

Projekt:
Višekriterijsko upravljanje vjetroagregatom

**Simulacijski modeli vjetroagregata i vjetra
u Matlab/Simulink okruženju
i njihova validacija**

Izvještaj

Mate Jelavić
Vlaho Petrović
Martina Marinković
Vedran Bobanac
Nedjeljko Perić

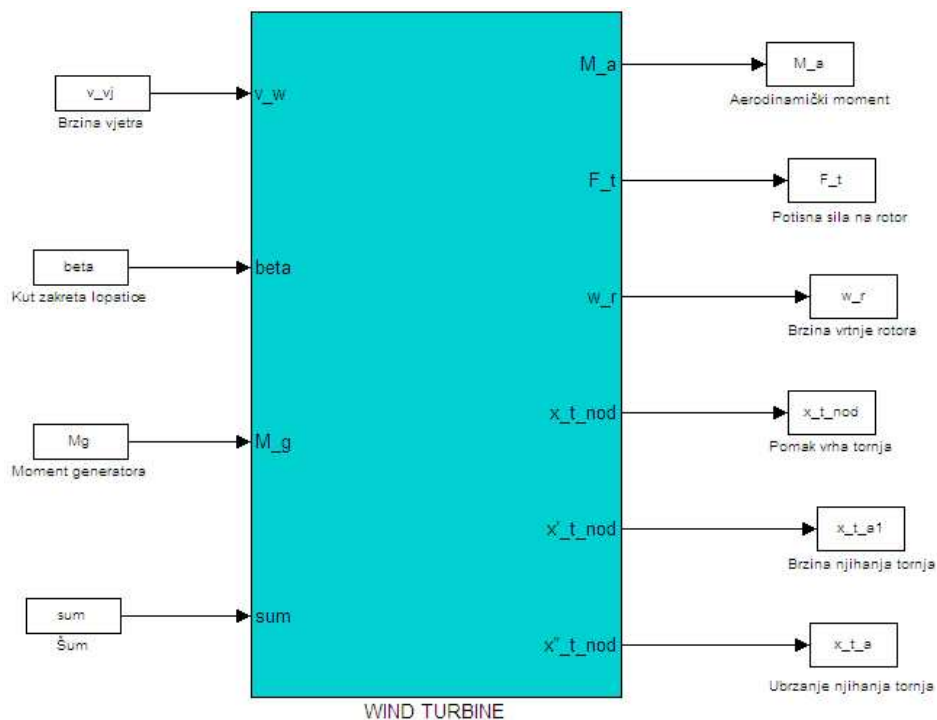
Zagreb, srpanj 2009.

Obnovljivi izvori energije, gdje vjetar zauzima najvišu poziciju prema instaliranoj snazi prošle godine, pokazali su se kao rješenje za ekološki problem našeg planeta. Danas Europa predvodi svijet po instaliranoj snazi vjetroelektrana, budući da je u 2008. godini u Europskoj Uniji instalirano više vjetroenergetskih postrojenja od bilo kojeg drugog tipa elektrana.

Kod upravljanja vjetroagregatom prisutne su razne prepreke, koje se moraju obavezno uzeti u obzir prilikom matematičkog modeliranja, poput strukturnih opterećenja, efekta sjene tornja (*engl. Tower shadow*) ili vibracija tornja i lopatica. Veliki problem je stohastička priroda vjetra, te okomiti profil vjetra (*Wind shear*).

Izrađen je simulacijski model vjetroagregata i vjetra, koji je realiziran u Matlab/Simulink okruženju, a kao referencu za ocjenu valjanosti modela su korišteni simulacijski rezultati dobiveni u programskom alatu GH Bladed. Simulacijski model vjetroagregata i vjetra sastoji se od nekoliko glavnih simulacijskih blokova.

Najvažniji dio je blok Wind Turbine, koji realizira matematički model vjetroagregata. Slika 1 prikazuje pojednostavljeni simulacijski model vjetroagregata, koji još nije povratnom vezom spojen na sustav upravljanja.



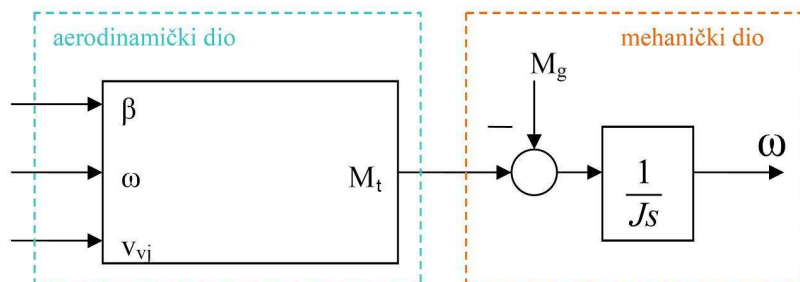
Sl. 1 Simulacijski blok vjetroagregata u Matlab/Simulink okruženju

Kako se može uočiti sa slike 1, ulazne veličine u model su brzina vjetra v_{vj} , kut zakreta β , nazivni moment generatora M_g i šum. Izlazne veličine su aerodinamički moment M_a , sila potiska F_t , brzina vrtnje rotora ω , pomak vrha tornja x_{t_nod} , brzina pomaka vrha tornja, x'_{t_nod} i ubrzanje pomaka vrha tornja x''_{t_nod} .

Na slici 2 je prikazan podsustav modela Wind turbine koji pak sadrži podsustave vezane uz aerodinamiku (Rotor aerodynamics) i mehaniku vjetroturbine (Rotor mechanics) te dinamiku tornja (Tower nodding).

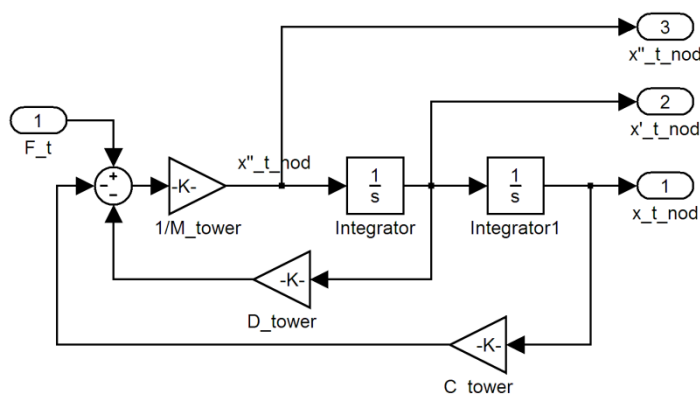
Ulazne veličine toga sustava su aerodinamički moment vjetroagregata, M_a , elektromagnetski moment generatora, M_g , i šum, a izlazna veličina podsustava je brzina vrtnje rotora, ω_r .

Sljedeća slika 5 daje pojednostavljeni prikaz interakcije dvaju podsustava koji čini osnovni princip rada vjetroagregata. Vjetroturbina se sastoji od lopatica i glavčine za koju su lopatice pričvršćene. Vjetroturbine suvremenih vjetroagregata u megavatnoj klasi snage u pravilu se sastoje od tri lopatice pa je tako i kod ovog simulacijskog modela. Glavčina vjetroagregata prenosi zakretni moment sa vjetroturbine na rotor generatora. Rotor turbine će se ubrzati ili usporiti, ovisno o razlici između aerodinamičkog momenta M_a i elektromagnetskog momenta generatora M_g .



Sl. 5 Blokovska shema osnovnog principa rada vjetroagregata

Podsustav Tower nodding opisuje dinamiku stupa vjetroagregata a prikazan je blokom na slici 6.

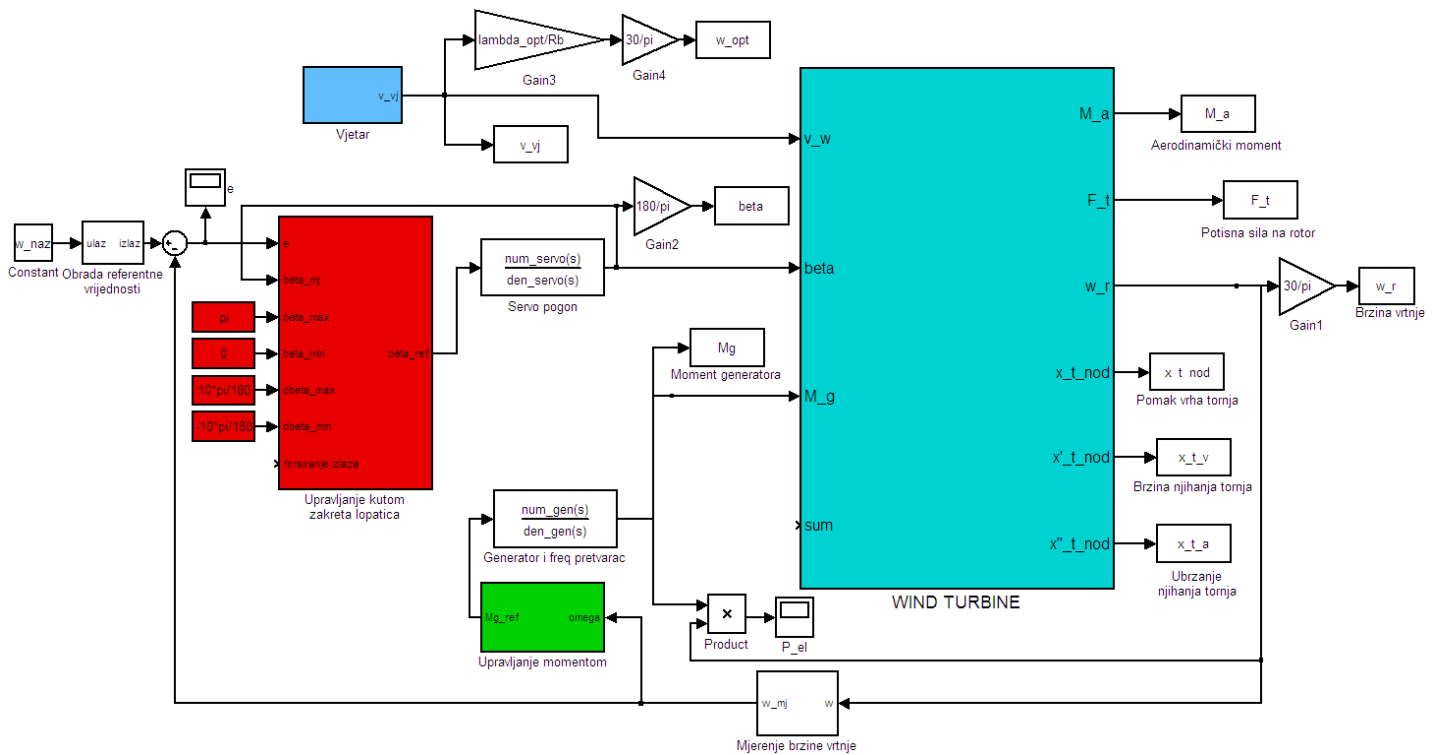


Sl. 6. Podsustav Tower nodding

Izlazne veličine tog podsustava Tower nodding su pomak, brzina i ubrzanje vrha tornja, dok je ulazna veličina potisna sila na rotor. Stup vjetroagregata je potporna konstrukcija koja nosi vjetroturbinu, generator i ostalu opremu vjetroagregata. Uobičajena visina tornja suvremenog vjetroagregata snage 1 MW je oko 60 m, a takve dimenzije su uzete u obzir i kod ovog simulacijskog modela. Fleksibilnost tornja jedan je od glavnih problema kod upravljanja brzinom vrtnje vjetroagregata te se nikako ne smije zanemariti u simulacijskom modelu. U simulaciji se promatra gibanje vrha tornja, što se odnosi spoj tornja i gondole, u smjeru vjetra.

Upravljanje vjetroagregatom predstavlja izazov zbog problema i prepreka koji se pritom javljaju. Radi se prvo o izrazito nelinearnom odnosu snage i brzine vjetra, koji se direktno odražava na sustav upravljanja. Zbog toga je radno područje vjetroagregata podijeljeno na dva dijela. Prvo radno područje odnosi se na slabije vjetrove kada generator radi ispod nazivne snage, dok u drugom radnom području generator radi na nazivnoj snazi, pri čemu je snaga vjetra veća od potrebne te ju je potrebno na neki način ograničiti.

Slika 7 pokazuje model vjetroagregata na koji je spojen sustav upravljanja povratnom vezom te pobuda, odnosno, vjetar.

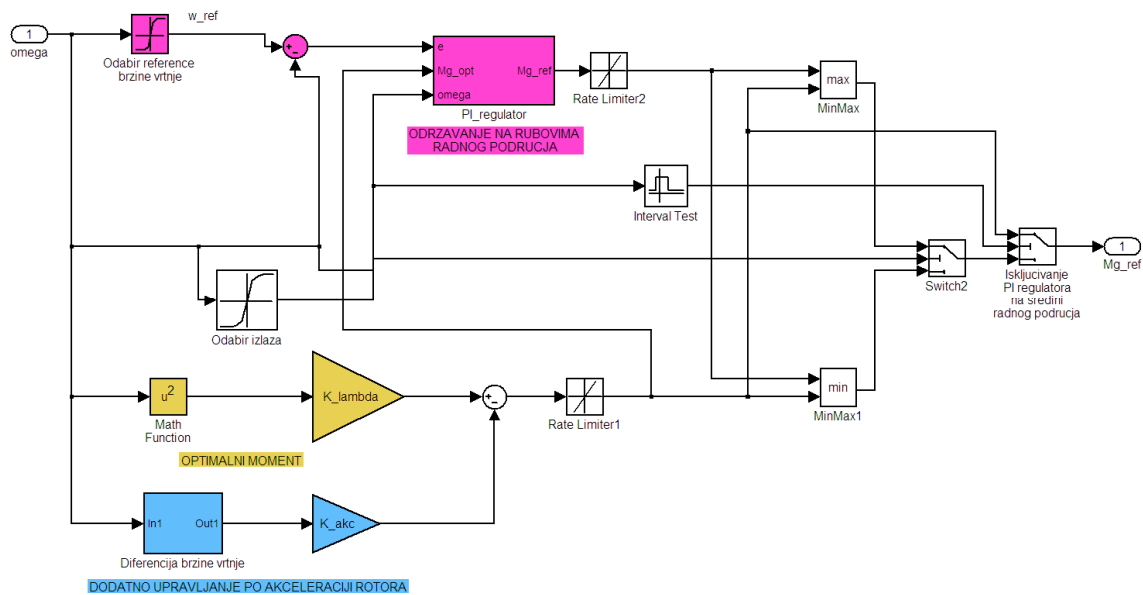


Sl. 7. Simulacijski model vjetroagregata i vjetra u Matlab/Simulink okruženju

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 0° . 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. Dakle, najvažnije procesne veličine vjetroagregata su brzina vrtnje rotora i snaga generatora.

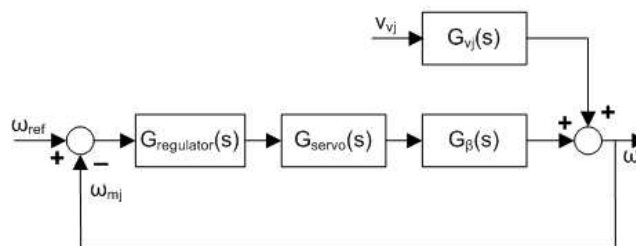
Pored zadaća regulacije, sustav upravljanja vjetroagregatom neprestano nadzire ispravnost svih komponenata sustava (npr. senzori, aktuatori, upravljačko sklopovlje), kao i vremenskih prilika (mjerenje brzine i smjera vjetra). Također, sustav upravljanja je zadužen za pokretanje vjetroagregata kada vjetar prijeđe brzinu vjetra za uključenje i za zaustavljanje vjetroagregata kada brzina vjetra naraste iznad brzine za isključenje.

U radnom području ispod nazivne brzine vjetra upravlja se momentom generatora i to na dva načina. Upravljanje PI regulatorom se vrši samo na rubovima radnog područja, a takvo upravljanje, koje se mora održati na rubovima radnog područja, u modelu se definira blokom prikazanim na slici 8. Model na slici prikazuje i dodatno upravljanje po akceleraciji rotora kada se primjenjuje i derivacijska komponenta. No treba biti oprezan zato što dodavanjem derivacijskog člana u upravljački krug sustav postaje osjetljiv na šumove i male promjene brzine vrtnje koje su posljedica stalnih stohastičkih promjena brzine vjetra.



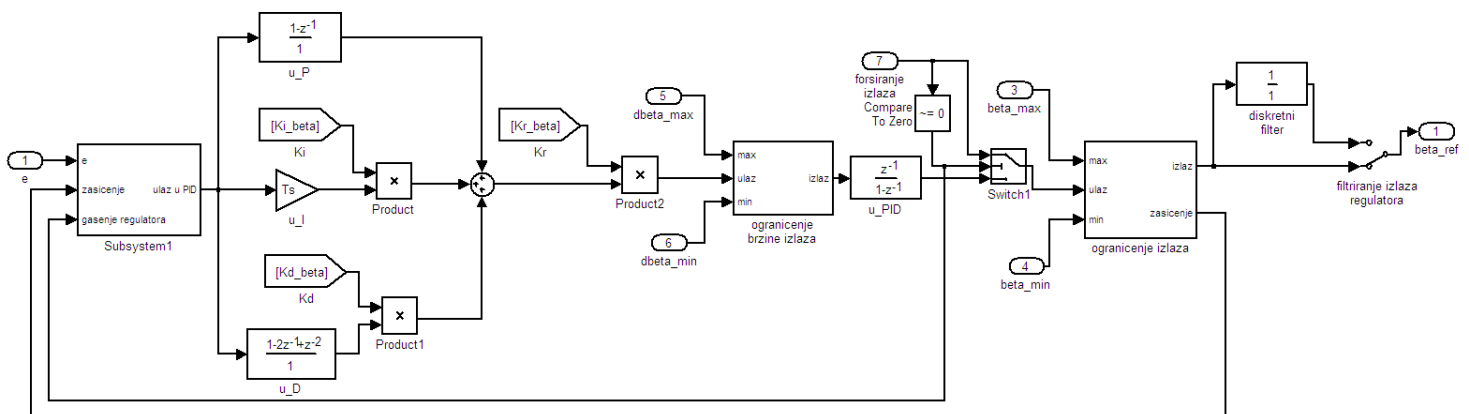
Sl. 8 Upravljanje momentom

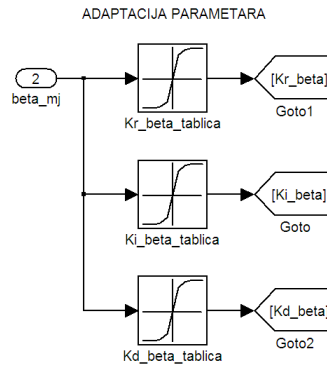
U radnom području iznad nazivne brzine vjetra snaga vjetra je veća od nazivne snage generatora i jako raste s porastom brzine vjetra. U ovom području upravljanje se vrši zakretanjem lopatica turbine (*engl. pitching*), pri čemu se moment generatora održava na nazivnoj vrijednosti. Cilj upravljanja iznad nazivne brzine vjetra je ograničiti brzinu vrtnje rotora na nazivni iznos i time osigurati da generator stalno radi na nazivnoj snazi. To se postiže ograničavanjem snage koja se preuzima iz vjetra, tj. smanjenjem učinkovitosti aerodinamičke pretvorbe. Na slici 9 prikazana je struktura regulacijskog kruga iznad nazivne brzine vrtnje.



Sl. 9 Regulacijski krug iznad nazivne brzine vrtnje

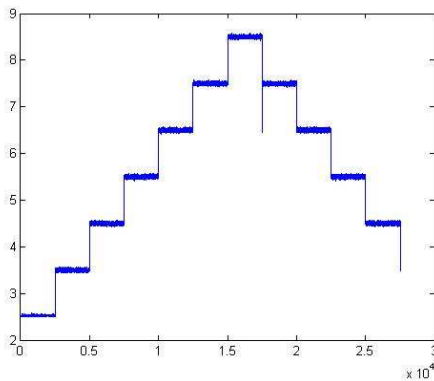
Na slici 10 prikazan je podsustav kojim se u modelu upravlja kutom zakreta lopatica. Moguće je upravljanje sa ili bez adaptacije parametara.



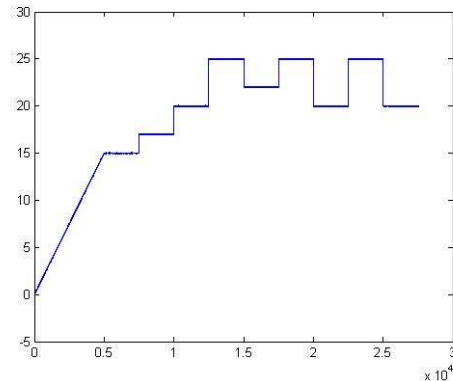


Sl. 10 Upravljanje kutom zakreta lopatica sa adaptacijom parametara

Nakon opisa najvažnijih komponenti simulacijskog modela, slijedi i opis blokova koji definiraju pobudu samog sustava, a to je vjetar. Prilikom simulacije primjenjivalo se nekoliko različitih tipova pobuda. Slike 11 i 12 prikazuju neke od promjena brzine vjetra koje su primjenjene kod simuliranja sustava upravljanja.



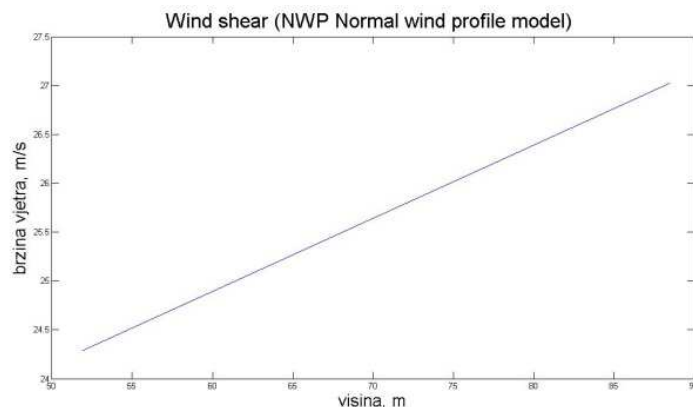
Sl. 11 Rast i zatim pad vrijednosti brzine vjetra, ispod nazivne brzine



Sl. 12 Promjene brzine vjetra, iznad nazivne brzine

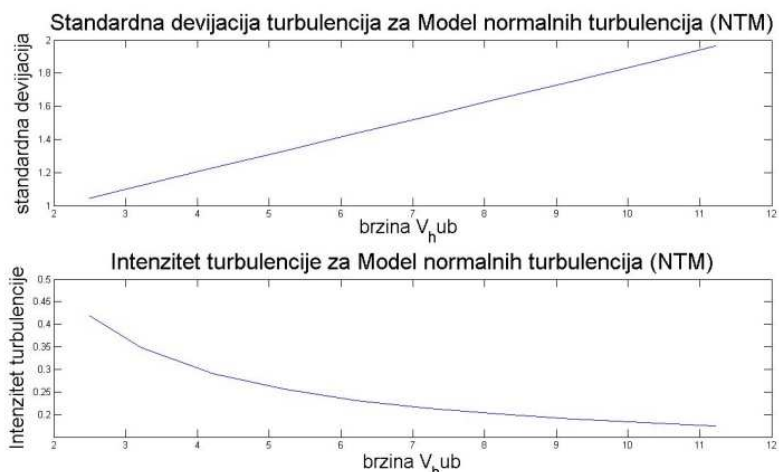
No da bi simulacijski model pokazao u validaciji zahvalno ponašanje za vjetroagregat, primjenjivani su i vjetrovi, koji su opisani u standardu IEC 61400 -1.

Sami vjetroagregati se prema određenim parametrima grupiraju u klasu vjetroagregata. Klasa ovisi o referentnoj brzini vjetra, v_{ref} , te o karakteristikama turbulencije, točnije, o očekivanoj vrijednosti intenziteta turbulencije, I_{ref} . Simulacijski model vjetroagregata, opisan u izvještaju, nalazi se u klasi vjetroagregata II_B. Normalni profil brzine vjetra prema standardu (Normal wind profile model NWP) pokazuje već spomenut okomiti profil brzine vjetra, što je prikazano na sljedećoj slici.



Sl. 13 Normal wind profile model – NWP (standard IEC 61400 -1)

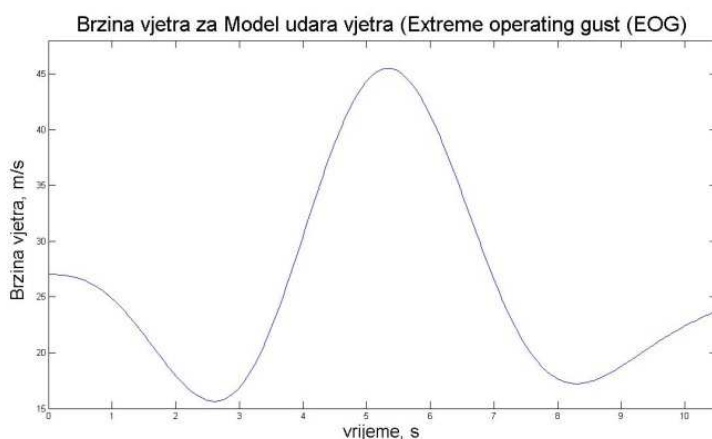
Model normalnih turbulencija (Normal turbulence model NTM) za klasu vjetroagregata II_B izračunava standardnu devijaciju turbulencija te intenzitet turbulencija, što je prikazano na slici 14.



Sl. 14 Normal turbulence model – NTM (standard IEC 61400 -1)

Zatim, model ekstremnih brzina vjetra (Extreme wind speed model EWM) daje podatke o brzini vjetra kroz jednu i kroz 50 godina, te se vidi da ona i dalje sijedi okomiti profil vjetra u ovisnosti o visini.

Model udara vjetra (Extreme operating gust EOG) pokazuje udar u obliku sombrera, što ovisi visini te o brzini udara vjetra v_{gust} .

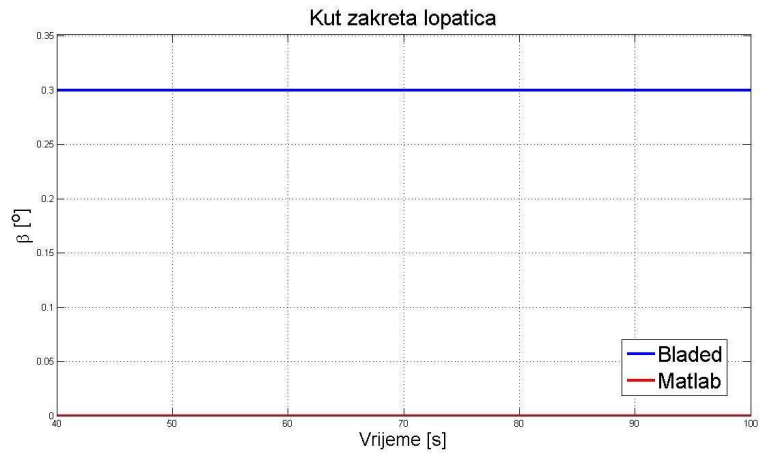


Sl. 15 Extreme operating gust - EOG (standard IEC 61400 -1)

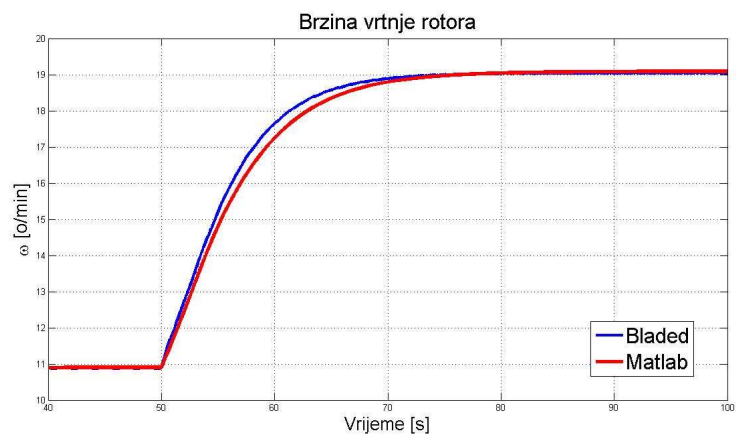
Standard IEC 61400 -1 također opisuje i ekstremnu promjenu smjera vjetra u Modelu ekstremne promjene smjera vjetra (Extreme direction change EDC) te udar vjetra zajedno sa promjenom smjera vjetra u Modelu koherentnog udara sa promjenom smjera (Extreme coherent gust with direction change ECD) .

Validacija je provedena na profesionalnom programskom paketu GH Bladed, koji sadrži vrlo detaljan model sustava vjetroagregata te omogućuje pouzdano simuliranje aerodinamičkih i strukturnih obilježja sustava. Iscrpne analize rezultata simulacija i njihove usporedbe s mjerenim podacima na stvarnim vjetroagregatima pokazale su da Bladed vrlo dobro modelira stvarne pojave koje se događaju u radu vjetroagregata.

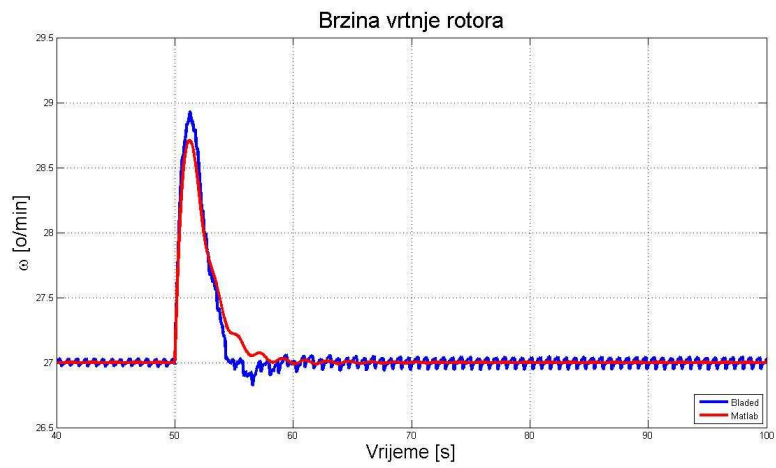
Važno je samo spomenuti da je minimalni kut zakreta lopatica u Bladed-u postavljen na 0.3° , a ne na 0° , kako je to namješteno kod simulacijskog modela u Matlab / Simulink okruženju pa sva malena odstupanja u mjerenjima prisutna su upravo zbog razlike u minimalnom kutu zakreta, što se vidi na sljedećoj slici.



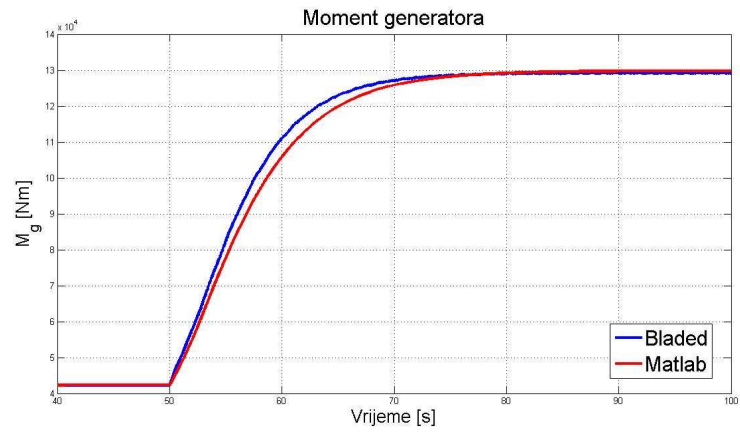
Sl. 16. Minimalni kut zakreta lopatica



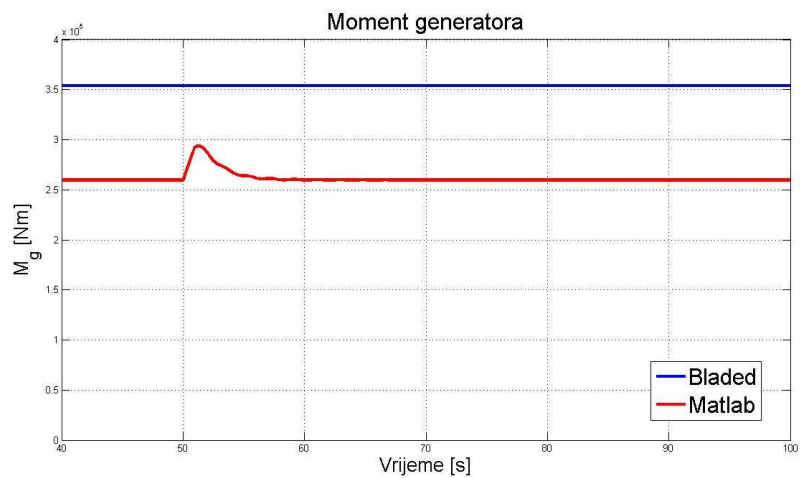
Sl. 17 Brzina vrtnje rotora ispod nazivne brzine vjetra



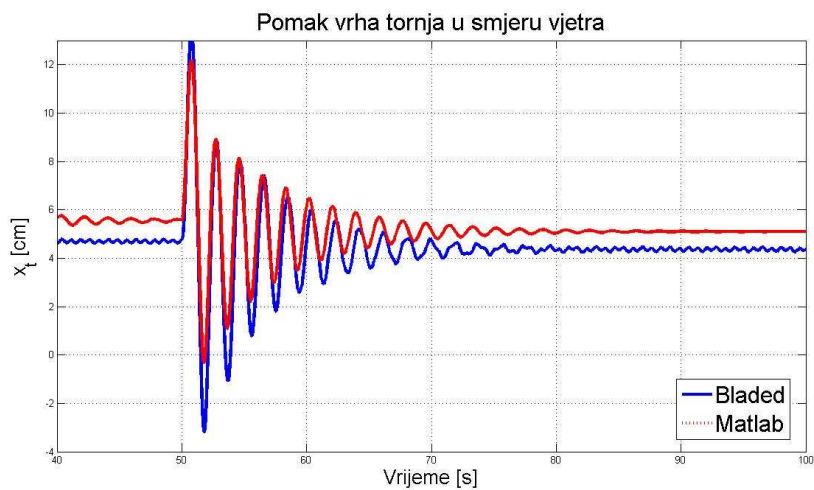
Sl. 18 Brzina vrtnje rotora iznad nazivne brzine vjetra



Sl. 18 Moment generatora ispod nazivne brzine vjetra



Sl. 19 Moment generatora iznad nazivne brzine vjetra



Sl. 21 Pomak vrha tornja iznad nazivne brzine vjetra

Simulacijski model vjetroagregata i vjetra stvoren u okruženju Matlab/Simulink pokazao je validacijom da uz opravdana malena odstupanja njegovo djelovanje ne odskaje od samog profesionalnog simulacijskog paketa GH Bladed što se može vidjeti i na priloženim dijagramima.