

# Dinamična nestabilnost lopatic vetrnih turbin zaradi velikih odklonov: eksperimentalna validacija

Andres Lopez-Lopez<sup>1</sup> – Jose Billerman Robles-Ocampo<sup>2,\*</sup> – Perla Yazmin Sevilla-Camacho<sup>2</sup> –  
Orlando Lastres-Danguillecourt<sup>1</sup> – Jesús Muniz<sup>3</sup> – Bianca Yadira Perez-Sariñana<sup>2</sup> – Sergio de la Cruz<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Znanstveno-humanistična univerza v Chiapasu, Mehika

<sup>2</sup> Politehnika v Chiapasu, Akademsko skupino za energetiko in trajnostni razvoj, Mehika

<sup>3</sup> Mehiška avtonomna nacionalna univerza, Inštitut za obnovljivo energijo, Mehika

Vetrne turbine s horizontalno osjo (HAWT) so konstruirane z velikimi rotorji, ki jim omogočajo, da izkoristijo kar se da velik del kinetične energije vetra. Vsak rotor je sestavljen iz pesta in lopatic. Lopatice so dolge, vitke, lahke, močno upogljive in prenašajo velike vetrne obremenitve. Med eksploatacijo so izpostavljene velikim odklonom in visokoamplitudnim vibracijam. Prav kombinacija teh dveh pojavov lahko povzroči nestabilnost lopatic, ki se nato prenaša naprej na gred rotorja in na ostale komponente vetrne turbine, to pa lahko privede do obsežnih poškodb sistema. Zato je pomembno podrobnejše razumevanje nestabilnosti kot odziva lopatic vetrne turbine na vibracije v prisotnosti velikih odklonov. Opravljenih je bilo več raziskav za razjasnitev nelinearnega dinamičnega vedenja lopatic. Nelinearno dinamično vedenje se lahko analizira npr. s kombiniranjem 3D modelov s končnimi elementi in računalniške dinamike fluidov (CFD). Te analitične metode so sicer učinkovite, so pa tudi zelo drage in še vedno ne omogočajo jasnega opisa dinamične nestabilnosti rotorjev pri različnih hitrostih vetra oz. vpliva večjih odklonov na nestabilnost. V pričujočem delu je bil za odpravo teh težav uporabljen poenostavljen aeroelastični model. Model omogoča identifikacijo, analizo in napovedovanje vpliva velikih odklonov na nelinearne vibracije lopatic vetrnih turbin. Uporabljen je bil model konzolnega nosilca z nelinearnimi členi, ki opisujejo elastično krivuljo. Oblikovan je bil dinamični model z upoštevanjem velikega geometrijskega odklona in uporabljen je bil pristop po Galerkinu. Privzete so bile enakovredne elastične in vztrajnostne lastnosti, vpliv sile vetra pa je bil formuliran po načelu diska aktuatorja, ki omogoča spreminjanje hitrosti vetra. Aeroelastični model je bil nato eksperimentalno validiran. Eksperimentalni sistem je vključeval vetrovnik, pospeškomer, sistem za zajem podatkov in aluminijaste lopatice. Eksperimenti so bili opravljeni z lastnimi in z vsiljenimi vibracijami. Vsiljene vibracije so bile generirane v vetrovniku, ki ustvarja hitrosti vetra od 10 m/s do 30 m/s. Zajeti signali pospeškov so bili integrirani v hitrosti in odmike, ki so predstavljeni v obliki faznih diagramov. Ti diagrami omogočajo opredelitev stabilne, nestabilne oz. kaotične dinamike lopatic.

Numerični in eksperimentalni rezultati analize dinamike lopatic razkrivajo, da je stabilnost odvisna od amplitude vzbujanja in od togosti. To pomeni, da je vedenje lopatic pri nizkih vetrnih obremenitvah stabilno, odkloni so majhni in sistem je linearen. Z naraščanjem vetrne obremenitve se nato pojavi nestabilnost, pri čemer so najbolj prizadete lopatice z nizko togostjo.

Rezultati preskusov z lastnimi vibracijami so pokazali stabilen odziv. Večji odkloni lopatic vnašajo harmonične motnje oz. nelinearnosti in fazna ravnina izkazuje motnje v kinetični in potencialni energiji vibracij.

Glavni prispevek pričujočega dela je v razvoju modela za določanje nelinearnih parametrov vibracij lopatic vetrnih turbin in identifikacijo njihove nestabilnosti pod vplivom različnih hitrosti vetra. Za model sta značilni računsko ekonomičnost in učinkovitost pri identifikaciji geometrijskih nelinearnosti.

Model bo v prihodnjih raziskavah mogoče razširiti z upoštevanjem sprememb preseka, ortotropnosti kompozitnih materialov in značilnih sekcijskih ojačitev lopatic velikih komercialnih vetrnih turbin, s tem pa bo dopolnjena ta študija nestabilnosti in nelinearnih vibracij lopatic.

**Ključne besede:** nestabilnosti, vetrovnik, nelinearne vibracije, nelinearen model, velik odklon, lopatica vetrne turbine, fazna ravnina