

**STATIČKA MKE ANALIZA I ANALIZA OSCILOVANJA STUBA
VETROGENERATORA****STATIC FEA AND OSCILLATION ANALYSIS OF A WIND TURBINE TOWER**Stanko Goločorbin, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – MAŠINSTVO**

Kratak sadržaj – Stubovi vetrogeneratora su jedni od najkompleksnije opterećenih stubova (tornjeva) koji postoje u građevini. Uzimajući u obzir da promenljiva priroda brzine vetra intenzivno menja opterećenje na stub u vidu ekscentričnog momenta. Cilj ovog istraživanja je dobijanje rezultata statičke MKE analize u vidu napona prema kojoj možemo, shodno najvećim naponima, promeniti dizajn samog modela stuba vetrogeneratora. Takođe istraživanjem oscilacija stuba i pronalaženjem sopstvenih kružnih frekvencija oscilovanja dobijamo zanje o brzini obrtaja rotora koju treba da ograničimo da stub ne bi mogao da uđe u rezonantni režim. U radu je prikazana primena metode konačnih elemenata (MKE) pri pronalaženju napona stuba pomoću ABAQUS – softvera i primena teorije oscilacija pri pronalaženju sopstvenih kružnih frekvencija i maksimalnih amplituda pomoću Mathematica – softvera, 3D model korišten za MKE analizu je izrađen u Solidworks – softveru.

Ključne reči: MKE, ABAQUS, Mathematica, teorija oscilacija, vetrogenerator.

Abstract – Wind turbine towers are one of the most complex loaded towers that exist in construction. Taking into account the ever changing nature of wind speeds, which intensly changes the load on the tower in terms of eccentric torque. The aim of this research is to find the results of the static FEM analysis in terms of stresses with which we can change the design of the wind turbine tower model. Also researching the oscillations of the tower and finding the natural frequencies we gain the knowledge of the angular velocity of the rotor which we have to restrict so that the tower doesn't go into resonance. The paper presents the application of finite element method to find the stresses in a wind turbine tower using ABAQUS – software and the application of theory of oscillation to find the natural frequencies and maximum amplitudes of oscillation using Mathematica – software, 3D model of the wind turbine was made using Solidworks – software.

Keywords: FEM, ABAQUS, Mathematica, theory of oscillation, wind turbine.

1. UVOD

Metoda konačnih elemenata (MKE) je numerička metoda i pripada grupi metoda tzv. diskretne analize.

NAPOMENA:

Ovaj rad je proistekao iz master rada čiji je mentor bio vanr. prof. dr Zvonko Rakarić.

Generalno gledano rezultat primene analitičkih metoda za rešavanje problema u mehanici je rešenje za klasu problema, često u obliku funkcija koje definišu polje tražene veličine (pomeranje, deformacija, napon, sila...). Dok se na drugu ruku MKE rešenje dobija za pojedinačne probleme, u ovom radu je to problem stuba vetrogeneratora.

MKE je zasnovana na fizičkoj diskretizaciji, tj. podeli sistema na elemente konačne veličine – konačne elemente (KE). Ideja o diskretizaciji (usitnjavanju, dekompoziciji, tj. zameni jednog kontinualnog sistema određenim brojem odgovarajućih podistema-elemenata) datira još iz vremena kada je počelo da se razmišlja o rešavanju složenih zadataka svođenjem na kombinaciju jednostavnijih i pojedinačno lako rešivih.

MKE metoda numeričke analize zasnovana na fizičkoj diskretizaciji, za razliku od većine numeričkih metoda koje se baziraju na matematičkoj aproksimaciji jednačina problema. Umesto elementa diferencijalno malih dimenzija, osnova svih razmatranja je element konačnih dimenzija, tj. konačni element. Jednačine za definisanje stanja neke statičke ili kinematičke veličine u okviru konačnog elementa, time implicitno i problema u celini, nisu diferencijalne ili integralne, već algebarske.

Iz aspekta fizičke diskretizacije, to je zamena realnog sistema, tj. kontinuuma diskretnim modelom sa “odgovarajućim” brojem KE “odgovarajućeg” oblika, tipa i rasporeda. Pojam “odgovarajući” ima poseban značaj u MKE analizi i analizi MKE rešenja, s obzirom na veliki broj prihvatljivih modela. Da bi se obezbedio „najbolji“ MKE model koji nije jednoznačno rešiv zadatak, potrebno je, pre svega, poznavanje prirode problema, poznavanje suštine MKE, kao i kreativni inženjerski pristup.

Veoma pojednostavljeni algoritam primene MKE u analizi konstrukcija može da ima sledeći oblik:

- Diskretizacija – podela realnog sistema na sistem KE koji se sastoji od određenog broja elemenata odgovarajućeg oblika,
- Izbor odgovarajućeg tipa KE u okviru odgovarajućeg oblika KE,
- Formiranje sistema jednačina za sistem KE,
- Rešavanje sistema jednačina,
- Proračun potrebnih veličina za KE i sistem u celini i
- Prikazivanje rešenja.

2. PRIMENA ABAQUS – MKE SOFTVERA PRI STATIČKOJ ANALIZI STUBA VETROGENERATORA

Analiza je rađena na stubu koji se sastoji od tri čelične cevi promenljivog prstenastog poprečnog preseka. Na sl. 2.1. dat je 3D model vetrogeneratora.



Slika 2.1. 3D model vetrogeneratora

2.1. Kratak pred-proračun opterećenja stuba vetrogeneratora

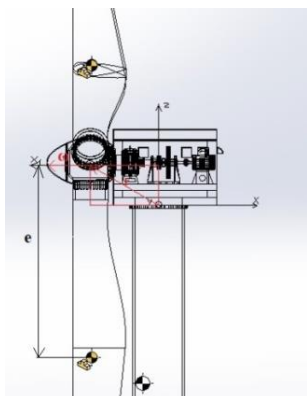
Na stub vetrogeneratora deluje

1. Moment rotora,
2. Pritisak vetra i
3. Težinsko opterećenje gornjeg kućišta i unutrašnjih komponenti.

Moment rotora računat tako što se uoči se centrifugalna sila $F=M_e\omega^2$ individualnih lopatica koje su napravljene od vlakana stakla čija je masa $M_{e1}=M_{e2}=M_{e3}=M_e$. Rastojanje e tj. ekscentricitet centra mase lopatice od ose rotacije rotora jednako je za sve tri lopatice.

Ugaona brzina uzeta na osnovu eksperimentalno dobijene vrednosti broja obrtaja po minuti rotora (vrednost je uzeta iz [8]). Određivanje vektora položaja prikazano je na slici 2.2.

$$\omega = \frac{N \cdot 2\pi}{60} \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right] \quad (1)$$



Slika 2.2. Određivanje vektora položaja

$$\dot{L}_O = \vec{M}_O^F = \vec{r} \times \vec{F} [Nm] \quad (2)$$

Pritisak vetra dobijamo, uzimajući u obzir najveću moguću vrednost brzine vetra, preko sledeće formule (koeficijenti su uzeti iz [8]):

$$P_{\max} = C_e C_d Q_s I_w [Pa] \quad (3)$$

- C_e – je koeficijent izloženosti konstrukcije na vetar (0.6~1.2)
- C_d – je koeficijent otpora kretanja tela usled vetra (0.09~1.15)
- Q_s – je faktor stagnacije pritiska vetra i računa se prema sledećoj formuli:
 $Q_s = 0.613 v_{\max}^2$ (gde je $v_{\max} = 45$ m/s)
- I_w – je faktor važnosti (odnosi se na to koliko je konstrukcija opterećena mašinski i od kojeg je materijala) (1~1.7)

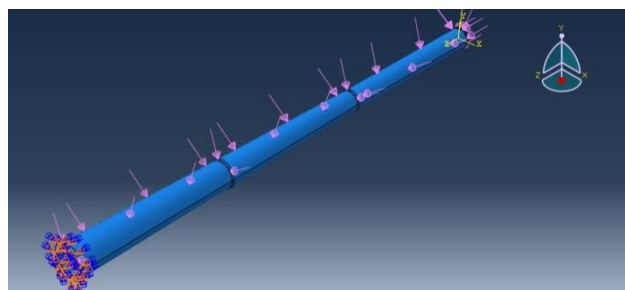
Težinsko opterećenje dobijamo preko softvera Solidworks merenjem masa kućišta i unutrašnjih komponenti kao što su, celokupan, generator, multiplikator, glavno vratilo sa ležajem, itd.

$$F_g = (\sum M) \cdot 9.8067 [N] \quad (4)$$

2.2. Rad unutar ABAQUS – MKE softvera

Prvo se modelu stuba „ubačenog“ u ABAQUS – MKE softver dodeljuju sledeća materijalna svojstva čelika, Youngov modul elastičnosti $E=200 \cdot 10^9$ Pa i Poissonov modul bočne kontrakcije $\nu=0.3$ i gustina $\rho=7800$ kg/m³. Potom se dodeljuju granični uslovi stuba, koji odgovaraju graničnim uslovima grede ukleštene na jednom kraju dok je drugi kraj slobodan.

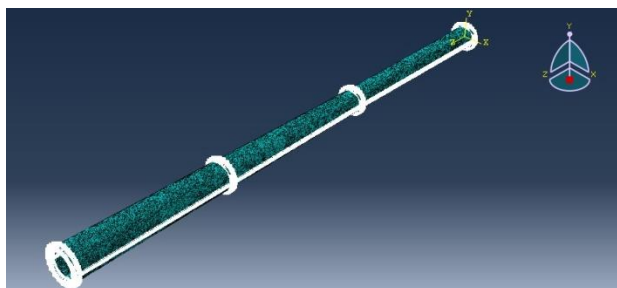
Korak opterećivanja stuba u kojem su nanešena opterećenja na MKE model stuba u vidu težinskog opterećenja kućišta sa lopaticama koje deluje na slobodan kraj stuba, kontinualnog opterećenja vetra koje deluje na bočnu stranu stuba i vektora momenta izmeštene centrifugalne sile lopatica rotora koji deluje u pravcu x-ose prikazan je na sl. 2.3.



Slika 2.3. Nanošenje opterećenja i dodeljivanja graničnih uslova 3D modelu stuba

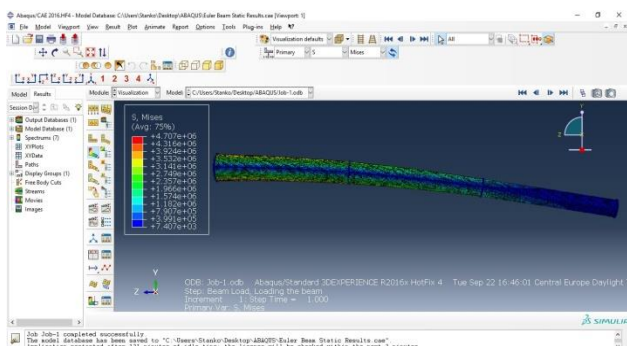
U sledećem koraku rađena je diskretizacija modela tzv. „Mešovanje“ modela koje je automatski optimizovano oko rupa za zavrtneve. Za tip konačnog elementa izabran je konačni element oblika tetraedra zbog jednostavnosti

računanja reakcija u čvorovima elemenata. Na sl. 2.4. prikazana je diskretizacija modela stuba.



Slika 2.4. Diskretizacija tzv. „Mešovanje“ stuba vetrogeneratora

Nakon čega su dobijeni sledeći rezultati u vidu napona za statičku analizu stuba (sl. 2.5.). Gde se vidi da su najveći naponi na podnožju stuba, bliže tlu. Što odgovara teoriji grede ukleštene na jednom kraju a opterećene na drugom.



Slika 2.5. Vizualizacija rezultata nakon obavljene MKE analize stuba

3. UVOD U TEORIJU OSCILACIJA I DINAMIČKU ANALIZU VETROGENERATORA

Među mnogim mehaničkim kretanjima koja se odigravaju u prirodi, često se srećemo sa kretanjima koja se periodično ponavljaju. U vezi sa ovim, izgradnja uređaja za zaštitu od vibracija i periodičnih udara predstavlja vrlo važan zadatak savremene tehnike.

Važno je napomenuti da oscilatorne pojave igraju dominantnu ulogu u mnogim fizičkim pojavama kao što su procesi u atomskom jezgru, procesima prenošenja mase i toplote, radijacione pojave, elektromagnetski fenomeni itd.

Oscilatorne pojave se vrlo široko koriste u građevinarstvu. Najrasprostanjeniji materijal u ovoj oblasti tehnike svakako je beton. Danas se primenjuje tzv. metod vibracije svežeg betona radi njegove homogenizacije koja značajno podiže kvalitet betona i njegovu nosivost. Slični metodi se primenjuju i pri izgradnji pešćanih nasipa i puteva.

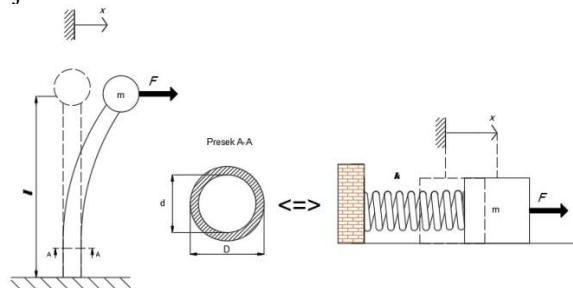
Vrlo nepoželjne oscilacije mogu da se pojave i pod dejstvom vazдушnih struja i vrtloga kod električnih dalekovoda, dimnjaka zgrada itd. Na primer vrhovi visokih fabričkih dimnjaka mogu imati amplitude od 40 do 50cm.

3.1. Određivanje krutosti sistema, metod deformacijskog rada i kastiljanova teorema

Metoda deformacijskog rada se koristi za određivanje deformacija elastičnih tela, kao i za određivanje reakcija veza statički neodređenih problema. U zavisnosti od tipa opterećenja razlikovaće se i postupci određivanja deformacijskog rada, tako da za naš primer (pri savijanju) važi

$$A_{def} = \frac{1}{2EI} \int_0^l M_s^2(z) dz \quad \text{za } I = const \quad (5)$$

Integracijom između nedeformisanog položaja tela i deformisanog položaja dobijamo deformacijski rad A_{def} . Određujemo krutost za model grede. Posmatramo gredu prstenastog poprečnog preseka (sl. 3.1.) koja se pod dejstvom horizontalne sile F deformiše.



Slika 3.1. Šematski prikaz modela grede

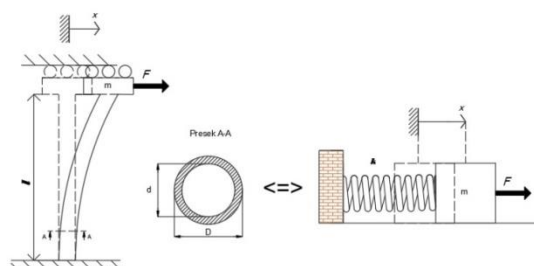
Pomeranje u pravcu x-ose dobijamo upotrebom Kastiljanove teoreme:

$$x = \frac{\partial A_{def}}{\partial F} = \frac{1}{2EI} 2F \frac{l^3}{3} \quad (6)$$

Krutost dalje dobijamo preko veze sile i pomeranja.

$$F = kx \Rightarrow k_2 = \frac{F}{x} = \frac{3EI x^{(2)}}{l^3} \quad (7)$$

Sada određujemo krutost za model grede sa klizačem (sl 3.2.). Posmatramo gredu koja se pod dejstvom sile F deformiše. Greda je zbog klizača slobodna da se kreće u pravcu x-ose, dok mu je vertikalno pomeranje onemogućeno tj $x(y=0)=0$ ako je y-osa štapa.



Slika 3.2. Šematski prikaz modela grede sa klizačem

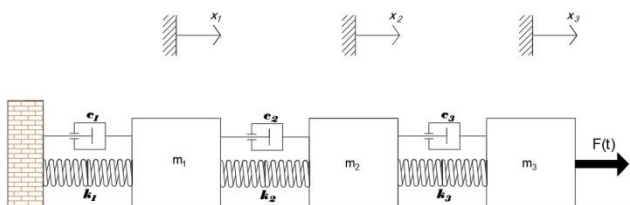
$$x = \frac{Fl^3}{12EI} \Rightarrow k_1 = \frac{F}{x} = \frac{12EI x^{(1)}}{l^3} \quad (8)$$

Pri računanju krutosti grede, računamo prvo moment inercije za prstenasti poprečni presek grede po sledećoj formuli:

$$I_x = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{64} [m^4] \quad (9)$$

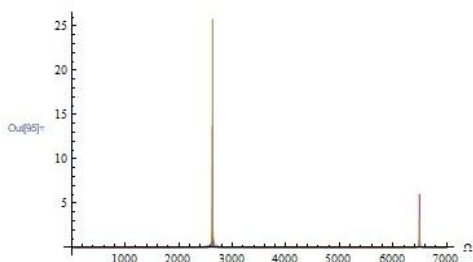
3.2. Sistem tri povezana oscilatora sa trenjem

Celokupna konstrukcija stuba se može, zbog cilja proučavanja oscilacija sistema, predstaviti sledećim matematičkim modelom (sl. 3.3.):



Slika 3.3. Šematski prikaz sistema sa tri stepena slobode

Sprovedena je procedura izračunavanja i dobijanja jednačina kretanja nakon čega su dobijene maksimalne amplitude oscilovanja u zavisnosti od frekvencije prinude pri uticaju trenja kao što je prikazano na slici 3.4.



Slika 3.4. Maksimalne amplitude oscilovanja sistema sa tri stepena slobode u zavisnosti od frekvencije prinudne periodične sile, prva maksimalna amplituda i druga maksimalna amplituda

4. ZAKLJUČAK

Na osnovu ovih analiza jasno je da bi stub vetrogeneratora bio mnogo bolje konstrukciono dizajniran ukoliko se prirubnica čelične cevi, koja je kruto povezana sa fundamentom, napravi tako da mnogo finije vrši prelaz sa bočne strane stuba na površinu fundamenta. Odnosno, zaključuje se da bi dizajn bio mnogo bolji u smislu napona pre svega da je prirubnica veće mase, boljeg konstrukcionog prelaza sa unutrašnjim otvorima za zavrtnjeve umesto spoljašnjeg, ili da je stub na dnu dodatno ukrućen bilo to čeličnim užadima ili pak na neki drugi način L-profilima.

Takođe određene su frekvencije prinudne sile koje se moraju izbegavati, ovo se rešava tako što se ograniči brzina okretanja glavnog rotora, sistemom kočnica mehanički i elektronskim sistemom sa sensorima ili pak automatskim menjanjem prenosnog odnosa unutar multiplikatora.

5. LITERATURA

- [1] Ratko B. Maretić: Otpornost materijala, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2016.
- [2] Ratko B. Maretić: Zbirka rešenih zadataka iz otpornosti materijala, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2016.
- [3] Božidar D. Vujanović: Teorija oscilacija, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2013.
- [4] Đorđe S. Đukić, Livija J. Cvetičanin, Miodrag M. Zuković: Dinamika, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2014.
- [5] Dušan Kovačević: MKE modeliranje u analizi konstrukcija, Građevinska knjiga a.d. – Beograd, 2006.
- [6] Dassault Systemes: Getting Started with Abaqus, Interactive Edition, 2013.
- [7] Professor Suvranu De: Abaqus Handout "Introduction to Finite Elements", Rensselaer Polytechnic Institute, 2013.
- [8] Trevor M. Letcher: A handbook for onshore and offshore wind turbines, Academic Press, 2017.
- [9] Wei Tong: Wind Power Generation and Wind Turbine Design, WIT Press Computational Mechanics, 2010.
- [10] Mario Alejandro Rosato: Small Wind Turbines for Electricity and Irrigation Design and Construction, CRC Press, 2019.
- [10] Risø National Laboratory: Guidelines for design of wind turbines, Wind and Energy Department Copenhagen, 2002.
- [11] Peter Jamieson, Garrad Hassan: Innovation in wind turbine design, John Wiley & sons, 2011.

Kratka biografija:



Stanko Goločorbin - Dipl. Inž. Mašinstva na fakultetu tehničkih nauka. Diplomirao na temi "Projektovanje proizvodnog sistema zavrtnjeva" 2019-te godine.

kontakt:
golocorbinstanko@gmail.com