

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

ZAVRŠNI RAD br. 2499

**UPRAVLJANJE BRZINOM VRTNJE
VJETROAGREGATA IZNAD NAZIVNE BRZINE
VJETRA S MOGUĆNOŠĆU
KRATKOTRAJNOG PREOPTEREĆENJA
GENERATORA**

Ermin Zvizdić

Zagreb, srpanj 2012.

Zahvaljujem se svojem mentoru, doc. dr. sc. Mariu Vašku na strpljenju i pristupačnosti, te neposrednom voditelju, mag. ing. inf. et. Nikoli Huretu, na podršci, savjetima i pomoći pri radu na laboratorijskom vjetroatregatu.

Sažetak

Upravljanje brzinom vrtnje vjetroagregata iznad nazivne brzine vjetra s mogućnošću kratkotrajnog preopterećenja generatora. Konstantan porast kapaciteta vjetroenergetskih postrojenja uvjetovan rastućom potrebom za električnom energijom dovodi do zahtjeva za instalacijom vjetroagregata na područjima turbulentnog, jakog i nepredvidivog vjetra. U radu je razmotren napredni pristup upravljanja vjetroagregatom iznad nazivne brzine vjetra pomoću elektromagnetskog momenta generatora. Brža dinamika momenta omogućava bolju kompenzaciju udara vjetra, te smanjuje opterećenje servo sustava za zakret lopatica. Razmotrene su dvije metode upravljanja – simulacijska, te upravljanje uz promjenjivo i ograničeno pojačanje. Potonje se pokazalo boljim, jer ima mnogo bolje vladanje pri standardnim udarima vjetra, a odziv na ekstremne udare vjetra je potpuno zadovoljavajuć. Provedena je sinteza parametara u simulacijskom okruženju, nakon čega je regulacija provjerena na laboratorijskom vjetroagregatu na 13. katu Fakulteta elektrotehnike i računarstva. Razmotren je utjecaj upravljanja momentom na generator i frekvencijski pretvarač, te je utvrđeno da ovaj koncept ima smisla primjenjivati samo za vjetroagregate sa sinkronim generatorom i direktnim spojem bez multiplikatora.

Ključne riječi: vjetroagregat, režim iznad nazivne brzine, moment generatora, frekvencijski pretvarač

Summary

Regulation of the rotor speed above the nominal wind speed with the possibility of short – term generator torque overload Constant expansion of wind power plants and ever increasing need for energy have resulted in a need to install wind turbines in areas with complex terms, such as strong, turbulent and unpredictable wind. This paper considers an advanced approach to the wind turbine control above the nominal wind speed as it relies on combined use of pitch and generator torque control. Faster torque dynamics compensates the gust wind much better, thus relieving the pressure on the servo system for pitch control. Two methods were considered – simulation approach and the one with adaptable and limited gain. The latter produced better results when exposed to more common wind gusts, but had satisfactory results when exposed to extreme gusts. Controller parameters were determined in simulational environment, and then tested on the wind turbine located on the 13th floor of the college building. Impact on the frequency converter and the generator was considered, and a conclusion was made that this controlling concept only produces desirable results when applied to the wind turbines with synchronous generators and direct drive.

Keywords: Wind turbine, above nominal speed wind, generator torque, frequency converter

Sadržaj

1.	Uvod	1
2.	Struktura i modeliranje sustava vjetroagregata.....	3
2.1.	Podsustavi vjetroagregata.....	3
2.2.	Fizikalne osnove pretvorbe energije.....	7
2.3.	Matematički model vjetroagregata	12
2.3.1.	Klasični model i njegova linearizacija	12
2.3.2.	Po dijelovima afini model u okolini statičke karakteristike.....	17
3.	Kompenziranje udara vjetra pomoću momenta vjetroagregata.....	19
3.1.	Simulacijski postupak.....	20
3.1.1.	Simulacijski postupak – klasični model.....	27
3.1.2.	Simulacijski postupak – afini model.....	32
3.2.	Dodatno upravljanje momentom generatora uz ograničenja	34
3.2.1.	Metoda ograničenja - klasični model	35
3.2.2.	Metoda ograničenja – afini model	36
3.3.	Implementacija na platformi LabView.....	37
4.	Rezultati.....	39
4.1.	Klasični model - odzivi.....	40
4.2.	Afini model – odzivi	48
4.3.	Odziv realnog sustava.....	51
5.	Utjecaj preopterećenja momenta na rad generatora i frekvencijskog pretvarača.....	54
5.1.	Spajanje vjetroagregata na električnu mrežu	54
5.2.	Utjecaj metode upravljanja na frekvencijski pretvarač i generator	56
6.	Zaključak.....	58
7.	Literatura.....	60

Popis oznaka i kratica

crIO	Compact Reconfigurable Input/Output
FPGA	Field-Programmable Gate Array
AW2	AntiWindup 2
engl	engleski
PWM	Pulse Width Modulation

Popis tablica

Tablica 1 Nazivni podaci vjetroagregata.....	6
Tablica 2 Nazivni podaci generatora	6
Tablica 3 Nazivni podaci motora pogonskog ventilatora.....	6

Popis slika

Slika 1 Laboratorijski vjetroagregat na 13. katu FER-a	3
Slika 2 Shema podsustava za pretvorbu mehaničke u električnu energiju	4
Slika 3 Laboratorijski vjetroagregat u zračnom tunelu.....	5
Slika 4 Sustav upravljanja vjetroagregatom s komunikacijskim sučeljem.....	7
Slika 5 Ekstremni udar vjetra	26
Slika 6 Simulink shema za proračun optimalnih parametara	30
Slika 7 Shema pomoću koje se provjerava odziv	31
Slika 8 Statička karakteristika prolazi kroz regije	32
Slika 9 Shema upravljanja pri promjenjivom pojačanju momenta s ograničenjem	36
Slika 10 Upravljački algoritam u LabViewu	37
Slika 11 Upravljačko sučelje u LabViewu	38
Slika 12 Frekvencijska karakteristika otvorenih regulacijskih krugova – ista radna točka	39
Slika 13 Frekvencijske karakteristike otvorenih regulacijskih krugova - različite radne točke	40
Slika 14 Brzina vrtnje pri odzivu na ekstremni vjetar	41
Slika 15 Kut zakreta pri odzivu na ekstremni vjetar.....	41
Slika 16 Kut zakreta lopatica pri odzivu na ekstremni udar vjetra	42
Slika 17 Brzina vrtnje rotora pri odzivu na ekstremni udar vjetra	43
Slika 18 Snaga generatora pri odzivu na ekstremni udar vjetra.....	43
Slika 19 Moment generatora pri odzivu na ekstremni udar vjetra	44
Slika 20 Skokovite promjene vjetra	46
Slika 21 Kut zakreta lopatica pri odzivu na skokovite promjene vjetra.....	46
Slika 22 Brzina vrtnje rotora pri odzivu na skokovite promjene vjetra	47
Slika 23 Snaga generatora pri odzivu na skokovite promjene vjetra	47
Slika 24 Moment generatora pri odzivu na skokovite promjene vjetra	48
Slika 25 Kut zakreta lopatica pri odzivu na ekstremni udar vjetra	49
Slika 26 Brzina vrtnje pri odzivu na ekstremni udar vjetra.....	49
Slika 27 Snaga generatora pri odzivu na ekstremni udar vjetra.....	50
Slika 28 Moment generatora pri odzivu na ekstremni udar vjetra	50
Slika 29 Brzina ventilatora	52
Slika 30 Brzina vrtnje pri odzivu na udar vjetra s ventilatora.....	52
Slika 31 Moment generatora pri odzivu na udar vjetra s ventilatora	53
Slika 32 Kut zakreta jedne od lopatica pri odzivu na udar vjetra s ventilatora	53
Slika 33 Spoj vjetroagregata na mrežu pogodan za realizaciju obrađivane metode upravljanja	55

1. Uvod

Uslijed povećanih zahtjeva za smanjenje emisije CO₂ i ostalih štetnih stakleničkih plinova u Zemljinu atmosferu zabilježen je nagli porast korištenja energije vjetra za proizvodnju električne energije. Kako su se gotovo sve zemlje svijeta obvezale povećati udio obnovljivih izvora energije u domaćoj proizvodnji, potpisivanjem raznih protokola i međunarodnih dogovora, izvjesno je da će se povećanje udjela i razvoj tehnologije iskorištavanja energije vjetra nastaviti u budućnosti. Kako bi se uspješno postigla ukupna željena instalirana snaga do 2020. godine od 180 GW [1], nužno je osim povećanja samog broja vjetroagregata napraviti iskorak u razvoju tehnologije konstrukcije vjetroagregata i pretvorbe energije vjetra.

Zahtjevi na sustav upravljanja vjetroagregatom vrlo su strogi zbog toga što su vjetroagregati postrojenja bez stalne ljudske posade, često postavljeni vrlo daleko od naseljenih mjesta na nedostupnim lokacijama. Kako snaga raste s trećom potencijom brzine vjetra, jasno je da će vjetroagregat imati vrlo specifične režime rada. Ispod određene minimalne brzine vjetra lopatice vjetroagregata miruju. Pri dovoljnim, ali slabijim brzinama vjetra snaga vjetra ispod nazivne snage generatora vjetroagregata. Cilj upravljanja u ovom režimu je maksimizirati iskorištenje energije vjetra. Pri jačim vjetrovima snaga vjetra prijeđe nazivnu snagu generatora, pa je potrebno ograničiti snagu vjetroagregata, odnosno brzinu vrtnje rotora. Iznad nazivne brzine vjetra brzina vrtnje ograničava se zakretanjem lopatica oko njihove uzdužne osi. Kako njihovo zakretanje utječe na dinamiku (njihanje) tornja vjetroagregata, potrebno je pri projektiranju sustava upravljanja paziti na utjecaj upravljačkih radnji na ostale varijable sustava, odnosno na stabilnost samog vjetroagregata.

Tema ovog rada je nadogradnja standardnog upravljanja iznad nazivne brzine vjetra - PI regulacije kuta zakreta lopatica, s ciljem bolje kompenzacije udara vjetra. Uvodi se upravljanje momentom iznad nazivne brzine vjetra zbog toga što moment generatora omogućuje znatno bržu kompenzaciju udara vjetra upravo zbog svoje brze dinamike.

U drugom poglavlju uvedeni su osnovni pojmovi koji opisuju sustav vjetroagregata, te fizikalna osnova pretvorbe energije vjetra u vrtnju rotora vjetroturbine. Naposljetku, temeljem uvedenog opisa podsustava iznosi se pojednostavljeni eksplicitni matematički model neophodan za projektiranje sustava upravljanja vjetroagregata.

U trećem poglavlju razmotreni su postupci projektiranja regulatora brzine vrtnje rotora vjetroagregata iznad nazivne brzine vjetra uz dodatno upravljanje momentom. Uvedeno je više metoda, te se uz svaku navode i pojašnjenja i provedeni proračuni. Razmatra se implementacija u simulacijskom okruženju MATLAB – Simulink, te aplikacija na realni sustav, laboratorijski vjetroagregat na 13. katu zgrade Fakulteta elektrotehnike i računarstva preko platforme LabView.

U četvrtom poglavlju iznesena je usporedba rezultata dobivenih provedenim metodama, te komentirana kvaliteta odziva na realnom sustavu.

U petom poglavlju razmotren je utjecaj preopterećenja na rad generatora i AC/DC/AC pretvarača. Naposljetku, izvedeni su zaključci o tehničkim ograničenjima pri radu u takvom režimu.

U šestom poglavlju dan je zaključak koji se sastoji od osvrta na postignute rezultate, te moguće postupke koji vode daljnjem poboljšanju odziva pri kompenzaciji vjetra.

U sedmom poglavlju nalazi se popis korištene literature i izvora informacija.

2. Struktura i modeliranje sustava vjetroagregata

Slijedi nekoliko potpoglavlja u kojima se navode osnovni podsustavi vjetroagregata, osnovni principi njihova rada, fizikalne osnove i matematički izrazi koji opisuju pretvorbu energiju vjetra u mehaničku energiju vrtnje rotora, odnosno električnu energiju na izlaznim stezaljkama generatora. Na kraju, uvodi se pojednostavljeni model korišten za sintezu sustava upravljanja.

2.1. Podsustavi vjetroagregata

Vjetroagregat je mehanički sustav koji kinetičku energiju vjetra pretvara u električnu energiju. Vjetroagregat se može podijeliti na nekoliko podsustava:

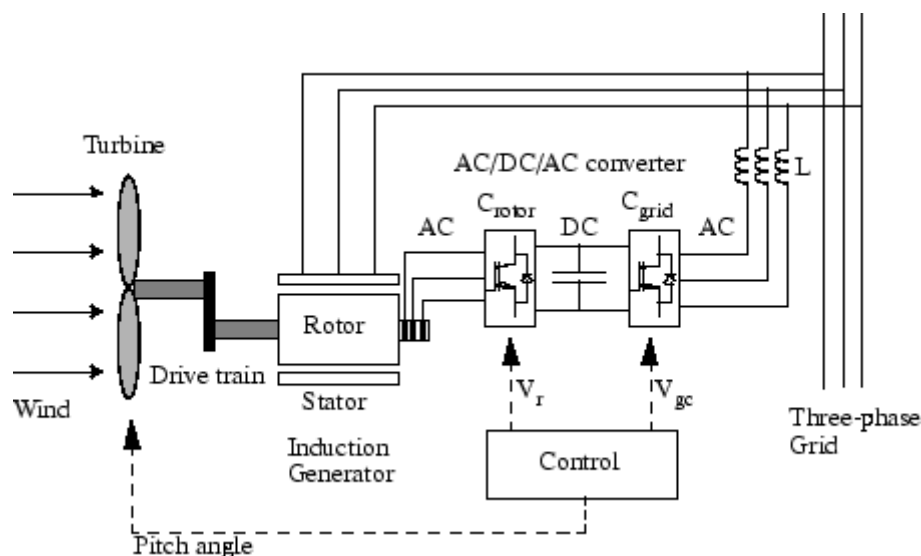
- Podsustav za aerodinamičku pretvorbu vjetra
- Podsustav za pretvorbu mehaničke energije vrtnje rotora u električnu
- Potporna konstrukcija i dodatna oprema
- Sustav upravljanja

Podsustav za aerodinamičku pretvorbu energije, odnosno vjetroturbina, sastoji se od lopatica i glavčine za koju su lopatice pričvršćene. Laboratorijski vjetroagregat na 13. katu, na kojem je provjeren sustav projektiranog upravljanja, ima tri lopatice, kao i većina današnjih vjetroagregata u megavatnoj klasi. Pomoću glavčine prenosi se zakretni moment s vjetroturbine na rotor generatora. Slika 11 prikazuje glavčinu i lopatice laboratorijskog vjetroagregata.



Slika 1 Laboratorijski vjetroagregat na 13. katu FER-a

Drugi podsustav čine generator, izmjenični AC/DC/AC pretvarač, mehanički prijenosnik energije (multiplikator), te transformator, kako prikazuje slika 2.



Slika 2 Shema podsustava za pretvorbu mehaničke u električnu energiju

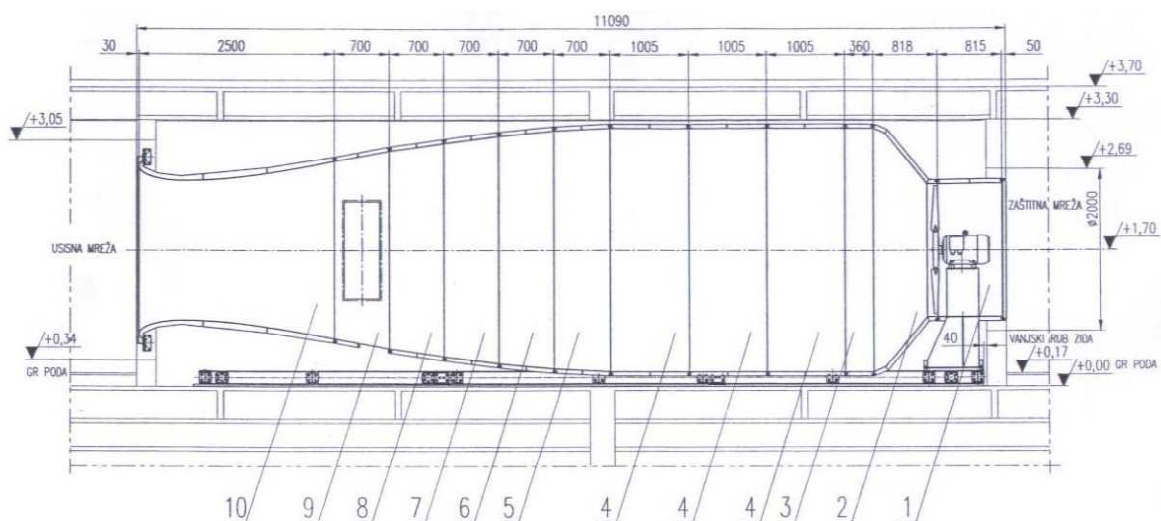
Generatori mogu biti sinkroni i asinkroni, a sama izvedba i izgled mogu varirati ovisno o snazi vjetroagregata i njegovoj izvedbi. Frekvencijski pretvarač sa istosmjernim međukrugom služi za pretvorbu frekvencije električne energije na izlazu iz generatora na frekvenciju mreže (50 Hz). Kako frekvencija električne energije ovisi izravno o brzini vrtnje generatora, jasno je da se uporabom frekvencijskog pretvarača omogućuje promjenjivost i relativna neovisnost brzine vrtnje generatora o frekvenciji mreže. Kako se vjetroturbine obično vrte brzinom od 15 – 30 o/min, što je relativno sporo, instaliraju se mehanički prijenosnici snage između generatora i vjetroturbine kako bi se mehanička brzine vrtnje prilagodila brzini vrtnje rotora generatora. Takvi mehanički prijenosnici zovu se multiplikatori i obično se realiziraju zupčaničkim prijenosom.

Generator se obično javlja u dvije konfiguracije [60]. Ukoliko je generator asinkron, stator je spojen direktno na mrežu, a rotor se spaja preko frekvencijskog pretvarača. U drugoj izvedbi, stator i rotor sinkronog generatora spajaju se preko frekvencijskog pretvarača.

Potporna konstrukcija vjetroagregata nosi vjetroturbinu, generator i ostatak opreme. Poželjno je sustav izdići na što veću visinu radi boljeg iskorištenja vjetra, pa se konstrukcija sastoji od glavnog nosača, na kojem je montirana kompletna oprema vjetroagregata, te toranj na kojem se nalazi nosač. Visina tornja obično odgovara promjeru rotora.

Sustavi upravljanja vjetroagregata obično se izvode digitalno pomoću industrijskih računala ili programirljivih logičkih kontrolera. Glavne zadaće sustava upravljanja su reguliranje procesnih veličina, omogućenje dijagnostike i pohranjivanje potrebnih podataka.

U nastavku je ukratko iznesen opis laboratorijskog vjetroagregata na vrhu zgrade Fakulteta elektrotehnike i računarstva, dok se detaljniji podaci mogu naći u [60]. Vjetroagregat u zračnom tunelu prikazuje slika 3.



Slika 3 Laboratorijski vjetroagregat u zračnom tunelu

Laboratorijski vjetroagregat je projektiran kao umanjena verzija vjetroagregata iz megavatne klase, pri čemu su zadržana su sva bitna svojstva megavatnog vjetroagregata, od aerodinamičke karakteristike vjetroagregata, preko napadnih kutevi lopatica do omjera obodne brzine rotora i brzine vjetra. Toranj također sadrži oscilatorna svojstva vjetroagregata iz megavatne klase. Nazivni podaci vjetroagregata nalaze se u tablici 1, nazivni podaci generatora u tablici 2, a nazivni podaci motora pogonskog ventilatora u tablici 3.

Tablica 1 Nazivni podaci vjetroagregata

Snaga	75.4 W ¹
Brzina vrtnje	240 o/min
Moment generatora	3 Nm
Brzina vjetra	5.1327 m/s

Tablica 2 Nazivni podaci generatora

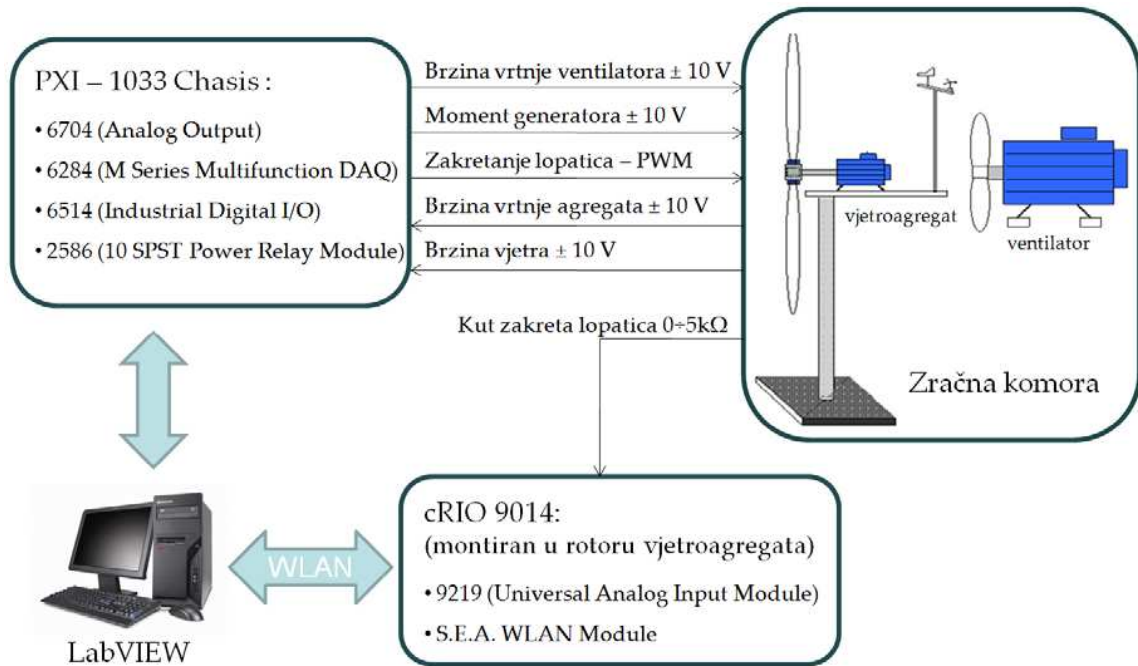
Nazivna naga	3.77 kW
Nazivna struja	8.00 A
Nazivni moment	12.00 Nm
Broj pari polova	4

Tablica 3 Nazivni podaci motora pogonskog ventilatora

Nazivna naga	11.0 kW
Nazivna struja	25.5 A
Nazivni moment	143.9 Nm
Broj pari polova	4

Elektromehanički moment generatora moguće je mijenjati preko frekvencijskog pretvarača. Lopatice vjetroagregata napravljene su od lijevanog aluminija i duge su 1.2 m. Uz svaku lopaticu korišten je istosmjerni servo motor pomoću kojeg je moguće lopaticu zakretati oko njezine uzdužne osi. Vjetar koji pokreće vjetroagregat moguće je generirati pomoću ventilatora smještenog na kraju zračnog tunela. Slika 4 prikazuje sustav upravljanja sa komunikacijskim sučeljem.

¹ Nazivni podaci nešto su manji od navedenih u [2], jer su provedene naknadne procjene optimalnih točaka rada i nazivnih parametara



Slika 4 Sustav upravljanja vjetroagregatom s komunikacijskim sučeljem

PXI -1033 koristi se za cjelokupnu komunikaciju s procesom, a platforma LabView omogućuje povezivanje računala sa komunikacijskim sučeljem, te implementaciju upravljačkog algoritma. Mjerenje kuta zakreta lopatica provodi se pomoću cRIO 9014, koji je montiran u rotoru vjetroagregata. Riječ je o National Instruments uređaju namijenjenom za rad u stvarnom vremenu opremljenom FPGA sklopovljem, što omogućava brz rad s ulaznim i izlaznim signalima. Kut zakreta lopatice određuje se očitavanjem otpora potenciometra ugrađenog u korijen lopatice – zakretanjem lopatice mijenja se otpor na potenciometru.

2.2. Fizikalne osnove pretvorbe energije

Modeliranje vjetroagregata obično se provodi pomoću dvije teorije [1]. Rotor vjetroturbine može se promatrati kao homogeni disk, umetnut u struju zraka konstantne brzine. Tada se rotor promatra kao propusna prepreka, koja preuzima dio energije iz struje zraka i pritom utječe na nju. Nakon toga u model se uključuje i vrtnja, pa se prvi pristup obično naziva model rotirajućeg diska. Taj pristup zanemaruje postojanje lopatica i njihovo djelovanje.

Nešto precizniji model daje teorija segmenata lopatice. Analizira se aerodinamička sila koja se javlja na lopaticama, te se postavljaju jednadžbe za uzgon i potisak, čijom se integracijom po dužini lopatice dobivaju izrazi za silu i moment na rotoru. Integracijom ovih dviju teorija dobivamo najpotpuniji opis modela vjetroagregata.

Kod modela aktuatornog diska pretpostavlja se da je strujanje zraka nevizkozno i stacionarno, odnosno da je volumni protok zraka pod utjecajem diska konstantan. Dakle, volumni i maseni protok prije diska, kroz sami aktuatorski disk i nakon diska su konstantni. Brzina vjetra pred diskom, odnosno na samom disku pada, dok tlak raste ispred diska, a neposredno nakon diska skokovito padne zbog postojanja vrtložnog strujanja. Tlak zraka se na dovoljno velikoj udaljenosti od diska ponovno vraća na vrijednost atmosferskog tlaka. Gubitak brzine u odnosu na brzinu vjetra daleko ispred diska opisuje se koeficijentom aksijalnog nastrujavanja a :

$$v_D = (1 - a)v_{vj,0} \quad (2.2.1)$$

Kako se dogodila promjena brzine strujanja vjetra uslijed djelovanja diska, promijenila se i količina gibanja u točki daleko iza aktuatorskog diska u odnosu na točku daleko ispred njega. Derivacijom promjene količine gibanja dobivamo promjenu sile uzrokovanu padom tlaka iza diska:

$$\Delta F_D = \Delta \frac{dp_{z,uk}}{dt} = (p_D^+ - p_D^-)A_D \quad (2.2.2)$$

A_D predstavlja površinu diska, p_D^+ i p_D^- tlak neposredno ispred, odnosno iza diska.

Zamislivši vjetar obuhvaćen diskom kao strujnu cijev možemo koristiti Bernoullijeve jednadžbe za točku ispred diska i onu neposredno prije diska, te za točke neposredno nakon i daleko iza diska. Pomoću Bernoullijevih jednadžbi, te izraza 2.2.1 i 2.2.2 dobivamo izraze za brzinu vjetra u dalekoj točki iza diska (2.2.3), te za snagu preuzetu od aktuatorskog diska (2.2.4):

$$v_S = (1 - 2a)v_{vj,0} \quad (2.2.3)$$

$$P_D = F_D v_D = 2\rho_z A_D v_{vj,0}^3 a(1-a)^2 \quad (2.2.4)$$

Ako snagu vjetra izrazimo kao vremensku promjenu njegove kinetičke energije, te uzmemo u obzir stacionarnost strujanja dobivamo izraz za snagu vjetra:

$$P_{vj} = \frac{dE_{kz}}{dt} = \frac{1}{2} \frac{(dm_z v_z^2)}{dt} = \frac{1}{2} \rho_z A_D v_{vj,0}^3 \quad (2.2.5)$$

Važno je uočiti da je ovisnost snage o brzini vjetra kubna, odnosno da snaga vrlo brzo i nelinearno raste s porastom brzine vjetra. Omjerom snage preuzete na disku (2.2.4) i ukupne snage vjetra (2.2.5) dobivamo omjer - C_P , odnosno koeficijent snage:

$$C_P = \frac{P_D}{P_{vj}} = 4a(1-a)^2 \quad (2.2.6)$$

Maksimalni iznos snage koji turbina može preuzeti dobiva se uz $a = 1/3$, odnosno

$$C_{Pmax} = \frac{16}{27} \quad (2.2.7)$$

Koeficijent 2.2.7 predstavlja fizičku granicu iskorištenja granice vjetra neke vjetro turbine, te se još naziva Betzov koeficijent. Model aktuatorskog diska daje osnovnu predodžbu o iskoristivosti snage vjetra, ali zanemaruje vrtnju rotora i posljedice vrtnje rotora na okolni zrak. Zbog toga se homogeni statički disk nadomješta rotirajućim diskom sa beskonačno mnogo infinitezimalno tankih lopatica. Time se javlja tangencijalna komponenta brzine vjetra, čija se pojava opisuje koeficijentom tangencijalnog nastrujavanja a' :

$$v_{D,t} = a' \omega r \quad (2.2.8)$$

ω predstavlja brzinu rotirajućeg diska, a r njegov radijus.

Pola povećanja iznosa tangencijalne brzine događa se prije, a pola poslije diska (tako je određen koeficijent a'). Kako je tangencijalna brzina prije diska nepostojeća, ukupna promjena tangencijalne komponente brzine vjetra na disku iznosi:

$$\Delta v_{z,t,uk} = 2a'\omega r \quad (2.2.9)$$

Promjenom tangencijalne brzine mijenja se kutna količina gibanja. Kako ona ovisi o radijusu, promatra se promjena kutne količine gibanja zraka pri strujanju kroz tanki kružni vijenac na disku. Infinitesimalna promjena kutne količine gibanja ima smjer suprotan smjeru vrtnje rotirajućeg diska, a iznos joj je dan sa:

$$\delta L_z = \rho_z \delta A_D x_z 2a'\omega r^2 \quad (2.2.10)$$

Derivacijom kutne količine gibanja dolazimo do momenta zakreta struje zraka koja prolazi kroz tanki kružni vijenac. Kako je vrtnja struje zraka uzrokovana samo diskom, moment zakreta diska jednak je momentu zakreta struje zraka. Umnoškom momenta zakreta sa brzinom rotacije diska dobivamo snagu tankog kružnog vijenca:

$$\delta P_t = \frac{d\delta L_z}{dt} \omega = \rho_z \delta A_D (1-a) v_{vj,0} 2a'\omega^2 r^2 \quad (2.2.11)$$

Kako je snaga rotirajućeg diska jednaka snazi preuzetoj iz vjetra, izjednačavanjem izraza 2.2.5 i 2.2.11 dobije se povezanost koeficijenata aksijalnog i tangencijalnog nastrujavanja:

$$a(1-a) = \lambda_r a' \quad (2.2.12)$$

λ_r predstavlja lokalni omjer brzina, te ako se r zamijeni radijusom diska R dobivamo izraz za globalni omjer brzina:

$$\lambda = \frac{\omega R}{v_{vj,0}} \quad (2.2.13)$$

Integracijom po radijusu kruga dobiva se izraz iz kojeg se jasno vidi da je snaga vjetra predana rotirajućem disku ovisna o koeficijentima nastrojavanja i lokalnom omjeru brzina. Izražavanjem koeficijenta snage C_P vidljivo je da je ovisan o lokalnom omjeru brzina, odnosno snaga se za različite iznose brzine vrtnje diska, a jednake brzine vjetra može razlikovati.

Teorija segmenata lopatica konačno objašnjava razlog pretvorbe energije – karakteristični presjek lopatica rotora, njihov aerodinamički profil. Princip rada je sličan letu zrakoplova – kako tlak ispod i iznad lopatice nisu jednaki zbog različitih brzina strujanja u tim područjima, nastaje sila uzgona F_L i sila otpora F_D . Ovisno o karakteristikama i geometriji profila, određuju se odgovarajući koeficijenti C_L i C_D . U ovisnosti o koeficijentima i napadnom kutu α , kutu između tetive profila lopatice i smjera strujanja zraka, određuje se doprinos spomenutih sila na tankom segmentu lopatice. Djelovanjem sile otpora paralelne sa smjerom prividne brzine vjetra (rezultanta zbroja obodne i tangencijalne komponente brzine na lopatici), te sile uzgona okomite na smjer prividne brzine vjetra, nastaju zakretna i potisna sila. Zakretna sila uzrokuje zakretni moment vjetroturbine, a potisna sila opterećuje konstrukciju vjetroagregata. Ako je kut nastrojavanja ϕ kut između prividne i obodne brzine, dolazi se do sljedećih izraza:

$$\delta F_t = \frac{1}{2} \rho_z v_{vj,p}^2 l_t [C_L \sin \phi - C_D \cos \phi] \delta r$$

$$\delta F_p = \frac{1}{2} \rho_z v_{vj,p}^2 l_t [C_L \cos \phi - C_D \sin \phi] \delta r$$

(2.2.14)

Kut nastrojavanja direktno ovisi o kutu zakreta lopatica β , koji je pogodan za upravljanje brzinom vrtnje.

Objedinjavanjem ovih teorija dolazimo do potpunog modela. Izjednačavanjem zakretnog momenta infinitezimalnog elementa površine diska i doprinosa sile zakreta na svih N lopatica dobivamo složene izraze iz kojih se koeficijenti nastrojavanja proračunavaju iterativno. Tako se proračunati koeficijenti zadaju kao pregledne tablice. Naprimjer, koeficijent C_P predodređen je kao pregledna tablica u ovisnosti o omjeru brzina i kutu zakreta lopatica, ako možemo pretpostaviti skokovite promjene brzine vjetra na rotoru turbine.

U 2.2.15, 2.2.16, 2.2.17 prikazani su izrazi pomoću kojih numeričkom integracijom dobivamo ukupni zakretni moment, zakretnu i potisnu silu:

$$\frac{\Delta M_t}{\Delta r} = 4\pi\rho_z v_{vj,0} a'(1-a)\omega r^3 \quad (2.2.15)$$

$$\frac{\Delta F_t}{\Delta r} = \frac{1}{2}N\rho_z v_{vj,p}^2 l_t [C_L \sin\phi - C_D \cos\phi] \quad (2.2.16)$$

$$\frac{\Delta F_p}{\Delta r} = \frac{1}{2}N\rho_z v_{vj,p}^2 l_t [C_L \cos\phi + C_D \sin\phi] \quad (2.2.17)$$

Temeljem gornjih izraza moguća je aktivna i pasivna regulacija ponašanja vjetroagregata. U ovom radu bit će razmotrena aktivna regulacija zakretanjem lopatica i forsiranjem momenta generatora.

2.3. Matematički model vjetroagregata

Temeljem relacija dobivenih u prethodnom potpoglavlju, ovdje se iznose temeljne relacije i jednadžbe koje modeliraju ponašanje vjetroagregata. Potpoglavlje 2.3.1 iznosi klasični model, koji se zbog vrlo približno određenih parametara ne slaže sa realnim sustavom (laboratorijskim vjetroagregatom). Potpoglavlje 2.3.2 ukratko pojašnjava po dijelovima afini model vjetroagregata u okolini njegove statičke karakteristike, čije se simulacijsko vladanje bolje slaže s realnim sustavom.

2.3.1. Klasični model i njegova linearizacija

Iz izraza 2.2.5 i 2.2.6 dobiva se da je snaga preuzeta od vjetroturbine jednaka:

$$P_t = \frac{1}{2}\rho_z R^2 \pi v_{vj}^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (2.3.1.1)$$

Utjecaj koeficijenta nastrujavanja opisan je preglednom tablicom C_p , uz pretpostavku skokovite promjene vjetra na rotoru vjetroturbine. Aerodinamički moment može se dobiti kao količnik snage i brzine vrtnje, pa se uvodi koeficijent momenta C_Q , kao količnik koeficijenta snage i omjera brzina. Izraz za aerodinamički moment:

$$M_t = \frac{P_t}{\omega} = \frac{1}{2} \rho_z R^3 \pi v^2 v_j C_q(\lambda, \beta) \quad (2.3.1.2)$$

Dinamička jednadžba koja opisuje promjenu brzine vrtnje rotora u ovisnosti o aerodinamičkom momentu i momentu generatora dana je sa 2.3.1.3:

$$M_t - M_g = J_t \frac{d\omega}{dt} \quad (2.3.1.3)$$

J_t predstavlja moment inercije turbine, a M_g elektromagnetski moment generatora.

Sila potiska izražena je preko bezdimenzionalnog koeficijenta potiska C_t :

$$F_p = \frac{1}{2} \rho_z R^2 \pi v^2 v_j C_t(\lambda, \beta) \quad (2.3.1.4)$$

Koeficijenti C_p , C_t , C_q proračunati su prije sinteze regulatora i dani kao pregledne tablice u ovisnosti o omjeru brzina i kutu zakreta lopatica, kao što je spomenuto u potpoglavlju 2.2.

Kako se pod utjecajem sile potiska javljaju vibracije tornja, brzina vjetra u gornjim relacijama zamjenjuje se relativnom brzinom u odnosu na toranj koji podrhtava, a vibracije tornja modeliraju se oscilatornim sustavom drugog reda. Dakle, relativna brzina v_{vj} postaje:

$$v_{vj} \rightarrow v_{vj} - \dot{x}_t \quad (2.3.1.5)$$

Njihanje tornja opisuje sljedeća diferencijalna jednadžba:

$$F_p = M\ddot{x}_t + D\dot{x}_t + Cx_t \quad (2.3.1.6)$$

Koeficijenti M - modalna masa tornja, D - modalno prigušenje tornja, te C – modalna krutost tornja prethodno su određeni tako da odgovaraju parametrima karakterističnima za vjetroagregate megavatne klase. Vibriranje lopatica je zanemareno zbog marginalnog utjecaja na sustav, odnosno relativne krutosti lopatica u odnosu na toranj. Tako modificirane jednadžbe predstavljaju konačni nelinearni model vjetroagregata.

$$\begin{aligned}
 M_t - M_g &= J_t \dot{\omega} \\
 M_t &= \frac{1}{2} \rho_z R^3 \pi (v_{vj} - \dot{x}_t)^2 C_q(\lambda, \beta) \\
 F_p &= \frac{1}{2} \rho_z R^2 \pi (v_{vj} - \dot{x}_t)^2 C_t(\lambda, \beta) \\
 F_p &= M \ddot{x}_t + D \dot{x}_t + C x_t
 \end{aligned}$$

(2.3.1.7)

Za potrebe simulacije pri određivanju parametara regulatora, nelinearni model lineariziran je razvojem u Taylorov red u okolini radnih točaka za koje je regulator projektiran. Linearizirane jednadžbe za M_t i F_p , zajedno sa odgovarajućim koeficijentima prikazani su u 2.3.1.8.

$$\begin{aligned}
 \Delta M_t &= \left. \frac{\partial M_t}{\partial v_{vj}} \right|_{RT} (\Delta v_{vj} - \Delta \dot{x}_t) + \left. \frac{\partial M_t}{\partial \beta} \right|_{RT} \Delta \beta + \left. \frac{\partial M_t}{\partial \omega} \right|_{RT} \Delta \omega \\
 \Delta F_p &= \left. \frac{\partial F_p}{\partial v_{vj}} \right|_{RT} (\Delta v_{vj} - \Delta \dot{x}_t) + \left. \frac{\partial F_p}{\partial \beta} \right|_{RT} \Delta \beta + \left. \frac{\partial F_p}{\partial \omega} \right|_{RT} \Delta \omega \\
 \left. \frac{\partial M_t}{\partial v_{vj}} \right|_{RT} &:= M'_v & \left. \frac{\partial M_t}{\partial \beta} \right|_{RT} &:= M'_\beta & \left. \frac{\partial M_t}{\partial \omega} \right|_{RT} &:= M'_{\omega'} \\
 \left. \frac{\partial F_p}{\partial v_{vj}} \right|_{RT} &:= F'_v & \left. \frac{\partial F_p}{\partial \beta} \right|_{RT} &:= F'_\beta & \left. \frac{\partial F_p}{\partial \omega} \right|_{RT} &:= F'_{\omega'}
 \end{aligned}$$

(2.3.1.8)

Prema (2.3.1.8), vrijedi:

$$\left. \frac{\partial M_t}{\partial v_{vj}} \right|_{RT} = \frac{1}{2} \rho_z R^3 \pi \left(2v_{vj,RT} C_q(\lambda_{RT}, \beta_{RT}) + v_{vj,RT}^2 \left. \frac{\partial C_q(\lambda, \beta)}{\partial \lambda} \right|_{RT} \left. \frac{\partial \lambda}{\partial v_{vj}} \right|_{RT} \right)$$

$$\left. \frac{\partial M_t}{\partial \beta} \right|_{RT} = \frac{1}{2} \rho_z R^3 \pi \cdot v_{vj,RT}^2 \left. \frac{\partial C_q(\lambda, \beta)}{\partial \beta} \right|_{RT}$$

$$\left. \frac{\partial M_t}{\partial \omega} \right|_{RT} = \frac{1}{2} \rho_z R^3 \pi \cdot v_{vj,RT}^2 \left. \frac{\partial C_q(\lambda, \beta)}{\partial \lambda} \right|_{RT} \left. \frac{\partial \lambda}{\partial \omega} \right|_{RT}$$

$$\left. \frac{\partial M_t}{\partial v_{vj}} \right|_{RT} = \frac{1}{2} \rho_z R^2 \pi \left(2v_{vj,RT} C_q(\lambda_{RT}, \beta_{RT}) + v_{vj,RT}^2 \left. \frac{\partial C_q(\lambda, \beta)}{\partial \lambda} \right|_{RT} \left. \frac{\partial \lambda}{\partial v_{vj}} \right|_{RT} \right)$$

$$\left. \frac{\partial M_t}{\partial \beta} \right|_{RT} = \frac{1}{2} \rho_z R^2 \pi \cdot v_{vj,RT}^2 \left. \frac{\partial C_q(\lambda, \beta)}{\partial \beta} \right|_{RT}$$

$$\left. \frac{\partial M_t}{\partial \omega} \right|_{RT} = \frac{1}{2} \rho_z R^2 \pi \cdot v_{vj,RT}^2 \left. \frac{\partial C_q(\lambda, \beta)}{\partial \lambda} \right|_{RT} \left. \frac{\partial \lambda}{\partial \omega} \right|_{RT}$$

$$\left. \frac{\partial \lambda}{\partial \omega} \right|_{RT} = \left. \frac{R}{v_{vj}} \right|_{RT}$$

$$\left. \frac{\partial \lambda}{\partial v_{vj}} \right|_{RT} = - \left. \frac{\omega R}{v_{vj}^2} \right|_{RT}$$

(2.3.1.8-1)

Odgovarajuće linearizirane prijenosne funkcije glase:

$$\begin{aligned}
 M_t(s) - M_g(s) &= J_t s \omega(s) \\
 M_t(s) &= M'_v (v_{vj}(s) - s x_t(s)) + M'_\beta \beta(s) + M'_\omega \omega(s) \\
 F_p(s) &= F'_v (v_{vj}(s) - s x_t(s)) + F'_\beta \beta(s) + F'_\omega \omega(s) \\
 F_p(s) &= M s^2 x_t(s) + D s x_t(s) + C x_t(s)
 \end{aligned}
 \tag{2.3.1.9}$$

Radi potpunosti, navode se linearizirane prijenosne funkcije po kutu zakreta lopatica, brzini vjetra i momentu generatora, jer su potrebne za simulacijski proračuna parametara realiziranog regulatora.²

$$\begin{aligned}
 G_{vj}(s) &= \frac{\omega(s)}{v_{vj}(s)} = \\
 &= \frac{M'_v (M s^2 + D s + C)}{J_t M s^3 + (J_t (D + F'_v) - M'_\omega) s^2 + (J_t C + M'_v F'_\omega - M'_\omega (D + F'_v)) s - M'_\omega C} \\
 G_\beta(s) &= \frac{\omega(s)}{\beta(s)} = \\
 &= \frac{M'_\beta M s^2 + (M'_\beta (D + F'_v) - M'_v F'_\beta) s + M'_\beta C}{J_t M s^3 + (J_t (D + F'_v) - M'_\omega) s^2 + (J_t C + M'_v F'_\omega - M'_\omega (D + F'_v)) s - M'_\omega C} \\
 G_{Mg}(s) &= \frac{\omega(s)}{M_g(s)} = \\
 &= \frac{M s^2 + (D + F'_v) s + C}{J_t M s^3 + (J_t (D + F'_v) - M'_\omega) s^2 + (J_t C + M'_v F'_\omega - M'_\omega (D + F'_v)) s - M'_\omega C}
 \end{aligned}
 \tag{2.3.1.10}$$

Izvedene prijenosne funkcije vrlo lako se izvode u okruženju Simulink / MATLAB, i osnova su za projektiranje upravljačkih algoritama.

² Navedene prijenosne funkcije bit će modificirane za proporcionalno pojačanje momenta generatora uvedenog radi kompenzacije udara momentom.

2.3.2. Po dijelovima afini model u okolini statičke karakteristike

Za potrebe projektiranja regulatora korišten je model vjetroagregata izveden u [60]. Nestandardni afini model koristi se radi velike razlike određenog klasičnog modela i stvarnog procesa. Po dijelovima afini modeli dobivaju se particioniranjem cjelokupnog stanja-ulaza sustava na konačan broj poliedarskih područja – politopa, nad kojima vrijedi afina funkcija preslikavanja vrijednosti ulaznih veličina i stanja procesa na izlaz – podmodel. Po dijelovima afini modeli vrlo dobro estimiraju nelinearne sustave i sustave s diskontinuitetima, što ih čini pogodnima za modeliranje sustava vjetroagregata. U ovom radu neće se razrađivati postupak projektiranja po dijelovima afinog modela zbog složenosti samog postupka i zbog toga što je cilj rada projektiranje kompenzatora udara, a ne identifikacija sustava. Dostupni model ima osam različitih regija, unutar kojih se kreće statička karakteristika vjetroagregata. Radne točke su prikazane u prostoru koordinatama (x_1, x_2, x_3) , gdje x_1 predstavlja kut zakreta lopatica, x_2 brzinu vrtnje rotora vjetroturbine, a x_3 brzinu vjetra na glavčini vjetroragregata. Neke od regija odgovaraju području ispod nazivne brzine, a neke području iznad nazivne brzine. Korištenjem MultiParametric Toolboxa u MATLAB-u, moguće je iscrutati regije i statičku karakteristiku, te odrediti kojoj regiji pripada pojedina radna točka.

U MATLAB-u po dijelovima afini model prikazan je strukturom `idmodes`, koji sadrži politopne forme koje predstavljaju regije, te parametre "idmodes.par" koji su ustvari vektori realnih brojeva - $[\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4]$ koji zajedno definiraju funkciju aerodinamičkog momenta. Sljedeća relacija opisuje kako se od navedenih parametara dolazi do aerodinamičkog momenta:

$$M_t = 5(\theta_1 \cdot \beta_{norm} + \theta_2 \cdot \omega_{norm} + \theta_3 \cdot v_{vj,norm} + \theta_4) \quad (2.3.2.1)$$

β_{norm} je kut zakreta lopatica skaliran s nazivnog raspona $[-10, 20]^\circ$ na $[0, 1]$, ω_{norm} brzina vrtnje skalirana s raspona $[0, 284]$ o/min na $[0, 1]$, a $v_{vj,norm}$ brzina vjetra skalirana s raspona $[3.5, 12]$ m/s na $[0, 1]$.

Normirane jedinice su bezdimenzionalne, te vrijede sljedeće relacije koje povezuju stvarne i normirane parametre:

$$\begin{aligned}\beta_{norm} &= \frac{\beta - \beta_{min}}{\beta_{max} - \beta_{min}} \\ \omega_{norm} &= \frac{\omega - \omega_{min}}{\omega_{max} - \omega_{min}} \\ v_{vj,norm} &= \frac{v_{vj} - v_{vj,min}}{v_{vj,max} - v_{vj,min}}\end{aligned}\tag{2.3.2.2}$$

Oblik jednadžbe (2.3.2.1) podsjeća na lineariziranu jednadžbu za aerodinamički moment (2.3.1.8), pa se lako može izvesti zaključak da parametri θ_i ustvari određuju normirane parcijalne derivacije za pripadajuće regije. Odgovarajuću neskalinu parcijalnu derivaciju možemo dobiti pravilom lančanog deriviranja.

Neka vrijedi sljedeće:

$$\begin{aligned}\left. \frac{\partial M_t}{\partial \beta_{norm}} \right|_{RT} &= 5 \theta_1 \\ \left. \frac{\partial M_t}{\partial \omega_{norm}} \right|_{RT} &= 5 \theta_2 \\ \left. \frac{\partial M_t}{\partial v_{vj,norm}} \right|_{RT} &= 5 \theta_3\end{aligned}\tag{2.3.2.3}$$

Pravilom lančanog deriviranja dobivamo iznose stvarnih parcijalnih derivacija:

$$\begin{aligned}\left. \frac{\partial M_t}{\partial \beta} \right|_{RT} &= \left. \frac{\partial M_t}{\partial \beta_{norm}} \right|_{RT} \cdot \left. \frac{\partial \beta_{norm}}{\partial \beta} \right|_{RT} = \frac{5 \theta_1}{(\beta_{max} - \beta_{min}) \cdot \frac{\pi}{180}} \\ \left. \frac{\partial M_t}{\partial \omega} \right|_{RT} &= \left. \frac{\partial M_t}{\partial \omega_{norm}} \right|_{RT} \cdot \left. \frac{\partial \omega_{norm}}{\partial \omega} \right|_{RT} = \frac{5 \theta_2}{(\omega_{max} - \omega_{min}) \cdot \frac{\pi}{30}} \\ \left. \frac{\partial M_t}{\partial v_{vj}} \right|_{RT} &= \left. \frac{\partial M_t}{\partial v_{vj,norm}} \right|_{RT} \cdot \left. \frac{\partial v_{vj,norm}}{\partial v_{vj}} \right|_{RT} = \frac{5 \theta_3}{(v_{vj,max} - v_{vj,min})}\end{aligned}\tag{2.3.2.4}$$

Za ovaj model važno je napomenuti kako je zanemarena potisna sila na vjetroagregat, pa se stoga uzima kao da je toranj apsolutno krut i nema oscilacija.

3. Kompenziranje udara vjetra pomoću momenta vjetroatregata

Konvencionalno upravljanje vjetroatregatom podrazumijeva da se iznad nazivne brzine vjetra brzina vrtnje rotora turbine drži konstantnom, a regulacija se provodi zakretanjem lopatica. Pritom se moment generatora drži konstantnim, kako bi vjetroatregat u tom režimu imao nazivnu snagu. U ovom radu razmotren je koncept upravljanja forsiranjem momenta generatora iznad nazivne brzine radi brže kompenzacije udara vjetra. Temelj ovakvom pristupu je jedan od temeljnih jednadžbi koje opisuju vjetroatregat (2.3.1.7), ovdje se navodi radi jasnoće:

$$M_t - M_g = J_t \dot{\omega}$$

Jasno je vidljivo kako se povećanjem momenta generatora (M_g) može smanjiti prirast brzine okretanja rotora pri brzinama većim od nazivne. Kako moment generatora ima mnogo bržu dinamiku od zakretanja lopatica, ovim postupkom moguće je brže kompenzirati nagle promjene vjetra. Naime, dinamika generatora je u milisekundnom području, jer brzina odziva ovisi o elektroničkim sklopkama pretvarača i električnim veličinama generatora, dok se upravljanje zakretom lopatica nalazi u sekundnom području zbog relativno velikim momenata tromosti u sustavu. Važno je napomenuti kako se moment generatora ne može koristiti za trajnu regulaciju, već mu u tome mora pomoći sustav za zakretanje lopatica koji vraća brzinu vrtnje rotora na nazivnu. Razlog tome je što opterećenje momenta generatora iznad nazivnog iznosa kroz dulji vremenski period može dovesti do oštećenja elemenata generatora. Dakle, motivacija uvođenja forsiranja momenta generatora je smanjeno opterećenje sustava za zakret lopatica, koje će uz brzu dinamiku momenta reagirati manje naglo, te se time manje trošiti.

Iz gornjeg razmatranja zaključuje se kako spomenuti regulator momenta ne smije imati integralno djelovanje, jer bi se operacijom integriranja moglo dovesti do postojanja trajnog povećanja momenta. Stoga, razmatra se regulator proporcionalnog djelovanja, čiji je opći oblik dan sa (3.1):

$$G_{R,Mg} = \frac{\Delta M_g(s)}{\Delta \omega(s)} = K_{Mg} \quad (3.1)$$

Temeljem prijenosne funkcije regulatora jasno se može vidjeti razlog uvođenja lineariziranog modela vjetroagregata i pripadajućih mu prijenosnih funkcija. Radi se o promjenama brzine vrtnje, odnosno momenta u okolini radne točke gdje je brzina vjetra nazivna.

Uvođenjem pojačanja momenta mijenja se dinamika cijelog sustava. Sustav postaje manje osjetljiv na promjenu brzine vjetra (vidljivo iz prijenosne funkcije po vjetru uvedene u potpoglavlju 3.2, manje je statičko pojačanje), te postaje brži (razlozi navedeni u prethodnom razmatranju – brža dinamika generatora). No, parametar K_{Mg} jako utječe na iznos snage generatora. Moment mu je proporcionalan brzini okretanja, ali i $K_{Mg} - u$, pa porastom obaju veličina snaga brzo raste. Ukoliko ose odabere dovoljno velik K_{Mg} , lako se može prijeći maksimalna dopuštena snaga. Upravo zato, potrebno je pažljivo optimirati regulator i odabrati parametre koji maksimalno iskorištavaju pozitivne značajke regulacije momenta. U nastavku navode se dvije metode parametriranja regulatora. Parametriranje simulacijskom analizom prikazuje se jer za razliku od statičke analize i analitičkog postupka, kako je objašnjeno u [1], uzima u obzir silu potiska, te što je još važnije, dinamiku servo pogona za zakretanje lopatica. Druga metoda uvodi ograničenje proporcionalnog pojačanja momenta u ovisnosti o iznosu brzine rotora, čime se postiže bolja kompenzacija u normalnim, neekstremnim uvjetima.

3.1. Simulacijski postupak

Kao što je već spomenuto, osnovni preduvjet forsiranja momenta generatora je mogućnost preopterećenja generatora i frekvencijskog pretvarača. Za frekvencijske pretvarače deklarira se karakteristika preopteretivosti u obliku povišenog iznosa snage i dozvoljenog trajanja unutar kojeg se dotični iznos može tolerirati. Kako je korišteni sustav generator – frekvencijski pretvarač laboratorijskog vjetroagregata vrlo robustan i može podnijeti puno jača preopterećenja nego što ih sam vjetroagregat može proizvesti, za analizu je važno

samo odrediti maksimalni iznos snage za kojeg se projektira regulator. Neka je snaga generatora dana sljedećim izrazom:

$$P_{el} = M_g \omega \quad (3.1.1)$$

Iznad nazivne brzine, moment generatora uz proporcionalni regulator oblika (3.1) iznosi:

$$M_g = M_{g,n} + K_{Mg} \Delta\omega = M_{g,n} + K_{Mg} (\omega - \omega_n) \quad (3.1.2)$$

$M_{g,n}$ predstavlja nazivni moment generatora, a ω_n nazivnu brzinu vrtnje rotora. Prema tome, izraz koji opisuje trenutnu snagu je:

$$P_{el} = M_{g,n} \omega_n + M_{g,n} \Delta\omega + K_{Mg} \omega_n \Delta\omega + K_{Mg} (\Delta\omega)^2 \quad (3.1.3)$$

Kao što je već spomenuto, potrebno je odrediti maksimalni iznos snage P_{max} , nešto manji od maksimalne dozvoljene snage $P_{max, dozv}$ (zbog redundantosti), koji se ne smije prijeći ni u kojem trenutku, ni za koji iznos udara vjetra.

Simulacijski postupak provodi se pomoću MATLAB i Simulink okruženja zbog nemogućnosti nalaženja eksplicitnih izraza za izračun vrijednosti parametara regulatora zakreta lopatica koji odgovaraju odabranom proporcionalnom pojačanju momenta. Potrebno je korigirati prijenosne funkcije sustava, jer se uvođenjem pojačanja K_{Mg} mijenja dinamika sustava. Kako je moment generatora direktno proporcionalan brzini vrtnje, a vrijedi dinamička jednadžba koja povezuje moment generatora, aerodinamički moment i promjenu brzine vrtnje rotora, promjena dinamike uvodi se korekcijom parcijalne derivacije aerodinamičkog momenta po brzini vrtnje, odnosno:

$$M_\omega' \rightarrow M_\omega' - K_{Mg} \quad (3.1.4)$$

Iz (3.1.4) i (2.3.1.10) izvedene su modificirane prijenosne funkcije po zakretu lopatica, brzini vjetra i momentu generatora, uzimajući u obzir oscilacije tornja.

$$\begin{aligned}
 G_{vj}'(s) &= \frac{\omega(s)}{v_{vj}(s)} = \\
 &= \frac{M_v'(Ms^2 + Ds + C)}{J_t Ms^3 + (J_t(D + F_v') - (M_\omega' - K_{Mg}))s^2 + (J_t C + M_v' F_\omega' - (M_\omega' - K_{Mg})(D + F_v'))s - (M_\omega' - K_{Mg})C} \\
 G_\beta'(s) &= \frac{\omega(s)}{\beta(s)} = \\
 &= \frac{M_\beta' Ms^2 + (M_\beta'(D + F_v') - M_v' F_\beta')s + M_\beta' C}{J_t Ms^3 + (J_t(D + F_v') - (M_\omega' - K_{Mg}))s^2 + (J_t C + M_v' F_\omega' - (M_\omega' - K_{Mg})(D + F_v'))s - (M_\omega' - K_{Mg})C} \\
 G_{Mg}(s) &= \frac{\omega(s)}{M_g(s)} = \\
 &= \frac{Ms^2 + (D + F_v')s + C}{J_t Ms^3 + (J_t(D + F_v') - (M_\omega' - K_{Mg}))s^2 + (J_t C + M_v' F_\omega' - (M_\omega' - K_{Mg})(D + F_v'))s - (M_\omega' - K_{Mg})C}
 \end{aligned} \tag{3.1.5}$$

Nakon modifikacije funkcije procesa, potrebno je odrediti prijenosnu funkciju servo pogona i uključiti je u model. Označimo je sa G_{servo} . Označimo prijenosnu funkciju regulatora zakreta lopatica sa G_{reg} . Regulator zakreta lopatica je standardnog PI oblika i projektira se prema pokazateljima kakvoće otvorenog regulacijskog kruga u frekvencijskom području. Dakle, potrebno je odrediti odgovarajuću presječnu frekvenciju i fazno osiguranje.

Otvoreni regulacijski krug definiramo kao:

$$G_o(s) = G_{reg}(s)G_{servo}(s)G_\beta'(s) \tag{3.1.6}$$

Presječna frekvencija je frekvencija pri kojoj otvoreni regulacijski krug ima pojačanje 1, odnosno:

$$|G_o(j\omega_c)| = 1 \tag{3.1.7}$$

Fazno osiguranje definira se kao faza koju se može dodati otvorenom krugu pri presječnoj frekvenciji da bude na rubu stabilnosti, odnosno:

$$\gamma = \pi + \arg (G_o (j\omega_c)) \quad (3.1.8)$$

Presječna frekvencija bira se prema preporuci [1]. Pokazalo se kako se za presječne frekvencije veće od trećine prve vlastite frekvencije tornja javljaju nedopustivo velike oscilacije tornja. Dakle, presječna frekvencija se bira iz sredine sljedećeg intervala:

$$0.25\omega_{0,t} < \omega_c < 0.3\omega_{0,t} \quad (3.1.9)$$

Prva vlastita frekvencija tornja izračunava se kao udaljenost polova karakteristične jednadžbe $A(s)$ od ishodišta, gdje je:

$$A(s) = Ms^2 + Ds^2 + C \quad (3.1.10)$$

Koeficijenti M , D i C su redom već spomenuta modalna masa tornja, modalno prigušenje tornja, te modalna krutost tornja. Oba pola su jednako udaljena od ishodišta, jer su polovi kompleksno konjugirani par.

Fazno osiguranje također se bira prema preporuci:

$$50^\circ < \gamma < 70^\circ \quad (3.1.11)$$

Prijenosna funkcija G_{reg} sa općim parametrima ima sljedeći oblik:

$$G_{reg}(s) = K_{r,\beta} \left(1 + \frac{K_{I,\beta}}{s} \right) \quad (3.1.12)$$

Koeficijenti $K_{r,\beta}$ i $K_{I,\beta}$ predstavljaju proporcionalno i integralno pojačanje PI regulatora.

Prema (3.1.6) i (3.1.8) fazno osiguranje sustava glasi:

$$\gamma = \pi + \arg(G_o(j\omega_c)) = \pi + \arg(G_{reg}(j\omega_c)) + \arg(G_{servo}(j\omega_c)) + \arg(G_{\beta}'(j\omega_c)) \quad (3.1.13)$$

Iz prijenosne funkcije G_{reg} određujemo izraz za fazno-frekvencijsku karakteristiku PI regulatora:

$$\arg(G_{reg}(j\omega)) = - \operatorname{arctg}\left(\frac{K_{I,\beta}}{\omega}\right) \quad (3.1.14)$$

Iz (3.1.13) i (3.1.14) određuje se izraz za integralno pojačanje PI regulatora zakreta lopatica:

$$K_{I,\beta} = \omega_c \operatorname{tg}\left(\pi + \arg(G_{\beta}'(j\omega)) + \arg(G_{servo}(j\omega)) - \gamma\right) \quad (3.1.15)$$

Integralno pojačanje regulatora mora biti pozitivno, pa se mora provjeriti je li argument funkcije tg u izrazu (3.1.15) u intervalu $\left(0, \frac{\pi}{2}\right)$. Ako nije, vrše se odgovarajuće modifikacije presječne frekvencije, tako da se uz isto fazno osiguranje postigne gore navedeni uvjet. Ukoliko se ne nađe odgovarajuća frekvencija, projektiranje parametara za tu radnu točku i trenutni K_{Mg} se preskače, te se ta kombinacija proglašava nevažećom.

Nakon što se odredi inegralno pojačanje, određuje se proporcionalno pojačanje PI regulatora tako da pojačanje otvorenog kruga pri presječnoj frekvenciji bude 1.

Amplitudno-frekvencijska karakteristika otvorenog regulacijskog kruga određena je sa:

$$|G_o(j\omega_c)| = K_{r,\beta} |G_{reg,1}(j\omega_c)| |G_{servo}(j\omega_c)| |G_{\beta}'(j\omega_c)| \quad (3.1.16)$$

gdje je $|G_{reg,1}(j\omega_c)|$ iznos amplitudno-frekvencijske karakteristike PI regulatora bez proporcionalnog pojačanja na presječnoj frekvenciji.

Prema tome, iz (3.1.7) i (3.1.16) slijedi da je izraz za proporcionalno pojačanje:

$$K_{r,\beta} = \frac{1}{|G_{reg,1}(j\omega_c)| |G_{servo}(j\omega_c)| |G_{\beta}'(j\omega_c)|} \quad (3.1.17)$$

Naposlijetku, potrebno je odrediti promjenu vjetra prema kojoj se simulacijski biraju optimalni parametri regulatora. Prema [1], uzet je ekstremni udar vjetra s vjerojatnošću ponavljanja jedanput u 50 godina, normiran prema IEC-61400-3. Ukoliko se parametri odrede prema normiranim promjenama vjetra, koje su stvorene temeljem snimanja ponašanja vjetra na više lokacija i kroz duži vremenski period, garantira se zadovoljavajuće ponašanje u praksi. Parametri vjetra pobude koji odgovaraju laboratorijskom vjetroagregatu izračunati su uz pomoć [4]. Izraz koji opisuje ekstremni udar vjetra korišten u radu je:

$$v_{vj}(t) = \begin{cases} v_{vj,0} , & 0 \leq t < 20 \cap t \geq 34 \\ v_{vj,0} - 0.37v_{ext} \sin\left(\frac{3\pi t}{T_{ext}}\right) \left(1 - \cos\left(\frac{2\pi t}{T_{ext}}\right)\right), & 20 < t < 34 \end{cases} \quad (3.1.18)$$

gdje je:

$$v_{ext} = 6.4 \left(\frac{\sigma_1}{1+0.1\left(\frac{D}{A_1}\right)} \right), \text{ amplituda ekstremnog udara vjetra}$$

$T_{ext} = 14$ s, trajanje ekstremnog udara vjetra

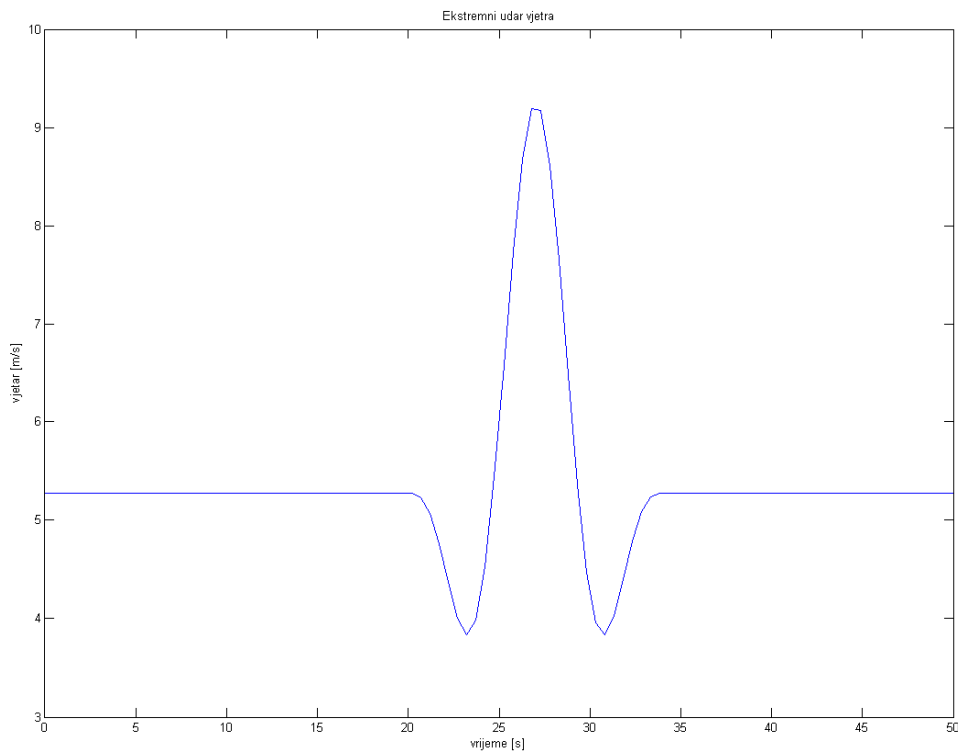
$D_r = 2.4$ m, promjer rotora vjetroturbine

σ_1 , standardna devijacija logitudinalne turbulentne komponente vjetra

Izračunati parametri za laboratorijski vjetroagregat glase ³:

$$\sigma_1 = 1.8, \quad v_{ext} = 5.3760 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (3.1.19)$$

³ Amplituda vjetra je modificirana kako bi bolje odgovarala laboratorijskom vjetroagregatu i ventilatoru, jer je nemoguće postići brzu promjenu amplitude od 9.3767 m/s, koliko je inicijalno iznosi v_{ext}



Slika 5 Ekstremni udar vjetra

U nastavku se iznosi algoritam prema kojem je projektiran regulator, odnosno prema kojemu su određene ovisnosti parametara regulatora zakreta lopatica i pojačanja momenta o maksimalnoj postignutoj snazi. Algoritmi za klasični i afini model prikazani su odvojeno, u potpoglavljima 3.1.1 i 3.1.2.

3.1.1. Simulacijski postupak – klasični model

Algoritam projektiranja parametara regulatora simulacijskom metodom proveden je kroz sljedeće korake ⁴:

- Provedena je inicijalizacija vektora potrebnih za simulaciju, radi bržeg izvođenja.
- Određene su radne točke u kojima je potrebno projektirati regulator. Pritom je za određivanje kuta zakreta lopatica, brzine vjetra i brzine vrtnje rotora vjetroturbine u stacionarnom stanju korišten PI regulator zakreta lopatica projektiran u sklopu predmeta Projekt. Odabrano je 14 radnih točaka oblika $(\beta_0, \omega_0, v_{vj,0})$ iznad nazivne brzine vrtnje. Iz spomenutih parametara određen je λ_0 za svaku radnu točku prema (2.2.13).
- Definiran je raspon parametara K_{Mg} uz proizvoljno određenu rezoluciju, za kojeg se provodi simulacija. Konkretno, nakon par proračuna i uspoređivanja dobivenih vrijednosti snage sa ciljanima, određeno je da je optimalno interval za simulacijsku metodu $K_{Mg} \in [0, 0.3]$.
- Proračunavaju se parcijalne derivacije aerodinamičkog momenta i potisne sile po kutu zakreta lopatica, brzini vrtnje rotora i brzini vjetra u svakoj radnoj točki $(\beta_0, \omega_0, v_{vj,0})$ prema (2.3.1.8-1). Dobivene numeričke vrijednosti pamte se za svaku radnu točku i kasnije služe za izračun lineariziranih prijenosnih funkcija u odgovarajućoj radnoj točki. Dio parcijalnih derivacija određuje se aproksimacijom pomoću diferencija koristeći proračunate lookup tablice C_q i C_t .
- Određena je maksimalna dozvoljena snaga P_{max} kao 180% nazivne snage. Za svaku kombinaciju radne točke i parametra K_{Mg} iz prethodno određenog intervala postavljeno je preporučeno fazno osiguranje od 60° , a ω_c odabrana je prema preporuci (3.1.9).

⁴ Detaljan M – kod nalazi se na cd-u priloženom sa radom

Prva prirodna frekvencija tornja iznosi $\omega_{0,t} = 6.283 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$, stoga se odabire presječna frekvencija u iznosu $\omega_c = 1.7278 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$.

- Za sve kombinacije radnih točaka i parametara K_{Mg} iz određenog intervala provodi se provjera je li argument funkcije tg iz (3.1.15) u ispravnom intervalu, odnosno je li integralno pojačanje pozitivno. Određuje se prijenosna funkcija servo motora za zakret lopatica, te linearizirana prijenosna funkcija po kutu zakreta lopatica u trenutnoj radnoj točki i za trenutni K_{Mg} prema (3.1.5). Ako uvjet nije zadovoljen postavlja se da je argument funkcije tg iz (3.1.15) na sredini dozvoljenog intervala (45°), te se uz fazno osiguranje od 60° ponovno proračunava presječna frekvencija koja zadovoljava uvjet na integralno pojačanje regulatora. Ako se frekvencija ne može izračunati, odnosno ako nema pozitivnih, realnih rješenja jednadžbe:

$$\text{tg}\left(\pi + \arg\left(G_{\beta}'(j\omega)\right) + \arg(G_{servo}(j\omega)) - \gamma\right) = \frac{\pi}{4} \quad (3.1.1.1)$$

radna točka se proglašava nevažećom, te se za dotičnu radnu točku uz trenutni K_{Mg} ne proračunavaju parametri. Prilikom računa vrijednosti faza i amplituda frekvencijske karakteristike servo pogona i linearizirane prijenosne funkcije po zakretu lopatica korišten je MATLAB Control Toolbox, pa se navedeni parametri vrlo lako i brzo računaju, npr funkcijom *bode*.

- Za svaki ispravan par (radna točka, K_{Mg} iz određenog intervala) izračunavaju se parametri $K_{r,\beta}$ i $K_{l,\beta}$ prema (3.1.17) i (3.1.15).
- Definira se željena pobuda, odnosno promjena brzine vjetra kao niz uređenih parova $(t_i, v_{vj,i})$. U ovom radu korišten je ekstremni udar vjetra određen prema (3.1.18) i (3.1.19).

- Na lineariziranom modelu vjetroagregata dobivenom prema (3.1.5) simulira se odziv na odabranu promjenu vjetra za svaku ispravnu radnu točku s pripadajućim parametrom K_{Mg} . Iz snimljenog odziva brzine vrtnje određuje se maksimalna promjena brzine vrtnje iznad njene nazivne vrijednosti, odnosno

$$\Delta\omega_{max}(i,j) = \omega_{max}(i,j) - \omega_{naz} \quad (3.1.1.2)$$

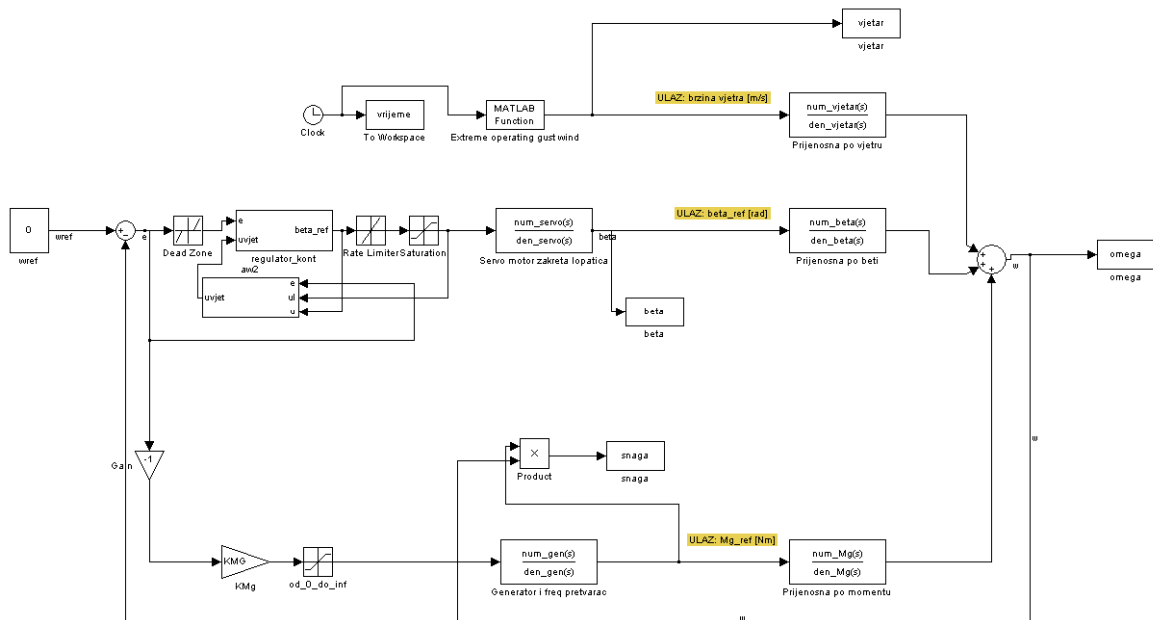
gdje i označava indeks trenutne radne točke, a j indeks trenutnog parametra K_{Mg} . Za tako proračunati $\Delta\omega_{max}(i,j)$ izračunava se maksimalna postignuta snaga $P_{maks}(i,j)$ u toj iteraciji pomoću izraza (3.1.3).

- Nakon što unutarnja petlja prođe po svim elementima odabranog raspona K_{Mg} , za trenutnu radnu točku s indeksom i bira se maksimalna dostignuta snaga, a koja je ujedno manja od maksimalno dozvoljene snage P_{max} . Matematički rečeno:

$$\begin{aligned} & \left(K_{Mg,opt}(i) K_{r,\beta,opt}(i) K_{l,\beta,opt}(i) \right) \\ & = \left(K_{Mg}(i, m) K_{r,\beta}(i, m) K_{l,\beta}(i, m) \mid P_{maks}(i, m) = \max_{j=1 \dots N_{Kmg}} P_{maks}(i, j), \right. \\ & \left. P_{maks}(i, m) < P_{max} \right) \end{aligned} \quad (3.1.1.3)$$

Parametri uz koje se postiže maksimalna snaga za i -tu radnu točku proglašavaju se optimalnima (za dotičnu radnu točku). Optimalni parametri odrede se na ovaj način za svaku radnu točku. N_{Kmg} predstavlja rezoluciju parametara K_{Mg} , odnosno određuje koliko će se točaka nalaziti između krajnjih vrijednosti raspona vektora K_{Mg} . $P_{maks}(i,j)$ je matrica dostignutih maksimalnih snaga za pojedini par (radna točka, K_{Mg} iz određenog intervala), te je generirana pomoću matrice maksimalnih promjena brzine, kao što je napomenuto u prethodnoj točki.

Slika 6 prikazuje Simulink shemu pomoću koje su se proračunavali optimalni parametri spomenuti u zadnje dvije točke gore navedenog algoritma. Regulator je realiziran sa ograničivačem iznosa i promjene upravljačke veličine, a također je ubačena i mrtva zona. Iznos referentnog kuta zakreta je ograničen je na iznos koji se mijenja u ovisnosti o radnoj točki za koju se trenutno provodi simulacija, te iznosi $[0 - \beta_{RT}, 50 - \beta_{RT}]^\circ$, promjena referentnog kuta zakreta u jednom koraku na $\pm 1.5^\circ$, a mrtva zona je u rasponu $[-3, 3]$ okr/min. Realizirana je anti-windup zaštita tipa 2. Anti-windup zaštita sprječava integriranje regulacijske pogreške dok je upravljačka veličina u zasićenju, odnosno vrlo spor povratak upravljačke veličine na ispravnu vrijednost nakon izlaska iz zasićenja. AW2 zaštita realizirana je logički – ako su ispunjeni uvjeti navedeni pod (3.1.1.4) sklopka u integratoru propustit će 0 na njegov ulaz umjesto regulacijskog odstupanja, odnosno njegov izlaz odgovarat će prošloj vrijednosti. Ako uvjeti nisu ispunjeni, regulator normalno radi, odnosno sklopka propušta regulacijsko odstupanje na ulaz integratora. Promjena momenta ograničena je s donje strane na 0. Proces je lineariziran po 14 radnih točaka, a parametri se osvježavaju kroz iteriranje simulacije.



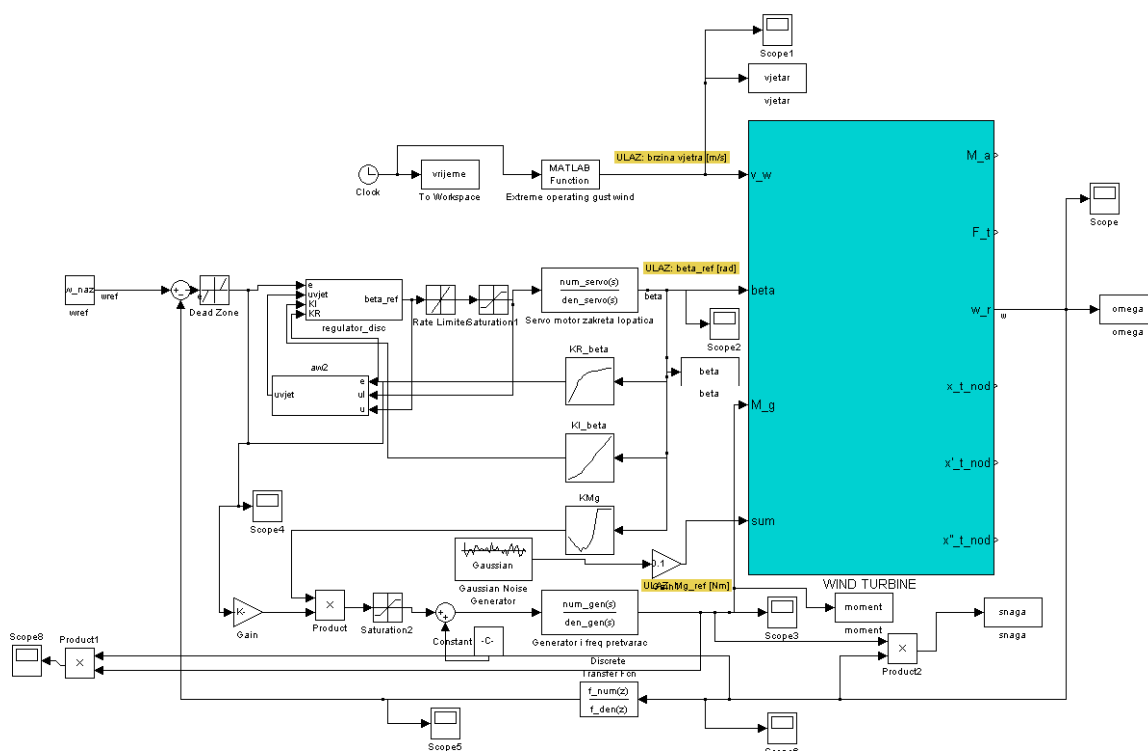
Slika 6 Simulink shema za proračun optimalnih parametara

$$\text{if } ((u < u_L) \ \&\& \ (e < 0)) \ \text{or } ((u > u_L) \ \&\& \ (e > 0)) \ \text{then } (S = 0)$$

$$\text{else } (S = 1)$$

(3.1.1.4)

Odziv se provjerava na nelinearnom modelu, uz integralni dio regulatora diskretiziran prema Tustinu. Dodani nelinearni elementi i AW2 zaštita ostaju jednaki kao u gornjoj shemi. Šum je modeliran Gausovim bijelim šumom amplitude 0.1. Model sustava je nelinearan, pa se barata apsolutnim vrijednostima, a ne pomacima oko radne točke. Projektiran je i filter kako bi se smanjio mjerni šum, no mrtva zona vrlo dobro rješava to pitanje, pa filter nema prevelikog efekta. Parametri PI regulatora i regulatora momenta biraju se u ovisnosti o mjerenom kutu zakreta lopatica, pomoću lookup tablica u kojima su pohranjeni prethodno izračunati vektori optimalnih parametara.

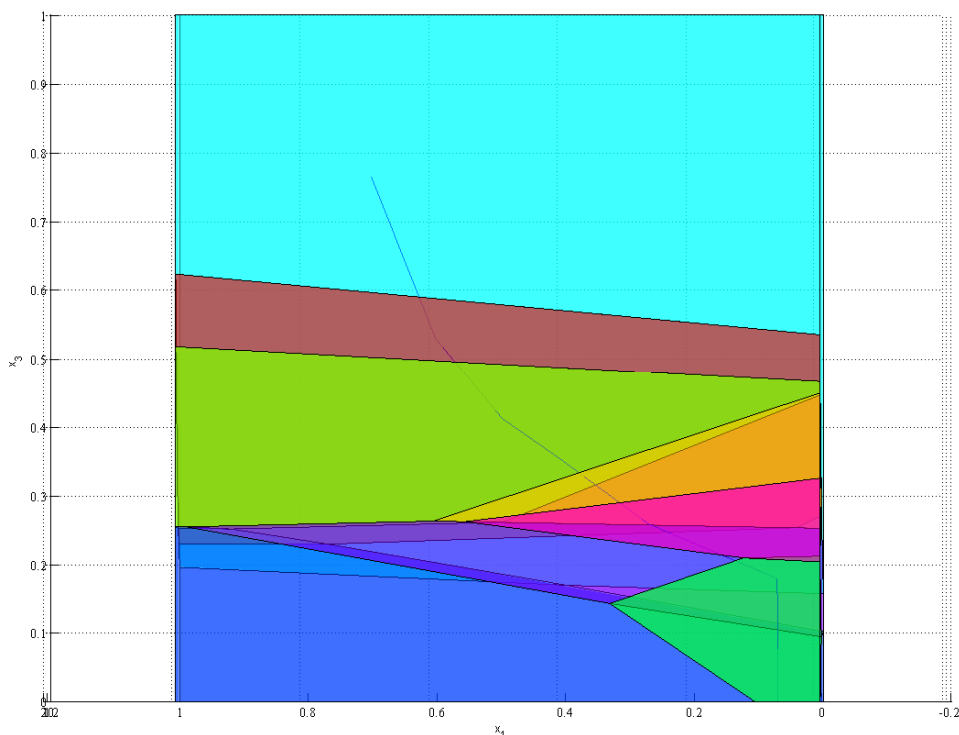


Slika 7 Shema pomoću koje se provjerava odziv

3.1.2. Simulacijski postupak – afini model

Kako je sami algoritam određivanja optimalnih parametara u odnosu na klasični model jednak, navode se samo razlike u postupku određivanja pojedinih parametara modela:

- Za određivanje parcijalnih derivacija prvo je potrebno odrediti regije u kojima se kreće statička karakteristika, i to iznad nazivne brzine. Za to je potreban poseban paket u MATLAB-u – Multiparametric Toolbox. Regije se iscrtaju zajedno sa statičkom karakteristikom, te se odrede točke u kojima statička karakteristika prelazi iz jedne regije u drugu. Pomoću funkcije „chebyball(region)“ odredi se koja boja regije pripada kojem parametru unutar idmodes strukture spomenute u drugom poglavlju. Naime, parametri regija u strukturi idmodes nisu poredane istim redom kao na grafu kojeg prikazuje slika 8.



Slika 8 Statička karakteristika prolazi kroz regije

- Identifikacijom je dobiveno da statička karakteristika iznad nazivne brzine prolazi crvenom, žutom, svijetlo zelenom, svijetlo plavom, ljubičastom i rozom regijom. Gornjim postupkom su boje povezane sa parametrima u strukturi, pa se pomoću izraza (2.3.2.4) mogu dobiti pravi iznosi parcijalnih derivacija aerodinamičkog momenta po kutu zakreta, brzini vrtnje i brzini vjetra.
- Radna točka za regiju i određena je kao aritmetička sredina točaka koje su sjecište statičke karakteristike i regija $i-1$ i $i+1$.
- Zbog nešto drugačijih parametara M , D i C , preporučena presječna frekvencija je različita.

Što se shema tiče, razlikuje se model. Umjesto prethodno klasično implementiranog modela vjetroagregata, zanemaruje se sila potiska, a aerodinamički moment računa se pomoću funkcije „hit_pwa“. Ulazni parametar spomenute funkcije je trenutna radna točka koju je potrebno skalirati kako je navedeno u (2.3.2.2) i skup parametara koji opisuju regije. Izlazni parametar je aerodinamički moment. Funkcija temeljem ulaznih vrijednosti evaluira u kojoj regiji se nalazi trenutna točka vjetroagregata i pomoću parametara koji određuju parcijalne derivacije (θ_1 do θ_4) računa aerodinamički moment prema (2.3.2.1). Logika upravljanja je jednaka kao kod simulacijskog postupka.

3.2. Dodatno upravljanje momentom generatora uz ograničenja

Dodatno poboljšanje upravljanja moguće je napraviti uvođenjem promjenjivog pojačanja momenta generatora dok se vjetroagregat nalazi u istoj radnoj točki. Simulacijskim modelom dobivamo vrlo konzervativne parametre koji će se pokazati dobrima pri odzivu na ekstremne udare vjetra. No, pri mnogo češćim, manjim udarima, pokazuju se neznatno bolji od konvencionalnih PI regulatora zakreta lopatica bez forsiranja momenta generatora. Ideja je, dakle, uzeti veće pojačanje pri manjim promjenama brzine, a manje pri većim promjenama kako bi se izbjeglo nepoželjno vladanje pri manjim skokovima vjetra. U ovom radu odabire se karakteristika prema preporuci iz [1], jer bi odabiranje čiste linearno promjenjive karakteristike pojačanja dovelo do nestabilnosti. U tom bi se slučaju porastom brzine vrtnje rotora smanjivao moment generatora, što je de facto pozitivna povratna veza.

Odabrana karakteristika ima konstantno pojačanje do $\Delta\omega_{norm}$, odnosno do odabrane granične promjene brzine vrtnje iznad nazivne vrijednosti, nakon čega se pojačanje K_{Mg} smanjuje po hiperbolnom zakonu:

$$K_{Mg} = \begin{cases} K_{Mg,lim}, & \Delta\omega \leq \Delta\omega_{norm} \\ \frac{K_{Mg,lim}\Delta\omega_{norm}}{\Delta\omega}, & \Delta\omega > \Delta\omega_{norm} \end{cases} \quad (3.2.1)$$

$\Delta\omega_{norm}$ je odabran tako da otprilike odgovara tipičnim nadvišenijma laboratorijskog vjetroagregata, odnosno procijenjen je na oko 2 o/min. Iznad tog nadvišenja, pretpostavlja se da je došlo do ekstremnog udara vjetra, pa se moment ograničuje smanjenjem proporcionalnog pojačanja. Iako se ograničenjem gubi dodatni kočni moment, prednost ovog postupka je upravo u konstantnom, nešto većem pojačanju pri nižim nadvišenijma brzine vrtnje. Pokazuje se da je odziv bolji čak i uz ekstremnije promjene vjetra.

Potrebno je odrediti granično pojačanje $K_{Mg,lim}$ tako da se ne razvije moment veći od $M_{g,lim}$, odnosno od maksimalnog dozvoljenog momenta generatora kojeg određujemo prema (3.2.2):

$$M_{g,lim} = \frac{P_{max}}{\omega_{el,max}} \quad (3.2.2)$$

Prema tome, mora vrijediti da umnožak konstantnog pojačanja $K_{Mg,lim}$ i $\Delta\omega_{norm}$ ne smije biti veći od razlike maksimalno dozvoljenog i nazivnog momenta, pa se uzima:

$$K_{Mg,lim} = \frac{M_{g,lim} - M_{g,n}}{\Delta\omega_{norm}} \quad (3.2.3)$$

3.2.1. Metoda ograničenja - klasični model

Postupak izračuna parametara uvelike se oslanja na simulacijski postupak. Koraci izračuna su sljedeći:

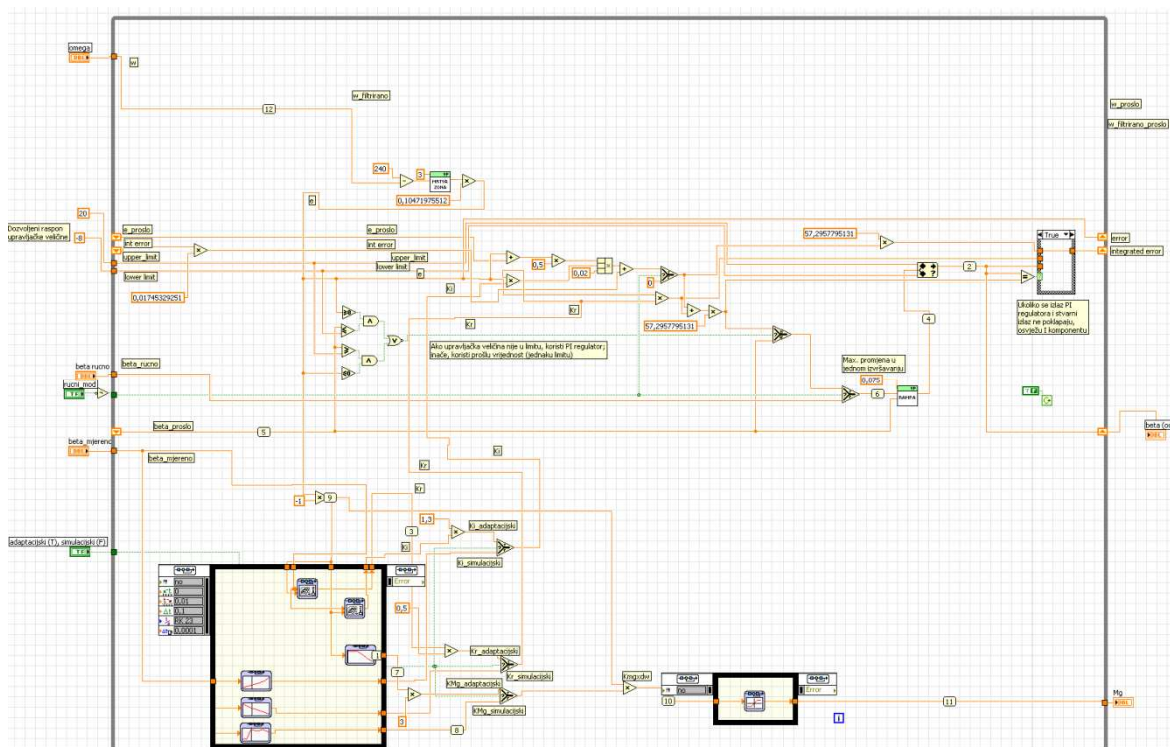
- Inicijalizacija vektora koji će se koristiti
- Određivanje parcijalnih derivacija kao u potpoglavlju 3.1.1
- Izračun graničnog pojačanja $K_{Mg,lim}$ prema (3.2.2) i (3.2.3), te stvaranje vektora $K_{Mg,lookup}$ prema (3.2.1)
- Određivanje faznog osiguranja i presječne frekvencije kao u potpoglavlju 3.1.1
- Izračun parcijalnih derivacija, provjera stabilnosti za puni raspon, te naposljetku izračun parametara $K_{r,\beta}$ i $K_{i,\beta}$ za svaku kombinaciju radne točke i parametra $K_{Mg,lookup}$ unutar određenog raspona kao što je napravljeno u potpoglavlju 3.1.1.

Simulink shema nešto je drugačija, jer su parametri $K_{r,\beta}$ i $K_{i,\beta}$ sada ovisni o promjeni brzine vrtnje iznad nazivne brzine, te o mjerenom kutu zakreta lopatica, pa su 1D lookup tablice zamijenjene 2D tablicama za te parametre. K_{Mg} ovisi samo o promjeni brzine vrtnje iznad nazivne vrijednosti. Model upravljanja prikazuje slika 9Slika 9.

3.3. Implementacija na platformi LabView

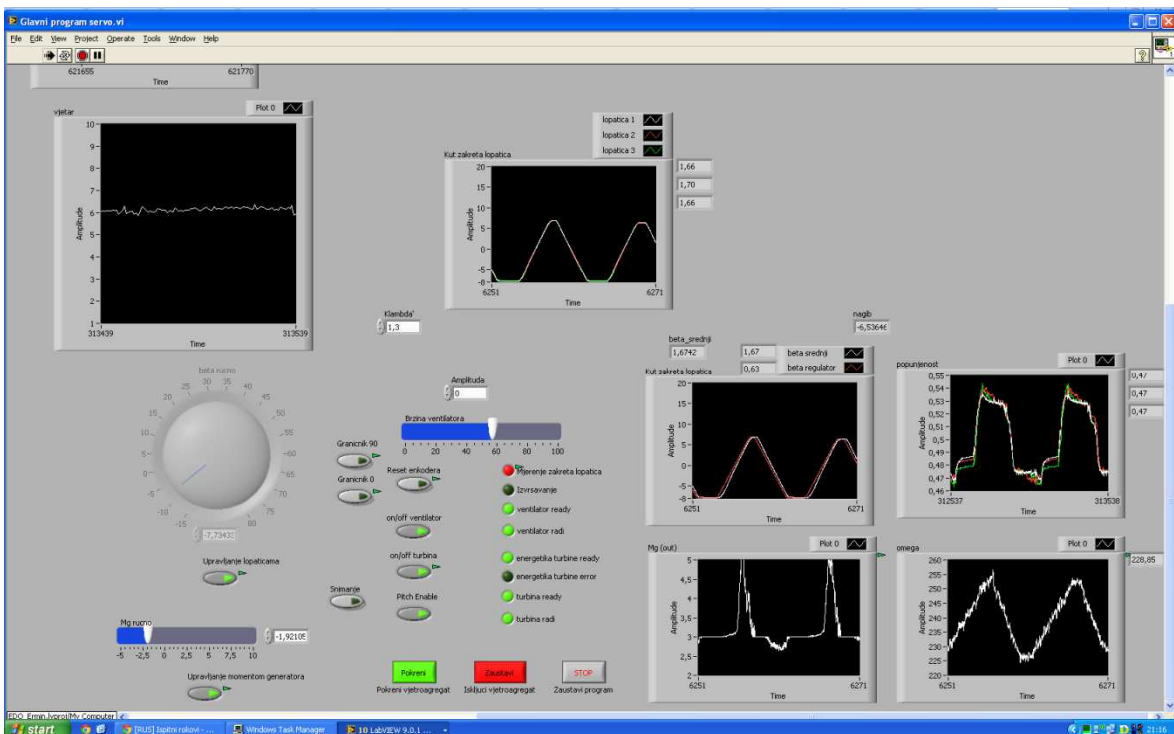
Nakon sinteze sustava upravljanja uslijedila je provjera na realnom sustavu, što je omogućeno preko platforme LabView. Vjetroagregat je povezan s računalom kao što je prikazano na slici 4. Za testiranje upravljačkih algoritama bilo je potrebno:

- implementirati upravljački algoritam unutar programa „Glavni_program.vi“
- uključiti cRio program da radi u pozadini (omogućuje nam mjerenje zakreta lopatica)
- zakrenuti fizički lopatice na pozicije obilježene markerima (enkoderi koji daju poziciju lopatice su relativni, a ne apsolutni)
- pokrenuti glavni program, upaliti ventilator koji omogućuje vjetar, upaliti turbinu, omogućiti zakretanje lopatica
- postaviti lopatice na početni položaj
- uz negativan moment generatora i porast vjetro sa ventilatora zaletiti vjetroagregat do nazivne brzine
- narinuti nagliju promjenu vjetro i snimiti odziv pomoću gumba“Snimanje“



Slika 10 Upravljački algoritam u LabViewu

Slika 10 prikazuje upravljački algoritam na platformi LabView. Vanjska petlja se izvršava svakih 0.02 s. Omogućen je ručni mod rada, gdje se referenca prosljeđuje direktno na izlaz. U automatskom načinu rada omogućeno je biranje između čistog simulacijskog algoritma i algoritma sa promjenjivim pojačanjem i ograničenjem. Svaku iteraciju se izračunavaju parametri regulatora zakreta lopatica i K_{Mg} u ovisnosti o mjerenom kutu zakreta lopatica, odnosno o mjerenom kutu zakreta lopatica i mjerenom nadvišenju brzine vrtnje rotora. Taj izračun obavljaju posebne petlje u crnim okvirima unutar glavne petlje. Integrirana je i AW2 zaštita, odnosno u slučaju da su ispunjeni uvjeti (3.1.1.4) na izlaz se prosljeđuje prošlo stanje. Ugrađena je mrtva zona koja nadomješta filter, ograničivač upravljačke veličine i ograničivač promjene upravljačke veličine kao u simulacijskom okruženju. Kompenzator udara vjetra realiziran je kao zaseban .vi blok i integriran u kod glavnog programa. Upravljački ekran glavnog programa i prikazuje slika 11. Taj ekran je ustvari sučelje pomoću kojeg se upravlja agregatom, jer sadrži sve gumbе potrebne za upravljanje, kao i pokazatelje trenda ključnih varijabli – brzine vjetra, brzine vrtnje rotora, te kuteva zakreta svih triju lopatica.

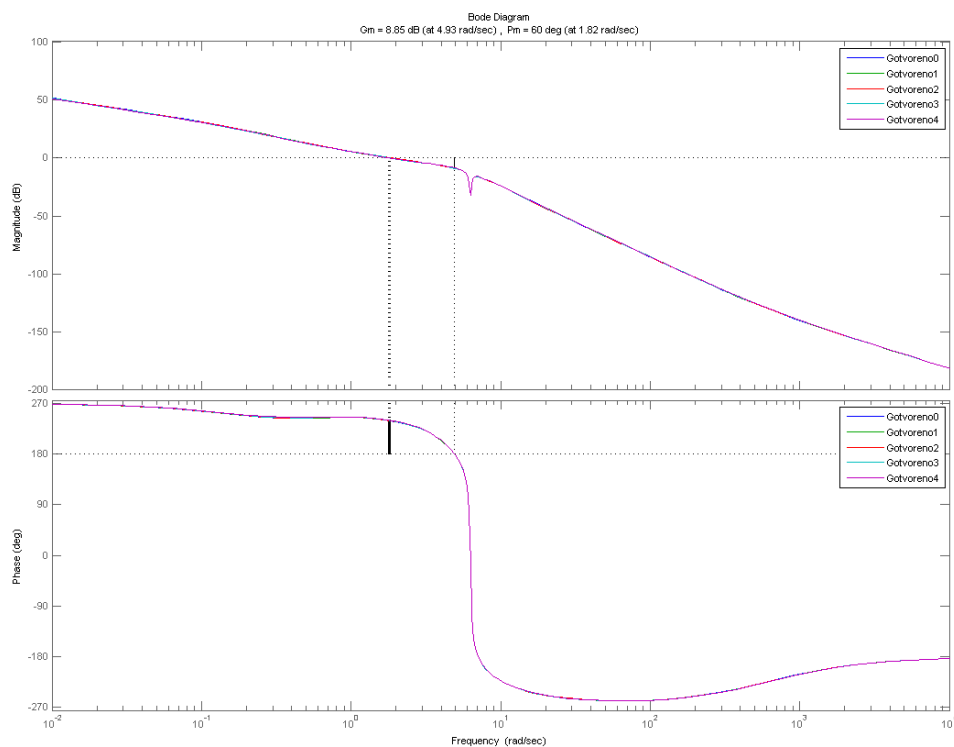


Slika 11 Upravljačko sučelje u LabViewu

4. Rezultati

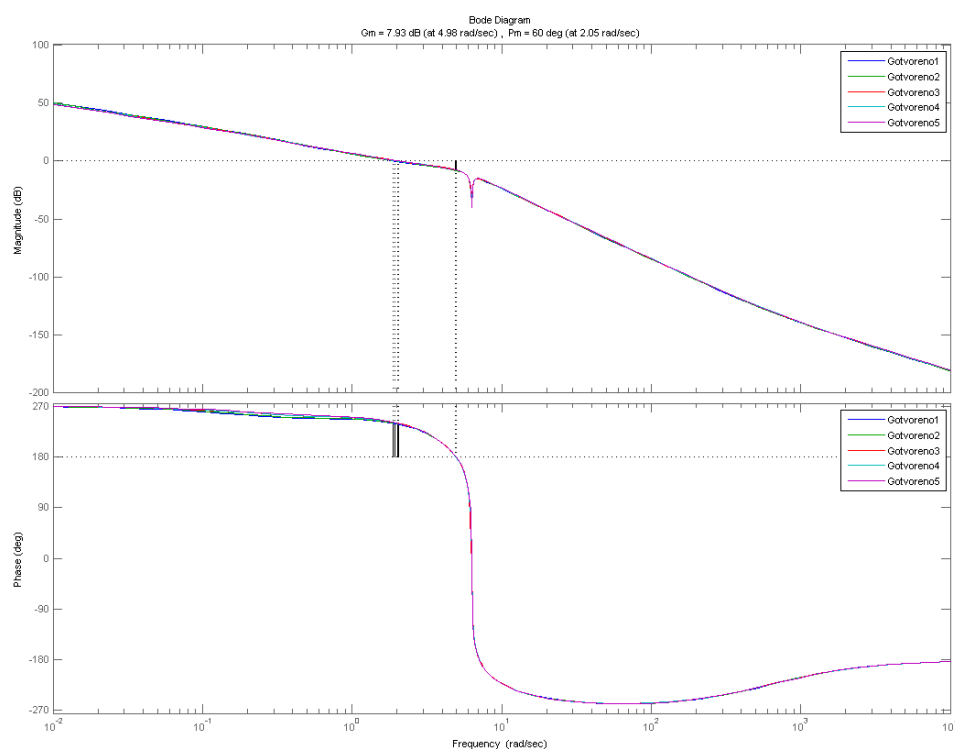
U ovom dijelu rada bit će uspoređeni odzivi dobiveni simulacijskom metodom i dodatnim upravljanjem za klasični i afini model na dvije vrste pobude – ekstreman vjetar i step nešto manjeg iznosa koji će predstavljati regularne udare vjetra. Naposlijetku, odzive će se usporediti sa onima dobivenima u LabViewu. Diskutirat će se o prednostima i manama ovih dvaju pristupa.

Za 5 lineariziranih prijenosnih funkcija po β , relativno bliskih po radnoj točki i pojačanju regulatora momenta, određena je frekvencijska karakteristika otvorenog kruga, kako bi se vidjelo da je sintezom postignuta željena presječna frekvencija i fazno osiguranje. Za tu svrhu bit će iskorišten klasični model. Prijenosnu funkciju otvorenog kruga računamo prema (3.16). Vidljivo je da se frekvencijske karakteristike pojedinih otvorenih krugova gotovo savršeno poklapaju, što znači da je dinamika procesa za jednu radnu točku gotovo identična za sve K_{Mg} .



Slika 12 Frekvencijska karakteristika otvorenih regulacijskih krugova – ista radna točka

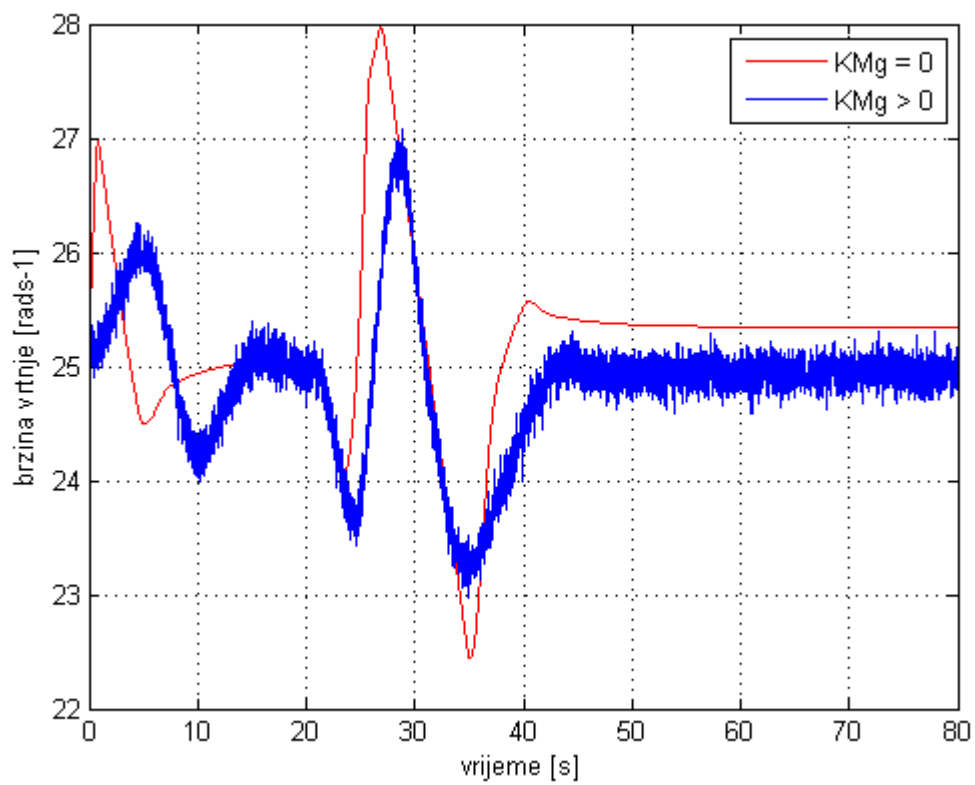
Slika 13 prikazuje nekoliko otvorenih regulacijskih krugova, no u različitim radnim točkama. Na slici je jasno vidljivo da se dinamika reguliranog sustava ne mijenja puno u različitim radnim točkama (gotovo identične karakteristike). To je postignuto pažljivim odabirom presječne frekvencije i faznog osiguranja. Naravno, valja naglasiti da je u regulacijskom otvorenom krugu linearizirana prijenosna funkcija po zakretu lopatica.



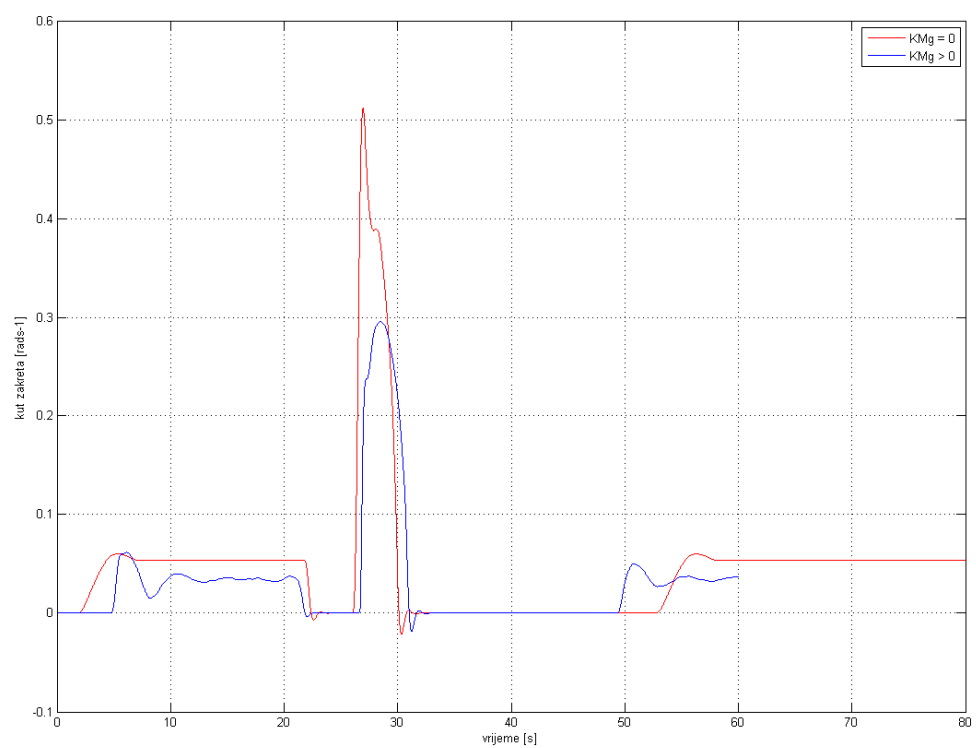
Slika 13 Frekvencijske karakteristike otvorenih regulacijskih krugova - različite radne točke

4.1. Klasični model - odzivi

Prije usporedbe dviju obrađenih metoda, navodi se usporedba odziva sa uključenim upravljanjem momentom i bez njega. Jasna je motivacija – uz upravljanje momentom aktivacija servo sustava za zakret lopatica je manja, nadvišenje brzine je manje, te je odziv nešto brži. Sljedeće dvije slike prikazuju navedeno – crveni odziv je bez upravljanja momentom, dok je plavi sa upravljanjem.

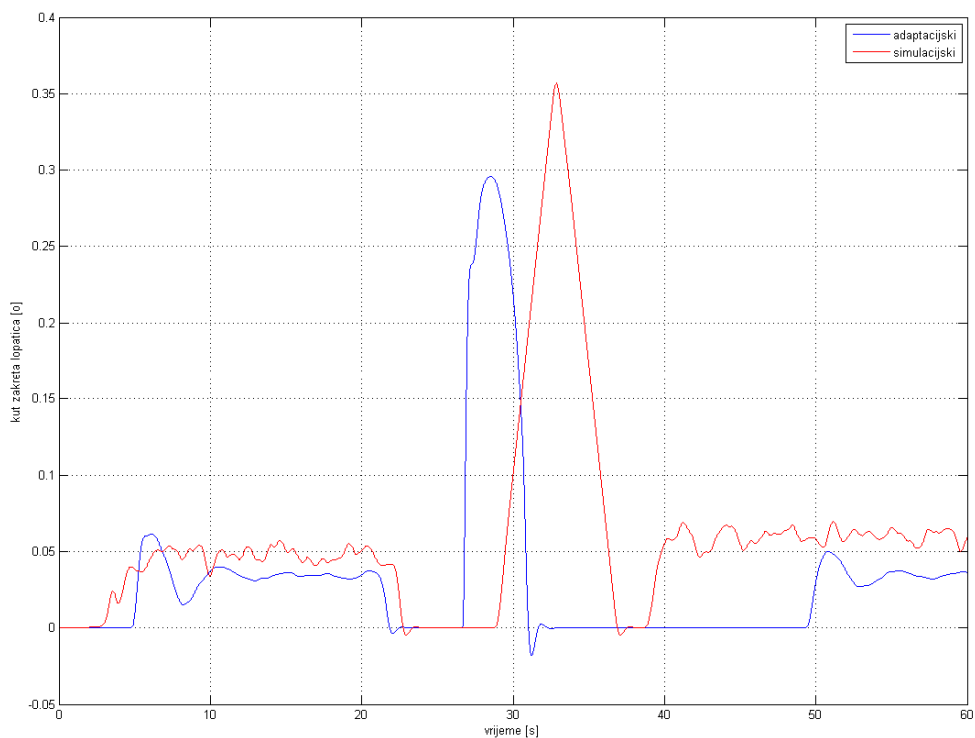


Slika 14 Brzina vrtnje pri odzivu na ekstremni vjetar

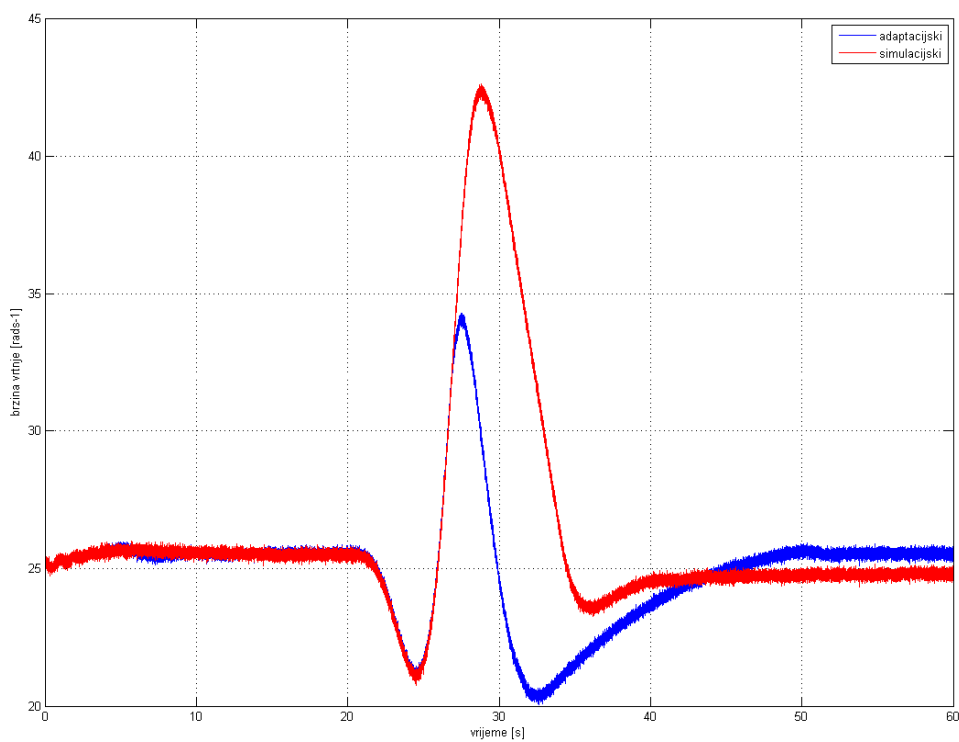


Slika 15 Kut zakreta pri odzivu na ekstremni vjetar

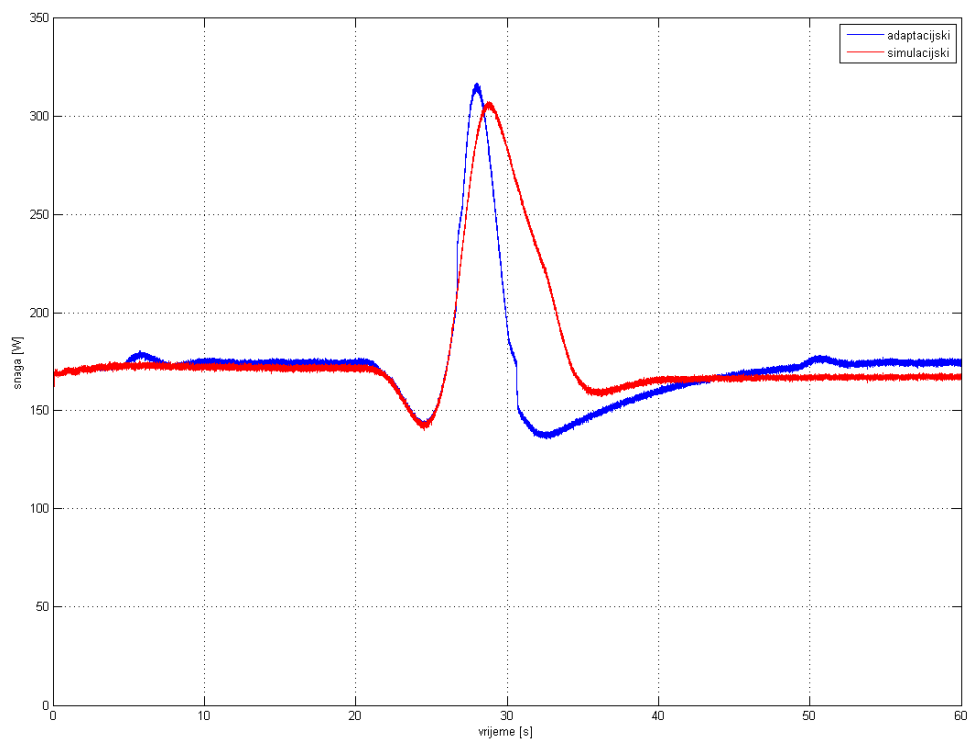
Sljedeće slike uspoređuju odzive dobivene na klasičnom modelu na ekstremni vjetar kao pobudu. Slike prikazuju kut zakreta lopatica, moment, snagu i brzinu vrtnje rotora dobivene o odzivu na vjetar sa slike 5. Crveni odzivi odgovaraju simulacijskom postupku, dok su plavi odzivi dobiveni metodom sa ograničenim pojačanjem (u daljnjem tekstu adaptacijska metoda).



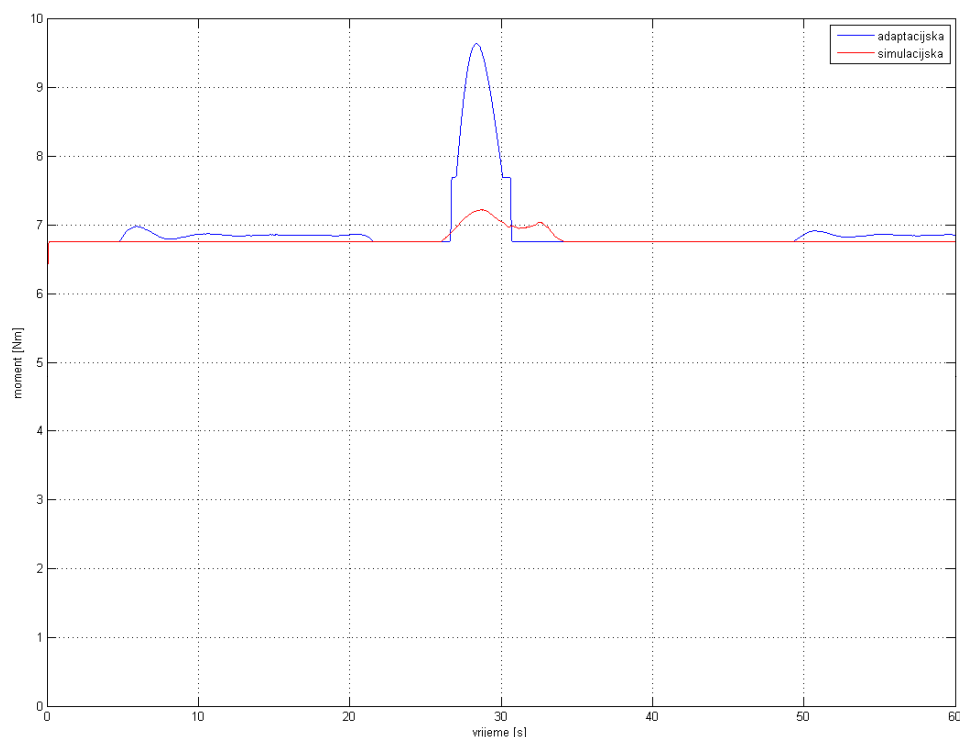
Slika 16 Kut zakreta lopatica pri odzivu na ekstremni udar vjetra



Slika 17 Brzina vrtnje rotora pri odzivu na ekstremni udar vjetra



Slika 18 Snaga generatora pri odzivu na ekstremni udar vjetra

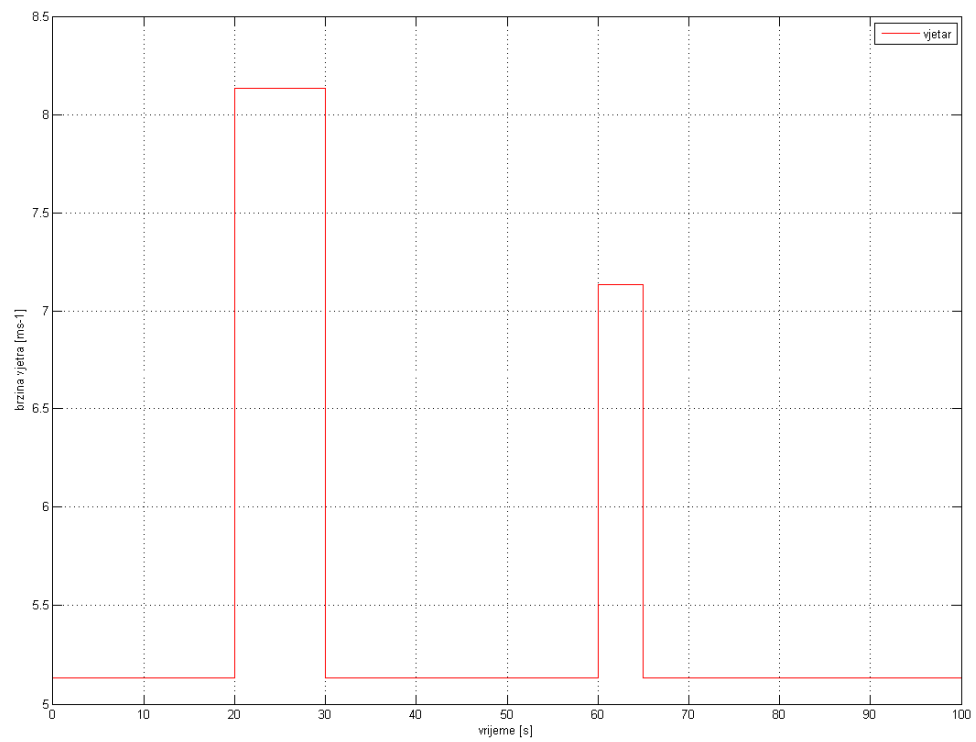


Slika 19 Moment generatora pri odzivu na ekstremni udar vjetra

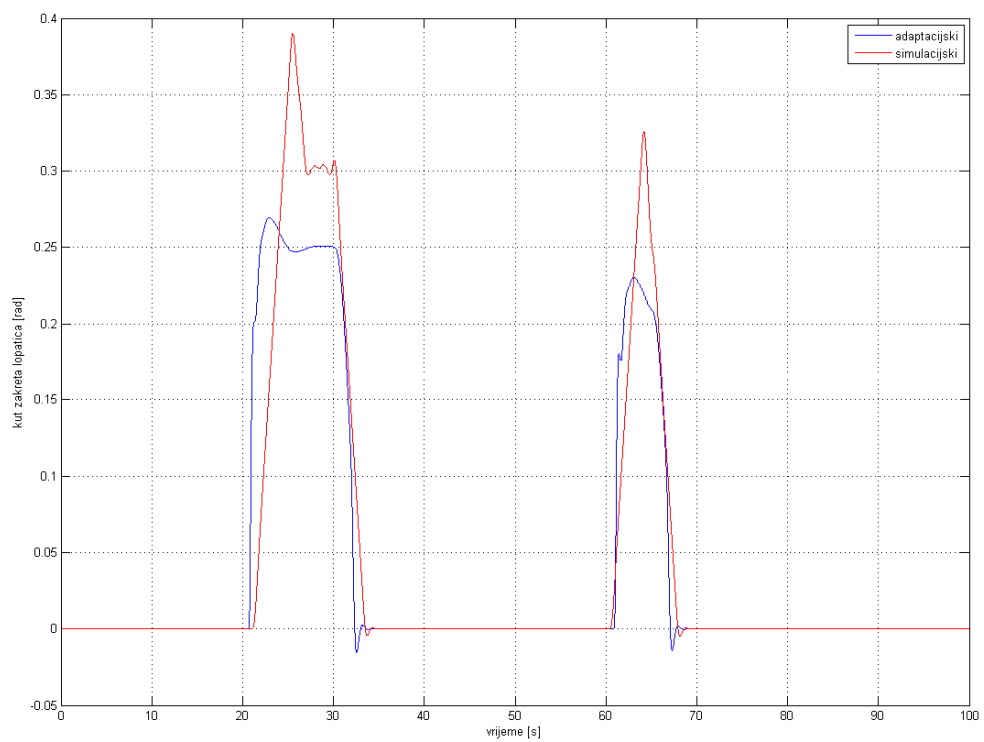
Sa odziva se mogu potvrditi motivi za parametiranje regulatora adaptacijskom metodom. Iz odziva kuta zakreta lopatica, koji je prikazan u radianima (slika 16) jasno je kako je zamor na servo motore za njihov zakret mnogo manji kod adaptacijske metode. Razlog tome je što je pojačanje K_{Mg} dobiveno adaptacijskom metodom pri nižim nadvišenjima brzine okretanja rotora znatno veće nego kod simulacijske metode, pa moment brzo odreagira i kompenzira udar vjetra odmah u početku naleta. Kada moment odradi svoje, uključuju se lopatice kako bi dovele brzinu rotora nazad na nazivnu. Iz odziva brzine vrtnje vidi se koliko bolje i brže adaptacijska metoda momentom kompenzira udar, te postiže dvostruko manje maksimalno nadvišenje brzine vrtnje. To je u direktnoj vezi sa zamjetno većim i kraćim forsiranjem momenta generatora (kako je vidljivo na slici 19), što je ujedno i cilj upravljanja momentom iznad nazivne brzine. Naime, kratkotrajna preopterećenja koja ne prelaze maksimalni dozvoljeni iznos poželjna su zbog svog brzog djelovanja na smanjenje brzine okretanja rotora.

Pritom, dakle, ne dolazi do štete za generator i frekvencijski pretvarač zbog kratkog trajanja pojave i ograničenog maksimalnog iznosa momenta, odnosno snage. Kod obje metode postignuta je otprilike jednaka maksimalna snaga, no adaptacijska metoda daje bolje rezultate, jer kako je već spomenuto, udar vjetra je kompenziran brže (snaga generatora je mnogo kraće na maksimalnom dopustivom iznosu kod adaptacijske nego kod simulacijske metode), a aktivacija servo sustava za zakret lopatica je zamjetno manje.

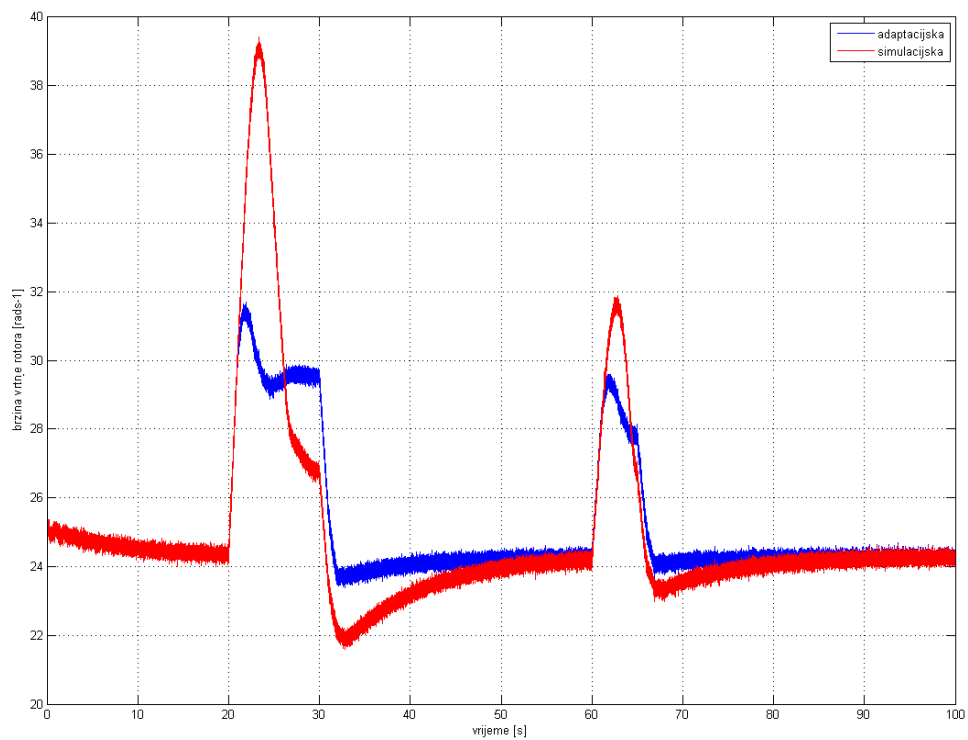
Nakon testiranja na ekstremni udar vjetra, poželjno je vidjeti ponašanje pri manjim udarima vjetra, gdje se očekuje da adaptacijska metoda bolje odreagira. Razlog tome je što simulacijska metoda parametre bira prema najgorem slučaju, odnosno prema ekstremnom udaru vjetra. Konkretno, za udar vjetra koji je korišten u ovom radu, vjerojatnost pojavljivanja je jednom u 50 godina. Jasno je dakle, da je puno važnije za vjetroagregat da dobro kompenzira udare vjetra koji se češće javljaju, amplitude 2 – 3 o/min. Dakako, ne smije se zanemariti mogućnost pojave jakog udara vjetra i ugroziti sigurnost vjetroagregata. No, prema gornjim odzivima, adaptacijska metoda se pokazala čak i boljom od simulacijske pri reakciji na ekstremni udar.



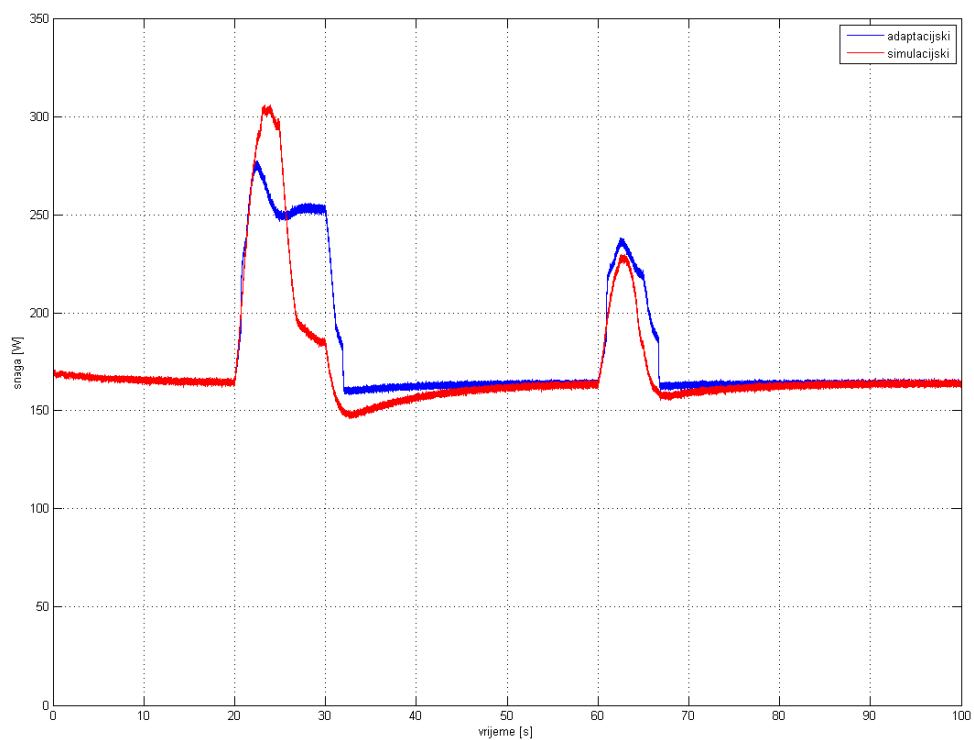
Slika 20 Skokovite promjene vjetra



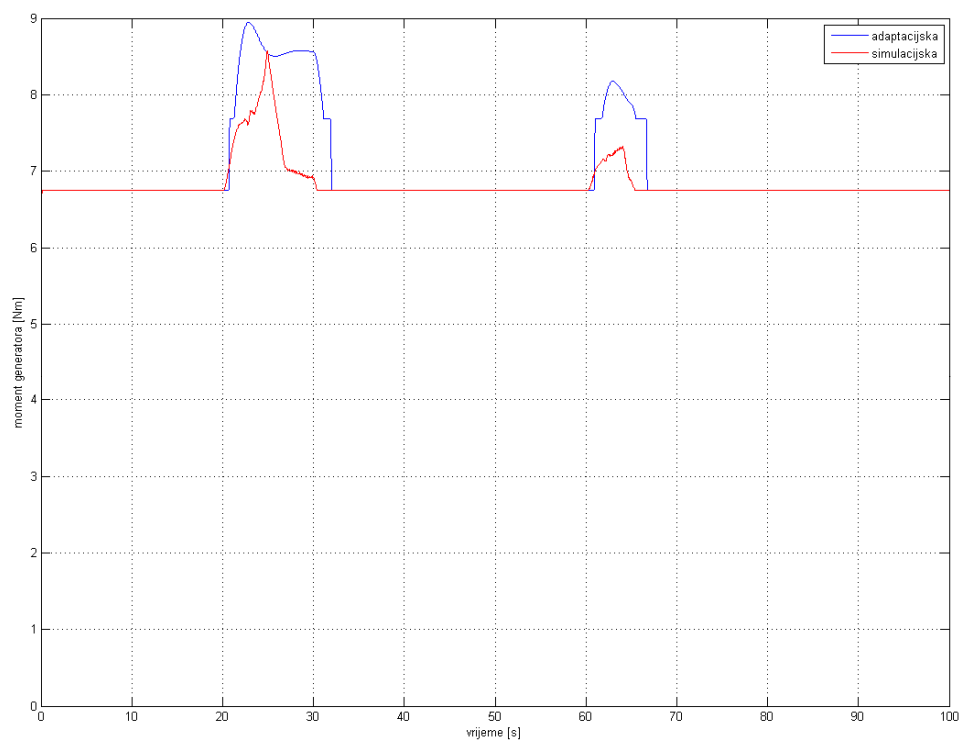
Slika 21 Kut zakreta lopatica pri odzivu na skokovite promjene vjetra



Slika 22 Brzina vrtnje rotora pri odzivu na skokovite promjene vjetra



Slika 23 Snaga generatora pri odzivu na skokovite promjene vjetra

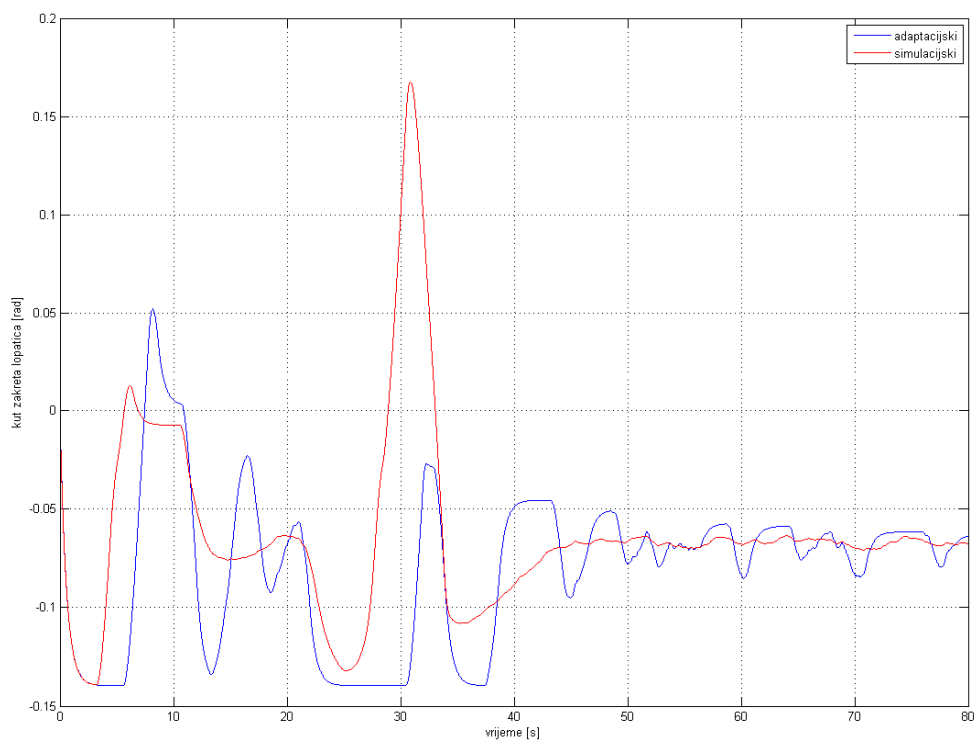


Slika 24 Moment generatora pri odzivu na skokovite promjene vjetra

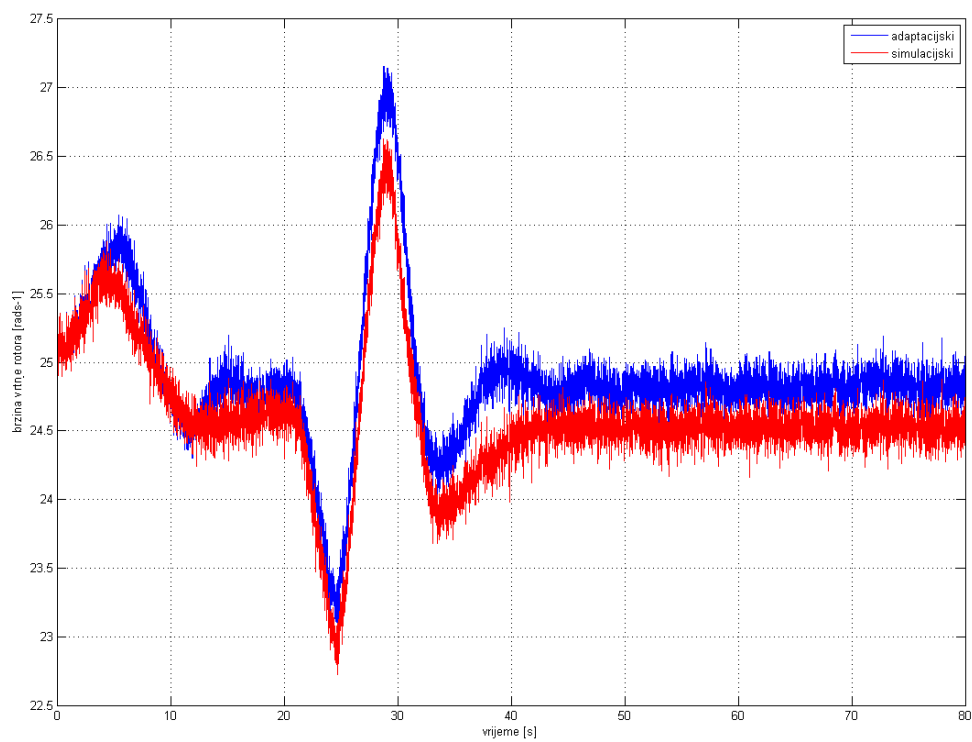
Adaptacijska metoda i ovdje se pokazala boljom, što je jasno vidljivo sa gornjih slika. Ponovno je odlikuje mnogo manje nadvišenje, brži odziv, manja aktivnost servo motora za zakret lopatica, te nešto veći iznos momenta generatora zbog kojeg nadvišenje brzine vrtnje brže opada na nazivnu vrijednost.

4.2. Afini model – odzivi

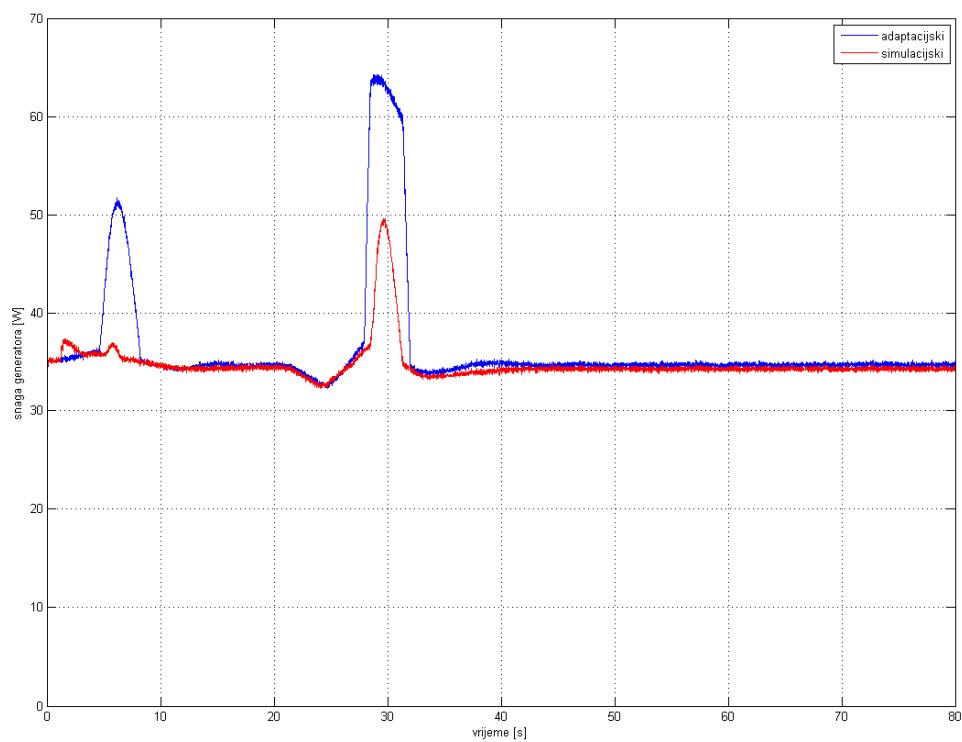
Na afinom modelu je radi preglednosti prikazan samo odziv na udar vjetra. Može se uočiti vrlo dobra kompenzacija udara vjetra za obje metode. Aktivnost servo pogona manja je kod adaptacijske metode, što je i očekivano. Nazivni iznos momenta pri afinom modelu procijenjen je na 1.4 Nm [3], pa se stoga nazivni moment i forsiranja momenta razlikuju u odnosu na klasični model. Vidljiv je zamjetno veći iznos nadvišenja momenta kod adaptacijske metode, što rezultira nešto bržim odzivom, ali i malo većim nadvišenjem brzine.



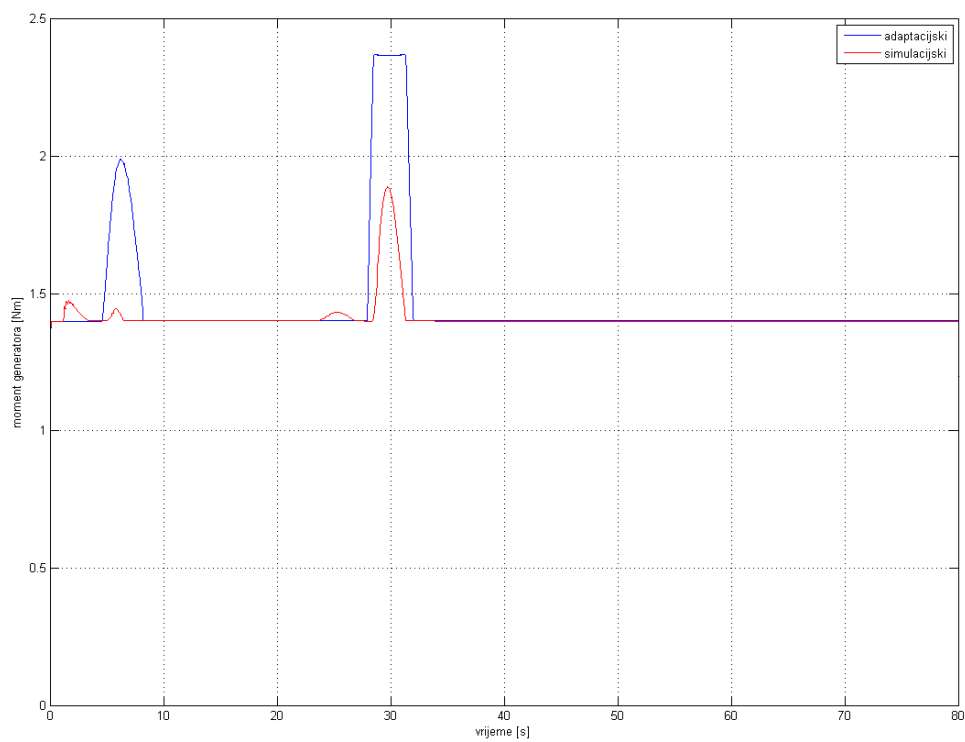
Slika 25 Kut zakreta lopatica pri odzivu na ekstremni udar vjetra



Slika 26 Brzina vrtnje pri odzivu na ekstremni udar vjetra



Slika 27 Snaga generatora pri odzivu na ekstremni udar vjetra

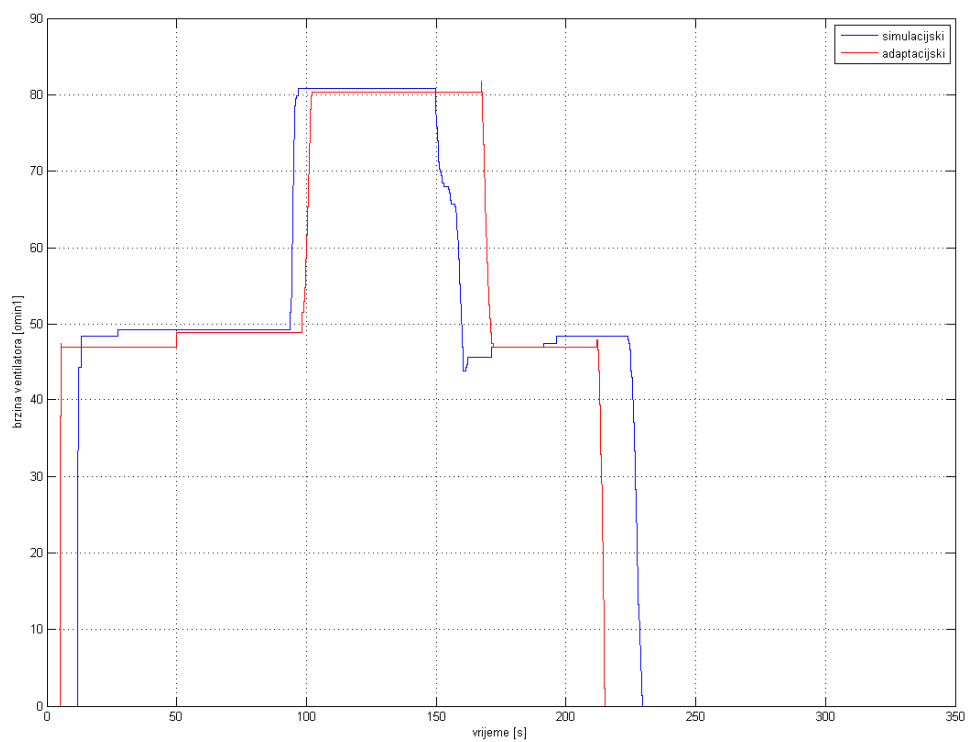


Slika 28 Moment generatora pri odzivu na ekstremni udar vjetra

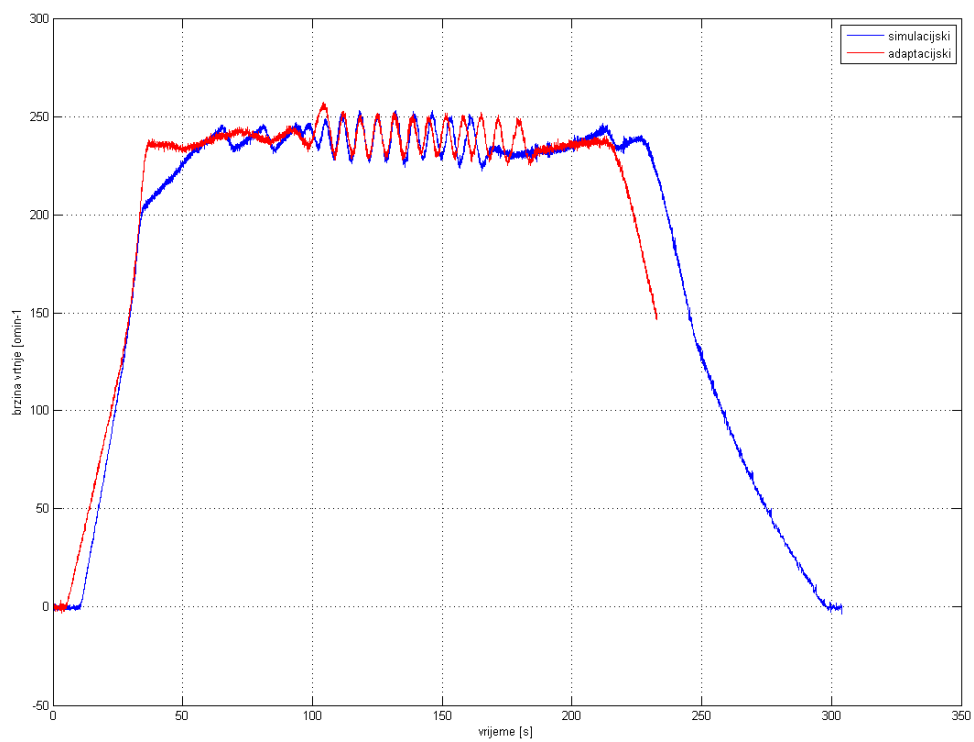
Početno nadvišenje brzine vrtnje na slici 26 rezultat je specifičnog ponašanja modela. Vjetroagregat je nelinearan sustav, a model pokušava konačnim brojem regija opisati dijelove sustava kao linearne. Međutim, zbog malog broja regija, prijelazi između njih sadrže diskontinuitete, pa se u početnom dovođenju u radnu točku događaju skokovi nefizikalno uzrokovani skokovi aerodinamičkog momenta zbog čega se javlja nadvišenje. Slika 27 prikazuje snagu generatora prilikom udara vjetra. Za obje metode jasno je da nije dostignut ili prekoračen maksimalni dopušteni iznos snage generatora, međutim adaptacijska je tome iznosu došla mnogo bliže, što pokazuje da su simulacijski parametri uistinu robusni i projektirani za najgori mogući slučaj.

4.3. Odziv realnog sustava

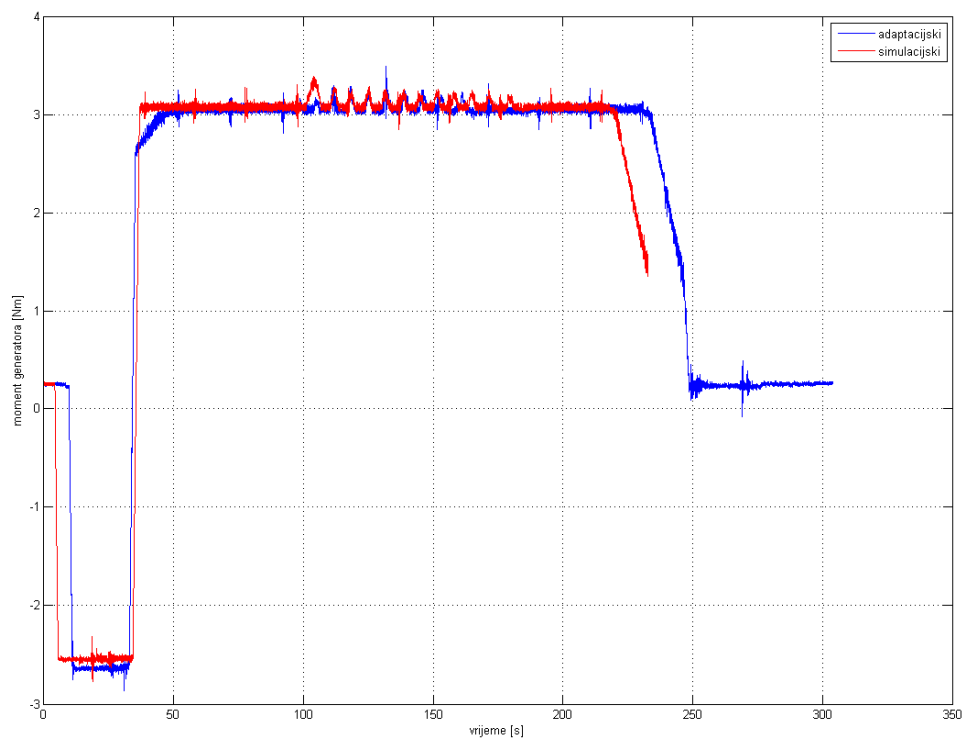
U nastavku su prikazani odzivi brzine ventilatora (pobudni vjetar), brzine vrtnje, momenta generatora, te kuta zakreta svake od triju lopatica snimljeni na laboratorijskom vjetroagregatu. Postignuti odziv je blago oscilatoran zbog preagresivnih parametara regulatora dobivenih sintezom na afinom modelu. Kut zakreta kasni sa reakcijom zbog prethodnog reagiranja momenta, pa se brzina ruši ispod nazivne vrijednosti umjesto potpunog ustaljenja. Doduše, nerealno je očekivati odziv stvarnog sustava koji je jednako kvalitetan kao simulacijski. Parametri su preagresivni zbog nepredviđene dinamike aerodinamičkog momenta afinim modelom, što se može vidjeti po brzini vrtnje rotora dok djeluje povišeni moment generatora. Prirodno je očekivati da bi se promjena brzina vrtnje trebala smanjiti povećanjem momenta generatora (dinamička jednadžba), odnosno nagib rasta brzine u nadvišenju bi trebao postati blaži djelovanjem momenta. To se doduše ne događa; nagib vrlo malo opada, praktički je jednak dok se ne uključe i lopatice. Iznos forsiranog momenta veći je kod adaptacijske metode, nadvišenje brzine pri naletu vjetra je manje (pogotovo za vrijeme manjih udara), kao i aktivnost servo pogona za vrijeme udara. Rezultati na stvarnom modelu su potvrdili razmatranja iz potpoglavlja 4.1.1 i 4.1.2. Snaga generatora nije prikazana zbog razlike u procijenjenom nazivnom momentu, koji za afini model iznosi spomenutih 1.4 Nm, dok je kod stvarnog sustava bliži iznosu od 3 Nm. Odziv s adaptacijskim parametrima prikazan je crvenom bojom, a sa simulacijskim plavom.



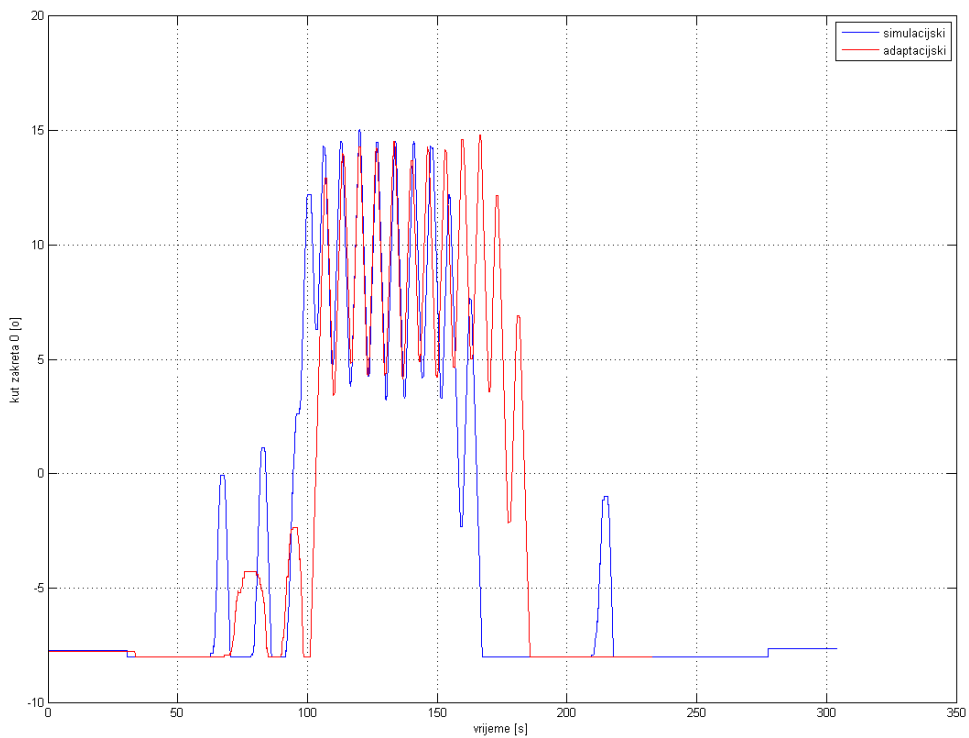
Slika 29 Brzina ventilatora



Slika 30 Brzina vrtnje pri odzivu na udar vjetra s ventilatora



Slika 31 Moment generatora pri odzivu na udar vjetra s ventilatora



Slika 32 Kut zakreta jedne od lopatica pri odzivu na udar vjetra s ventilatora

5. Utjecaj preopterećenja momenta na rad generatora i frekvencijskog pretvarača

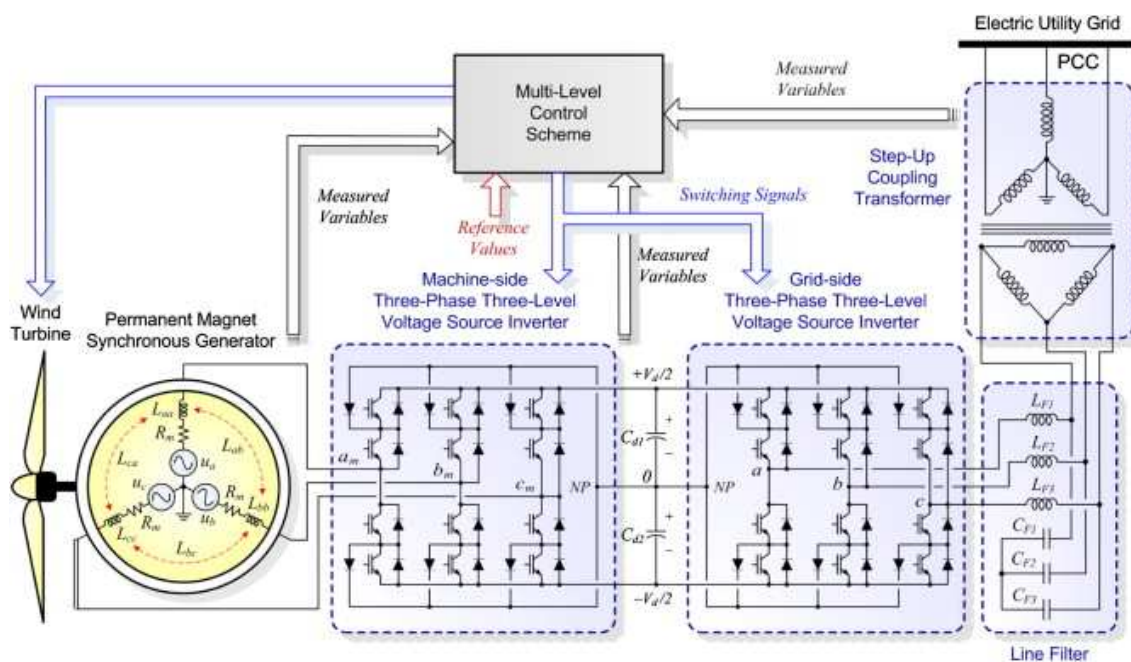
5.1. Spajanje vjetroagregata na električnu mrežu

Suvremeni vjetroagregati obično se spajaju na mrežu preko neizravnog izmjeničnog pretvarača kako bi mogli imati promjenjivu brzinu vrtnje, odnosno frekvenciju. No, potrebno je i prilagoditi mehaničku brzinu okretanja vjetroturbine brzini vrtnje generatora. Obično se vjetroturbina vrti sporije nego generator, pa u praksi postoje dva standardna rješenja: spoj preko multiplikatora i direktan pogon. Spoj preko multiplikatora rabi se s asinkronim generatorima. Multiplikator mora biti masivan zbog preuzimanja relativno velikog momenta vjetroturbine, a i kvarljiv je zbog međusobnog udaranja zubaca prijenosnih zupčanika, što je rezultat čestog i naglog mijenjanja spomenutog momenta. Direktni pogon obično se rabi sa sinkronim generatorom, a transformacija brzine odvija se uporabom više pari polova. Kako bi generator mogao izdržati veliki moment koji mu je direktno spojen, mora biti masivan i sadržavati veliku količinu aktivnog materijala, što pogoduje kvarljivosti. Navedene realizacije razlikuju se i po načinu spajanja na mrežu. Kod konfiguracije s multiplikatorom i asinkronim generatorom, stator generatora spaja se direktno na mrežu, dok je rotor spojen preko frekvencijskog pretvarača. Tako upravljani motor zove se dvostruko napajani asinkroni motor zbog toga što se spaja na električnu mrežu u dvije točke, a izvedba spoja se naziva sinkrona kaskada. Alternativa (uz sinkroni generator i direktan pogon) jest spojiti stator sinkronog generatora preko frekvencijskog pretvarača na mrežu. U tom slučaju nema direktnog spoja generatora i mreže, što znatno smanjuje negativan utjecaj vjetroagregata na mrežu, kao što je onečišćenje frekvencije, ali i vjetroagregat postiže bolje vladanje u uvjetima kratkotrajnih smetnji na mreži.

Isplativost, odnosno mogućnost upravljanja forsiranjem momenta iznad nazivne brzine vjetra uvelike ovisi o korištenom spoju mehaničkog i generatorskog dijela, odnosno generatora i mreže. Kod varijante multiplikator – asinkroni generator – spoj nadsinkrone kaskade, multiplikator vjetroagregata direktno preuzima moment generatora pa neprestane promjene momenta generatora mogu uzrokovati udarce među zupčanicima multiplikatora i njihovo pojačano trošenje. Osim toga, moment

generatora je pobuda za oscilatorni sustav koji se sastoji od zamašnih masa rotora i generatora spojenih osovinom. Kod vjetroagregata s multiplikatorom osovina na strani generatora u pravilu je prilično fleksibilna te je cijeli sustav dosta oscilatoran [1]. Osim toga, kod spoja nadsinkrone kaskade frekvencijski pretvarač dimenzioniran je za trećinu nazivne snage, pa dozvoljava promjenu brzine vrtnje u vrlo malom rasponu, odnosno nadvišenja snage koja bi mogao izdržati vjetroagregat s tom konfiguracijom su znatno manja.

Razmatranjem konfiguracije direktni pogon – sinkroni generator – frekvencijski pretvarač za nazivnu snagu generatora, mogu se uočiti pogodnosti za upravljanje brzinom vrtnje vjetra iznad nazivne brzine obrađene u ovom radu. Kako ne postoji multiplikator, glavčina je kruta zbog potrebne masivne izvedbe, a frekvencijski pretvarač je dimenzioniran za nazivnu snagu generatora, omogućeno je upravljanje brzinom vrtnje u većem rasponu iznad nazivne brzine. Upravljanje razrađeno u ovom radu pogodno je za realizaciju uz ovakav spoj vjetroagregata na mrežu (prikazan je na slici 33), pa se u nastavku razmatraju samo njegove prednosti, odnosno nedostaci.



Slika 33 Spoj vjetroagregata na mrežu pogodan za realizaciju obrađivane metode upravljanja

5.2. Utjecaj metode upravljanja na frekvencijski pretvarač i generator

Frekvencijski pretvarači se koriste za pretvorbu energije pri prijelazu iz jednog u drugi distribucijski standard, ali i za kontrolu brzine i okretnog momenta izmjeničnih motora. Klasična izvedba je trofazna, sa dvorazinskim protuparalelnim spojem. Fazne napone kontroliraju poluvodičke sklopke, obično IGBT tranzistori uz protuparalelno spojene diode (kako bi se omogućilo vođenje uz oba polariteta napona na sklopki) uz impulsno- širinsku modulaciju. Poluvodičke sklopke čine most, koji se koristi za povezivanje svih faza na pozitivni ili negativni istosmjerni napon. Širinsko impulsnom modulacijom planirano se izmjenjuju spojevi faza na pozitivni i negativni istosmjerni napon, tako da se postigne željena izlazna frekvencija. Istosmjerni međukrug služi za eventualnu promjenu naponske razine, te obično sadrži kočni otpornički sklop na kojem se disipira suvišna energija.

Problem pri korištenju ove metode upravljanja je već spomenuto preopterećenje generatora i frekvencijskog pretvarača uslijed povećanog momenta, odnosno brzine vrtnje rotora turbine. Frekvencijski pretvarač je de facto najosjetljivija komponenta cijelog spoja zbog iznimno malih vremenskih konstanti elektroničkih poluvodičkih sklopki kojima upravlja frekvencijom. Dozvoljena preopterećenja obično su zadana pomoću preglednih tablica, gdje je iznos nadvišenja snage dan kao funkcija trajanja dotičnog dozvoljenog preopterećenja. [5] Regulator momenta mora osigurati da preopterećenja ne traju dulje od tablicama previđenih, kako ne bi došlo do kvara.

U obzir treba uzeti i kratki spoj generatora koji se manifestira višestrukim povećanjem njegovog momenta (3 - 7 puta), [1]. Kako je u predloženom algoritmu moment ograničen na 180% nazivne vrijednosti, njegova povećanja pri normalnom radu vjetroagregata iznad nazivne brzine vrtnje ne predstavljaju poseban problem. U slučaju da se dostigne kritični moment, implementira se neka od izvedbi ograničivača momenta, a višak snage se disipira kroz npr. toplinu.

Naposlijetku, zaključuje se da algoritam upravljanja treba postignuti balans između ograničenja spoja vjetroagregata na mrežu (frekvencijskog pretvarača i generatora) i kvalitete kompenzacije udara vjetra. Potrebno je pogotovo paziti da se preopterećenje frekvencijskog pretvarača spriječi u svim pogonskim uvjetima, jer je to ključna komponenta za prijenos električne energije sa vjetroagregata na električnu mrežu.

6. Zaključak

Koncept dodatnog upravljanja momentom generatora iznad nazivne brzine vjetra ima svojih mana i prednosti. Promjene brzine vrtnje rotora daleko su manje nego kod regulacije standardnim PI regulatorom zakreta lopatica, što je jako pozitivna odlika ovog algoritma. Dodatna prednost leži u činjenici da je osjetljivost aerodinamičkog momenta vjetroturbine na promjene kuta zakreta lopatica najmanja oko nazivne brzine vjetra zbog nelinearnosti sustava. Zbog toga je vrlo teško klasičnim PI regulatorom ostvariti blagi prijelaz između režima. Osim toga, dok je brzina vjetra ispod nazivne, lopatice miruju i u pravilu su zakočene, pa je potrebno više vremena kada se pokreću iz mirovanja. To često dovodi do nedozvoljenih brzina i sigurnosnog kočenja vjetroagregata [1]. Upravljanjem momentom generatora proporcionalnim regulatorom rješava se ovaj problem, jer povećanje momenta generatora djeluje kao privremeni kočni moment dok lopatice ne počnu reagirati i utjecati na promjenu aerodinamičkog momenta. Nadvišenja momenta ograničena su samim postupcima sinteze, pa se čak i pri ekstremnijim udarima vjetra ne ugrožavaju osjetljive komponente, kao što je frekvencijski pretvarač. Dapače, manja nadvišenja snage uglavnom mogu i generator i frekvencijski pretvarač trajno izdržati. U radu su obrađene dvije metode sinteze parametara, te se pokazalo da metoda s dodatnim upravljanjem i ograničenjem rezultira smanjenom aktivnošću servo sustava za zakret lopatica, kraćim periodom nadvišenja i njegovim manjim iznosom, uz nešto veći iznos momenta. Snaga je i pri ekstremnim udarima ostala ispod maksimalnog dozvoljenog iznosa, pa nema potrebe za ograničavanjem momenta.

Negativna posljedica dodatnog upravljanja momentom generatora iznad nazivne brzine vjetra jest povećano opterećenje mirujućeg dijela konstrukcije vjetroagregata. Moment opterećenja u x osi glavnog nosača, tj. vrha tornja, izravna je posljedica momenta generatora. Zbog toga je toranj jače opterećen. [1] Dodatna opterećenja i zamor materijala nastaju na mjestu spoja statora generatora i glavnog nosača.

Dodatna poboljšanja mogu se uvesti uvođenjem jednakog statičkog pojačanja i dominantne dinamike za sve radne točke. Doduše, temeljem ostvarenog odziva,

frekvencijske karakteristike otvorenih regulacijskih krugova za različite radne točke i različita proporcionalna pojačanja momenta ne razlikuju se drastično, dok su presječne frekvencije vrlo bliske. Uzimanjem konstrukcijskih opterećenja u obzir smanjile bi se oscilacije sustava. Važan čimbenik su i elementi pretvorbe i prijenosa energije razvijene na vjetroturbini prema električnoj mreži, jer su osjetljivi na trajnije promjene momenta generatora i nadvišenja brzine vrtnje.

7. Literatura

1. Jelavić, M: Upravljanje vjetroagregatom s ciljem smanjena dinamičkih opterećenja konstrukcije, doktorska disertacija, FER, Zagreb, 2009
2. Petrović V., Hure N., Baotić M., Primjena LabVIEW programskog alata za razvoj HIL strukture upravljanja brzinom vrtnje vjetroagregata, MIPRO 2010. str.1-7
3. Hure, N. Identifikacija po dijelovima afinog modela vjetroagregata u okolini njegove statičke karakteristike, diplomski seminar, FER, Zagreb 2010.
4. Calculation of extreme operating gust – SaECa Net, s Interneta, http://www.saecanet.com/calculation_page/000414_000543_extreme_operating_gust.php, 20. lipnja 2012.
5. Perić, N. Jelavić M, Wind turbine control for highly turbulent winds, s Interneta, <http://hrcak.srce.hr/file/73146>, 3.srpnja.2012.