

Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet

Darina Križanac, Marta Lovrak

ANALIZA SUSTAVA MONITORINGA NA STUPU VJETROAGREGATA

Zagreb, 2018.

Ovaj rad izrađen je u laboratoriju Zavoda za tehničku mehaniku Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu pod vodstvom doc. dr. sc. Ivana Duvnjaka, dipl. ing. građ. i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2017./2018.

SADRŽAJ:

UVOD	1
1. STANJE PODRUČJA	3
1.1 Vjetroelektrane u Hrvatskoj	3
1.2 Vrste vjetroagregata	6
1.3 Dijelovi kopnenog vjetroagregata	8
1.4 Djelovanje vjetra na stup vjetroagregata	9
1.5 Postojeći sustavi monitoringa vjetroagregata	10
2. MOTIVACIJA ZA ISTRAŽIVANJEM	15
2.1 Kolaps vjetroagregata u Hrvatskoj	15
2.2 Kolaps vjetroagregata u svijetu	15
2.3 Zaključak	18
3. TEORIJSKA PODLOGA - DINAMIČKI PARAMETRI KONSTRUKCIJA	19
3.1 Uvod u modalnu analizu	19
3.2 Digitalna obrada signala	19
3.2.1 Fourierove transformacije	19
3.2.2 Spektralne funkcije	22
3.3 Klasična modalna analiza	28
3.4 Modalna transformacija	28
3.5 Operacionalna modalna analiza - OMA	31
4. MODEL VJETROAGREGATA U LABORATORIJU	33
4.1 Opis modela vjetroagregata u laboratoriju	33
4.1.1 Korišteni materijali	35
4.1.2 Oprema za ispitivanje	35
4.1.3 Analogno digitalni pretvarač (eng. A-D converter)	37
4.1.4 Osobno računalo s potrebnim softwareom za analizu	38
4.1.5 Čekić za nanošenje pobude	38
4.1.6 Metalni podlošci korišteni kao čvorovi mreže	38
4.2 Statički monitoring na modelu u laboratoriju	39
4.2.1 Analiza relativnih deformacija pri statičkom monitoringu	39
4.2.2 Analitičko određivanje sile i progiba	42
4.2.3 Diskusija i analiza rezultata statičkog monitoringa na modelu u laboratoriju ...	46
4.3 Dinamički monitoring	47
4.3.1 Eksperimentalno dinamičko ispitivanje modela	47

4.3.2	Simulacija oštećenja na modelu u laboratoriju	47
4.3.3	Određivanje dinamičkih parametara mjerenjem vibracija - akcelerometri	48
4.3.4	Određivanje dinamičkih parametara mjerenjem vibracija - EOT	53
4.4	Diskusija i analiza rezultata dinamičkog monitoringa na modelu u laboratoriju.....	54
	Prilog 1– zapisi statičkog opterećenja	56
5.	PRIMJENA SUSTAVA MONITORINGA NA STVARNOM VJETROAGREGATU ..	59
5.1	Opis konstrukcije i monitoringa vjetroagregata	59
5.2	Analiza rezultata statičkog monitoringa vjetroagregata	61
5.2.1	Analiza naprezanja i momenta savijanja pri dnu stupa	62
5.2.2	Analiza sile opterećenja vjetrom pri vrhu stupa	63
5.2.3	Analiza pomaka vrha stupa	64
5.3	Analiza rezultata dinamičkog monitoringa vjetroagregata	65
5.3.1	Rezultati dinamičkih parametara po visini stupa akcelerometrima.....	66
5.3.2	Praćenje vlastite frekvencije elektrootpornim trakama	68
5.4	Numerički model vjetroagregata	70
5.4.1	Simulacija oštećenja i promjena vlastite frekvencije	72
6.	ZAKLJUČCI I PREPORUKE	74
	ZAHVALE	76
	POPIS LITERATURE	77
	POPIS SLIKA	81
	POPIS TABLICA.....	84
	SAŽETAK RADA	85
	SUMMARY	85

UVOD

Vjetar je čist i obnovljiv izvor energije koji ne uzrokuje zagađenje vode i zraka. Vjetar kao izvor energije ima najniže relativne emisije stakleničkih plinova, najmanju potrošnju vode i najpovoljnije društvene utjecaje u odnosu na fotonaponske elektrane, hidroelektrane, geotermalne elektrane, te ugljen i plin [1]. Snaga vjetra predstavlja dobru opciju u potrazi za obnovljivom energijom, stoga se vjetroagregati postavljaju u skupinama na istim lokacijama kako bi u sklopu vjetroelektrana proizvodili električnu energiju. Vjetar predstavlja besplatni pogonski izvor za proizvodnju električne energije, stoga omogućuje brzi povrat investicije koja obuhvaća velike troškove na početku projekta te manje troškove za vrijeme održavanja sustava. Radi masovne proizvodnje i tehnološkog napretka cijena vjetroagregata je sve prihvatljivija, također mnoge vlade nude porezne olakšice kako bi potaknuli razvoj energije vjetra [2]. Obzirom na mnoge prednosti i poticaje, danas vjetroelektrane u predstavljaju vrlo značajan udio u opskrbi energijom.

Prilikom postavljanja vjetroagregata valja uzeti u obzir nekoliko faktora, kao što su njihova raspoloživost, pouzdanost i profitabilnost [3]. Kod vjetroagregata karakteristična je stohastička priroda režima opterećenja na konstrukciju i njene elemente čiji učinci mogu narušiti njihov strukturni integritet, što dovodi do značajnih troškova održavanja. Tijekom vremena, vjetroagregat će postati manje učinkovit u usporedbi s novim. To može biti uzrokovano brojnim čimbenicima, uključujući izloženost okolišu, zamor lopatica rotora, zamor betonskih temelja i zamor stupa vjetroagregata, slijeganje tla, loša izvedba i loše održavanje. Zaštita imovine i maksimiziranje proizvodnje energije su izazovi i prioriteti za vlasnike. U tom kontekstu prepoznata je nužnost implementacije sustava praćenja (nadzora, monitoringa) konstrukcije (SHM - structural health monitoring) na vjetroagregatima. SHM omogućuje praćenje stanja konstrukcije vjetroagregata tijekom njegovog životnog ciklusa, koji se kreće od 20 do 25 godina [4].

Postoji mnogo sudionika u procesu kao što su proizvođači, vlasnici i korisnici vjetroagregata koji financijski mogu imati korist od primjene sustava monitoringa (SHM), koji je glavni pokazatelj pouzdanosti i operativne funkcionalnosti za svaki od vjetroagregata. Pouzdanost i operativna funkcionalnost može se postići sustavnim praćenjem stanja svih bitnih elemenata vjetroagregata. SHM sustav kombinira različite informacijske i komunikacijske tehnologije, te osigurava automatizirano prikupljanje, pohranu i analizu podataka. Osim toga, SHM sustav pruža daljinski pristup prikupljenim podacima evidentiranim na vjetroagregatu, uključujući fleksibilnu vizualizaciju podataka, analizu podataka i mehanizme izvoza podataka [5]. Postoje

tri glavna područja u kojima se SHM može primijeniti na vjetroagregatu: rotor (uključujući lopatice), stup i temelji. Svaka komponenta predstavlja različite probleme, načine i različite udjele kvara [6].

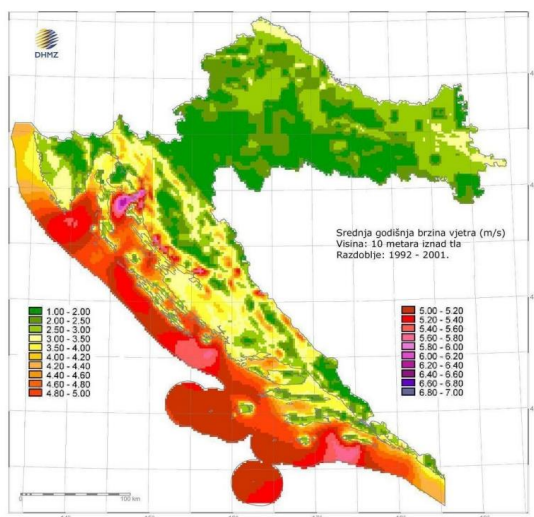
Ovaj rad fokusiran je na sustav praćenja stupa vjetroagregata kao jednog od opterećenih elementa cijelog sustava, koji je izložen konstantnom cikličkom opterećenju uslijed djelovanja promjenjivog intenziteta vjetra i njegovog smjera. Uobičajeno je za takav tip vitkih konstrukcija (kao što su visoki dimnjaci, visoki čelični stupovi, visoki tv tornjevi, itd.) koje su izložene jakom intenzitetu vjetra da su opterećene velikim vibracijama i ponovljivim cikličkim opterećenjima koja mogu dovesti do zamora te oštećenja istih. Razvoj oštećenja kod ovakvih konstrukcija nastaje postupno, a potom se uslijed djelovanja cikličnog opterećenja rapidno povećava sve do katastrofalnih posljedica.

U radu su obuhvaćena dva tipa sustava monitoringa; statički i dinamički sustav. Prvi obuhvaća prikupljanje i analizu relativnih deformacija u kritičnom presjeku stupa radijalno raspoređeni. Dinamički sustav monitoringa podijeljen je na kontinuirani i periodički. Dinamički kontinuirani sustav monitoringa obuhvaća praćenje promjene vlastitih frekvencija na temelju analize relativnih deformacija u kritičnom presjeku stupa. Dinamički periodički monitoring provodi se mjerenjem vibracija prikupljanjem akceleracija u vremenu kako bi odredili dinamičke parametre kao što su vlastita frekvencija, modalni oblici i prigušenje. Analiza navedenih sustava monitoringa temelji se na eksperimentalnim podacima provedenim na modelu vjetroagregata u laboratoriju, eksperimentalnim podacima prikupljenim na stvarnom vjetroagregatu, te provedenim numeričkim analizama.

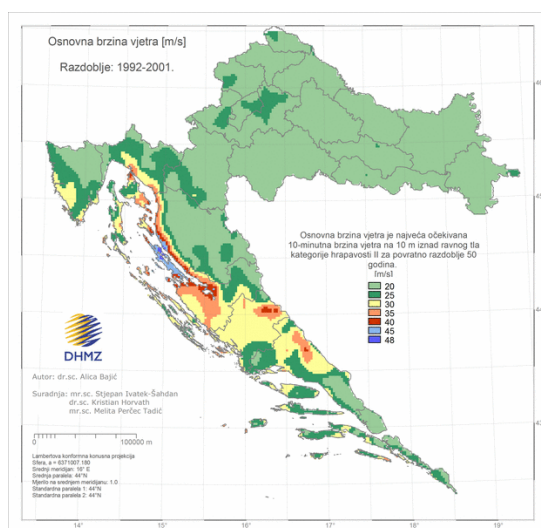
1. STANJE PODRUČJA

1.1 Vjetroelektrane u Hrvatskoj

Razvoj vjetroelektrana u Hrvatskoj počeo je 1988. godine kada je postavljen prvi vjetroagregat. Zbog povoljnijih karakteristika vjetra vjetroagregati se grade na području Jadrana, gdje srednja brzina vjetra iznosi 3-6 m/s (Slika 1). U priobalnim dijelovima puše jak vjetar i do 40 dana godišnje (Slika 2). Jugo i bura su najčešći vjetrovi i pušu tijekom cijele godine, a najveći im je intenzitet tijekom hladnijeg dijela godine. Zbog čestih jakih udara i velikih oscilacija u brzini, nisu u potpunosti iskoristivi i mogu uzrokovati oštećenja vjetroturbina. Stoga je bitno graditi vjetroelektrane na područjima gdje ne pušu vjetrovi orkanske jačine [7].



Slika 1. Srednja brzina vjetra [m/s] u republici Hrvatskoj



Slika 2. Najveća očekivana brzina vjetra [m/s] u Republici

Prema podacima iz listopada 2015. godine na prijenosnu i distribucijsku mrežu bilo je priključeno ukupno 18 vjetroelektrana, s ukupnom instaliranom snagom 420,95 MW. (Tablica 1; Tablica 2)

Tablica 1 Vjetroelektrane unutar hrvatskog EES-a (priključak na prijenosnu mrežu – stanje kolovoz 2016.)

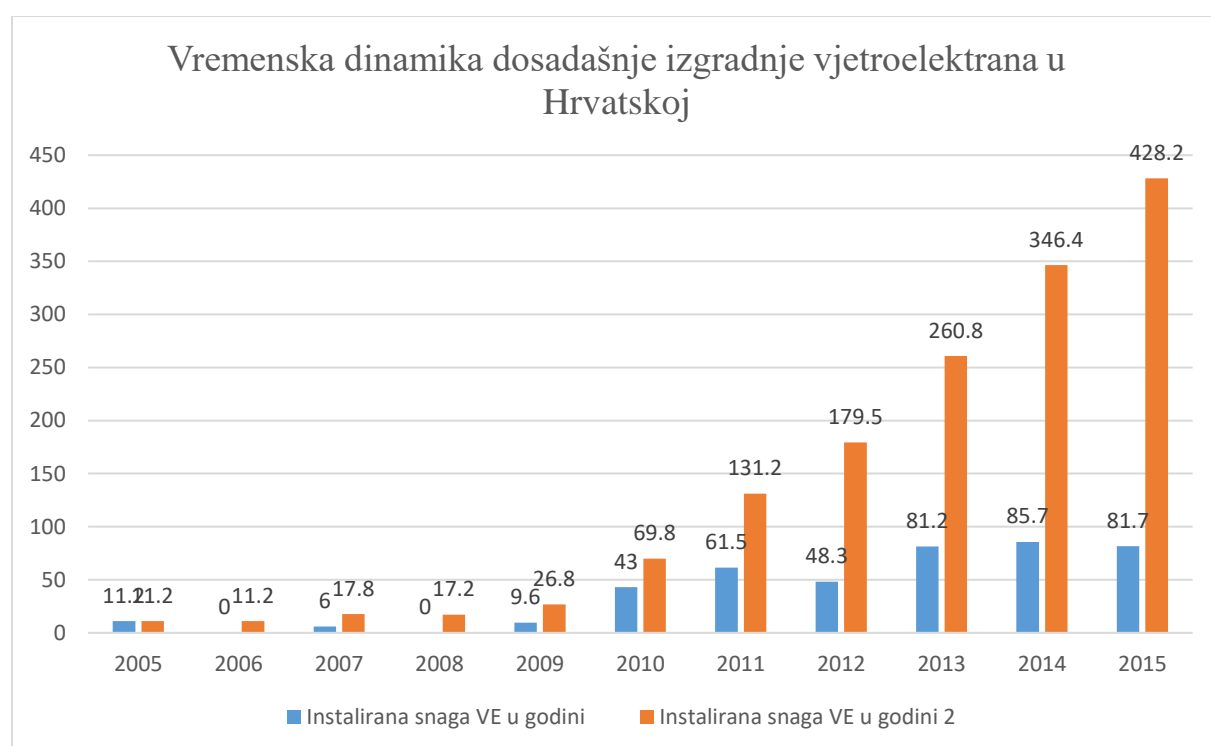
Vjetroelektrana	Odobrena priključna snaga [MW]	Naponska razina priključka [kV]	Lokacija
VE Vrataruša	42	110	Senj
VE ZD2	18	110	Benkovac
VE ZD3	18	110	Benkovac
VE Pometeno brdo	20	110	Split (Konjsko)
VE Ponikve	34	110	Pelješac
VE Jelinak	30	110	Trogir
VE ST1-1 Voštane	20	110	Kraljevac
VE ST1-2 Kamensko	20	110	Kraljevac
VE Zelengrad - Obrovac	42	110	Obrovac
VE Bubrig, Crni Vrh I Velika Glava	43	110	Šibenik
VE Ogorje	44	110	Muč
VE Rudine	35	110	Ston
UKUPNO HOPS		366	

Tablica 2 Vjetroelektrane unutar hrvatskog EES-a (priključak na distribucijsku mrežu – stanje kolovoz 2016.)

Vjetroelektrana	Odobrena priključna snaga [MW]	Naponska razina priključka [kV]	Lokacija
VE Ravne	5.95	10	Pag
VE Trtar-Krtolin	11.2	30	Šibenik
VE Orlice	9.6	30	Šibenik
VE ZD 6 (Velika Popina)	9	35	Gračac
VE Crno Brdo	10	10	Šibenik
VE ZD4	9.2	10	Benkovac
UKUPNO HEP-ODS		54.95	

Zbog iscrpljenja fosilnih goriva sve više se ulaže i potiče razvoj sustava iskorištavanja obnovljivih izvora energije. Strategijom energetskeg razvoja Republike Hrvatske želi se postići uravnotežen razvoj odnosa između sigurnost opskrbe energijom, konkurentnosti i očuvanja okoliša.

Izgradnjom elektrana po Strategiji energetskeg razvoja Republike Hrvatske, do 2020. godine, planirana instalirana snaga vjetroelektrana treba iznositi 1.200 MW, odnosno 10% od ukupne potrošnje električne energije. Procjenama je utvrđeno da nije moguće integrirati vjetroelektrane ukupne priključne snage veće od 400 MW (Slika 3). Poboľšanjem raspoložive sekundarne regulacije unutar sustava bit će moguća izgradnja vjetroelektrana veće ukupne instalirane snage.



Slika 3. Vremenska dinamika dosadašnje izgradnje vjetroelektrana u Hrvatskoj [8]

Integracija vjetroelektrana u hrvatski elektroenergetski sustav, stvara troškove i investicijska ulaganja u dodatna pojačanja prijenosne mreže, troškove osiguravanja dodatnih pomoćnih usluga i dodatne troškove energije uravnoteženja. Povećanje integracije VE trebalo bi provoditi postupno, uz odgovarajuće pripreme i analize utjecaja već postojećih VE na pogon sustava. U razdoblju 2017.-2026. godine planirana je izgradnja 16 vjetroelektrana, ukupne instalirane snage od 1462,2 MW [8].

1.2 Vrste vjetroagregata

Vjetroelektrane se dijele na:

- kopnene vjetroelektrane,
- priobalne vjetroelektrane,
- plutajuće vjetroelektrane,
- zračne vjetroelektrane.

Najčešći oblik vjetroelektrana su kopnene vjetroelektrane (Slika 4) koje se nalaze na vrhovima brda i padinama. Njihova izrada, montaža i održavanje su najjednostavniji i najpovoljniji u odnosu na ostale vjetroelektrane.



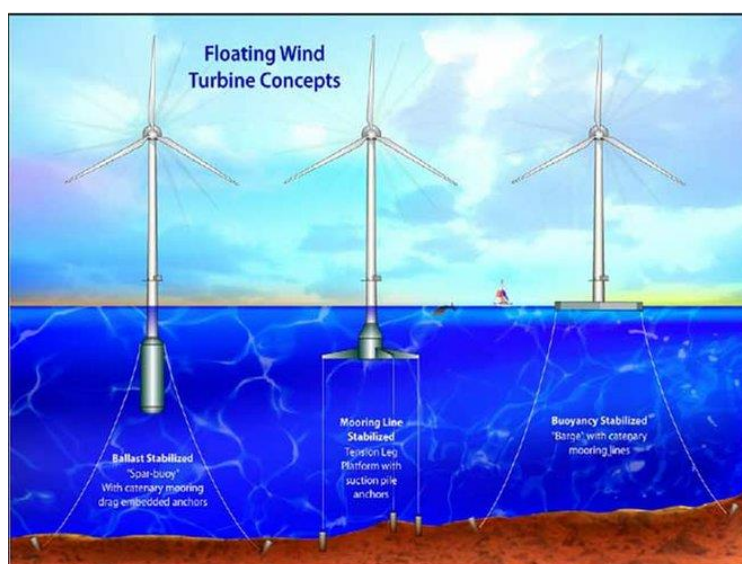
Slika 4. Kopnena vjetroelektrana Vratuša kod Senja [9]

Priobalne vjetroelektrane grade se na moru (priobalna područja-udaljenost od obale do 50 km) u dubinama manjim od 60 metara (Slika 5). Zbog manje površinske hrapavosti vode od kopna, brzine vjetrova su veće na moru. Vjetroagregati u moru su općenito skuplji od kopnenih zbog zahtjevnije izgradnje i većih troškova održavanja. Potrebne su dodatne zaštite od korozije zbog morske soli u vidu premaza i katodne zaštite. Takve vjetroelektrane mogu imati 100 i više vjetroagregata. Električna energija proizvedena u vjetroagregatu prenosi se podvodnim kabelom.



Slika 5. Priobalna vjetroelektrana u Nizozemskoj [10]

Plutajuće ili pučinske vjetroelektrane postavljaju se u dubljem moru na plutajuću strukturu (Slika 6), gdje ne postoji mogućnost instaliranja priobalnih vjetroelektrana. Njihova izgradnja i održavanje je komplicirano, odnosno početni i troškovi održavanja su veći, ali zbog jako povoljne lokacije (jaki vjetrovi) smatraju se isplativima. Više vjetroagregata povezuje se u jednu vjetroelektranu i onda se zajedničkim podmorskim kablom električna energija prenosi na kopno.



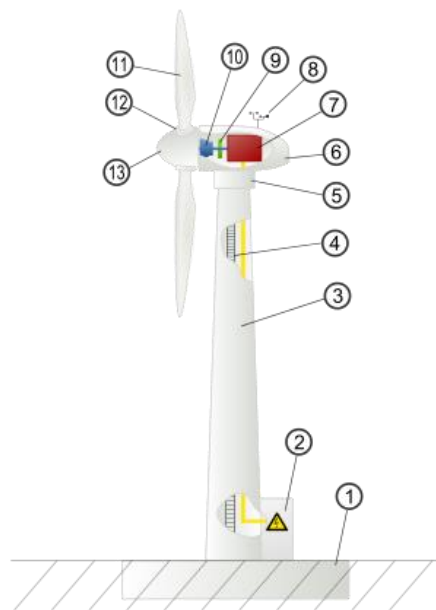
Slika 6. Koncept plutajućih vjetroelektrana [11]

Zračne ili visinske vjetroelektrane podignute su u više slojeve atmosfere bez potpore tornja (Slika 7). Dijele se na one koje iskorištavaju energiju vjetra na nižim visinama i one koje iskorištavaju energiju vjetra na višim visinama. U potpunosti su ekološki prihvatljive i moguće ih je postaviti na bilo kojoj lokaciji na svijetu. Puštanjem tih vjetroelektrana u realizaciju električna energija iz vjetra bi se mogla proizvoditi 90% vremena čime bi se smanjila cijena električne energije. Također bi se smanjilo zagađenje jer ne ispuštaju stakleničke plinove [7].



Slika 7. Koncept visinskih vjetroelektrana [12]

1.3 Dijelovi kopnenog vjetroagregata



Slika 8. Dijelovi kopnenog vjetroagregata [13]

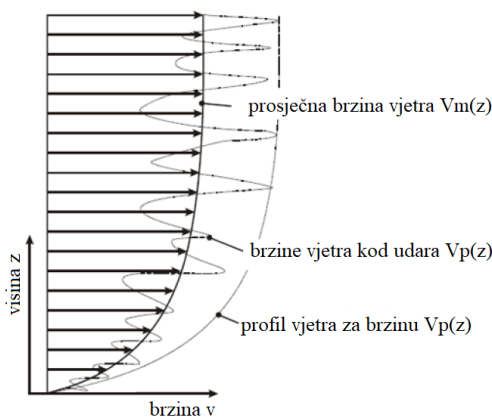
Glavni dijelovi kopnenog vjetroagregata s vodoravnom (horizontalnom) osi (Slika 8):

1. temelj,
2. priključak na elektroenergetski sustav,
3. stup (toranj),
4. ljestve za pristup,
5. zakretnik,
6. kućište stroja ili gondola,
7. električni generator,
8. anemometar,
9. kočioni sustav (elektromagnetska ili mehanička kočnica),
10. prijenosnik snage (obično multiplikator),
11. lopatice rotora,
12. sustav zakretanja lopatica (eng. *pitch*),
13. glava rotora.

Stup može biti izveden kao cjevasto konični, teleskopski, rešetkasti, učvršćeni i povezani. Danas se najčešće koristi cjevasta konstrukcija, a njena je prednost što ju osim visoke čvrstoće karakterizira i veća otpornost na vibracije. Prednost rešetkaste konstrukcije nalazi se u jednostavnosti, a budući da ju je moguće rastaviti na manje dijelove prikladnija je za prijevoz i ugradnju. Unutar cjevastog stupa nalaze se stube ili ljestve, a kod većih se ponekad ugrađuje i dizalo. U podnožju se nalazi transformator koji povezuje vjetroagregat sa srednjenaponskom mrežom, te kontrolna i mjerna jedinica [7].

1.4 Djelovanje vjetra na stup vjetroagregata

Vitke strukture izložene vjetru, poput tornjeva vjetroagregata, podložne su vremenski promjenjivim (dinamičnim) djelovanjima (Slika 9). Srednji dio odgovora konstrukcije, koncentriran u smjeru vjetra, odnosi se na srednju brzinu vjetra; varijabilni dio odgovora konstrukcije uzrokovan je međusobnim djelovanjem turbulencije vjetra i vrtložne pobude [14]. Srednji dio odgovora konstrukcije proizvodi amplitude pokreta, ovisno o srednjoj brzini vjetra. Varijabilni dio odgovora konstrukcije proizvodi aerodinamička djelovanja okomito na smjer vjetra, čija frekvencija ovisi o srednjoj brzini vjetra, obliku i veličini poprečnog presjeka konstrukcije. Najgora moguća situacija događa se pri kritičnim brzinama vjetra, koji uzrokuje rezonantnu pobudu prirodnom frekvencijom. Ovaj opasni fenomen poznat je kao lock-in [15].



Slika 9. Promjena brzine vjetra u ovisnosti o visini (z) [16]

1.5 Postojeći sustavi monitoringa vjetroagregata

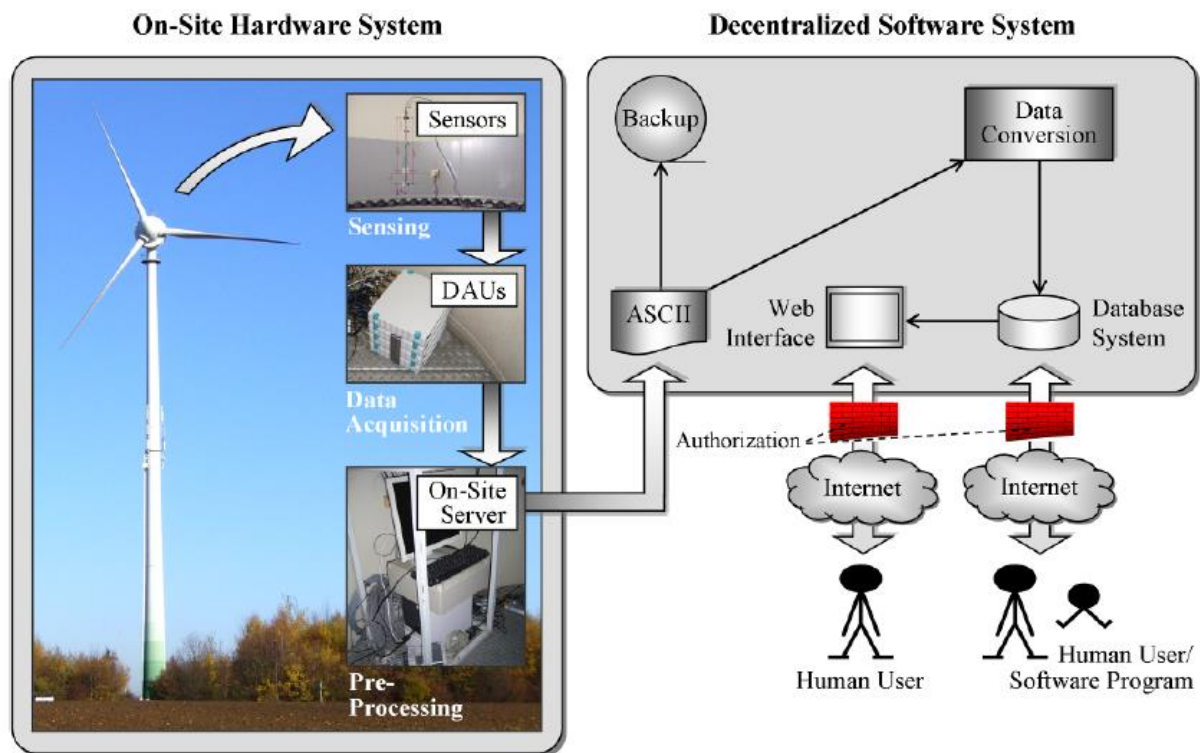
Tijekom eksploatacijskog perioda vjetroagregata, primijećeno je da su se dogodili privremeni kvarovi, koji utječu na performanse i pouzdanost sustava. Kvarovi sustava SHM ili nefunkcioniranje komponenti senzora može dovesti do neželjenih prekida prikupljanja podataka [17].

Uzroci takvih neispravnosti su višestruki, na primjer privremeni prekidi napajanja koji utječu na računalne sustave, problemi u hardveru pri prikupljanju podataka zbog ekstremnih vremenskih uvjeta, problemi u komunikaciji na daljinu i slično. Očito, ako se pravovremeno ne otkriju kvarovi, mogu uzrokovati gubitak vrijednih podataka nadzora. Da bi takve nedostatke prevladali, autonomni softver je implementiran i integriran u postojeći SHM sustav. Na temelju multi-agent sustava, autonomni softver je dizajniran da automatski detektira neispravnosti cijelog SHM sustava i njegovih komponenti, te odmah šalje upozorenja za sanaciju ("2nd level monitoring" ili "praćenje nadzora"). Algoritmi za otkrivanje oštećenja, kao na primjer brza Fourierova transformacija ili autoregresivni modeli, mogu biti dio multi-agent sustava. Decentralizirani SHM sustav sastoji se od dva podsustava (Slika 10):

- hardverski sustav postavljen na licu mjesta
- decentralizirani softverski sustav

Hardverski sustav uključuje senzore, jedinice za prikupljanje podataka (DAUs) i lokalno računalo. Senzori su ugrađeni unutar i izvan stupa, kao i na temeljima. Senzore kontroliraju jedinice za prikupljanje podataka koje su povezane s on-site serverom koji se nalazi u sobi za održavanje vjetroagregata. Podaci prikupljeni i unaprijed obrađeni hardverskim sustavom na licu mjesta prosljeđuju se decentraliziranom softverskom sustavu pomoću trajno instalirane

DSL veze. Svrha softverskog sustava je automatsko arhiviranje i obrada podataka kao što su sažimanje, pretvaranje i pohranjivanje stečenih skupova podataka. Softverski sustav omogućuje ovlaštenim korisnicima daljinski pristup SHM sustavu [18].



Slika 10 Decentralizirani SHM sustav [18]

Sustav kontrole nadzora može se provoditi na rotoru i lopaticama, generatoru, stupu i temeljima. U nastavku su opisani senzori koji se koriste za SHM stupova i temelja.

Elektrootporni tenzometri (EOT) (Slika 11) - SHM se može provoditi pomoću elektrootpornih traka mjereći deformacije uzrokovane opterećenjem mogu biti mjerodavan izvor informacija. Na osnovu rezultata mjerenja, poznajući karakteristike materijala, moguće je odrediti opterećenja na konstrukciju [19]. Međutim, njihovo korištenje je ograničeno zbog osjetljivosti na udarce i nemogućnosti mjerenja cikličkih opterećenja [20].



Slika 11 Elektrootporne trake (EOT) [21]

Optičke mjerne trake (Optical-fiber sensors-OFS) (Slika 12) su pogodne za SHM zbog mogućnosti mjerenja u okruženjima visokog napona i neosjetljivosti na magnetska polja. Prednost u odnosu na elektrootporne trake je mjerenje većih relativnih deformacija te veća otpornost na puzanje i zamor [22]. OFS imaju visoku temperaturnu zavisnost i ne mogu se samokompenzirati, nego se temperaturna kompenzacija vrši računski uz mjerenje temperature. [23]. Najveći nedostatak optičkih mjernih traka je visoka cijena, koja raste čak i do 50 puta više, nego za EOT. [19]

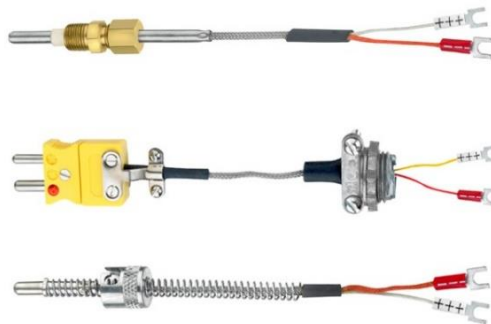


Slika 12 Optičke mjerne trake [24]

Senzori za mjerenje temperature i vibracija - Akcelerometri (Slika 13) se koriste za mjerenje vibracija stupa tijekom rada vjetroagregata. U slučaju velikih oscilacija temperatura potrebno je postaviti termoparove (Slika 14) duž konstrukcije kako bi dobili mjerodavne rezultate mjerenja [25].



Slika 13 Akcelerometar



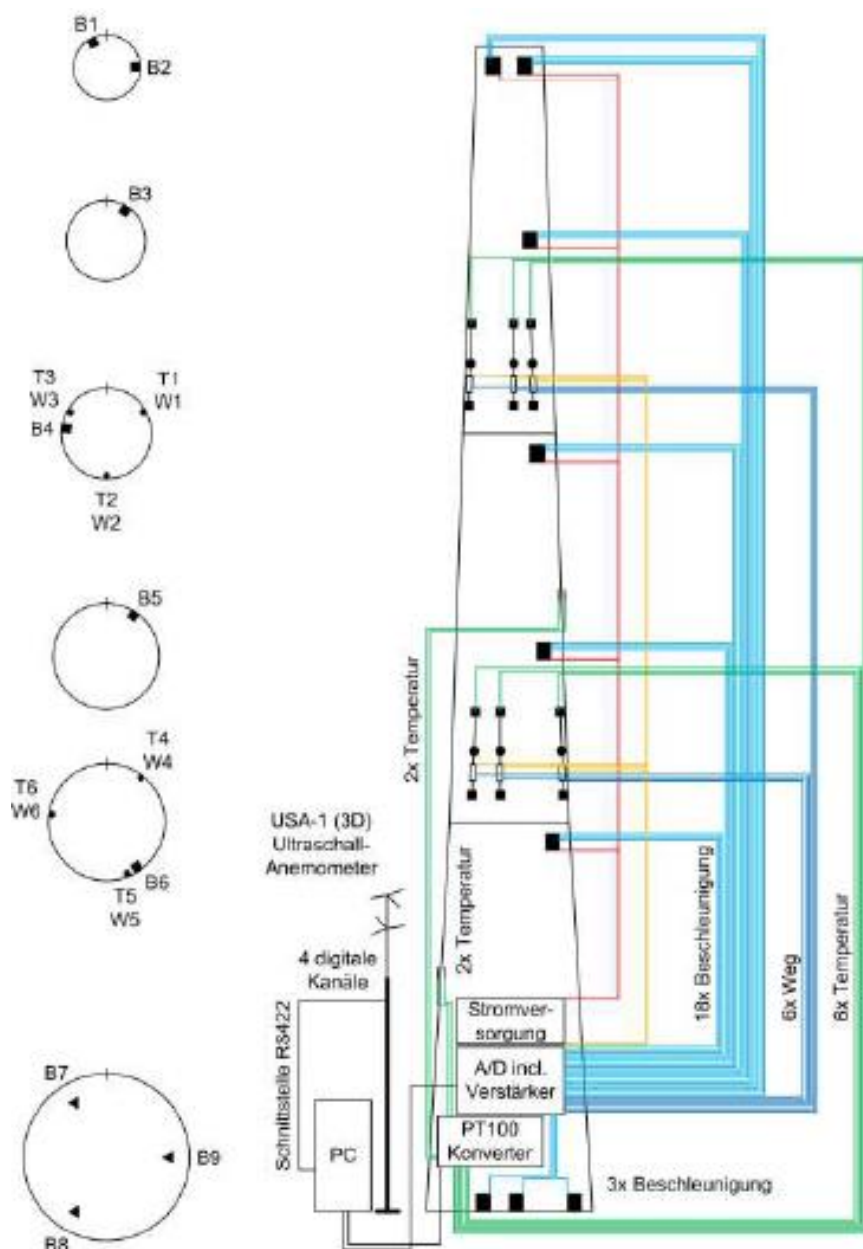
Slika 14 Termoparovi [26]

Senzori za mjerenje pomaka kao što su infracrveni senzori, linearno varijabilni diferencijalni transformator (LVDT) (Slika 15) te Hall-effect senzori, se koriste za monitoring temelja vjetroagregata [27].



Slika 15 Linearno varijabilni diferencijalni transformator (LVDT) [28]

Pozicije senzora prikazane su u nastavku (Slika 16). Postavljeno je 9 akcelometara, 92 elektrootporne trake, 4 temperaturna senzora i 2 inklinometra. Mjerenja su potvrdila da je po visini stupa konstrukcije varijacija napreznja mala, jer se u poprečnom presjeku mijenja promjer i debljina stijenke. Stup se ponaša kao konzola i raspodjela momenta savijanja po visini stupa je gotovo linearna [29].



Slika 16 Primjer pozicioniranja senzora na stupu i temeljima za kopnene vjetroagregate [29]

2. MOTIVACIJA ZA ISTRAŽIVANJEM

Sustav monitoringa na vjetroagregatima u svijetu pa i u Hrvatskoj predstavlja poseban izazov. Budući da je riječ relativno novijoj tehnologiji proizvodnje električne energije, sve većem broju vjetroparkova i ubrzanoj gradnji, nerijetko se događaju kolapsi ovakvih konstrukcija.

2.1 Kolaps vjetroagregata u Hrvatskoj

Jedan od primjera kolapsa možemo pronaći i u Hrvatskoj. Vjetroelektrana Ravne 1 prva je vjetroelektrana u Hrvatskoj, a na predjelu iznad paške solane montirana je 19. kolovoza 2004. Silovita bura, 06. listopada 2017., slomila je jedan od tri propelera na jednoj od vjetrenjača, propeler je potom centrifugalna sila odbacila stotinjak metara dalje od same vjetroelektrane. Pretpostavlja se da su se ostala dva propelera nastavila vrtjeti, što je dovelo do ispadanja čeličnog vjetroagregata iz ravnoteže te njegovog kolapsa (Slika 17). Vjetroagregat težine je oko 35 tona i visine 50 metara. Ovo je prvi put da se ovako nešto dogodilo otkad u Hrvatskoj postoje vjetroelektrane [30]. Posljedice kolapsa su višestruke, osim velike materijalne štete, može doći do onečišćenja okoliša, prekida u opskrbi električnom energijom te oštećenja drugih vjetroagregata u blizini.

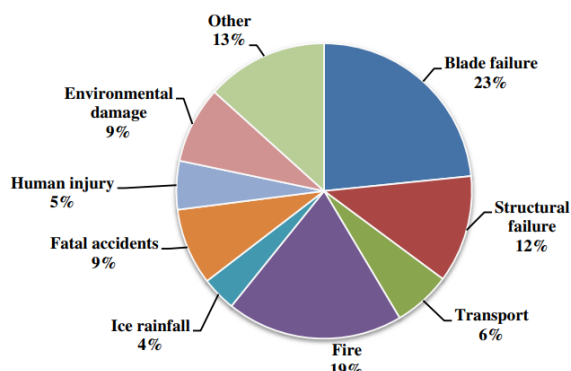


Slika 17 Srušena vjetrenjača na otoku Pagu [31]

2.2 Kolaps vjetroagregata u svijetu

S obzirom na veliki broj vjetroparkova u svijetu nerijedak je slučaj nastanka kolapsa vjetroagregata. U ovom poglavlju prikazat će se povijesni pregled uzroka kolapsa velikih vjetroagregata u svijetu [32]. U prikazanom radu obrađeno je 715 raznih izvora u kojima su dostupni i dokumentirani razlozi nesreća na vjetroagregatima. Na sljedećem grafu dana je razdioba nesreća [%] prema poznatim uzrocima nesreća. Dominantan broj nesreća pripada

lopaticama i konstrukcijskim elementima, što u sumi odgovara gotovo 35% svih nesreća (Slika 18).



Slika 18 Tipovi nesreća na vjetroagregatima u svijetu prema istraživanju [32]

Nadalje, u istom radu dan je detaljan pregled (1997-2009) od 62 nesreće vjetroagregata, te su navedeni uzroci koji su doveli do nesreća (Slika 19).

Details of 62 accidents of tower collapse (1997–2009 inclusive).

No.	Date	Country	Failure type	Turbine type	Cause of failure
1	1997/08/01	USA	Fatal	500 kW	Unidentified
2	1998/12/27	UK	Structural failure	WEG MS-3 300 kW	Unidentified
3	1999/01/16	Germany	Structural failure	Enercon E-40	Material fatigue
4	1999/03/01	Germany	Structural failure	Enercon E-40	Material fatigue
5	1999/12/03	Denmark	Structural failure	Various, including Windmatic, Wincon, Bonus, and Vestas	Storm
6	1999/12/12	Germany	Structural failure	Sudwind S 46/600 kW	Unidentified
7	2000	France	Structural failure	500 kW	Storm
8	2000/01/20	Germany	Fire	Sudwind S 46/600 kW	Lightning strike
9	2000/02/10	Germany	Structural failure	Enercon E32	Unidentified
10	2000/02/15	Holland	Structural failure	Lagerwey	Storm
11	2000/03/11	Holland	Structural failure	Newinco in Rhenen, 30 m tower	Storm
12	2000/12/09	Spain	Structural failure	GamesaEólica G-47 660 kW	Being struck by blade
13	2001/01/15	Spain	Structural failure	GamesaEólica G-47 660 kW	Unidentified
14	2002/01/28	Germany	Structural failure	Windrad HSW 250	Storm
15	2002/05/15	USA	Structural failure	WTC	Being struck by blade
16	2002/06/12	Germany	Fire	N/A	Fire
17	2002/10/27	Germany	Structural failure	GET 41a 600 kW. Hub height 70 m, rotor diameter 41 m	Storm
18	2002/11/19	USA	Structural failure	Anemometer	Ice storm
19	2002/12/18	Germany	Structural failure	Vestas V80 2.0 MW	Faulty welding
20	2002/12/28	France	Blade failure	600 kW, 75 m total height	Storm
21	2003/02/02	Germany	Fire	Enercon	Fire
22	2003/03/01	USA	Structural failure	Anemometer	Ice storm
23	2003/07/28	Germany	Miscellaneous	80 ton, 25 m total height	Unidentified
24	2004/01/01	France	Structural failure	Lagerwey 750 kW	Storm
25	2004/03/20	France	Structural failure	Lagerwey 300 kW	Storm
26	2004/09/26	Germany	Fire	N/A	Fire
27	2005/05/06	USA	Structural failure	GE Wind 1.5 MW	Unidentified
28	2005/06/20	Canada	Structural failure	N/A	Storm
29	2005/12/16	Germany	Structural failure	Small private turbine, 15 m high	Storm
30	2006/01/10	Holland	Structural failure	Nedwind, 1 MW, 55 m diameter, 63 m tower	Unidentified
31	2006/02/21	USA	Structural failure	120 foot tower	Unidentified
32	2006/03/28	Holland	Structural failure	Lagerwey LW 18/80, 31 M tower	Unidentified
33	2006/07/06	Holland	Miscellaneous	Nedwind	Lightning strike
34	2006/10/31	Holland	Fire	Vestas NM 48/750	Fire
35	2006/11/20	USA	Structural failure	Small turbine	Material fatigue
36	2006/12/04	France	Structural failure	30 m height	Strong winds
37	2006/12/08	USA	Structural failure	School turbine 150 kW	The braking system failed
38	2007/01/08	Japan	Structural failure	Vestas	Strong winds
39	2007/01/09	Germany	Fire	N/A	Fire
40	2007/01/13	Germany	Structural failure	HSW 100	Storm
41	2007/03/08	USA	Structural failure	N/A	Unidentified
42	2007/05/11	UK	Structural failure	N/A	Strong winds
43	2007/07/30	Holland	Human injury	N/A	Unidentified
44	2007/08/25	USA	Fatal	Siemens 2.3 MW	Unidentified
45	2007/11/08	UK	Structural failure	Vestas V47	Strong winds
46	2007/12/21	USA	Structural failure	N/A	Storm
47	2007/12/31	Japan	Structural failure	N/A	Faulty welding
48	2008/01/02	UK	Structural failure	Vestas V25	Strong winds
49	2008/01/08	UK	Structural failure	Domestic wind turbine	Storm
50	2008/02/22	Denmark	Structural failure	Vestas (Nordtank NKT600 - 180/43)	The braking system failed
51	2008/03/03	Holland	Structural failure	Lagerwey LW 18/80	Unidentified
52	2008/03/04	USA	Structural failure	N/A	Ice storm
53	2008/03/30	Holland	Miscellaneous	Vestas V90 3 MW	Unidentified
54	2008/09/28	Taiwan	Structural failure	Z72-2000-2B 2 kW	Strong winds
55	2008/10/16	USA	Structural failure	N/A	Strong winds
56	2008/10/25	UK	Structural failure	N/A	Strong winds
57	2008/11/09	USA	Fatal	N/A	Unidentified
58	2009/02/07	USA	Blade failure	ReDriven Power turbine, 20 kW, 20 foot blades	Being struck by blade
59	2009/09/22	USA	Human injury	N/A	Unidentified
60	2009/12/01	UK	Structural failure	N/A	Unidentified
61	2009/12/17	USA	Structural failure	N/A	Storm
62	2009/12/28	USA	Structural failure	N/A	Ice storm

Slika 19 Tablica nesreća na vjetroagregatima u svijetu prema istraživanju [32]

U danj tablici može se učiti da su identificirana 44 uzroka nesreća koja su dovela do kolapsa vjetroagregata, od toga veći dio pripada prirodnom nepogodama kao što su oluje (34%) i jaki vjetrovi (18%). Stoga prirodne nepogodne predstavljaju najveći rizik kojima su izloženi vjetroagregati. Ostali faktori koji se ističu koji su uzrokovali nesreće su zamor materijala (3 slučaja) i loša kvaliteta varova (2 slučaja) (Slika 20).



Slika 20 Fotografije vijaka, zamor materijala [32]

Na sljedećoj slici prikazan je još jedan slučaj kolapsa stupa nastao kao posljedica zamora materijala (Slika 21). Vjetropark se nalazi u Japanu a kolaps se dogodio 2013 godine [33].



Slika 21 Fotografije vijaka, zamor materijala [33]

2.3 Zaključak

Na temelju prikazanog može se zaključiti da je sustav monitoringa vrlo važan na ovakvom tipu konstrukcija koje su konstantno izložene promjenjivom djelovanju vjetra i iznimnom opterećenju svih elementa vjetroagregata. Standardan sustav monitoringa na vjetroagregatima uobičajeno postoji na postrojenju; motoru, ležajevima, itd. ali uobičajeno ne postoji na konstruktivnim elementima vjetroagregata kao što su stup i temelj. Dakle, u okviru ovog rada analizirat će se mogućnost primjene jednostavnog i financijski povoljnog (u odnosu na cijeli projekt) sustava monitoringa na vrlo važnim konstruktivnim elementima stupu i temelju.

3. TEORIJSKA PODLOGA - DINAMIČKI PARAMETRI KONSTRUKCIJA

U ovom poglavlju dane su osnovne postavke, temeljene na teoriji, za potrebe određivanja dinamičkih parametara konstrukcija. Navedena teorijska podloga koristiti će se u eksperimentalnom dijelu rada na modelu vjetroagregata.

3.1 Uvod u modalnu analizu

U novije vrijeme primjenjuju se metode za određivanje stanja i oštećenja konstrukcija bazirane na određivanju dinamičkih (modalnih) parametara konstrukcija (vlastitih frekvencija, koeficijenta prigušenja i vlastitih oblika titranja). Dinamičko ponašanje konstrukcije može se opisati nizom pojedinačnih modova vibriranja. Modalni parametri opisuju dinamičko ponašanje konstrukcije kao linearnu kombinaciju više rezonantnih modova. Razvoj metoda ispitivanja, analize prikupljenih podataka i tehničko usavršavanje mjerne opreme danas omogućavaju mjerenje dinamičkih parametara realnih konstrukcija s visokom točnošću. Polazna osnova za eksperimentalno određivanje dinamičkih parametara konstrukcije jest činjenica da odgovor konstrukcije na dinamičku pobudu sadrži karakteristiku fizičkog sistema. Dinamički parametri su funkcije globalne krutosti i najbolji su pokazatelj realnog stanja konstrukcije. Svaka ozbiljnija promjena koja se dogodi na konstrukciji prouzročit će i promjenu vrijednosti dinamičkih parametara. Objektivno te promjene neće biti velike pa je potrebno postići visoku točnost primijenjenih eksperimentalnih metoda [23].

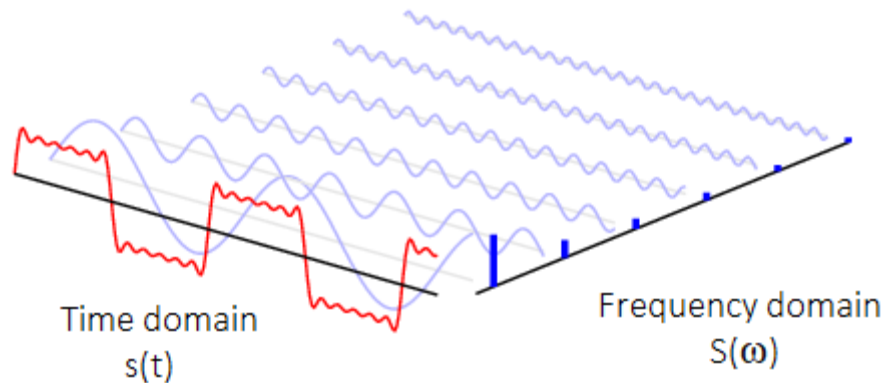
3.2 Digitalna obrada signala

3.2.1 *Fourierove transformacije*

Dinamički proces može se prikazati u vremenskom i frekventnom području. Postupak koji omogućuje prijelaz iz vremenskog u frekventno područje i obratno zove se Fourierova transformacija (FT), preko Fourierovog transformacijskog para:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-i2\pi ft} dt$$
$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f)e^{i2\pi ft} df$$

gdje je $x(t)$ vremenska funkcija, a $X(f)$ kompleksna funkcija koja predstavlja Fourierovu transformaciju funkcije $x(t)$. Fourierova transformacija je matematički alat koji omogućuje jedinstven rastav fizikalno realnog signala u sumu sinusnih i kosinusnih članova odgovarajućih frekvencija, amplituda i faza (Slika 22).



Slika 22 Rastavljanje signala u sumu sinusnih članova (DFT-FFT)

Kod digitalnog prikupljanja podataka mjerenje se vrši u konačnom vremenskom periodu T koji je diskretiziran na N jednako raspoređenih vremenskih intervala Δt , stoga je Diskretna Fourierova Transformacija (DFT) osnova za formulaciju bilo kakve funkcije u frekventnom području kod digitalnog prikupljanja podataka. Ako je frekventno područje diskretizirano izbor frekvencija je ovisan o toj diskretizaciji, a DFT opisuje doprinos svakog sinusnog i kosinusnog člana za pojedinu diskretnu frekvenciju [34].

Za konačni vremenski period T podijeljen na N jednakih Δt intervala Diskretna Fourierova transformacijski par je:

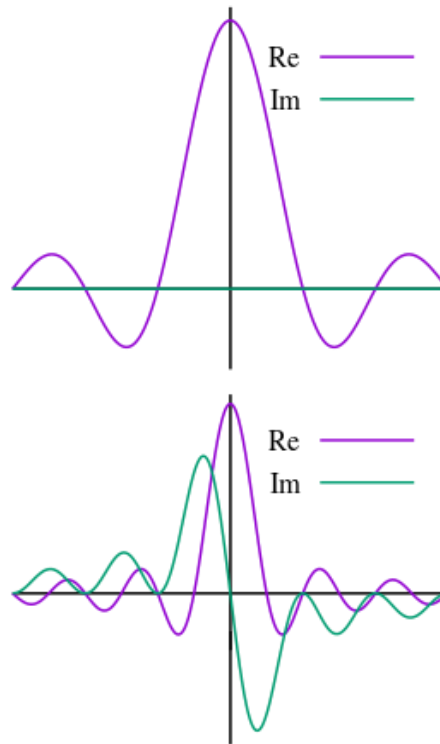
$$X(m\Delta f) = \Delta t \sum_{n=0}^{N-1} x(n\Delta t) e^{-i2\pi m\Delta f n\Delta t} \quad m = 0, \dots, \frac{N}{2}$$

$$x(n\Delta t) = \Delta f \sum_{m=0}^{N/2} X(m\Delta f) e^{-i2\pi m\Delta f n\Delta t} \quad n = 0, \dots, N-1$$

Rezultat Diskretne Fourierove transformacije je kompleksni spektar frekvencija određenog signala koji ima realni i imaginarni dio (Slika 23), a točan je samo ako je $x(t)$ periodički signal perioda:

$$Re[X(m\Delta f)] = \Delta t \sum_{n=0}^{N-1} x(n \Delta t) \cos(2\pi m \Delta f n \Delta t)$$

$$Im[X(m\Delta f)] = \Delta t \sum_{n=0}^{N-1} x(n \Delta t) \sin(2\pi m \Delta f n \Delta t)$$

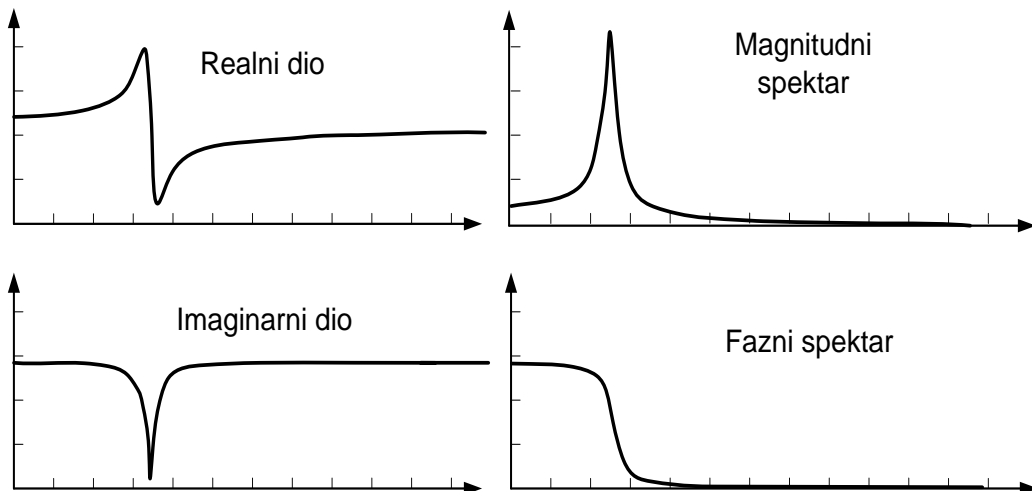


Slika 23 Realni i imaginarni dio kompleksnog spektra frekvencija

Realni i imaginarni dio se najčešće preračunavaju u magnitudni i fazni spektar (Slika 24) u sljedećem obliku:

$$|X(f)| = \sqrt{Re[X(m\Delta f)]^2 + Im[X(m\Delta f)]^2}$$

$$\phi = \operatorname{tg}^{-1} \frac{Im[X(m\Delta f)]}{Re[X(m\Delta f)]}$$



Slika 24 Rezultat DFT-a prigušenog sinusnog signala

Brza Fourierova Transformacija (FFT), koju su prvi objavili J. W. Cooley i J. W. Tukey, predstavlja algoritam za ubrzano rješavanje DFT-a. Ako koristimo DFT i uzimamo blok od N podataka potrebno je obaviti N^2 množenja i $(N - 1)$ zbrajanja kompleksnih brojeva, dok se primjenom FFT-a može odrediti isti rezultat sa $N \log_2 N$ računskih operacija. Razlika u broju operacija može biti znatna što je vidljivo u Tablica 3 :

Tablica 3 Broj uzoraka i odnos broja operacija DFT-a i FFT-a

$N = 2^p$ (broj uzoraka)	Odnos broja računskih operacija DFT/FFT $N^2 / N \log_2 N$
$2^8 = 256$	32
$2^9 = 512$	56,9
$2^{10} = 1024$	102,4
$2^{11} = 2048$	186,2
$2^{12} = 4096$	341,3
$2^{13} = 8192$	630,1
$2^{14} = 16384$	1170,3

3.2.2 Spektralne funkcije

Spektralni prijelaz iz vremenskog u frekventno područje obavlja spektralni analizator. Taj proces baziran je na diskretnoj Fourierovoj transformaciji, a radi jednostavnosti postupka i

uštede vremena koristi se FFT algoritam. Analizator pri tome uzima blok podataka u vremenskom području, ako taj blok podataka ne sadrži cijeli broj ciklusa frekventni odgovor nije čist. Analizatorima frekvencija određuju se različite spektralne funkcije [35] :

- kompleksni spektar frekvencija
- spektralne gustoće snage
 - funkcija autospektralne gustoće snage
 - funkcija međuspektralne gustoće snage
- frekventni odgovor
- koherencija.

Osnovne dinamičke (modalne) parametre neke konstrukcije možemo dobiti određivanjem funkcije frekventnog odgovora. Također iz skupa podataka funkcije frekventnog odgovora moguće je, osim osnovnih dinamičkih parametara, odrediti i eksperimentalne modalne parametre [36]. Modalni parametri mogu se odrediti serijom mjerenja funkcija frekventnog odgovora (FRF) između jedne ili više referentnih točaka na kojima se nanosi pobuda i određenog broja mjernih točaka, tj. mjerenih stupnjeva slobode (DOF – Degree of Freedom). Stupanj slobode je mjerna točka i smjer definiran na konstrukciji. Vlastite frekvencije i koeficijenti prigušenja mogu se odrediti mjerenjem FRF-a između bilo koja dva stupnja slobode, osim onih stupnjeva slobode koji predstavljaju nultočke pojedinog modalnog oblika. [35]. Vezu između ulaznih i izlaznih signala na konstrukciji kao funkciju u ovisnosti o frekvenciji možemo opisati pomoću funkcije frekventnog odgovora. Funkcija frekventnog odgovora (FRF) je dakle mjera koja pokazuje koliki je izlaz neke mehaničke veličine (npr. akceleracija, brzina, pomak) po jedinici ulazne veličine. Funkcije frekventnog odgovora eksperimentalno se određuju višekanalnim mjerenjima sile pobude i odgovora konstrukcije (Slika 26 Blok dijagram FRF-a). Postoje različiti oblici funkcije frekventnog odgovora, ovisno o promatranoj varijabli odgovora, a to su oblik [37]:

- popustljivosti: daje kompleksni odnos pomaka i sile;
- pokretljivosti: daje kompleksni odnos brzine i sile;
- inertnosti: daje kompleksni odnos akceleracije i sile.

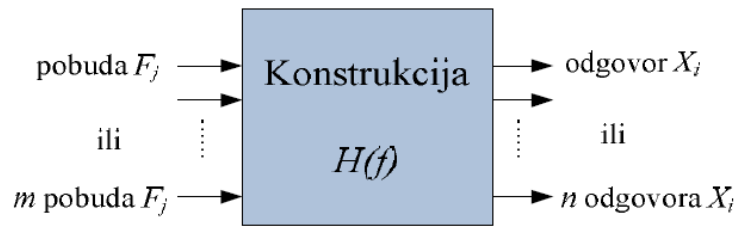
Postoje četiri osnovne konfiguracije određivanja funkcije frekventnog odgovora ovisno o broju pobuda koje se nanose i o broju kanala kojima se mjeri odgovor konstrukcije [38]:

- jedan ulaz – jedan izlaz (SISO, Single Input – Single Output);
- jedan ulaz – više izlaza (SIMO, Single Input – Multiple Output);
- više ulaza – jedan izlaz (MISO, Multiple Input – Single Output);
- više ulaza – više izlaza (MIMO, Multiple Input – Multiple Output).

Najbolje rezultate ispitivanja daje konfiguracija s više ulaza – više izlaza (MIMO) jer se provodi u najkraćem vremenu s najmanje promjena uvjeta tijekom ispitivanja. Mana te konfiguracije je to što je zahtjevnija s aspekta opreme potrebne za provođenje ispitivanja i obrade prikupljenih podataka. Konfiguracije s jednim ulazom ili jednim izlazom također se mogu koristiti jer svaki redak ili stupac matrice funkcije frekventnog odgovora sadrži dovoljno informacija za određivanje svih modalnih parametara [35]. Matrica funkcije frekventnog odgovora (Slika 25 Matrice funkcije frekventnog odgovora) predstavlja vezu između ulaznih i izlaznih spektralnih funkcija. Spektralne funkcije koje se koriste kod SIMO konfiguracije prikazane su u Matrici 2, a spektralne funkcije koje se koriste kod MISO konfiguracije prikazane su u Matrici 3.

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ \vdots \\ X_n \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & H_{13} & \dots & H_{1m} \\ H_{21} & H_{22} & H_{23} & \dots & H_{2m} \\ H_{31} & H_{32} & H_{33} & \dots & H_{3m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{n1} & H_{n2} & H_{n3} & \dots & H_{nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ \vdots \\ F_m \end{bmatrix} & \text{Matrica 1} \\
 \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ \vdots \\ X_n \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & H_{13} & \dots & H_{1m} \\ H_{21} & H_{22} & H_{23} & \dots & H_{2m} \\ H_{31} & H_{32} & H_{33} & \dots & H_{3m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{n1} & H_{n2} & H_{n3} & \dots & H_{nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ \vdots \\ F_m \end{bmatrix} & \text{Matrica 2} \\
 \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ \vdots \\ X_n \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & H_{13} & \dots & H_{1m} \\ H_{21} & H_{22} & H_{23} & \dots & H_{2m} \\ H_{31} & H_{32} & H_{33} & \dots & H_{3m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{n1} & H_{n2} & H_{n3} & \dots & H_{nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ \vdots \\ F_m \end{bmatrix} & \text{Matrica 3}
 \end{aligned}$$

Slika 25 Matrice funkcije frekventnog odgovora



Slika 26 Blok dijagram FRF-a

Prijenosna funkcija $H(f)$ kompleksna je funkcija koja opisuje snagu i fazu odgovora po jedinici sinusne pobude kao funkciju ulazne frekvencije. Prijenosne funkcije se mogu odrediti iz spektralnih, autospektralnih i međuspektralnih funkcija prema sljedećim izrazima.

$$H(f) = \frac{Y(f)}{X(f)}$$

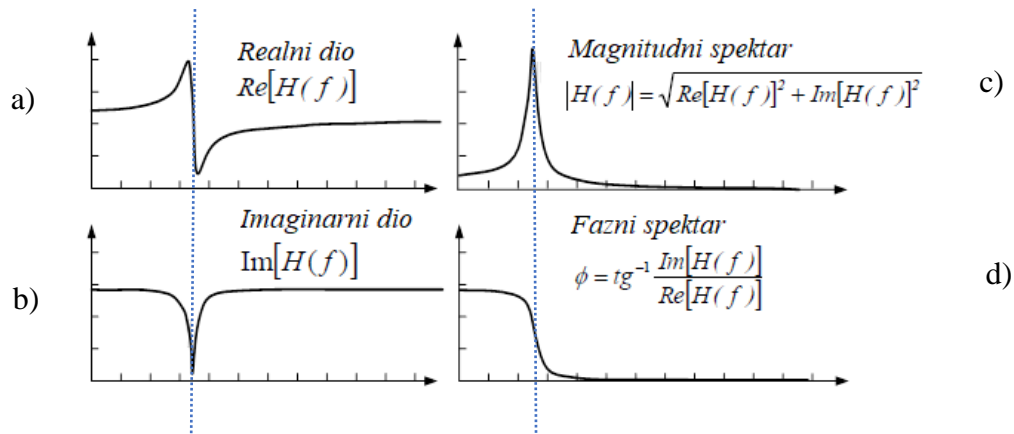
$$|H(f)|^2 = \frac{G_{yy}(f)}{G_{xx}(f)}$$

$$H_1(f) = \frac{G_{yx}(f)}{G_{xx}(f)}$$

$$H_2(f) = \frac{G_{yy}(f)}{G_{xy}(f)}$$

3.2.2.1. Određivanje dinamičkih parametara

Vlastita frekvencija može se odrediti iz bilo kojeg oblika funkcije frekventnog odgovora $H(f)$ (Slika 27). Kod realnog dijela FRF-a to je točka infleksije koja ima vrijednost nula (slika 9.a). Imaginarni dio frekventnog odgovora pri vlastitoj frekvenciji ima maksimum ili minimum (slika 9.b). Magnituda frekventnog odgovora je maksimalna pri vlastitoj frekvenciji (slika 9.c), a odgovor kasni za 90° u odnosu na pobudu što je vidljivo iz faznog dijela frekventnog odgovora (slika 9.d) [35].



Slika 27 Određivanje vlastitih frekvencija iz $H(f)$

Koeficijent prigušenja može se odrediti iz magnitudnog dijela funkcije frekventnog odgovora. Najčešće se koristi metoda pojasa pola snage ili neka druga metoda temeljena na procjeni oštine rezonantnog vrha, odnosno stupnja prigušenja. Da bi se mogla primijeniti metoda pojasa pola snage moraju biti zadovoljeni sljedeći uvjeti:

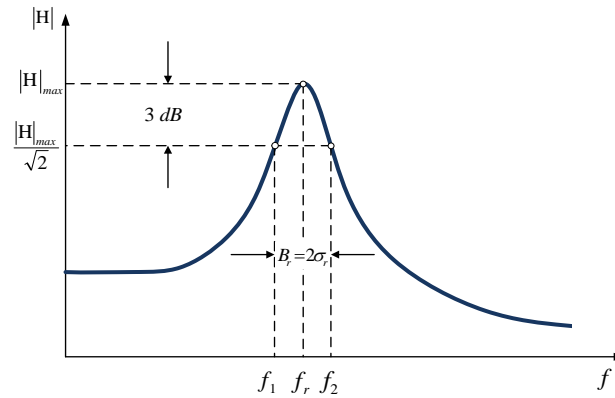
- koeficijenti prigušenja konstrukcije (ξ) mora biti manji od 0,05.
- frekventna rezolucija zapisa mora biti najmanje pet puta manja od širine pojasa pola snage
- promatrani mod se ne smije preklapati sa susjednim modom prema sljedećem uvjetu:

$$(f_r - f_{r-1}) > 4(\sigma_r - \sigma_{r-1})$$

Ako su zadovoljeni gore navedeni uvjeti koeficijent prigušenja za mod r se određuje prema izrazu koji možemo prikazati u obliku:

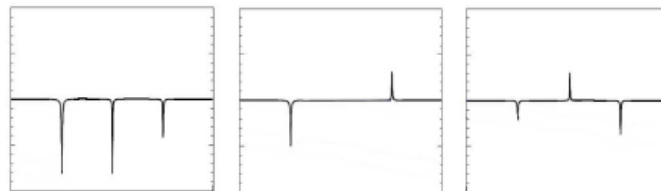
$$\xi_r = \frac{B_r}{2f_r} = \frac{f_2 - f_1}{f_1 + f_2}$$

Frekvencije f_1 i f_2 , lijevo i desno od rezonantnog vrha koje su određene s magnitudom koja odgovara maksimalnoj magnitudi promatranog rezonantnog vrha podijeljenoj sa $\sqrt{2}$ što odgovara razini od 3dB ako je magnituda prikazana u decibelnoj skali (Slika 28).

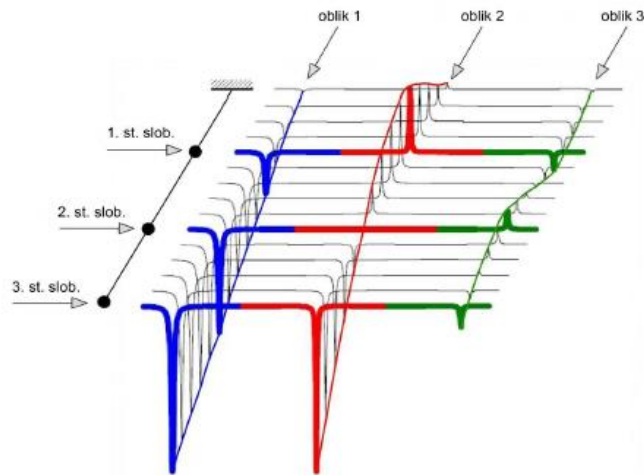


Slika 28 Određivanje koeficijenta prigušenja iz pojasa pola snage magnitudnog dijela spektra

Modalni oblici se mogu odrediti iz jednog retka ili stupca matrice frekventnog odgovora, odnosno iz imaginarnog dijela funkcija u tom retku ili stupcu. Prikazan je primjer određivanja modalnih oblika na konzoli (Slika 29). Radi jednostavnosti prikazan je redak s imaginarnim dijelom funkcija frekventnog odgovora matrice dobivenih samo za 3 stupnja slobode (Slika 30). Kod rezonantnih frekvencija imaginarni dio pojedinih funkcija frekventnog odgovora postiže svoj maksimum ili minimum, odnosno na tom mjestu ima vrh. Vrijednost maksimuma ili minimuma pri određenoj rezonantnoj frekvenciji se razlikuje za pojedine stupnjeve slobode. Provlačenjem glatke krivulje kroz vrijednosti maksimuma ili minimuma za pojedine stupnjeve slobode pri određenoj frekvenciji dobiva se modalni oblik pri toj frekvenciji.



Slika 29 Imaginarni dio funkcija frekventnog odgovora



Slika 30 Dobivanje modalnih oblika iz imaginarnog dijela funkcija frekventnog odgovora

3.3 Klasična modalna analiza

Klasična modalna analiza široko je primijenjena u slučaju linearnih sustava s klasičnim prigušenjem gdje postoje klasični prirodni periodi i oblici titranja. Kod takvih sustava jednadžbe gibanja se mogu transformirati iz izvornih koordinata u modalne koordinate što se svodi na niz neovisnih jednadžbi s jednim stupnjem slobode. Svaka jednadžba sadrži jedan oblik, period i prigušenje titranja. Pobuda može biti jednostavna (formula) ili složena (niz podataka) pa proračun pojedine jednadžbe vršimo analitički ili numerički, a ukupni odziv sustava predstavlja zbroj odziva za svaku jednadžbu. Klasična modalna analiza ne vrijedi u slučaju kada ne postoji rastav na niz neovisnih jednadžbi (npr. kod neelastičnih sustava, bez obzira na sustav prigušenja ili kod sustava s izrazito različitim prigušenjima pojedinih dijelova) [39].

3.4 Modalna transformacija

Polazimo od diferencijalne jednadžbe koja predstavlja sustav od n vezanih diferencijalnih jednadžbi s n nepoznanica. Modalnom transformacijom ove matrične jednadžbe dolazimo do n međusobno neovisnih diferencijalnih jednadžbi s po jednom nepoznaticom koje se mogu rješavati pojedinačno.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = \mathbf{F}$$

gdje su:

M, C i K	- matrice masa, prigušenja i krutosti
$\ddot{\mathbf{x}}, \dot{\mathbf{x}}$ i \mathbf{x}	- vektori ubrzanja, brzine i pomaka
F	- vektor vanjskog opterećenja

Vektor pomaka \mathbf{x} izražavamo kao linearnu kombinaciju amplituda vlastitih oblika titranja:

$$\mathbf{x} = \Phi \mathbf{q}$$

gdje je Φ predstavlja modalnu matricu, odnosno matricu vlastitih vektora:

$$\Phi = [\varphi_1, \varphi_2 \dots \varphi_n]$$

a \mathbf{q} vektor modalnih koordinata. Modalna matrica je neovisna o vremenu, stoga su prva i druga derivacija po vremenu jednadžbe:

$$\dot{\mathbf{x}} = \Phi \dot{\mathbf{q}}$$

$$\ddot{\mathbf{x}} = \Phi \ddot{\mathbf{q}}$$

Kada izvršimo zamjenu osnovnih koordinata u jednadžbi i s lijeve strane pomnožimo s transponiranom modalnom matricom Φ^T dolazimo do transformirane jednadžbe gibanja:

$$\mathbf{M}^* \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}^* \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}^* \mathbf{q} = \mathbf{F}^*$$

gdje je:

$$\mathbf{M}^* = \Phi^T \mathbf{M} \Phi$$

$$\mathbf{C}^* = \Phi^T \mathbf{C} \Phi$$

$$\mathbf{K}^* = \Phi^T \mathbf{K} \Phi$$

$$\mathbf{F}^* = \Phi^T \mathbf{F}$$

Iz ortogonalnosti vlastitih oblika slijedi da su matrice \mathbf{M}^* i \mathbf{K}^* dijagonalne matrice:

$$\Phi_i^T \mathbf{M} \Phi_j = 0 \quad \text{za } i \neq j$$

$$\Phi_i^T \mathbf{K} \Phi_j = 0 \quad \text{za } i \neq j$$

Dijagonalnost matrice \mathbf{C}^* ovisi o prirodi prigušenja, odnosno ona je dijagonalna samo ako se pretpostavi da je matrica prigušenja \mathbf{C} linearna kombinacija matrice masa \mathbf{M} i matrice krutosti \mathbf{K} .

$$\mathbf{C}^* = \Phi^T \mathbf{C} \Phi = \Phi^T (\alpha \mathbf{M} + \beta \mathbf{K}) \Phi = \alpha \mathbf{M}^* + \beta \mathbf{K}^*$$

Kada jednadžbu raspišemo dobivamo:

$$\begin{bmatrix} m_1^* & & & \\ & m_2^* & & \\ & & \ddots & \\ & & & m_n^* \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \\ \vdots \\ \ddot{q}_n \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1^* & & & \\ & c_2^* & & \\ & & \ddots & \\ & & & c_n^* \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \vdots \\ \dot{q}_n \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1^* & & & \\ & k_2^* & & \\ & & \ddots & \\ & & & k_n^* \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{\varphi_1\}^T \{F\} \\ \{\varphi_2\}^T \{F\} \\ \vdots \\ \{\varphi_n\}^T \{F\} \end{Bmatrix}$$

Modalna masa nije povezana s masom konstrukcije i nije je moguće izmjeriti. Ona može poprimiti bilo koju vrijednost osim nule pa skaliranjem matrice modalnih oblika modalna masa poprima jediničnu vrijednost prema izrazu:

$$\Phi^n = \Phi \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{m_1^*}} & & & \\ & \frac{1}{\sqrt{m_2^*}} & & \\ & & \ddots & \\ & & & \frac{1}{\sqrt{m_n^*}} \end{bmatrix}$$

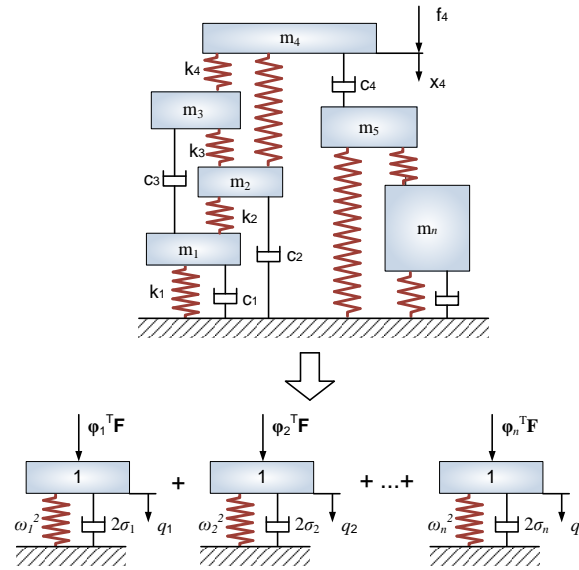
Korištenjem skalirane modalne oblike i primjenom analogije s jednostupanjskim sustavom imamo:

Modalna masa $\Phi^{nT} \mathbf{M} \Phi^n = \begin{bmatrix} 1 & & & \\ & 1 & & \\ & & \ddots & \\ & & & 1 \end{bmatrix}$

Modalno prigušenje $\Phi^{nT} \mathbf{C} \Phi^n = \begin{bmatrix} 2\xi_1 \omega_1 & & & \\ & 2\xi_2 \omega_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & 2\xi_n \omega_n \end{bmatrix}$

Modalna krutost $\Phi^{nT} \mathbf{K} \Phi^n = \begin{bmatrix} \omega_1^2 & & & \\ & \omega_2^2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \omega_n^2 \end{bmatrix}$

Transformacijom u modalni prostor smo dobili n nezavisnih diferencijalnih jednadžbi drugog reda. Svaka od tih jednadžbi predstavlja jednadžbu gibanja neovisnog jednostupanjskog sustava i predstavlja gibanje pri jednom od modalnih oblika (Slika 31).



Slika 31 Modalna transformacija

$$\ddot{q}_r + 2\sigma_r \dot{q}_r + \omega_r^2 q_r = \{\varphi_r\}^T \{F\} \quad r=1, \dots, n.$$

Svaka od jednadžbi definirana je jediničnom modalnom masom, stupnjem prigušenja koji odgovara pojasnjoj širini promatranog modalnog oblika i konstanti opruge koja je jednaka kvadratu vlastite frekvencije. Modalna sila opisuje utjecaj određene raspodjele opterećenja na pobudu pojedinog modalnog oblika. Jednaka je skalarnom produktu modalnog oblika i vektora sila, odnosno predstavlja projekciju sile na modalni oblik.

3.5 Operacionalna modalna analiza - OMA

Ova metoda omogućuje pouzdano i efikasno određivanje modalnih parametara. Razlikuje se od eksperimentalne modalne u tome što za OMA-u nije potrebno znati funkciju pobude. Modalne parametre možemo odrediti na osnovu rezultata izmjerenih odgovora konstrukcija [40].

Prednost ove analize je to što prilikom ispitivanja nije potrebno kontrolirano pobuđivati konstrukciju. Kao pobude se koriste ambijentalna i prirodna djelovanja koje su stohastičkog (slučajnog) karaktera. Time se uvelike olakšava provođenje eksperimenata posebice kod velikih građevinskih konstrukcija, gdje kontrolirano pobuđivanje skupo i komplicirano, a u nekim slučajevima i nemoguće [41]. Konstrukcije se podvrgavaju prirodnim vibracijama čiji uzroci

moгу biti vjetar, valovi, seizmička mikropodrtavanja, prometno i korisno opterećenje. Takve vibracije je teško realizirati na umjetni način. Također te pobude prilikom ispitivanja eksperimentalnom modalnom analizom u ulaznom signalu uzrokuju smetnje i preklapanjem s kontinuirano nanošenim pobudama kod određivanja modalnih parametara, uzrokuju šum.

Determinističke harmoničke pobude, kao što su pobude uzrokovane proizvodnim postrojenjima, generatorima, ventilacijskim sustavima i slično, mogu uzrokovati pogreške i krive interpretacije rezultata. Zato ih je potrebno uočiti te pri određivanju dinamičkih parametara njihov utjecaj otkloniti.

Provođenje eksperimenata je jednostavnije, brže i znatno povoljnije jer nema potrebe za opremom za kontrolirano nanošenje pobude. Zahtjeva se jedino oprema za prikupljanje i obradu podataka. Instrumenti koji se koriste za mjerenje funkcije odgovora konstrukcije su akcelerometri i sustav za prikupljanje podataka koji se sastoji od analizatora, AD pretvarača i osobnog računala [34].

Metode operacionalne modalne analize se dijele na metode razvijene u frekventnom i metode razvijene u vremenskom području. Metode razvijene u frekventnom području baziraju se na dekompoziciji funkcije odgovora u frekventnom području (eng. Frequency Domain Decomposition – FFD) . Stohastičke identifikacije potprostora (eng. Stochastic Subspace Identification – SSI) su temelj metoda razvijenih u vremenskom području [42].

4. MODEL VJETROAGREGATA U LABORATORIJU

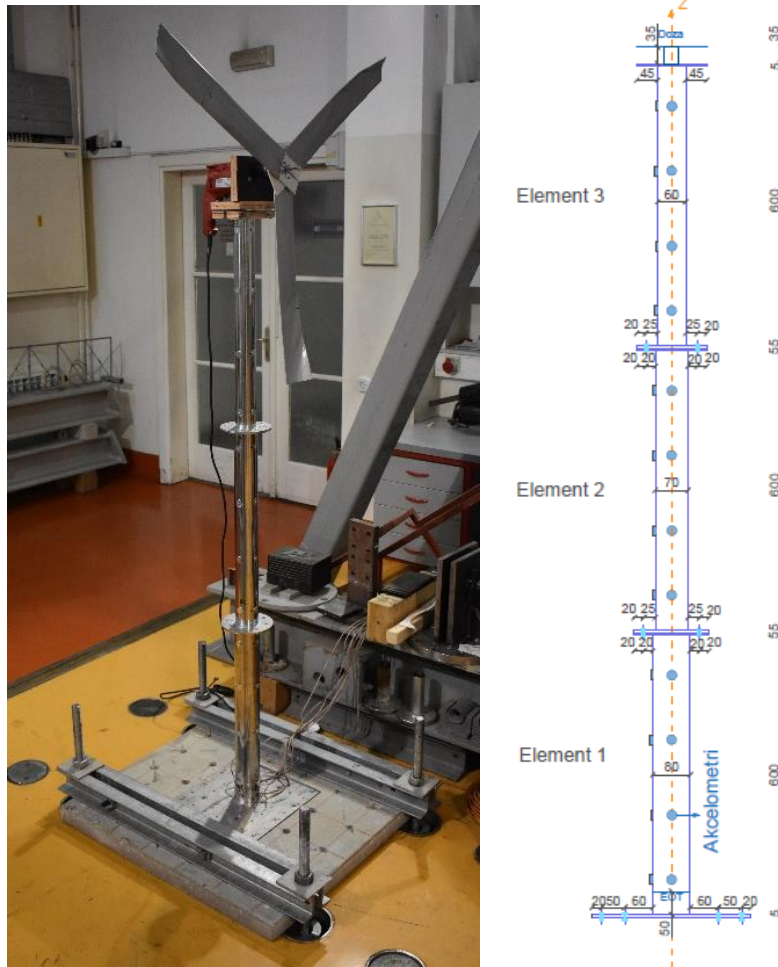
U ovom poglavlju primijenjen je sustav statičkog i dinamičkog monitoringa na stupu vjetroagregata u laboratoriju. Na laboratorijskom modelu provedena su statička i dinamička mjerenja za neoštećeno i oštećeno stanje konstrukcije, nakon čega su rezultati analizirani i međusobno uspoređeni. Dimenzije modela vjetroagregata približno su umanjene u mjerilu 1:50 u odnosu na stvarni vjetroagregat.

4.1 Opis modela vjetroagregata u laboratoriju

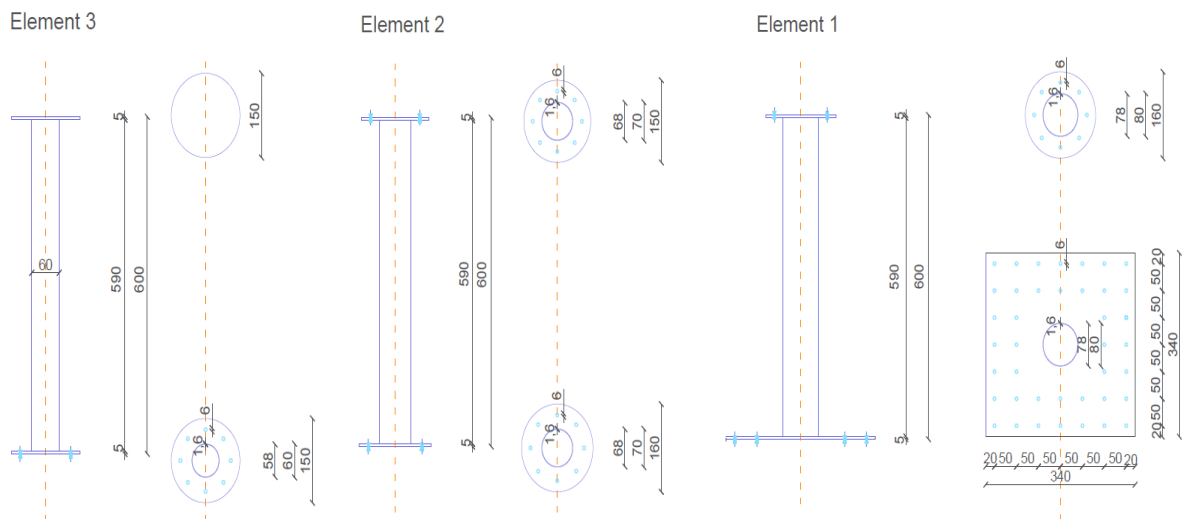
Prije početka ispitivanja bilo je potrebno adekvatno odrediti parametre modela konstrukcije vjetroagregata. Cilj je bio napraviti model koji će dinamičkim i statičkim ispitivanjem dati frekvencije odziva i modalne oblike što sličnije realnoj konstrukciji. Također bilo je potrebno i da oscilira u domeni realnih, ali lako mjerljivih pomaka. Ograničenje prilikom izrade modela bila je veličina i težina realnog vjetroagregata koja je onemogućila izradu realne replike modela u manjem mjerilu. Zbog velike krutosti sustava i velike mase na vrhu stupa, nismo bili u mogućnosti u potpunosti simulirati realne uvjete. Prije konačnog odabira modela konstrukcije napravljen je jednostavan numerički model u programu SAP2000. Nakon razrade različitih mogućnosti i obrade rezultata iz numeričkog modela odabrane su optimalne dimenzije i materijal modela koje zadovoljavaju potrebe ovoga rada. (Slika 32; Slika 33) Geometrijske karakteristike ispitivanog modela podešene su tako da što bolje odgovaraju stvarnom vjetroagregatu, čije mjerilo približno iznosi 1:50 (Tablica 4).

Tablica 4 Dimenzije ispitivanog modela

Dimenzija	Oznaka	Vrijednost
Visina	h_1	600 [mm]
	h_2	600 [mm]
	h_3	600 [mm]
Promjer	ϕ_1	80 [mm]
	ϕ_2	70 [mm]
	ϕ_3	60 [mm]
Debljina stijenke	d_s	1,6 [mm]
Debljina obrubnica	t	5 [mm]
Promjer vijka	ϕ_v	6 [mm]
Razmak akcelerometara	l	150 [mm]
Radijalni razmak EOT-a	φ	45°



Slika 32. Nacrt i fotografija ispitivanog modela



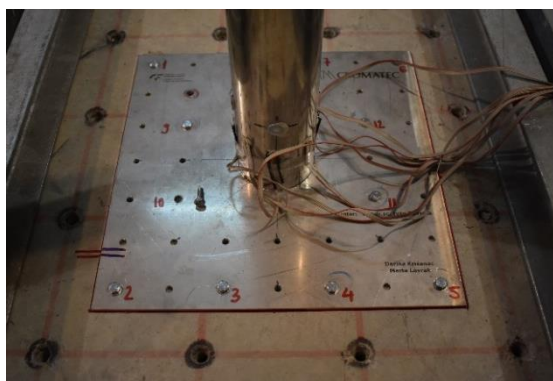
Slika 33. Detalji pojedinih elementa

4.1.1 Korišteni materijali

U svrhu podešavanja ciljane frekvencije modela te željom za dovoljnom duktilnošću i malom masom za izradu modela korišten je inoks kao materijal (Tablica 5). Za spajanje obrubnica između elemenata i spajanje modela konstrukcije na betonsku ploču (Slika 34) korišteni su čelični vijci M6, kvalitete 8.8. Vijci korišteni za spajanje obrubnica pričvršćeni su maticama. Betonska ploča, na koju je spojen model konstrukcije, nepomično je pričvršćena na pod pomoću čeličnih elemenata te navoja s maticama.

Tablica 5 Karakteristike materijala korištenog za izradu modela

Karakteristike	Oznaka	Vrijednost
Modul elastičnosti	E	190 000 MPa
Specifična gustoća	ρ	7,849 kN/m ³
Poissonov koeficijent	ν	0,3



Slika 34. Spoj modela i betonske ploče

4.1.2 Oprema za ispitivanje

Oprema je značajan faktor o kome ovisi osnovni pristup prikupljanju i obradi podataka. Senzori, analogno-digitalni pretvarači te ostala elektronička oprema moraju po svojoj frekventnoj rezoluciji biti prilagođeni opsegu frekventnih karakteristika konstrukcija. Potrebno je osigurati registraciju i prijenos podataka koja otklanja sve dodatne signale iz frekventnog područja koji u analizi mogu uzrokovati poteškoće ili netočnosti [23]. Radi raznolikosti provedenih ispitivanja na modelu konstrukcije, te moguće usporedbe i ocjene koristi mjerne opreme, korištena su dva različita mjerna sustava; elektrootporni tenzometri (EOT) i akcelerometri. U nastavku je opisana oprema korištena u eksperimentalnom dijelu ispitivanja.

4.1.2.1 Elektrootporni tenzometri - EOT

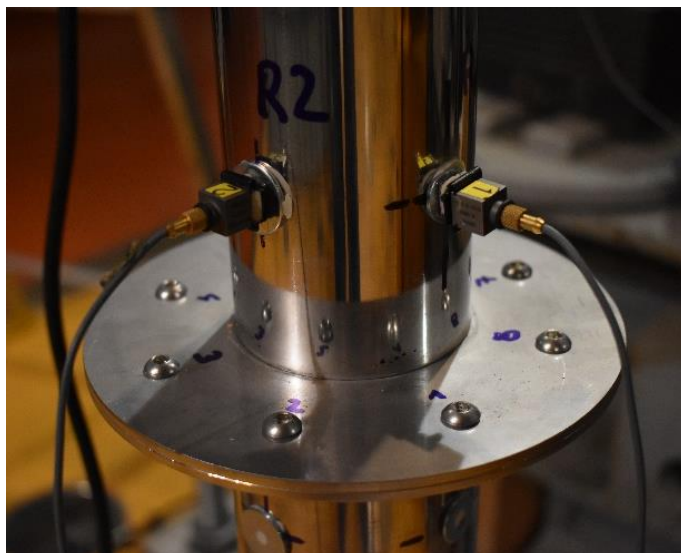
Njihov rad bazira se na promjeni električnog otpora struje koja kroz njih teče uslijed promjene duljine i poprečnog presjeka pri deformiranju. Sastoje se od tankih žica koje su savijene po nekoliko puta i nosećeg elementa na kojeg je žica zalijepljena. Na podnožje modela postavljeno je 8 elektrootpornih tenzometara (HBM 6/120 LY41) Slika 35).



Slika 35. Elektrootporni tenzometri postavljeni na podnožju modela

4.1.2.2 Piezoelektrični akcelerometri (Brüel & Kjær)

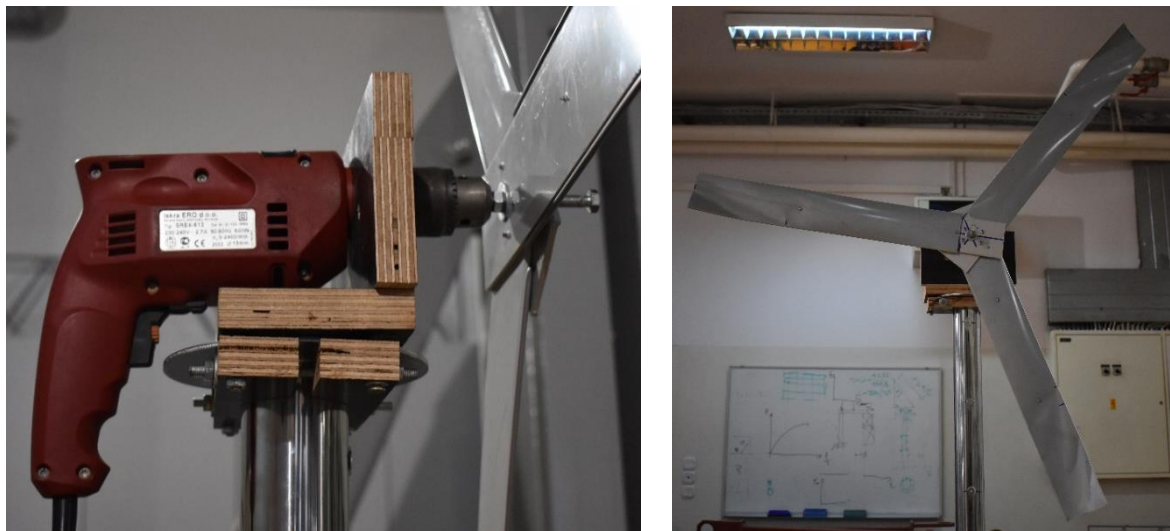
Osjetljivost akcelerometara je 10 mV/ms^{-2} s amplitudnim područjem frekvencija od 0,3 Hz do 8 kHz (Slika 36).



Slika 36. Referentni akcelerometri te detalj spoja dvaju elemenata

4.1.2.3 Simulacija opterećenja vjetrom

Kako bi što vjernije simulirani realno opterećenje stupa, u tu svrhu na modelu u laboratoriju na vrhu stupa postavljena je bušilica s aluminijskim lopaticama (Slika 37).



Slika 37. a) Prikaz načina pričvršćenja bušilice na model i b) Aluminijske lopatice

4.1.3 Analogno digitalni pretvarač (eng. A-D converter)

AD pretvarači pretvaraju analogni ulazni signal u digitalni signal pogodan za daljnju računalnu obradu. U ovom radu korištena su dva tipa pretvarača, prvi za prikupljanje vibracija s akcelerometara, a drugi za prikupljanje relativnih deformacija s EOT (Slika 38).

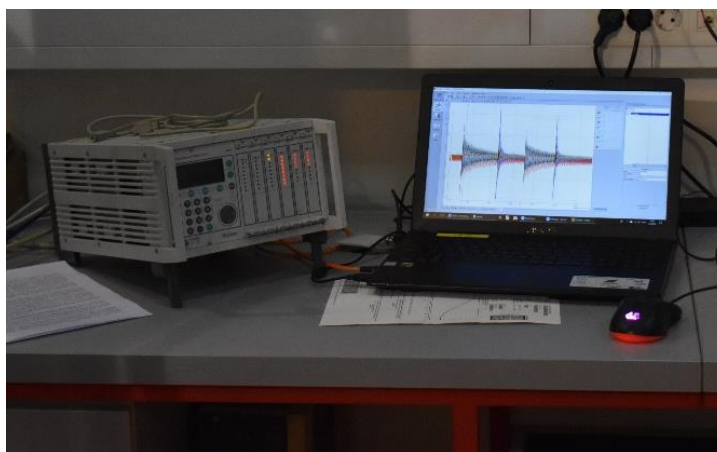


Slika 38. a) Pulse A-D pretvarač vibracija

b) MGC plus

4.1.4 *Osobno računalo s potrebnim softwareom za analizu*

Direktno je spojeno s analogno-digitalnim pretvaračem iz kojeg prima digitalne signale mjerenih veličina (Slika 39). Veličine mjerene akcelerometrom se obrađuju u licenciranom softwareu „Pulse – LabShop“. Veličine mjerene elektrootpornim tenzometrima obrađuju se u licenciranom softwareu „DIAdem“.



Slika 39. MGC A-D konverter spojen na osobno računalo

4.1.5 *Čekić za nanošenje pobude*

Gumeni čekić korišten je za potrebe nanošenja impulsnog udara čija je spektralna karakteristika bliska bijelomu šumu u području frekvencija koje su nam zanimljive kod ispitivanog modela.

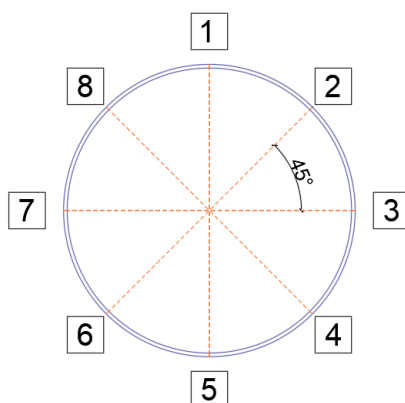
4.1.6 *Metalni podlošci korišteni kao čvorovi mreže*

Metalni podlošci su za površinu modela pričvršćeni pomoću dvokomponentnog ljepila. Postavljeni su u točkama čvorova duž dviju izvodnica modela. Služe za pravilno nanošenje akcelerometra te osiguranje prijanjanja preko djelovanja magneta akcelerometra na metal.

4.2 Statički monitoring na modelu u laboratoriju

Utjecaj vjetra na stup vjetroagregata, ovisno o smjeru i jačini, može biti značajan. Vjetar djeluje okomito na konstrukciju i uzrokuje njeno progibanje. Pri jakim udarima vjetra može doći do oštećenja konstrukcije vjetroagregata. Na konstrukciju su postavljeni mjerni instrumenti koji mjere brzinu vjetra te u slučaju jakih naleta vjetra šalju upozorenje sustavu kako bi se lopatice pravovremeno zaustavile i smanjile opterećenje na stup, sve kako ne bi došlo do oštećenja same konstrukcije i pogonskog mehanizma. Mjerenjem deformacija na stupu i u temeljima konstrukcije vjetroagregata moguće je odrediti oštećenja na konstrukciji.

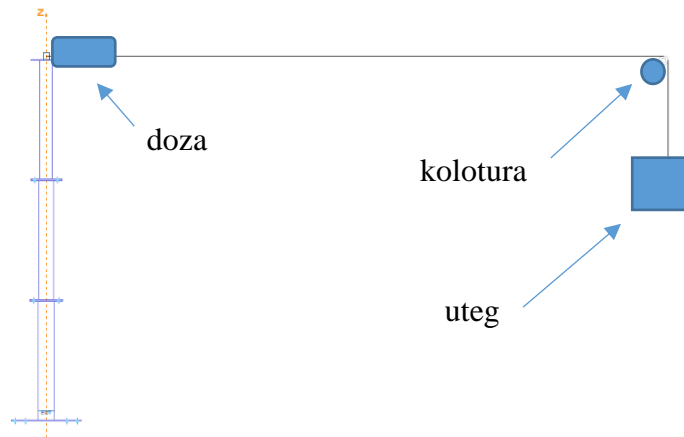
Statički sustav monitoringa na modelu vjetroagregata zamišljen je u svrhu određivanja relativnih deformacija pri dnu stupa. Osam EOT postavljene su radijalno u bazi stupa s jednakim kutom koji međusobno zatvaraju od 45° (Slika 40). Svrha statičkog monitoringa je određivanje veličine sile koje se prenosi na stup uslijed djelovanja opterećenja vjetrom.



Slika 40. Radijalni raspored elektrootpornih traka pri dnu stupa

4.2.1 Analiza relativnih deformacija pri statičkom monitoringu

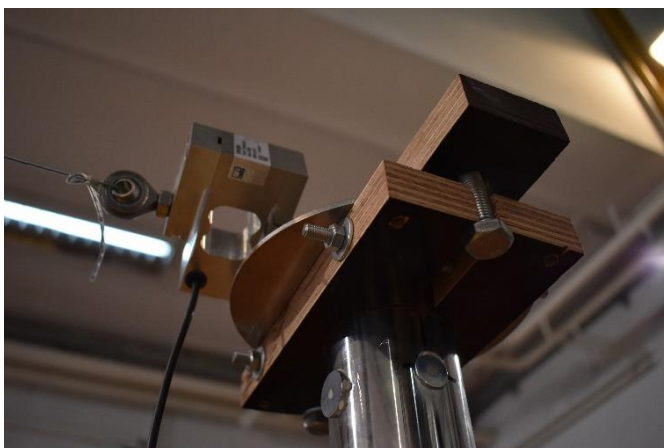
Djelovanje vjetra na model konstrukcije u eksperimentu aproksimirali smo poprečnim statičkim opterećenjem na stup. Na vrhu stupa pričvršćena je doza, osjetilo kojom se mjeri sila. Uteg mase 10 kilograma preko užeta i koloture ovješeno je tako da prenosi opterećenje na vrh stupa (Slika 41; Slika 42; Slika 43). Pretpostavlja se da je užo nerastezljivo, a utjecaj trenja je otklonjen uporabom kugličnog ležaja. Mjerene su relativne deformacije preko osam elektrootpornih mjernih traka (EOT). Elektrootporne trake postavljene su na visini 5 cm, mjereno od ruba temeljne ploče.



Slika 41. Shema statičkog opterećenja



Slika 42. a) statičko opterećenje i b) uteg obješen preko koloture

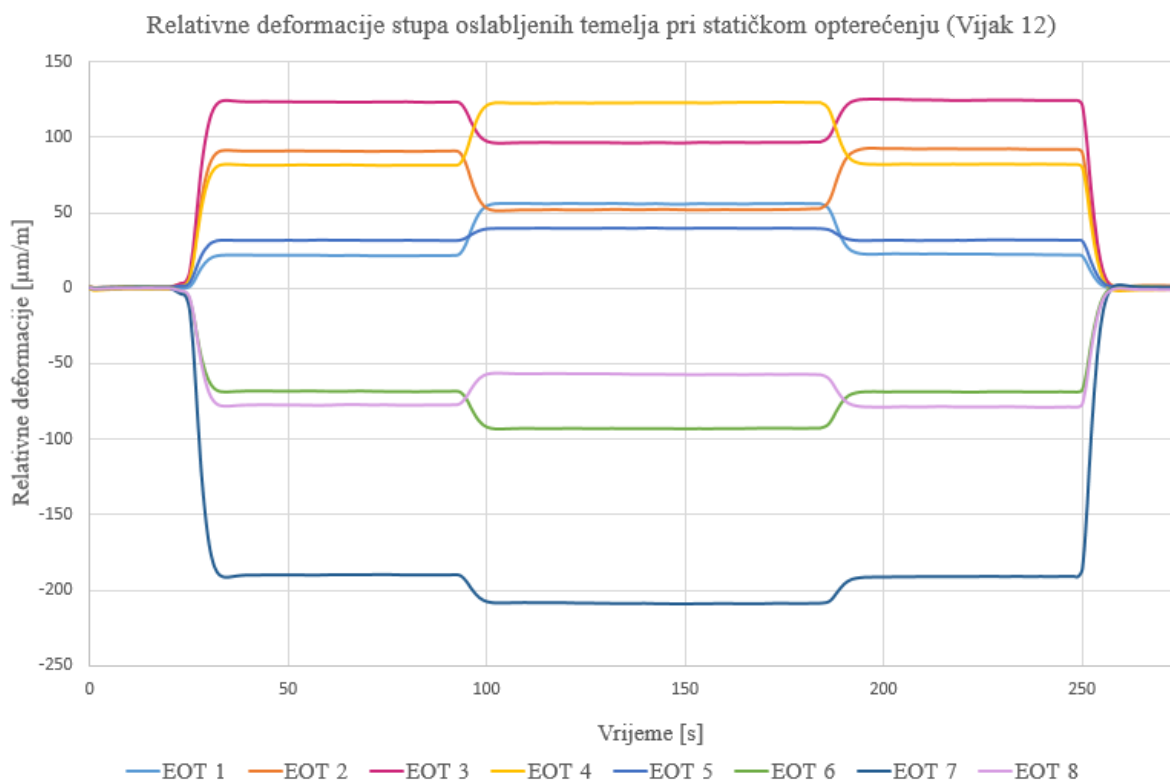


Slika 43. Detalj a) doza na vrhu stupa i b) kuglični ležaj (kolotura)

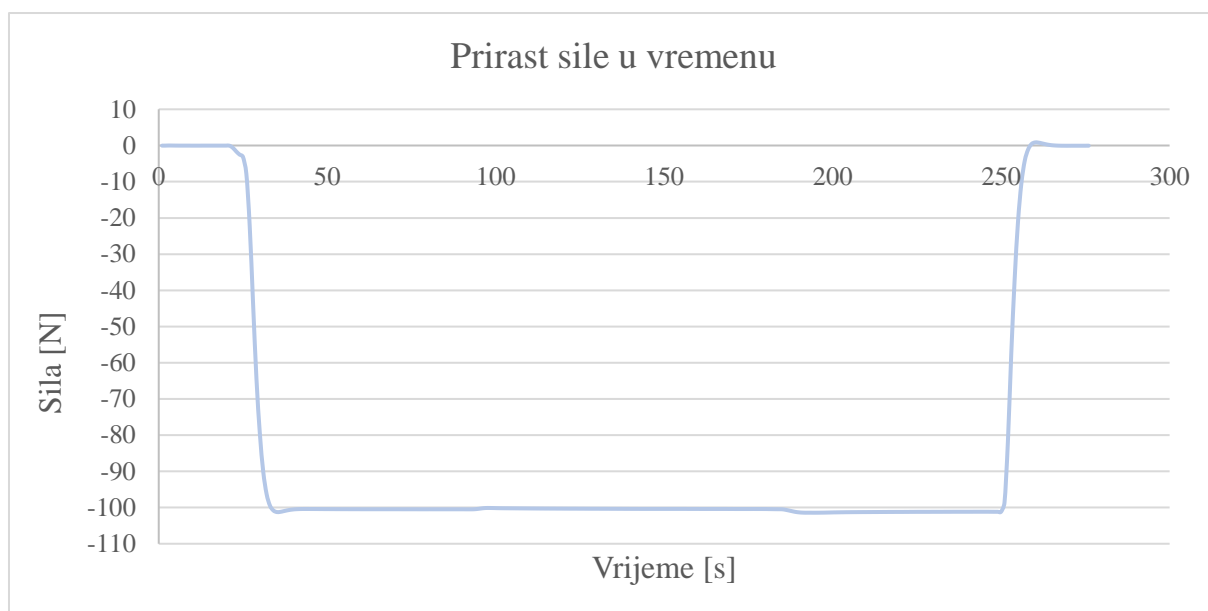
Statičko ispitivanje provedeno je u tri faze:

- opterećenje utegom neoštećenog modela
- oštećenje otpuštanjem vijaka
- pričvršćenje vijaka

Svaka faza je trajala oko 60 sekundi. Kako bi odredili utjecaj oštećenja na ukupnu konstrukciju, ispitivao se oštećen i neoštećen model. Oštećenje je simulirano odvijanjem vijaka. Elektrootporne mjerne trake, zbog udaljenosti, nisu zabilježile značajnu promjenu deformacija pri odvijanju vijaka na prvoj i drugoj etaži. Stoga se promatrao utjecaj odvijanja vijaka u temeljnoj ploči u odnosu na neoštećen model. Otpuštena su pojedinačno četiri vijaka. Vijak 9 i vijak 10 nalaze se u tlaku, a vijak 11 i vijak 12 u vlaku. Veće oscilacije u rezultatima su zabilježene pri ispitivanju vijaka u vlaku. Na slici (Slika 44) dan je karakteristični zapis pri statičkom opterećenju stupa silom od 100 [N] (Slika 45). Na danom zapisu nakon 100 sekundi otpušten je vijak 12 te je nešto prije 200 sekundi ponovno isti zategnut. U prilogu 1 dan je tablično i grafički detaljan zapis svih simulacija oštećenja.



Slika 44. Karakteristični zapis statičkog opterećenja (vijak 12)



Slika 45 Prirast sile u vremenu pri statičkom opterećenju modela

Na temelju prikazanog zapisa (Slika 44) može se uočiti da dolazi do preraspodjele relativnih deformacija na pojedinim mjernim mjestima. Iz čega zaključujemo kada bi na stvarnom modelu došlo do popuštanja veze između čeličnog stupa i AB temelja za isto opterećenje i smjer vjetra moguće je iz statičkog monitoringa ocijeniti oštećenje.

4.2.2 Analitičko određivanje sile i progiba

Analizom rezultata dolazimo do zaključka da neutralna os ne prolazi kroz sredinu poprečnog presjeka, jer su deformacije mjerene na trakama 1 i 5 različite od nule. Do pomicanja neutralne osi dolazi zbog unosa ekscentrične sile, stoga pri računanju naprezanja treba uzeti u obzir utjecaj momenta savijanja i uzdužne sile. Na osnovu izmjerenih deformacija, uz poznavanje modula elastičnosti ($E = 190\,000\text{ MPa}$), izračunato je naprezanje (Slika 46; Slika 47). Kao mjerodavna deformacija uzeta je srednja vrijednost izmjerena trakama 3 i 7.

Cilj sljedeće analize je obratnim postupkom, na osnovu poznatih relativnih deformacija pri opterećenju stupa poznatom silom, odrediti veličinu sile koja djeluje na vrhu stupa i u konačnici progib vrha stupa.

Analiza neoštećenog stanja modela

Naprezanje:

$$\sigma = \varepsilon \cdot E$$

$$\sigma = 157,15 \cdot 10^{-6} \cdot 190\,000$$

$$\sigma = 29,86 \text{ MPa}$$

Jednadžba ekscentrično opterećenih štapova:

$$\sigma = \frac{M}{I} \cdot x + \frac{N}{A}$$

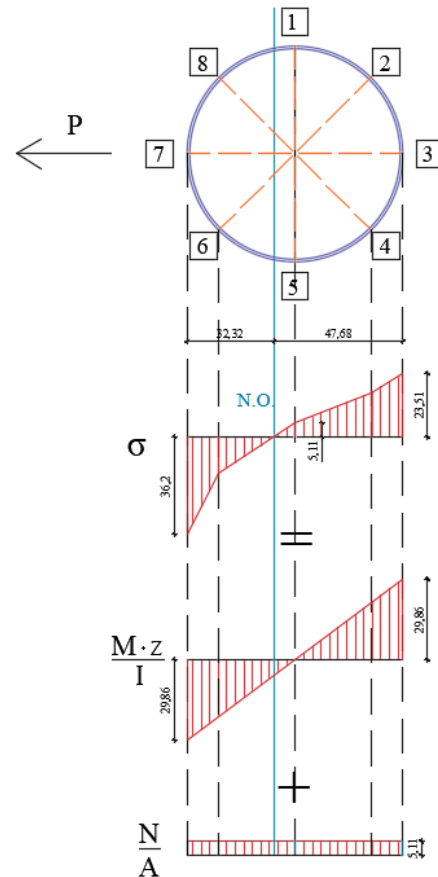
Omjer uzdužne sile N i površine poprečnog presjeka očitavan je iz dijagrama na slici 5.7

$$\frac{N}{A} = 5,11 \text{ MPa}$$

Uvrštavanjem u jednadžbu dobiven je moment savijanja:

$$29,86 = \frac{M}{193646,99} \cdot 40 + 5,11$$

$$\mathbf{M = 169,28 \text{ Nm}}$$



Slika 46. Dijagrami naprezanja za neoštećeni model

Poznavajući moment i visinu unosa sile (udaljenost elektrootporne trake i doze) $\rightarrow z=1,785 \text{ m}$ možemo analitički odrediti poprečnu silu od utega:

$$\mathbf{P = \frac{M}{z} = \frac{169,28}{1,785} = 94,84 \text{ N}}$$

Progib određujemo iz diferencijalnih odnosa:

$$\frac{d^2w}{dz^2} = -\frac{M}{EI}$$

Dvostrukom integracijom dobivamo:

$$\frac{d^2w}{dz^2} = -\frac{P \cdot z}{EI} \Big/ \iint dz$$

$$w = -\frac{P \cdot z^3}{6 \cdot EI} + C \cdot z + D$$

Iz rubnih uvjeta odredimo konstante C i D:

$$\text{Progib na dnu stupa : } w(z = 0) = 0 \rightarrow D = 0$$

$$\text{Kut zaokreta na dnu stupa : } \frac{dw}{dz}(z = 0) = 0$$

Iz čega slijedi:

$$0 = -\frac{94,84 \cdot 1785^2}{2 \cdot 193646,99 \cdot 190\,000} + C \rightarrow C = 4,11 \cdot 10^{-3}$$

$$w = -\frac{P \cdot z^3}{6 \cdot EI} + C \cdot z = -\frac{94,84 \cdot 1785^3}{6 \cdot 193646,99 \cdot 190\,000} + 4,11 \cdot 10^{-3} \cdot 1785$$

Poprečni progib na vrhu stupa od poprečne sile :

$$\mathbf{w = 4,89 \text{ mm}}$$

Analiza oštećenog stanja modela

Naprezanje:

$$\sigma = \varepsilon \cdot E$$

$$\sigma = 152,88 \cdot 10^{-6} \cdot 190\,000 =$$

$$\sigma = 29,05 \text{ MPa}$$

Jednadžba ekscentrično opterećenih štapova:

$$\sigma = \frac{M}{I} \cdot x + \frac{N}{A}$$

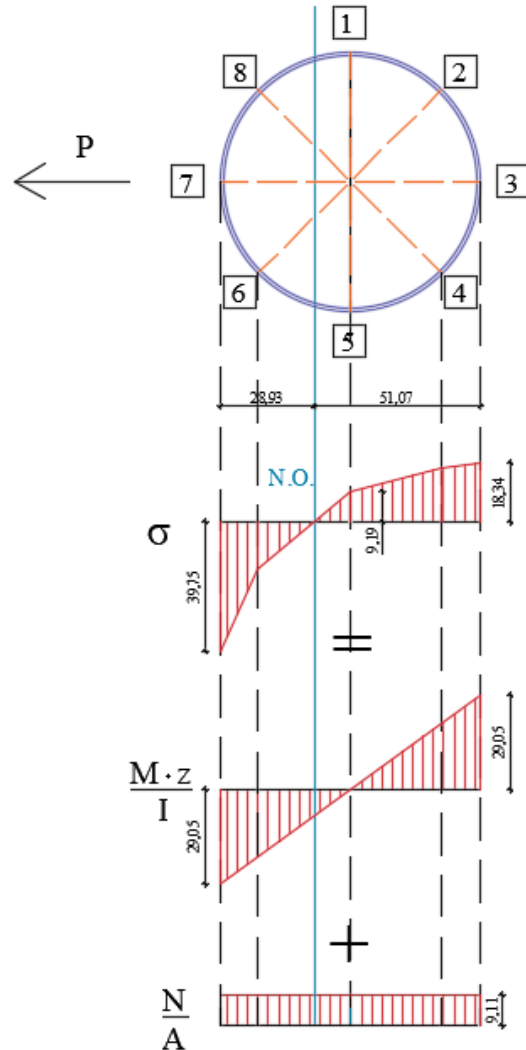
Omjer uzdužne sile N i površine poprečnog presjeka očitavan je iz dijagrama na slici 5.8.:

$$\frac{N}{A} = 9,19 \text{ MPa}$$

Uvrštavanjem u jednadžbu dobiven je moment savijanja:

$$29,05 = \frac{M}{193646,99} \cdot 40 + 9,11$$

$$\mathbf{M = 185,10 \text{ Nm}}$$



Slika 47. Dijagrami naprezanja za oštećeni model

Poznavajući moment i visinu unosa sile (udaljenost elektrootporne trake i doze) $\rightarrow z=1,785 \text{ m}$ možemo analitički odrediti poprečnu silu od utega:

$$\mathbf{P = \frac{M}{z} = \frac{185,18}{1,785} = 103,70 \text{ N}}$$

Progib određujemo iz diferencijalnih odnosa:

$$\frac{d^2w}{dz^2} = -\frac{M}{EI}$$

Dvostrukom integracijom dobivamo:

$$\frac{d^2w}{dz^2} = -\frac{P \cdot z}{EI} \Big/ \iint dz$$

$$w = -\frac{P \cdot z^3}{6 \cdot EI} + C \cdot z + D$$

Iz rubnih uvjeta odredimo konstante C i D:

$$\text{Progib na dnu stupa : } w(z = 0) = 0 \rightarrow D = 0$$

$$\text{Kut zaokreta na dnu stupa : } \frac{dw}{dz}(z = 0) = 0$$

Iz čega slijedi:

$$0 = -\frac{103,70 \cdot 1785^2}{2 \cdot 193646,99 \cdot 190\,000} + C \rightarrow C = 4,49 \cdot 10^{-3}$$

$$w = -\frac{P \cdot z^3}{6 \cdot EI} + C \cdot z = -\frac{103,70 \cdot 1785^3}{6 \cdot 193646,99 \cdot 190\,000} + 4,49 \cdot 10^{-3} \cdot 1785$$

Poprečni progib na vrhu stupa od poprečne sile :

$$w = 5,34 \text{ mm}$$

4.2.3 Diskusija i analiza rezultata statičkog monitoringa na modelu u laboratoriju

Ako pretpostavimo linearno-elastično ponašanje materijala za vrijeme statičkog opterećenja, rezultati ukazuju da je moguće analizom zapisa relativnih deformacija pri dnu stupa odrediti silu opterećenja na njenom vrhu (100 N). Navedena analiza daje nam zapravo da na stvarnom modelu vjetroagregata možemo vrlo dobro procijeniti veličinu opterećenja vjetra. Na laboratorijskom modelu pokazalo se odstupanje u procjeni sile približno 5%.

Nadalje, provedena je analiza progiba stupa za neoštećeno i oštećeno stanje. Otpuštanjem jednog vijka na temelju poprečni pomak na vrhu stupa se povećao za 0,45 mm, odnosno 8,43 %. Možemo zaključiti da oštećenja na temelju stupa uzrokuju povećanje poprečnog pomaka na vrhu konstrukcije, što je i očekivano.

Dolazimo do zaključka da su elektrootporne trake mjerodavne za mjerenje deformacija uzrokovanih djelovanjem vjetra, odnosno ekvivalentnim statičkim djelovanjem. Također su cjenovno povoljnije od ostalih metoda mjerenja u vidu kontinuirano monitoringa. Postavivši ih na podnožje stupa moguće je detektirati nastanak oštećenja na temeljima. Ako želimo utvrditi oštećenja uzduž stupa potrebno je postaviti elektrootporne trake na svaku etažu. Izvedba i kontrola takvog sustava bila bi znatno zahtjevnija.

4.3 Dinamički monitoring

4.3.1 Eksperimentalno dinamičko ispitivanje modela

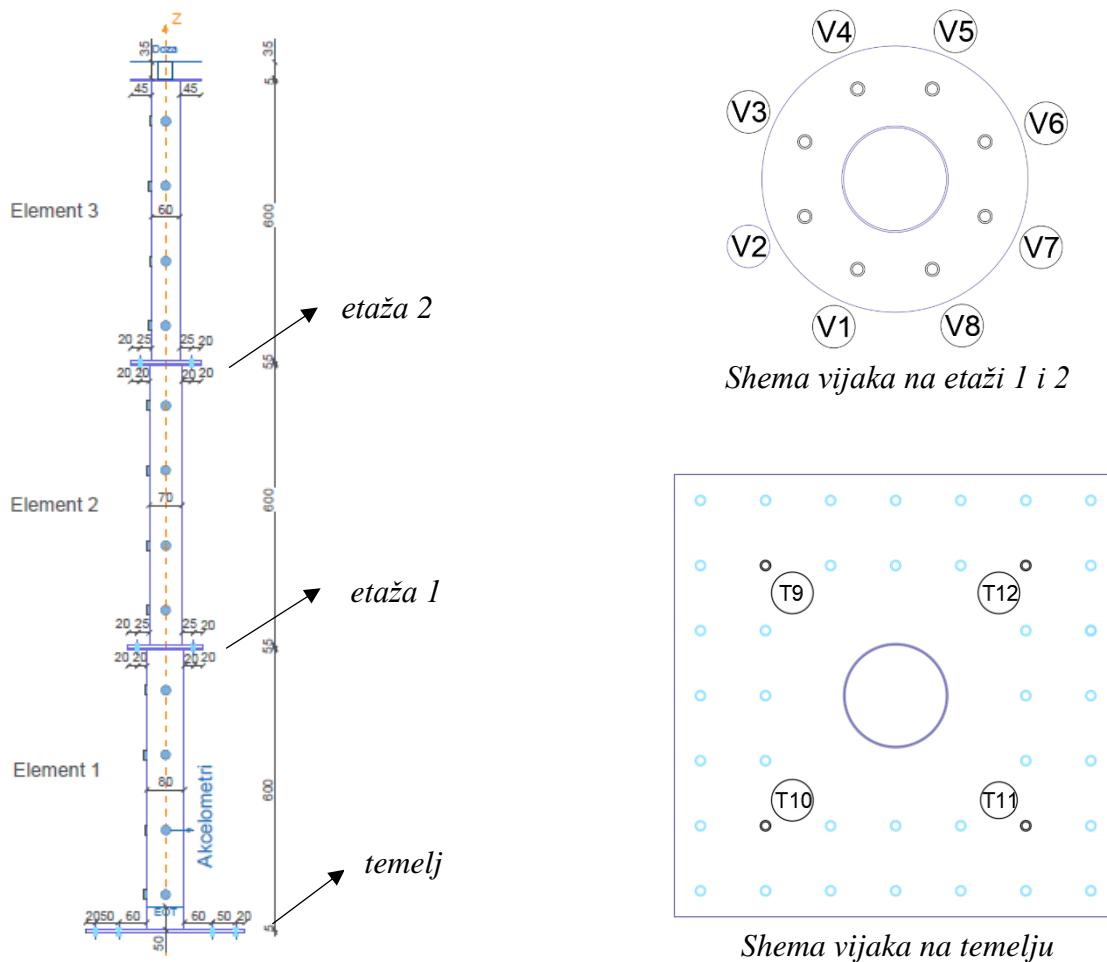
Za određivanje vlastitih frekvencija i modalnih oblika koristila su se dva mjerna sustava:

- akcelerometri
- elektrootporne trake (EOT)

Impulsna pobuda implicirana je gumenim čekićem. Kako bi utvrdili utjecaj oštećenja na promjenu vlastitih frekvencija i modalnih oblika mjerenje je vršeno na neoštećenom i oštećenom modelu.

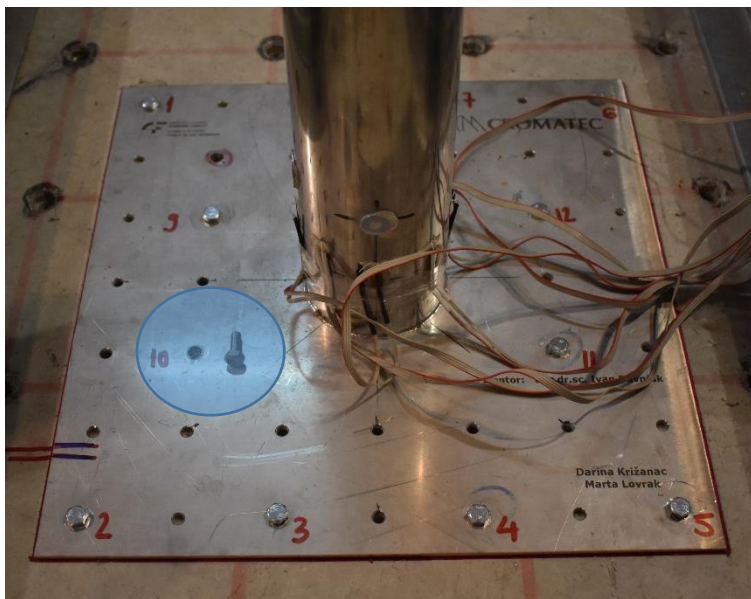
4.3.2 Simulacija oštećenja na modelu u laboratoriju

Oštećenje je simulirano otpuštanjem vijaka. Vijci su otpušteni pojedinačno i u kombinaciji dva susjedna vijka. Otpuštanje vijaka prevedeno je na svim etažama te na temelju (Slika 48).



Slika 48. Detalj vijaka na etažama i temelju

U slučaju simuliranja oštećenja pojedinačnim otpuštanjem vijaka na prvoj etaži odstranjeni su vijci V1, V3, V5 i V7, a na drugoj etaži V2, V4, V6 i V8. Kombiniranim otpuštanjem dva vijka, na prvoj etaži odstranjeni su vijci V4 i V5 te vijci V1 i V8, a na drugoj etaži V2 i V3, zatim V6 i V7. Osim vijaka na stupu otpuštanu su i pojedinačno četiri vijka na temeljnoj ploči (T9, T10, T11, T12) (Slika 49). Nakon ispitivanja, obradom podataka mjerenja akcelerometrima i elektrootpornim trakama obavljena je usporedba rezultata.

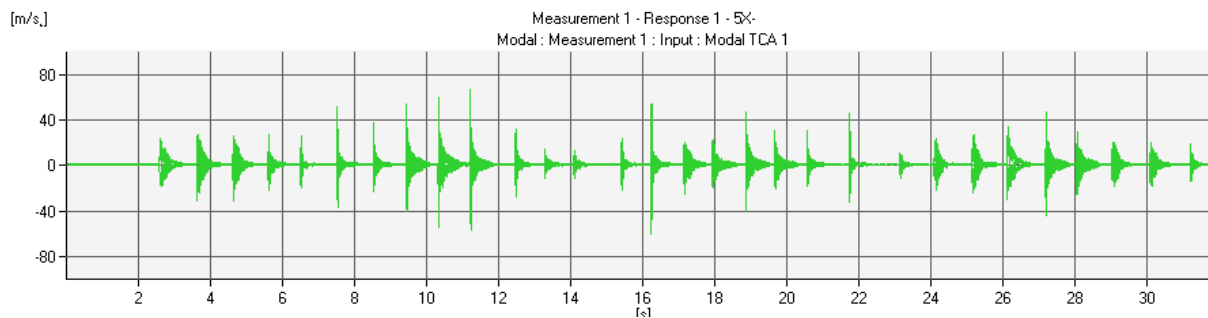


Slika 49 Simulacija oštećenja na temelju (T10)

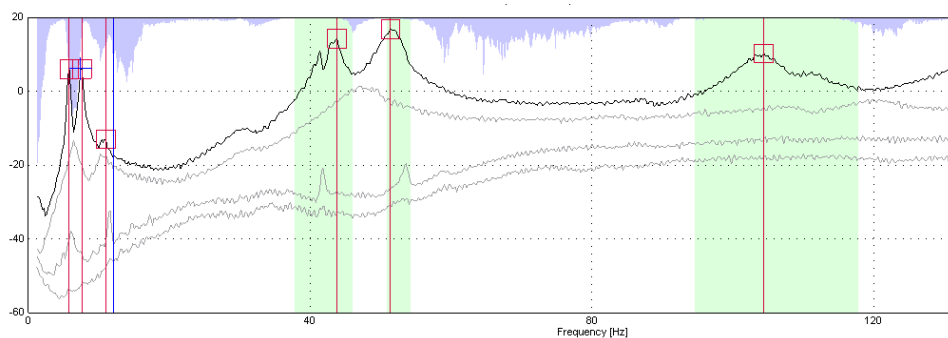
4.3.3 Određivanje dinamičkih parametara mjerenjem vibracija - akcelerometri

Za potrebe ispitivanja na model su pričvršćene 24 metalne podloške, po 12 podloški na dvije izvodnice stupa. Mjerne podloške predstavljaju mjerne točke, na koje se postavljaju akcelerometri. Mjerenje se vrši u dva smjera (x i y). Dva su akcelerometra referentna i nalaze se na podnožju drugog elementa, a ostali se premještaju po visini stupa. Nakon postavljanja akcelerometara provodi se serija ispitivanja od 11 mjerenja. Svako mjerenje traje 32 sekunde i u tom periodu se gumenim čekićem nanosi impulsna pobuda duž cijelog modela. Preko analogno-digitalnog pretvarača analogni signal iz akcelerometara se pretvara u digitalni i analizira na računaru. Po završetku mjerenja operacionalna modalna analiza (OMA), ranije opisana u radu, provodi se u licenciranom softveru „Pulse – LabShop“. Tako dobiveni su modalni parametri konstrukcije, odnosno modalni oblici i vlastite frekvencije modela.

U nastavku su prikazani vremenski zapis pobude stupa vjetroagregata (Slika 50) i odgovarajući spektralni zapis. (Slika 51). U sljedećoj tablici prikazani su rezultati izmjerenih vlastitih frekvencija stupa na modelu vjetroagregata u laboratoriju za neoštećeno stanje (Tablica 6).



Slika 50. Karakteristični vremenski zapis pobude

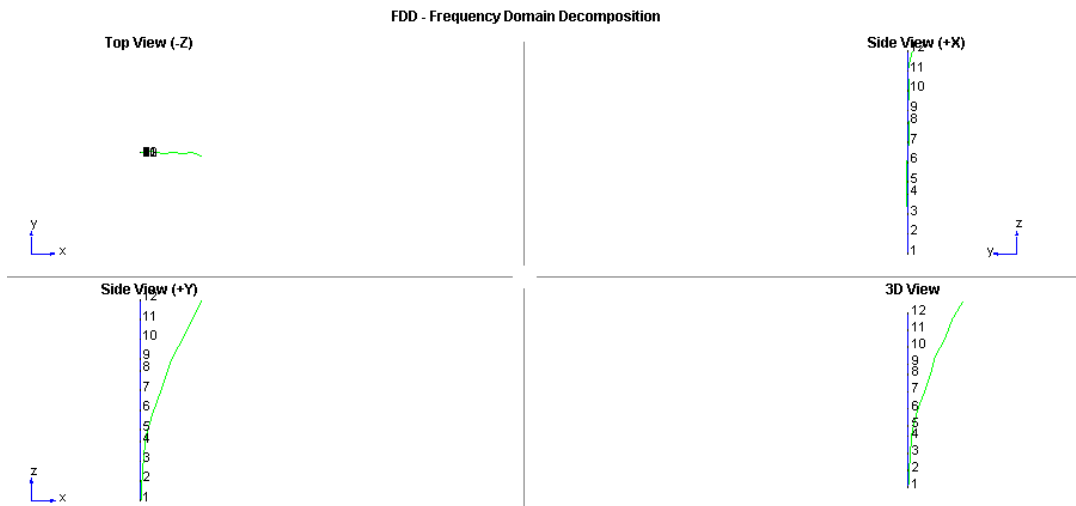


Slika 51. Karakteristični spektralni zapis odgovora konstrukcije

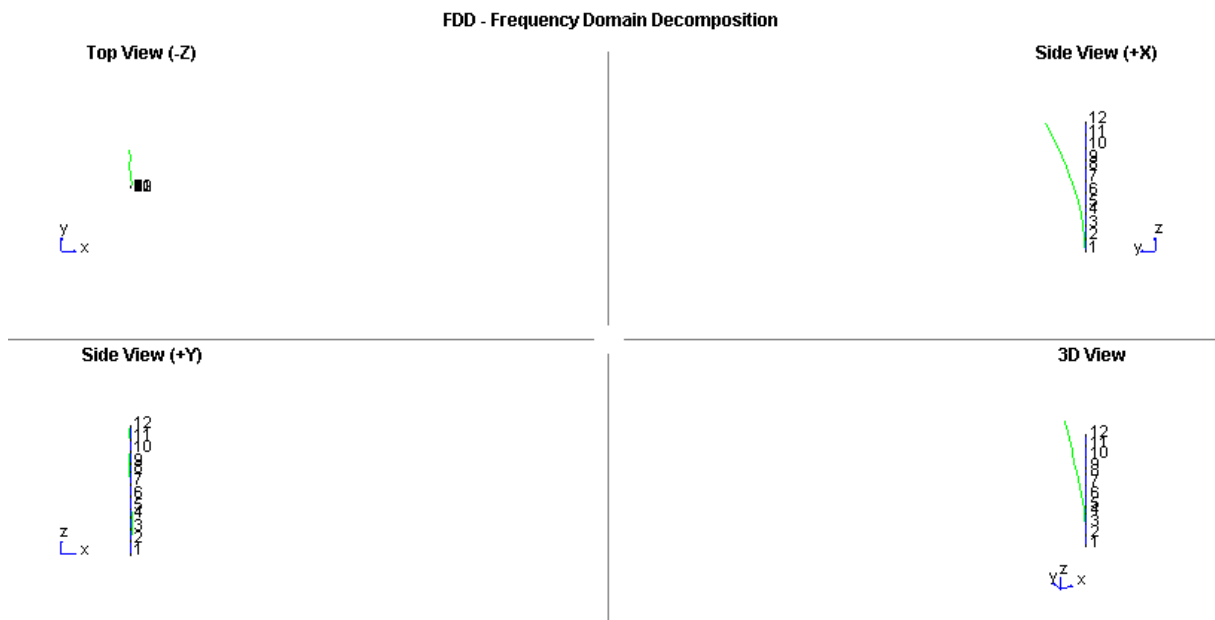
Tablica 6 Rezultati izmjerenih vlastitih frekvencija za neoštećeno stanje

Modalni oblik	Vlastita frekvencija [Hz]
1.	5,80
2.	7,60
3.	43,80
4.	51,40
5.	104,40

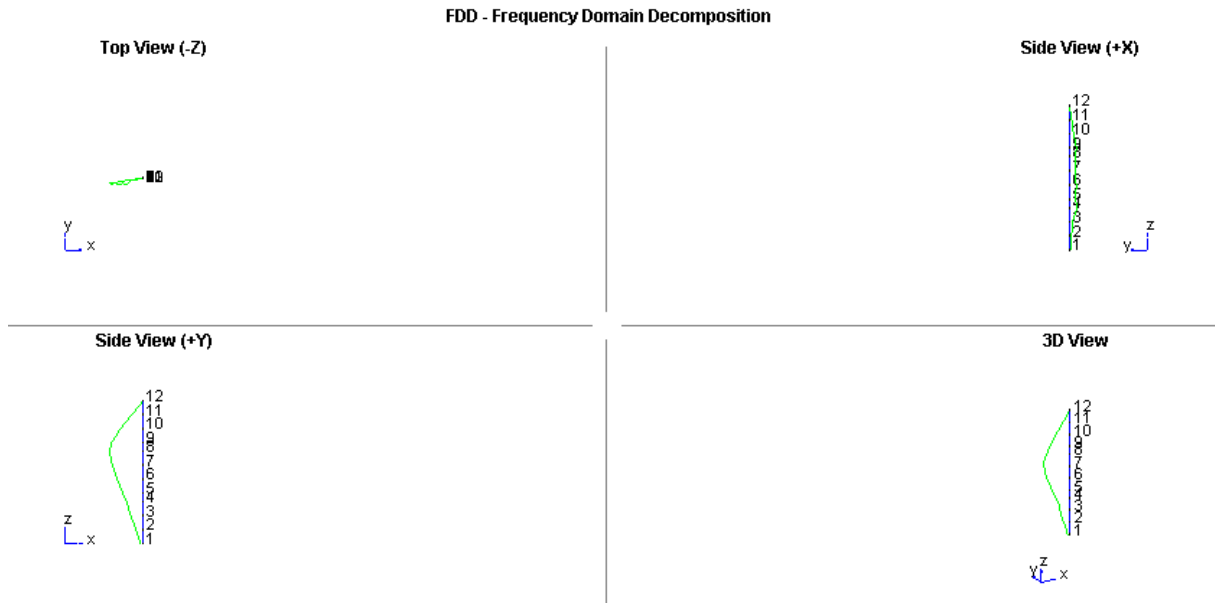
Na sljedećim slikama izdvojeni su eksperimentalno izmjereni modalni oblici na modelu vjetroagregata u laboratoriju za neoštećeno stanje, te su prikazani u tri 2D pogleda i 3D pogledu (Slika 52 - Slika 56).



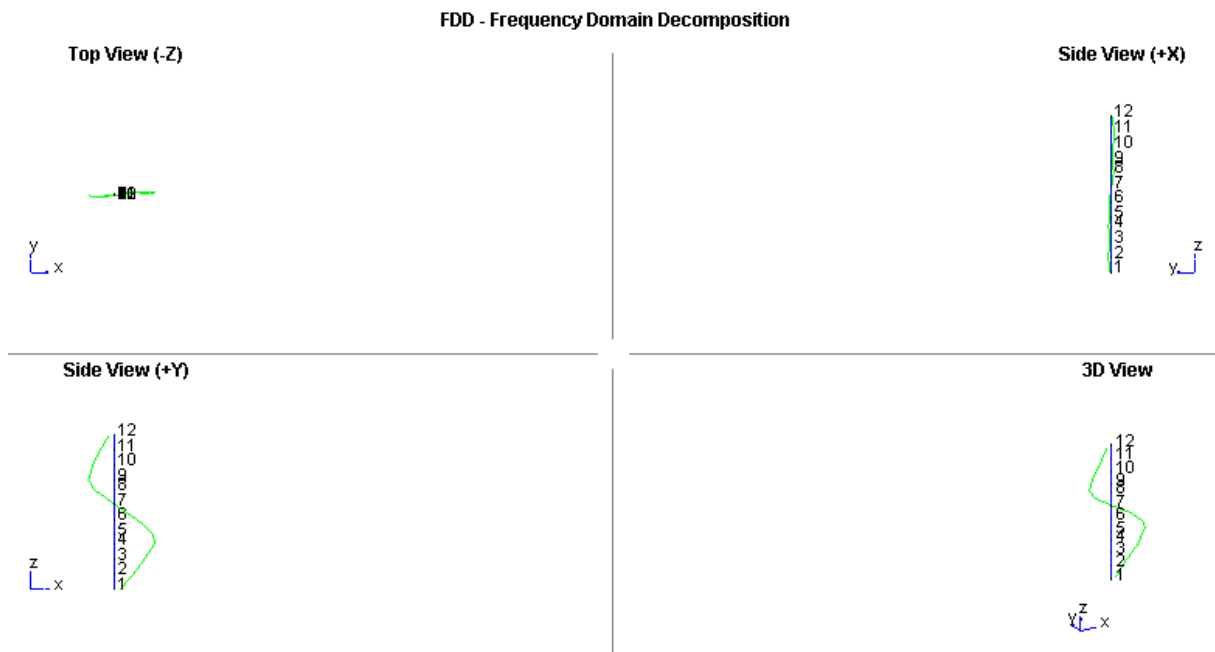
Slika 52. Prvi modalni oblik



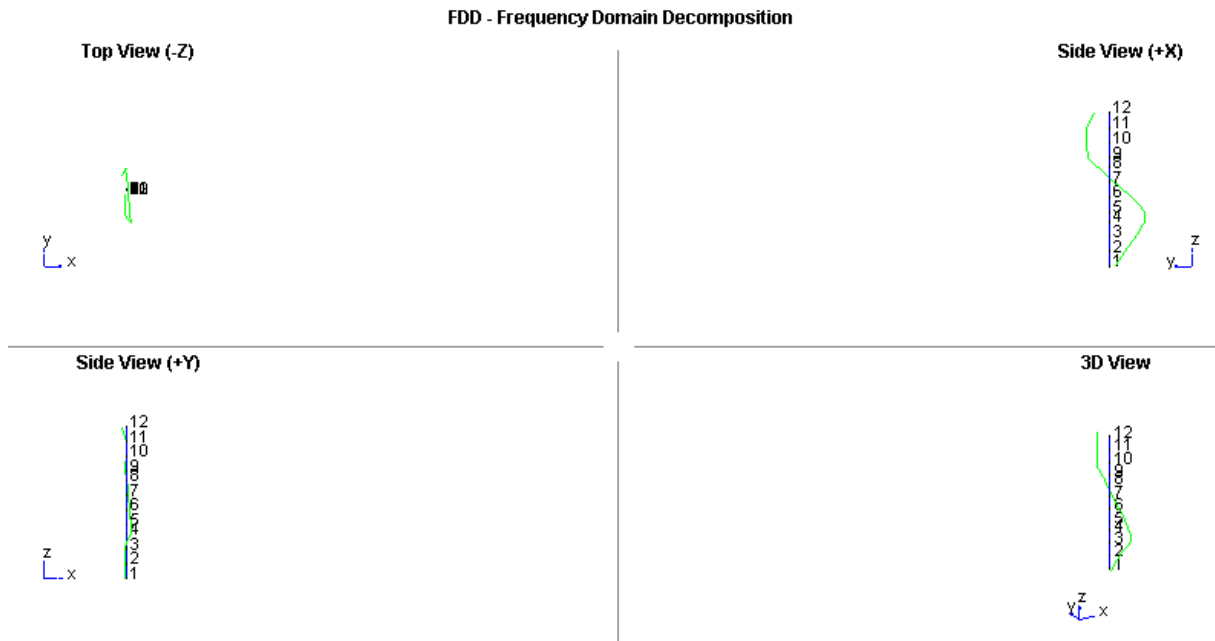
Slika 53. Drugi modalni oblik



Slika 54. Treći modalni oblik



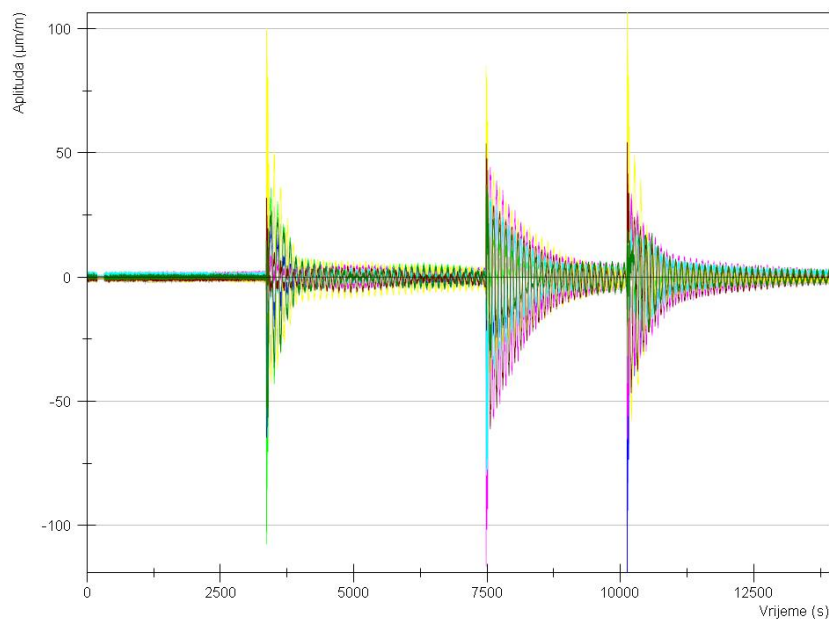
Slika 55. Četvrti modalni oblik



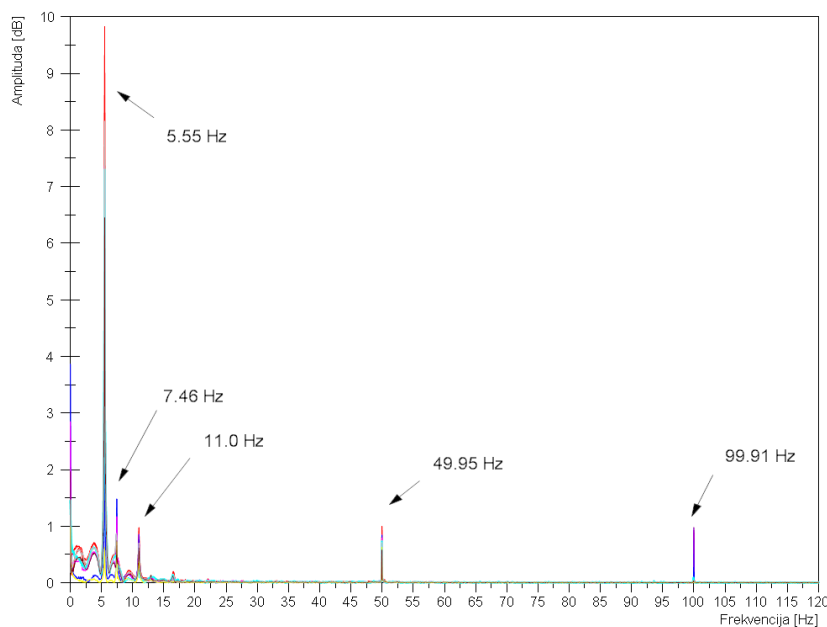
Slika 56. Peti modalni oblik

4.3.4 Određivanje dinamičkih parametara mjerenjem vibracija - EOT

Kao i kod statičkog testa, osam elektrooptičkih mjernih traka postavljeno je na podnožje stupa. Nakon impulsne pobude gumenim čekićem model slobodno istitrava. Nakon potpunog istitravanja, tj. vraćanja modela u početni položaj, postupak se ponavlja još dva puta. Veličine mjerene elektrooptičkim tenzometrima obrađuju se u licenciranom softveru „DIAdem“.



Slika 57 Karakteristični vremenski zapis odgovora s osam EOT



Slika 58 Karakteristični spektralni zapis s naznačenim vlastitim frekvencijama

Tablica 7 Rezultati izmjerenih vlastitih frekvencija za neoštećeno stanje i usporedba s rezultatima izmjerenim akcelerometrima

Modalni oblik	Izmjerene vlastite frekvencije s EOT [Hz]	Odstupanje EOT/AKC
1.	5,55	4,31%
2.	7,46	1,84%
3.	11,00	-
4.	49,95	2,82%
5.	99,91	4,30%

S elektrootpornim tenzometrima (EOT) moguće je pratiti vlastitu frekvenciju na stupu vjetroagregata. Na temelju prikazanih rezultata u prethodnoj tablici može se uočiti malo odstupanje vlastite frekvencije izmjerene EOT i izmjerene akcelerometra, odstupanje je manje od 5%. Odstupanje nastaje zbog ne savršenost laboratorijskog modela. Zbog jednostavnijeg postavljanja mjerne opreme i niskih zahtjeva održavanja elektrootporne trake (EOT) predstavljaju bolji izbor. Dodatna prednost nad akcelerometrima su manji ukupni troškovi. Stoga zaključujemo da su elektrootporne trake pogodne za mjerenje vlastitih frekvencija.

4.4 Diskusija i analiza rezultata dinamičkog monitoringa na modelu u laboratoriju

U sljedećim tablicama prikazani su rezultati provedenih dinamičkih ispitivanja na modelu u laboratoriju. Kao što je već navedeno oštećenja su simulirana na svakoj od etaža i na temelju stupa, a simulacija oštećenja provedena je otpuštanjem jednog ili dvaju vijaka.

Na prikazanim rezultatima može se uočiti promjena frekvencije, odnosno opadanje (predznak minus). Simulacijom oštećenja na prvoj etaži ističe se veći pad vlastite frekvencije za veće oštećenje, što je i očekivano. Navedena promjena nešto manje se očituje na simuliranim oštećenjima za drugu etažu. Promjena vlastite frekvencije na temelju također se može uočiti s tim da nije došlo do promjene frekvencije kod dugog modalnog oblika. I dalje je najosjetljiviji prvi modalni oblik kod simulacije oštećenja.

Tablica 8 Promjena vlastite frekvencije za oštećenja simulirana na etaži 1

Modalni oblik	Frekvencija za neoštećeno stanje	Simulirana oštećenja – promjena frekvencije					
		V1	V3	V5	V7	V4-V5	V1-V8
1.	5,80	-5,5%	-7,4%	-11,5%	0,0%	-20,8%	-20,8%
2.	7,60	-5,6%	-5,6%	-5,6%	-5,6%	-8,6%	-8,6%
3.	43,80	-6,3%	-5,8%	-6,3%	-1,4%	-7,4%	-7,9%
4.	51,40	-1,8%	-2,0%	-2,0%	0,4%	-4,5%	-0,8%
5.	104,40	-3,0%	-3,4%	-4,0%	-0,8%	-9,9%	-13,5%

Tablica 9 Promjena vlastite frekvencije za oštećenja simulirana na etaži 2

Modalni oblik	Vlastita frek. neoštećeno stanje	Simulirana oštećenja – promjena frekvencije					
		V2	V4	V5	V8	V2-V3	V6-V7
1.	5,80	-7,4%	-7,4%	-3,6%	-11,5%	-7,4%	-7,4%
2.	7,60	-5,6%	-5,6%	-5,6%	-5,6%	-5,6%	-5,6%
3.	43,80	-5,3%	-9,0%	-5,8%	-9,0%	-6,8%	-6,8%
4.	51,40	-4,0%	-1,2%	-4,5%	-3,6%	-5,3%	-3,6%
5.	104,40	-4,6%	-4,6%	-6,5%	-4,8%	-4,0%	-5,5%

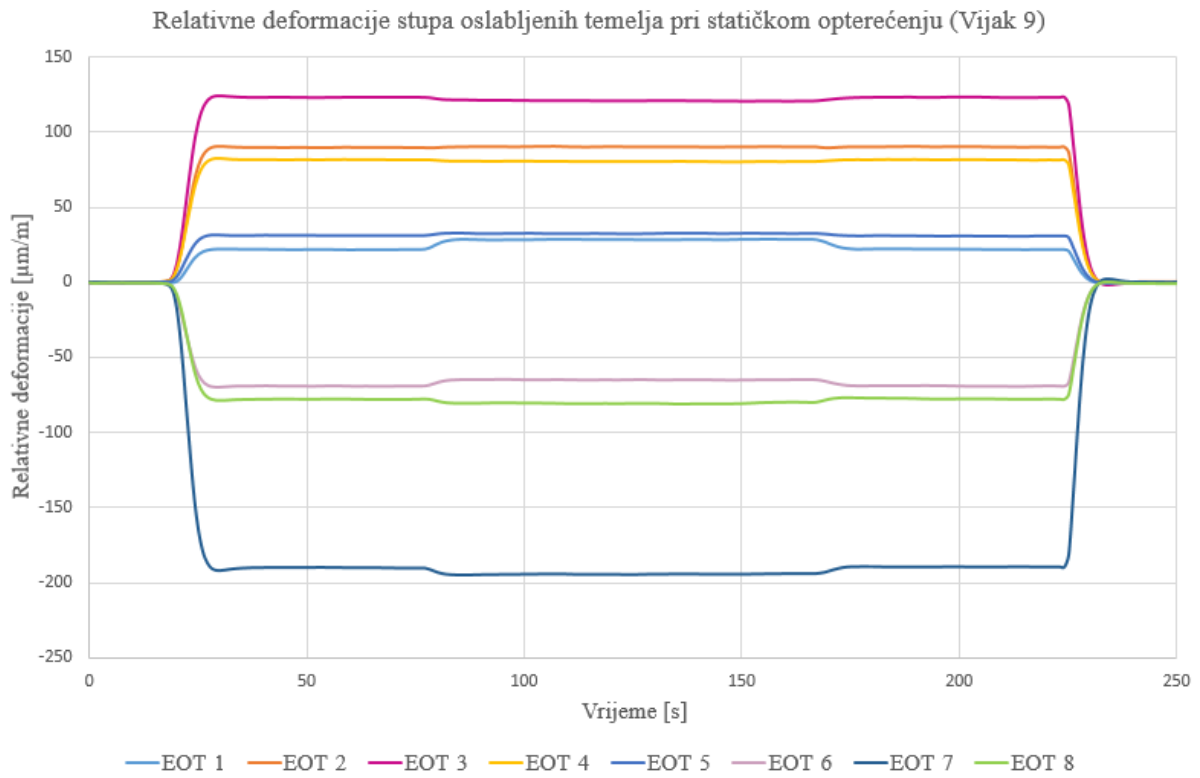
Tablica 10 Promjena vlastite frekvencije za oštećenja simulirana na temelju

Modalni oblik	Vlastita frek. neoštećeno stanje	Simulirana oštećenja – promjena frekvencije			
		T9	T10	T11	T12
1.	5,80	-12,0%	0,0%	-7,7%	-7,7%
2.	7,60	-	-	-	-
3.	43,80	-7,0%	-2,6%	-4,2%	-3,6%
4.	51,40	-	-	-5,1%	-4,7%
5.	104,40	-5,6%	4,2%	-3,5%	-2,2%

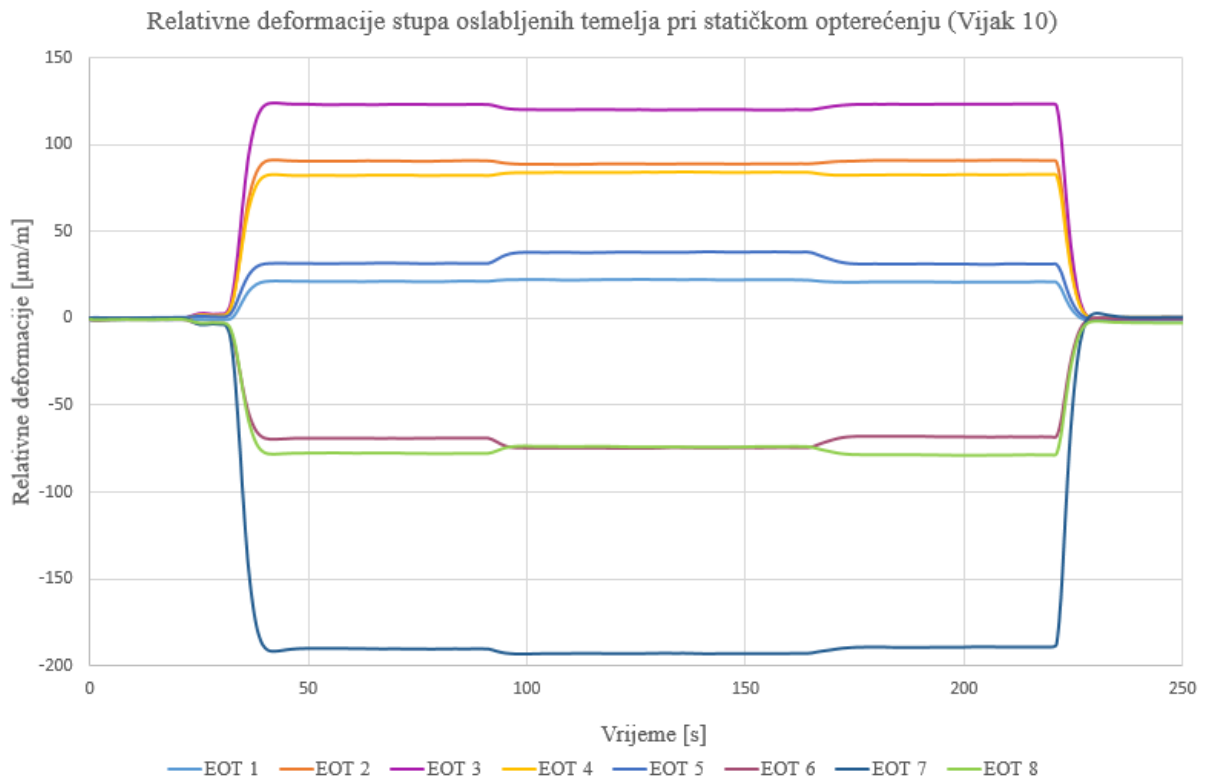
Prilog 1– zapisi statičkog opterećenja

Tablica 11 Prikaz rezultata statičkog ispitivanja

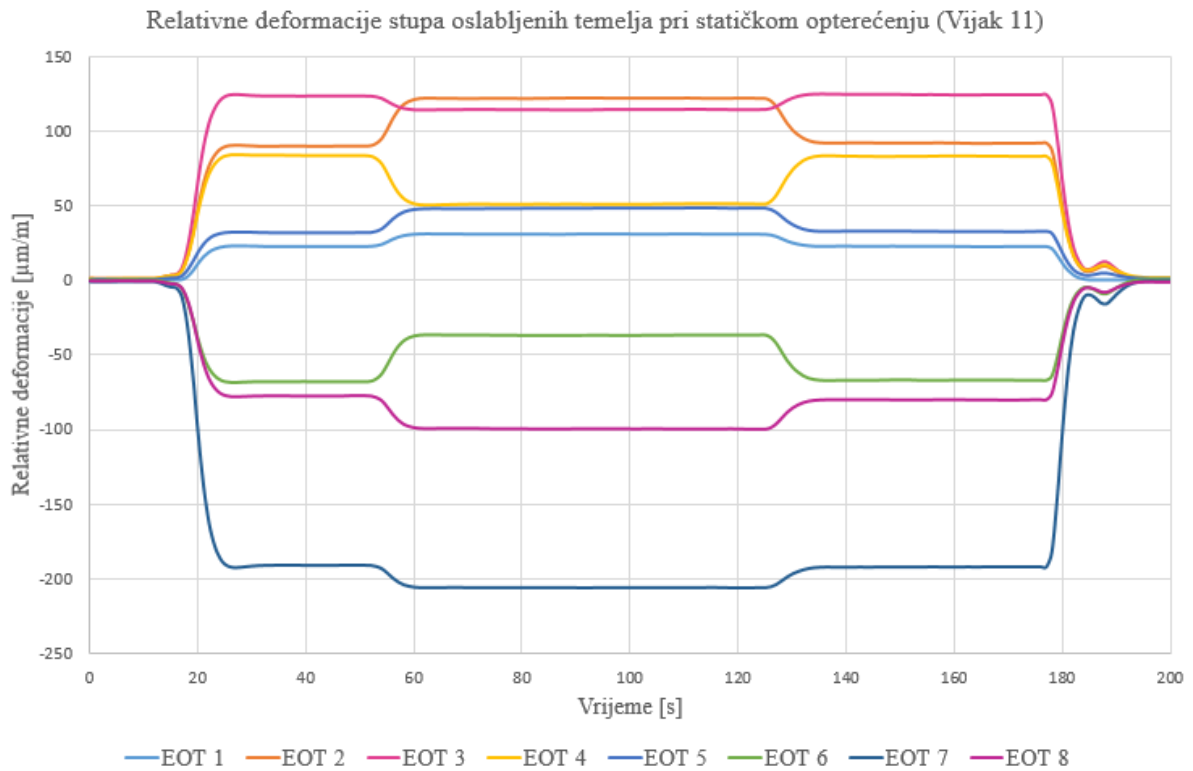
	Traka	Otpuštanje vijka	Pričvršćenje vijka	Otpuštanje vijka
Neoštećeno	1	22.05	-	-
	2	90.68	-	-
	3	123.76	-	-
	4	82.58	-	-
	5	31.73	-	-
	6	-64.89	-	-
	7	-190.55	-	-
	8	-78.04	-	-
Vijak 9	1	21.94	28.36	22.06
	2	89.96	90.4	90.45
	3	123.53	121.26	123.74
	4	82.17	80.85	82.11
	5	31.17	32.43	30.86
	6	-68.86	-64.73	-69.14
	7	-190.25	-194.89	-189.89
	8	-77.19	-80.16	-77.09
Vijak 10	1	21.61	22.57	21.17
	2	90.27	88.58	90.51
	3	123.09	119.98	123.21
	4	82.65	84.48	82.91
	5	31.64	37.88	31.07
	6	-69.30	-74.65	-68.44
	7	-190.67	-193.25	-189.58
	8	-77.79	-74.30	-79.15
Vijak 11	1	22.55	31.06	22.71
	2	89.95	122.42	92.11
	3	123.72	114.66	124.67
	4	83.49	50.57	82.67
	5	31.95	48.55	32.96
	6	-68.45	-37.37	-67.32
	7	-190.72	-205.69	-191.89
	8	-77.22	-99.24	-79.97
Vijak 12	1	21.73	56.47	22.59
	2	90.34	51.76	91.87
	3	123.37	96.53	124.72
	4	82.11	123.31	82.56
	5	31.99	40.24	32.18
	6	-38.57	-93.24	-69.03
	7	-190.12	-209.23	-191.26
	8	-77.19	57.25	-78.71



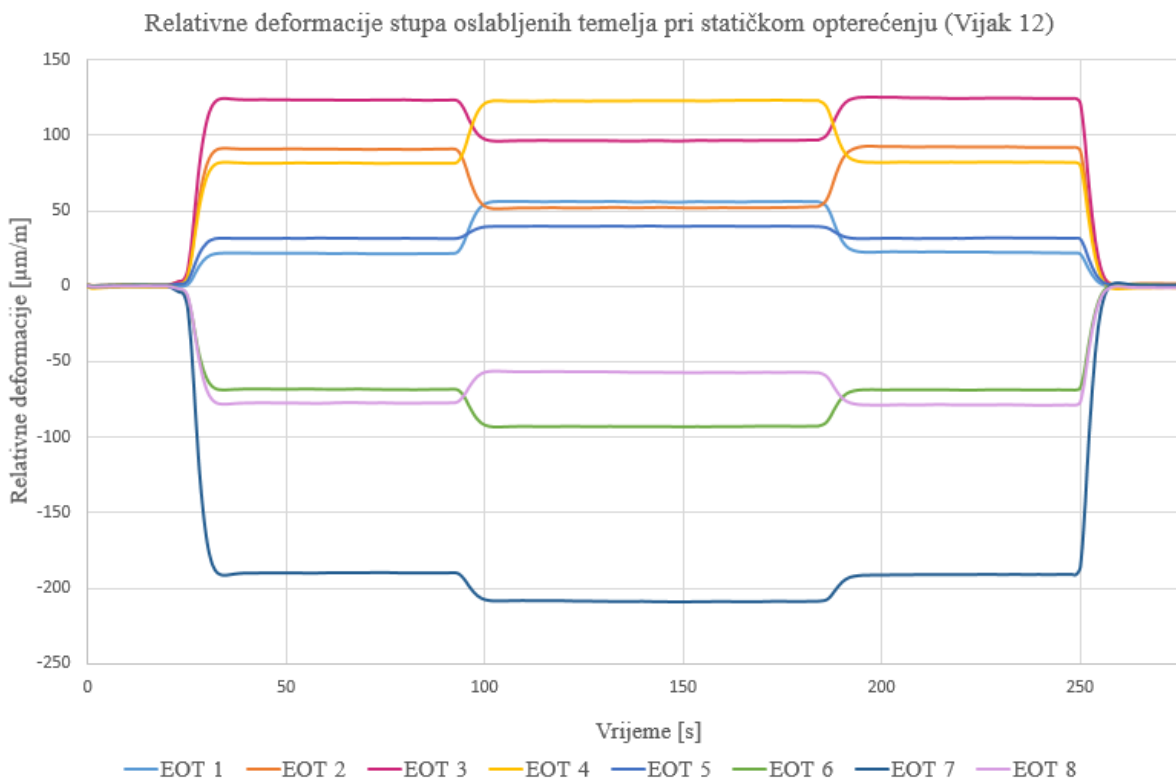
Slika 59 Relativne deformacije stupa (Vijak 9)



Slika 60 Relativne deformacije stupa (Vijak 10)



Slika 61 Relativne deformacije stupa (Vijak 12)



Slika 62 Relativne deformacije stupa (Vijak 12)

5. PRIMJENA SUSTAVA MONITORINGA NA STVARNOM VJETROAGREGATU

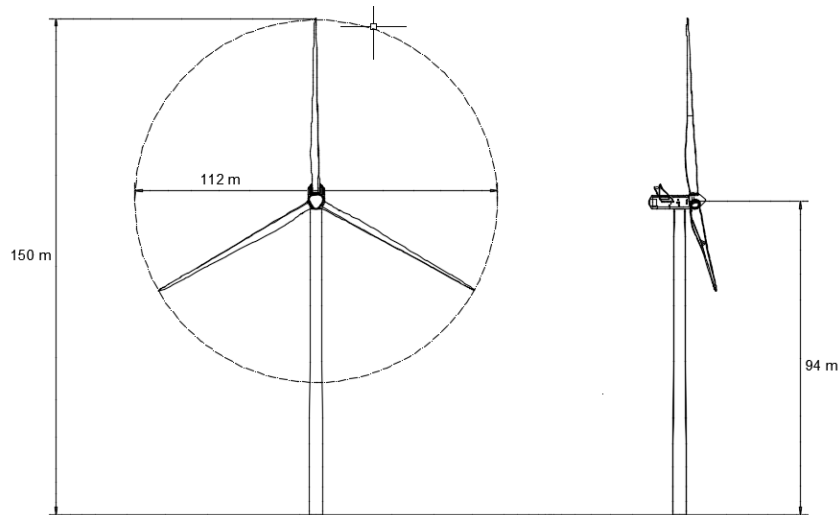
Na temelju provedene analize predloženog sustava monitoringa u laboratoriju na umanjenom modelu vjetroagregata, za implementaciju istog sustava monitoringa odabran je jedan stvarni vjetroagregat u Hrvatskoj. Zbog zaštite vlasnika vjetroparka i ograničenih prava na korištenje rezultata bitni podatci o konstrukciji i rezultatima monitoringa u ovom radu neće se iznositi.

5.1 Opis konstrukcije i monitoringa vjetroagregata

Za implementaciju sustava monitoringa odabran je vjetroagregat koji se nalazi na Jadranskoj obali (Slika 63). Vjetroagregat se sastoji od gondole s ugrađenom opremom koja je pričvršćena na vrhu konusno oblikovanog stupa (blizak cilindru) čija je visina približno 94 m, te rotora s tri lopatice promjera 112 m (Slika 64). Maksimalna visina od tla do vrha lopatice rotora na stupu iznosi 150,1 m. Promjer stupa na priključku s temeljem je 3900 mm, a na vrhu stupa 3238 mm. Oko 2,6 m od dna stupa se nalaze ulazna vrata koja vode na čelično stubište predviđeno za preglede. Stup je izrađen iz čelika S355. Temelj stupa vjetroagregata kružnog je oblika, promjera 18,8 m, te visine 2,895 m pri bazi stupa, sa smanjenjem visine prema rubovima, koja na samom rubu iznosi 1,0 m. Temelj je izrađen iz betona razreda čvrstoće C30/37, osim postamenta čiji je razred čvrstoće C45/55.

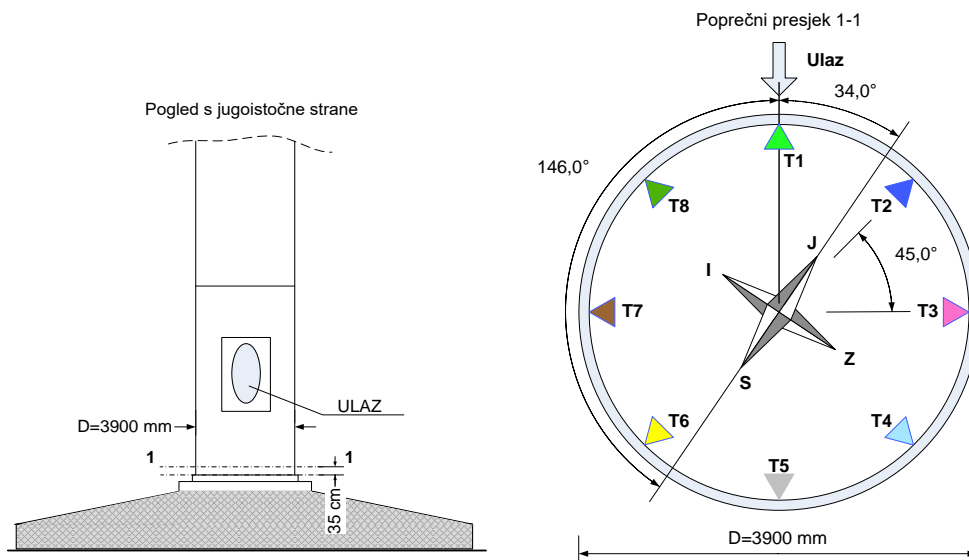


Slika 63 Fotografija vjetroagregata



Slika 64 Shema vjetroagregata s osnovnim dimenzijama

Instaliran je sustav monitoringa koji se sastoji od kontinuiranog praćenja relativnih deformacija pri dnu stupa s unutrašnje strane u zoni neposredno uz temelj (Slika 65). Položaj mjernih mjesta prikazan je u tlocrtu u poprečnom presjeku 1-1. U tlocrtu mjerna mjesta nalaze se na jednakom razmaku te međusobno zatvaraju kut od 45° . Mjerno mjesto 1 nalazi se u tlocrtu ispod ulaznih vrata te ima odklon kuta od 146° od smjera sjevera prema jugu. Potrebno je napomenuti da je monitoring relativnih deformacija (nulto stanje) pokrenut pri položaju gondole od 69.1° u odnosu na sjever. Budući da je monitoring instaliran nakon ugradnje cijele opreme (lopatice, generator, itd.) rezultati relativnih deformacija prikazuju samo utjecaj opterećenja vjetrom.



Slika 65 Položaj mjernih mjesta pri dnu stupa

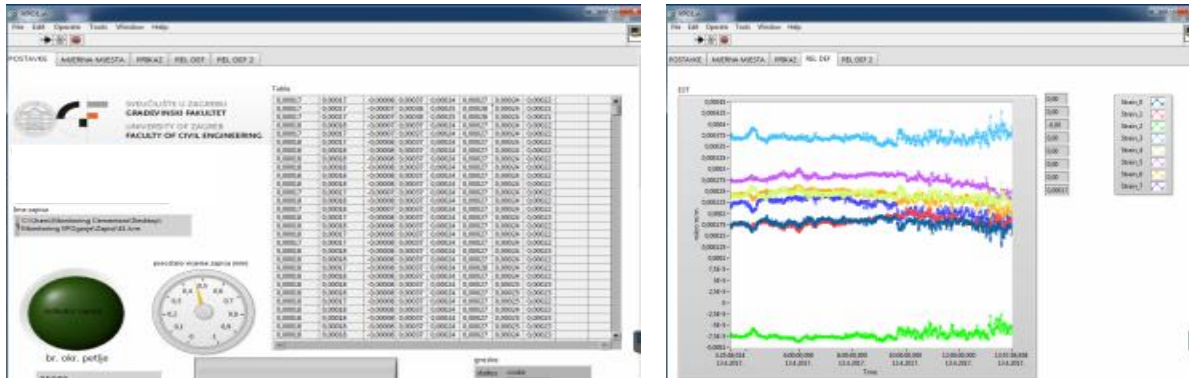
Na temelju analize rezultata na modelu vjetroagregata u laboratoriju zaključeno je da prikazani sustav monitoringa moguće primijeniti na ovakvom tipu konstrukcije. Praćenjem relativnih deformacija pri dnu stupa moguće je odrediti sljedeće:

- naprezanja i moment savijanja pri dnu stupa,
- sila opterećenja vjetrom na vrhu stupa,
- pomak vrha stupa,
- praćenje vlastitih frekvencija stupa u vremenu.

Za potrebe kontinuiranog praćenja stanja konstrukcije vjetroagregata instaliran je sustav monitoringa relativnih deformacija. Sustav se sastoji od dva dijela:

- Kontinuirani statički monitoring,
- Kontinuirani dinamički monitoring

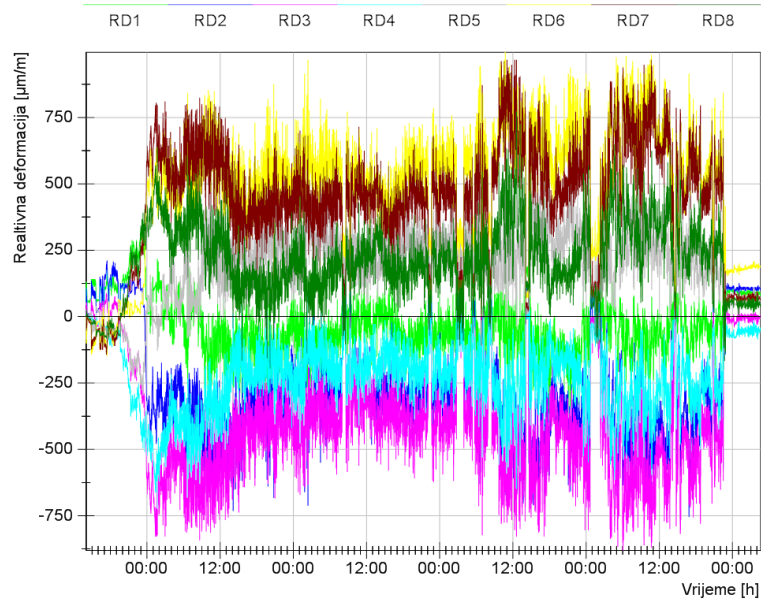
Sustav za prikupljanje podataka čini A/D pretvarač 24 bitne rezolucije (oznake CDAQ 9181) i modul za mjerenje relativnih deformacija (oznake NI9235) proizvođača National Instruments. Za potrebe monitoringa dizajniran je sustav za analizu i pohranu podataka koji se temelji na LabVIEW softveru instaliranom na osobnom računalu koje se nalazi na samoj lokaciji. Grafičko sučelje (Slika 66) prikazuje prikupljene podatke koji se pohranjuju na računalu kojem je moguće pristupiti s udaljene lokacije preko Internet veze.



Slika 66 Grafičko sučelje monitoringa

5.2 Analiza rezultata statičkog monitoringa vjetroagregata

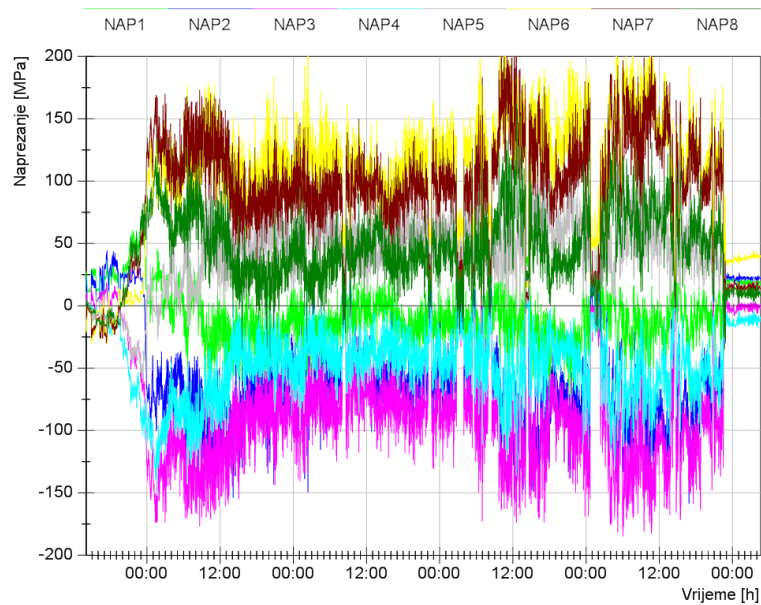
Na sljedećoj slici prikazan je zapis relativnih deformacija za kratki vremenski period od 5 dana (Slika 67). Za prikazani period poznata je srednja brzina vjera od 20 m/s i dominantni smjer puhanja vjetra sa sjeveroistoka (bura). Na temelju prikazanog zapisa analizirat će se prethodno navedeni parametri.



Slika 67 Zapis relativnih deformacija u vremenu

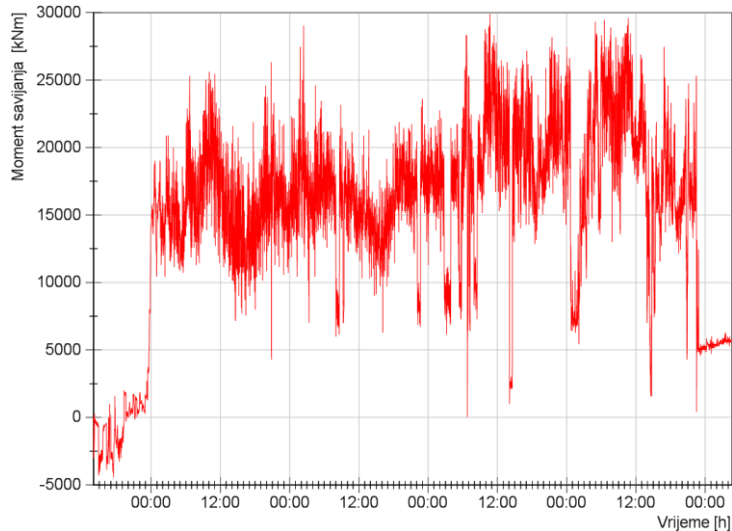
5.2.1 Analiza naprezanja i momenta savijanja pri dnu stupa

Naprezanje pri dnu stupa odredit će se iz modula elastičnosti za čelik od $E=210$ GPa. U nastavku je prikazan graf naprezanja za svako mjerno mjesto (Slika 68).



Slika 68 Zapis naprezanja u vremenu

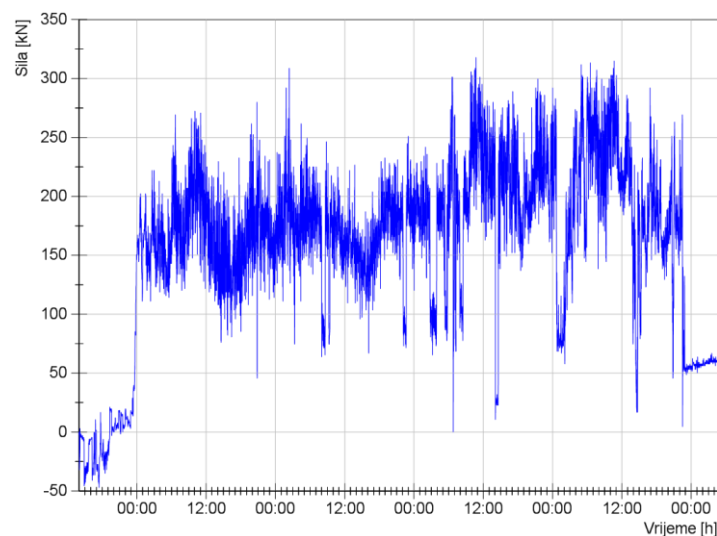
Analiza momenta savijanja pri dnu stupa izračunata je na temelju srednje vrijednosti izmjerenih ekstremnih relativnih deformacija podijeljena s momentom otpora stupa. Utjecaj uzdužne sile od opterećenja vjetrom je zanemarena jer neutralna os prilazi gotovo kroz težište presjeka. Rezultat momenta savijanja u vremenu prikazan je na sljedećoj slici (Slika 69).



Slika 69 Vremenski prikaz momenta savijanja pri dnu stupa

5.2.2 Analiza sile opterećenja vjetrom pri vrhu stupa

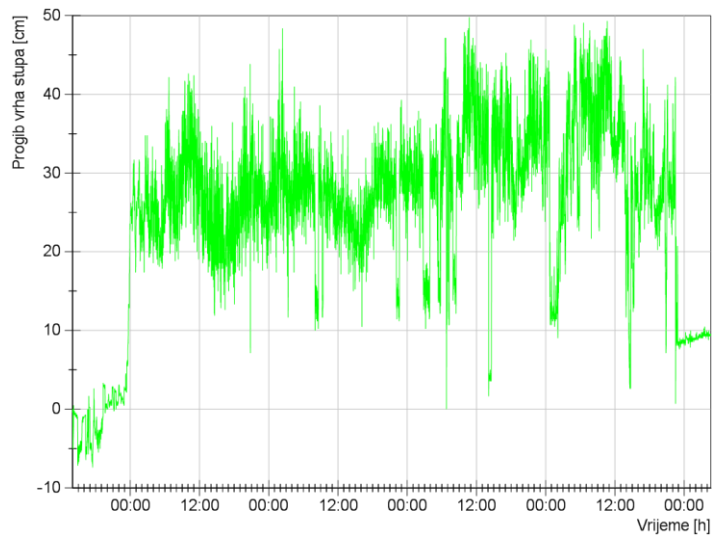
Slično kao kod modela vjetroagregata u laboratoriju i ovdje je moguće na temelju zapisa relativnih deformacija i poznate geometrije odrediti veličinu sile pri vrhu stupa (Slika 70). Ovdje je potrebno zanemariti direktni utjecaj od opterećenja vjetrom na sami stup po njegovoj visini, stoga prikazani zapis pretpostavlja da se cijela sila vjetra unosi preko lopatica na vrh stupa.



Slika 70 Vremenski prikaz sile opterećenja vjetrom pri vrhu stupa

5.2.3 Analiza pomaka vrha stupa

Pomak vrha stupa moguće je odrediti na temelju poznatog izraza za djelovanje poprečne sile na vrhu konzole $w = \frac{Fl^3}{3EI}$. Ako se prepostavi da je krutost stupa linearno promjenjiva po visini i uzme njena srednja vrijednost, dobije se maksimalni pomak vrha stupa od gotovo 50 cm (Slika 71).

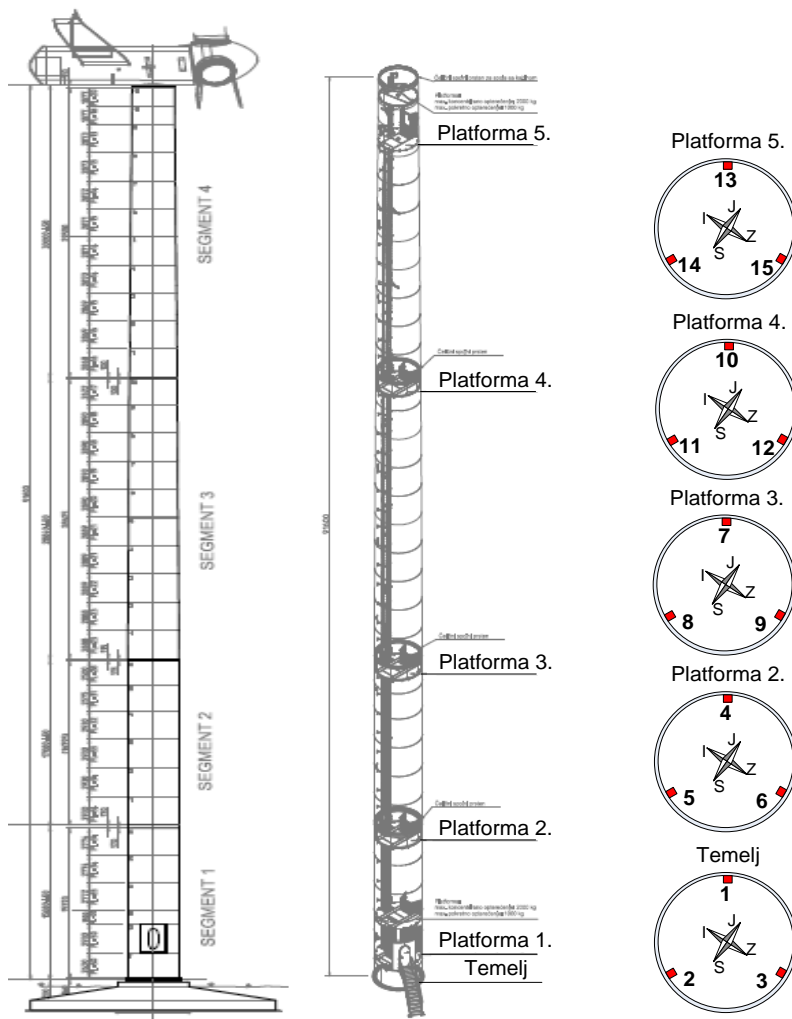


Slika 71 Vremenski prikaz progiba vrha stupa

5.3 Analiza rezultata dinamičkog monitoringa vjetroagregata

Kontinuirani dinamički monitoring obuhvaća dinamičke zapise s elektrootpornih traka pri čemu se sa svih mjernih mjesta zapisuju vrijednosti s frekvencijom uzorkovanja od 800 Hz. Svrha ovog dinamičkog monitoringa je praćenje vlastitih frekvencija u vremenu.

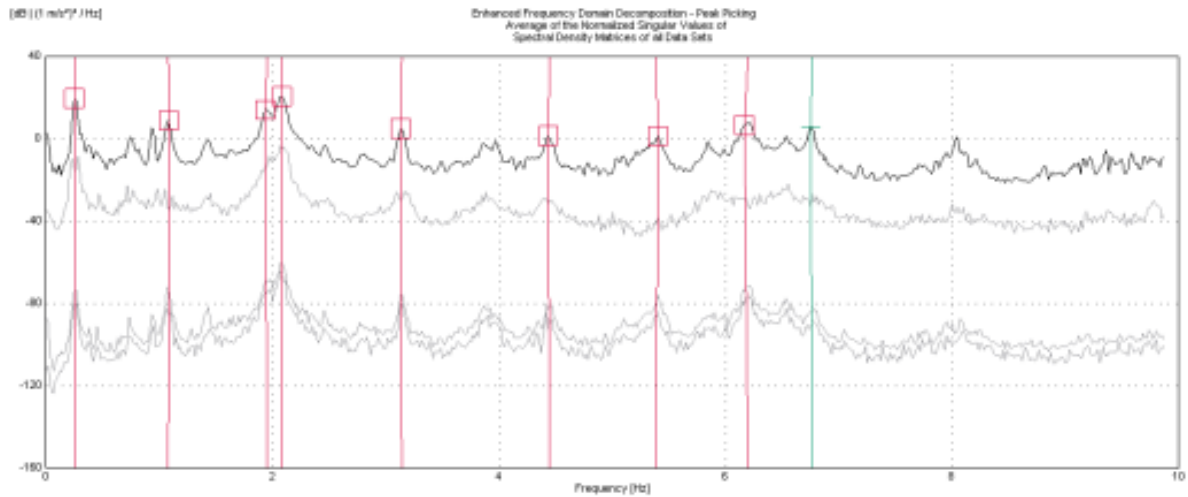
Prije instalacije sustava monitoringa s EOT, provedeno je mjerenje vibracija akcelerometrima po visini stupa u svrhu određivanja dinamičkih parametara konstrukcije – stupa. Ovo mjerenje je provedeno pri ambijentalnim pobudama dok vjetroagregat nije radio. Pri ispitivanju stupa vjetroagregata, akceleracije su mjerene na 15 mjernih mjesta, po tri mjerna mjesta na pet nivoa stupa i to u tangencijalnom (A1) i radijalnom (A2) smjeru (Slika 72).



Slika 72 Mjerna mjesta akceleracija po stupu

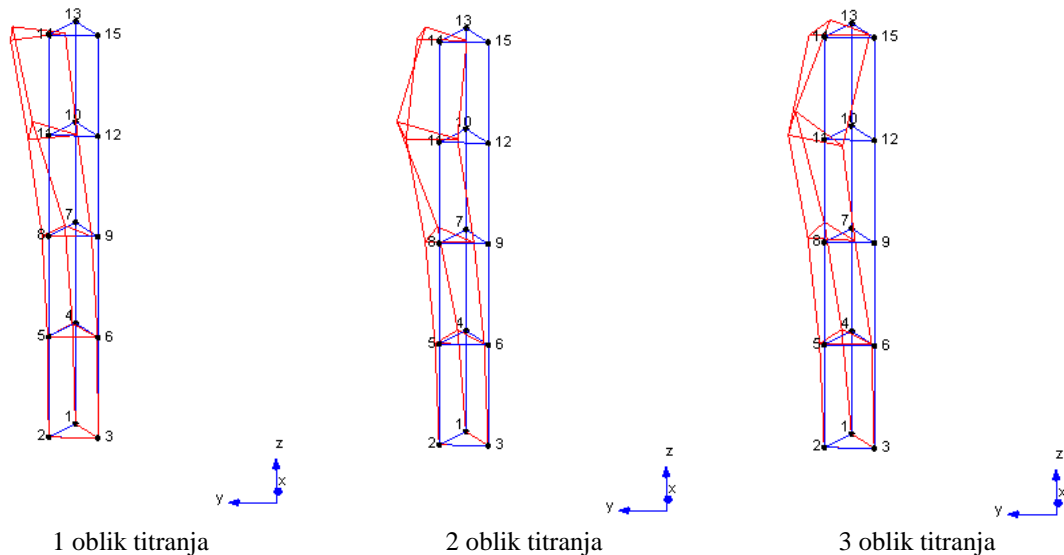
5.3.1 Rezultati dinamičkih parametara po visini stupa akcelerometrima

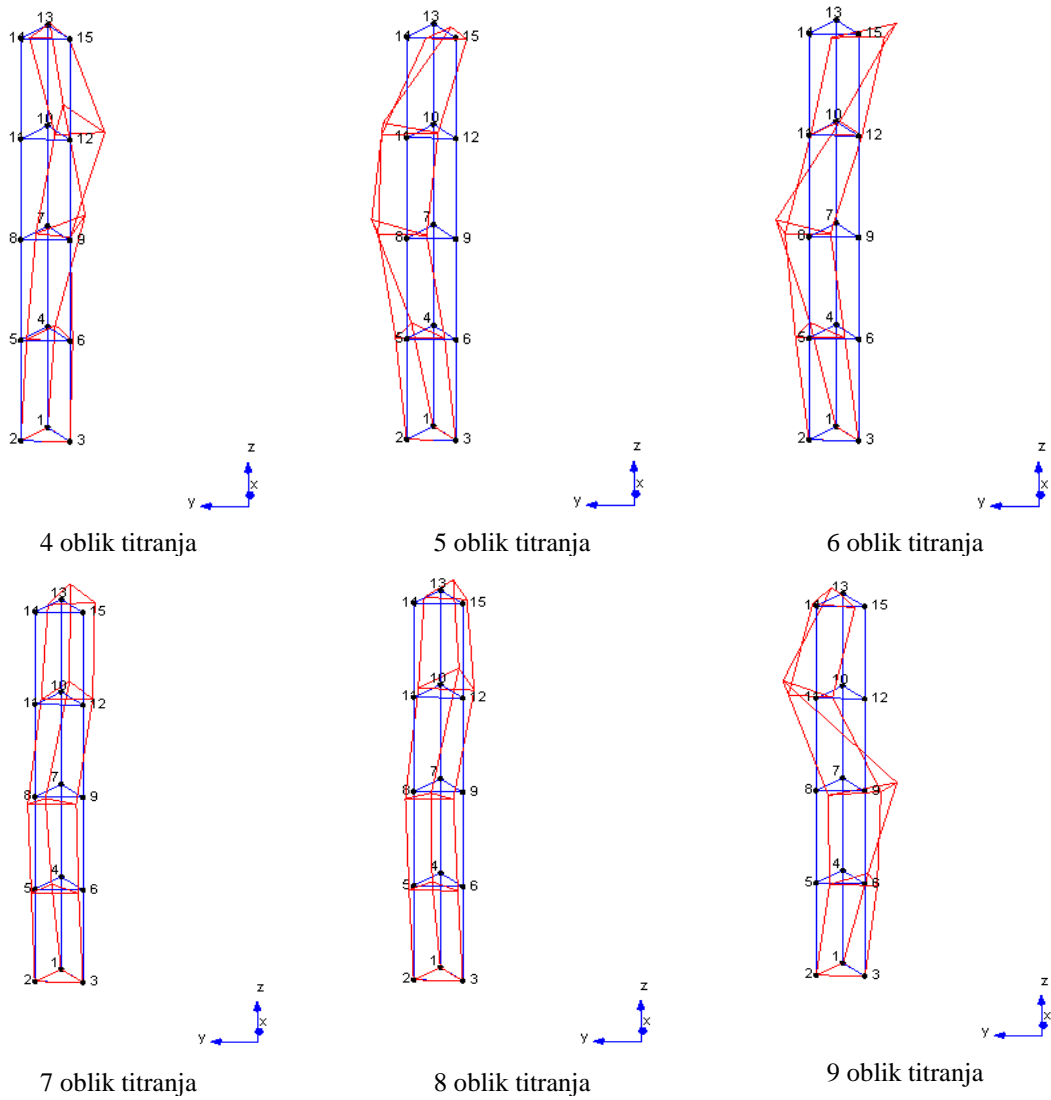
Sljedeća slika prikazuje singularne vrijednosti matrica spektralnih gustoća dobivene na bazi 30 spektralnih zapisa (Tablica 12) (tangencijalni i radijalni smjer za 15 mjernih točaka) iz kojih su vlastite frekvencije određene kao rezonantni vrhovi (Slika 73).



Slika 73 Singularne vrijednosti matrica spektralnih gustoća

U nastavku su prikazani modalni oblici stvarnog vjetroagregata dobiveni tijekom monitoringa (Slika 74).





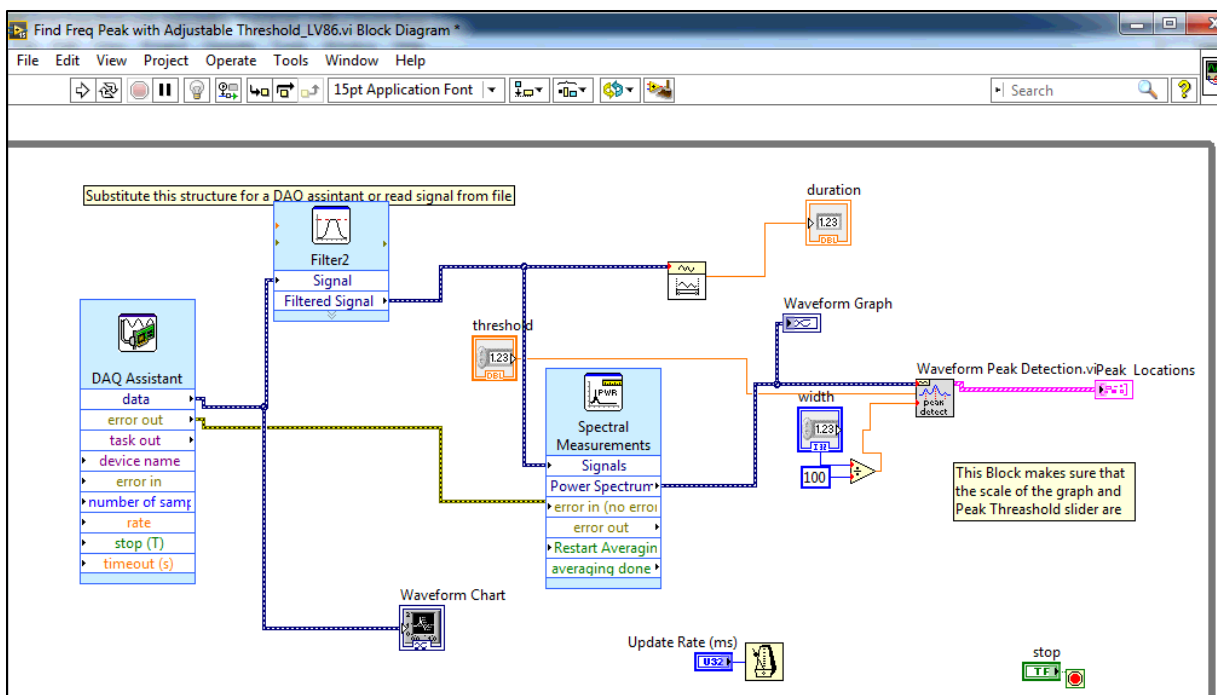
Slika 74 Modalni oblici neoštećenog stupa vjetroagregata dobiveni monitoringom

Tablica 12 Vlastite frekvencije stupa realnog modela za tri perioda mjerenja

Oblici titranja	Izmjerene vlastite frekvencije [Hz]
1	0,26
2	1,07
3	1,95
4	2,07
5	3,14
6	4,45
7	5,41
8	6,21
9	6,77

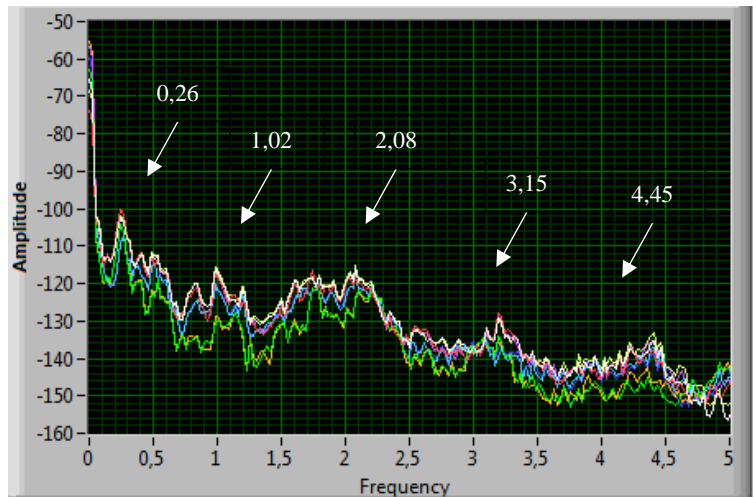
5.3.2 Praćenje vlastite frekvencije elektrootpornim trakama

Kontinuirani dinamički monitoring temelji se na prikupljanju vremenskih zapisa relativnih deformacija s osam elektrootpornih traka. Cilj ovog monitoringa je praćenje vlastitih frekvencija i njihova promjena u vremenu, kao eventualni indikator nastanka oštećenja na konstrukciji vjetroagregata. Sustav kontinuiranog dinamičkog monitoringa sastoji se od prikupljanja zapisa frekvencijom od 400 Hz s brojem uzoraka 32 768 u svakom zapisu. Spektralna analiza temelji na brzom Fourierovoj transformaciji te se zapisi linearno osrednjavaju zadržavajući vrhove vlastitih frekvencija u decibelnoj skali. Analiza je provedena u softveru Labview (Slika 76).



Slika 75 Sučelje softvera za analizu vlastitih frekvencija iz vremenskog zapisa EOT-a

Kao rezultat analize dobije se spektralni zapis koji se pohranjuje na računalu. Na prikazanom zapisu mogu se uočiti vlastite frekvencije konstrukcije jednake onima dobivenim mjerenjem dinamičkih parametara konstrukcije s akcelerometrima (Slika 75).



Slika 76 Rezultat analize u softveru Labview

Kao što smo imali i kod modela vjetroagregata u laboratoriju i ovdje se može donijeti zaključak da primjenom sustava monitoringa s EOT u odgovarajućem presjeku moguće je pratiti vlastitu frekvenciju u vremenu.

5.4 Numerički model vjetroagregata

Za potrebe simulacije oštećenja na realnoj konstrukciji vjetroagregata izrađen je numerički model konstrukcije u programu SAP2000 (Slika 77). Stup vjetroagregata modeliran je štapnim elementima i smatra se konzolnim sustavom. Elementi su modelirani s promjenjivim poprečnim presjecima jednakim onima na stvarnoj konstrukciji tako da se presjek sužava porastom visine konstrukcije. Materijal je definiran kao čelik S355 pretpostavljenog modula elastičnosti 210 GPa. Masa gornjeg dijela vjetrenjače (rotor, vratilo, generator) simulirana je dodavanjem opterećenja na vrhu stupa. U numeričkom modelu provedena je modalna analiza kojom su dobiveni modalni oblici i vlastite frekvencije modela koje su zatim uspoređivane s rezultatima dobivenim monitoringom konstrukcije. U nastavku su prikazani rezultati.



Slika 77 Numerički model realne konstrukcije

Na sljedećim slikama prikazani su numerički dobiveni modalni oblici kao i vlastite frekvencije. Rezultati dobiveni numeričkim modelom (Slika 78) uspoređeni su s eksperimentalno izmjerenim vlastitim frekvencijama i oblicima. Iz analize prikazanih vlastitih frekvencija stvarne konstrukcije i numeričkog modela možemo zaključiti da numerički model daje zadovoljavajuće rezultate u usporedbi sa stvarnom konstrukcijom te se može koristiti kao valjani izvor informacija prilikom projektiranja i praćenja realne konstrukcije. Adekvatno aproksimiran numerički model daje vlastite frekvencije i modalne oblike slične onima na stvarnoj konstrukciji.

$f_1=0,290$ Hz



$f_2=1,953$ Hz



$f_3=1,953$ Hz



$f_4=5,645$ Hz



$f_5=11,119$ Hz



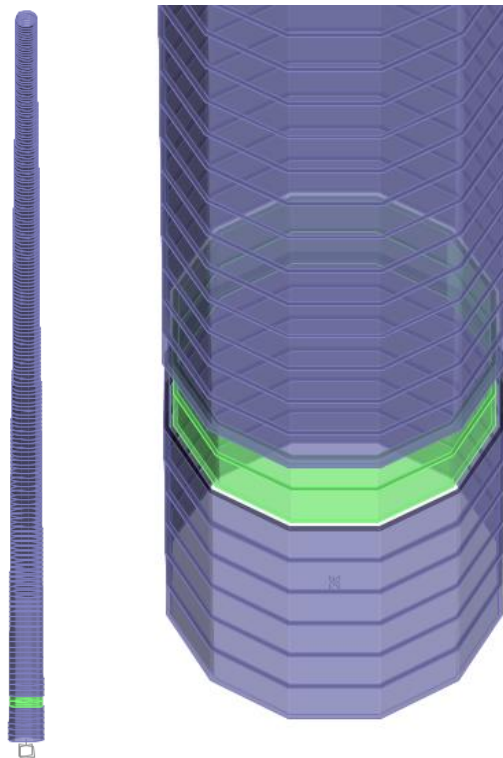
$f_6=18,298$ Hz



Slika 78 Modalni oblici neoštećenog stupa vjetroagregata dobiveni numeričkim modelom

5.4.1 Simulacija oštećenja i promjena vlastite frekvencije

Cilj izrade numeričkog modela realnog vjetroagregata je simulacija oštećenja u vrhu određivanja promjene vlastite frekvencije. Oštećenje je simulirano smanjenjem modula elastičnosti konačnog elementa na donjem dijelu konstrukcije (u blizini temelja). Promatrano je smanjenje modula elastičnosti za 20, 30 i 40 % (Slika 79). U svrhu ocjene postojanja oštećenja na konstrukciju prati se samo promjena vlastite frekvencije. Ukupni rezultati promjene vlastitih frekvencija prikazani su u sljedećoj tablici (Tablica 13).



Slika 79 Simulacija oštećenja stupa

Tablica 13 Vlastite frekvencije i usporedba neoštećenog i oštećenog numeričkog modela

f [Hz]	E=210 GPa	E=168 GPa		E=134,4 GPa		E=107,5 GPa	
	Neoštećeno	Oštećenje 20%	Razlik a [%]	Oštećenje 30%	Razlik a [%]	Oštećenje 40%	Razlik a [%]
Oblik 1	0,290	0,288	0,69	0,286	1,53	0,283	2,54
Oblik 2	1,953	1,946	0,34	1,938	0,75	1,929	1,24
Oblik 3	5,644	5,638	0,11	5,630	0,25	5,621	0,41
Oblik 4	11,119	11,112	0,07	11,102	0,15	11,091	0,25
Oblik 5	18,297	18,273	0,13	18,242	0,30	18,205	0,51
Oblik 6	26,903	26,841	0,23	26,765	0,51	26,675	0,85

Navedenom simulacijom oštećenja pokazano je da svakom promjenom krutosti, odnosno nastankom oštećenja, dolazi do promjene vlastite frekvencije. Ako analiziramo svaku od vlastitih frekvencija možemo primijetiti da nastaje sve veća razlika (%) kako se smanjuje krutost u prikazanom presjeku. Nadalje, očito je da je prva vlastita frekvencija najviše osjetljiva na promjenu krutosti, što je bilo i za očekivati.

6. ZAKLJUČCI I PREPORUKE

U okviru ovog rada provedeno je opsežno istraživanje za potrebe analize sustava monitoringa na stupu vjetroagregata. Motivacija za istraživanje ove teme proizašla je uočavanjem učestalih kolapsa vjetroagregata kako u svijetu tako i u Hrvatskoj. Uvidom u postojeće stanje uočeno je da veliki broj nesreća na vjetroagregatima upravo dolazi zbog čestog kolapsa konstruktivnih elementa prouzrokovanih zamorom materijala, korozijom čelika u priobalnom području, greškama u izvođenju itd.

Sustav monitoringa vrlo je važan na konstrukcijama konstantno izloženim promjenjivom djelovanju vjetra i iznimnom opterećenju. Standardan sustav monitoringa na vjetroagregatima uobičajeno postoji na postrojenju; motoru, ležajevima, ali ne i na konstruktivnim elementima vjetroagregata kao što su stup i temelj. Potaknuti navedenim povedeno je opsežno istraživanje na umanjenom modelu vjetroagregata u laboratoriju približno u mjerilu 1:50, te realnom vjetroagregatu u Hrvatskoj.

Na umanjenom modelu vjetroagregata istreniran je sustav monitoringa koji obuhvaća statički i dinamički dio. Prvi obuhvaća prikupljanje i analizu relativnih deformacija pomoću radijalno raspoređenih elektrootpornih tenzometara u kritičnom presjeku stupa. Dinamički sustav monitoringa podijeljen je na kontinuirani i periodički. Dinamički kontinuirani sustav monitoringa obuhvaća praćenje promjene vlastitih frekvencija na temelju analize relativnih deformacija u kritičnom presjeku stupa. Dinamički periodički monitoring provodi se mjerenjem vibracija i prikupljanjem akceleracija u vremenu kako bi odredili dinamičke parametre (vlastita frekvencija i modalni oblici).

Simulacijom oštećenja na modelu u laboratoriju dokazano je da svakom promjenom krutosti, odnosno nastankom oštećenja, dolazi do promjene vlastite frekvencije. To dokazuje mogućnost ocjene postojanja oštećenja na stupu iz promjene vlastite frekvencije. Nadalje, usporedbom sustava monitoringa primjenom akcelerometara i elektrootpornih traka pokazano je da se rezultati međusobno podudaraju. Potom je provedena cijela analiza korisnih podataka koje je moguće dobiti iz sustava monitoringa s elektrootpornim trakama.

Jednostavnije postavljanje mjerne opreme te niski zahtjevi održavanja EOT-a rezultiraju manjim ukupnim troškovima. Na temelju provedene analize i rezultata zaključujemo da su elektrootporne trake pogodne za mjerenje mnogo bitnih parametra: vlastite frekvencije, naprezanja, momenti savijanja, sila opterećenja vjetra na lopatice itd. Osim eksperimentalnog istraživanja na modelu, provedeno je i numeričko modeliranje stvarnog vjetroagregata. Iz analize vlastitih frekvencija stvarne konstrukcije i numeričkog modela možemo zaključiti da

numerički model daje zadovoljavajuće rezultate u usporedbi sa stvarnom konstrukcijom te se može koristiti kao valjani izvor informacija prilikom projektiranja i praćenja realne konstrukcije.

Za daljnja istraživanja preporuča se analiza rezultata predloženog i instaliranog dugotrajnog monitoringa na stvarnoj konstrukciji vjetroagregata. Preporuča se posebnu pozornost obratiti na analizu promjene vlastite frekvencije u vremenu. Potrebno je voditi računa o eventualnom utjecaju ambijentalne temperature na rezultate dinamičkih parametra, kako nas taj utjecaj ne bi doveo do krivog zaključka.

ZAHVALE

Mentoru doc. dr. sc. Ivanu Duvnjaku, dipl. ing. građ. na vodstvu, razumijevanju, uloženom trudu i konstruktivnim savjetima.

Tvrtki CROMATEC koja je sponzorirala i izradila model na kojem su provedena eksperimentalna ispitivanja što nam je pružilo priliku spoznaje kompleksnosti znanstveno istraživačkog rada i proširenju našeg znanja.

Svim djelatnicima laboratorija za tehničku mehaniku na korisnim savjetima prilikom izrade numeričkog modela i eksperimentalnog dijela, pristupačnosti i ugodnoj radnoj atmosferi istraživanja. Naročito, Željku Kelkoviću na tehničkoj, moralnoj i kreativnoj podršci.

POPIS LITERATURE

- [1] A. Evans, V. Strezov i T. Evans, Assessment of sustainability indicators for renewable energy technologies, Elsevier Science Direct, 2009.
- [2] Anonymous, 7 April 2018. [Mrežno]. Available: <https://www.nationalgeographic.com/environment/global-warming/wind-power/>.
- [3] MIWF, »Dash Cluster Energien Forschung NRW,« Ministry of innovation, science, research and technology of the state of North Rhine Westphalia, Düsseldorf, Germany, 2009.
- [4] C. Ciang, J. Lee i H. Bang, Structural health for a wnd turbine system: a review of damage detection methods, Measurement Science & Technology, 2008.
- [5] K. Smarsly, K. H. Law i D. Hartmann, Structural health monitoring of wind turbines observed by autonomous software components – 2nd level monitoring, Stanford University, CA, USA, Ruhr-University Bochum, Germany, 2012.
- [6] Currie, Saafi, Tachtatzis i Quail, Structural health monitoring for wind turbine foundations, Glasgow, Scotland: University of Strathclyde, 2012.
- [7] Anonymous, »Wikipedia,« 7 April 2018. [Mrežno]. Available: https://hr.wikipedia.org/wiki/Dijelovi_vjetroagregata.
- [8] H. o. p. s. d. -. HOPS, »Desetogodišnji plan razvoja prijenosne mreže 2017.-2026., s detaljnom razradom za počeno trogodišnje i jednogodišnje razdoblje,« 2016..
- [9] »Wikipedija,« [Mrežno]. Available: https://hr.wikipedia.org/wiki/Vjetroelektrane_u_Hrvatskoj.
- [10] »Flanderstoday,« [Mrežno]. Available: <http://www.flanderstoday.eu/business/windmills-north-sea-over-subsidised-says-regulator>.
- [11] »Livescience,« [Mrežno]. Available: <https://www.livescience.com/7183-floating-ocean-windmills-designed-generate-power.html>.
- [12] »Discovermagazine,« [Mrežno]. Available: <http://discovermagazine.com/2008/oct/24-high-flying-windmills-blow-away-their-ground-based-cousins>.
- [13] Wikipedia, »Wind turbine design,« 26. April 2018.. [Mrežno]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Wind_turbine_design. [Pokušaj pristupa 1. May 2018.].
- [14] V. Koloušek, M. Pirner, O. Fischer i J. Naprstek, Wind Effects on Civil Engineering Structures (Studies in Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol 2), Amsterdam: Elsevier, 1984.

-
- [15] M. Benedetti, V. Fontanari i D. Zonta, Structural health monitoring of wind towers: remote damage detection using strain sensors, Trento, Italy: Department of Materials Engineering and Industrial Technologies, 2011.
- [16] D. Dujmović, »Djelovanja (predavanje) - Metalne konstrukcije 2,« Građevinski fakultet zagreb, Zagreb, 2018..
- [17] F. Besnard, On Optimal Maintenance Management for Wind Power Systems, Stockholm: KTH, 2009.
- [18] K. Smarsly, K. H. Law i D. Hartman, »Structural health monitoring of wind turbines observed by autonomous software components-2nd level monitoring,« CA,USA; Bochum, Germany, 2012.
- [19] D. Coronado i K. Ficher, »CONDITION MONITORING OF WIND TURBINES: STATE OF THE ART, USER EXPERIENCE AND RECOMMENDATIONS,« 2015.
- [20] W. Yang, P. J. Travner, C. J. Crabtree, Y. Feng i Y. Qiu, »"Wind turbine condition monitoring: technical and commercial challenges", Wind Energy, vol 17. pp. 673-693,« 2014.
- [21] »HBM,« [Mrežno]. Available: <https://www.hbm.com/en/5741/strain-gauge-selection-installation-workshop/>. [Pokušaj pristupa 1 5 2018].
- [22] Z. Hameed, Y. S. Hong, Y. M. Cho, S. H. Ahn i C. K. Sing, »"Condition monitoring and fault detection of wind turbines and related algorithms: A review,"Renewable & Sustainable Energy Review, vol 13.pp. 1-39,« 2009.
- [23] D. Damjanović, 2017. [Mrežno]. Available: https://www.grad.unizg.hr/_download/repository/7_predavanje_EM.pdf.
- [24] »Scaime,« [Mrežno]. Available: <http://www.scaime.com/en/121/products-services/optical-fiber-strain-gauges.html>. [Pokušaj pristupa 1 5 2018].
- [25] G. D. Sitter, W. Weijtjens, Y. V. Ingelgem, D. D. Wilde, K. Verlinden, S. Milis i C. Devriendt, »Foundation monitoring systems:Analysis of 2 years of monitoring at the north sea,« u *EWEA 2014*, Bercelona, Spain, 2014.
- [26] »TUTCO,« [Mrežno]. Available: <http://www.tutco.com/tutparts-components/thermocouples/>. [Pokušaj pristupa 1 5 2018].
- [27] M. Currie, M. Saafi, C. Tachtatzis i F. Quail, »"Structural health monitoring for wind turbine foundations", Proceedings of the ICE-Energy, vol. 166, no. 4, pp. 162-169,« 2013.
- [28] »HBM,« [Mrežno]. Available: http://www.directindustry.com/prod/hbm-test-measurement/product-6017-30649.html?utm_source=ProductDetail&utm_medium=Web&utm_content=SimilarProduct&utm_campaign=CA. [Pokušaj pristupa 1 5 2018].

-
- [29] S. Lachmann, Dissertation: Kontinuierliches Monitoring zur Schadigungsverfolgung an Tragstrukturen von Windenergieanlagen, Bochum: Ruhr Universitat Bochum, 2014.
- [30] B. Matijević, »Večernji list,« 9. 10. 2017.. [Mrežno]. Available: <https://lokalni.vecernji.hr/vijesti/vjetroelektrana-teska-35-tona-se-srusila-je-je-bura-slomila-propeler-5871>. [Pokušaj pristupa 1. 5. 2018.].
- [31] L. Gerlanc, »Jutarnji.hr,« 08. 10. 2017. . [Mrežno]. Available: <https://www.jutarnji.hr/vijesti/hrvatska/vjetrenjaca-na-pagu/6628080/>. [Pokušaj pristupa 1. 5. 2018.].
- [32] W.-T. T. Jui-Sheng Chou, »Failure analysis and risk management of a collapsed large wind turbine tower,« *Engineering Failure Analysis*, svez. 18, p. 19, 2011.
- [33] T. I. Yin LIU, »Fatigue Failure Accident of Wind Turbine Tower in Taikoyama Wind Farm,« 2015.
- [34] D. Dajmanović, Skripta: Eksperimentalne metode 2, Zagreb, 2016.
- [35] D. Damjanović , Doktorska disertacija: Utjecaj temperature na dinamičke parametre građevinskih konstrukcija, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, 2010..
- [36] B. Schwarz i M. Richardson , Experimental Modal Analysis, Orlando, Florida, USA: CSI Reliability Week, 1999.
- [37] H. Herlufsen, »Modal Analysis using Multi-Reference and Multiple-Input Multiple-Output techniques,« 8 April 2018. [Mrežno]. Available: <http://www.bksv.com/doc/bo0505.pdf>..
- [38] M. C. Harris , Shock and Vibration Handbook, Fourth edition, New York: McGraw-Hill, 1996.
- [39] D. Lazarević, M. Šavor Novak i M. Uroš, Dinamika konstrukcija s uvodom u potresno inženjerstvo, Zagreb: Građevinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, 2018.
- [40] H. Herlufsen, P. Andersen, S. Gade i N. Møller, Identification Techniques for Operational Modal Analysis - an Overview and Practical Experiences, Proceedings of the 1st International Operational Modal Analysis Conference, Copenhagen, 2005.
- [41] H. Herlufsen, S. Gade i N. Møller , »Identification Techniques for Operational Modal Analysis - An Overview and Practical Experiences,« 8 April 2018. [Mrežno]. Available: <https://pdfs.semanticscholar.org/ecde/bcee90589af8b972b6237f06d54d0685eb00.pdf>.
- [42] L. Zhang, R. Brincker i P. Andersen, »An Overview of Operational Modal Analysis: Major Development and Issues,« u *Proceedings of the 1st International Operational Modal Analysis Conference (IOMAC)*, Copenhagen, Denmark, 2005.
-

-
- [43] »DHMZ,« 30 04 2018. [Mrežno]. Available:
http://klima.hr/klima.php?id=k1¶m=k1_9&elpar=evjetar.
- [44] S. FER, »Fourierova analiza - Skripta,« 8 April 2018. [Mrežno]. Available:
http://www.fer.unizg.hr/_download/repository/skripta_fourierova_analiza.pdf.

POPIS SLIKA

Slika 1. Srednja brzina vjetra [m/s] u republici Hrvatskoj	3
Slika 2. Najveća očekivana brzina vjetra [m/s] u Republici	3
Slika 3. Vremenska dinamika dosadašnje izgradnje vjetroelektrana u Hrvatskoj [8].....	5
Slika 4. Kopnena vjetroelektrana Vratuša kod Senja [9]	6
Slika 5. Priobalna vjetroelektrana u Nizozemskoj [10].....	7
Slika 6. Koncept plutajućih vjetroelektrana [11]	7
Slika 7. Koncept visinskih vjetroelektrana [12]	8
Slika 8. Dijelovi kopnenog vjetroagregata [13]	8
Slika 9. Promjena brzine vjetra u ovisnosti o visini (z) [16].....	10
Slika 10 Decentralizirani SHM sustav [18].....	11
Slika 11 Elektrootporne trake (EOT) [21].....	12
Slika 12 Optičke mjerne trake [24]	12
Slika 13 Akcelerometar	13
Slika 14 Termoparovi [26]	13
Slika 15 Linearno varijabilni diferencijalni transformator (LVDT) [28].....	13
Slika 16 Primjer pozicioniranja senzora na stupu i temeljima za kopnene vjetroagregate [29]	14
Slika 17 Srušena vjetrenjača na otoku Pagu [31]	15
Slika 18 Tipovi nesreća na vjetroagregatima u svijetu prema istraživanju [32]	16
Slika 19 Tablica nesreća na vjetroagregatima u svijetu prema istraživanju [32].....	16
Slika 20 Fotografije vijaka, zamor materijala [32]	17
Slika 21 Fotografije vijaka, zamor materijala [33]	17
Slika 22 Rastavljanje signala u sumu sinusnih članova (DFT-FFT).....	20
Slika 23 Realni i imaginarni dio kompleksnog spektra frekvencija.....	21
Slika 24 Rezultat DFT-a prigušenog sinusnog signala	22
Slika 25 Matrice funkcije frekventnog odgovora.....	24
Slika 26 Blok dijagram FRF-a	25
Slika 27 Određivanje vlastitih frekvencija iz $H(f)$	26
Slika 28 Određivanje koeficijenta prigušenja iz pojasa pola snage magnitudnog dijela spektra	27
Slika 29 Imaginarni dio funkcija frekventnog odgovora	27
Slika 30 Dobivanje modalnih oblika iz imaginarnog dijela funkcija frekventnog odgovora ..	28

Slika 31 Modalna transformacija	31
Slika 32. Nacrt i fotografija ispitivanog modela	34
Slika 33. Detalji pojedinih elementa	34
Slika 34. Spoj modela i betonske ploče.....	35
Slika 35. Elektrootporni tenzometri postavljeni na podnožju modela	36
Slika 36. Referentni akcelerometri te detalj spoja dvaju elemenata.....	36
Slika 37. a) Prikaz načina pričvršćenja bušilice na model i b) Aluminijske lopatice	37
Slika 38. a) Pulse A-D pretvarač vibracija b) MGC plus	37
Slika 39. MGC A-D konverter spojen na osobno računalo.....	38
Slika 40. Radijalni raspored elektrootpornih traka pri dnu stupa.....	39
Slika 41. Shema statičkog opterećenja	40
Slika 42. a) statičko opterećenje i b) uteg obješen preko koloture.....	40
Slika 43. Detalj a) doza na vrhu stupa i b) kuglični ležaj (kolotura).....	40
Slika 44. Karakteristični zapis statičkog opterećenja (vijak 12)	41
Slika 45 Prirast sile u vremenu pri statičkom opterećenju modela	42
Slika 46. Dijagrami naprezanja za neoštećeni model.....	43
Slika 47. Dijagrami naprezanja za oštećeni model	45
Slika 48. Detalj vijaka na etažama i temelju	47
Slika 49 Simulacija oštećenja na temelju (T10).....	48
Slika 50. Karakteristični vremenski zapis pobude	49
Slika 51. Karakteristični spektralni zapis odgovora konstrukcije	49
Slika 52. Prvi modalni oblik.....	50
Slika 53. Drugi modalni oblik	50
Slika 54. Treći modalni oblik.....	51
Slika 55. Četvrti modalni oblik	51
Slika 56. Peti modalni oblik	52
Slika 57 Karakteristični vremenski zapis odgovora s osam EOT	53
Slika 58 Karakteristični spektralni zapis s naznačenim vlastitim frekvencijama	53
Slika 59 Relativne deformacije stupa (Vijak 9)	57
Slika 60 Relativne deformacije stupa (Vijak 10)	57
Slika 61 Relativne deformacije stupa (Vijak 12)	58
Slika 62 Relativne deformacije stupa (Vijak 12)	58
Slika 63 <i>Fotografija vjetroagregata</i>	59

Slika 64 Shema vjetroagregata s osnovnim dimenzijama	60
Slika 65 Položaj mjernih mjesta pri dnu stupa	60
Slika 66 Grafičko sučelje monitoringa.....	61
Slika 67 Zapis relativnih deformacija u vremenu	62
Slika 68 Zapis naprežanja u vremenu	62
Slika 69 Vremenski prikaz momenta savijanja pri dnu stupa	63
Slika 70 Vremenski prikaz sile opterećenja vjetrom pri vrhu stupa	63
Slika 71 Vremenski prikaz progiba vrha stupa	64
Slika 72 Mjerna mjesta akceleracija po stupu	65
Slika 73 Singularne vrijednosti matrica spektralnih gustoća	66
Slika 74 Modalni oblici neoštećenog stupa vjetroagregata dobiveni monitoringom	67
Slika 75 Sučelje softvera za analizu vlastitih frekvencija iz vremenskog zapisa EOT-a.....	68
Slika 76 Rezultat analize u softveru Labview	69
Slika 77 Numerički model realne konstrukcije	70
Slika 78 Modalni oblici neoštećenog stupa vjetroagregata dobiveni numeričkim modelom...	71
Slika 79 Simulacija oštećenja stupa	72

POPIS TABLICA

Tablica 1 Vjetroelektrane unutar hrvatskog EES-a (priključak na prijenosnu mrežu – stanje kolovoz 2016.).....	4
Tablica 2 Vjetroelektrane unutar hrvatskog EES-a (priključak na distribucijsku mrežu – stanje kolovoz 2016.).....	4
Tablica 3 Broj uzoraka i odnos broja operacija DFT-a i FFT-a.....	22
Tablica 4 Dimenzije ispitivanog modela.....	33
Tablica 5 Karakteristike materijala korištenog za izradu modela	35
Tablica 6 Rezultati izmjerenih vlastitih frekvencija za neoštećeno stanje	49
Tablica 7 Rezultati izmjerenih vlastitih frekvencija za neoštećeno stanje i usporedba s rezultatima izmjerenim akcelerometrima	54
Tablica 8 Promjena vlastite frekvencije za oštećenja simulirana na etaži 1	55
Tablica 9 Promjena vlastite frekvencije za oštećenja simulirana na etaži 2	55
Tablica 10 Promjena vlastite frekvencije za oštećenja simulirana na temelju	55
Tablica 11 Prikaz rezultata statičkog ispitivanja	56
Tablica 12 Vlastite frekvencije stupa realnog modela za tri perioda mjerenja	67
Tablica 13 Vlastite frekvencije i usporedba neoštećenog i oštećenog numeričkog modela ...	72

SAŽETAK RADA

Darina Križanac, Marta Lovrak

Analiza sustava monitoringa na stupu vjetroagregata

Sustav monitoringa vjetroagregata smatra se glavnim pokazateljem pouzdanosti i operativne funkcionalnosti. Kontinuiranim praćenjem stanja elemenata vjetroagregata mogu se detektirati oštećenja i kvarovi koji mogu bitno utjecati na funkcionalnost vjetroagregata. Provedena su istraživanja na realnom vjetroagregatu i umanjenom modelu vjetroagregata (M 1:50) u laboratoriju u svrhu određivanja utjecaja oštećenja na promjenu dinamičkih parametara. Istraživanje obuhvaća eksperimentalnu i numeričku analizu modela bez oštećenja i sa simuliranim oštećenjima. U okviru eksperimentalnih istraživanja provedena su statička i dinamička ispitivanja na umanjenom modelu, primjenjujući dva načina mjerenja (elektrootporni tenzometri- EOT i akcelerometri). Analizom rezultata dokazan je utjecaj oštećenja na promjenu dinamičkih parametara, prvenstveno vlastite frekvencije. Na posljetku, analizirani sustav monitoringa primijenjen je na realnom vjetroagregatu smješten na Jadranskoj obali. U okviru istraživanja donesen je zaključak o povoljnoj primjeni EOT u okviru sustava monitoringa kod ovakvog tipa građevina.

Ključne riječi: vjetroagregat, monitoring, vlastita frekvencija, modalni oblici, detekcija oštećenja

SUMMARY

Darina Križanac, Marta Lovrak

Analysis of SHM system of the tower of wind turbine

Wind turbine monitoring system is considered as the main indicator of reliability and operational functionality. Continuous monitoring of the condition of the wind turbine elements can detect damage and breakdowns that can significantly affect the functionality of the wind turbine. Research was conducted on a real wind turbine and scale model (M 1:50) in the laboratory to determine variation of dynamic parameters due to damage on the structure. The research includes experimental and numerical analysis of the undamaged and damaged model. Within the experimental studies, static and dynamic tests were conducted on a scale model, using two measurement methods (strain gauges and accelerometers). Conducted analysis have shown that simulated damages of the tower have affect on variation of dynamic parameters, primarily changes of eigenfrequency. Finally, the analyzed monitoring system was applied to the real wind turbine located on the Adriatic coast. Within the scope of the research, a conclusion was made on good implementation of strain gauges within the monitoring system in this type of structure.

Key words: wind turbine, monitoring, eigenfrequency, modal shapes, damage detection