

# Laboratorijski set za ispitivanje energije vetra

Aleksandra Grujić  
Nove energetske tehnologije  
Visoka škola elektrotehnike i računarstva  
Beograd, Srbija  
[aleksandra.grujic@viser.edu.rs](mailto:aleksandra.grujic@viser.edu.rs)

Milan Ivezić  
Nove energetske tehnologije  
Visoka škola elektrotehnike i računarstva  
Beograd, Srbija  
[milan.ivezic@viser.edu.rs](mailto:milan.ivezic@viser.edu.rs)

Nikola Velenderić  
Služba za održavanje TENT A  
Pro-Tent  
Beograd, Srbija  
[nikola.velenderic@gmail.com](mailto:nikola.velenderic@gmail.com)

Saša Vrtunić  
Služba za železnički transport TENT A  
Pro-Tent  
Beograd, Srbija  
[vrtunic@gmail.com](mailto:VRTUNIC@gmail.com)

**Sadržaj**— Osnovni zadatak rada je da prikaže neke od rezultata koji su dobijeni u laboratoriji koja je formirana za potrebe predmeta *Obnovljivi izvori energije*, a koji se izvodi na Visokoj školi elektrotehnike i računarstva u Beogradu. Dat je prikaz elemenata koji čine laboratoriju i princip rada. U radu su merene strujna i karakteristika snage vetrogeneratora tipa TPW 200W i upoređivane sa tabličnim vrednostima u cilju provere ispravnosti specijalnog elektronskog sklopa, merno-akvizicione elektronike, koja se koristi za akviziciju podataka, namenski napravljene za potrebe laboratorije. Cilj formiranja laboratorije je upoznavanje studenata sa osnovnim veličinama karakterističnim za dobijanje električne energije iz energije sunca i vetra.

**Ključne reči**- *vetrogenerator; laboratorija; merno-akviziciona elektronika*

## I. UVOD

Osnovni zadatak ovog rada je da objedini teorijska i praktična znanja iz oblasti vetroenergetike. Laboratorijske vežbe namenjene su proučavanju problematike vezane za proizvodnju električne energije iz energije vetra i energije Sunca, efikasno skladištenje i korišćenje energije, upotrebu softverskih alata vezanih za problematiku obnovljivih izvora. U radu su opisani konstrukcijski delovi laboratorije i princip rada. Detaljnije je analiziran vetrogenerator (VG) tipa TPW 200W u smislu ispitivanja njegovih karakteristika u laboratorijskim uslovima. Prikazana je analiza dobijenih rezultata.

Osnovna namena laboratorije je da omogućiti održavanje laboratorijskih vežbi iz predmeta *Obnovljivi izvori energije (OIE)*, sa akcentom na fotonaponske i vetro tehnologije. Imajući ovo u vidu laboratorija u svom sastavu ima dva sistema:

1) *Solarni sistem na naponskom nivou od 12V jednosmerno*

2) *Vetro sistem na naponskom nivou od 24V jednosmerno*

Bitno je napomenuti da su ova dva sistema, zbog različitih naponskih nivoa kao i zbog karakteristika i morfologije laboratorijskih vežbi međusobno isključujući, odnosno nije projektovana mogućnost hibridnog rada. Ovaj rad je fokusiran na ispitivanje vetrogeneratora i tretira samo vetro sistem laboratorije.

## II. GLAVNI DELOVI LABORATORIJE

Prvi zadatak vetro sistema je da omogućiti prikaz kompletnog sistema proizvodnje, skladištenja i potrošnje električne energije proizvedene iz energije vetra. Drugi zadatak je da omogućiti ispitivanje karakteristika samog vetrogeneratora u punom obimu izuzimajući ispitivanja njegove aerodinamike. U skladu sa tim vetro sistem laboratorije poseduje dva modula (dva režima rada), a osnovni elementi celog sistema su:

- a) *Vetrogenerator TPW 200W 24V*
- b) *Regulator punjenja baterija*
- c) *Dve baterije AGM 12V 35Ah*
- d) *Trofazni AM snage 0,37kW*
- e) *Frekventni regulator*
- f) *Merno-regulaciona i upravljačka elektronika*
- g) *Invertor 12V/220V*
- h) *Server*
- i) *Potrošači*

Iako vetro sistem laboratorije podržava i merenja karakteristika vetrogeneratora nešto većih snaga, ovaj vetrogenerator je odabran i instaliran prvenstveno zbog njegovih dobrih karakteristika pri malim brzinama, niskom naponu koji generiše, malih dimenzija i nimalo komplikovanog instaliranja i puštanja u rad. Pošto je laboratorija prvenstveno namenjena studentima i održavanju laboratorijskih vežbi, vetrogenerator TPW 200W proizvođača Tyconpower, se pokazao kao odličan izbor.

Ovaj vetrogenerator karakterišu mala težina (< 10 kg), ali i velika robusnost kako bi izdržao jaka naprezanja prilikom najbržih vetrova. Posедуje 6 lopatica izrađenih od polipropilena ojačanog staklom, velike čvrstoće i otpornosti na ultravioletna zračenja i zamor materijala. Ovaj broj lopatica takođe obezbeđuje najbolje performanse pri vetrovima malih brzina i smanjuje vibracije pri velikom broju obrtaja. U tabeli I prikazane su osnovne karakteristike vetrogeneratora TPW 200W 24V.

TABELA I: OSNOVNE KARAKTERISTIKE VETROGENERATORA TPW 200W

KARAKTERISTIKA	TPW 200W 24V
Početa brzina vetra	2,1 m/s
Nominalna snaga	150 W pri 12,5 m/s
Maskimalna snaga	200W
Naponski nivo	24 V
Broj polova statorskog namotaja	36
Broj rotorskih magneta	10
Prečnik rotorskog diska	0,92 m
Maksimalna brzina rotora	500 – 550 ob/min
Broj lopatica	6
Materijal lopatica	Polipropilen ojačan staklom
Kućište	Galvanizovan liveni aluminijum
Zaštita od prekomerne brzine	Da
Maksimalna dozvoljena brzina vetra	35 m/s
Težina	8,5 Kg
Proizvodnja električne energije (mesečno)	17 kWh pri 5,4 m/s

U realnom sistemu napon vetrogeneratora je konstantan pošto je on direktno povezan sa regulatorom punjenja baterija koji generiše konstantan napon pri svom radu. Tako da je ova karakteristika zapravo najbitnija pri projektovanju.

Regulator punjenja baterija je elektronski sklop koji energiju jednog naponskog i strujnog nivoa koja dolazi sa vetrogeneratora pretvara u energiju drugog naponskog i strujnog nivoa podesnu za bezbedno punjenje baterija. Takođe preko njega se odvija i protok energije sa baterija prema potrošačima. U malim sistemima predstavlja neophodan i kritičan deo, jer u sebi sadrži električne zaštite i kontrolere toka energije.

Za potrebe akumulacije proizvedene energije i čuvanja za kasniju upotrebu u većini vetrosistema koriste se olovne gelirane baterije. U laboratoriji osim za tu upotrebu služe i kao pouzdani izvori stabilnog napona na koji se referišu većina merenja i vežbi. Važno je istaći da su ove baterije potpuno zatvorene i ne postoji nikakva mogućnost isticanja štetnih materija i kiselina kao što je to slučaj kada se koriste obične kisele baterije ili akumulatori.

U laboratoriji su u upotrebi dve baterije nazivnog kapaciteta od 35Ah (ukupno 70Ah) i naponskog nivoa od 12V, vezane u rednu vezu rade na naponu od 24V dok u paralelnoj vezi rade na naponskom nivou od 12V.

Trofazni asinhroni elektromotor nazivne snage od 370W se u laboratoriji koristi kao simulator brzine vetra. Osovina elektromotora je krutom vezom povezana sa osovinom vetrogeneratora i promenom broja obrtaja elektromotora automatski se menja i broj obrtaja vetrogeneratora.

Ovakav dizajn i izvedba motor-vetrogenerator grupe ima svojih prednosti, ali i mana. U prednosti spadaju veoma laka i jednostavna montaža i demontaža, jednostavno merenje broja obrtaja, jednostavna ekstrapolacija brzine vetra, manje rotirajućih delova i spojnica i veća sigurnost u radu.

Glavni nedostaci su povećano klizanje motora što sa sobom povlači povećanje struje rotora, smanjen obrtni moment na osovini, dodatno pregrevanje motora i potencijano smanjen radni vek. Takođe, zbog krute veze pojačane su radjalne vibracije motor-vetrogenerator grupe. Svi ovi nedostaci su u granicama podnošljivog zbog kratkog rada motor-vetrogenerator grupe na dnevnom nivou.

Kako bi se ovi nedostaci kompenzovali na elektromotor je ugrađen dodatni eksterni hladnjak, podnožje elektromotora je izrađeno od antivibracione gume i za upravljanje brojem obrtaja se koristi frekventni regulator sa mogućnošću podešavanja krive momenta i ograničenjem struje statora.

Frekventni regulatori se koriste za napajanje i kontinualnu regulaciju broja obrtaja standardnih trofaznih elektromotora. Obezbeđuju trofazni sistem izlaznih napona neophodan za pogon elektromotora primenom PWM tehnike. Promena brzine elektromotora se reguliše promenom učestanosti trofaznih napona koji se dovode na stator. Istovremeno vrši se promena napona tako da moment motora ostaje nepromenjen.

Merenje svih fizičkih veličina (napona, struje, temperature, broja obrtaja, itd..) se vrši pomoću specijalnog elektronskog sklopa, namenski napravljenog za potrebe laboratorije. Sam elektronski sklop se sastoji iz tri modula:

- 1) Merni modul
- 2) Komunikaciono-upravljački modul
- 3) Regulacioni modul

Merni modul vrši direktna merenja svih električnih veličina:

- Naponi direktno na izvodima vetrogeneratora i solarnog modula
- Napon celokupnog sistema na 12 i 24V
- Naizmenični napon koji obezbeđuje inverter
- Struje direktno na izvodima vetrogeneratora i solarnog modula
- Struje punjenja baterija u kolu regulatora punjenja (vetro i solar sistem)
- Jednosmernu struju koju potrošači crpe iz baterija
- Naizmeničnu struju u kolu invertora

Takođe posredstvom svojih periferija (sonde, fotootpornika, itd..) merni modul vrši i merenja:

- Broja obrtaja motogenerator grupe
- Osvetljaja solarnog modula
- Temperature
- Aktivne i reaktivne energije koju sistem proizvodi

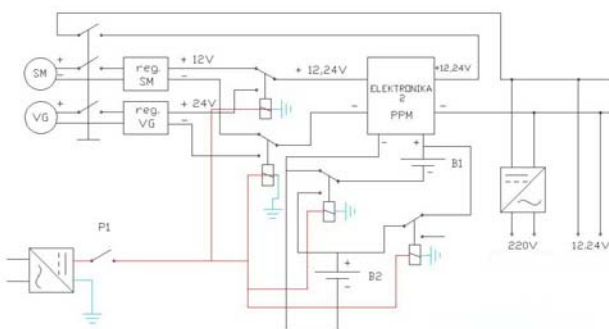
Osim merenja modul vrši i formatiranje rezultata u računarski čitljive podatke.

Osnovne funkcije ovog modula su: upravljanje i kontrola procesa i celokupnog sklopa; prenaponska i podnaponska, prekostrujna i zaštita od kratkog spoja; alarmi i automatsko gašenje određenog podmodula ako dođe do kritičnih slučajeva; serijska komunikacija i slanje podataka prema serveru.

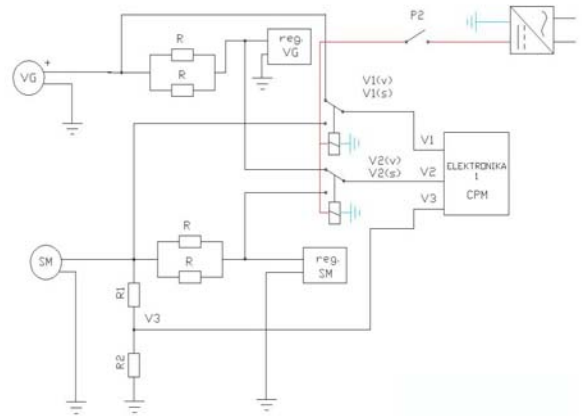
Kako se laboratorija sastoji iz dva odvojena sistema (vetro i solar) koji operišu na različitim naponskim nivoima, postoji potreba za jasnim razgraničenjem između ta dva sistema, kako operativnim tako i električnim.

U tu svrhu isprojektovan je regulacioni modul sa sledećim funkcijama:

- Prebacivanje celokupne laboratorije sa naponskog nivoa od 12V na naponski nivo od 24V i obrnuto (slika 1)
- Pružanje interfejsa za direktno ispitivanje vetrogeneratora i solarnog modula (slika 2)
- Galvansko odvajanje oba sistema



Slika 1. Regulacioni modul: prebacivanje naponskih nivoa



Slika 2. Regulacioni modul: šantiranje sistema

Inverter je nezaobilazan deo velike većine vetro i solarnih sistema. U laboratorijskom sistemu obezbeđuje energiju za naizmenične potrošače direktno sa baterija kao i merenja naizmeničnih veličina. Tipičan stepen korisnog dejstva kod većine invertora je iznad 97% tako da ne unose veliko smanjenje stepena korisnog dejstva u ceo sistem prilikom konverzije energije vetra u električnu energiju.

Uloga servera u laboratorijskom sistemu je konačna obrada izmerenih veličina, njihovo prikazivanje u čitljivoj formi i pružanje funkcionalnog radnog okruženja. Uz to, radno okruženje je u vidu veb stranice postavljeno na lokalnu mrežu laboratorije i može mu se pristupiti sa bilo kog računara u okviru lab mreže, što omogućava rad veće grupe studenata istovremeno. Lokalna mreža laboratorije sadrži 10 računara na kojima je studentima omogućeno da analiziraju dobijene podatke.

Operativni sistem instaliran na serveru je Linux CentOS 6.2 64-bit. Odabran je zbog njegove pouzdanosti i sigurnosti u radu kao i zbog *Open Source* arhitekture, što pruža mnogo više mogućnosti u programiranju i dizajniranju softvera za unikatne potrebe kakve su potrebe laboratorije.

Podaci se sa komunikaciono-upravljačkog modula elektronike posredstvom USB kontrolera šalju na COM port servera. Brzina komunikacije je 115200 b/s u formatu 8N1. Kontrola veze se može izvesti preko raznih programa za serijsku komunikaciju dostupnih na internetu.

Sesija se obnavlja na svake 2 sekunde i predstavlja trenutno izmereno stanje. Na samom serveru program koji vrši komunikaciju, sinhronizaciju, prikupljanje podataka i kontrolu veze je Minicom.

Svi podaci koji se prikupljaju pomoću programa Minicom prvobitno se smeštaju u tekstualni fajl koji kreira sam program. Da bi se izbegli mogući nelogični podaci nastali usled nesavršenosti sinhronizacije takta mikroprocesora elektronskog sklopa i takta procesora servera, ove „sirove“ podatke koristeći skriptu pisanu u programskom jeziku Perl prosleđuju se istovremeno kreirajući NoSQL bazu podataka. Dalja obrada podataka se odnosi na izbacivanje nelogičnih i dupliranih upisa,

definisivanja realnog vremena i pripreme rezultata za grafičko prikazivanje.

Za grafičku obradu podataka koristi se softverski alat RRDTTool, dostupan na svim Linux sistemima. Za konačno grafičko prikazivanje i postavljanje rezultata rada u laboratoriji na lokalnu mrežu u obliku statičkog HTML sadržaja koristi se mrežni server Apache HTTPD – 2.2.15 – 15.el6.centos.1.x86\_64.

Aplikacija je urađena u vidu mrežnog sadržaja (sajta) koristeći programske jezike PHP, HTML, XML sa mogućnošću dalje implementacije JAVA SCRIPT-a radi pune kontrole izvršnih funkcija.

### III. ANALIZA REZULTATA VETROGENERATORA TPW 200W – 24V

Osnovni zadatak ispitivanja je da se dobiju realne karakteristike vetrogeneratora *TPW 200W*, te da se tako dobijeni podaci dalje koriste u laboratorijskim vežbama koje će izvoditi studenti. Dobijeni rezultati su upoređeni sa podacima dostupnim od proizvođača vetrogeneratora *TPW 200W* kao i sa empirijski utvrđenim karakteristikama malih vetrogeneratora. Na taj način je verifikovana tačnost i preciznost dobijenih rezultata. Drugi zadatak je da se testira funkcionalnost celokupnog vetrosistema laboratorije obnovljivih izvora energije.

Ovde je bitno istaći da struja vetrogeneratora u realnom sistemu u mnogome zavisi od stanja baterija. U laboratoriji su u vreme ispitivanja vetrogeneratora baterije bile preko 80% napunjene pa tako struja izmerena u ogledu realnog rada ne predstavlja maksimalno moguću struju proizvodnje. Kako bi se izbegli netačni rezultati, vetro sistem laboratorije poseduje mogućnost ispitivanja vetrogeneratora u kratkom spoju i praznom hodu, bez akumulatorskih baterija u kolu merenja. Od posebnog značaja je ogled kratkog spoja jer se iz njega dobija maksimalna struja proizvodnje vetrogeneratora, nezavisno od stanja napunjenosti baterija i vrste potrošača uključenih u kolo.

Ogled kratkog spoja se izvodi pri kratom spajanju krajeva vetrogeneratora TPW 200W, a rezultati ogleda kratkog spoja dati su u tabeli II.

Najbitnije karakteristike malih vetrogeneratora su strujna i karakteristika snage u zavisnosti od brzine vetra. Laboratorija ne poseduje aero tunel pa je i direktno merenje brzine vetra nemoguće. Međutim kako se meri broj obrtaja motor-vetrogenerator grupe koristeći karakteristike dostupne od proizvođača i izmerene vrednosti može se proceniti brzina vetra sa malim odstupanjima [5].

Zadaje se učestanost kojom se napaja stator elektromotora pomoću frekventnog regulatora, a rezultati su prikazani u tabeli III.

TABELA II. OGLED KRATKOG SPOJA VETROGENERATORA TPW 200W

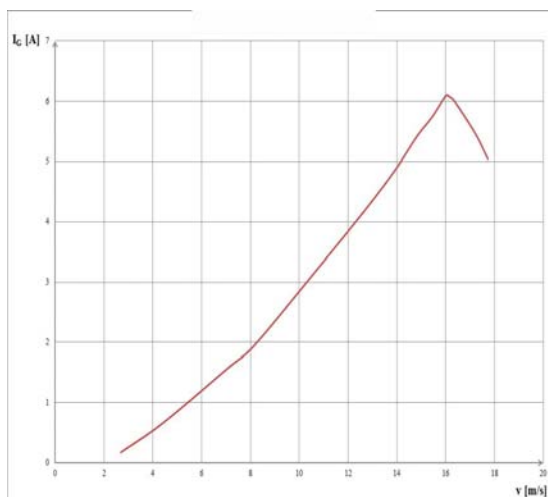
Učestanost napona statora elektromotora [Hz]	Broj obrtaja osovine motor-generator grupe [ob/min]	Struja vetrogeneratora [A]
2,75	15	0,108
5	57	0,659
10	111	1,95
15	160	3,112
20	201	4,12
25	232	4,84
30	256	5,418
35	271	5,75
40	284	6,096
45	290	6,073
50	287	6,04
51	278	5,771
53	259	5,413
55	247	5,038

TABELA III. PRIKAZ NAPONA, STRUJE I SNAGE VG TPW 200W U ZAVISNOSTI OD UČESTANOSTI NAPAJANJA MOTORA

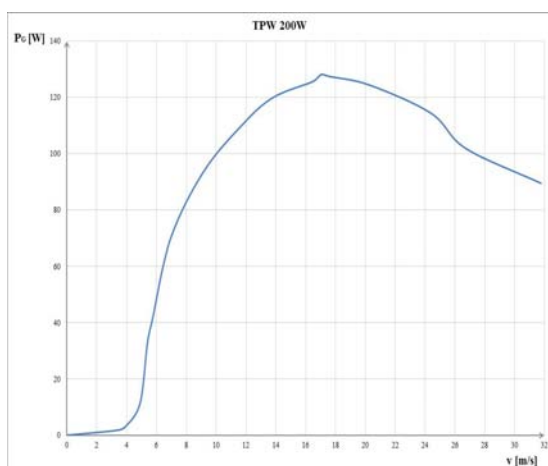
Učestanost napajanja statora AM [Hz]	Brzina obrtanja osovine n [ob/min]	Brzina vetra [m/s]	Napon VG TPW 200W [V]	Struja VG TPW 200W [A]	Izlazna snaga TPW 200W [W]
2,5	75	3,34	2,7	0,645	1,74
3	88	3,95	3,59	0,856	3,07
5	110	4,9	7,05	1,618	11,4
8,5	185	5,4	12,87	2,556	32,9
10	211	5,74	14,695	2,821	41,45
15	280	6,95	19,75	3,535	69,84
20	333	9,166	23,31	4,015	93,59
25	367	11,78	25,58	4,315	110,4
30	388	13,84	26,82	4,475	120
35	400	16,47	27,48	4,569	125,58
40	407	17,05	27,8	4,611	128,17
45	409	17,6	27,7	4,601	127,44
50	413	20,3	27,3	4,553	124,3
51	431	24,42	26,03	4,389	114,3
53	455	26,73	24,39	4,175	101,8
55	475	31,78	22,69	3,94	89,4

#### IV. STRUJNA I KARAKTERISTIKA SNAGE VG TPW 200W

Korišćenjem dobijenih rezultata iz tabele II mogu se grafički prikazati karakteristike struje u zavisnosti od brzine vetra (slika 3) i zavisnost izlazne snage VG TPW 200W od simulirane brzine vetra (slika 4). Sa strujne karakteristike prikazane na slici 3 može se zaključiti da se maksimalna struja od 6,1 A postiže pri brzini vetra od 16 m/s. Sa slike 4 koja predstavlja zavisnost izlazne snage od brzine vetra može se zaključiti da se maksimalna izlazna snaga VG TPW 200W od 128 W dobija pri brzini vetra od 17 m/s. Upoređujući osnovne karakteristike konkretnog vetrogeneratora (tabela I) sa dobijenim rezultatima uočava se odstupanje vrednosti za maksimalnu snagu koju generiše vetrogenerator TPW 200W. Ova činjenica se može objasniti time što se vetar simulira i činjenicom da se pri proračunu brzine vetra, za konkretna opterećenja, unose greške. Ova činjenica se može objasniti time što su podaci iz tabele II dobijeni pri simularanju rada vetrogeneratora u realnom sistemu, te kako su akumulatorske baterije bile na 80% stanja napunjenosti, 128W je maksimalna snaga koja se mogla bezbedno isporučiti sistemu u tom trenutku.



Slika 3. Zavisnost struje vetrogeneratora od brzine vetra



Slika 4. Zavisnost izlazne snage vetrogeneratora od brzine vetra

#### V. ZAKLJUČAK

U radu su prikazane osnovne teorijske postavke vetroenergetike kao i pregled trenutnog stanja vetroenergetike u Evropi i svetu, isprojektovana i implementirana laboratorija obnovljivih izvora, ispitane karakteristike vetrogeneratora male snage *TPW 200W*, a u sklopu toga testirana i celokupna funkcionalnost vetro sistema laboratorije.

Rezultati ispitivanja karakteristika vetrogeneratora *TPW 200W*, se u pogledu strujnih karakteristika u potpunosti slažu sa karakteristikama dostupnim od proizvođača te su na taj način najbolje verifikovani. Sa nazivnih podataka za snagu vetrogeneratora očitano je da se maksimalna snaga proizvodnje javlja pri brzini vetra od oko 16 m/s. Konačni rezultati ispitivanja vetrogeneratora *TPW 200W*, pokazuju da se maksimalna snaga proizvodnje u laboratorijskim uslovima (slika 4) javlja pri brzini vetra od 17 m/s, što je takođe u skladu sa nazivnim vrednostima ispitivanog vetrogeneratora, dok je karakteristika snage vetrogeneratora u skladu sa empirijski utvrđenim karakteristikama malih vetrogeneratora sa permanentnim magnetima na rotoru.

Ispitivanjem vetrogeneratora *TPW 200W*, istovremeno je i testiran celokupan vetro sistem laboratorije. Kako ne postoje odstupanja između nazivnih karakteristika i rezultata dobijenih u laboratorijskim ispitivanjima, vetro sistem laboratorije obnovljivih izvora je u potpunosti funkcionalan i sva merenja i rezultati su vidljivi na veb aplikaciji.

#### LITERATURA

- [1] Gilbert M. Masters: „Renewable and Efficient Electric Power Systems“, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2004
- [2] Mukund R. Patel: „Wind and Solar Power Systems“, CRC Press, New York, 1999
- [3] Tony Burton, David Sharpe, Nick Jenkins, Ervin Bossanyi: „Wind Energy Handbook“, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2001
- [4] J. F. Manwell, J. G. Mcgowan, A. L. Rogers: „Wind Energy Explained“, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2009
- [5] M. Ragheb: „Wind Power Systems“, State University of Illinois, 2012
- [6] M. Ivezić, A.Grujić, S. Petrović, N. Velenderić, S. Vrtunić, "The future of interactive engineering education", ISTI, Tirana, June 2012

#### ABSTRACT

Basic task of this paper is to present some of the results obtained in the lab, which was formed for the purpose of course Renewable energy sources which performed at the School of Electrical Engineering and Computer Science applied studies in Belgrade. Testing is performed on wind generator rated power 200W. Three-

phase asynchronous motor rated power of 0.37 kW is used in the lab as a simulator of wind speed. Motor shaft is rigidly connected to the axle connection of wind generators and electric motors change speed automatically changes the speed of wind generators. The lab also has an inverter, two batteries 35Ah, frequency inverter, battery charge controller with MPPT included, measurement control electronics, server and ten workstation. In this paper, the measured current and power characteristics of wind turbines and compared with the tabular values in order to check the validity of a special electronic circuit, purpose-built for the needs of lab.

#### WIND ENERGY TRAINING SYSTEM IN EDUCATION

Aleksandra Grujić

Milan Ivezić

Nikola Velenderić

Saša Vrtunić