

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA**

Zavod za automatiku i računalno inženjerstvo

DIPLOMSKI RAD br. 248

**UPRAVLJANJE VJETROAGREGATOM S  
CILJEM PRIGUŠENJA NJIHANJA TORNJA**

Vilim Kos

Zagreb, lipanj 2011.

## Zahvala

*Zahvaljujem prof.dr.sc. Nedjeljku Periću na izboru teme i sugestijama, a Vlahi Petroviću, dipl.ing. na svestranoj pomoći, korisnim savjetima i uputama tijekom izrade i pisanja rada. Posebnu zahvalnost dugujem obitelji koja me poticala i pružala potporu tijekom studija.*

## Diplomski zadatak

## Sadržaj

1. Uvod .....	1
2. Sustav regulacije vjetroagregata.....	5
3. Matematički model vjetroagregata .....	7
3.1. Koordinatni sustav lopatice .....	7
3.2. Koordinatni sustav središta glavčine.....	10
3.3. Koordinatni sustav gondole.....	12
3.4. Dinamika vrtnje rotora i njihanje tornja.....	13
3.5. Okomiti profil brzine vjetra i sjena tornja .....	14
4. Pojedinačno zakretanje lopatica .....	16
4.1. D-q koordinatni sustav .....	16
5. Identifikacija procesa .....	22
6. Sinteza regulatora.....	26
Zaključak .....	35
Literatura .....	36
Sažetak .....	37
Abstract.....	38
Životopis.....	39

## Popis slika

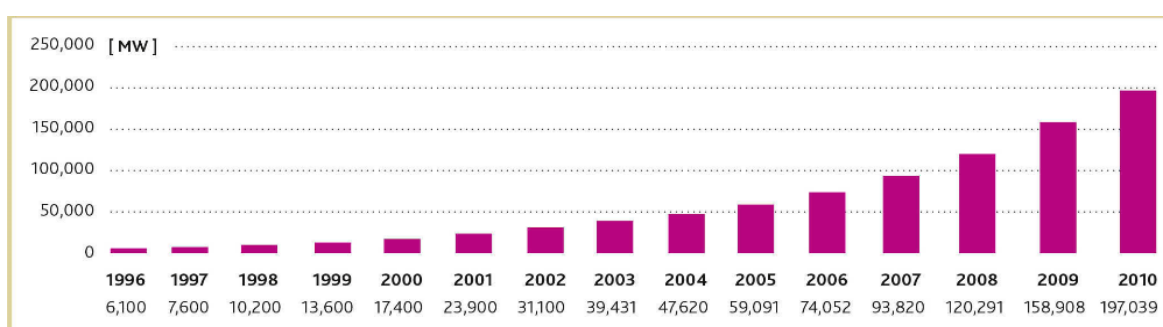
Slika 1.1 Ukupna instalirana snaga vjetroelektrana u svijetu po godinama .....	1
Slika 1.2 Instalirana snaga vjetroelektrana u svijetu po regijama i godinama .....	2
Slika 1.3 Najveća tržišta energije vjetra u 2010.god. ....	2
Slika 1.4 Godišnja prognoza instalacije energije vjetra po regijama .....	3
Slika 2.1 Sustav regulacije vjetroagregata.....	6
Slika 3.1 Koordinatni sustav lopatice .....	8
Slika 3.2 Mirni koordinatni sustav središta glavčine .....	11
Slika 3.3 Koordinatni sustav gondole .....	12
Slika 3.4 Koeficijent utjecaja sjene tornja .....	15
Slika 4.1 Shema upravljanja za smanjenje strukturnih opterećenja.....	17
Slika 4.2 Blokowska shema upravljanja u d-q koordinatnom sustavu .....	19
Slika 4.3 Kut zakreta prve loptice .....	20
Slika 4.4 Moment opterećenja u korijenu prve lopatice .....	21
Slika 5.1 Odziv sustava na pobudni PRBS signal .....	23
Slika 5.2 Promjena brzine vrtnje kod validacije dobivenog modela .....	24
Slika 5.3 Promjena kuta zakreta lopatice kod validacije dobivenog modela .....	25
Slika 5.4 Prikaz momenta opterećenja kod validacije dobivenog modela.....	25
Slika 6.1 Pojednostavljena shema sustava upravljanja vjetroagregatom .....	26
Slika 6.2 Prikaz vjetra korištenog u simulacijama .....	29
Slika 6.3 Odziv brzine vrtnje rotora vjetroagregata .....	30
Slika 6.4 Odziv kuta zakreta prve lopatice.....	30
Slika 6.5 Odziv momenta opterećenja u korijenu prve lopatice .....	31
Slika 6.6 Odziv momenta opterećenja u korijenu treće lopatice .....	31
Slika 6.7 Odziv momenta opterećenja u d-q koordinatnom sustavu .....	32
Slika 6.8 Odziv brzine pomaka vrha tornja vjetroagregata .....	32

Slika 6.9 Uvećani odziv brzine pomaka vrha tornja vjetroagregata .....	33
Slika 6.10 Odziv referentnog i stvarnog kuta zakreta lopatice .....	34

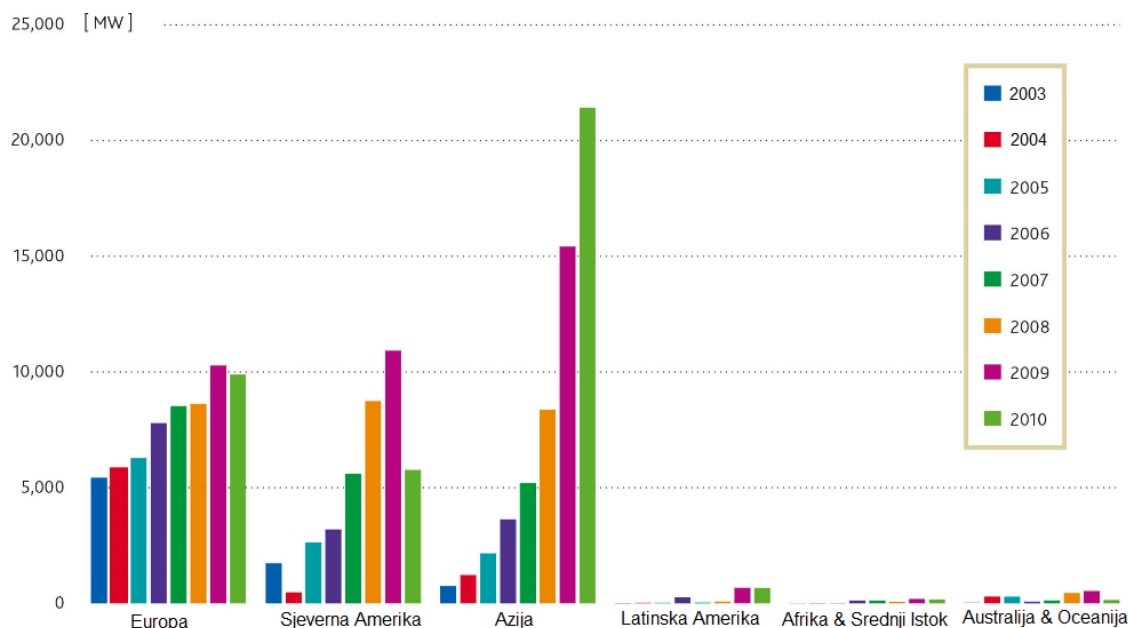
## 1. Uvod

Iskorištavanje snage vjetra bilo je kroz povijest od velikog značaja u raznim gospodarskim granama. Danas se najviše pažnje usmjerava na energiju vjetra kao na jedan od mogućih alternativnih ekoloških izvora energije. Vjetar predstavlja neiscrpan izvor energije čiji ukupni potencijal višestruko nadmašuje svjetske potrebe za električnom energijom. Korištenje energije vjetra u proizvodnji električne energije počinje se razvijati u tridesetim godinama prošlog stoljeća izgradnjom prvih vjetroelektrana. U zadnjem desetljeću 20.st. počinje brži razvoj tehnologije turbina za vjetroelektrane. U samo pet godina težina turbina je prepolovljena, a stvorena buka prepolovljena je za samo tri godine. Prije nekoliko godina turbina s kapacitetom od 500 kW je bila senzacija, dok danas postoje turbine i snage do 5 MW. Vjetroenergetika je grana energetike koja se najbrže razvija, kako u pogledu tehnologije, tako i u pogledu instaliranih vjetroelektrana u svijetu. Povećanje ljudske populacije uzrokuje stalno povećanje potreba za energijom, posebno električnom energijom. Trend rasta potreba na globalnom nivou iznosi oko 2,8 % godišnje. Od svih obnovljivih izvora energije u novije doba najveću stopu porasta izgradnje imaju vjetroelektrane [1]. Na slikama 1.1-4. prikazan je razvoj instalirane snage vjetra u svijetu po godinama, regijama, državama kao i procjena budućeg razvoja vjetroelektrana [2].

Svi ovi podaci posljedica su činjenice da je tehnologija iskorištavanja energije vjetra dostupna i sigurna. Troškovi su znatno smanjeni, a javno mišljenje ima izrazito pozitivan stav prema obnovljivim izvorima energije. Struja proizvedena iz energije vjetra nema kao nusprodukt nikakvih onečišćivača okoliša. U usporedbi s drugim oblicima dobivanja energije nema nikakve opasnosti po ljudski život.

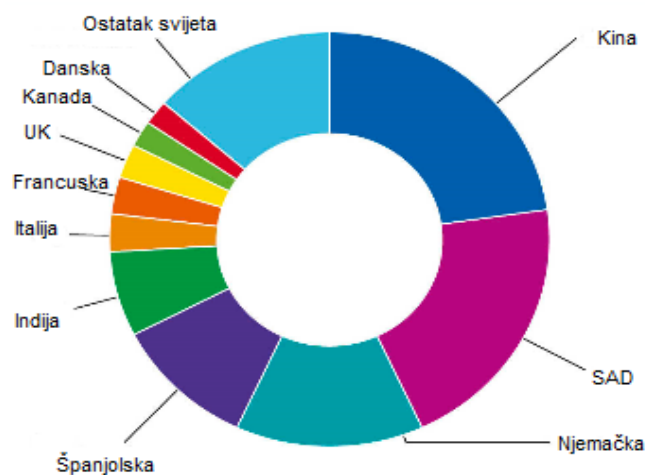


Slika 1.1. Ukupna instalirana snaga vjetroelektrana u svijetu po godinama



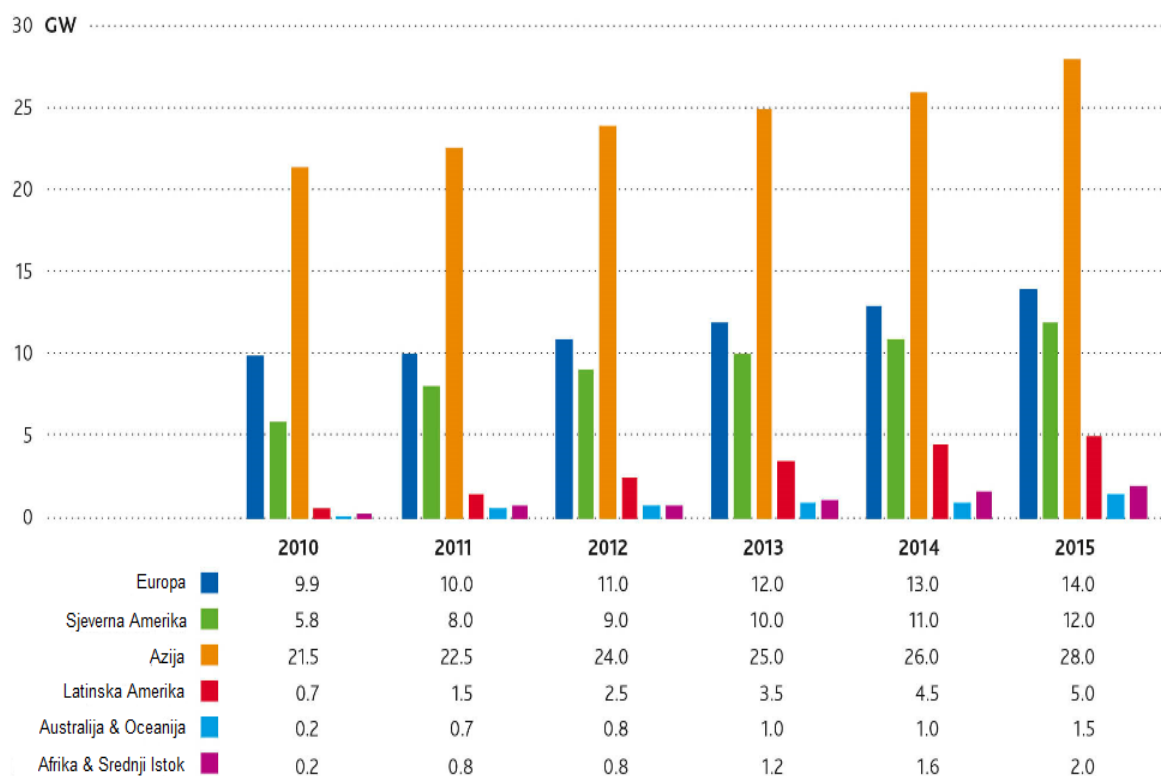
Slika 1.2. Instalirana snaga vjetroelektrana u svijetu po regijama i godinama

Među najveća tržišta energije vjetra u svijetu s najvećom instaliranom snagom vjetroelektrana spadaju Kina, SAD, Njemačka, Španjolska, Indija, dok je veliki doprinos razvoju moderne vjetroenergetike dala Danska u kojoj je industrija vjetroagregata postala jedna od vodećih industrija. Snaga instaliranih vjetroelektrana u 2009.god. porasla je za 31%, odnosno uz instaliranu dodatnu snagu od 37,5 GW ukupna instalacija snage vjetroelektrana na kraju te godine je iznosila 157,9 GW. Trećina instalirane snage vjetroelektrana u 2009.god. je u Kini, koja je dvije godine uzastopce doživjela rast instalirane snage od preko 100%.



Slika 1.3. Najveća tržišta energije vjetra u 2010.god.





Slika 1.4. Godišnja prognoza instalacije energije vjetra po regijama

Osnovni zadatak upravljanja vjetroagregatom je regulacija brzine vrtnje i snage vjetroagregata u smislu optimiranja proizvodnje električne energije. Pritom se mora uzeti u obzir kako smanjiti strukturna opterećenja i njihanja tornja. Naime, suvremeni vjetroagregati su, tijekom svog rada, izloženi velikim strukturnim opterećenjima koja su promjenjiva zbog turbulentne prirode vjetra, okomitih profila brzine vjetra, djelovanja tornja na strujanje zraka i drugih. Zbog potencijalno velikih strukturnih opterećenja, potrebna je masivna konstrukcija, što poskupljuje proizvodnju vjetroagregata. S druge strane, pokazalo se da je na iznose pojedinih strukturnih opterećenja moguće utjecati adekvatnim upravljanjem koje koristi zakretanje lopatica rotora oko njihove uzdužne osi (engl. *Pitch control*). Kod ovakvog načina upravljanja, prilikom jakih vjetrova se, na temelju iznosa proizvedene snage, lopatice zakreću iz ili u vjetar, smanjujući ili povećavajući tako napadni kut kako bi se održala zadana razina snage.

Cilj ovog rada je istražiti složene strukture upravljanja kojim bi se prigušilo njihanje tornja vjetroagregata. Rad je organiziran kako slijedi:

U drugom se poglavlju opisuju fizikalne osnove rada vjetroagregata, pretvaranje energije vjetra u energiju vrtnje rotora te se navode radna područja vjetroagregata.

U trećem poglavlju je prikazan izvod nelinearnog matematičkog modela vjetroagregata koji sadržava njihanje tornja te opterećenja lopatica, glavčine i gondole vjetroagregata.

U četvrtom poglavlju opisana je metoda smanjivanja harmoničkih strukturnih opterećenja pojedinačnim zakretanjem lopatica korištenjem Parkove transformacije u d-q koordinatni sustav.

U petom poglavlju opisuje se identifikacija modela opterećenja koja se kasnije koristi za sintezu regulatora. Identifikacija je provedena na realističnom modelu vjetroagregata.

U zadnjem, šestom poglavlju opisana je sinteza regulatora za upravljanje brzinom vrtnje pomoću kojeg bi se prigušilo njihanje tornja vjetroagregata. Upravljanje se obavlja pomoću linearnog kvadratičnog regulatora LQR-a.

## 2. Sustav regulacije vjetroagregata

Snaga vjetra, odnosno snaga gibanja zračne mase s kružnim presjekom radijusa jednakim radijusu rotora vjetroagregata, proporcionalna je trećoj potenciji brzine vjetra te je opisana izrazom [3]:

$$P_{vj} = \frac{1}{2} \rho_z v_{vj}^3 R_r^2 \pi, \quad (2-1)$$

gdje je  $\rho_z$  gustoća zraka,  $R_r$  polumjer presjeka rotora vjetroagregata, a  $v_{vj}$  brzina vjetra. Iz izraza (2-1) očito je da snaga vjetra raste izrazito brzo s porastom brzine vjetra. Ta činjenica je važna jer pokazuje izraženu nelinearnost vjetroagregata, ali i zato što uvjetuje potrebu za dva različita režima upravljanja, koja su opisana u nastavku. Pretvorba kinetičke energije vjetra u energiju vrtnje rotora vjetroagregata je moguća jer su lopatice vjetroagregata oblikovane slično krilima zrakoplova. Zbog specifičnog oblika aerodinamičkog profila lopatica vjetroagregata dolazi do nejednakog tlaka iznad i ispod samih lopatica te se javlja sila uzgona. Sila uzgona uzrokuje zakretni moment na osovini vjetroturbine koji se koristi za pokretanje generatora. Uz silu uzgona prisutna je i sila potiska na rotor koja je nepoželjna jer je glavni izvor opterećenja konstrukcije i uzrok njihanja tornja.

Vjetroagregat radi u dva režima rada. Prvi se javlja za vrijeme slabih vjetrova kada je brzina vjetra manja od nazivne brzine vjetra, a samim time je i snaga vjetra manja od nazivne snage generatora vjetroagregata. U tom slučaju lopatice rotora treba držati na minimalnom kutu zakreta, najčešće na  $0^\circ$ , kako bi se energija vjetra maksimalno iskoristila. Glavna zadaća sustava upravljanja u ovom području je prilagoditi brzinu vrtnje generatora brzini vjetra tako da se osigura maksimalni koeficijent učinkovitosti.

Drugi režim rada javlja se za vrijeme jakih vjetrova kada je snaga vjetra daleko veća od snage generatora vjetroagregata. Zadatak sustava upravljanja u tom području jest ograničenje snage vjetroagregata što se postiže zakretanjem lopatica rotora oko njihove uzdužne osi čime se mijenja napadni kut koji lopatice rotora zatvaraju sa strujom zraka. Granica između dva režima rada je nazivna brzina vjetra, tj. najmanja brzina vjetra pri kojoj vjetroagregat ostvaruje nazivnu

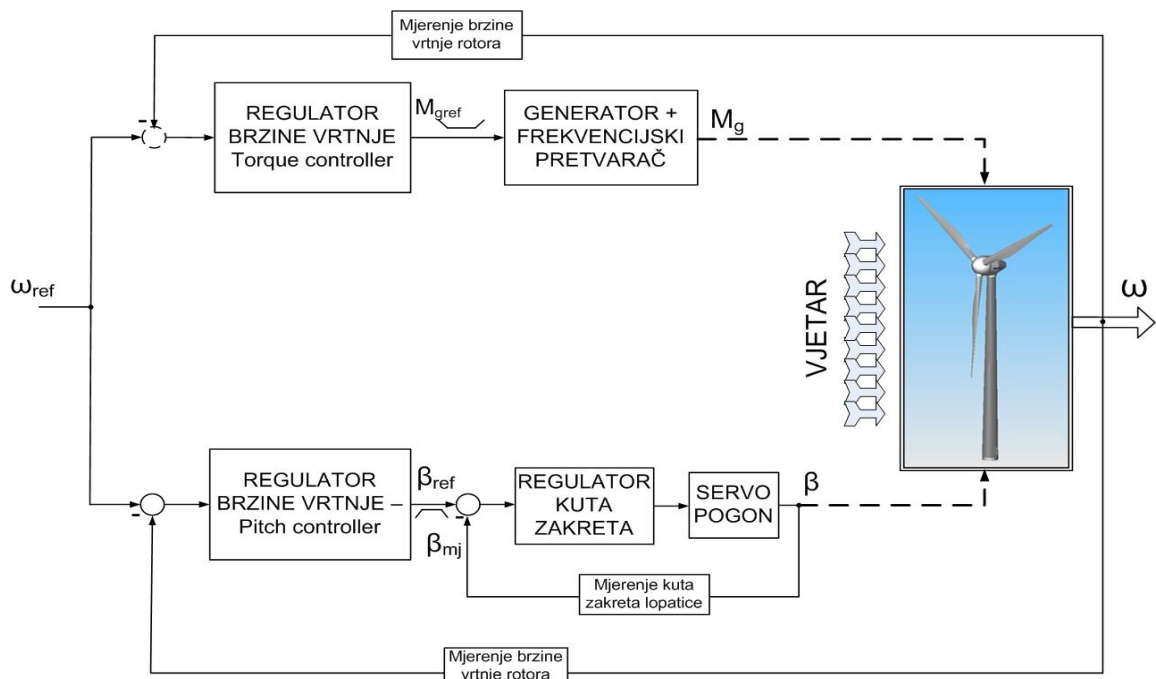
snagu. Nazivna ili nominalna snaga je najveća moguća snaga koju generator može kontinuirano proizvoditi.

Vjetroagregat nema sposobnost iskorištenja cjelokupne energije vjetra jer bi to značilo da je gibanje zračne mase zaustavljeno neposredno iza rotora vjetroagregata. Omjer između mehaničke snage vjetroagregata  $P_m$  i ukupne snage vjetra  $P_{vj}$  definira koeficijent učinkovitosti  $C_p$  [3]:

$$C_p = \frac{P_m}{P_{vj}} = f(v_{vj}, \omega, \beta). \quad (2-2)$$

Koeficijent učinkovitosti (2-2) ovisan je o brzini vjetra  $v_{vj}$ , brzini vrtnje rotora  $\omega$  i kutu zakreta lopatica  $\beta$ .

Iz gore navedenih činjenica očito je da sustav upravljanja vjetroagregatom čine dvije osnovne regulacijske petlje – jedna određuje moment generatora, a druga kut zakreta lopatica. Obje petlje djeluju istodobno, ali ovisno o radnom području, jedna je uvijek dominantna. Shema sustava upravljanja je prikazana na slici 2.1.



Slika 2.1. Sustav regulacije vjetroagregata

### 3. Matematički model vjetroagregata

U ovom poglavlju prikazan je nelinearan matematički model vjetroagregata. Pažnja se posvećuje opterećenjima na lopatice, glavčinu i gondolu vjetroagregata. Koordinatni sustavi korišteni u promatranjima opterećenja predstavljaju standard koji koriste međunarodne standardizacijske i certifikacijske kuće, poput certifikacijske kuće Germanischer Lloyd [4]. Toranj vjetroagregata je fleksibilan te se savija pod utjecajem sila, dok lopatice rotora smatramo krutima jer su one mnogo kruće od tornja. Porastom dimenzija vjetroagregata lopatice su sve fleksibilnije te se na promatranom vjetroagregatu od 2,5 MW ne bi smjele u potpunosti zanemariti. Opis matematičkog modela služi za razumijevanje nastanka i prijenosa opterećenja s lopatica na ostatak konstrukcije, dok će se kasnije za sintezu regulatora koristiti identificirani model koji sadržava i efekte savijanja lopatica. Također se uzima pretpostavka da je ravnina rotora okomita na smjer vjetra što u pravilu nije, no takva pretpostavka ne narušava u značajnijoj mjeri točnost modela.

#### 3.1. Koordinatni sustav lopatice

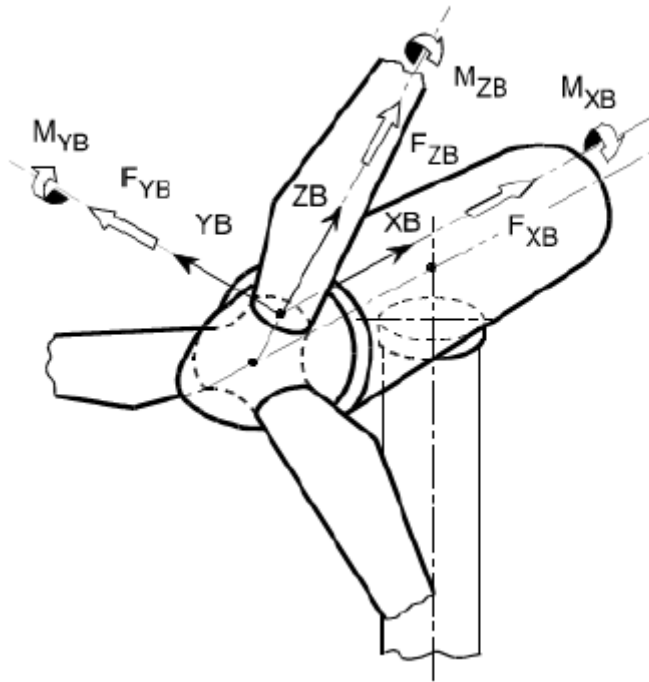
Koordinatni sustav lopatice prikazan je slikom 3.1. Apcisa ima smjer vjetra, aplikata je okomita na apcisu i ima smjer dulje osi lopatice, a ordinata je okomita na druge dvije osi i usmjerena tako da s njima tvori desni Kartezijev koordinatni sustav.

Ishodište se nalazi u korijenu lopatice pa koordinatni sustav rotira zajedno s lopaticom. U koordinatnom sustavu kao na slici 3.1. sila na lopatice u smjeru apcise je aerodinamičkog karaktera te vrijedi sljedeći izraz [5]:

$$F_{x,i} = \frac{1}{2} \rho_z R_r^2 \pi C_{Fx}(\lambda_i, \beta_i) v_{vj,i}^2, \quad (3-1)$$

gdje je  $C_{Fx}(\lambda_i, \beta_i)$  koeficijent koji određuje ovisnost aerodinamičke sile o omjeru obodne brzine i brzine vjetra  $\lambda_i$  te o kutu zakreta lopatica  $\beta_i$ .

Pod utjecajem sile potiska toranj vjetroagregata se savija te se takvo gibanje opisuje preko horizontalnih pomaka vrha tornja u smjeru vjetra  $x_{nod}$ . Kako se toranj savija rotor vjetroagregata osjeća različitu brzinu vjetra.



Slika 3.1. Koordinatni sustav lopatice

Relativna brzina vjetra za pojedinu lopaticu  $v_{vj,i}$  rezultat je interakcije stvarne brzine vjetra na lopatici  $v_{vj0,i}$  i gibanja vrha tornja naprijed-natrag te zadovoljava sljedeći izraz:

$$v_{vj,i} = v_{vj0,i} - \dot{x}_{nod} + \frac{3}{2h_t} \frac{3R_b}{4} \dot{x}_{nod} \cos\theta_i, \quad (3-2)$$

gdje je  $h_t$  visina tornja vjetroagregata, a  $\theta_i$  azimut pojedine lopatice. Za toranj vjetroagregata pretpostavlja se da je prizmatična šipka duljine  $h_t$  pa faktor  $\frac{3}{2h_t}$  predstavlja omjer pomaka i rotacije uzrokovane savijanjem tornja, dok faktor  $\frac{3R_b}{4}$  predstavlja djelovanje efekta naginjanja gondole koji nema isti utjecaj na relativnu brzinu vjetra duž cijele lopatice.

Osim sile u smjeru apcise definiraju se i sile na lopatice u smjeru drugih dviju osi:

$$F_{y,i} = F_{y,aero,i} + F_{y,grav,i} + F_{y,inerc,i} , \quad (3-3)$$

$$F_{z,i} = F_{z,aero,i} + F_{z,grav,i} + F_{z,inerc,i}. \quad (3-4)$$

Aerodinamičke komponente sile definiraju se slično kao za silu  $F_{x,i}$ .

$$F_{y,aero,i} = \frac{1}{2} \rho_z R_r^2 \pi C_{Fy}(\lambda_i, \beta_i) v_{vj,i}^2 \quad (3-5)$$

$$F_{z,aero,i} = \frac{1}{2} \rho_z R_r^2 \pi C_{Fy}(\lambda_i, \beta_i) v_{vj,i}^2. \quad (3-6)$$

Gravitacijska komponenta sile je uvijek usmjerena vertikalno prema dolje te se zbog rotiranja koordinatnog sustava pojavljuje u ovisnosti o azimutu.

$$F_{y,grav,i} = -m_l g \sin \theta_i, \quad (3-7)$$

$$F_{z,grav,i} = -m_l g \sin \theta_i, \quad (3-8)$$

gdje je  $m_l$  masa lopatice, a  $g=9,81 \text{ m/s}^2$  akceleracija gravitacijske sile.

Inercijske sile se različito manifestiraju za svaku os. Kod sile  $F_{y,i}$  se javlja reakcija na ubrzanje lopatice dok inercijska komponenta sile  $F_{z,i}$  predstavlja centrifugalnu silu. Djelovanje inercijskih sila po cijeloj lopatici opisujemo jednom silom s hvatištem u centru mase lopatice:

$$F_{y,inerc,i} = m_l \dot{\omega} (R_{gl} + z_{cm,l}), \quad (3-9)$$

$$F_{z,inerc,i} = m_l (R_{gl} + z_{cm,l}) \omega^2, \quad (3-10)$$

gdje zbroj polumjera glavčine  $R_{gl}$  i koordinate na z-osi centra mase lopatice  $z_{cm,l}$  predstavlja udaljenost centra mase lopatice od centra rotora.

Jednako kao i sile, moguće je definirati i momente koji djeluju na svaku lopaticu. Moment  $M_{x,i}$  sastoji se od zbroja aerodinamičke, gravitacijske i inercijske komponente, te se opisuje sljedećim izrazima:

$$M_{x,i} = M_{x,aero,i} + M_{x,grav,i} + M_{x,inerc,i}, \quad (3-11)$$

$$M_{x,aero,i} = \frac{1}{2} \rho_z R_r^3 \pi C_{Mx}(\lambda_i, \beta_i) v_{vj,i}^2, \quad (3-12)$$

$$M_{x,grav,i} = m_l g z_{cm,l} \sin \theta_i, \quad (3-13)$$

$$M_{x,iner,c,i} = -J_i \dot{\omega}. \quad (3-14)$$

gdje je  $J_i$  moment inercije lopatice oko središta vrtnje (oko apscise).

Gravitacijska komponenta uzrokovana je gravitacijskom silom koja djeluje u centru mase lopatice te se pojavljuje u ovisnosti o azimutu zbog vrtnje rotora. Inercijska komponenta je prisutna zbog reakcije na promjenu kutne količine gibanja. Momenti preostale dvije osi se isto sastoje od aerodinamičke, inercijske i gravitacijske komponentne, no gravitacijska i inercijska komponenta imaju jako mali utjecaj na ukupni moment pa se može pisati:

$$M_{y,i} \approx M_{y,aero,i} = \frac{1}{2} \rho_z R_r^3 \pi C_{My}(\lambda_i, \beta_i) v_{vj,i}^2, \quad (3-15)$$

$$M_{z,i} \approx M_{z,aero,i} = \frac{1}{2} \rho_z R_r^3 \pi C_{Mz}(\lambda_i, \beta_i) v_{vj,i}^2. \quad (3-16)$$

## 3.2. Koordinatni sustav središta glavčine

Kod koordinatnog sustava glavčine kao na slici 3.2. definira se posebno rotirajući, a posebno mirni koordinatni sustav. Rotirajući se dobije translacijom ishodišta koordinatnog sustava prve lopatice iz korijena lopatice u središte glavčine, dok je mirni koordinatni sustav središta glavčine jednak rotirajućem kada je os  $z$  rotirajućeg sustava pozicionirana vertikalno prema gore. Kut između aplikata rotirajućeg i mirnog koordinatnog sustava definira se kao  $\theta$ . Ako se ta dva koordinatna sustava poklapaju tada  $\theta$  iznosi nula [5].

$$\theta = \theta_1 = \theta_2 - \frac{2\pi}{3} = \theta_3 - \frac{4\pi}{3}. \quad (3-17)$$

Sila na središte glavčine definira se kao zbroj sila na pojedinoj lopatici:

$$F_{x,gl} = \sum_{i=1}^3 F_{x,i}, \quad (3-18)$$

te ima uvijek jednaki iznos i u mirnom i u rotirajućem koordinatnom sustavu jer je apcisa tih sustava uvijek jednako usmjerena. Iznos sila preostalih dviju osi je rezultanta sile na lopatice i sile teže glavčine:



$$F_{y,gl} = \sum_{i=1}^3 [F_{y,i} \cos(\theta_i - \theta) - F_{z,i} \sin(\theta_i - \theta)] - m_{gl} g \cdot \sin \theta, \quad (3-19)$$

$$F_{z,gl} = \sum_{i=1}^3 [F_{z,i} \cos(\theta_i - \theta) - F_{y,i} \sin(\theta_i - \theta)] - m_{gl} g \cdot \cos \theta, \quad (3-20)$$

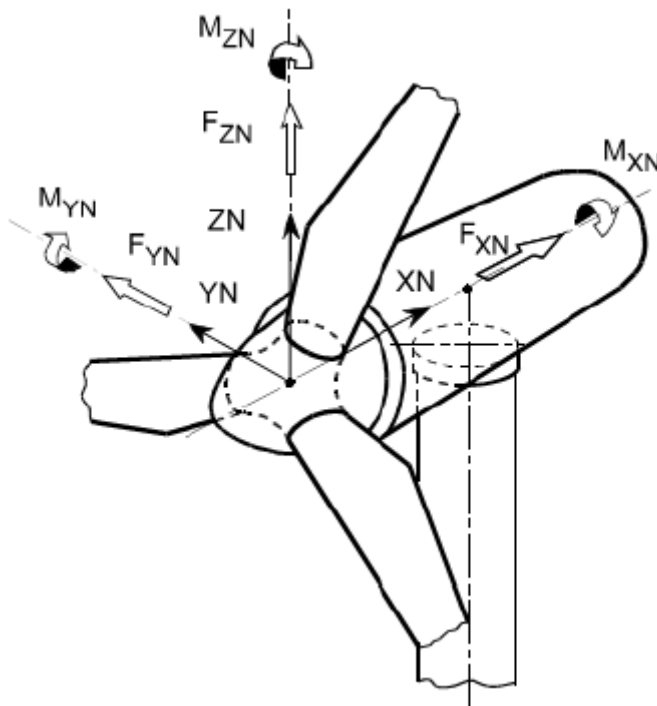
gdje je  $m_{gl}$  masa glavčine. Uvrštavanjem iznosa  $\theta = 0$  dobiju se iznosi sila u mirnom koordinatnom sustavu. Moment na središte glavčine u smjeru vjetra definiran je kao:

$$M_{x,gl} = \sum_{i=1}^3 (M_{x,i} - R_{gl} F_{y,i}) - J_{gl} \dot{\omega}, \quad (3-21)$$

gdje  $J_{gl}$  označava moment inercije glavčine. Ostala dva izraza za moment osim sila i momenta na lopatice sadrže i dodatni moment koji je prisutan zbog toga što centar mase ne leži na aplikati koordinatnog sustava.

$$M_{y,gl} = \sum_{i=1}^3 (M_{y,i} + R_{gl} F_{x,i}) \cos(\theta_i - \theta) - \sum_{i=1}^3 M_{z,i} \sin(\theta_i - \theta) - m_{gl} g x_{cm,gl} \cos \theta, \quad (3-22)$$

$$M_{z,gl} = \sum_{i=1}^3 (M_{y,i} + R_{gl} F_{x,i}) \sin(\theta_i - \theta) + \sum_{i=1}^3 M_{z,i} \cos(\theta_i - \theta) + m_{gl} g x_{cm,gl} \sin \theta. \quad (3-23)$$



Slika 3.2. Mirni koordinatni sustav središta glavčine

### 3.3. Koordinatni sustav gondole

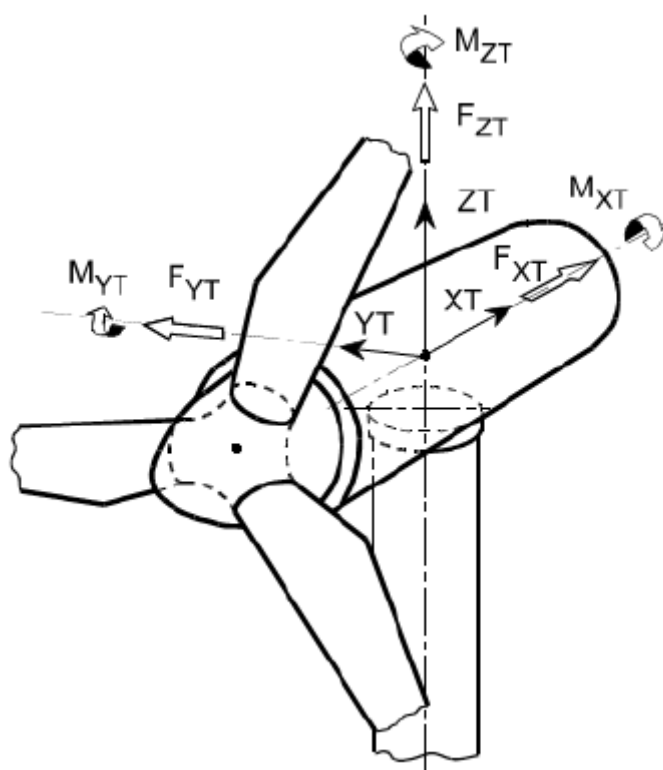
Koordinatni sustav gondole dobiva se translacijom ishodišta mirnog koordinatnog sustava središta glavčine u središte vrha tornja kako je prikazano slikom 3.3. Iz navedene tvrdnje vrijede sljedeći izrazi [5]:

$$F_{x,go} = F_{x,gl,mirni}, \quad (3-24)$$

$$F_{y,go} = F_{y,gl,mirni}, \quad (3-25)$$

$$F_{z,go} = F_{z,gl,mirni} - (m_{go} + m_{gen})g, \quad (3-26)$$

gdje su  $m_{go}$ ,  $m_{gen}$  mase gondole i generatora vjetroagregata.



Slika 3.3. Koordinatni sustav gondole

Moment na gondolu koji djeluje u smjeru vjeta rezultanta je momenta generatora, bočne sile na gondolu i gravitacije.

$$M_{x,go} = M_g - F_{y,gl,mirni}(h_{gl} - h_t) + (m_{go}y_{cm,go} + m_{gen}y_{cm,gen})g, \quad (3-27)$$

gdje su  $y_{cm,go}$  i  $y_{cm,gen}$  koordinate centra mase gondole i generatora na y osi,  $h_{gl}$  visina središta glavčine,  $h_t$  visina tornja. Preostala dva momenta u smjeru y i z osi definirana su sljedećim relacijama:

$$M_{y,go} = M_{y,gl,mirni} + F_{x,gl,mirni}(h_{gl} - h_t) + F_{z,gl,mirni}x_o - (m_{go}x_{cm,go} + m_{gen}x_{cm,gen})g, \quad (3-28)$$

$$M_{z,go} = M_{z,gl,mirni} - F_{y,gl,mirni}x_o, \quad (3-29)$$

gdje je  $x_o$  udaljenost ishodišta koordinatnog sustava glavčine i koordinatnog sustava gondole duž osi  $x$  (*engl. overhang*).

### 3.4. Dinamika vrtnje rotora i njihanja tornja

Relacija koja opisuje gibanje vjetroagregata je [5]:

$$J_g \dot{\omega} = M_{x,gl} - M_g, \quad (3-30)$$

gdje je  $J_g$  moment inercije generatora.

Sređivanjem se dolazi do sljedeće relacije:

$$J_t \dot{\omega} = M_a - M_g, \quad (3-31)$$

gdje je  $J_t$  moment inercije vjetroturbine, a aerodinamički pogonski moment se opisuje izrazom:

$$M_a = \sum_{i=1}^3 (M_{x,aero,i} - R_{gl} F_{y,aero,i}) = \frac{1}{2} \rho_z R_r^3 \pi C_q (\lambda_i, \beta_i) v_{vj,i}^2. \quad (3-32)$$

Potrebno je još odrediti jednadžbu koja opisuje njihanje tornja:

$$M \ddot{x}_{nod} + D \dot{x}_{nod} + C x_{nod} = F_{x,gond} + \frac{3}{2h_t} M_{y,gond}. \quad (3-33)$$

gdje su  $M$ ,  $D$  i  $C$  modalna masa, prigušenje i konstanta krutosti tornja. Gornjom jednadžbom opisano je gibanje naprijed-natrag koje ima znatni utjecaj na vladanje vjetroagregata, međutim može se i opisati gibanje lijevo-desno koja je posljedica momenta generatora i bočne sile na gondolu:

$$M \ddot{x}_{nay} + D \dot{x}_{nay} + C x_{nay} = F_{y,gond} + \frac{3}{2h_t} M_g. \quad (3-34)$$

Faktor  $\frac{3}{2h_t}$  koji stoji uz momente u navedenim relacijama predstavlja omjer pomaka i rotacije uzrokovane savijanjem tornja vjetroagregata. Pritom se pretpostavlja da je toranj prizmatična šipka duljine  $h_t$ .

### 3.5. Okomiti profil brzine vjetra i sjena tornja

Zbog svojih velikih dimenzija, lopatice vjetroagregata osjećaju različitu brzinu vjetra ovisno o svojem položaju. Kako se rotor vjetroagregata okreće mijenja se i položaj lopatica te će bilo koje dvije točke udaljene po visini osjećati različitu brzinu vjetra. Brzina vjetra se povećava u višim slojevima atmosfere. Razlog tome je neravan reljef koje ublažuju strujanje vjetra. Eksponencijalni model koji opisuje okomiti profil brzine vjetra dan je sljedećom relacijom [5]:

$$v_{vj}(h) = v_{vj}(h_{gl}) \cdot \left(\frac{h}{h_{gl}}\right)^\alpha, \quad (3-35)$$

gdje je  $v_{vj}$  brzina vjetra,  $h$  promatrana visina,  $h_{gl}$  visina središta glavčine te  $\alpha$  eksponent okomitog profila vjetra koji modelira značajke tla. Efektivna brzina vjetra na pojedinoj lopatici može se aproksimirati brzinom vjetra na 3/4 duljine lopatice:

$$v_{vj}(h) = v_{vj}(h_{gl}) \cdot \left(1 + \frac{3R_b}{4h_{gl}}\right)^\alpha. \quad (3-36)$$

Sjena tornja je pojava do koje dolazi zbog toga što toranj vjetroagregata predstavlja prepreku struji zraka koja nastoji zadržati brzinu strujanja prije nego što postane deformirana. Zbog deformacije, brzina strujanja se smanjuje ispred i iza rotora vjetroagregata. Do smanjenja brzine strujanja zraka ispred tornja dolazi zbog toga što struja zraka mora zaobići toranj te se tako povećava volumen struje zraka, a brzina se pritom smanji. Kada se lopatica nađe ispred tornja ona će osjećati manju brzinu vjetra nego preostale dvije lopatice, te se zbog toga smanjuju aerodinamičke sile na toj lopatici. Za opisivanje sjene tornja vrijedi sljedeća jednadžba:

$$v_{vj,i,ts} = K_{ts} v_{vj,i}, \quad (3-37)$$

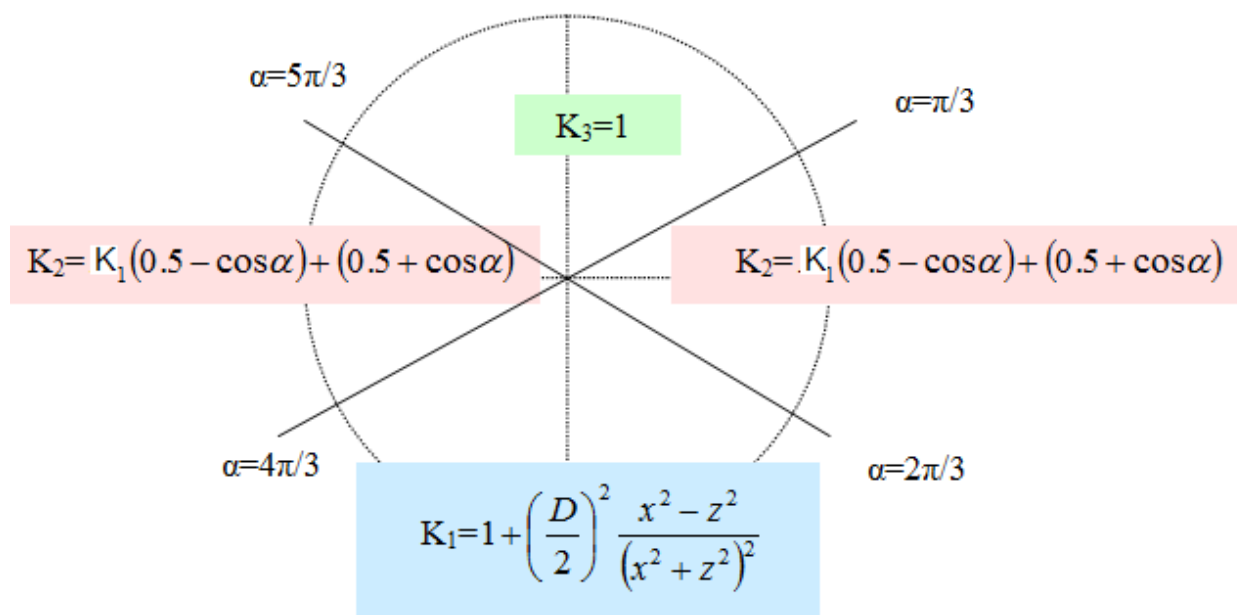
gdje  $v_{vj,i,ts}$  predstavlja brzinu vjetra na  $i$ -toj lopatici,  $v_{vj,i}$  brzinu vjetra na  $i$ -toj lopatici bez utjecaja sjene tornja te  $K_{ts}$  koeficijent utjecaja sjene tornja.

Koeficijent  $K_{ts}$  se računa ovisno o kutu pod kojim se lopatica nalazi (slika 3.4.). Za kutove između  $-\pi/3$  i  $\pi/3$ , lopatica nije u sjeni tornja, dakle, brzina vjetra je nepromijenjena i  $K_{ts}$  je 1. Za kutove između  $2\pi/3$  i  $4\pi/3$ ,  $K_{ts}$  se računa po formuli:

$$K_{ts} = 1 + \left(\frac{D}{2}\right)^2 \frac{x^2 - z^2}{(x^2 + z^2)^2}, \quad (3-38)$$

gdje su:

- $D$  - promjer tornja na visini na kojoj se proračunava utjecaj sjene tornja, [m],
- $z$  - udaljenost od tornja do lopatice, [m]. Računa se od simetrale tornja (po njegovoj visini) do lopatice,
- $x$  - umnožak duljine lopatice i sinusa kuta pod kojim se lopatica nalazi, [m]. Na ovaj način se utvrđuje trenutni položaj lopatice, odnosno nalazi li se i koliko lopatica u sjeni tornja.



Slika 3.4. Koeficijent utjecaja sjene tornja

Oba efekta unose ovisnost brzine vjetra koju lopatica osjeća o položaju, odnosno azimutu promatrane lopatice. To je ujedno i uzrok izraženoj periodičnosti u opterećenjima koja djeluju na lopatice, što znatno povećava zamor materijala i skraćuje životni vijek vjetroagregata.

## 4. Sustav pojedinačnog zakretanja lopatica

Porastom dimenzija kod modernih vjetroagregata, opterećenja konstrukcije postaju sve izraženija. Pritom se posebno ističu harmonička opterećenja uzrokovana vrtnjom rotora vjetroagregata i okomitim profilom brzine vjetra. Pošto takva opterećenja znatno utječu na zamor materijala i skraćuju očekivani životni vijek vjetroagregata, potrebno je razviti napredne metode upravljanja za smanjivanje opterećenja konstrukcije. Pritom su posebno značajna opterećenja frekvencije brzine vrtnje vjetroagregata. U ovom se poglavlju opisuje smanjenje harmoničkih opterećenja primjenom pojedinačnog zakreta lopatica i Parkove d-q transformacije [6].

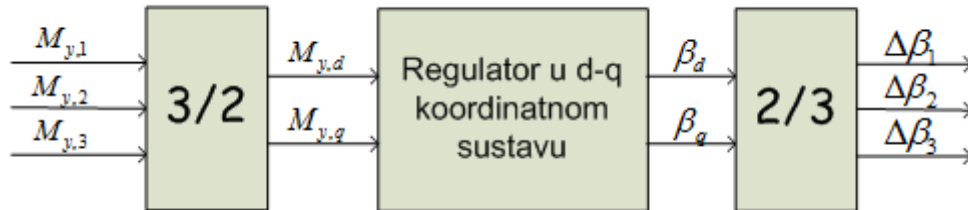
### 4.1. D-q koordinatni sustav

U ovom radu razmatraju se smanjenja opterećenja na frekvenciji 1p (engl. *once per revolution*) zbog činjenice da su opterećenja na pojedinu lopaticu najizraženija na frekvenciji prvog harmonika, koja je jednaka frekvenciji vrtnje rotora. Pošto su lopatice vjetroagregata pomaknute za kut od  $2\pi/3$ , opterećenja koja djeluju na pojedinu lopaticu također su pomaknuta za jednaki kut. Iz navedenog razloga potrebno je mijenjati kut pojedinačno za svaku lopaticu te se na taj način smanjuju harmonička strukturna opterećenja. Gore navedeni problem se rješava na način da glavni regulator koji reagira na promjene brzine vjetra daje zajednički kut zakreta za sve tri lopatice  $\beta_c$ , dok regulator za smanjenje opterećenja određuje posebno za svaku lopaticu dodatni zakret  $\Delta\beta_i$ . Ukupni zakret pojedine lopatice tada iznosi [6]:

$$\beta_i = \beta_c + \Delta\beta_i. \quad (4-1)$$

Za smanjenje strukturnih opterećenja vjetroagregata, mjeri se moment opterećenja u korijenu lopatice  $M_{y,i}$ , dok se upravljanje obavlja u d-q koordinatnom sustavu pošto nam je zanimljiva samo amplituda oscilacija frekvencije prvog

harmonika. Na slici 4.1. prikazana je shema upravljanja za smanjenje harmoničkih opterećenja.



Slika 4.1. Shema upravljanja za smanjenje strukturnih opterećenja

Transformacija u d-q koordinatni sustav i natrag izvode se pomoću sljedećih relacija:

$$\begin{bmatrix} M_{y,d} \\ M_{y,q} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\omega t + \frac{4\pi}{3}\right) \\ \sin(\omega t) & \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\omega t + \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} M_{y,1} \\ M_{y,2} \\ M_{y,3} \end{bmatrix}, \quad (4-2)$$

$$\begin{bmatrix} \beta_c \\ \beta_d \\ \beta_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \cos(\omega t) & \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\omega t + \frac{4\pi}{3}\right) \\ \sin(\omega t) & \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\omega t + \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \end{bmatrix}, \quad (4-3)$$

gdje su:

- $M_{y,q}, M_{y,d}$  - sinusna i kosinusna komponenta opterećenja  $M_{y,i}$ ,
- $\beta_q, \beta_d$  - sinusna i kosinusna komponenta kuta zakreta lopatica,
- $\beta_c$  - kolektivni kut zakreta lopatica,
- $\omega$  - brzina vrtnje rotora vjetroagregata.

U izrazima za momente opterećenja glavčine i gondole vjetroagregata(3-15), (3-19) i (3-20), osim gravitacijskih komponenata, nalaze se i vrijednosti opterećenja na lopaticu u d-q koordinatnom sustavu. Upotreba d-q transformacije je dodatno opravdana činjenicom da se d-q transformacija fizikalno odvija pri prijenosu opterećenja s rotirajućeg koordinatnog sustava lopatica vjetroagregata na mirne koordinatne sustave glavčine i gondole. Opterećenje na pojedinu lopaticu može se izraziti preko sljedećeg izraza:

$$M_{y,i} = M_{y,c} + \Delta M_{y,i}, \quad (4-4)$$

gdje je  $M_{y,c} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 M_{y,i}$  kolektivna vrijednost opterećenja, a  $\Delta M_{y,i}$  odstupanje od srednje vrijednosti za pojedinu lopaticu. Uvrsti li se izraz (4-4) u relaciju (4-2) gubi se informacija o kolektivnoj vrijednosti opterećenja  $M_{y,c}$ .

Da bi lopatice međusobno zamijenile položaje, odnosno da bi prva lopatica poprimila položaj druge, druga položaj treće a treća položaj prve potrebno je vrijeme iznosa  $\Delta t = \frac{2\pi}{3\omega}$ . Do navedenog iznosa potrebnog vremena došlo se iz prije navedene činjenice da su lopatice rotora razmaknute za kut  $\frac{2\pi}{3}$ , pa će zato i opterećenja na pojedinu lopaticu biti vremenski razmaknuta za iznos  $\Delta t$ . Iz navedenih razloga pojedina frekvencijska komponenta opterećenja na lopaticu se može pisati kao:

$$M_{y,i} = A \sin \left[ k \left( \omega t + \frac{2\pi}{3} i \right) + \varphi \right]. \quad (4-5)$$

Iz izraza (4-5) se vidi da je prvi harmonik opterećenja pojedine lopatice razmaknut za kut  $\omega \cdot \Delta t = 2\pi/3$ , dok su viši harmonici razmaknuti za kut prema sljedećem izrazu:

$$k \cdot \omega \cdot \Delta t = k \cdot \frac{2\pi}{3}, \quad (4-6)$$

gdje će za svaki  $k$  djeljiv s 3 fazni pomak biti višekratnik osnovnog perioda, a sinusi će za ostale vrijednosti  $k$  biti međusobno razmaknuti za  $2\pi/3$  te će se poništiti njihov zbroj. Iz tog razloga je očigledno da će kolektivna vrijednost opterećenja  $M_{y,c}$  sadržavati frekvencijske komponente  $0p$ ,  $3p$ ,  $6p$ , itd., odnosno navedene frekvencijske komponente izgubit će se transformacijom (4-1).

Uvrštenjem relacije (4-5) u transformaciju (4-2), određujemo preslikavanje ostalih frekvencijskih komponenata [7]:

$$M_{y,q} = A \cdot (S_1 - S_2), \quad (4-7)$$

$$S_1 = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \cos \left[ (k-1)\omega t + \varphi + (k-1) \frac{2\pi}{3} i \right], \quad (4-8)$$

$$S_2 = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \cos \left[ (k+1)\omega t + \varphi + (k+1) \frac{2\pi}{3} i \right], \quad (4-9)$$



Poznato je da je zbroj triju kosinusa međusobno razmaknutih za  $2\pi/3$  jednak nuli pa za zbrojeve iz relacija (4-7)(4-8)(4-9) možemo pisati kao[7]:

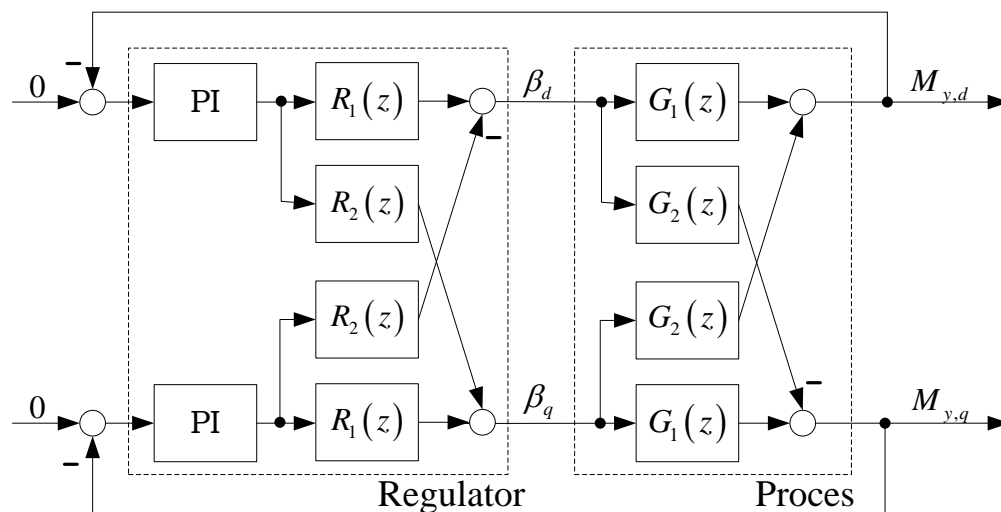
$$S_1 = \begin{cases} \cos[(k-1)\omega t + \varphi], & k-1 = 0,3,6 \dots \\ 0, & \text{inače} \end{cases} \quad (4-10)$$

$$S_2 = \begin{cases} \cos[(k+1)\omega t + \varphi], & k+1 = 0,3,6 \dots \\ 0, & \text{inače} \end{cases} \quad (4-11)$$

Relacijama (4-10) i (4-11) možemo potvrditi već dokazanu tvrdnju da frekvencije  $0p$ ,  $3p$ ,  $6p \dots$  ne sudjeluju u transformaciji (4-2), tj. da je njihova transformacija jednaka nuli. Također možemo primijetiti da će se frekvencija  $1p$  transformirati u konstantu, dok će se viši harmonici transformirati u najbliži harmonik djeljiv s tri (npr.  $2p$  i  $4p$  se transformira u  $3p$ ). Pošto je naš cilj smanjiti opterećenja frekvencije  $1p$ , viši harmonici predstavljaju smetnju te će se pri sintezi regulatora trebati pripaziti da budu dovoljno prigušeni.

Isti zaključci o transformiranju frekvencija bi se dobili i da smo umjesto sinusne komponente opterećenja izračunali kosinusnu komponentu.

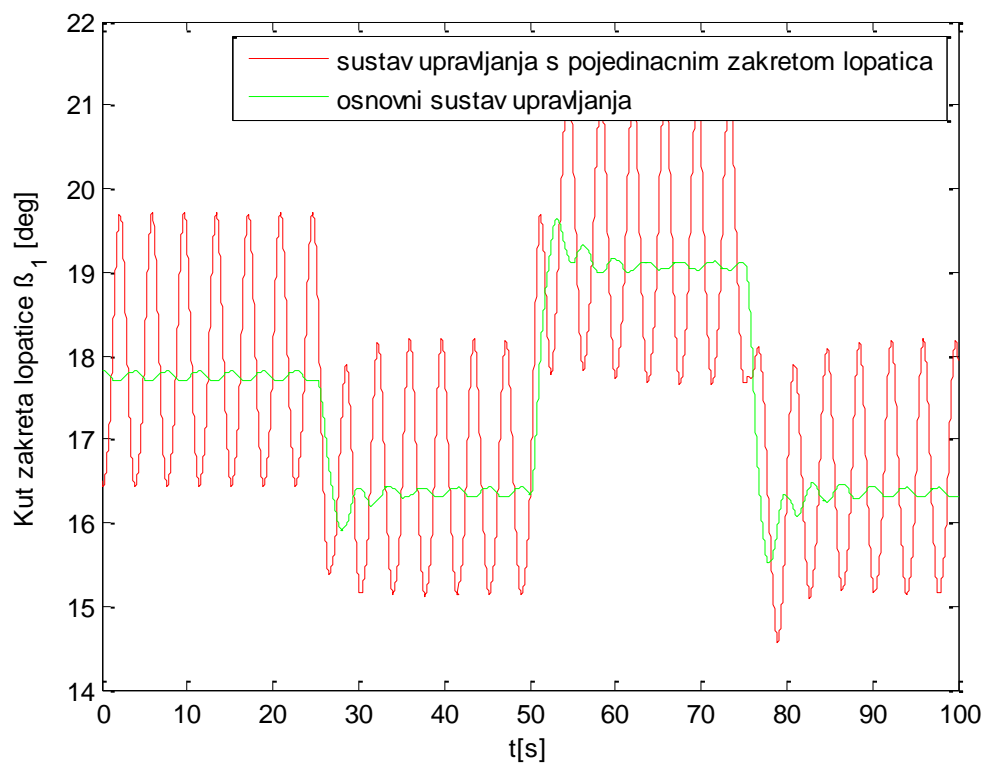
Pojedinačno upravljanje lopaticama u d-q koordinatnom sustavu zahtjeva dva PI regulatora u obje osi te jedan raspredni regulator, koji ima svrhu razdvajanja djelovanja dvaju PI regulatora. Načelna shema upravljanja pokazana je na slici 4.2.



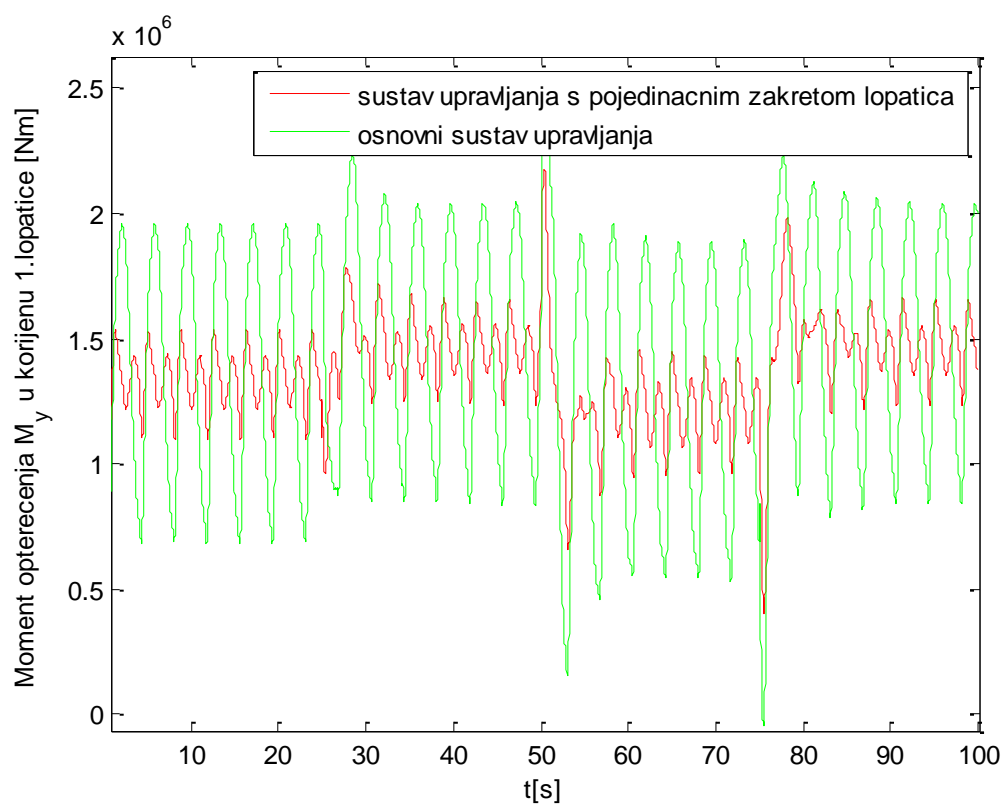
Slika 4.2. Blokvska shema upravljanja u d-q koordinatnom sustavu

Svaki od PI regulatora smanjuje jednu komponentu opterećenja, odnosno ideja je da se mijenjanjem sinusne komponente kuta zakreta smanjuje sinusna komponenta opterećenja, a mijenjanjem kosinusne komponente kuta zakreta smanjuje kosinusna komponenta opterećenja.

Na slikama 4.3. i 4.4. prikazani su odzivi kuta zakreta prve lopatice, kao i momenta opterećenja u korijenu prve lopatice kako bi se prikazalo smanjenje strukturnih opterećenja uz malo veću aktivnost zakreta lopatica korištenjem sustava s pojedinačnim zakretom lopatica u odnosu na osnovni sustav upravljanja s kolektivnim zakretom lopatica.



Slika 4.3. Kut zakreta lopatice

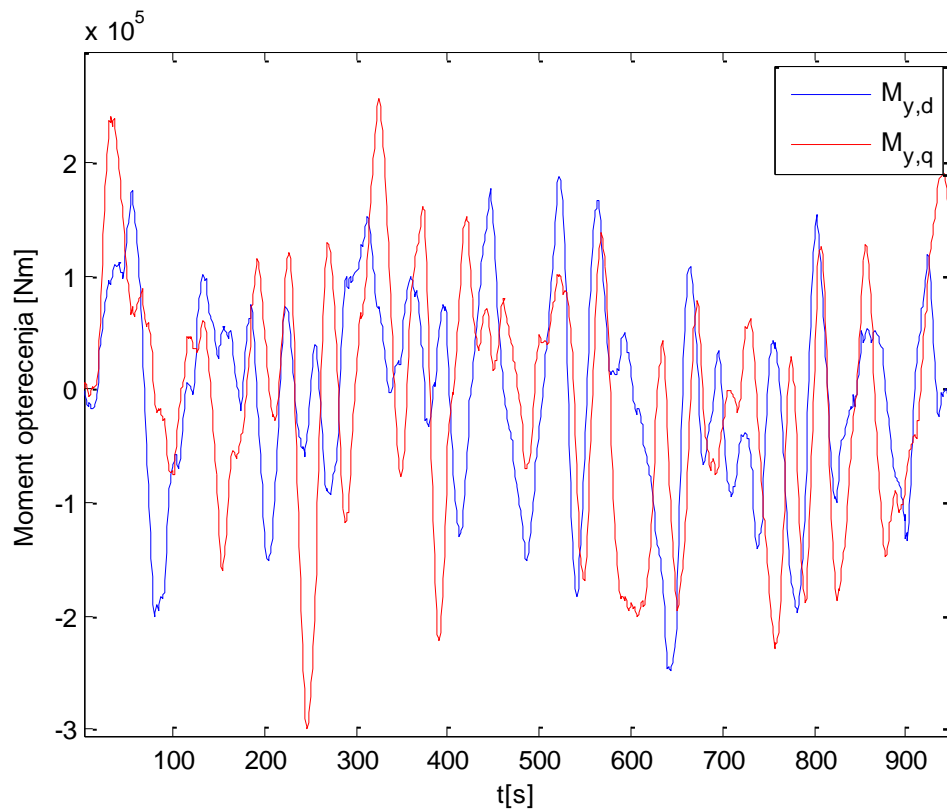


Slika 4.4. Moment opterećenja u korijenu prve lopatice

## 5. Identifikacija procesa

U ovom poglavlju opisuje se identifikacija modela opterećenja koja se provela u programskom alatu Matlab. Odzivi su snimljeni u programskom alatu GH Bladed. Iako se analitičkim modelom u trećem poglavlju objasnilo kako nastaju opterećenja te kako se prenose s lopatica na ostale dijelove vjetroagregata zbog korištenih pojednostavljenja kao što su krute lopatice te kvazistacionarni koeficijenti za aerodinamička opterećenja, za potrebe sinteze regulatora korištena je identifikacija modela procesa. Identifikacija je provedena na realističnom modelu vjetroagregata. Njihanje tornja je opisano s dva moda za gibanje naprijed-natrag i dva moda za gibanje lijevo-desno. Također su korištene fleksibilne lopatice s šest modova za gibanje lijevo-desno (u ravnini rotora) i šest modova za gibanje naprijed-natrag te servo pogon za svaku lopaticu[8]. Ovim postupkom traži se ovisnost momenata opterećenja na lopatice ( $M_{y,d}, M_{y,q}$ ), brzine vrtnje  $\omega$ , kutova zakreta lopatica ( $\beta_c, \beta_d, \beta_q$ ), akceleracije pomaka tornja  $\ddot{x}$ , brzine pomaka tornja  $\dot{x}$ , i pomaka tornja  $x$  o referentnim kutovima zakreta lopatica ( $\beta_{c,ref}, \beta_{d,ref}, \beta_{q,ref}$ ) u d-q koordinatnom sustavu.

Kao referentne vrijednosti kuta zakreta lopatica u d-q koordinatnom sustavu postavlja se PRBS (engl. *Pseudo Random Binary Sequence*) signal te se mjere momenti opterećenja u korijenu lopatica. Kao vrijeme takta PRBS signala uzeto je  $\Delta t = 80ms$ , dok je prilikom snimanja odziva korišteno vrijeme uzorkovanja  $T = 20ms$ . Amplituda prbs-a je  $c = 1^\circ$  (0.0175 rad) te osnovni period 60 sekundi [9]. Takav signal trajanja ponavljamo 15 puta pa je ukupno trajanje mjerenja 900 s. Pošto je vjetroagregat nelinearan sustav, model opterećenja je potrebno identificirati u više radnih točaka. U ovom radu prikazani su rezultati za radnu točku određenu brzinom vjetra  $v_{vj} = 19 m/s$ . Na slici 5.1. prikazan je odziv sustava na pobudni PRBS signal.



Slika 5.1. Odziv sustava na pobudni PRBS signal

Rezultat identifikacije može se prikazati kao model u prostoru stanja dvadeset i prvog reda sljedećeg oblika:

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k, \quad (5-1)$$

$$y_k = Cx_k, \quad (5-2)$$

gdje je matrica A dimenzija (21x21), matrica B dimenzija (21x3), a matrica C dimenzija (9x21). Ulaz i izlaz iz modela definirani su na sljedeći način:

$$u = [\beta_{c,ref}, \beta_{d,ref}, \beta_{q,ref}]^T, \quad (5-3)$$

$$y = [M_{y,d}, M_{y,q}, \omega, \beta_c, \beta_d, \beta_q, \ddot{x}, \dot{x}, x]^T,$$

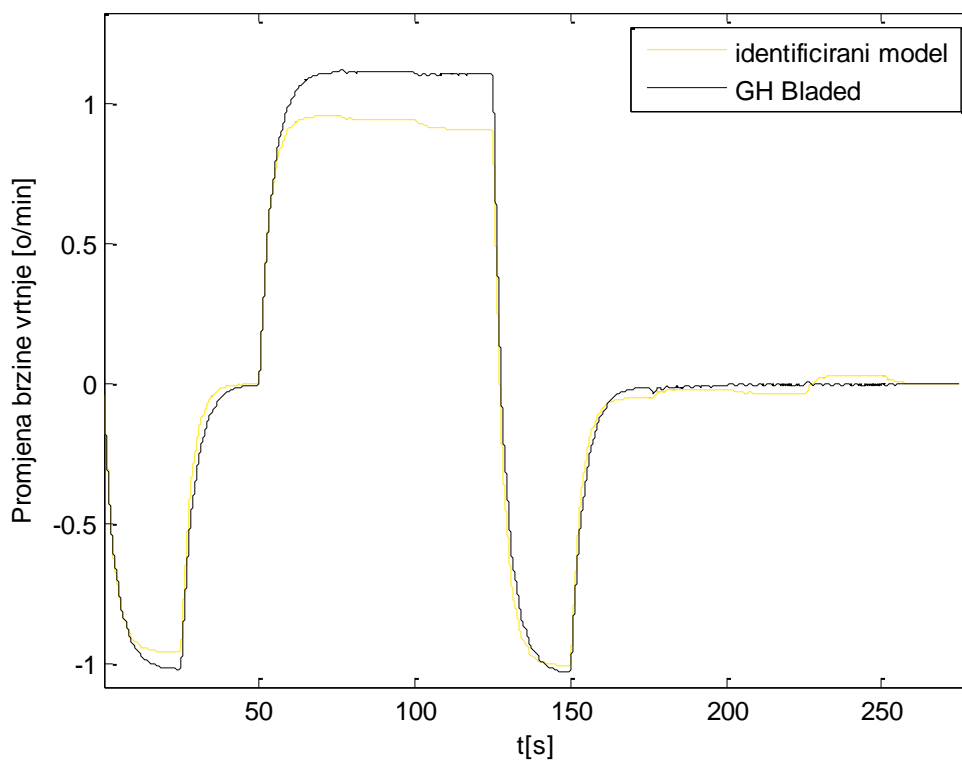
(5-4)

gdje su:

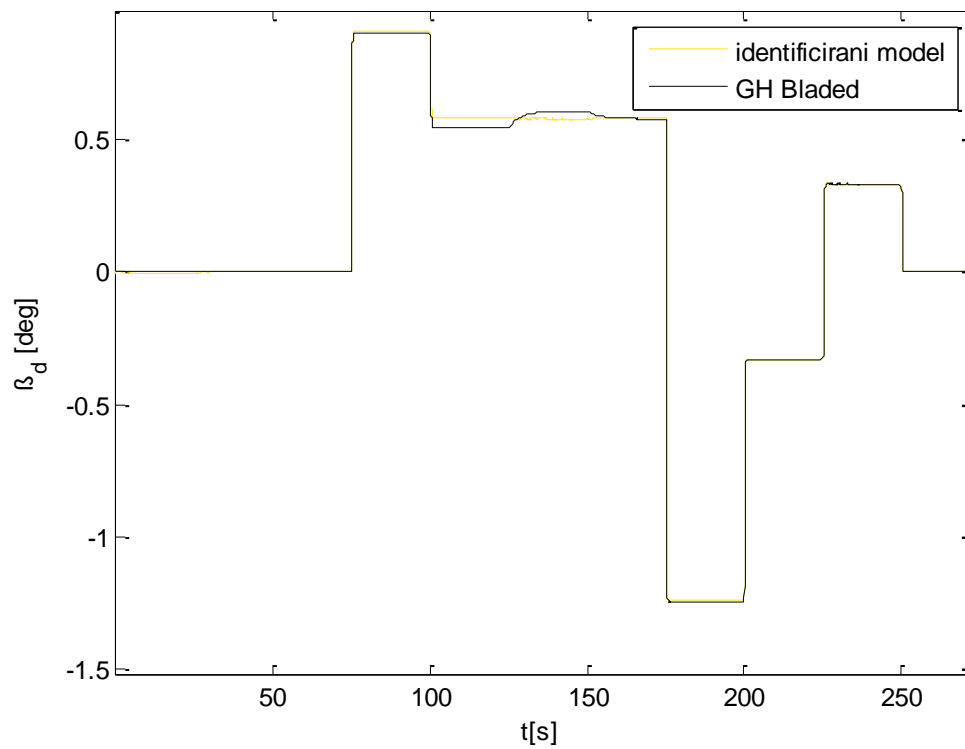
- $M_{y,d}, M_{y,q}$  - sinusna i kosinusna komponenta opterećenja  $M_{y,i}$ ,
- $\beta_c, \beta_d, \beta_q$  - kolektivna, sinusna i kosinusna komponenta kuta zakreta lopatica,

- $\beta_{c,ref}, \beta_{d,ref}, \beta_{q,ref}$  - kolektivna, sinusna i kosinusna komponenta referentnog kuta zakreta lopatica,
- $\omega$  - brzina vrtnje rotora,
- $\ddot{x}, \dot{x}, x$  - akceleracija, brzina i pomak tornja vjetroagregata.

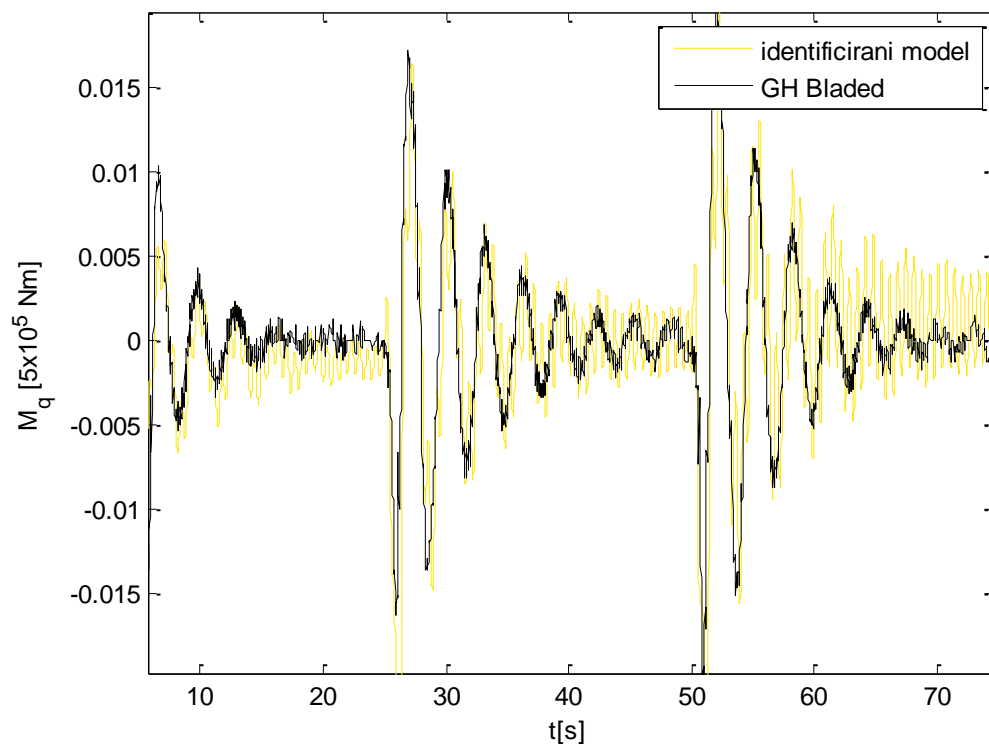
Na sljedećim slikama 5.2. i 5.3. prikazana je validacija identificiranog modela. Može se primijetiti zadovoljavajuće poklapanje s odzivima snimljenim u programskom alatu GH Bladed. Kao odabrani model koristi se model u prostoru stanja dvadeset i prvog reda.



Slika 5.2. Promjena brzine vrtnje kod validacije dobivenog modela



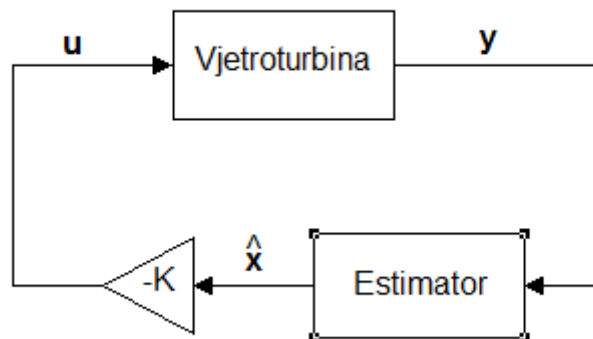
Slika 5.3. Promjena kuta zakreta lopatice kod validacije dobivenog modela



Slika 5.4. Prikaz momenta opterećenja kod validacije dobivenog modela

## 6. Sinteza regulatora

Na temelju identificiranog modela (5-1) i (5-2) projektira se regulator za upravljanje brzinom vrtnje pomoću kojeg bi se prigušilo njihanje tornja vjetroagregata, a analizom opterećenja koja utječu na njihanje tornja (vidi (3-33)) zaključuje se da je to moguće postići korištenjem kolektivnog i pojedinačnog zakretanja lopatica [11]. Iz tog razloga projektiramo regulator koji će koristiti i kolektivno i pojedinačno zakretanje lopatica za postizanje prigušenja njihanja tornja. Ideja je da se sinusnom i kosinusnom komponentom kuta zakreta lopatica ukloni (sinusna i kosinusna) komponenta opterećenja u d-q koordinatnom sustavu, dok se kolektivni kut zakreta lopatica koristi za upravljanje brzinom vrtnje. Također, sve komponente kuta zakreta lopatica mogu biti iskorištene za prigušenje njihanja tornja. Upravljanje se obavlja pomoću linearnog kvadratičnog regulatora LQR-a. Na slici 6.1. prikazana je pojednostavljena shema sustava upravljanja.



Slika 6.1. Pojednostavljena shema sustava upravljanja vjetroagregatom

LQR predstavlja (vremenski promjenljiv) regulator po varijablama stanja sustava  $x$  kojim se postiže minimizacija integralnog kriterija kvalitete na intervalu  $[0, M]$  [11]:

$$J = \frac{1}{2} x_N^T S_N x_N + \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{N-1} (x_k^T Q x_k + u_k^T R u_k), \quad (6-1)$$

gdje su  $S_N \geq 0, Q \geq 0, R > 0$  simetrične matrice. Umjesto vremenski promjenljivog regulatora koriste se pojačanje s početka intervala kojim se dobiva suboptimalno vladanje sustava koje je u pravilu vrlo slično optimalnom vladanju.



Proračun LQR-a rađen je prema identificiranom modelu procesa u prostoru stanja kojeg je potrebno proširiti dodatnim varijablama stanja, a to su integral brzine vrtnje rotora te integrali momenata opterećenja  $M_{y,d}, M_{y,q}$ . Eliminacijom opterećenja u d-q koordinatnom sustavu uz nesavršeni model procesa te uz prisutnost poremećaja koji djeluju na sustav proširenje je nužno kako bi se osiguralo održavanje brzine vrtnje na nazivnoj vrijednosti. Proširivanjem modela, odnosno dodavanjem integrala momenata opterećenja i integrala brzine vrtnje radi eliminacije pogreške u stacionarnom stanju matrice sustava se proširuju na odgovarajuće dimenzije:

- Matrica A dimenzija 24x24,
- Matrica B dimenzija 24x3,
- Matrica C dimenzija 12x24,

te je izlaz iz modela oblika:

$$y = [M_{y,d}, M_{y,q}, \omega, \beta_c, \beta_d, \beta_q, \ddot{x}, \dot{x}, x, \int M_{y,d}, \int M_{y,q}, \int \omega]^T. \quad (6-2)$$

Vektor varijabli stanja tada poprima sljedeći oblik:

$$\tilde{x} = \begin{bmatrix} x \\ \int \omega dt \\ \int M_{y,d} dt \\ \int M_{y,q} dt \end{bmatrix}. \quad (6-3)$$

Model sustava se dodatno proširuje kako bi upravljački signal poprimio sljedeći oblik:

$$u_k = u_{k-1} + \Delta u_k, \quad (6-4)$$

gdje  $\Delta u(k)$  predstavlja promjenu upravljačkog signala, a dobiva se izračunom preko regulatora. Razlog zbog kojeg regulator računa promjenu upravljačkog signala, a ne sam upravljački signal je što se tada težinskom matricom  $R$  može kažnjavati (brza) promjena upravljačkog signala umjesto apsolutnog iznosa. Naveden preinake zahtijevaju promjenu modela pa vektor stanja poprima oblik:

$$x = \begin{bmatrix} \tilde{x} \\ u_{k-1} \end{bmatrix}, \quad (6-5)$$

dok je novi ulaz u sustav  $\Delta u_k$ .

Nakon navedene preinake vektor stanja ima 27 elementa pa je matrice sustava potrebno dodatno proširiti. Oblik proširenih matrica prikazan je u nastavku:

$$A_n = \begin{bmatrix} A & B \\ 0 & I \end{bmatrix}, \quad (6-6)$$

$$B_n = \begin{bmatrix} B \\ I \end{bmatrix}, \quad (6-7)$$

$$C_n = [C \ 0], \quad (6-8)$$

gdje je  $I$  jedinična matrica dimenzije 3, a  $0$  nul-matrica odgovarajućih dimenzija.

Odabir težinskih matrica rađen je iterativnom metodom i traženjem zadovoljavajućeg vladanja vjetroagregata. Analizom simulacijskih rezultata dobivene su težinske matrice kojima se postiže kompromis između smanjenja njihanja tornja i povećane aktivnosti sustava za zakret lopatica. Težinske matrice su sljedećeg oblika:

$$Q_y = \begin{bmatrix} 0.75 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.75 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 8000 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2000 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.75 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.75 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4000 \end{bmatrix},$$

$$R = 1000 \cdot \begin{bmatrix} 400 & 0 & 0 \\ 0 & 20 & 0 \\ 0 & 0 & 20 \end{bmatrix},$$

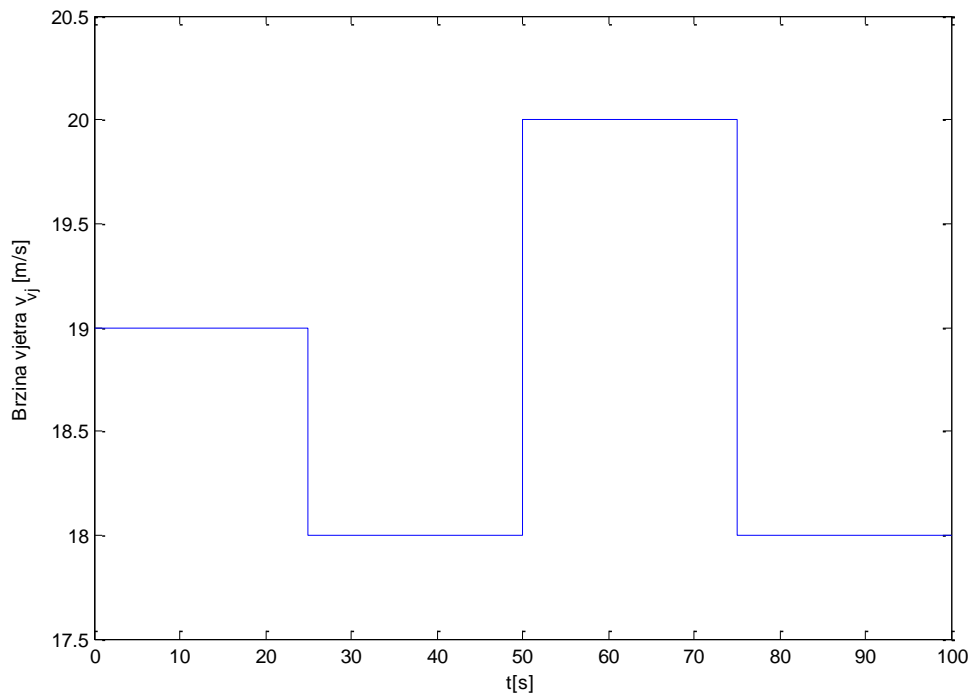
gdje je težinska matrica  $Q$  dobivena kao:

$$Q = C_n^T \cdot Q_y \cdot C_n. \quad (6-9)$$

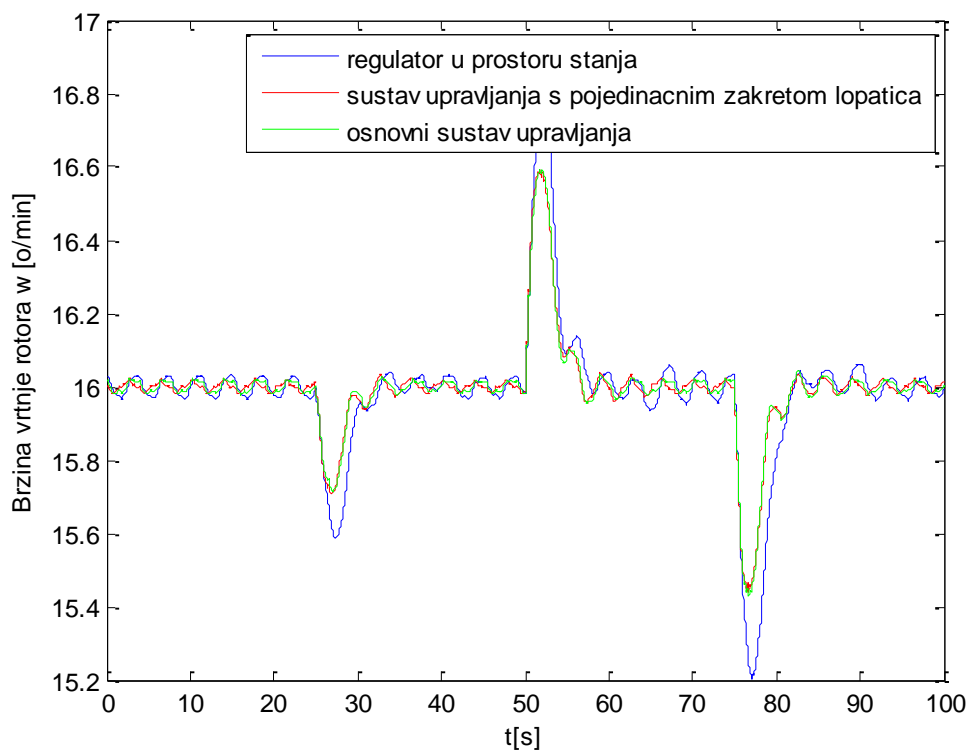
Za konačnu strukturu sustava upravljanja potrebno je odrediti i estimator do kojeg se dolazi preko izraza:

$$x_k = (A - LC)x_{k-1} + Bu_{k-1} + Ly_{m,k}. \quad (6-10)$$

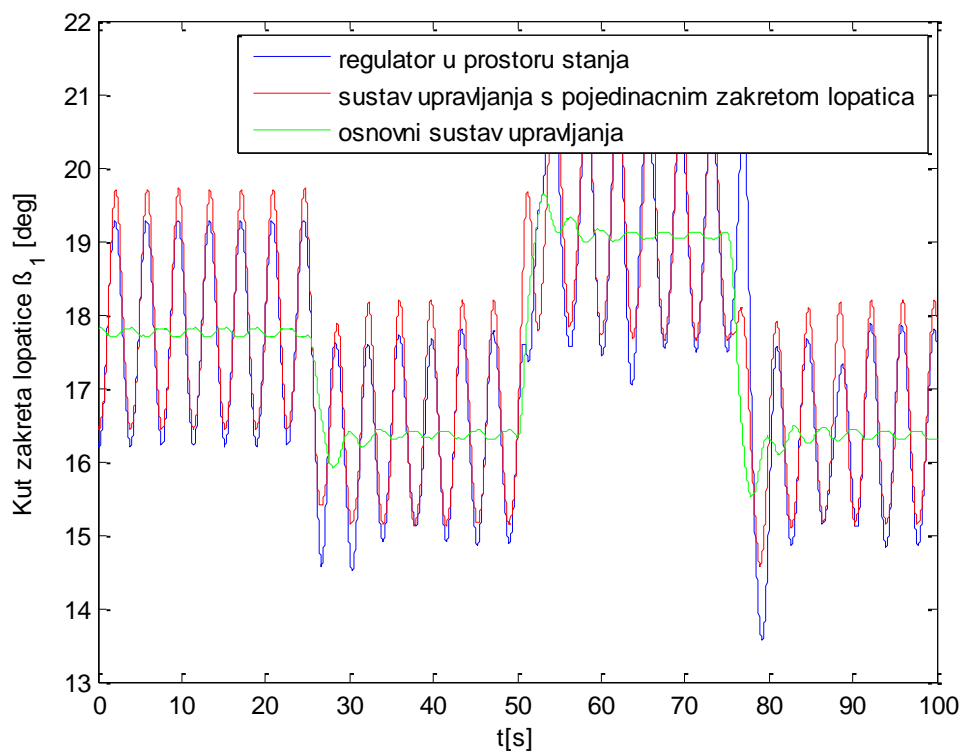
Na sljedećim slikama prikazani su odzivi vjetroagregata upravljanog LQR-om, koji su dobiveni simulacijama u profesionalnom simulacijskom alatu GH Bladed. Radi usporedbe dani su i odzivi sustava uz osnovni sustav upravljanja te sustavom upravljanja preko pojedinačnog zakreta lopatica s PI regulatorima u obje osi. Vjetar korišten u simulacijama prikazan je na slici 6.2.



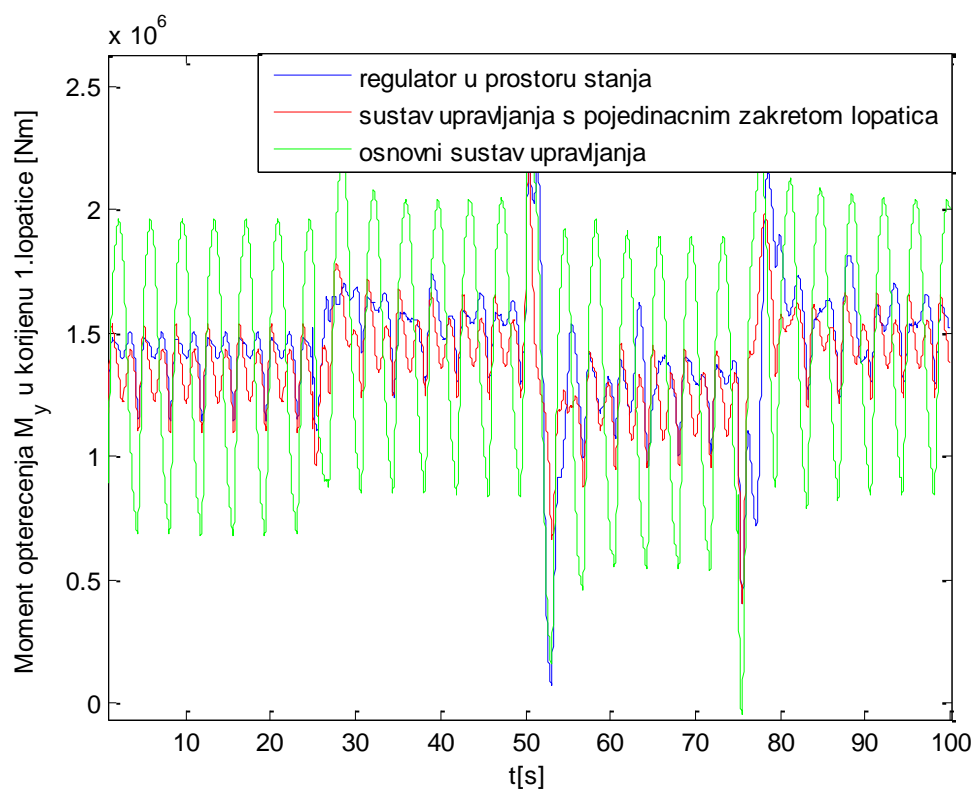
Slika 6.2. Prikaz vjetra korištenog u simulacijama



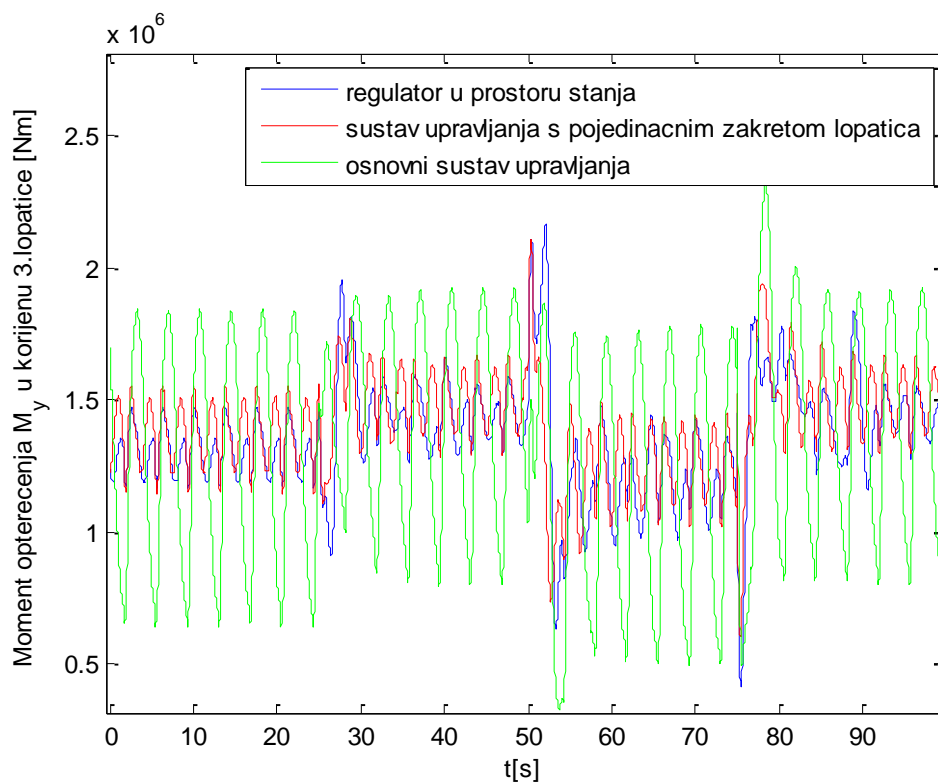
Slika 6.3. Odziv brzine vrtnje rotora vjetroaergata



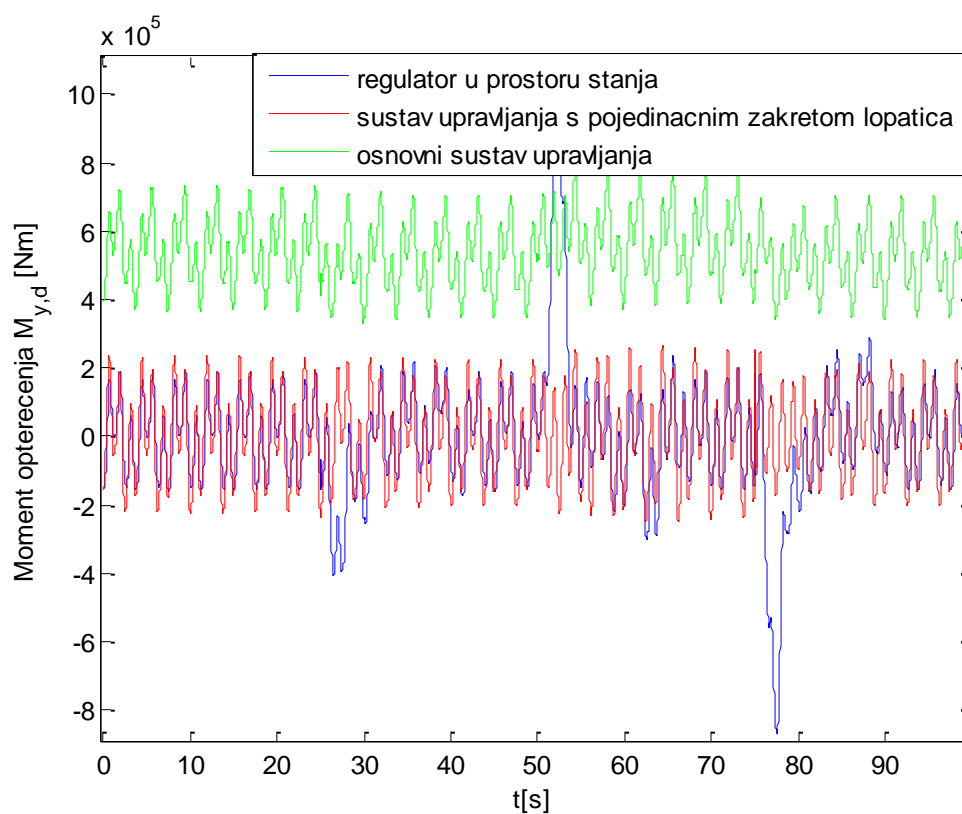
Slika 6.4. Odziv kuta zakreta prve lopatice



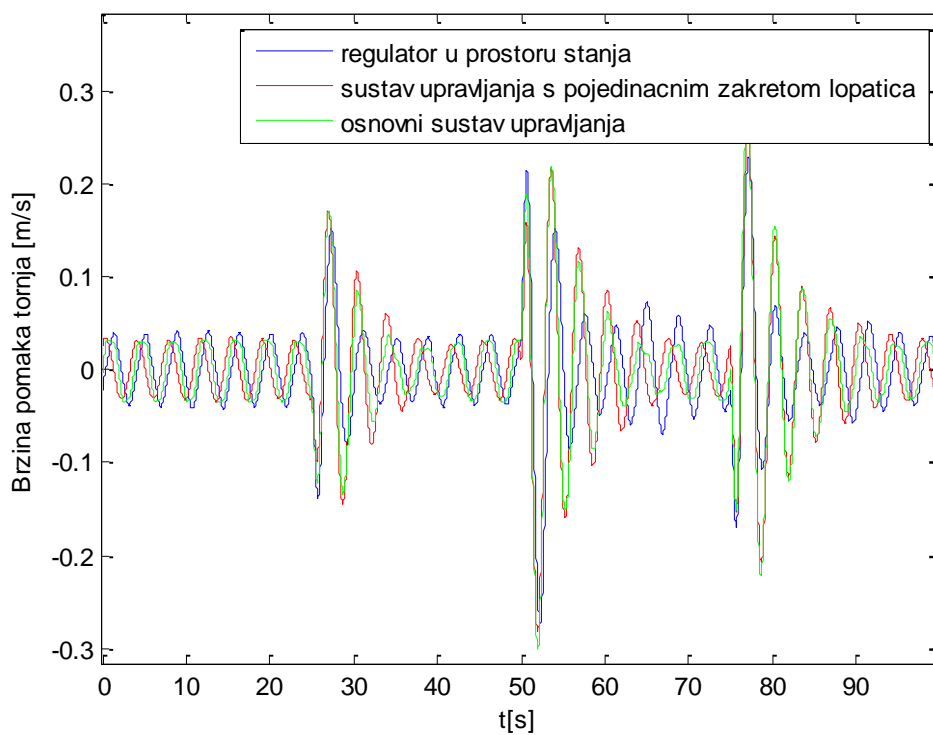
Slika 6.5. Odziv momenta opterećenja u korijenu prve lopatice



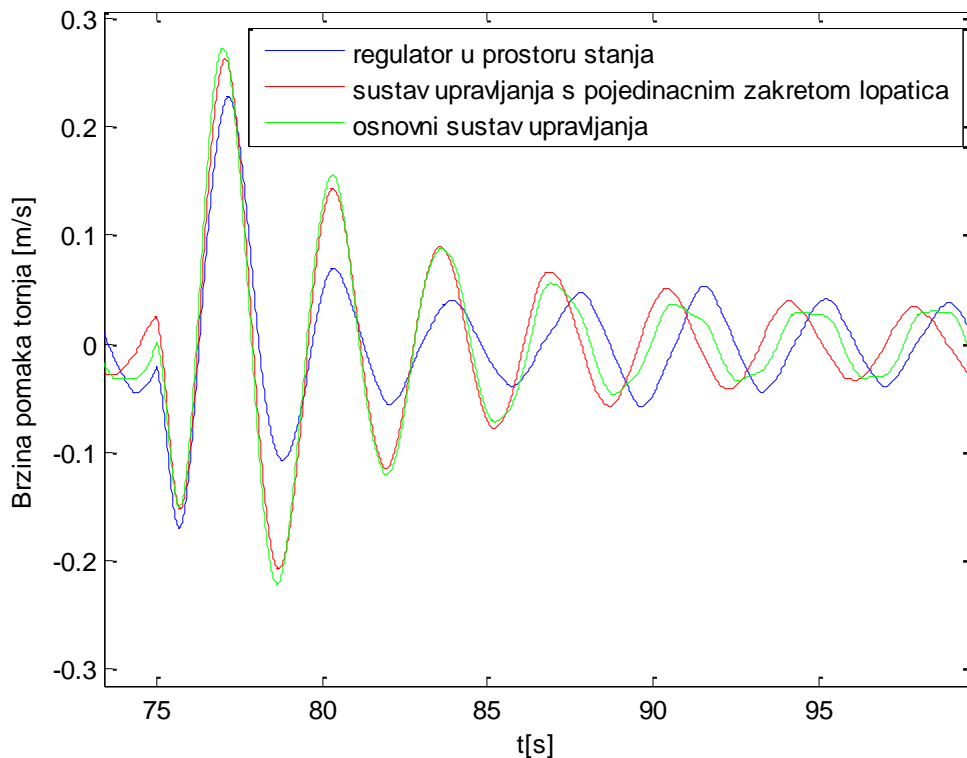
Slika 6.6. Odziv momenta opterećenja u korijenu treće lopatice



Slika 6.7. Odziv momenta opterećenja u d-q koordinatnom sustavu

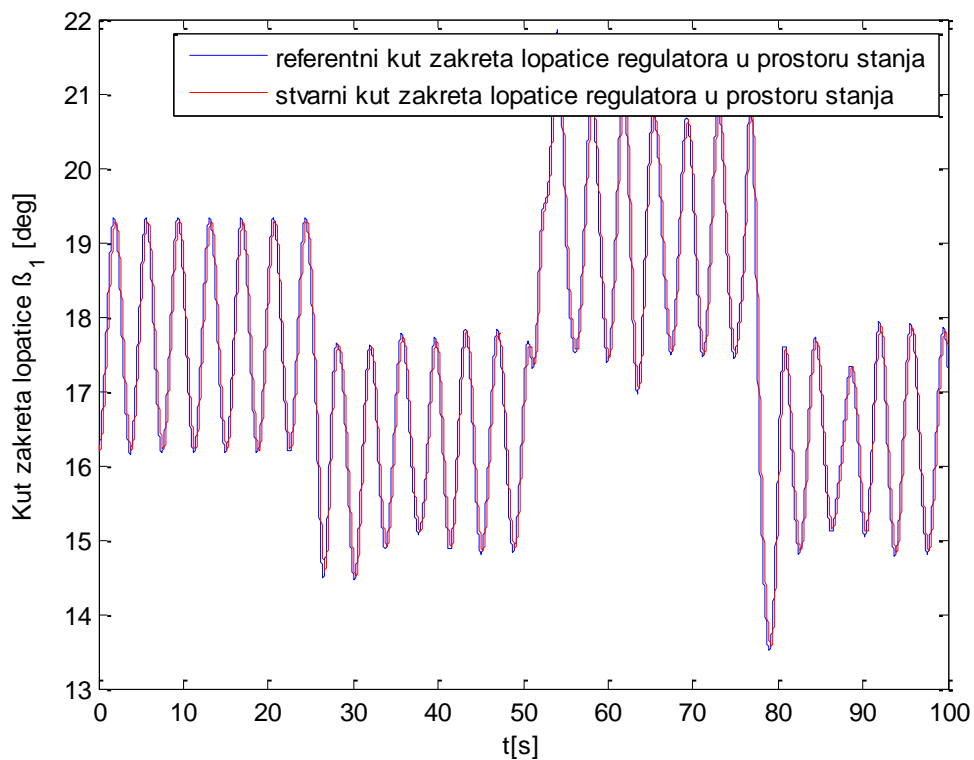


Slika 6.8. Odziv brzine pomaka vrha tornja vjetroagregata



Slika 6.9. Uvećani odziv brzine pomaka vrha tornja vjetroagregata

Iz odziva (slika 6.3.) se može zaključiti da je brzina vrtnje gotovo jednaka u sva tri slučaja sustava upravljanja osim kod promjene brzine vjetra gdje dolazi do malih odstupanja regulatora u prostoru stanja. Ta odstupanja su poželjna kako bi se što povoljnije prigušilo njihanje tornja. Brzina pomaka vrha tornja vjetroagregata (slika 6.8.) je smanjena uz malo veću aktivnost lopatica (slika 6.4.). Na slici 6.9. prikazana je brzina pomaka vrha tornja vjetroagregata kod smanjenja brzine vjetra od  $2\text{ m/s}$ . Naime, prigušenje njihanja tornja se događa prilikom udara vjetra te je uočljivo kako vjetroagregat s regulatorom u prostoru stanja brže istitra i ranije uđe u ustaljeno stanje. Rezultati pokazuju da se primjenom LQR-a mogu smanjiti vibracije tornja vjetroagregata. Također opterećenja na korijen lopatice pokazuju znatno smanjenje u odnosu na osnovni sustav upravljanja. Na slici 6.7. prikazan je odziv momenta opterećenja  $M_{y,d}$  u d-q koordinatnom sustavu te se primjećuju skokovi kod promijene brzine vjetra koji su poželjni kako bi se dodatno prigušilo njihanje tornja vjetroagregata.



Slika 6.10. Odziv referentnog i stvarnog kuta zakreta lopatice

Na slici 6.10. prikazano je kako servo pogon bez većih poteškoća odrađuje neprestano zakretanje lopatica.



## Zaključak

Porastom veličine i snage kod modernih vjetroagregata, njihanje tornja i strukturna opterećenja postaju jako izražena i predstavljaju prepreku daljnjem povećanju snage vjetroagregata. Međutim, zakretanjem lopatica rotora oko njihove uzdužne osi moguće je znatno utjecati na oscilacije tornja. Stoga je važno da sustav upravljanja, uz upravljanje brzinom vrtnje (snagom) vjetroagregata, dodatno utječe na prigušenje njihanja tornja i smanjenje opterećenja.

U ovom radu je određen model vjetroagregata prikladan za korištenje u navedenim proširenim upravljačkim algoritmima. Na temelju identificiranog modela u prostoru stanja razvijen je upravljački algoritam preko linearnog kvadratičnog regulatora (LQR) koji, uz regulaciju brzine vrtnje, postiže i prigušenje njihanja tornja vjetroagregata te smanjuje momente opterećenja u korijenu lopatica. Opisana je metoda projektiranja regulatora u prostoru stanja te je prikazano kako uz veću aktivnost lopatica moguće smanjiti njihanje tornja. U ovom radu je napravljen jedan regulator koji se brine o različitim kriterijima kao što su brzina vrtnje, njihanje tornja te opterećenja, za razliku od klasičnog pristupa gdje se za svaki kriterij projektira zaseban dio regulatora.

U rezultatima simulacija prikazani su usporedni odzivi klasičnog sustava upravljanja, sustava upravljanja pojedinačnog zakreta lopatica s dva PI regulatora u obje osi te sustava upravljanja preko regulatora u prostoru stanja.

Toranj suvremenih vjetroagregata u megavatnoj klasi nije apsolutno krut te može oscilirati. Ta pojava postaje sve izraženija porastom dimenzija vjetroagregata. Otklanjanjem navedenih problema pridonosi se smanjenju zamora materijala konstrukcije što povećava životni vijek vjetroagregata, a samim time pridonosi i isplativosti vjetroagregata.

## Literatura

1. Kos, V: "Kompenzacija utjecaja udara vjetra na brzinu vrtnje vjetroagregata predupravljanjem na temelju estimacije brzine vjetra", Završni rad, FER, Zagreb, 2009.
2. <http://www.gwec.net/> 2011.
3. Burton, T; Sharpe, D; Jenkins, N; Bossanyi, E: "*Wind Energy Handbook*," John Wiley & sons, 2001.
4. Bossanyi, E. A; Quarton, D. C: "*GH Bladed – Theory Manual* ", Garrad Hassan and Partners Limited, 2003.
5. Kos, V: "Smanjenje opterećenja konstrukcije vjetroagregata primjenom pojedinačnog zakretanja lopatica", seminarski rad, FER, Zagreb, 2010.
6. Bossanyi, E. A: "*Individual Blade Pitch Control for Load Reduction*", Wind energy, 2003.
7. Petrović, V: "Smanjenje opterećenja konstrukcije i zamora materijala vjetroagregata primjenom naprednih metoda", diplomski rad, FER, Zagreb, 2008.
8. Petrović, V: "Reduction of Oscillatory Loading of the Wind Turbine Structure by Individual Pitch Control", seminarski rad, FER, Zagreb, 2011.
9. Perić, N; Petrović, I: "*Identifikacija procesa*", FER, Zagreb, 2005.
10. H.Namik; K.Stol: "Individual blade pitch control of floating offshore wind turbines", Wind Energy, 2010.
11. M. Jelavić: "*Upravljanje vjetroagregatom s ciljem smanjenja dinamičkih opterećenja konstrukcije*", seminarski rad, Zagreb, 2009.

# Upravljanje vjetroagregatom s ciljem prigušenja njihanja tornja

## Sažetak

Cilj ovog rada je istražiti složene strukture upravljanja kojim bi se prigušilo njihanje tornja vjetroagregata. Najprije treba odrediti model vjetroagregata koji je prikladan za korištenje u proširenim upravljačkim algoritmima. Na temelju identificiranog modela u prostoru stanja i pomoću linearnog kvadratičnog regulatora (LQR-a) određuje se upravljački algoritam koji uz regulaciju brzine vrtnje, smanjuje strukturna opterećenja te prigušuje njihanje tornja vjetroagregata. Rezultati su pokazali da takav regulator uz malo veću aktivnost lopatica postiže zadovoljavajuće prigušenje njihanja tornja.

### Ključne riječi:

Vjetroagregat, strukturna opterećenja, matematički model vjetroagregata, pojedinačno zakretanje lopatica, model u prostoru stanja, LQR, prigušenje njihanja tornja

# **Wind turbine control with the aim of damping tower oscillations**

## **Abstract**

The goal of this thesis is to investigate advanced wind turbine control methods for damping of tower oscillations. Firstly, wind turbine model suitable for use in advanced control algorithms is obtained. The control algorithm which reduces structural loads and dampens tower oscillations and also controls wind turbine rotor speed is designed based on the identified model in state space and by using the linear quadratic regulator (LQR). The results show that such a regulator achieves satisfactory damping of tower oscillations by slightly increased blade pitch activity.

### **Key words:**

Wind turbine, structural loads, mathematical model of wind turbine, individual pitch control, state space model, LQR, damping of tower oscillations

## Životopis

<b>Osobni podaci</b>	ime i prezime: Vilim Kos datum i mjesto rođenja: 13. rujan 1986, Čakovec, Hrvatska adresa: Ruđera Boškovića 60, 40329 Kotoriba broj mobitela: 098 861 950 e-mail: vilim.kos@gmail.com
<b>Obrazovanje</b>	1993.-2001. <ul style="list-style-type: none"><li>• Osnovna škola Kotoriba, Kotoriba</li></ul> 2001.-2005. <ul style="list-style-type: none"><li>• Gimnazija Čakovec, Čakovec<ul style="list-style-type: none"><li>– Sve razrede završio s odličnim uspjehom te oslobođen polaganja mature</li></ul></li></ul> 2005.-2011. <ul style="list-style-type: none"><li>• Fakultet elektrotehnike i računarstva, Sveučilište u Zagrebu<ul style="list-style-type: none"><li>– 2008. upisao smjer Automatika</li></ul></li></ul>
<b>Strani jezici</b>	engleski

Potpis: