

6. Nestacionárne procesy

Jedným z hlavných problémov pri prevádzke veterných turbín je určenie nestacionárnych aerodynamických javov ku ktorým dochádza na profile ich lopatiek. Potrebujeme určiť nestacionárne aerodynamické zaťaženie lopatiek, výkon rotora, dynamické namáhanie a aeroelastické správanie listov turbíny.

6.1. Zdroje nestacionárneho aerodynamického zaťaženia

Vplyv uhla nábehu je výsledkom kombinácie viacerých faktorov a to sklonu lopatky, uhla zatočenia, elastického krútenia, rýchlosťi krútenia a pružného ohýbania. Pri malom uhle nábehu a plne zasiahnutom toku, sa jednotlivé zdroje v prvom rade prejavujú ako zmiernená amplitúda a ako fázy relatívnych zmien ku kvázi stacionárному zaťaženiu. Avšak pri vyšších uhloch nábehu, kedy je separácia prúdu časovo závislá môže dôjsť k vzniku javu, ktorý je známy ako dynamic stall – dynamické odtrhnutie prúdu.

Dynamic stall sa prejavuje ako značné prekročenie hodnoty vztlaku, tlaku a klopivého momentu oproti stavu pri kvázi stacionárnom prúdení. Tento jav sa spája s veľkými fázovými zmenami pri nestacionárnom zaťažení ako výsledok hysterézie pri rozvoji toku [16].

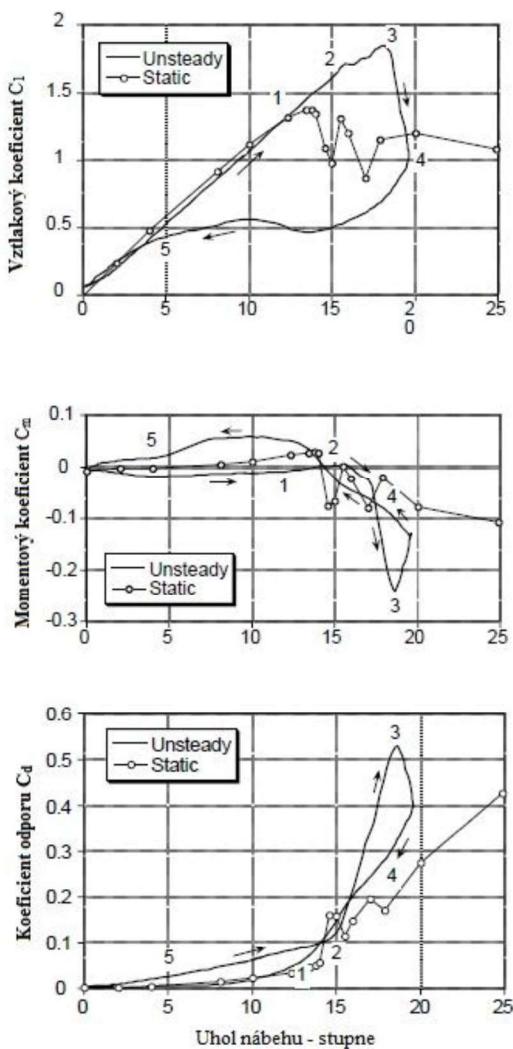
6.2. Dynamic stall

K dynamickému odtrhnutiu prúdu dochádza na profile lopatky ktorá je vystavená časovo závislému vychyľovaniu, vertikálnemu posunu, alebo inému typu nestacionárneho pohybu pričom výsledkom je, že efektívny uhol nábehu je vyšší ako normálny statický uhol nábehu. V dôsledku týchto skutočností fyzikálny popis separácie toku a jeho zastavenie je už v základoch odlišné od mechanizmu zastavenia pri tom istom profile krídla za statických alebo kvázi statických podmienok.

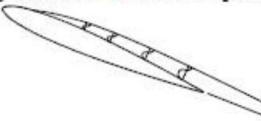
Dynamic stall čiastočne predstavuje oneskorenie nástupu separácie toku pri vyšších uhloch nábehu ako to, ktoré by malo nastať štatisticky. Je však potrebné pri tomto oneskorení zobrať do úvahy aj vírové porušenie ktoré nastane na nábehovej strane lopatky. V závislosti od dĺžky trvania vírového porušenia na profile lopatky sa bude vytvárať a zvyšovať vztlak. Vírové prúdenie nie je stabilné a vír sa rýchlo presúva nad tetivou lopatky. Toto prúdenie produkuje rýchly pohyb v zadnej časti tlakového stredu a výsledkom je veľký moment nakláňania a zvýšenie torzného zaťaženia na lopatku.

S rastom uhla nábehu dochádza k separácii prúdenia v bode tlakového gradientu na prednej strane lopatky v dôsledku pôsobenia dynamických podmienok. Experimentálnymi metódami sa zistilo, že formovanie šmykovej vrstvy je možné len na nábehovej strane lopatky v smere prúdenia, ktoré sa rýchlo zroluje a spôsobí vírenie. Po krátkom čase od vzniku vírenie opúšťa nábehovú hranu a je vedené nad povrchom krídla turbíny. Tento proces indukuje tlakovú vlnu, vztlak ako aj zaťaženia pri rovnakom uhle nábehu.

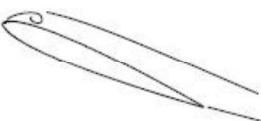
Jednotlivé kroky procesu dynamic stall sú schematicky popísané na nasledovnom obrázku (Obr. 98) [16].



Krok 1: Profil prekročil kritický uhol nábehu, v medznej vrstve vzniká reverzné prúdenie.



Krok 2: Na vodiacej hrane dochádza k formovaniu vírenia.



Krok 2-3: Vír sa presúva nad lopatkou, dochádza k budeniu vztaku a zmene tlaku.



Krok 3-4: Rast vztaku sa zastavi. Po dosiahnutí odtokovej hrany je prúdenie plne oddelené.



Krok 5: Pri opäťovnom zmenšení uhl'a nábehu sa tok opäť pripojuje k profilu krídla.



Obr. 98 Schematická ukážka nestacionárneho zaťaženia a prechodu prúdu na dvojdimentzionálnom profile krídla pri dynamickom zaťažení

Krok 1: Zobrazuje oneskorenie odtrhnutia prúdu - odpovede na redukciu tlakového gradientu, ktorý bol spôsobený nakláňaním lopatky pod vplyvom šírenia úplavu a medznej vrstvy.

Krok 2: Zahŕňa separáciu prúdu a formovanie vírov, čo spôsobí oddelovanie prúdu v prednej časti profilu krídla. Vírenie spôsobí vznik dodatočného vztaku a to počas času kedy sa prúd nachádza nad povrchom.

Krok 3: Náhle prerušenie vztakového koeficientu nastáva pri vyššom uhle nábehu ako divergencia pri momente nakláňania.

Krok 4: Po prechode víru odtokovou hranou profilu krídla je strhnutý do turbulentného úplavu po prúde, a tok nad povrchom sa stáva plne oddelený. Tento proces je spojený s náhlym poklesom vztaku, maximálnym tlakom a maximálnym klopivým momentom lopatky. Zaťaženie lopatky a uhol nábehu je približne rovnaký ako pri stacionárnom prúdení. K opäťovnému pripojeniu prúdenia by došlo len v prípade ak by sa uhol nábehu dostał späť na nízku hodnotu.

Krok 5: Predstavuje proces opäťovného pripojenia prúdu k lopatke, konkrétnie v tomto prípade je uhol nábehu menší ako 5° .

V súčasnosti sa na modelovanie javu dynamic stall využívajú poloempirické metódy a existuje viacero prístupov. Jedným z najpoužívanejších modelov je Leishman & Beddoes, ktorý neskôr rozpracoval Pierce & Hansen.

Vyriešiť problém javu dynamic stall je dôležitý najmä z pohľadu konštrukcie turbíny, aby bola schopná vydržať dané preťaženie. Časť problému simulácie dynamic stall vyplýva z nepresnosti modelovania oneskorenej separácie prúdu, ktoré je dôsledkom nestacionárnych javov.

Problém dynamic stall môžeme rozdeliť do dvoch kategórií [16]:

Nestabilné zníženie tlaku na lopatke ktoré vedie k oneskoreniu vytvorenia 3-D medznej vrstvy v porovnaní s rýchlosťou jej vytvorenia v kvázi-stacionárnych podmienkach.

Znásobený vplyv odstredivých síl a Coriolisovho javu medznej vrstvy na rotačné prúdenie. Coriolisov jav a odstredivé zrýchlenie možno vyjadriť prostredníctvom upravených rovníc pre výpočet medznej vrstvy:

Rovnica kontinuity

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial \omega}{\partial z} = 0 \quad (6.1)$$

Hybnosť v smere x

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial z} - \Omega^2 x = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (6.2)$$

Hybnosť v smere y

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + \omega \frac{\partial v}{\partial z} + 2\Omega u - \Omega^2 x = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + v \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \quad (6.3)$$

Tlakový spád

$$-\frac{\partial p}{\partial z} = 0 \quad (6.4)$$

x – smer tetivy profilu krídla

y – dĺžka rozpätia

z – kolmica k profilu krídla

$\Omega^2 x$ - odstredivé zrýchlenie

$2\Omega u$ – Coriolisove zrýchlenie.

6.3. Redukovaná frekvencia a čas

Redukovaná frekvencia a redukovaný čas patria k jedným zo základných parametrov ktoré popisujú nestacionárne aerodynamické prúdenie a správanie profilu krídla. Redukovaná frekvencia sa používa na popis stupňa rovnováhy. Pri popise vychádza z bezrozmerných Navier-Stokesových rovníc. Ak použijeme dimenzionálnu analýzu môžeme túto funkciu zapísť ako [16]

$$\frac{F}{\rho V^2 c^2} = f \left(\frac{\rho V c}{\mu}, \frac{V}{a}, \frac{\omega c}{V} \right) = f(Re, M, k) \quad (6.5)$$

F – výsledná sila

c – tetiva profilu krídla

ω – oscilácia pri danej uhlovej frekvencii

V – rýchlosný tok

Za normálnych podmienok je redukcia frekvencie popísaná v podmienkach polovice tetivy lopatky čiže

$$b = \frac{c}{2} \quad (6.6)$$

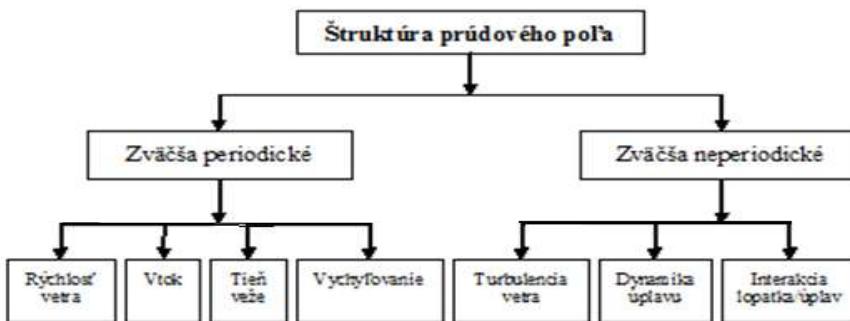
a teda

$$k = \frac{\omega b}{V} = \frac{\omega c}{2V} \quad (6.7)$$

Pre $k = 0$ hovoríme o stacionárnom prúdení, pri $0 \leq k \leq 0,05$ ide o kvázi stacionárne prúdenie. Zvyčajne ak je redukovaná frekvencia väčšia ako 0,05 považuje sa prúdenie za nestacionárne.

6.4. Prejavy nestacionárnych aerodynamických efektov na veterných turbínach

Veľmi dôležitým aspektom, ktorý ovplyvňuje prejavy nestacionárnych aerodynamických procesov na veterných turbínach je ich samotná konštrukcia. Turbíny sú väčšinou prevádzkované v relatívne nestacionárnom prostredí. Jednotlivé zdroje nestacionárneho prúdenia sumarizuje obr. 8 [16].



Obr. 99 Prehľad zdrojov aerodynamického zaťaženia veternej turbíny

Jedným z dôležitých aspektov je kvantifikácia nestacionárneho prúdenia v danom prúdovom poli. Zatial' čo porušenia toku môžu mať aperiodickú a prechodnú povahu sú vhodné na charakterizovanie nestacionarity [16] [12] [10]..

Vďaka typickým nízkym rýchlosťam rotácie veterných turbín a odchýlok sa očakáva redukovanie frekvencie a to obzvlášť v prípade keď sa lopatky hýbu dovnútra pozdĺž ich hrán v smere od špičky [16] [12] [10].

Uvažujme že dôjde k redukcii frekvencie v spojitosti s tokom na radiálnom polomere počas vychylovania toku. Ak uhol vychýlenia je γ potom redukovanú frekvenciu spojenú s fluktuáciou rýchlosťi môžeme vyjadriť ako

$$k = \frac{\Omega c}{2(\Omega Rr + V_\infty \sin \gamma)} = \left(\frac{1}{\sin \gamma / X_{TSR}} \right) \frac{c}{2R} \quad (6.8)$$

ΩRr - rotačná rýchlosť

X_{TSR} – pomer obvodovej rýchlosťi

Typická hodnota pomeru R/c je okolo 10 pre veterné turbíny s nízkym výkonom. Pre $k < 0.05$ alebo pre približnú hodnotu sa tok môže považovať za stacionárny alebo kvázi stacionárny.

6.5. Špecifické nestacionárne efekty na veterných turbínach

- *Zmeny rýchlosťí vetra* – Skúsenosti potvrdzujú že vietor nevanie konštantnou rýchlosťou a v kombinácii s relatívne nízkou rýchlosťou indukovanou veternovou turbínou zmierňuje fluktuácie rýchlosťi vetra, ktoré môžu významne ovplyvniť uhol nábehu. Tento jav môže spôsobiť nežiaduce kolísanie výkonu turbíny. Vplyvom jeho pôsobenia taktiež dochádza k výkyvom a fázovým zmenám síl, v porovnaní so silami, ktoré by pôsobili pri kvázi-stacionárnych podmienkach. Zmena rýchlosťi spôsobuje oneskorenie v rozvoja toku ako odpovede na prúdenie a v prípade rotora bude potrebných pre rozbeh viac ako 10 otáčok lopatiek [16] [12] [10]..
- *Rýchlosný gradient vetra* – Veterné turbíny sú prevádzkovane v podmienkach hraničnej vrstvy atmosféry s výraznými gradientmi rýchlosťi. V časti úplavu, ktorá je bližšie k zemskému povrchu je rýchlosť prúdenia nižšia ako vo vyšších častiach, to vedie k nejednotnosti uhla nábehu nad diskom turbíny [16] [12] [10]..
- *Nestacionárne fluktuácie rýchlosťi pri vychýlení toku* – K veľkým nestacionárnym zmenám v rýchlosťiach bude dochádzať vždy pri vychýlení turbíny. Obyčajne k tomu dôjde v dôsledku toho, že natáčací mechanizmus nie je schopný dostatočne nasledovať prúdenie vetra, aby sa dosiahlo jeho dokonalé zachytenie po celý čas. Nízka obvodová rýchlosť turbíny znamená veľké odchýlky od axiálneho toku a to aj napriek tomu že uhol nábehu ostáva relatívne konštantný [16] [12] [10]..
- *Nestacionárny indukčný efekt úplavu* – Zmena aerodynamických podmienok s časom má vplyv na intenzitu a miesto vírenia v smere prúdenia úplavu. Tento proces má opakujúcu tendenciu, závisí na predchádzajúcom zaťažení lopatiek. Prejavuje sa ako oneskorenie vtoku na disk rotora [16] [12] [10]..
- *Miestny efekt záberu* – Nestacionárne javy môžu byť výsledkom rýchlosťi prechodu vzduchu cez rotujúce lopatky. Kvôli relatívne nízkej rotačnej rýchlosťi lopatiek, miestnemu uhlu zatočenia toku a následnému vychylovaniu turbíny môže dôjsť k ich výraznému zosilneniu. Pri zachytení toku platí zásada, že nedôjde k výraznejšiemu zaťaženiu turbíny, avšak pri radiálnej zložke toku dochádza k vzniku javu známemu ako dynamic stall.
- *Efekt tienenia veže* - V prípade UP-WIND turbín (v smere prúdenia) bude výsledkom prechodu listu turbíny cez úplav alebo "tieň" zmena uhla nábehu. Pri DOWN-WIND turbínach (proti smeru prúdenia) môžeme tento jav prirovnáť prechodu listu vrtule helikoptéry. Toto vzájomné pôsobenie spôsobí zaťaženie lopatiek pre ktoré nemôžeme použiť predpoklad že sa nachádzajú v kvázi-stacionárnych podmienkach [16] [12] [10]..

Vo všeobecnosti štruktúrne zaťaženie lopatiek môže byť nestacionárne vzhľadom k ďalším vplyvom ako sú periodické zmeny gravitačnej sily na liste turbíny, otáčkam a flexibilite lopatiek.

6.6. Theodorsenova teória

Theodorsenova teória je rozšírená teória, ktorá tvorí základ pre viaceru aerodynamických modelov popisujúcich nestacionárne aerodynamické prúdenie. Profil krídla a ním budený úplav sú reprezentované vírmi v úplave, ktoré sa rozširujú na planárnom povrchu v smere po prúde na odtokovej hrane do nekonečna. Úplav je tvorený počtom obejov, ktoré sú budené na