djelovanjem sunčevog zračenja

Kao i kod svakog drugog fluida tako i kod zraka dolazi do uzbuđivanja čestica od kojih se sastoji, time se povećava njihov međusobni razmak koji se manifestira smanjenjem gustoće. Hladni zrak je znatno gušći od zagrijanog pa zbog toga stvara veći pritisak na površinu dok topli zrak ima tendenciju širiti se. Zbog dualnosti ponašanja toplog i hladnog zraka dolazi do spontane difuzije, tj. do izjednačavanja tlakova. To strujanje uzrokovano izjednačavanjem tlakova nazivamo vjetar. Osim same gustoće zraka, na količinu čestica koje služe kao nositelji kinetičke energije ubrajamo i vlažnost zraka.

Gustoća zraka ovisi o njegovoj temperaturi i vlažnosti što je logično, uzmemo li u obzir da se u vlažnijem zraku nalazi veća količina čestica vodene pare koje sudjeluju u pogonu zračne turbine,

a čestice u hladnijem stanju sporije titraju u prostoru pa je time manja frekvencija sudaranja čestica zraka, međusobna udaljenost im je manja i zrak je time kompaktniji, odnosno, gušći.

## 2.2. Matematički model gibanja vjetra

Pri gibanju vjetra njegova kinetička energija se djelomično pretvara u mehaničku pomoću zračne turbine kojom se pogoni električni generator zadužen za proizvodnju električne energije.

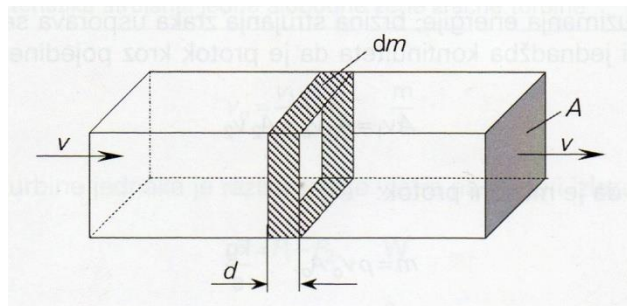
Kinetička energija infinitezimalnog dijela vjetra računa se po izrazu:

$$dE = \frac{1}{2} v^2 dm \quad (2-1)$$

Zbog praktičnih razloga, kao što je mogućnost mjerenja promjenjivih parametara jednadžbe i računanje kinetičke energije vjetra, standardnu gornju formulu preoblikujemo na sljedeći način:

Element mase zapišemo kao umnožak gustoće vjetra (zraka) i dijela volumena koji odgovara tom elementu mase

$$dm = \rho dV \quad (2-2)$$



**Slika 2.2.** Infinitezimalni dio mase vjetra

Nadalje, element volumena zapisujemo kao umnožak površine kruga koji čine lopatice vjetrenjače pri rotaciji i dio puta koji vjetar prijeđe u određenom trenutku

$$dV = A dx \quad (2-3)$$

Put zapisujemo kao umnožak brzine i vremena te ga u tom obliku uvrstimo u jednadžbu (2-3)

$$dV = A v dt \quad (2-4)$$

Jednadžbu (2-4) uvrstimo u jednadžbu (2-2)

$$dm = \rho A v dt \quad (2-5)$$

Naposljetku, jednadžbu (2-5) uvrstavamo u jednadžbu (2-1) kako bi dobili konačan oblik jednadžbe za izračun kinetičke energije vjetra u ovisnosti o promjenjivim parametrima koje je moguće izmjeriti ili, u slučaju površine, izračunati poznavajući duljinu lopatice rotora vjetrenjače

$$dE = \frac{1}{2} \rho A v^3 dt \quad (2-6)$$

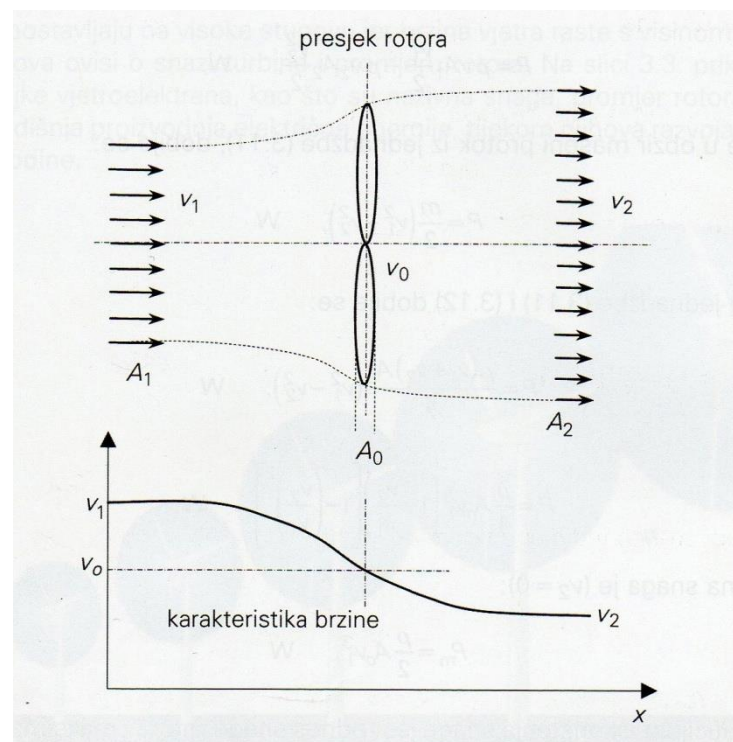
Snagu vjetra dobijemo kada gornju jednadžbu (2-6) podijelimo s vremenom  $t$

$$P = \frac{A \rho v^3}{2} \quad (2-7)$$

Osim gustoće vjetra bitnu ulogu ima i lokacija vjetroelektrane, a samim time se podrazumijeva i nadmorska visina na kojoj se nalazi rotor vjetrenjače.

### 2.3. Pretvorba energije vjetra

Prilikom prolaska vjetra kroz turbinu dio njegove kinetičke energije pretvara se mehaničku energiju koja pokreće rotor generatora pomoću lopatica. Pri tome se putanja i brzina vjetra mijenjaju.



**Slika 2.3.** Ovisnost brzine i putanje vjetra o položaju promatranja

Na slici 2.2. vidimo grafički prikaz snopa zraka pri prolasku kroz rotor. Ovisnost površine i brzine vjetra na pojedinim mjestima opisujemo jednadžbom kontinuiteta:

$$A_1 v_1 = A_0 v_0 = A_2 v_2 \quad (2-8)$$

Ako je snaga vjetra prije rotora  $P_1$ , a snaga vjetra nakon prolaska kroz rotor  $P_2$  tada je razlika te dvije snage jednaka snazi rotora turbine  $P_0$

Maksimalna snaga turbine ovisi o brzini vjetra prije prolaska kroz nju i površini kruga kojeg formiraju elise pri vrtnji

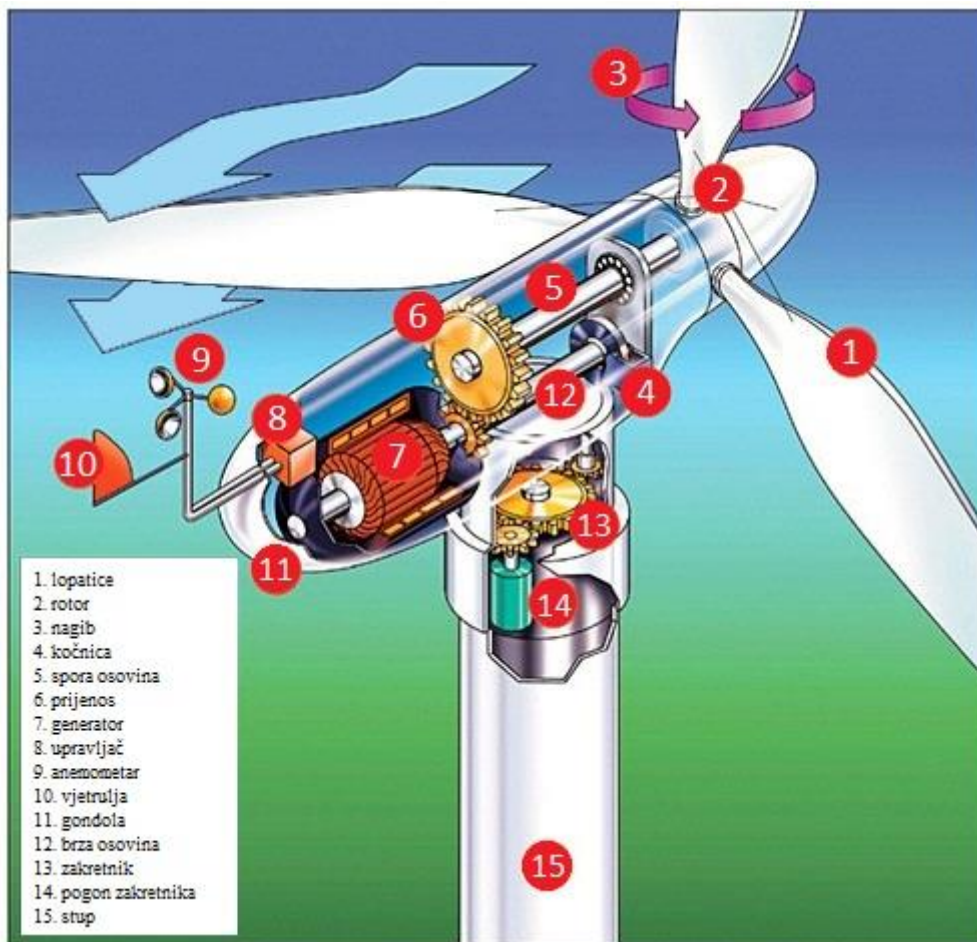
$$P_M = \frac{\rho A_0 v_1^3}{2} \quad (2-9)$$

Omjer teoretske maksimalne snage na turbini i maksimalne snage vjetra iznosi 16/27 i naziva se Betzov koeficijent. To znači da taj udio vjetra postaje mehanička energija na turbini, a ostatak ostaje u obliku kinetičke energije nakon protoka kroz turbinu.

$$c_p = \frac{P_1}{P_M} \quad (2-10)$$

Osim Betzovog koeficijenta, u obzir se uzimaju i koeficijenti maksimalne iskoristivosti zračne turbine ( $\eta_{\max,zt} \approx 0,65$ ) te koeficijent maksimalne iskoristivosti generatora ( $\eta_{\max,g} \approx 0,8$ ) pa je izraz za maksimalnu snagu vjetroelektrane.

## 2.4. Izgled i dijelovi vjetroturbine



Slika 2.4. Dijelovi vjetroturbine

Najčešća izvedba današnjih vjetroturbina je s tri aerodinamički građene lopatice jer je to optimalan omjer ukupne mase lopatica i količine vjetra koji se može iskoristiti za pokretanje i kontinuiran rad generatora. Brojem okretaja i smjerom djelovanja vjetra na lopatice upravlja jedna upravljačka jedinica koja na osnovu ponašanja anemometra i vjetrulje kontrolira te parametre putem mehaničke kočnice, aerodinamičke kočnice (nagib lopatica) i zakretnika.



Brzina rotacije sporohodne (spore) osovine ovisi o brzini vrtnje lopatica, a mehanizam unutar gondole transformira tu brzinu u skladu s potrebnom brzinom generatora kojeg pogoni brzohodna (brza) osovina. Generator ne smije biti preosjetljiv na nejednaku brzinu kojom se pogoni, ugrađuje se sinkroni za manje ili samostalne mreže, a asinkroni za jače distributivne mreže.

### 3. OPIS OPREME I RADA U PROGRAMU CLEAN ENERGY TRAINER

Za izvođenje ovih eksperimenata koristi se ventilator, vjetrogenerator, dva bakrena vodiča, kontrolna pločica, USB kabel i računalo.



**Slika 3.1.** Kontrolna pločica

Kontrolna pločica na sebi ima: utor za USB kabel, utor za napajanje, pozitivnu i negativnu stezaljku te razne elektroničke sklopove.

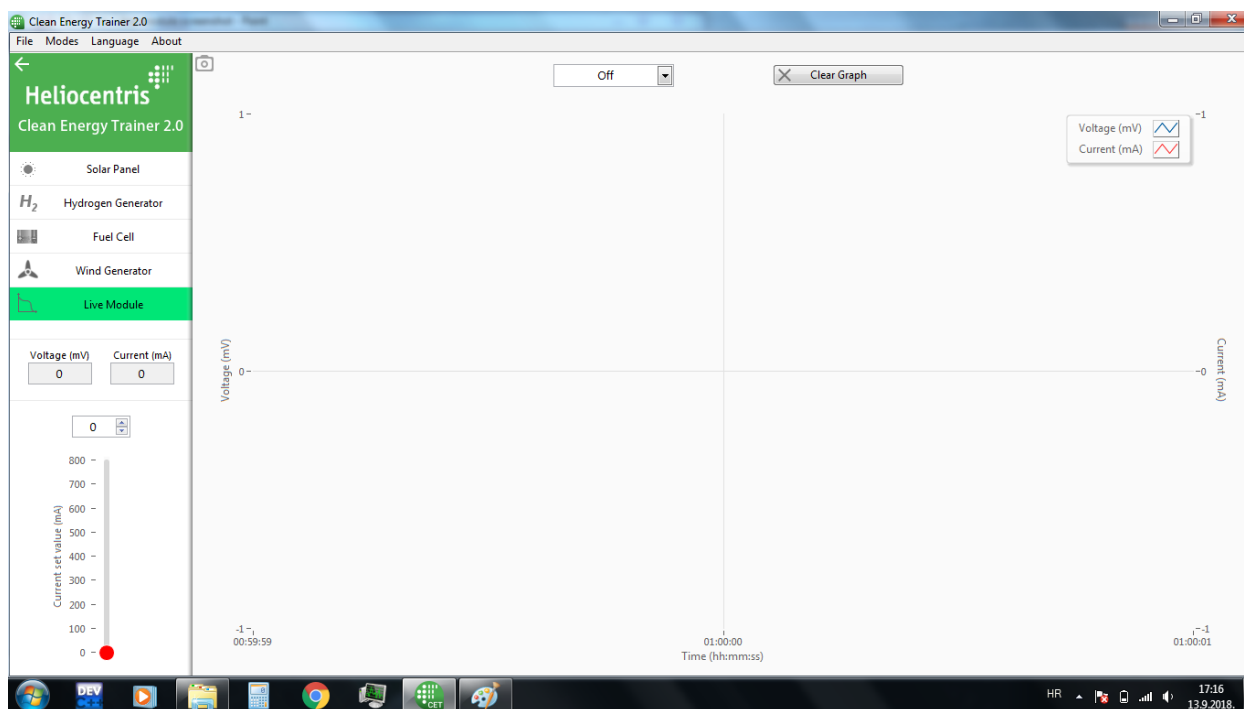


**Slika 3.2.** Vjetrogenerator

Dijelovi vjetrogeneratora su: stalak, elise, pričvrsnica za elise, istosmjerni generator, mehanizam za prijenos i promjenu brzine rotacije te kućište generatora i mehanizma (tzv. *gondola*)

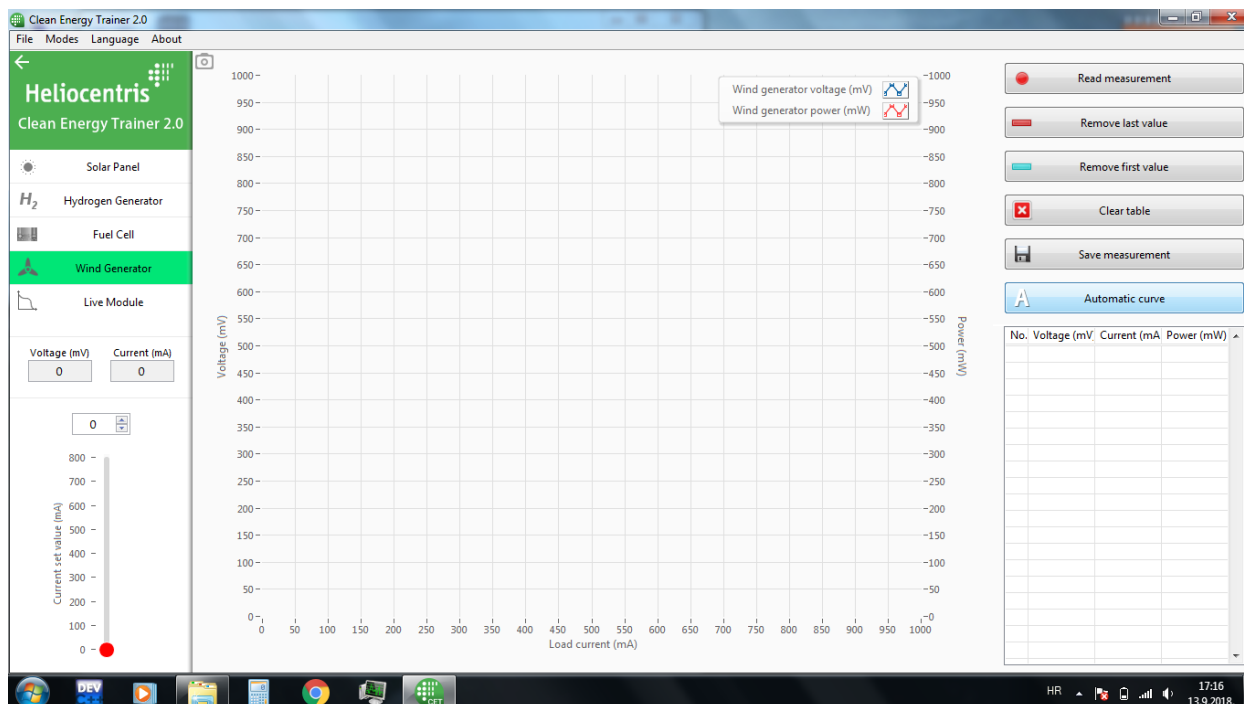
U sklopu izvođenja eksperimenata vezanih uz završni rad koristio sam se programskim paketom Clean Energy Trainer tvrtke Heliocentris. Nakon instalacije pokrenemo program te pričekamo da se poveže s kontrolnom pločom. Nakon povezivanja potrebno je kalibrirati sustav te možemo odabrati jedan od dva načina rada.

Prvi od ta dva prikazan je na slici 3.1. U ovom režimu rada prikazan nam je iznos napona na stezaljkama generatora u stvarnom vremenu. Na taj način možemo promatrati kako promjenjivi vanjski čimbenici utječu na napon u određenom trenutku.



Slika 3.3. Live Module način rada

Drugi način rada funkcioniра tako da unesemo željeni napon ili struju, a kontrolna ploča stvori uvjete za mjerenje druge veličine tako što će prilagoditi opterećenje generatora. Mjerenja se mogu obaviti i automatski tako da u određenim koracima kontrolna ploča mijenja iznos promjenjivog otpora i snima iznose napona, struje i snage te na osnovu mjerenja crta graf ovisnosti napona i snage o struji, a sve vrijednosti pohranjuje u tablicu i time su spremni za daljnju obradu ako je potrebno. Prilikom takvog načina mjerenja iznos struje se povećava do vrijednosti kada se elise gotovo zaustave.

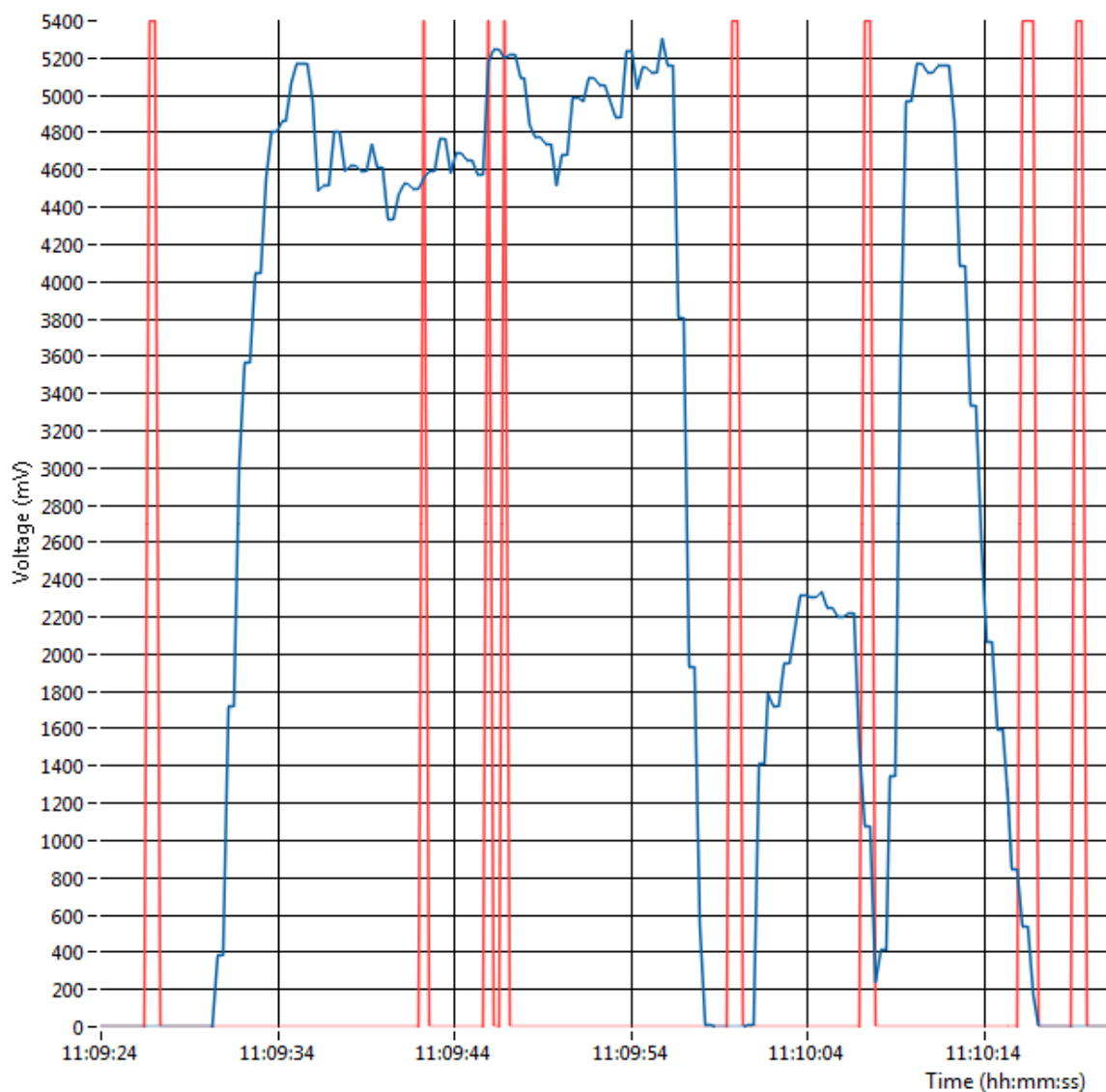


Slika 3.4. Izgled sučelja za mjerenje i snimanje karakteristika

## 4. EKSPERIMENTI

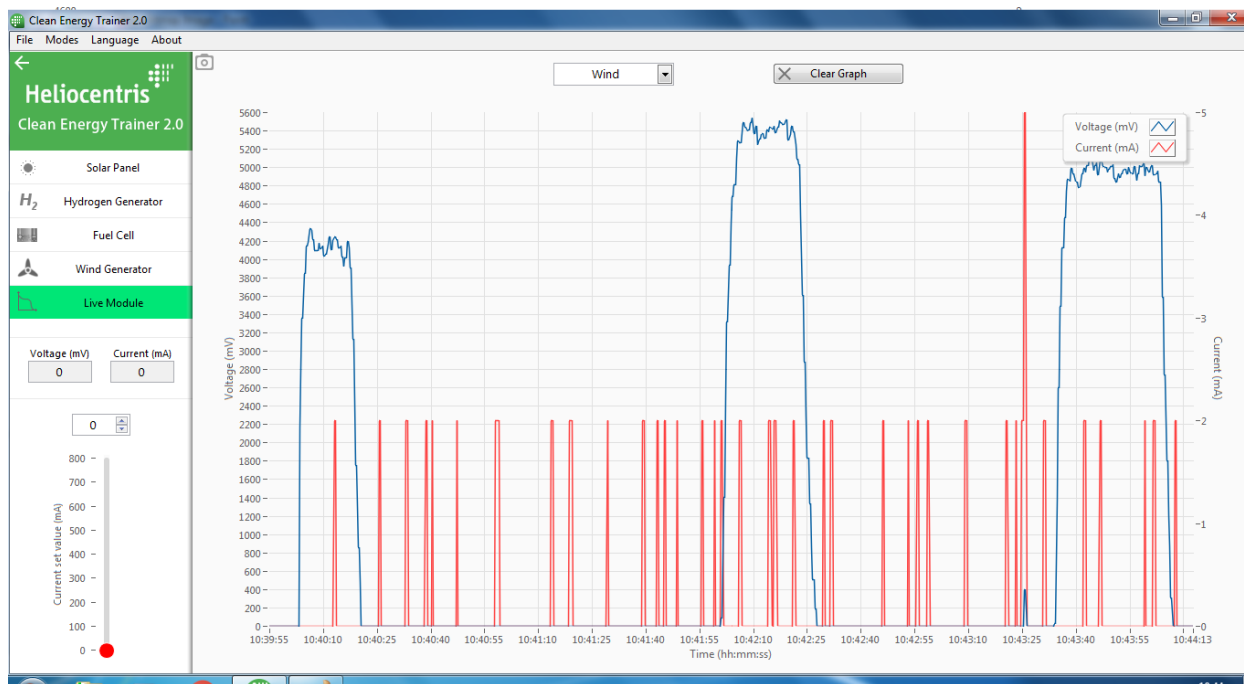
U eksperimentima je korištena oprema navedena u prethodnom poglavlju, izvode se tako da nam ventilator simulira različite uvjete, odnosno, brzine vjetra. Pri tome promatramo kakav utjecaj na razvijeni napon i snagu na stezaljkama generatora imaju broj elisa, snaga vjetra, kut elisa u odnosu na vodoravnu os te opterećenje generatora.

### 4.1. Live module način snimanja



**Slika 4.1.** Napon na stezaljkama generatora uz ometanje toka vjetra

Na ovoj slici vidimo u kojoj mjeri veličina objekta koji se nalazi ispred rotora utječe na napon generiran na stezaljkama generatora. Ometanje protoka većim objektima rezultira manjim generiranim naponom u određenim trenutcima. U ovom eksperimentu udaljenost između ventilatora i elisa iznosi 30 cm, korišteno je 6 elisa pod kutem  $45^\circ$  prema osovini.

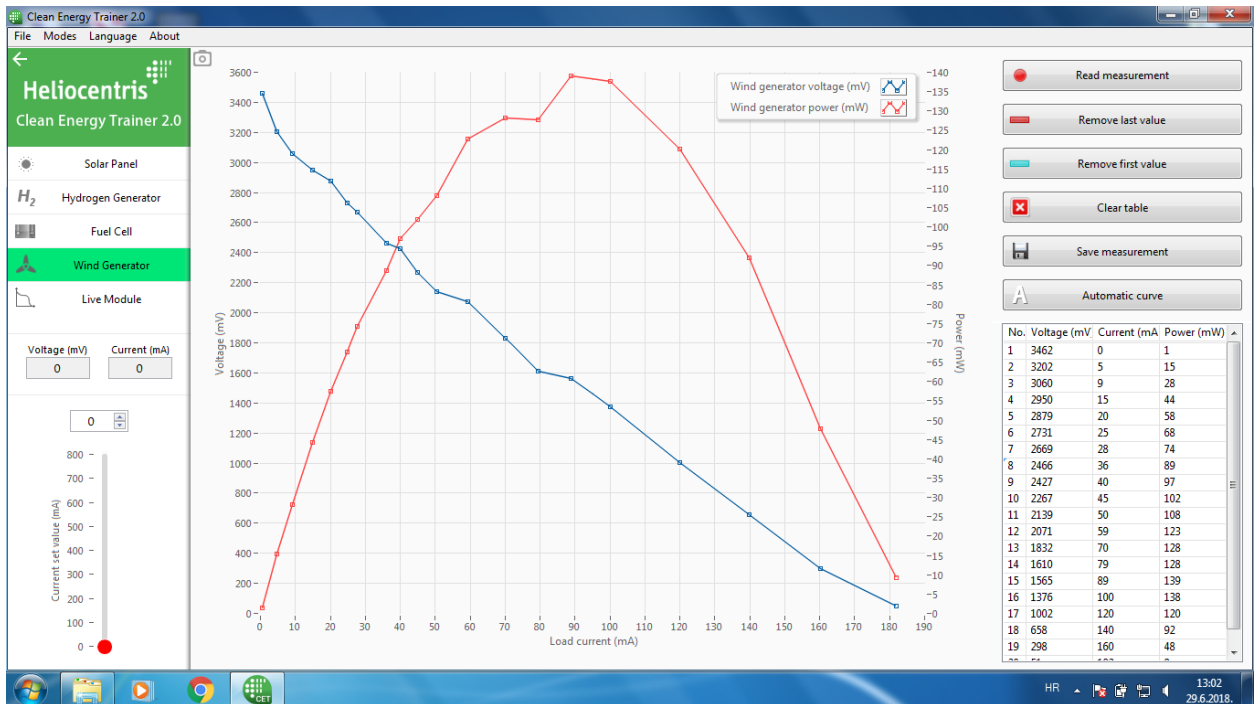


**Slika 4.2.** Ovisnost broja elisa o generiranom naponu

Za ovaj dio eksperimenta je također korišten live module način rada kako bi na jednom mjestu imali prikazane približne prosječne vrijednosti napona za slučaj kada 3, 6 i 4 elise pokreću generator pri jednakoj snazi vjetra i jednakom kutu u odnosu na vodoravnu os. Udaljenost između ventilatora i elisa je 30 cm, kut elisa prema osovini iznosi  $45^\circ$ , a snaga vjetra ventilatora je 2.

#### 4.2. Snimanje strujno-naponskih karakteristika pri različitim opterećenjima

U ovom režimu rada snimaju se strujno-naponske karakteristike uz automatski promjenjivi otpor ugrađen u tiskanu pločicu pomoću koje računalo komunicira s generatorom. Prilikom izođenja svakog eksperimenta udaljenost između ventilatora i lopatica iznosi 30 cm, a elise se umeću u predviđena ležišta tako da im kut između susjednih lopatica bude jednak te da svaka pojedina lopatica bude nagnuta pod istim kutom. Nakon što postavimo opremu prema određenim zahtjevima, odabiremo opciju "Automatic curve" te pričekamo dok program ne završi ciklus mjerenja nakon kojeg će se elise okretati maksimalnom brzinom jer generator više neće biti opterećen. Otpor opterećenja se mijenja u približno jednakim skokovima tako da se proporcionalno otporu mijenja jakost struje potrebne za prolazak kroz trošilo. Na taj se način automatski izračunava snaga za pojedine vrijednosti struje i napona. Nakon toga odabiremo opciju "Save measurement". Isto tako, cilj eksperimenta je utvrditi optimalan kut i broj elisa pri kojima se razvija najveća snaga te utjecaj brzine vjetra na snagu.



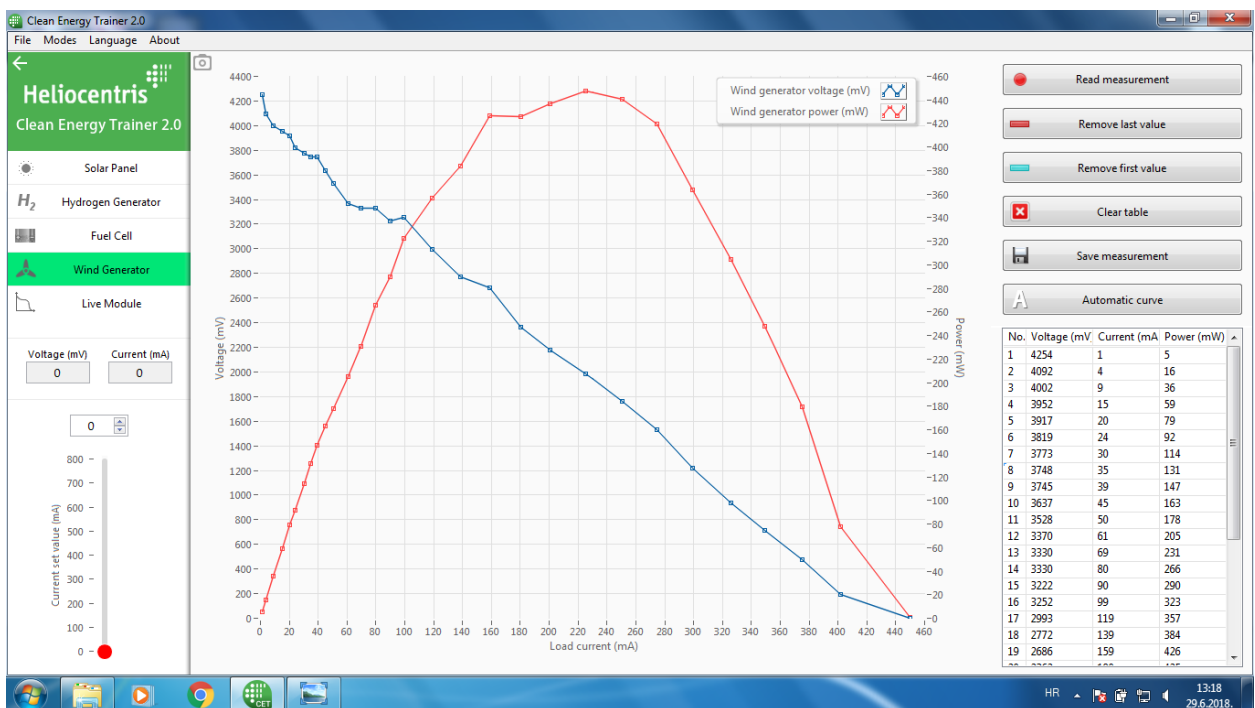
Slika 4.3. 3 lopatice, 30° prema osovini, snaga vjetra ventilatora 2



Slika 4.4. 3 lopatice, 45° prema osovini, snaga vjetra ventilatora 2



Slika 4.5. 3 lopatice, 60° prema osovini, snaga vjetro ventilatora 2

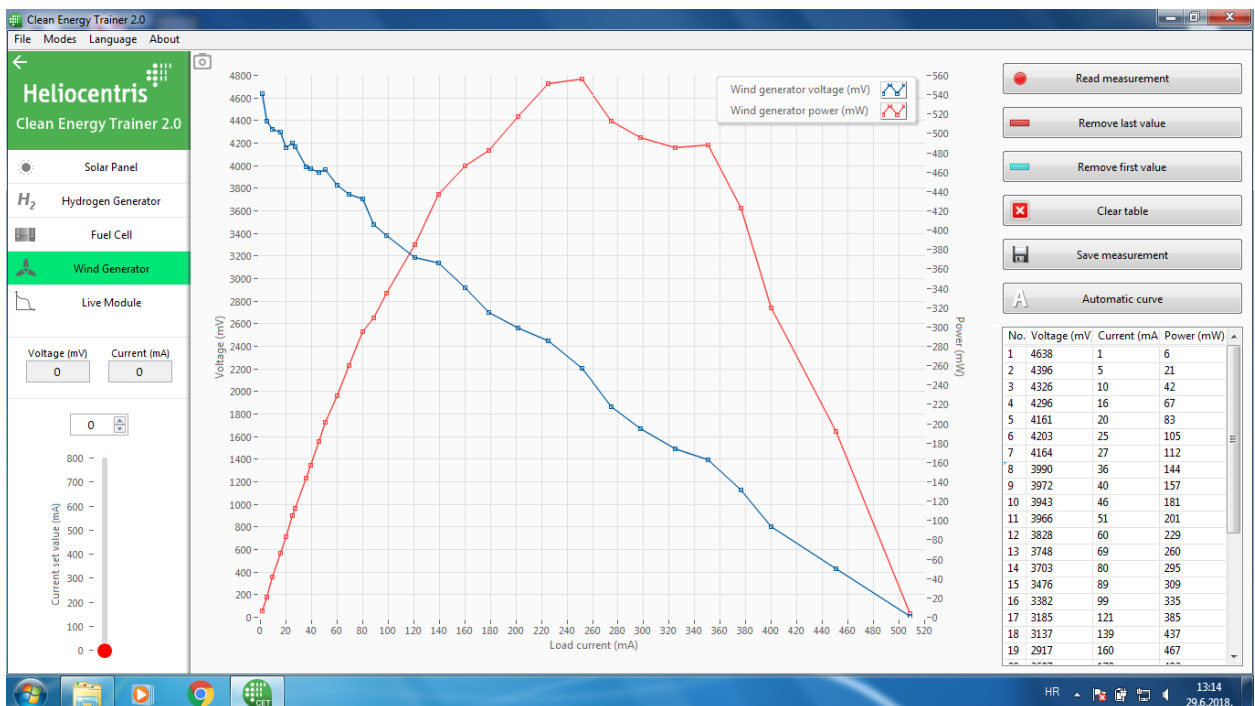


Slika 4.6. 6 lopatica, 30° prema osovini, snaga vjetro ventilatora 2

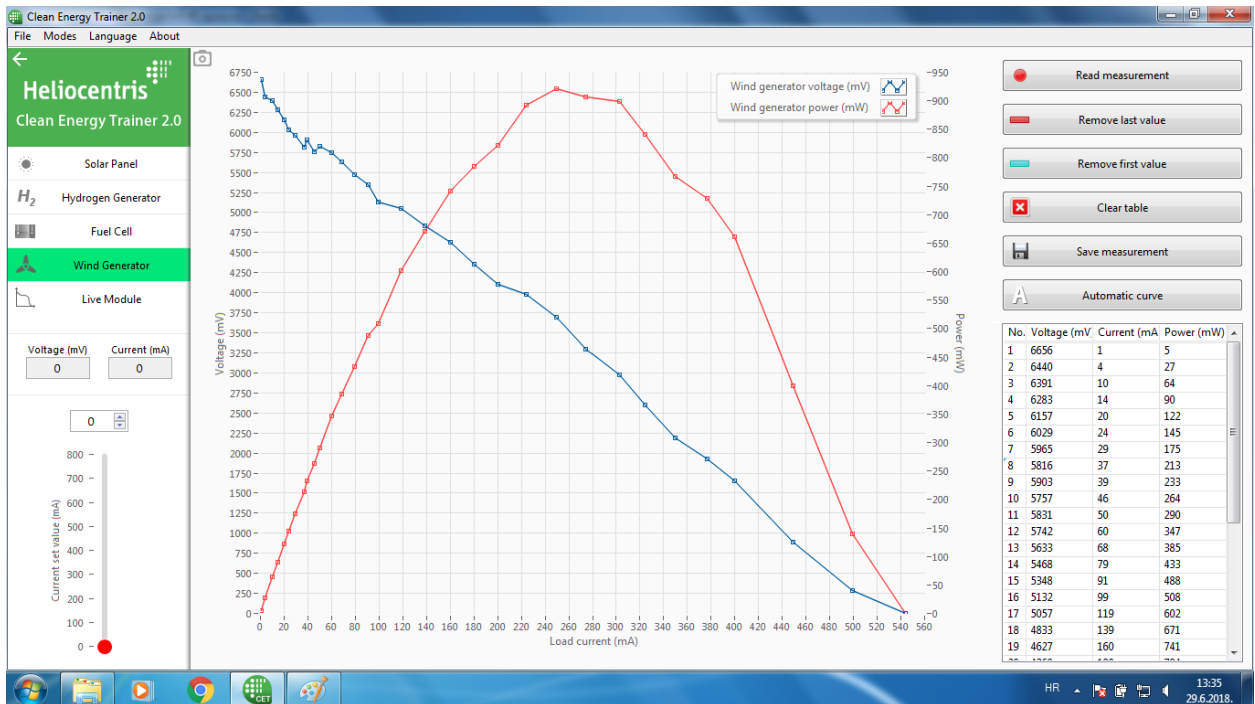




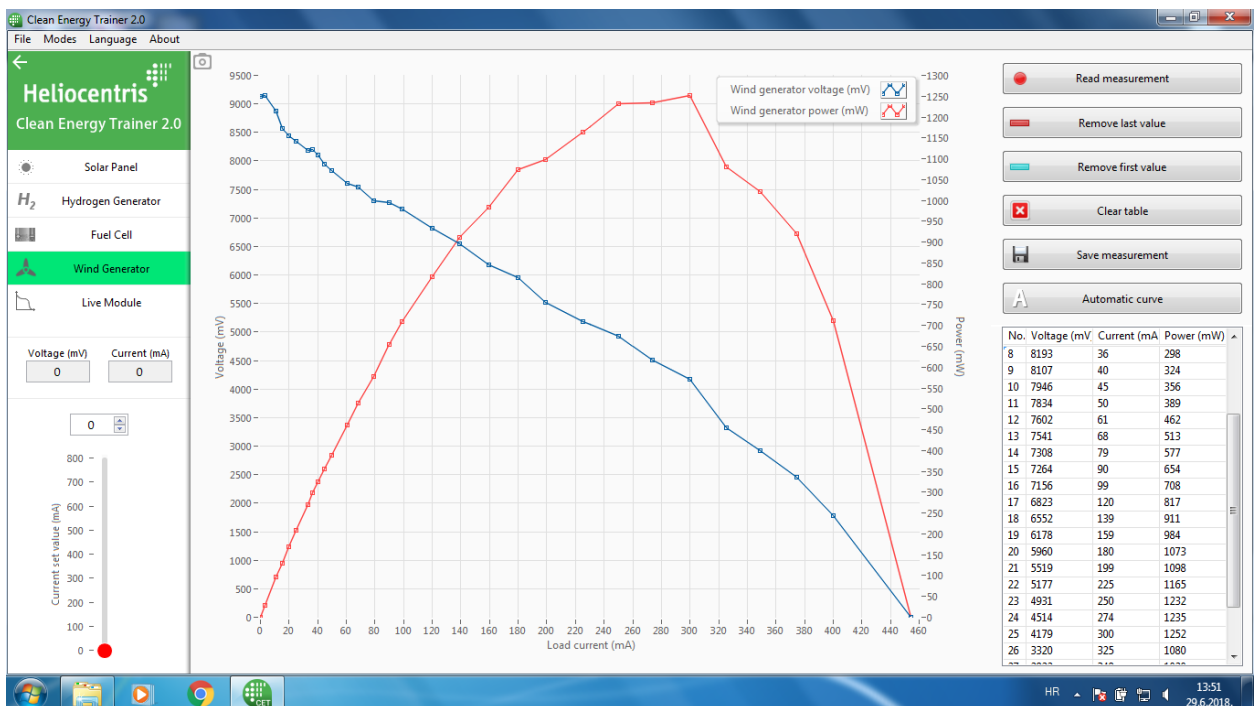
Slika 4.7. 6 lopatica, 60° prema osovini, snaga vjetra ventilatora 2



Slika 4.8. 6 lopatica, 30° prema osovini, snaga vjetra ventilatora 3



Slika 4.9. 6 lopatica, 45° prema osovini, snaga vjetra ventilatora 3



Slika 4.10. 6 lopatica, 60° prema osovini, snaga vjetra ventilatora 3

## 5. OBRADA PODATAKA

U pokusima koji su vezani za live module način rada programa bitno je samo primijetiti da je napon praznog hoda generatora

**Tablica 5.1.** Ovisnost broja lopatica o srednjoj vrijednosti napona praznog hoda

Broj lopatica	3	6	4
Srednja vrijednost napona (mV)	4100	5400	4900

**Tablica 5.2.** 3 lopatice, snaga vjetra ventilatora 2

30°				45°				60°			
No.	Napon (mV)	Struja (mA)	Snaga (mW)	No.	Napon (mV)	Struja (mA)	Snaga (mW)	No.	Napon (mV)	Struja (mA)	Snaga (mW)
1	3462	0	1	1	4355	0	0	1	6382	0	0
2	3202	5	15	2	4160	5	21	2	6268	5	30
3	3060	9	28	3	4034	9	37	3	5808	10	57
4	2950	15	44	4	3802	16	59	4	5619	16	87
5	2879	20	58	5	3566	20	71	5	5288	21	112
6	2731	25	68	6	3540	24	85	6	4868	25	121
7	2669	28	74	7	3461	28	96	7	4486	27	120
8	2466	36	89	8	3274	36	117	8	4365	34	149
9	2427	40	97	9	3141	40	125	9	3964	39	154
10	2267	45	102	10	3014	46	139	10	3819	44	169
11	2139	50	108	11	2814	50	142	11	3501	50	175
12	2071	59	123	12	2650	59	156	12	3050	61	185
13	1832	70	128	13	2464	71	175	13	2284	71	162
14	1610	79	128	14	1926	79	153	14	1807	80	144
15	1565	89	139	15	1989	90	179	15	1413	90	127
16	1376	100	138	16	1663	99	165	16	840	99	83
17	1002	120	120	17	1214	120	146	17	282	120	34
18	658	140	92	18	832	139	115	18	12	138	2
19	298	160	48	19	521	159	83				
20	51	182	9	20	97	180	17				
				21	8	201	2				
Maks.	3462	182	139	Maks.	4355	201	179	Maks.	6382	138	185

Tablica 5.3. 6 lopatica, snaga vjetra ventilatora 2

30°				45°				60°			
No.	Napon (mV)	Struja (mA)	Snaga (mW)	No.	Napon (mV)	Struja (mA)	Snaga (mW)	No.	Napon (mV)	Struja (mA)	Snaga (mW)
1	4290	0	0	1	6156	0	0	1	8656	0	0
2	4233	5	20	2	5956	4	24	2	8346	5	42
3	3960	10	40	3	5780	10	58	3	8241	9	74
4	3986	15	61	4	5740	15	85	4	8139	16	126
5	3966	21	83	5	5744	19	108	5	8002	20	160
6	3939	24	95	6	5691	24	137	6	7900	25	196
7	3806	29	109	7	5484	29	160	7	7702	28	213
8	3691	35	128	8	5473	33	182	8	7646	35	268
9	3593	40	144	9	5296	40	212	9	7530	39	295
10	3622	44	160	10	5150	44	228	10	7441	43	321
11	3548	49	175	11	5135	50	256	11	7398	50	374
12	3462	59	205	12	5136	59	303	12	7237	59	427
13	3443	70	241	13	5025	71	356	13	6994	70	491
14	3284	80	263	14	4971	80	398	14	6946	79	552
15	3227	89	287	15	4778	90	430	15	6623	90	596
16	3083	100	309	16	4692	99	466	16	6621	99	654
17	2880	119	344	17	4490	120	541	17	6380	120	769
18	2743	140	383	18	4284	140	598	18	6037	141	850
19	2545	159	405	19	4077	159	648	19	5830	161	939
20	2248	180	404	20	3885	180	699	20	5725	179	1027
21	2135	201	429	21	3646	200	729	21	5153	201	1035
22	1919	225	432	22	3169	226	715	22	4684	226	1059
23	1670	251	420	23	2921	251	732	23	4262	250	1066
24	1520	274	416	24	2532	276	698	24	3828	275	1051
25	1228	299	367	25	2306	301	693	25	2886	299	863
26	895	327	292	26	1889	325	614	26	2550	326	831
27	618	350	217	27	1449	348	505	27	1781	349	622
28	376	373	140	28	983	375	368	28	722	375	271
29	225	401	90	29	576	400	230	29	2	398	1
30	1	451	0	30	13	452	6				
Maks.	4290	451	432	Maks.	6156	452	732	Maks.	8656	398	1066

**Tablica 5.4.** 6 lopatica, snaga vjetra ventilatora 3

30°				45°				60°			
No.	Napon (mV)	Struja (mA)	Snaga (mW)	No.	Napon (mV)	Struja (mA)	Snaga (mW)	No.	Napon (mV)	Struja (mA)	Snaga (mW)
1	4638	1	6	1	6656	1	5	1	9135	0	0
2	4396	5	21	2	6440	4	27	2	9147	3	29
3	4326	10	42	3	6391	10	64	3	8878	11	96
4	4296	16	67	4	6283	14	90	4	8571	15	129
5	4161	20	83	5	6157	20	122	5	8439	20	169
6	4203	25	105	6	6029	24	145	6	8347	25	209
7	4164	27	112	7	5965	29	175	7	8183	33	270
8	3990	36	144	8	5816	37	213	8	8193	36	298
9	3972	40	157	9	5903	39	233	9	8107	40	324
10	3943	46	181	10	5757	46	264	10	7946	45	356
11	3966	51	201	11	5831	50	290	11	7834	50	389
12	3828	60	229	12	5742	60	347	12	7602	61	462
13	3748	69	260	13	5633	68	385	13	7541	68	513
14	3703	80	295	14	5468	79	433	14	7308	79	577
15	3476	89	309	15	5348	91	488	15	7264	90	654
16	3382	99	335	16	5132	99	508	16	7156	99	708
17	3185	121	385	17	5057	119	602	17	6823	120	817
18	3137	139	437	18	4833	139	671	18	6552	139	911
19	2917	160	467	19	4627	160	741	19	6178	159	984
20	2697	179	482	20	4360	180	784	20	5960	180	1073
21	2559	202	517	21	4104	200	822	21	5519	199	1098
22	2448	225	551	22	3980	224	891	22	5177	225	1165
23	2209	252	557	23	3694	249	921	23	4931	250	1232
24	1866	275	513	24	3300	275	906	24	4514	274	1235
25	1669	297	496	25	2974	302	899	25	4179	300	1252
26	1493	325	485	26	2597	324	841	26	3320	325	1080
27	1394	350	488	27	2191	350	767	27	2922	349	1020
28	1124	376	423	28	1932	377	728	28	2459	374	920
29	799	400	320	29	1654	400	661	29	1778	400	712
30	427	451	192	30	890	449	400	30	1	454	1
31	7	508	3	31	281	499	140				
				32	1	544	1				
Maks.	4638	508	557	Maks.	6656	544	921	Maks.	9147	454	1252

U ovim pokusima nije potrebno dodatno obrađivati podatke jer program to čini za nas, prema tablicama 5.2., 5.3. i 5.4. možemo uočiti koja je maksimalna dobivena snaga za svaki od slučajeva te uvjete pri kojima je izmjerena. Kada bismo imali mogućnost izmjeriti brzinu vjetra mogli bismo usporediti maksimalnu snagu vjetra sa snagama koje smo dobili kao rezultat mjerenja struje i napona generatora te izračunati kolika je efikasnost ovog modela vjetrogeneratora.

## 6. ZAKLJUČAK

Za shvaćanje ovog eksperimenta potrebno je razumjeti koncept mehanike fluida te biti u stanju vizualno predočiti strujanje zraka u prirodi te, na sličan način, i ovaj u laboratorijskim uvjetima.

U pokusima opterećenja generatora moguće je pratiti iznos napona vjetrogeneratora, iznos struje koju zahtijeva opterećenje te snagu vjetrogeneratora. Pri tome je bitno napomenuti da su ovo uvjeti kakvi vladaju u laboratoriju te kao takvi imaju mnoga odstupanja od onih prilika kakvi su u vjetroelektranama. Primjerice, vjetar je u eksperimentima postignut uporabom ventilatora što nam daje konstantnu snagu i brzinu vjetra, ali unosi nepotrebno vrtloženje, a time i odstupanje od naravi prirodnog vjetra. Isto tako, elise su u našem slučaju potpuno ravne i jednostavnog dizajna dok su elise vjetrenjača u elektranama zakrivljene i aerodinamične kako bi maksimalna iskoristivost snage vjetra bila što bliže teorijskoj. Eksperimenti koji su izvedeni prilično su jednostavno koncipirani i objašnjeni kako bi se razumjeli benefiti koji se mogu iskoristiti u stvarnosti, a isto tako i slučajevi kada je neki od uvjeta nepogodan za eksploataciju snage vjetra za dobivanje električne energije.

Nadalje, unatoč očekivanoj manjoj snazi prilikom povećanja broja lopatica (zbog povećanja mase, a time i tromosti rotora) razvijena snaga je najveća pri najvećem broju lopatica. Razlog tomu je što je masa lopatica relativno mala pa ne utječe u tolikoj mjeri na inerciju rotora, a ukupna površina koju zauzimaju lopatice je duplo veća pa vjetar ima manje prostora na kojemu ne djeluje u svakom trenutku  $dt$ . Snaga, uspoređujući slične uvjete u tablicama 5.2. i 5.3., nije razmjerno veća zbog toga što pri većim snagama generator radi bliže svojoj nazivnoj radnoj točki i tada mu je koeficijent iskoristivosti veći.

Za potpunije shvaćanje matematičko fizikalnih relacija koje opisuju gibanje vjetra potrebno je prilikom izvođenja pokusa znati točnu brzinu umjetno stvorenog vjetra. Na taj način možemo doći do preciznijih proračuna vezanih uz maksimalnu iskoristivost snage vjetra. Ako je moguće, preporučuje se i korištenje lopatica koje izgledaju približno slične onima u vjetroelektranama kako bi bilo moguće postići veću snagu i iskoristivost bliže maksimalnoj teorijskoj.

## LITERATURA

[1] Physical geography, edukacijski internetski portal o fizičkoj geografiji (19.9.2018.)

<http://www.physicalgeography.net/fundamentals/7n.html>

[2] Lj, Majdandžić, Obnovljivi izvori energije, Graphis, Zagreb, 2008.

[3] Clean energy trainer, upute za korištenje i priručnik za eksperimente, Heliocentris, Berlin, 2006.

<http://heliocentrisacademia.com/portfolio-item/clean-energy-trainer/>

[4] Asia Renewable Energy Corporation (19.9.2018.)

<http://renergy.vn/514/Parts-of-Wind-Turbine/>

**ŽIVOTOPIS**

MATEJ POLJAREVIĆ

Rođen je 15. rujna 1996. godine u Osijeku, a odrastao je i živi u mjestu Punitovci. Prva četiri razreda osnovne škole pohađao je u mjestu Punitovci, a preostala četiri u mjestu Josipovac Punitovački. Osnovnu školu završava 2011. godine, a svih osam razreda završio je s odličnim uspjehom. Nakon što je završio osnovnu školu, upisuje se u I. Gimnaziju Osijek u Osijeku, koju završava 2015. godine s vrlo dobrim uspjehom. Tijekom školovanja svake je godine sudjelovao na natjecanjima iz matematike.

Nakon završene srednje škole upisuje preddiplomski sveučilišni studij elektrotehnike, smjer elektroenergetika na Elektrotehničkom fakultetu u Osijeku. Nakon završetka studija cilj mu je upisati i završiti diplomski studij, a potom i poslijediplomski doktorski studij te se zaposliti u području svoje struke.



**SAŽETAK**

U završnom radu opisan je princip nastanka vjetra, matematički model gibanja vjetra i način dobivanja električne energije. Objasnjena je funkcija dijelova jedne vjetroturbine i način pretvorbe kinetičke energije vjetra u mehaničku energiju na osovini i pretvorba mehaničke u električnu energiju pomoću generatora. Prikazano je sučelje programskog paketa Clean Energy Trainer 2.0 te oprema za izvođenje eksperimenata koja dolazi uz taj programski paket. Na primjeru nekoliko eksperimenata prikazana su 2 režima rada koji su na raspolaganju. U live module načinu rada promatra se napon praznog hoda generatora u stvarnom vremenu u ovisnosti o prilikama u kojima se nalazi vjetroturbina i način na koji su postavljene lopatice. U režimu rada za snimanje karakteristike opterećenja generatora cilj je snimiti karakterističnu krivulju ovisnosti napona o struji i krivulju ovisnosti snage o struji pri promjenjivom opterećenju. Pri tome se razvija maksimalna snaga pri najvećoj brzini, odnosno snazi vjetra, kutu od 60° lopatica prema osovini i 6 lopatica pričvršćenih za osovinu koja iznosi 1252 mW.

Ključne riječi: vjetar, vjetroturbina, osovina, snaga, napon, struja, clean energy trainer 2.0, karakteristike opterećenja, generator, brzina

**ABSTRACT**

In this final work, principles of wind creation, a mathematical model of wind movement and the procedure of generating electric energy are described. Parts of the wind turbine and a method of conversion of wind's kinetic energy to mechanical energy on the shaft and afterward into electric energy using a generator are explained. The interface of a software package called Clean Energy Trainer 2.0 and its respective equipment for performing experiments are presented. As demonstrated by a few experiments, two modes are available to use. In live module mode, open-circuit voltage is measured in real-time depending on circumstances in which wind turbine works and the way of blades are set. In wind generator mode Automatic characteristic curve option is used for recoding voltage-current graph and power-current graph at . During that process, the maximum power of 1252 mW is developed at maximum wind speed,  $60^\circ$  between blades and axle and 6 blades attached to the shaft.

Key words: wind, wind turbine, shaft, power, voltage, current, live module, clean energy trainer 2.0, wind speed, blades, characteristic curve

## POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I SIMBOLA

Tablica

Oznaka ili simbol	Naziv	Mjerna jedinica
E	energija	J
v	brzina	m/s
m	masa	kg
A	površina	m <sup>2</sup>
$\rho$	gustoća	kg/m <sup>3</sup>
V	volumen	m <sup>3</sup>
U	napon	V
I	struja	A
P	snaga	W
P <sub>0</sub>	snaga rotora turbine	W
P <sub>1</sub>	snaga vjetra prije prolaska kroz turbinu	W
P <sub>2</sub>	snaga vjetra nakon prolaska kroz turbinu	W
P <sub>M</sub>	Maksimalna snaga vjetra	W
c <sub>p</sub>	Betzov koeficijent	/
$\eta_{\max,zt}$	maksimalna iskoristivost zračne turbine	/
$\eta_{\max,g}$	maksimalna iskoristivost generatora	/