

Projekt:

Višekriterijsko upravljanje vjetroagregatom

**Provjera klasičnih algoritama upravljanja pomoću  
profesionalnih simulacijskih alata**

**Vedran Bobanac**

**Mate Jelavić**

**Nedjeljko Perić**

Zagreb, lipanj 2009.

## 1. UVOD

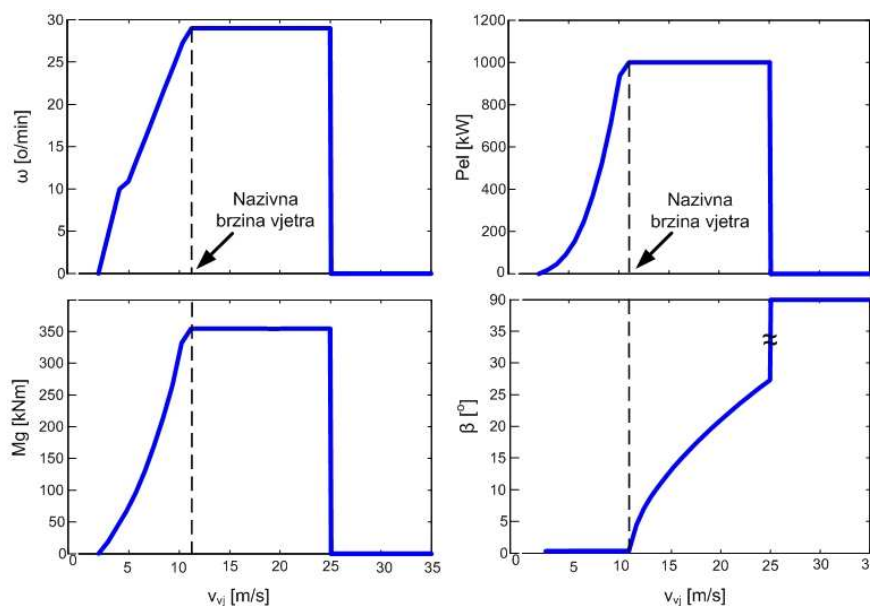
U ovom izvještaju prikazani su rezultati simulacijskih provjera klasičnih algoritama upravljanja suvremenim vjetroagregatima u megavatnoj klasi snage. Ovi algoritmi su jako rašireni u praksi i koriste se za upravljanje većinom suvremenih vjetroagregata. Simulacije su provedene na računalu, u profesionalnom simulacijskom alatu GH Bladed. Ovaj alat predstavlja implementaciju detaljnih matematičkih modela kompletnog suvremenog vjetroagregata, kao i prirodnih pojava koje utječu na vjetroagregat, poput vjetra, potresa, te morskih struja i valova u slučaju *offshore* vjetroagregata. Brojne akreditacijske agencije kao npr. Det Norske Veritas priznaju rezultate GH Bladed-a kao relevantne prilikom certificiranja vjetroagregata.

Fizikalne pojave koje se događaju prilikom aerodinamičke pretvorbe energije vjetra u mehaničku energiju vrtnje vjetroagregata vrlo su složene, te je za njihov opis potreban složen matematički model. Za opis ovih pojava uobičajeno se koristi način modeliranja koji je u engleskoj literaturi poznat pod nazivom *Blade Element and Momentum Theory*. Alat GH Bladed temelji se na ovome modelu. Ovaj model koristi implicitne relacije koje se rješavaju numeričkim postupcima, a sam izvod modela se zasniva na kombiniranju dvaju pristupa: teorije rotorskog diska i teorije segmenata lopatica. Prvi pristup promatra rotor vjetroagregata kao čvrsti disk i analizira njegov utjecaj na slobodno strujanje zraka, dok drugi pristup svaku lopaticu promatra kao niz infinitezimalnih segmenata te analizira aerodinamičke pojave na njima.

## 2. OPIS PROMATRANOG VJETROAGREGATA

U ovome izvještaju promatra se sustav upravljanja vjetroagregatom Končar KO-VA 57/1 koji ostvaruje nazivnu snagu od 1 MW pri nazivnoj brzini vrtnje 27 o/min. Generator je sinkroni, te je rotor generatora spojen izravno na rotor turbine (bez multiplikatora), tako da je brzina vrtnje generatora uvijek jednaka brzini vrtnje turbine. Generator je spojen na mrežu korištenjem frekvencijskog pretvarača nazivne snage generatora čime je omogućeno mijenjanje brzine vrtnje u širokom rasponu – od 10 do 27 o/min. Ograničavanje brzine vrtnje i snage iznad nazivne brzine vjetra vrši se zakretanjem lopatica čiji je raspon zakretanja od  $0.3^\circ$  (maksimalno iskorištenje energije vjetra) do  $90^\circ$  (položaj za zaustavljanje). Visina tornja je 60 m, a promjer rotora 57 m. Vjetroagregat radi u rasponu brzina vjetra od 2.5 m/s (brzina vjetra za uključenje, *engl. cut-in wind speed*) do 25 m/s (brzina vjetra za isključenje, *engl. cut-out wind speed*). Nazivna brzina vjetra iznosi 11 m/s.

Na slici 1. prikazane su statičke karakteristike promatranog vjetroagregata. Prikazani su brzina vrtnje rotora, moment generatora, snaga vjetroagregata i kut zakreta lopatica u ovisnosti o brzini vjetra. Iz ovih karakteristika se jasno mogu prepoznati dva različita radna područja vjetroagregata. Ispod nazivne brzine vjetra kut zakreta lopatica se ne mijenja, dok se moment generatora, a time i brzina vrtnje mijenjaju prema upravljačkom zakonu koji osigurava najbolje iskorištenje energije vjetra. Iznad nazivne brzine vjetra moment generatora se drži na nazivnoj vrijednosti, dok se promjenom zakreta kuta lopatica održava nazivna brzina vrtnje, a time i nazivna snaga vjetroagregata.



Slika 1. Statičke karakteristike vjetroagregata snage 1 MW

Gore opisani vjetroagregat potrebno definira se u profesionalnom simulacijskom alatu GH Bladed. Jezgru alata GH Bladed predstavlja matematički model koji opisuje aerodinamičke prilike na rotoru vjetroagregata. Matematički model zasniva se na implementaciji kombinirane teorije rotirajućeg diska i teorije segmenata lopatica (*engl. Blade element and momentum theory*). Ova teorija opisuje pretvorbu kinetičke energije struje zraka (vjetra) u energiju vrtnje rotora i energiju koja se manifestira kao opterećenje konstrukcije. Za detalje oko načina rada Bladed-a i opis matematičkog modela koji Bladed koristi vidjeti [1] i [2].

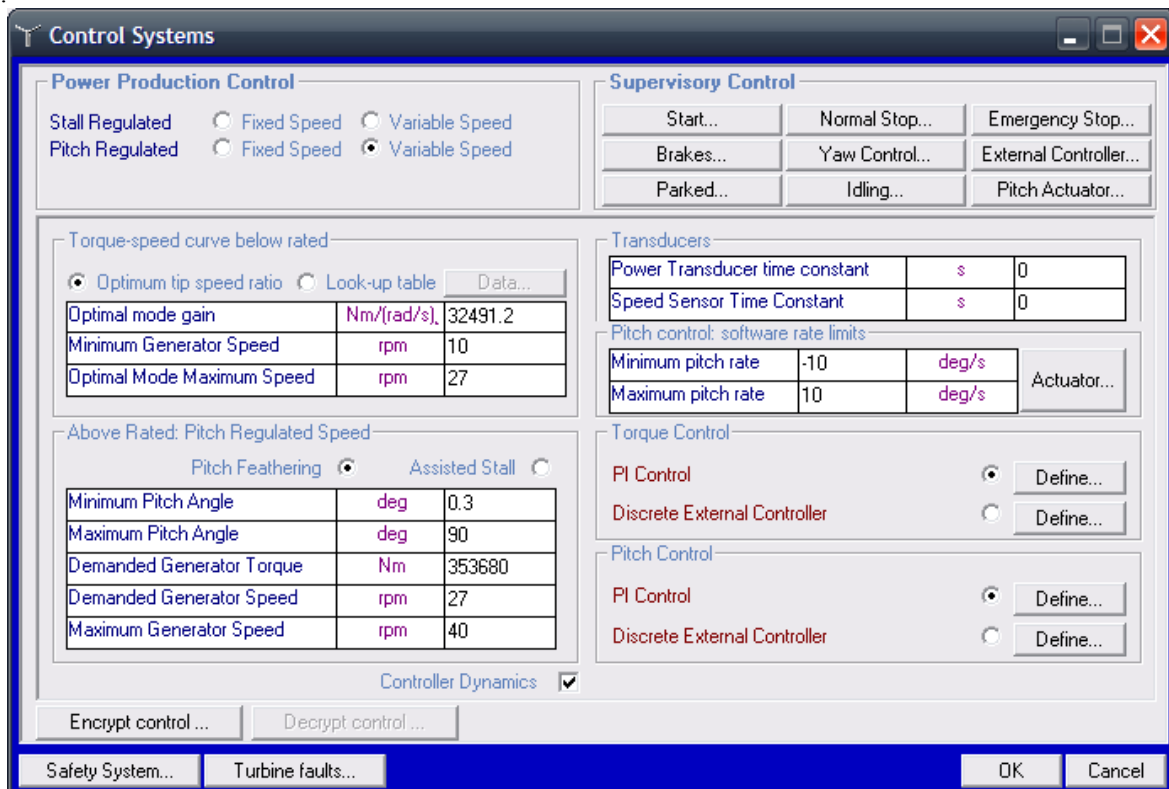
Prvi korak prilikom definiranja vjetroagregata u Bladed-u predstavlja definiranje aerodinamičkih karakteristika profila lopatica. Za lopaticu se definira više sekcija (*engl. Aerofoil Datasets*) koje imaju različite aerodinamičke karakteristike. Navedene karakteristike zadaju se u obliku tablica koeficijenta sile uzgona i koeficijenta sile otpora u ovisnosti o napadnom kutu struje zraka na lopaticu.

Za promatrani vjetroagregat definirane su aerodinamičke karakteristike za 7 profila. Profil lopatice se mijenja kako se ide od korijena prema vrhu lopatice pa se u skladu s tim ove karakteristike pridružuju pojedinim dijelovima lopatica u ovisnosti o njihovoj udaljenosti od korijena.

Svaka lopatica podijeljena je u više dijelova (sekcija) za koje je potrebno definirati:

- Udaljenost od korijena lopatice
- Gore navedene aerodinamičke karakteristike profila
- Dimenzije kao što su duljina tetive i debljina profila
- Uvijenost
- Masu po jedinici dužine
- Položaj centra mase
- Krutost
- Itd.

Da bi vjetroagregat bio potpuno definiran potrebno je unijeti brojne druge parametre koji opisuju karakteristike rotora, glavčine, tornja, generatora, osovinskog voda, gondole itd. Za ovaj izvještaj najbitnije je kako je definiran sustav upravljanja. Sučelje u koje se unose parametri sustava upravljanja prikazano je na slici 2.



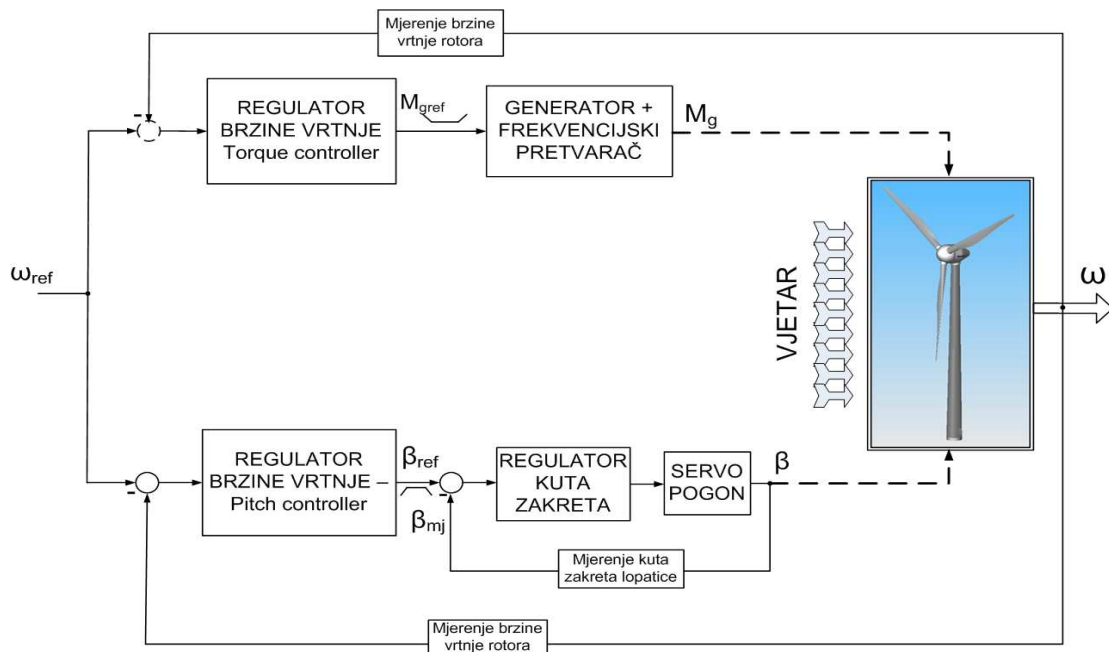
Slika 2. Definiranje sustava upravljanja u alatu GH Bladed

### 3. STRUKTURA SUSTAVA UPRAVLJANJA

Vjetroagregat je nelinearan sustav zbog karakteristike vjetra, tj. zbog toga što je snaga vjetra proporcionalna sa trećom potencijom brzine vjetra. Zbog toga se sustav upravljanje dijeli na 2 radna područja. Za razdvajanje radnih područja definira se nazivna brzina vjetra. Nazivna brzina vjetra je najmanja brzina vjetra pri kojoj vjetroagregat ostvaruje nazivnu snagu. Sukladno tome radna područja vjetroagregata su:

- Ispod nazivne brzine vjetra
- Iznad nazivne brzine vjetra

Upravljanje vjetroagregatom odvija u dvije glavne regulacijske petlje koje rade paralelno, ali je ovisno o radnom području jedna od njih dominantna. Za vrijeme slabih vjetrova dominantno je upravljanje momentom čime se pokušava osigurati da omjer brzine vrtnje i brzine vjetra bude optimalan. Istovremeno druga regulacijska petlja osigurava zakret lopatica na kut koji će osigurati maksimalno iskorištenje energije vjetra, a to je obično oko  $0^\circ$ . Za vrijeme jakih vjetrova dominantno je upravljanje kutom zakreta lopatica čime se pokušava osigurati da brzina vrtnje rotora stalno bude na nazivnom iznosu. Istovremeno prva regulacijska petlja održava moment generatora na nazivnoj vrijednosti čime je osigurano da generator radi nazivnom snagom. Iz danog opisa izvodi se opća struktura sustava upravljanja vjetroagregatom koja je prikazana na slici 3. Iz slike se može zaključiti da obje upravljačke petlje reguliraju brzinu vrtnje turbine, ali na različit način.



**Slika 3.** Načelna shema sustava upravljanja brzinom vrtnje vjetroagregata

## 4. REZULTATI SIMULACIJA

Provedene su brojne simulacije koje pokazuju ponašanje vjetroagregata u uvjetima različitih vjetrova. Korištene su skokovite promjene vjetra, koje se ne pojavljuju u prirodi međutim mogu dobro poslužiti za proučavanje karakteristika sustava upravljanja. Osim skokovitih promjena, korišten je i realni, turbulentni vjetar, kakav se pojavljuje u prirodi. Signal turbulentnog vjetra generiran je u Bladed-u korištenjem von Karmanovog matematičkog modela sa tri komponente turbulencija (longitudinalne, lateralne i vertikalne).

Promatrani su odzivi na skokoviti pad vjetra, skokoviti porast vjetra, te na turbulentni vjetar i to za sljedeća radna područja (određena brzinama vjetra):

- Ispod nazivne brzine vjetra
- Iznad nazivne brzine vjetra
- U okolini nazivne brzine vjetra (na prijelazu radnih područja)

Uspoređene su dvije strategije upravljanja ispod i dvije strategije upravljanja iznad nazivne brzine vjetra.

Ispod nazivne brzine vjetra uspoređeno je:

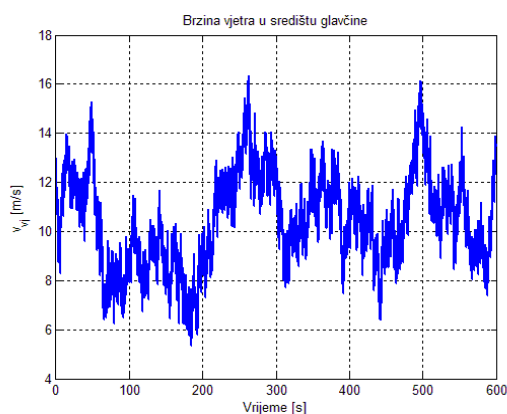
- Upravljanje optimalnim momentom i PI regulatorom na rubovima radnog područja.
- Upravljanje preglednom tablicom (*engl. Look-up table*)

Iznad nazivne brzine vjetra uspoređeno je:

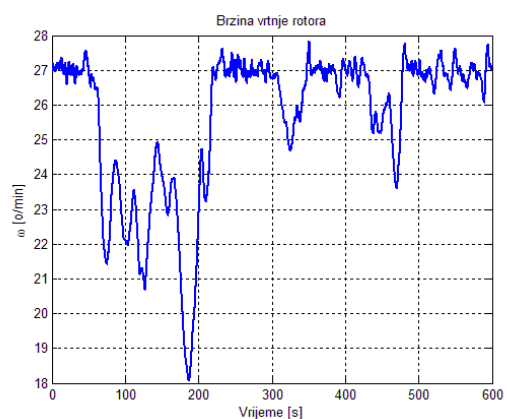
- Upravljanje PI regulatorom s adaptacijom parametara
- Upravljanje PI regulatorom s fiksnim parametrima

Na ovaj način simulacijama je pokazano ono što se znalo iz teorije, a to je da se bolje ponašanje vjetroagregata postiže upravljanjem PI regulatorom na rubovima radnih područja ispod nazivne brzine vjetra i upravljanjem PI regulatorom s adaptacijom parametara iznad nazivne brzine vjetra.

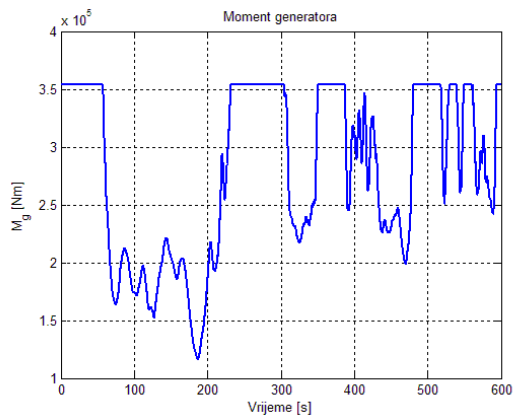
Provođenjem simulacija dobiveni su brojni rezultati, tako da je u nastavku prikazan samo njihov manji dio. U nastavku su prikazani odzivi sustava na realni, turbulentni vjetar za radno područje oko nazivne brzine vjetra (na prijelazu radnih područja), a to je najzahtjevnije područje za upravljanje. Na slici 4. prikazan je pobudni signal brzine vjetra, a na slikama 5. - 10. odzivi, redom: brzine vrtnje rotora, momenta generatora, kuta zakreta lopatica, električne snage generatora, pomaka vrha tornja u smjeru vjetra i momenta opterećenja u korijenu 1. lopatice.



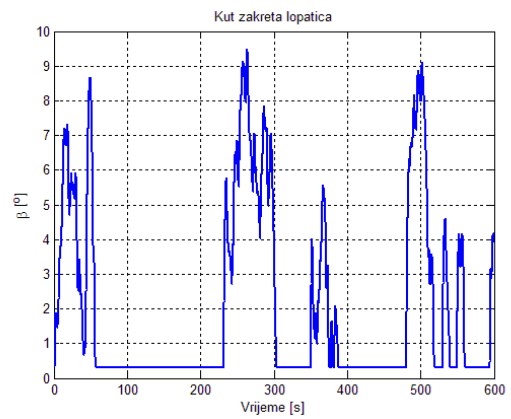
Slika 4. Brzina vjetra



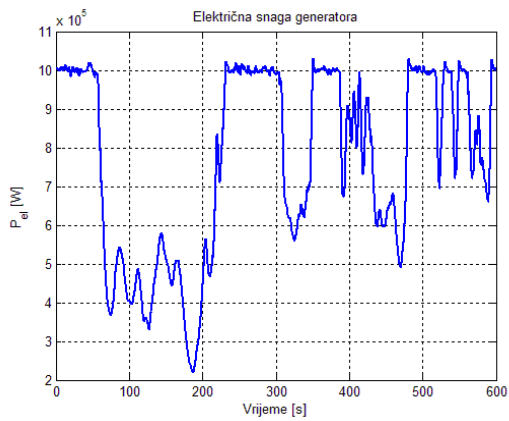
Slika 5. Brzina vrtnje rotora



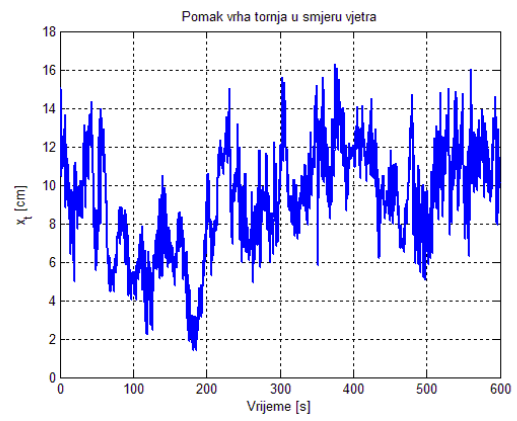
Slika 6. Moment generatora



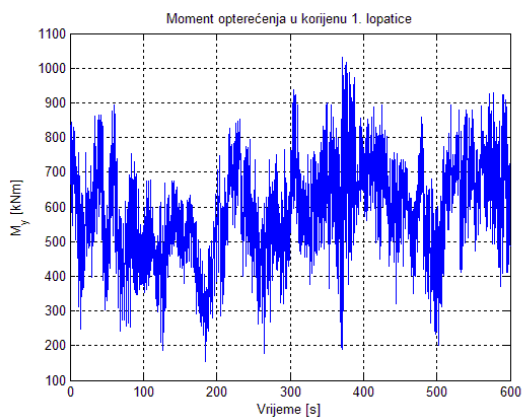
Slika 7. Kut zakreta lopatica



Slika 8. Električna snaga generatora



Slika 9. Pomak vrha tornja u smjeru vjetra



Slika 10. Moment opterećenja u korijenu 1. lopatice

## 5. ZAKLJUČAK

U ovome radu opisan je sustav upravljanja vjetroagregatima u klasi snage 1 MW. Svi opisani algoritmi su, u manjoj ili većoj mjeri, već pronašli primjenu na suvremenim vjetroagregatima. Za ispitivanje ovih algoritama koristi se profesionalni simulacijski alat GH Bladed, pomoću kojeg su provedene brojne simulacije na modelu stvarnog, suvremenog vjetroagregata. Rezultati koje daje GH Bladed uzimaju se kao relevantni budući da je GH Bladed alat priznat od brojnih međunarodnih akreditacijskih agencija. Provedene simulacije pokazuju zadovoljavajuće ponašanje sustava upravljanja u uvjetima različitih vjetrova, ali isto tako ukazuju na moguća poboljšanja.

Jedna od stvari koju bi svakako trebalo poboljšati jest moment opterećenja u korijenu lopatica. Ovaj moment ima sličan valni oblik za sve 3 lopatice. Moment opterećenja u korijenu lopatica poprima prilično velike iznose (valja primijetiti da su iskazane veličine na grafu u kNm), što uzrokuje zamor materijala i skraćuje radni vijek vjetroagregata. Moment opterećenja lopatica je prikazan kao primjer nezadovoljavajućeg ponašanja sustava. Ovo ponašanje može se popraviti naprednim tehnikama upravljanja koje su predmet istraživanja u daljnjim fazama projekta. Još jedna stvar koja će se nastojati poboljšati je smanjenje njihanja tornja, koje također jako utječe na zamor materijala, radni vijek, a samim time i isplativost vjetroagregata.

## 6. POPIS LITERATURE

- [1] E. A. Bossanyi, D. C. Quarton, *GH Bladed - Theory Manual*, 282/BR/009, prosinac 2003.
- [2] E. A. Bossanyi, D. Witcher, D. C. Quarton, *GH Bladed Version 3.65 - User Manual*, 282/BR/010, srpanj 2004.
- [3] M. Jelavić, V. Petrović, M. Marinković, V. Bobanac, N. Perić, *Analiza postojećih metoda matematičkog modeliranja vjetroagregata i vjetra*, izvještaj, veljača 2009.
- [4] M. Jelavić, V. Petrović, M. Marinković, V. Bobanac, N. Perić, *Analiza postojećih algoritama upravljanja vjetroagregatima te pravaca njihova istraživanja*, izvještaj, ožujak 2009.
- [5] Danish Wind Industry Association, [www.windpower.org](http://www.windpower.org), veljača 2009.
- [6] European Wind Energy Association, [www.ewea.org](http://www.ewea.org), veljača 2009.
- [7] T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins, E. Bossanyi, *Wind Energy Handbook*, John Wiley & sons, 2001.
- [8] E. L. van der Hooft, P. Schaak, T. G. van Engelen, *Wind turbine control algorithms*, ECN-C—03-111, 2003.
- [9] M. Jelavić, *Upravljanje vjetroagregatom s ciljem smanjenja dinamičkih opterećenja konstrukcije*, doktorska disertacija, FER, Zagreb, svibanj 2009.
- [10] M. Jelavić, *Upravljanje vjetroagregatom u cilju smanjenja zamora materijala*, seminarski rad, FER, Zagreb, 2007.
- [11] V. Petrović, *Smanjenje opterećenja konstrukcije i zamora materijala vjetroagregata primjenom naprednih metoda upravljanja*, diplomski rad, Voditelj: N. Perić, FER, Zagreb, 2008.
- [12] N. Perić, *Automatsko upravljanje*, predavanja, FER, Zagreb, 2005.