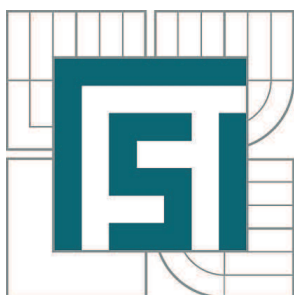


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

AERODYNAMIKA AXIÁLNÍCH VĚTRNÝCH TURBÍN

AERODYNAMICS OF AXIAL WIND TURBINES

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. JAN JUST

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. JIŘÍ ŠKORPÍK, Ph.D.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Jan Just

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Energetické inženýrství (2301T035)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Aerodynamika axiálních větrných turbín

v anglickém jazyce:

Aerodynamics of axial wind turbines

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Větrná energetika je dynamicky se rozvíjející obor výroby elektřiny. Naprosto převažujícím typem jsou axiální větrné turbíny s maximální třemi lopatkami. Jedná se tedy o lopatkový stroj bez skříně jehož základní aerodynamický návrh je o to obtížnější než je návrh klasických turbín se skříní. Proto zvládnutí této problematiky umožní studentovi širokou orientaci v problémech návrhu lopatkování turbín a turbokompresorů.

Cíle diplomové práce:

- (1) Shrnutí dosavadního stavu poznání v oblasti návrhu a aerodynamiky větrných turbín.
- (2) Návrh větrné turbíny pro konkrétní lokalitu.

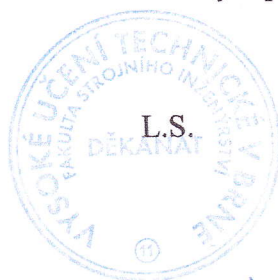
Seznam odborné literatury:

- [1] ŠKORPÍK, Jiří. Větrné turbíny a ventilátory, Transformační technologie, 2011. Brno: Jiří Škorpík, [online] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. Dostupné z <http://www.transformacni-technologie.cz/vetrne-turbiny-a-ventilatory.html>.
- [2] HAU, Erich, Wind Turbines–fundamentals, technologies, Applications, Economics, 2006. 2. vydání. Springer Berlin Heidelberg New York, ISBN–10-3-540-24240-6.
- [3] HANSEN, Martin. Aerodynamics of wind turbines, 2008. Second edition. London: Earthscan Ltd., ISBN 978-1-84407-438-9.
- [4] WILSON, R. E.; LISSAMAN, P. B. S.; WALKER, S. N. Aerodynamic performance of wind turbines, 1976. Corvallis: Oregon State Univ., Technical Report. Dostupné z [http://wind.nrel.gov/designcodes/papers/WilsonLissamanWalker_AerodynamicPerformanceOfWindTurbines\(1976\).pdf](http://wind.nrel.gov/designcodes/papers/WilsonLissamanWalker_AerodynamicPerformanceOfWindTurbines(1976).pdf)
- [5] ABBOTT, Ira, DOENHOFF, Albert. Theory of wing sections, including a summary of airfoil data, 1959. Druhé upravené vydání. New York: Dover publications, inc., ISBN-10:0-486-60586-8.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Jiří Škorpík, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/13.

V Brně, dne 23.10.2012



doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá problematikou aerodynamiky větrných turbín. V práci je odvozena základní teorie založená na zákonu zachování hybnosti, která je základním nástrojem pro návrh a výpočet větrné turbíny. Tato teorie je následně doplněna o korekční faktory a posléze použita při návrhu větrné elektrárny pro konkrétní parametry. Výpočet je proveden iteračně s využitím softwaru MATLAB, přičemž samotný kód je uveden v příloze. V práci jsou uvedeny grafy shrnující průběh jednotlivých veličin po délce lopatky. V závěrečné části jsou stručně popsány pokročilejší témata aerodynamiky cílená na determinaci dalších upřesňujících faktorů, jimiž se obor větrné energetiky zabývá v poslední době.

KLÍČOVÁ SLOVA

Aerodynamika větrných turbíny, Betz, korekce podle Glauerta, korekce podle Prandtl, mezní vrstva

ABSTRACT

This master thesis concerns about problematics of wind turbines. The document summarizes basic theory based on the law of momentum conservation which is essential tool for the design and calculation of wind turbines. The theory is complemented by number of correction factors and then used in the design of wind turbine for specific parameters. The calculation is performed iteratively using Matlab software and the actual code is given in appendix. Graphs summarizing the progress of various units along the blades are presented in the document. The final section briefly describes advanced topics of aerodynamics concerning other important factors that the field of wind energy deal with in recent time.

KEYWORDS

Wind turbine aerodynamics, Betz, correction according to Glauert, correction according to Prandtl, boundary layer

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

JUST, J. Aerodynamika axiálních větrných turbín. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 71 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Škorpík, Ph.D

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Já, Bc. Jan Just, prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně, s uvedením všech použitých pramenů a literatury, pod vedením vedoucího práce Ing. Jiřího Škorpíka, PhD.

V Brně 24.5.2013

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji svému vedoucímu Ing. Jiřímu Škorpíkovi, PhD. za cenné rady a připomínky při tvorbě diplomové práce. Dále bych rád poděkoval celé své rodině, která mi umožnila studovat a která mě podporovala v průběhu celého studia i mimo něj.

OBSAH

Úvod	13
1. Větrná energetika v současnosti	14
1.1. Podoba současných větrných elektráren	15
1.1.1. Základ	15
1.1.2. Stožár	15
1.1.3. Strojovna	16
1.1.4. Rotor	17
2. Aerodynamika – vymezení pojmů	18
2.1. Proudění plynu	18
2.2. Laminární proudění	18
2.3. Turbulentní proudění	19
2.4. Mezní vrstva	20
3. 2-D AERODYNAMIKA	21
3.1. Silové poměry	21
3.1.1. Výsledná aerodynamická síla	21
3.1.2. Vztlková síla	21
3.1.3. Odporová síla	22
3.1.4. Klopivý moment	22
3.2. Aerodynamické koeficienty	23
3.3. Odtržení mezní vrstvy	24
4. 1-D hybnostní analýza ideální větrné turbíny	26
4.1. Vliv rotace	31
5. Výpočet větrné turbíny	35
5.1. Metoda osamoceného profilu	35
5.2. Korekce podle Prandtlů	40
5.3. Korekce podle Glauerta	41
5.4. Stacionární stavy porušující ideální předpoklady	43
5.5. Vliv proudového pole za turbínou	44
5.6. Nestacionární aerodynamické děje	45

6. Návrh větrné turbíny pro danou lokalitu.....	46
6.1. Výběr vhodné lokality.....	46
6.2. Výběr vhodného aerodynamického profilu	49
6.3. Postup výpočtu větrné turbíny pro danou lokalitu	50
6.4. Kontrola počátečních odhadů	61
6.5. Výsledná podoba lopatky	61
7. Závěr	63
8. Seznam symbolů a veličin	65
9. Seznam použitých zdrojů.....	68
10. Seznam obrázků.....	70
11. Seznam příloh.....	71

ÚVOD

Snaha soudobé vyspělé společnosti je co nejvíce eliminovat škodlivý vliv lidské činnosti na životní prostředí, zejména produkci skleníkových plynů. Z pohledu sociálního tato snaha tkví v dostatečné edukaci široké veřejnosti a změně jejích návyků, z pohledu technického se jedná především o vývoj nových, popř. modernizaci stávajících zařízení a postupů s cílem snižování energetické náročnosti výroby a její ekologizace, maximalizování účinnosti chodu produktu. Na poli energetiky tomu není jinak.

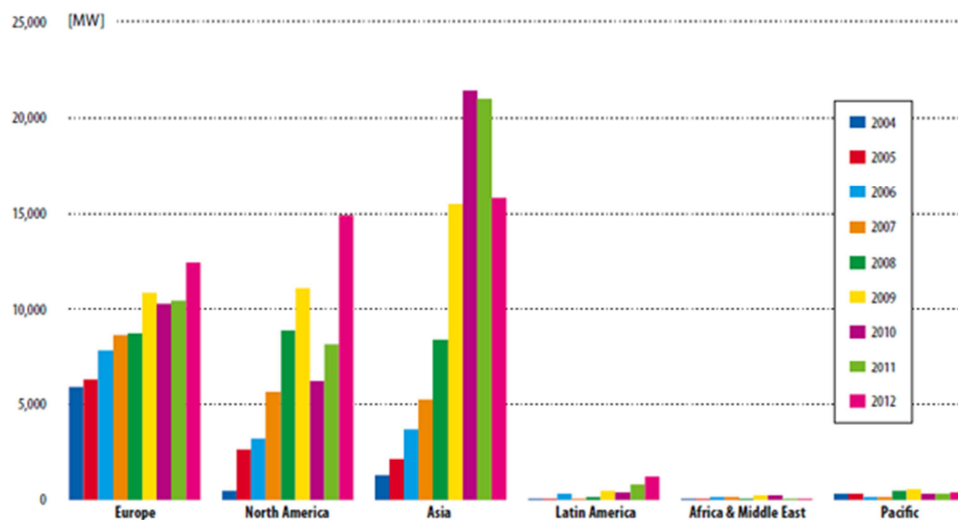
Poptávka energie ve světových regionech stále stoupá. Energie se stala velmi cennou obchodovatelnou surovinou, která bezesporu hraje velmi významnou strategickou roli a která má přímý vliv na ekonomiku každého státu. Energetická nezávislost každé země je pak přirozeně úzce spjata se surovinami vstupujícími do procesu výroby elektrické energie. Možnost zajištění soběstačné stabilní dodávky využívaných komodit je pak věcí ryze geografickou. S přihlédnutím i k tomuto faktu se v posledních dekádách zvyšuje podíl tzv. alternativní energie na energetickém mixu většiny vyspělých zemí. Fotovoltaické panely se stejně tak jako větrné elektrárny staly běžnou součástí krajiny. Zatímco první zmíněné transformují energii slunečního záření v ušlechtilější elektrickou energii, v druhém případě se jedná o přeměnu kinetické energie proudu vzduchu.

Princip větrné elektrárny je znám od konce devatenáctého století, kdy byla větrná turbína poprvé použita k výrobě elektrické energie. V počátku vývoje větrných elektráren byly větrné turbíny využívány výhradně v off-grid systémech, později dochází ke snaze o připojení k centrálním distribučním sítím. Dodnes se v odlehklých oblastech využívá výhod větrných elektráren k lokální produkci elektrické energie především jako doplňkový zdroj konvenčních agregátů. Konstrukce větrných turbín doznala od počátku svého vývoje značných změn. Soudobé větrné turbíny jsou nejčastěji stroje s vysokou nosnou věží s otočnou gondolou zajišťující ideálně pravý úhel mezi proudem vzduchu a rovinou rotace lopatek rotoru, jež se otáčejí kolem horizontální osy rotace. K otáčení gondoly slouží pomocné elektromotory automaticky ovládané systémem, který nepřetržitě sleduje směr a rychlost větru.

Největším vývojem pak přirozeně prošla aerodynamika lopatek rotoru, jíž se tato práce zabývá a jejíž výpočet je uveden v příslušných kapitolách. Především díky poznatkům z leteckého průmyslu byly v počátcích konstrukce a provozu moderních větrných turbín používány aerodynamické letecké profily, které jsou následně optimalizovány pro vyšší náběžné úhly často přítomné při chodu větrných turbín. Tato práce shrnuje a vysvětluje základní hybnostní teorii, jíž se využívá právě při aerodynamickém výpočtu větrných turbín a jež je následně použita pro aerodynamický návrh větrné elektrárny pro lokalitu s konkrétními parametry.

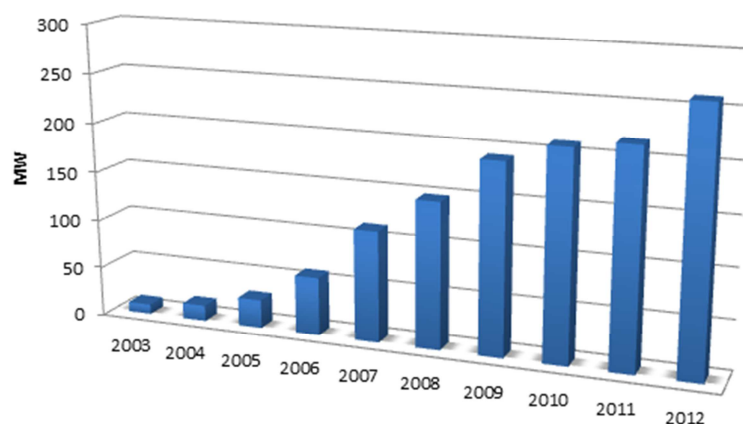
1. VĚTRNÁ ENERGETIKA V SOUČASNOSTI

Rostoucí ceny fosilních paliv a jejich dopad na životní prostředí vytvořily vhodné podmínky pro uplatnění větrných elektráren, které se staly energetickým hitem současné doby v celosvětovém měřítku. Rostoucí trend ve světových regionech lze pozorovat ze statistiky dle obrázku 1.



Obr. 1 Roční přírůstky instalovaného výkonu v regionech v letech 2004 – 2012 [1]

Na poli české energetiky tomu není jinak. Odsouhlasením zákona o podpoře a využívání obnovitelných zdrojů v roce 2005 se větrná energetika stala za mohutné státní podpory dynamickým oborem s vhodným investičním prostředím a instalovaný výkon ve větrných elektrárnách vzrostl v letech 2003 – 2012 více než desetinásobně.



Obr. 2 Celkový instalovaný výkon ve větrných elektrárnách v ČR [1]

Prudký nárůst podílu větrné energetiky na českém energetickém mixu je oproti Západní a Severní Evropě poněkud opožděn. Vzhledem k mnohonásobně většímu potenciálu a tradici ve využívání větrné energie se především Dánsko a Holandsko stali lídry v tomto oboru již v 70. letech 20. století. Zatímco v České republice byl podíl větrné energie na státním energetickém mixu přibližně 1,1% (v roce 2012, [1]), v Dánsku se dle dostupných statistik procento instalovaného výkonu ve větrnících zvýšilo na hodnotu 24,1% (v roce 2008, [2]) s výhledem až 50% podílu do roku 2020. Přirozeně je pak právě Dánsko hlavním držitelem know-how konstrukce a samotné technologie výroby jednotlivých celků současných větrných elektráren.

1.1. Podoba současných větrných elektráren

Současná větrná elektrárna je nejčastěji stroj s horizontální osou rotace. Vzhledem ke značné technické komplikovanosti jednotlivých částí větrné elektrárny jsou níže uvedeny pouze stručné charakteristiky každé z nich.

1.1.1. Základ

Stavbu základu větrné elektrárny vždy předchází důkladný geologický průzkum podloží. V případě umístění větrné elektrárny do vnitrozemí je konstrukce ustavena do ocelového kruhu s otvory pro armování a kabeláž, tzv. fundamentu, který je umístěn na základové betonové desce. Přesnost vodorovného ustavení fundamentu je zajištěna distančními šrouby, přičemž povolená tolerance vodorovného ustavení je přibližně 1mm. [1] Následuje vylití betonového základu a po vyzrání penetrační nátěr.

Například pro stavbu základu větrné elektrárny VESTAS s výkonem 2MW je použito přibližně 1104tun betonu a 40tun ocelové armovací výztuže.

1.1.2. Stožár

V případě větrných elektráren s výškou stožáru 40 – 105 m bývá stožár rozdělen do jednotlivých kuželových segmentů, které jsou k sobě přišroubovány pomocí přírub. Segmenty, nejčastěji s výškou 25m, se skládají z několika svařených prstenců.

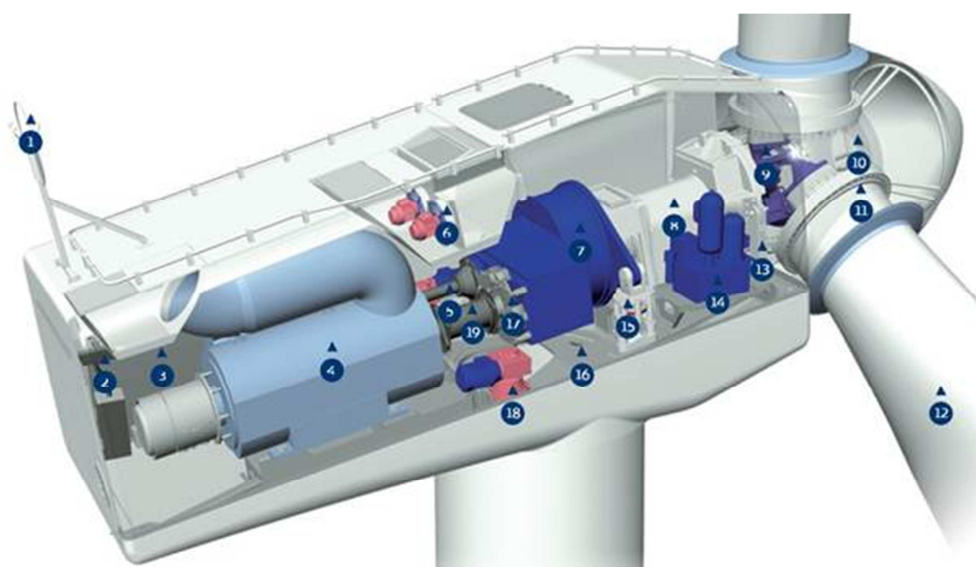
Polotovarem prstence je ocelový plech. Rozvin kuželového tvaru je vypálen, skružen na požadovaný průměr a následně podélně svařen. Takto jsou vyrobeny všechny prstence segmentu. Pro přesné finální ustavení jsou příruby sešroubovány a takto navařeny na krajní prstence sousedních segmentů. Po dokončení výroby krajních prstenců jsou ve svařovacím přípravku svařeny zbylé prstence segmentu. Po předepsané kontrole svarů je každý segment povrchově upraven. Nejprve je povrch otryskán, později je nastříknuta polyuretanová barva. [1]

Před použitím musí být segmenty vybaveny výstupovým žebříkem, kabelovým roštem a technologickou plošinou. V současné době se pro spojení uvedeného vybavení

velmi často využívá magnetů. V úvahu rovněž připadá svarové spojení popř.pomocí závitových děr, avšak ty jsou často zdrojem vrubů v konstrukci.

1.1.3. Strojovna

Uspořádání strojovny se liší dle jednotlivých výrobců. Vzhledem k velkému počtu mechanických částí a použitých technologií budou uvedeny pouze jmenovitě dle popisu obrázku 3.



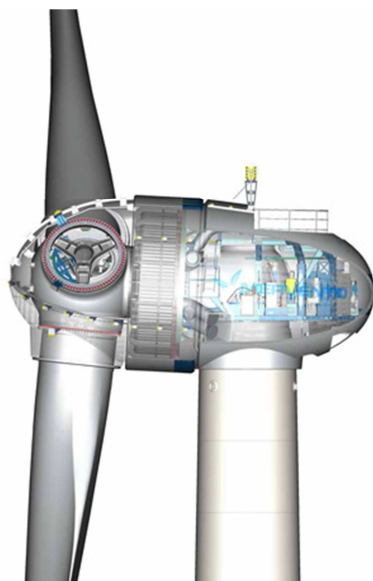
Obr. 3 Schéma strojovny větrné elektrárny VESTAS V52 [1]

Popis obrázku: 1 – ultrazvukový anemometr, 2 – servisní výtah, 3 – VMP regulátor s konvertorem, 4 – asynchronní generátor OptiSpeed, 5 – hydraulický válec natáčení rotorových listů, 6 – ventilátory chlazení, 7 – převodovka, 8 – hlavní hřídel, 9 – systém natáčení rotorových listů, 10 – rotorová hlava, 11 – ložisko rotorového listu, 12 – rotorový list, 13 – systém aretace rotoru (pro servisní účely), 14 – hydraulický agregát, 15 – držák převodovky zachycující kroučící moment, 16 – nosný rám strojovny, 17 – mechanická kotoučová brzda, 18 – pohon natáčení strojovny větrné elektrárny, 19 – kompozitová gondola větrné elektrárny:

Nejčastější uspořádání strojovny je demonstrováno na obr. 3. Hlavní hřídel (8) přenáší veškerý výkon od rotoru větrné turbíny do převodovky (7). Otáčky větrných turbín se pohybují v intervalu 5-20 ot/min, zatímco pracovní otáčky generátoru jsou 1000, 1500 či 3000 ot/min. Z uvedeného vyplývá požadavek na značný převodový poměr a přenesení často více než megawattového výkonu. Tyto požadavky splňuje několikastupňová planetová převodovka, jejíž přesné uspořádání se může lišit dle výrobce. Převodovka je spojena s generátorem (4) jednou či dvěma sousedními hřídeli přes spojku a mechanickou třecí brzdu (17). Zatímco spojka kompenzuje rázy vzniklé větrnými poryvy, třecí brzda je bezpečnostním prvkem zaručující okamžité zastavení rotoru. Typ použitého generátoru se rovněž liší podle výrobce. Používanými jsou jak synchronní generátory, tak asynchronní se 4póly (synchronní otáčky 1500ot./min) či 6póly (1000ot./min.). Správné natočení rotoru zajišťují samostatné elektropohony, které otáčí celou strojovnou dle pokynu řídicího systému. Strojovna je umístěna na kuličkovém ložisku, kde je na vnější kleci vytvořeno přímé ozubení. Vnější klec je součástí stožáru, vnitřní klec pak nosného

rámu strojovny. Pro zajištění požadované polohy po otočení strojovny slouží čelistové brzdy. Strojovna bývá vybavena také hydraulickými systémy (14) pro pohon veškerých použitých mechanických brzd či systému natáčení rotorových listů. [1]

V současnosti se používají rovněž větrné elektrárny bez převodovky. V takovém případě je použit mnohapólový generátor bez použití převodovky. Nevýhodou tohoto systému je nutná úprava vyrobené elektrické energie výkonovou elektronikou.



Obr. 4 Příklad větrné elektrárny bez převodovky MERVENTO [3]

1.1.4. Rotor

Hlavním úkolem rotoru větrné elektrárny je přeměna kinetické energie větru na mechanickou energii otáčivého pohybu. Fyzikálním principem této přeměny a jejími úskalími se zabývají kapitoly níže.

Současné větrné elektrárny jsou nejčastěji v provedení se třemi rotorovými listy. Tento počet je výhodný především k menšímu namáhání od gyroskopických momentů, dynamických sil a lepšímu vyvážení. Konstrukce listu rotoru větrné elektrárny je součástí know-how společnosti. Rotorový list je vyráběn nanášením vrstev kompozitního materiálu a jeho nasycováním příslušným pojivem. Počet nanesených vrstev a jejich tloušťka, stejně tak jako směr vláken jednotlivých vrstev jsou předmětem pevnostních výpočtů, v dnešní době zejména metodou konečných prvků. Uvnitř rotorového listu je nosník přenášející hlavní zatížení. Finální tvar listu je dosažen nanášením vrstev do formy, která je negativem výsledného tvaru. Vzhledem k rozměrům listu je forma složena z přesně opracovaných menších dílců spojených v jeden celek. Spojení listů k rotorové hlavě je provedeno pomocí pevnostních šroubů, které jsou zalaminovány přímo do stěny listu.

2. AERODYNAMIKA – VYMEZENÍ POJMŮ

2.1. Proudění plynu

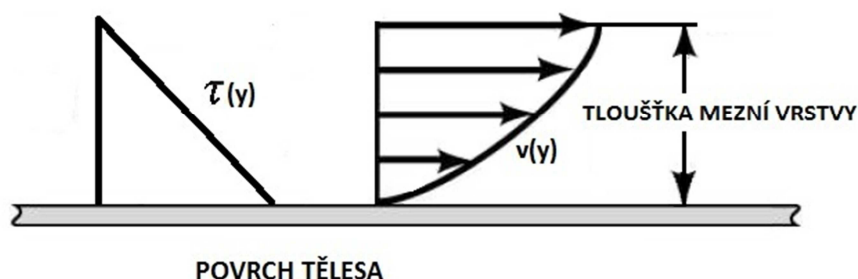
Proudění plynu lze definovat jako pohyb tekutiny v daném směru, přičemž jednotlivé částice se neustále pohybují a mění svou vzájemnou polohu. Lze tedy uvažovat, že každá částice má v daný okamžik svůj vektor rychlosti. Myšlená čára, pro jejíž každý bod platí, že tečna na tuto křivku má směr rychlosti pohybující se částice v daném bodě, se nazývá proudnice. Je-li rychlost částic ve vztažném místě proudění stálá, mluvíme o proudění stacionárním. V opačném případě se jedná o proudění nestacionární.

Z hlediska výpočtu rozeznáváme proudění ideální a reálné tekutiny. Hlavním rozdílem je uvažování viskozity reálné tekutiny způsobující odpor proti směru proudění. Oproti ideálnímu stavu již tedy nelze předpokládat, že rychlost proudění se po průřezu potrubí, popř. v okolí obtékaného profilu, nemění. Proudění reálné tekutiny dělíme na dva základní druhy – laminární a turbulentní.

2.2. Laminární proudění

U laminárního proudění jednotlivé vrstvy tekutiny po sobě pouze kloužou, čímž nedochází k významné výměně částic v normálovém směru. Tento režim proudění je přítomen při nižších rychlostech proudu. Typický příklad rychlostního profilu je uveden na obr.5. Tečné napětí mezi jednotlivými vrstvami popisuje rovnice (2.1.) dle [4].

$$\tau_{\text{LAMINÁRNÍ}} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)_{\text{LAMINÁRNÍ}} \quad (2.1)$$



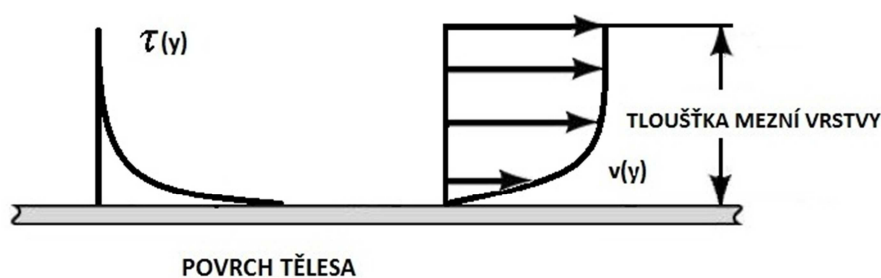
Obr. 5 Rychlostní a napěťový profil laminárního proudění

Popis obrázku: y – normálová vzdálenost od povrchu tělesa [m], $v(y)$ – rychlost proudu tekutiny v dané vzdálenosti od povrchu tělesa [$m \cdot s^{-1}$], $\tau(y)$ – smykové napětí v dané vzdálenosti od povrchu tělesa

2.3. Turbulentní proudění

V případě turbulentního proudění přítomného při vyšších rychlostech se tvoří víry, které jsou způsobeny převažujícími účinky setrvačných sil nad silou třecí. Vyrovnanější rychlostní profil u turbulentního proudění souvisí s neustálým přecházením částic z jedné vrstvy do druhé a kvzájemnému předávání jejich kinetické energie a hmoty, přičemž dochází ke změně hybnosti resultující ve vyšší brzdný účinek. Z uvedeného vyplývá, že hydraulický odpor u turbulentního proudění je vyšší než v případě laminárního režimu. Z definice rovnice (2.1.) aplikované na případ profilu turbulentního proudění je patrné, že rychlostní gradient má větší hodnotu, a tím i tečné napětí je větší než v případě laminárního režimu proudění.

$$\tau_{\text{LAMINÁRNÍ}} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)_{\text{LAMINÁRNÍ}} < \tau_{\text{TURBULENTNÍ}} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)_{\text{TURBULENTNÍ}} \quad (2.2)$$

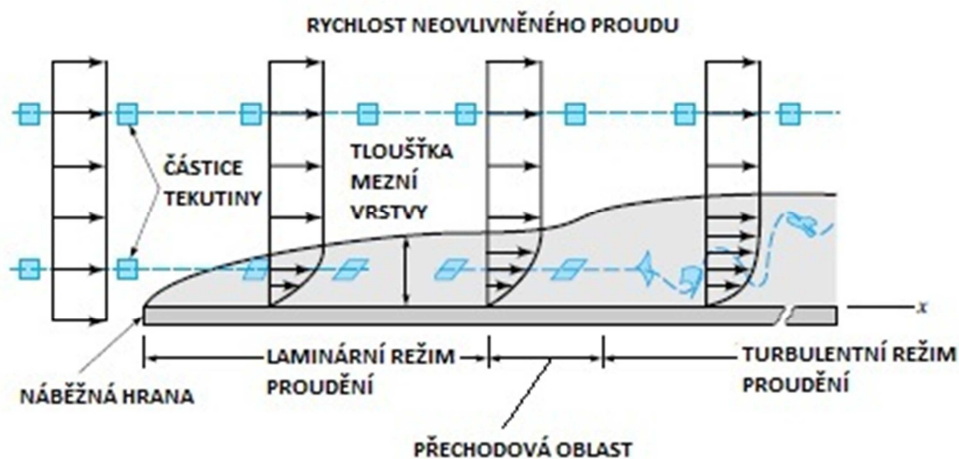


Obr.6 Rychlostní a napěťový profil turbulentního proudění

Popis obr.: y – normálová vzdálenost od povrchu tělesa [m], $v(y)$ – rychlost proudu tekutiny v dané vzdálenosti od povrchu tělesa [$m \cdot s^{-1}$], $\tau(y)$ – smykové napětí v dané vzdálenosti od povrchu tělesa

2.4. Mezní vrstva

Mezní vrstva je velmi tenká oblast okolo obtékaného tělesa, kde se značně projevují viskózní efekty způsobující rozdílné rychlosti v závislosti na normálové vzdálenosti od obtékaného povrchu. Tento rychlostní gradient dává vznik odporové síle, jež působí proti směru pohybu tělesa. Experimenty bylo prokázáno, že na povrchu tělesa je rychlost proudu v důsledku maximálního smykového napětí nulová. Tloušťka mezní vrstvy je definována jako normálová vzdálenost od povrchu obtékaného profilu, kde rychlost uvažované viskózní tekutiny je 99% rychlosti volného proudu, kde viskózní síly jsou již zanedbatelné a řešení významně neovlivňují. [5] Z hlediska geometrického je proudění v mezní vrstvě okolo aerodynamického profilu a jeho přechod z laminárního režimu proudění do turbulentního demonstrováno na obr.7. Na obrázku je také patrná přechodová oblast, kdy na jejím počátku laminární proudění přestává být stabilní a začíná se transformovat v režim turbulentní. Na konci tohoto intervalu je již proudění tekutiny v plně turbulentním režimu.

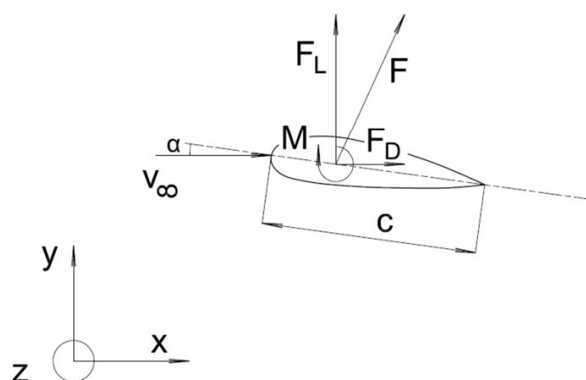


Obr. 7 Mezní vrstva [6]

3. 2-D AERODYNAMIKA

Teorie zabývající se návrhem lopatky větrné turbíny v rovině, tedy ve 2-D, vychází z úvahy nekonečně dlouhé lopatky, kde rychlost proudu vzduchu ve směru x , y (viz obr.8) je mnohonásobně vyšší než rychlost proudu vzduchu po lopatce, tedy ve směru z , kterou lze považovat za nulovou. Za tohoto předpokladu lze uvažovat, že myšlené elementy se ve směru z nijak neovlivňují. Libovolný průřez myšlené lopatky s konstantní geometrií po celé její délce je v základní formě zobrazen na obr.8.

3.1. Silové poměry



Obr. 8 Silové poměry na aerodynamickém profilu

Popis obrázku: F_L – vztlaková síla [N], F_D – odporová síla [N], F – výsledná aerodynamická síla [N], c – tětiva [m], v_∞ – rychlost proudu větru [m.s^{-1}], M – klopivý moment [N.m], α – náběžný úhel [deg]

3.1.1. Výsledná aerodynamická síla

Při obtékání asymetrického tělesa popř.symetrického tělesa asymetricky umístěného do proudu vzduchu působí na těleso obecně orientovaná aerodynamická síla F dle obr. 8.

3.1.2. Vztlaková síla

Při respektování souřadného systému zvoleného na obr.8 je vztlaková síla F_L y –složkou výsledné síly. Tato síla je vždy kolmá na relativní rychlost proudu vzduchu a je definována vztahem (3.1) dle [7]. Ze vztahu je zřejmé, že síla je definována na jednotku délky lopatky, tedy v N/m. V této počáteční úvaze není rotace lopatky uvažována a rychlost proudu větru je tedy současně relativní rychlostí.

$$F_L = \frac{1}{2} C_l \rho v_\infty^2 c \quad (3.1)$$

Fyzikální podstata vztahové síly tkví v rozdílu tlaku na horní a spodní straně aerodynamického profilu. Tento rozdíl je způsoben zakřivením trajektorie proudových vláken. Zatímco na horní straně aerodynamického profilu vzniká v důsledku větší křivosti trajektorie proudnic podtlak, na spodní straně je situace opačná – tlak vzroste nad hodnotu atmosférického tlaku a vzniká tedy přetlak. Závislost rozdílu tlaku na křivosti profilu je dána rovnicí (3.2) dle [7].

$$\frac{\delta p}{\delta r} = \frac{\rho v^2}{r} \quad (3.2)$$

3.1.3. Odporová síla

Při respektování souřadného systému zvoleného na obr.8 je odporová síla F_D x – složkou výsledné síly. Směr této síly je rovnoběžný se směrem rychlosti nabíhajícího proudu vzduchu. Její velikost je definována vztahem (3.3). Odporová síla je způsobena třením povrchu profilu proudícího vzduchu a silou danou rozdílem tlaků v x – směru, která se významně zvyšuje při odtržení mezní vrstvy, jak bude upřesněno dále. [7]

$$F_D = \frac{1}{2} C_d \rho v_\infty^2 c \quad (3.3)$$

3.1.4. Klopivý moment

K úplnému popisu silových poměrů na aerodynamickém profilu je nutno znát také klopivý moment M , který bývá stanoven k působišti sil vytyčeném na těživě c , nejčastěji ve vzdálenosti $\frac{c}{4}$ od náběžné hrany. [7] Tento moment má především vliv na pevnostní výpočty, a tudíž není předmětem aerodynamických úvah uvedených v dalších kapitolách.

$$M = \frac{1}{2} C_m \rho v_\infty^2 c^2 \quad (3.4)$$

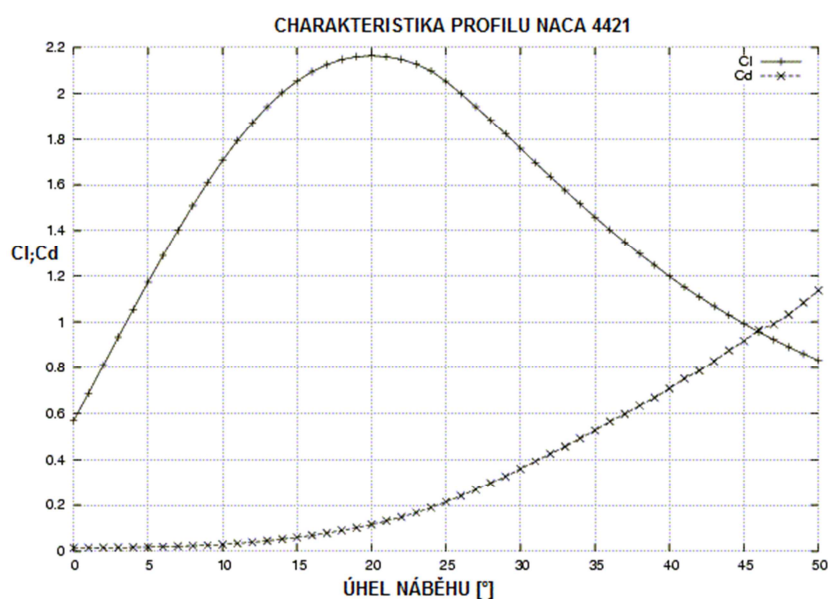
3.2. Aerodynamické koeficienty

Ke kvalitativnímu popisu výše zmíněných sil a momentu slouží vztahový koeficient, odporový koeficient a momentový koeficient, které jsou uvedeny ve výše zmíněných rovnicích. Tyto součinitele charakterizují vztah odporové a vztahové síly k dynamickému tlaku okolo zkoumaného tělesa. Při použití v oblasti větrné energetiky a letectví je nejužitečnější zobrazení těchto koeficientů v závislosti na úhlu náběhu.

Aerodynamické koeficienty jsou v oblasti větrných turbín funkcemi úhlu náběhu α a Reynoldsova čísla Re . Úhel náběhu je definován jako úhel, který svírá vektor rychlosti proudu větru v_∞ s tětvou c , jak je patrné z obr.8. Reynoldsovo číslo Re je bezrozměrná veličina poměřující účinek odporových sil k silám setrvačným, na základě čehož jsme schopni předpovědět režim proudění.

Graficky jsou příklady závislostí koeficientů C_l a C_d na úhlu náběhu α patrné z obr.9, který vychází z měření konkrétního aerodynamického profilu typu NACA 4421. Z obrázku je zřejmé, že při zvyšování úhlu náběhu dochází ke zvyšování koeficientu vztahu až do konkrétní hodnoty α , při které následně dochází ke stagnaci a snižování hodnoty, přičemž odporový koeficient vzrůstá.

Fyzikální vysvětlení pozorovaného jevu spočívá v odtržení mezní vrstvy na horní straně aerodynamického profilu, což je doprovázeno značným poklesem hodnoty vztahového koeficientu, a růstem koeficientu odporového. Ve snaze maximalizovat poměr $\frac{C_l}{C_d}$ je zřejmé, že hlavní důraz je kladen na snížení odporového koeficientu, a tudíž i eliminaci odtržení mezní vrstvy.

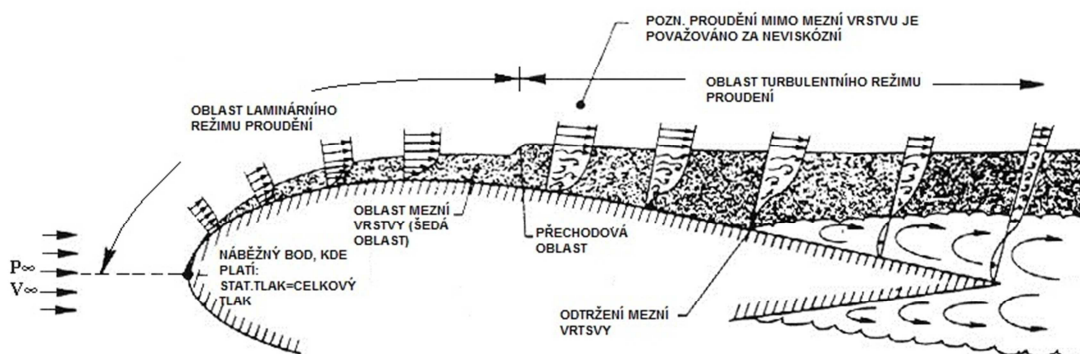


Obr. 9 Závislost odporového a vztahového koeficientu na úhlu náběhu pro aerodynamický profil NACA 4421 [24]

3.3. Odrážení mezní vrstvy

Odrážení mezní vrstvy je způsobeno ztrátou kinetické energie proudu v důsledku tření. V tomto případě účinky setrvačných sil převažují a tlakové síly již nestačí k „přitlačení“ proudu na plochu obtékaného tělesa. Mezi odkloněnou proudnicí a stěnou dochází k víření tekutiny, což odebrává hlavnímu proudu energii. Odrážení mezní vrstvy úzce souvisí s drsností materiálu povrchu, Reynoldsovým číslem, křivostí profilu, viskozitou tekutiny, původní mírou turbulence v nabíhajícímu proudu,... [8]

Na náběžné hraně existuje tzv. náběžný bod, viz obr.10, který rozděluje tok vzduchu na část, která teče přes horní část profilu, a na část, která obtéká aerodynamický profil zespodu. V tomto bodě platí, že rychlost proudícího vzduchu je rovna nule. [9] Při aplikování Bernoulliho rovnice v dostatečné vzdálenosti od obtékaného profilu (mimo mezní vrstvu, kde proudění lze považovat za nestlačitelné) je zřejmé, že při nulové rychlosti roste statický tlak na maximum. Vzhledem k rozdílným tlakům se proud vzduchu obtékající přes náběžnou hranu urychluje. Z uvedeného vyplývá, že tlakový gradient v podélném směru x (po těživě) je záporný, avšak jeho hodnoty jsou na horní i spodní straně profilu rozdílné. Na horní straně je, s přihlédnutím k většímu zakřivení povrchu, absolutní hodnota gradientu větší než v případě méně zakřiveného povrchu na straně opačné. Tlak za odtokovou hranou však musí být stejný pro oba proudy, což musí přirozeně vést ke změně znaménka tlakového gradientu ve specifickém místě na horní straně profilu. [7] Právě oblast, kde dochází ke změně znaménka tlakového gradientu, je pro odrážení mezní vrstvy nejnebezpečnější.



Obr. 10 Odrážení mezní vrstvy [10]

Popis obr: v_∞ - neovlivněná rychlost proudu tekutiny [$m \cdot s^{-1}$], p_∞ - neovlivněný tlak proudu tekutiny [$m \cdot s^{-1}$]

Z hlediska odrážení mezní vrstvy tedy rozeznáváme příznivý a nepříznivý tlakový gradient.

Příznivý tlakový gradient

Snižuje riziko vzniku odtržení mezní vrstvy, způsobuje její ztenčení a podporuje laminární proudění. Gradient je uvažován po těživě ve směru x .

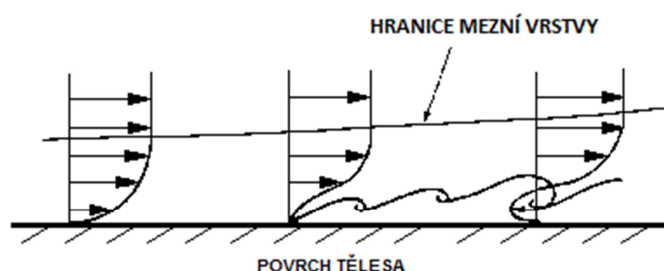
$$\frac{\partial p}{\partial x} < 0 \quad (3.5)$$

Nepříznivý tlakový gradient

Zvyšuje riziko vzniku odtržení mezní vrstvy, zvyšuje její tloušťku a podporuje turbulentní proudění.

$$\frac{\partial p}{\partial x} > 0 \quad (3.6)$$

Vývoj rychlostního profilu v mezní vrstvě při přechodu z nižšího tlaku do vyššího je reprezentován na obr.11. Zjednodušeně lze říci, že zatímco neovlivněná část proudu tekutiny má dostatek hybnosti „překonat“ vyšší tlak, hybnost proudu blízko povrchu tělesa již dostatečná není a dochází tak k reverznímu proudění za vzniku vírů. Ty způsobují významnou ztrátu energie, ztrátu sací schopnosti a signifikantní propad vztahové síly. [11]



Obr. 11 Vývoj rychlostních profilů v mezní vrstvě při přechodu z nižšího tlaku do vyššího [11]

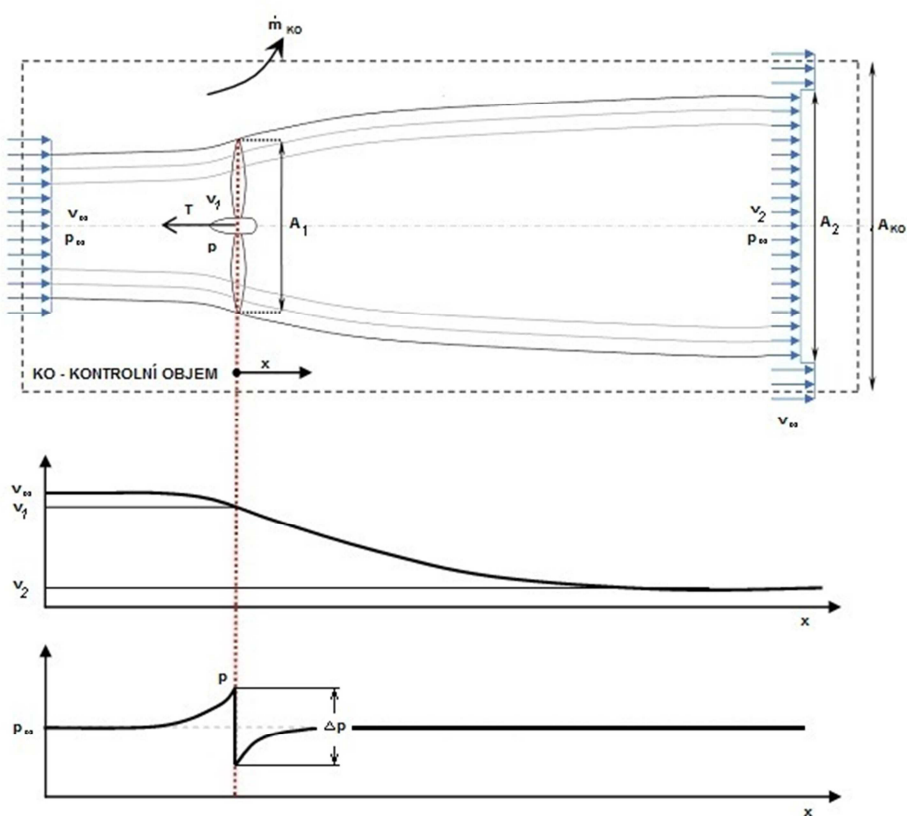
Pozn. Tvar rychlostního profilu vychází z řešení Navier-Stokesovy rovnice aplikované na povrch tělesa za předpokladu nulové rychlosti.

Odtržení mezní vrstvy a potíže s tím spojené mohou být částečně eliminovány. Je-li v bodě na obtékaném profilu, kde tekutina vstupuje do oblasti vyššího tlaku, režim proudění laminární, mezní vrstva se s největší pravděpodobností odtrhne. V případě turbulentního proudění je situace odlišná. Těsně za přechodovou oblastí, kde dochází k rozvoji turbulentního proudění, má tekutina blízko povrchu tělesa schopnost zabránit odtržení mezní vrstvy v důsledku vyšší hybnosti. Je tedy nadmíru důležité, aby v bodě změny znaménka tlakových gradientů byl režim proudění mezní vrstvy plně turbulentní. Tato nutnost může být zajištěna změnou drsnosti povrchu zajišťující požadovaný režim proudění v daném bodě.

4. 1-D HYBNOSTNÍ ANALÝZA IDEÁLNÍ VĚTRNÉ TURBÍNY

Základní princip fungování větrné turbíny spočívá ve zpomalování proudu vzduchu, tedy transformaci části jeho kinetické energie na mechanickou práci rotoru. V praxi však není možné, z důvodů zmíněných v následujících pasážích této kapitoly, zpomalit proud vzduchu na nulu a využít tak veškerou kinetickou energii proudu vzduchu. Stanovením využitelného podílu, tzv. Betzova limitu, se zabývá právě teorie ve zjednodušeném jednorozměrném systému.

Betzova studie vychází z několika předpokladů. Rotor turbíny je nahrazen infinitezimálně tenkým propustným diskem s nulovým třením, tedy nezpůsobuje žádný odpor proudící tekutině. Rychlostní profil na disku je ideálně rovnoměrný, tekutina je neviskózní, nestlačitelná a proudění je považováno za izoentropické. Tlak má po obou stranách rotoru v dostatečné vzdálenosti od něj stejnou hodnotu a žádné vnější působící síly nejsou uvažovány. [12] Průběh tlaku a rychlosti, stejně tak jako uvažovaná geometrie, je reprezentován na obr.12 .



Obr. 12 Grafické znázornění průběhu tlaku a rychlosti v 1-D systému [12]

Popis obrázku: v_{∞} - neovlivněná rychlost proudu tekutiny [m.s^{-1}], v_1 - rychlost proudu tekutiny v místě rotoru [m.s^{-1}], v_2 - rychlost proudu tekutiny v dostatečné vzdálenosti za rotorem [m.s^{-1}], p_{∞} - tlak v dostatečné vzdálenosti od rotoru [Pa], A_1 - plocha rotoru [m^2], A_2 - plocha ovlivněného proudu tekutiny kolmá na směr rychlosti v dostatečné vzdálenosti za rotorem [m^2], A_{KO} - plocha kontrolního objemu kolmá na směr rychlosti proudu tekutiny [m^2], T - tahová síla [N], $\dot{m}_{KO}$ - hmotnostní tok odcházející z kontrolního objemu po stranách

Tahová síla T je určena rozdílem tlaků po obou stranách disku.

$$T = \Delta p \cdot A_1 \quad (4.1)$$

Rozdíl tlaku Δp lze vyjádřit z Bernoulliho rovnice aplikované mezi dvěma body, a to mezi bodem v dostatečné vzdálenosti před uvažovaným diskem a bodem těsně před diskem. Stejně tak lze vyjádřit rovnici pro bod těsně za diskem a bod v dostatečné vzdálenosti za ním.

$$p_\infty + \frac{1}{2}\rho v_\infty^2 = p + \frac{1}{2}\rho v_1^2 \quad (4.2)$$

$$p - \Delta p + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = p_\infty + \frac{1}{2}\rho v_2^2 \quad (4.3)$$

Dosazením rovnice (4.2) do (4.3) rovnice získáme rozdíl tlaků dle rovnice (4.4)

$$\Delta p = \frac{1}{2}\rho(v_\infty^2 - v_2^2) \quad (4.4)$$

Při uvažování zjednodušujících předpokladů je rovnice (4.5) odvozena z integrálního tvaru rovnice vyjadřující zákon zachování hybnosti aplikované na kontrolní objem vyznačený dle obr.12.

$$\rho v_2^2 A_2 + \rho v_\infty^2 (A_{KO} - A_2) + \dot{m}_{KO} v_\infty - \rho v_\infty^2 A_{KO} = -T \quad (4.5)$$

Neznámá $\dot{m}_{KO}$ pak může být vyjádřena na základě zákona zachování hmoty.

$$\rho v_\infty A_{KO} = \rho v_2 A_2 + \rho v_\infty (A_{KO} - A_2) + \dot{m}_{KO} \quad (4.6)$$

Odkud:

$$\dot{m}_{KO} = \rho(v_\infty - v_2)A_2 \quad (4.7)$$

Ze zákona zachování hmoty lze také odvodit vztah mezi plochou A_1 a A_2 z rovnice

$$\dot{m} = \rho v_1 A_1 = \rho v_2 A_2 \quad (4.8)$$

Kombinací rovnic (4.5), (4.7) a (4.8) lze odvodit výsledný vztah pro tahovou sílu T .

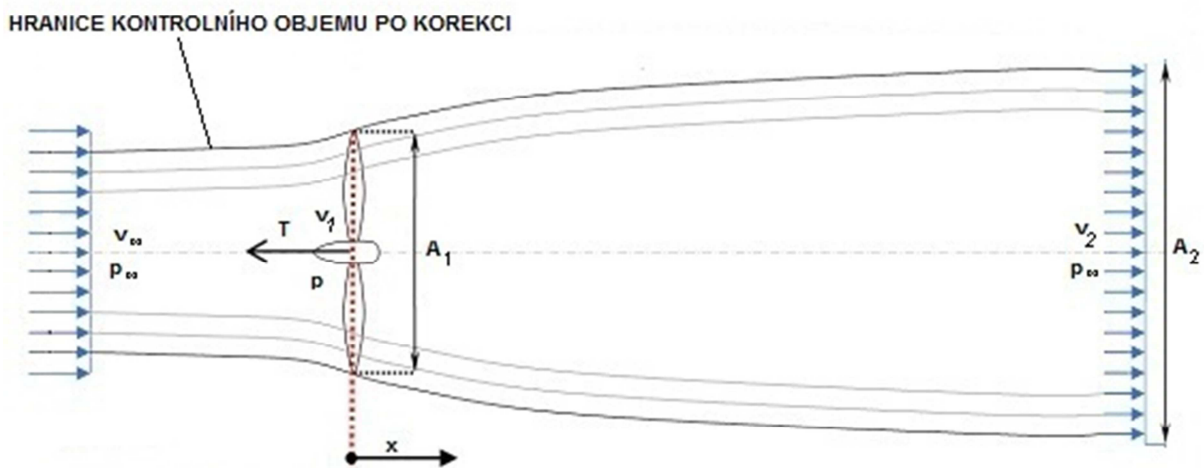
$$T = \rho v_1 A_1 (v_\infty - v_2) = \dot{m}(v_\infty - v_2) \quad (4.9)$$

Srovnáním vztahu (4.1) s dosazením rovnice (4.4) se vztahem (4.9) lze vyjádřit rychlost těsně za diskem rovnicí.

$$v_1 = \frac{1}{2}(v_\infty + v_2) \quad (4.10)$$

Z předchozí rovnice vyplývá, že rychlost proudu tekutiny těsně za diskem je průměrem neovlivněné rychlosti v dostatečné vzdálenosti před diskem a rychlosti zpomaleného proudu za diskem. Vzhledem k obtížnému stanovení hmotnostního toku

směřujícího ze stran kontrolního objemu je výhodnější stanovit kontrolní objem ve tvaru okrajových proudnic, viz obr.13.



Obr. 13 Geometrie kontrolního objemu po korekci [12]

Popis obrázku: v_∞ - neovlivněná rychlost proudu tekutiny [m.s^{-1}], v_1 - rychlost proudu tekutiny v místě rotoru [m.s^{-1}], v_2 - rychlost proudu tekutiny v dostatečné vzdálenosti za rotorem [m.s^{-1}], p_∞ - tlak v dostatečné vzdálenosti od rotoru [Pa], A_1 - plocha rotoru [m^2], A_2 - plocha ovlivněného proudu tekutiny kolmá na směr rychlosti v dostatečné vzdálenosti za rotorem [m^2], T - tahová síla [N]

V tomto případě je již hmotnostní tok opouštějící oblast kontrolního objemu teoreticky nulový. Po opětovné aplikaci zákona zachování hybnosti na nový kontrolní objem je odvozena rovnice (4.11), kde jsou účinky okolního tlaku na vymezený objem vyjádřeny silou $F_{tlaková}$. Ta, jak může být dokázáno dosazením za T z rovnice (4.9), je nulová.

$$T = \rho v_1 A_1 (v_\infty - v_2) + F_{tlaková} \quad (4.11)$$

Ze zákona zachování energie lze vyjádřit vztah pro výkon větrné turbíny.

$$P = \frac{1}{2} \dot{m} (v_\infty^2 - v_2^2) = \frac{1}{2} \rho v_1 A (v_\infty^2 - v_2^2) \quad (4.12)$$

Pro stanovení rychlosti v_1 je účelné definovat axiální faktor a , který vyjadřuje závislost zmíněné rychlosti na rychlosti počáteční v_∞ dle rovnice (4.13). Dosazením do rovnice (4.10) lze pak také vyjádřit rychlost na konci kontrolního objemu jako funkci rychlosti vstupní v_∞ dle rovnice

$$v_1 = (1 - a)v_\infty \quad (4.13)$$

$$v_2 = (1 - 2a)v_\infty \quad (4.14)$$

Po dosazení uvedených vztahů do rovnic pro výkon a sílu plyne vztah (4.15) a (4.16).

$$P = 2\rho v_{\infty}^3 a(1-a)^2 A \quad (4.15)$$

$$T = 2\rho v_{\infty}^2 a(1-a) A \quad (4.16)$$

Porovnání odvozeného vztahu výkonu větrné turbíny a výkonu teoreticky využitelného určuje výkonový bezrozměrný koeficient dle vztahu (4.17).

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho v_{\infty}^3 A} = 4a(1-a)^2 \quad (4.17)$$

Podobně lze určit i tahový koeficient srovnávající tahovou sílu ze vztahu (4.16) vůči teoreticky maximální.

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho v_{\infty}^2 A} = 4a(1-a) \quad (4.18)$$

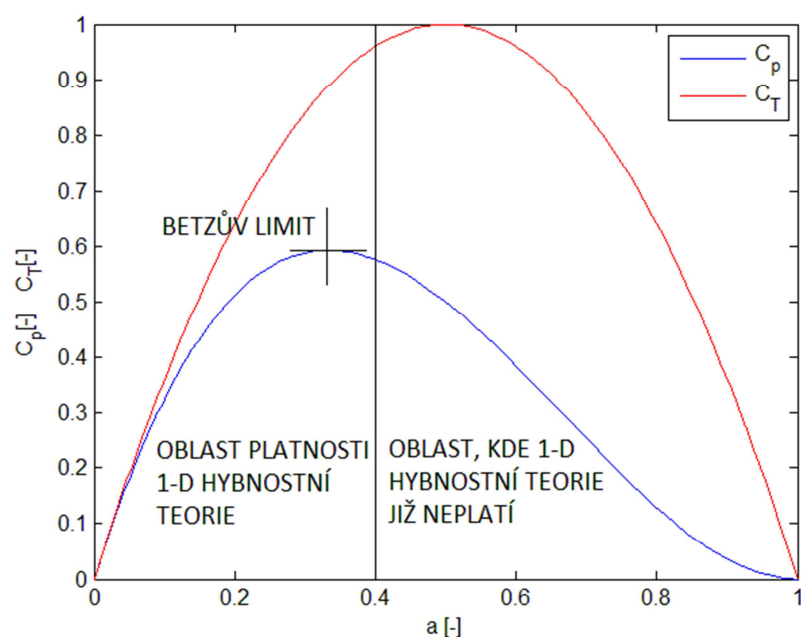
Ve snaze najít maximální C_p , tedy maximalizovat využitelný výkon, lze najít maximum této funkce, tzv. Betzův limit.

$$\frac{dC_p}{da} = 4(1-a)(1-3a) = 0 \quad (4.19)$$

$$\rightarrow a = \frac{1}{3} \quad (4.20)$$

$$\rightarrow C_{p,max} = \frac{16}{27} \doteq 0,5926 \quad (4.21)$$

Experimenty bylo zjištěno, že platnost předpokladů shrnutých na začátku této kapitoly lze v praxi aplikovat pouze na případy, kdy $a < 0,4$. [7] V opačném případě by dle rovnice (4.14) docházelo ke zpětnému proudění.

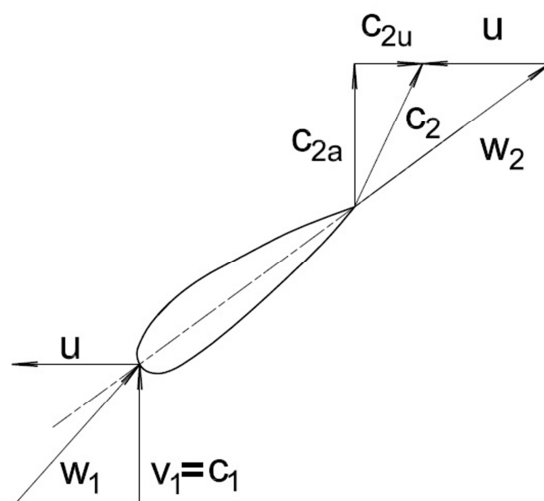


Obr. 14 Průběh bezrozměrných koeficientů C_p a C_T v závislosti na indukčním faktoru a

Omezení platnosti výše odvozené teorie lze rovněž vysvětlit tak, že při vyšším indukčním koeficientu se za větrnou turbínou projevuje značný rozdíl rychlosti ovlivněné oblasti proudu vzduchu vůči rychlosti neovlivněné okolní oblasti vně uvažovaného kontrolního objemu. Díky rozdílu rychlostí sousedních vrstev dochází k turbulencím a tvorbě víru, které přenáší hmotnostní tok, a tedy i hybnost přes hranice kontrolního objemu. Předpoklady uvedené na začátku této kapitoly jsou tímto porušeny.

4.1. Vliv rotace

V praxi není předpoklad přímočarého proudění vzduchu v původním směru za ideální větrnou turbínou splněn a listy rotoru proudění značně ovlivňují. Ze zákona akce a reakce je zřejmé, že stejnou silou jako působí vzduch na lopatku rotoru, rovněž působí lopatka na vzduch. Tato síla má stejnou velikost, pouze opačný směr. Z uvedeného pak vyplývá, že vzduch opouštějící odtokovou hranu má významnou složku rychlosti ve směru opačném proti směru rotace rotoru, jak deklaruje následující obr.15. Ze zákona zachování hmoty je patrné, že musí platit $v_1 = c_1 = c_{2a}$.



SMĚR ROTACE ROTORU

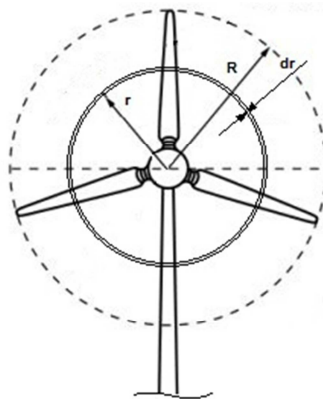
Obr. 15 Rychlosti na náběžné a odtokové hraně uvažovaného aerodynamického profilu

Popis obrázku: u – obvodová rychlost lopatky rotoru $[m \cdot s^{-1}]$, w_1 – relativní rychlost na náběžné hraně $[m \cdot s^{-1}]$, c_1 – absolutní rychlost na náběžné hraně $[m \cdot s^{-1}]$, c_2 – absolutní rychlost proudu na odtokové hraně $[m \cdot s^{-1}]$, c_{2a} – axiální složka absolutní výstupní rychlosti proudu $[m \cdot s^{-1}]$, c_{2u} – obvodová složka absolutní výstupní rychlosti proudu $[m \cdot s^{-1}]$, w_2 – relativní rychlost na odtokové hraně $[m \cdot s^{-1}]$, v_1 – rychlost proudu vzduchu dle hybnostní teorie $[m \cdot s^{-1}]$

Z pohledu zákona zachování energie zahrnujícího vliv rotace je kinetická energie proudu vzduchu přeměněna v práci větrné turbíny, kinetickou energii rotace proudu a také energii translačního pohybu za turbínou. Lze tedy psát:

$$K \cdot E_{\text{translační1}} = PRÁCE + K \cdot E_{\text{translační2}} + K \cdot E_{\text{rotační2}}$$

Z turbínové Eulerovy rovnice odvozené v příloze A plyne vztah (4.22) pro infinitezimálně tenký kontrolní objem dle obr.16. Pro omezení ztrát vlivem kinetické energie rotace proudu vzduchu dané složkou výstupní rychlosti c_{2u} by se pro stejný výkon turbíny musela zvýšit úhlová rychlost Ω , tedy i otáčky. Z této analýzy je zřejmé, že vyšší otáčky turbíny omezují ztráty a zvyšují tak účinnost turbíny.



Obr. 16 Znáznornění kontrolního objemu pro aplikaci Eulerovy turbínové rovnice

Popis obrázku: r – aktuální průměr lopatky rotoru větrné turbíny [m], R – maximální průměr lopatky rotoru větrné turbíny [m], dr – infinitezimálně tenká tloušťka kontrolního objemu [m]

$$dP = \dot{m} \Omega r c_{2u} = 2\pi r^2 \rho c_1 \Omega c_{2u} dr \quad (4.22)$$

I v tomto případě zavádíme koeficient dávající do souvislosti obvodovou složku absolutní rychlosti proudu vzduchu a rychlost rotace lopatky dle vztahu:

$$a' = \frac{\text{úhlová rychlost proudu vzduchu}}{2 \times \text{úhlová rychlost rotoru}} = \frac{\frac{c_{2u}}{r}}{2\Omega} \quad (4.23)$$

Po dosazení koeficientu a a a' lze vztah pro výkon přepsat do tvaru dle rovnice (4.24).

$$dP = 4\pi\rho\Omega^2 v_\infty a' (1-a) r^3 dr \quad (4.24)$$

Po integraci přes poloměr lopatky lze dostat celkový výkon dle vztahu (4.25).

$$P = 4\pi\rho\Omega^2 v_\infty \int_0^R a' (1-a) r^3 dr \quad (4.25)$$

Pro kvalitativní zhodnocení výkonu je vztah dosazen do rovnice pro bezrozměrný výkonový součinitel dle následujícího vztahu.

$$C_p = \frac{4\pi\rho\Omega^2 v_\infty \int_0^R a' (1-a) r^3 dr}{\frac{1}{2}\rho v_\infty^3 A} \quad (4.26)$$

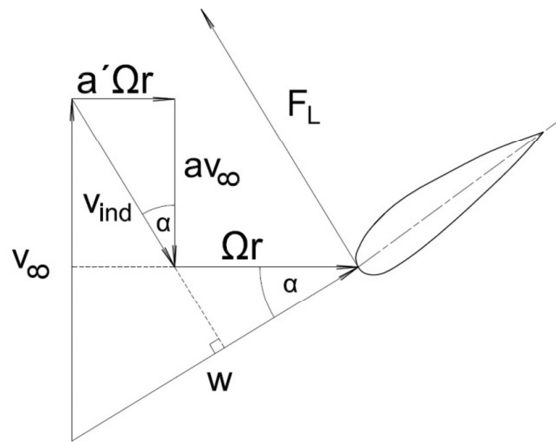
Vztah lze upravit za použití substituce $\lambda = \frac{\Omega R}{v_\infty}$, tzv. koeficientu rychloběžnosti, dávající do poměru obvodovou rychlost na konci lopatky s rychlostí proudu vzduchu a $x = \frac{\Omega r}{v_\infty}$ dávající do poměru lokální obvodovou rychlost s rychlostí proudu vzduchu. Po dosazení lze psát:

$$C_p = \frac{8}{\lambda^2} \int_0^\lambda a'(1-a) x^3 dx \quad (4.27)$$

Ve snaze najít maximum uvedeného vztahu je nutné najít maximum funkce.

$$f(a, a') = a'(1-a) \quad (4.28)$$

V případě, kdy nedochází k odtržení mezní vrstvy, jsou a a a' závislé veličiny. Jejich závislost lze odvodit z obrázku.



Obr. 17 Geometrická závislost

Popis obrázku: F_L – vztlaková síla [N], v_∞ – rychlost proudu větru [$m \cdot s^{-1}$], w – relativní rychlost větru [$m \cdot s^{-1}$], v_{ind} – indukovaná rychlost větru [$m \cdot s^{-1}$], α – náběžný úhel [deg], Ω – úhlová rychlost rotoru [$rad \cdot s^{-1}$], a – axiální indukční faktor [-], a' – radiální indukční factor, r – aktuální poloměr [m]

Z geometrických závislostí lze odvodit následující vztahy:

$$\tan \alpha = \frac{a' \Omega r}{a v_\infty} \quad (4.29)$$

$$\tan \alpha = \frac{(1-a)v_\infty}{(1+a')\Omega r} \quad (4.30)$$

Srovnáním vztahů s využitím substituce $x = \frac{\Omega r}{v_\infty}$ lze psát vztah:

$$x^2 a'(1+a') = a(1-a) \quad (4.31)$$

Ze závislosti uvedené předchozí rovnicí lze najít maximum funkce. S přihlédnutím k faktu, že a je závislé na a' , lze najít maximum dle rovnice:

$$\frac{df}{da} = (1 - a) \frac{da'}{da} - a' = 0 \quad (4.32)$$

Rovnice pak přechází ve tvar:

$$(1 + 2a') \frac{da'}{da} x^2 = 1 - 2a \quad (4.33)$$

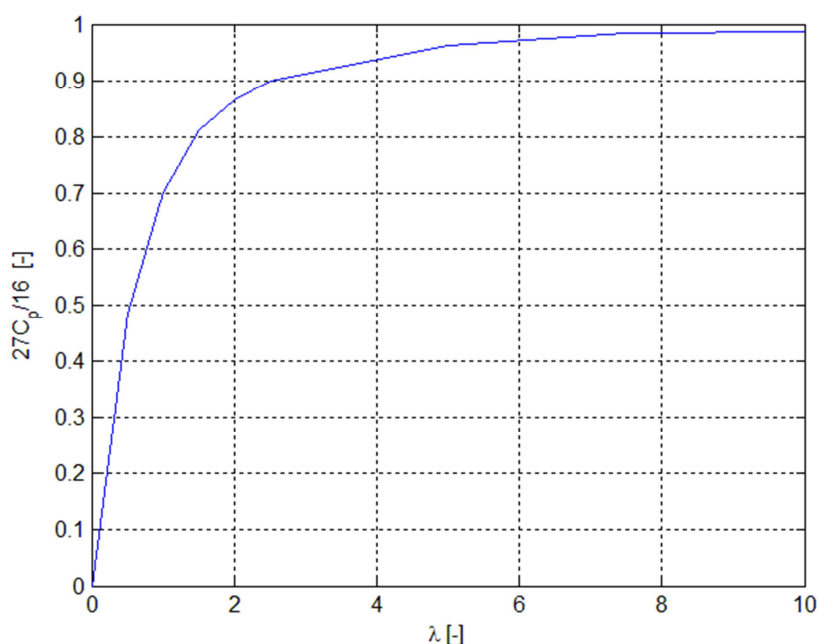
Rovnice (4.32), (4.33) v kombinaci s rovnicí (4.31) ústí ve vztah demonstrující závislost a a a' :

$$a' = \frac{1-3a}{4a-1} \quad (4.34)$$

V tuto chvíli je již možné vyjádřit výkon větrné turbíny potažmo i výkonový koeficient dle rovnice (4.27). Z definice výkonového koeficientu je zřejmé, že jmenovatel obsahuje teoretický výkon proudu vzduchu. Po zkorigování této hodnoty na hodnotu teoreticky získatelnou dle Betzova limitu lze definovat účinnost větrné turbíny dle vztahu.

$$\eta = \frac{c_p}{c_{p,max}} = \frac{27}{16} C_p \quad (4.35)$$

Závislost korigované účinnosti na koeficientu rychloběžnosti je znázorněna na obr.14:



Obr. 18 Závislost korigované účinnosti (vztaženo k Betzovu maximu) větrné turbíny na koeficientu rychloběžnosti s uvažováním rotace

5. VÝPOČET VĚTRNÉ TURBÍNY

5.1. Metoda osamoceného profilu

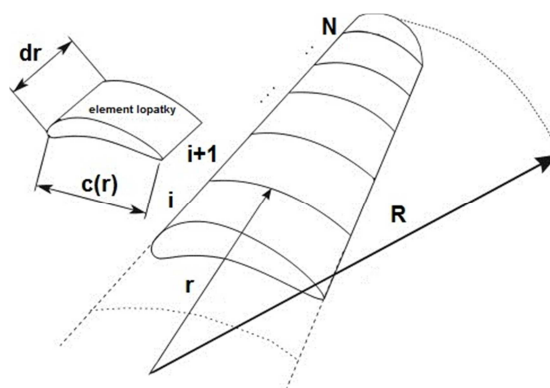
Metoda osamoceného profilu vychází z odvození uvedeného v kapitole 4. *1-D hybnostní analýza*, kde je rotor větrné turbíny uvažován jako tenký disk. Podobnost tohoto disku s reálnou větrnou turbínou tkví v rozdílu tlaku. Parametry proudu vzduchu v okolí myšleného disku jsou, za předpokladů shrnutých v kapitole 4. *1-D hybnostní analýza*, odvozeny v závislosti na indukčních faktorech a a a' . Ze zákona zachování energie je zřejmé, že tyto indukční faktory rovněž vyjadřují část energie odebrané větrnou turbínou. Parametry proudění na lopatce rotoru větrné turbíny mohou být následně vyjádřeny v závislosti na těchto indukčních faktorech.

Metoda osamoceného profilu staví na dvou základních koncepcích. První z nich, zákon zachování hybnosti, na jehož principu je odvozena tahová síla T a krouticí moment τ byl již použit v předchozích kapitolách a je rovněž uveden v příloze. Tahová síla T a krouticí moment τ vyjádřený pro infinitezimálně tenký objem na poloměru r a tloušťce dr (dle obr.16) v závislosti na indukčních faktorech bude tedy následující:

$$dT = \rho v_{\infty}^2 4a(1-a)\pi r dr \quad (5.1)$$

$$d\tau = 4a'(1-a)\rho v_{\infty} \pi r^3 \Omega dr \quad (5.2)$$

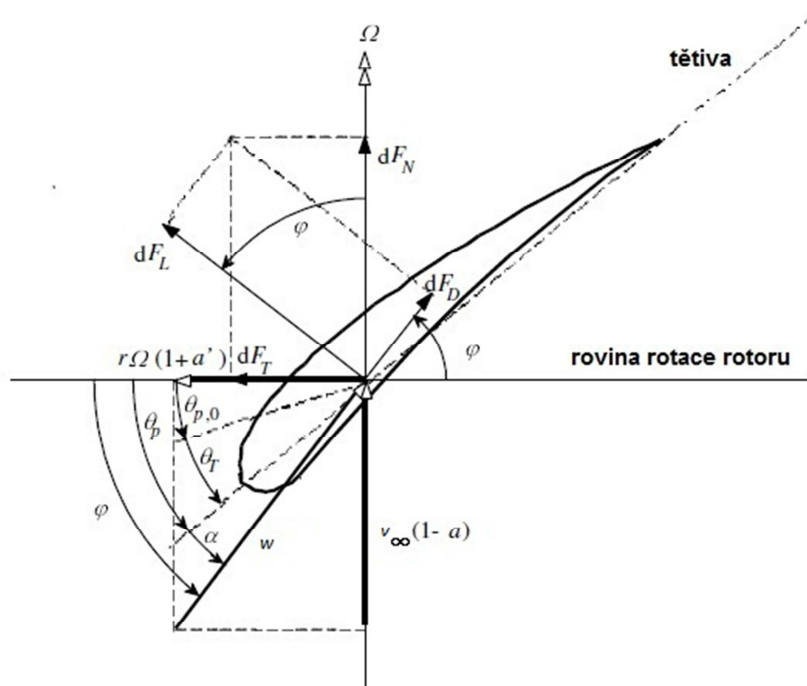
Druhá ze zmíněných koncepcí rozděluje lopatku větrné turbíny na konečný počet elementů tak, aby bylo možné vyjádřit silové poměry pro každý element zvlášť.



Obr. 19 Dělení lopatky větrné turbíny [13]

Popis obrázku: r – aktuální průměr lopatky rotoru větrné turbíny [m], R – maximální průměr lopatky rotoru větrné turbíny [m], dr – infinitezimálně tenká tloušťka kontrolního objemu [m], $c(r)$ – tětiva na aktuálním poloměru lopatky [m], N – počet elementů lopatky [-]

Po rozdělení lopatky je k dispozici N elementů, přičemž geometrie jednotlivých výseků je demonstrována na obrázku.



Obr. 20 Geometrie lopatky jednotlivých elementů [4]

Popis obrázku: F_L – vztlaková síla [N], F_D – odporová síla [N], F_N – normálová síla [N], F_T – tečná síla, tečná k trajektorii rotoru [N], v_∞ – rychlost proudu větru [$m \cdot s^{-1}$], w – relativní rychlost větru [$m \cdot s^{-1}$], α – náběžný úhel [deg], φ – úhel relativní rychlosti k rovině rotace [deg], θ_p – úhel stoupání na daném elementu [deg], θ_{p_0} – úhel stoupání na prvním elementu (počítáno od konce lopatky) [deg], θ_T – úhel kroucení lopatky [deg], Ω – úhlová rychlost rotoru [$rad \cdot s^{-1}$]

Vztahy vycházející z geometrických závislostí dle předchozího obrázku lze shrnout následujícími vztahy:

$$\theta_T = \theta_P - \theta_{P,0} \quad (5.3)$$

V tomto případě je úhel kroucení lopatky definován relativně ke konci lopatky větrné turbíny. Vztahy jsou uvedeny dle [4], v jiné literatuře se často vyskytuje definování úhlu kroucení relativně ke kořenu lopatky.

$$\varphi = \theta_p + \alpha \quad (5.4)$$

$$\tan\varphi = \frac{v_{\infty} \cdot (1-a)}{\Omega r (1+a')} = \frac{(1-a)}{(1+a')\lambda_r} \quad (5.5)$$

$$w = \frac{v_{\infty} \cdot (1-a)}{\sin\varphi} \quad (5.6)$$

$$dF_L = \frac{1}{2} C_l \rho w^2 c dr \quad (5.7)$$

$$dF_D = \frac{1}{2} C_d \rho w^2 c dr \quad (5.8)$$

$$dF_N = dF_L \cos\varphi + dF_D \sin\varphi \quad (5.9)$$

$$dF_T = dF_L \sin\varphi - dF_D \cos\varphi \quad (5.10)$$

$$dF_N = B \frac{1}{2} \rho w^2 (C_l \cos\varphi + C_d \sin\varphi) c dr \quad (5.11)$$

$$d\tau = B r dF_T \quad (5.12)$$

$$d\tau = B \frac{1}{2} \rho w^2 (C_l \sin\varphi - C_d \cos\varphi) c r dr \quad (5.13)$$

Před uvedením konkrétního výpočtu budou v následující sekci vysvětleny jednotlivé vztahy použité v početní části a jejich odvození opírající se o dvě výše zmíněné koncepce. V počáteční fázi jsou rovnice odvozeny za předpokladu nulové rotace za turbínou $a' = 0$, nulového odporu aerodynamického profilu $C_d = 0$, nejsou uvažovány ztráty konečným počtem lopatek turbíny a turbína pracuje v teoreticky ideálním stavu (Betzův limit), tedy $a = \frac{1}{3}$ dle rovnice.

Dále se předpokládá, že použitý aerodynamický profil je znám a jeho vlastnosti jsou vyjádřeny křivkou určující průběh vztahového a odporového koeficientu v závislosti na úhlu náběhu, přičemž daný úhel je uvažován pro nejmenší poměr $\frac{C_d}{C_l}$, ve snaze se co nejvíce přiblížit uvažované hodnotě $C_d = 0$. Stejně tak je znám koeficient rychloběžnosti λ , počet lopatek B , maximální radius lopatek R . [4]

Za těchto předpokladů lze uvažovat, že distribuce tětiny po délce lopatky umožní využít maximální využitelnou energii odpovídající Betzově limitu. Po dosažení ideálního indukčního faktoru do rovnice (5.1):

$$dT = \rho v_{\infty}^2 \frac{4}{3} \left(1 - \frac{1}{3}\right) \pi r dr \quad (5.14)$$

Rovnice (5.11) při uvažování nulového odporového koeficientu a B lopatek přejde ve tvar:

$$dF_N = B \frac{1}{2} C_l \rho w^2 \cos \varphi c dr \quad (5.15)$$

Dle rovnice (5.6) po dosažení uvažovaného indukčního faktoru $a = \frac{1}{3}$:

$$w = \frac{2v_{\infty}}{3 \sin \varphi} \quad (5.16)$$

Po dosažení do rovnosti rovnic (5.14) a (5.15) a s pomocí rovnice (5.16) lze odvodit vztah:

$$\frac{BC_l c}{4\pi r} = \tan \varphi \sin \varphi \quad (5.17)$$

Rovnice níže odvozená z rovnice (5.5) pak dává do souvislosti oba indukční faktory. Za předpokladu nulového indukčního faktoru pro obvodový směr a ideálního axiálního faktoru lze rovnici psát následovně:

$$\tan \varphi = \frac{2}{3\lambda_r} \quad (5.18)$$

Po dosažení vztahu (5.18) do (5.17) lze psát:

$$\frac{BC_l c}{4\pi r} = \frac{2}{3\lambda_r} \sin \varphi \quad (5.19)$$

Vyjádřením tětiny a úhlu relativní rychlosti z předchozích dvou vztahů lze psát:

$$c = \frac{8\pi r \sin \varphi}{3\lambda_r BC_l} \quad (5.20)$$

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{2}{3\lambda_r} \right) \quad (5.21)$$

Jak již bylo zmíněno, veškeré vztahy uvedené výše jsou platné při uvažování ideálního stavu. V praxi však tato značně zjednodušená metoda neposkytuje dostatečně přesné výsledky a výpočet je zpřesněn o vliv rotace za větrnou turbínou, o odpor turbíny a ztráty konečným počtem lopatek turbíny. Přesto lze výsledky obdržené za těchto předpokladů považovat za vhodnou aproximaci při prvotních odhadech pro iteraci vlastního výpočtu, který je uveden v kapitole 6.3. *Postup výpočtu větrné elektrárny.*

Při zahrnutí vlivu rotace a opět s využitím hybnostní analýzy dle kapitoly č.4 společně s geometrickými závislostmi dle obr.19 lze psát:

$$dT = \rho v_{\infty}^2 4a(1-a)\pi r dr \quad (5.22)$$

$$d\tau = 4a'(1-a)\rho v_{\infty}\pi r^3 \Omega dr \quad (5.23)$$

$$dF_N = B \frac{1}{2} \rho w^2 (C_l \cos \varphi + C_d \sin \varphi) c dr \quad (5.24)$$

$$d\tau = B \frac{1}{2} \rho w^2 (C_l \sin \varphi - C_d \cos \varphi) c r dr \quad (5.25)$$

S využitím $\sigma' = \frac{Bc}{2\pi r}$ lze rovnice přepsat do tvaru:

$$dF_N = \sigma' \pi \rho \frac{v_{\infty}^2 (1-a)^2}{\sin^2 \varphi} (C_l \cos \varphi + C_d \sin \varphi) r dr \quad (5.26)$$

$$d\tau = \sigma' \pi \rho \frac{v_{\infty}^2 (1-a)^2}{\sin^2 \varphi} (C_l \sin \varphi - C_d \cos \varphi) r^2 dr \quad (5.27)$$

Momenty dle rovnic (5.27) a (5.2) lze položit do rovnosti dle následujícího:

$$4a'(1-a)\rho v_{\infty}\pi r^3 \Omega dr = \sigma' \pi \rho \frac{v_{\infty}^2 (1-a)^2}{\sin^2 \varphi} (C_l \cos \varphi + C_d \sin \varphi) r^2 dr \quad (5.28)$$

Po algebraické úpravě a za předpokladu $C_d = 0$ přechází vztah do tvaru:

$$\frac{a'}{(1-a)} = \sigma' \frac{C_l}{4\lambda_r \sin \varphi} \quad (5.29)$$

Předpoklad nulového odporového koeficientu se v praxi používá pro aerodynamické profily s velmi nízkými koeficienty odporu, kde toto zjednodušení má na řešení jen zanedbatelný vliv. [4]

S využitím rovnice (5.5) lze po algebraických úpravách dostat:

$$\frac{a}{(1-a)} = \sigma' \frac{C_l \cos \varphi}{4 \sin^2 \varphi} \quad (5.30)$$

$$a = \frac{1}{\left[\frac{1+4\sin^2 \varphi}{\sigma' C_l \cos \varphi} \right]} \quad (5.31)$$

$$a' = \frac{1}{\left[\frac{4 \cos \varphi}{\sigma C_l} - 1 \right]} \quad (5.32)$$

Jakmile jsou oba indukční faktory vyjádřeny, lze stanovit předpokládaný výkon větrné turbíny na základě výkonového koeficientu dle následujícího vztahu. Je nutné podotknout, že ačkoli indukční faktory byly odvezeny za předpokladu nulového odporového koeficientu, výkonový koeficient již odpor zahrnuje. Odvození rovnice pro výkonový koeficient není součástí této práce a je zde uveden pouze výsledný vztah (5.33) dle [4].

$$C_p = \frac{8}{\lambda^2} \int_{\lambda_h}^{\lambda} \sin^2 \varphi (\cos \varphi - \lambda_r \sin \varphi) (\sin \varphi + \lambda_r \cos \varphi) \left[1 - \frac{C_d}{C_l} \cot \varphi \right] \lambda_r^2 d\lambda_r \quad (5.33)$$

5.2. Korekce podle Prandtla

Rovnice dosud uvedené byly odvozeny za předpokladu nulové složky rychlosti v radiálním směru – po lopatce (ve směru z dle obr.8). V praxi však, vzhledem k rozdílným tlakům na spodní a horní straně aerodynamického profilu, dochází k proudění vzduchu přes konec lopatky. Vzhledem k této diferenci je indukována nenulová rychlost, jejíž směr je na přetlakové straně směrem od středu otáčení ke špičce lopatky, zatímco na opačné straně je tomu naopak. Tento jev má negativní vliv na výkon lopatky, tzn. odporová síla roste na úkor síly vztahové. Tento děj postihuje korekční faktor podle Prandtla, který vztah odvodil. Vzhledem ke značné náročnosti je odvození Prandtlova korekčního faktoru nad rámec této práce a nadále je použit pouze výsledný vztah dle [4].

$$F = \left(\frac{2}{\pi} \right) \cos^{-1} \left[\exp \left(- \left\{ \frac{\frac{B}{2} \left[1 - \frac{r}{R} \right]}{\left(\frac{r}{R} \right) \sin \varphi} \right\} \right) \right] \quad (5.34)$$

Jak je zřejmé, tento vztah upravuje silové poměry a moment působící na lopatku větrné turbíny. Upravené vztahy zahrnující konečný počet lopatek vypadají následovně:

$$dT = F \rho v_{\infty}^2 4a(1-a) \pi r dr \quad (5.35)$$

$$d\tau = F 4a'(1-a) \rho v_{\infty} \pi r^3 \Omega dr \quad (5.36)$$

$$\frac{a}{(1-a)} = \sigma' \frac{C_l \cos \varphi}{4F \sin^2 \varphi} \quad (5.37)$$

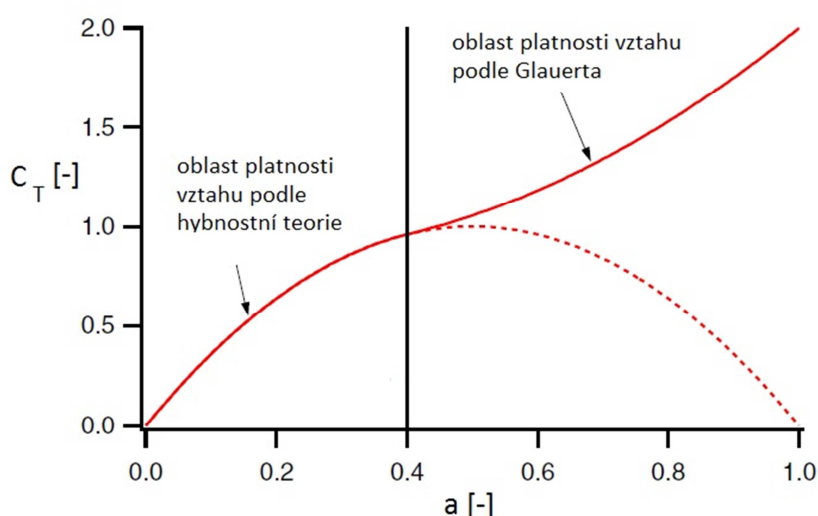
$$\frac{a'}{(1-a)} = \sigma' \frac{C_l}{4F \lambda_r \sin \varphi} \quad (5.38)$$

$$C_p = \frac{8}{\lambda^2} \int_{\lambda_h}^{\lambda} F \sin^2 \varphi (\cos \varphi - \lambda_r \sin \varphi) (\sin \varphi + \lambda_r \cos \varphi) \left[1 - \frac{C_d}{C_l} \cot \varphi \right] \lambda_r^2 d\lambda_r \quad (5.39)$$

5.3. Korekce podle Glauerta

Před samotným návrhem větrné turbíny pro danou lokalitu je nutné zmínit druhý zásadní faktor značně omezující použitelnost výpočtů založených na hybnostní teorii. V případě, kdy podmínky proudění vzduchu na lopatce turbíny jsou značně odlišné od podmínek výpočtových, vztahy odvozené na základě hybnostní teorie neposkytují přesné výsledky. Tento fakt obzvlášť postihuje velmi namáhané lopatky při vysokých rychlostech proudu vzduchu, kdy indukční faktor v axiálním směru je $a \geq 0,4$, a dle hybnostní teorie by, jak již bylo konstatováno v třetí kapitole, docházelo ke zpětnému proudění za větrnou turbínou.

Experimentálně bylo zjištěno, že při axiálním indukčním faktoru $a = 1$ tahový koeficient rapidně vzroste přibližně na hodnotu $C_T = 2$, kdy dochází ke značným turbulencím a signifikantnímu hmotnostnímu toku přes kontrolní objem uvažovaný při odvození hybnostní teorie. [7] V takovém případě se výpočet opírá o empiricky získané vztahy podle Glauerta, dávající do souvislosti axiální indukční faktor a tahový koeficient, jejichž průběh je znázorněn na obr. 21.



Obr. 21 Oblast platnosti empirického vztahu podle Glauerta [4]

Pro oblast, kdy $a > 0,4$ či ekvivalentně $C_T > 0,96$, platí empirický vztah:

$$a = \left(\frac{1}{F}\right) \left[0,143 + \sqrt{0,0203 - 0,6427(0,889 - C_T)}\right] \quad (5.40)$$

Uvedená 1-D hybnostní teorie a její aplikace na jednotlivé elementy lopatky spolu s oběma základními korekčními faktory uvedenými v předchozích kapitolách je základním stavebním kamenem pro výpočet a predikci výkonu větrných turbín. Tyto teorie jsou však odvozeny při ustáleném stavu a za zjednodušujících podmínek, které mohou být v praxi porušeny. Při provozování reálné turbíny existuje několik dalších, dosud nezmíněných faktorů, které mají vliv na provoz větrné elektrárny. Jedná se především o vliv proudu vzduchu za turbínou, nestacionární stavy a rovněž stavy stacionární, avšak notně porušující ideální předpoklady. Zmíněné vlivy nejsou součástí výpočtu uvedeného v kapitole 6. *Návrh větrné turbíny pro danou lokalitu* avšak jsou stručně shrnuty v následujících podkapitolách. Konstatováním těchto stavů je nastíněn směr výzkumu v oblasti aerodynamiky větrných turbín posledních dekád.

5.4. Stacionární stavy porušující ideální předpoklady

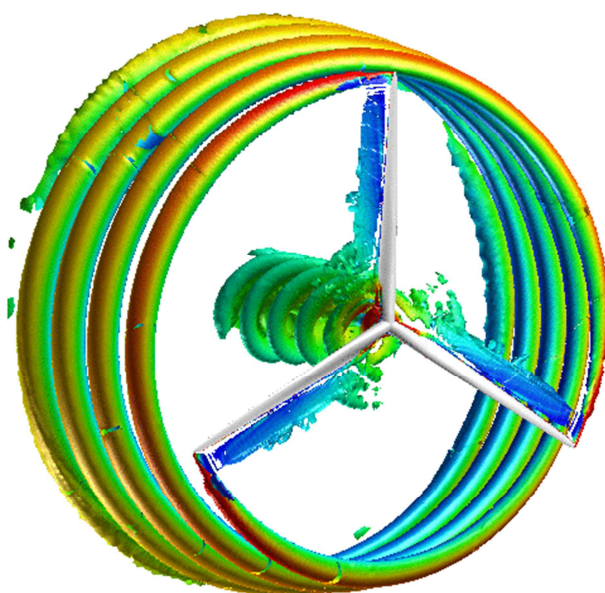
Mezi tyto stavy patří např. degradace povrchu lopatky. Ta může být zapříčiněna nalepováním hmyzu, mořské soli či srážkou ptactva s lopatkou větrné turbíny. Výsledkem je znatelná změna drsnosti materiálu vedoucí ke změně režimu proudění a potenciálnímu nebezpečí odtržení mezní vrstvy, snížení vztlačové síly, a tedy i výkonu turbíny. Možností přispívající k eliminaci tohoto jevu je častá údržba lopatek, popř. použití aerodynamického profilu méně citlivého na změny drsnosti vlastního povrchu.

K odtržení mezní vrstvy však nezdědka dochází i u běžně provozovaných větrných turbín s původní drsností. Z hlediska regulace mají konstrukčně nejjednodušší typy větrných elektráren lopatky pevně spojeny s rotorovým hřídelem, což za specifických podmínek může vést ke vzniku odtržení mezní vrstvy na převažujícím povrchu lopatky. Tyto větrné elektrárny pracují při téměř konstantních otáčkách, a tudíž úhel náběhu je přímo úměrný rychlosti proudu vzduchu před turbínou. Se zvyšujícím se úhlem náběhu přirozeně dochází k odtržení mezní vrstvy při rapidním poklesu vztlačové síly a vzrůstu tahové síly. [7] V této situaci již vztahy mezi úhlem náběhu a aerodynamickými koeficienty nejsou natolik zřejmé a aerodynamické síly působící na lopatku turbíny nelze stanovit dle jednoduchých analytických vztahů uvedených v předchozích kapitolách. Turbulence přítomné při odtržení mezní vrstvy mohou indukovat kolísavé proudění, a tudíž i kolísavé zatížení lopatky.

Měření aerodynamických profilů se provádí v aerodynamických tunelech, přičemž profily jsou umístěny staticky. Srovnáním výpočtů založených na takto získaných aerodynamických koeficientech a reálného provozu turbíny se stejným profilem bylo zjištěno, že na reálné turbíně dochází ke zpoždění při odtržení mezní vrstvy a tím i většímu zatížení turbíny, než bylo předpokládáno. Tento jev je přisuzován nenulovému gradientu tlaku po rotující lopatce turbíny ústící v nenulovou rychlost proudu vzduchu v tomtéž směru. Toto proudění pak „přitlačuje“ mezní vrstvu k povrchu lopatky. [4]

5.5. Vliv proudového pole za turbínou

Přestože zmíněná hybnostní teorie popisuje rychlostní poměry na lopatce turbíny i za ní, v praxi je toto proudové pole podstatně složitější. Experimentálně bylo dokázáno, že každá z lopatek turbíny generuje víry – víry vznikající již na náběžné hraně, víry v blízkosti osy rotace a velmi silné víry na konci lopatky způsobující značné ztráty (korekční faktor dle Glauerta). Tento stav je znázorněn na obr.22. Víry vzniklé na konci lopatky se v oblasti blízké za turbínou spojují a dále rotují po obvodu.



Obr. 22 Vznik vírů při provozu větrné turbíny [14]

Všechny víry jsou následně transportovány po proudu, přičemž jsou rozptýleny přibližně ve vzdálenosti 1-3 průměrů rotoru. [4] V této oblasti zaniká periodicitu víření a ve větší vzdálenosti za turbínou je již rychlostní pole poměrně rovnoměrné. Ke zrovnoměrnění rychlostního pole rovněž přispívá míchání ovlivněného proudu vzduchu za turbínou s volným okolním proudem v důsledku rozdílných axiálních rychlostí a relativně vyšší turbulence ovlivněného proudu. Tento děj pokračuje až do doby, kdy se turbínou generované víry a turbulence zcela vytratí. Popsaný jev má značný vliv především u větrných farem, kde jsou větrné elektrárny umístěny v blízkosti za sebou, a tudíž turbulence v náběžném proudu u zadních turbín je značná. To vede mj. k většímu namáhání listů.

5.6. Nestacionární aerodynamické děje

Nestacionárními aerodynamickými ději jsou myšleny děje dávající vzniku proměnlivých aerodynamických sil působících na lopatku, vibrace lopatky, a tudíž způsobující únavu materiálu. Jmenovitě lze zmínit dynamické odtrhávání mezní vrstvy, které je způsobeno náhlými výkyvy rychlosti větru. V této situaci dochází k velmi rychlému odtržení mezní vrstvy a jejímu opětovnému přilnutí k povrchu. K tomuto jevu dochází např. při průchodu lopatky kolem stožáru větrné elektrárny, kde je rychlostní pole významně ovlivněno. Toto chování není postihnuto v hybnostní teorii a bylo předmětem samostatného výzkumu na konci dvacátého století (Beddoes, Björck et al., 1999).

Hybnostní teorie rovněž predikuje okamžitou změnu axiálního indukčního faktoru, a tím i rychlostního pole před a za rotorem turbíny při náhlém zvýšení rychlosti náběžného proudu vzduchu. Reálná odezva proudového pole na změny chodu větrné turbíny však není okamžitá a určitý čas trvá, než turbína začne pracovat opět v ustáleném režimu. Tento čas může dosahovat až deseti sekund, během kterých se aerodynamické poměry na lopatce mohou značně odlišovat od predikovaných hodnot získaných výpočtem založeným na hybnostní teorii. [4]

Dalším fenoménem aerodynamických nestacionárních dějů jsou malé turbulence a víry v náběžném proudu vzduchu. Víry mohou dosahovat podstatně menších rozměrů než rotor turbíny, a proto se i relativní rychlost větru „viděna“ rotující lopatkou turbíny může během rotace na konkrétním poloměru značně lišit.

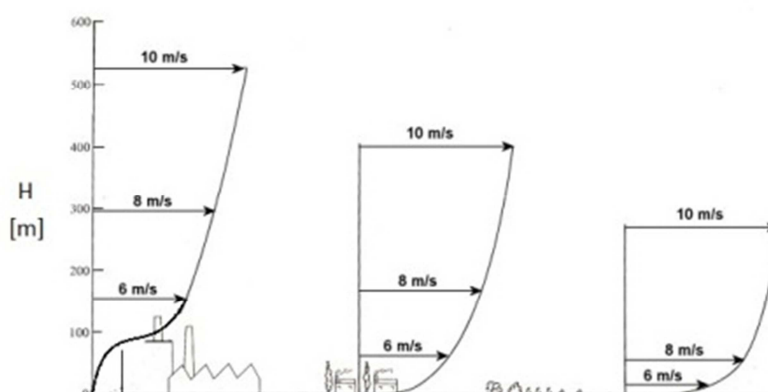
Konstatované vlivy jsou předmětem dalšího výzkumu a vývoje aerodynamiky větrných turbín, avšak náročnost jejich detailnějšího zkoumání značně převyšuje nároky na diplomovou práci, a proto není její součástí.

6. NÁVRH VĚTRNÉ TURBÍNY PRO DANOU LOKALITU

6.1. Výběr vhodné lokality

Výběr vhodné lokality pro stavbu větrné elektrárny je klíčovým rozhodnutím investora. Přestože Česká republika není se svým typicky vnitrozemským klimatem ideální pro větrnou energetiku, závazky vůči Evropské unii podpořené vysokými odkupními cenami vytvářejí výhodné prostředí pro investice s brzkou návratností.

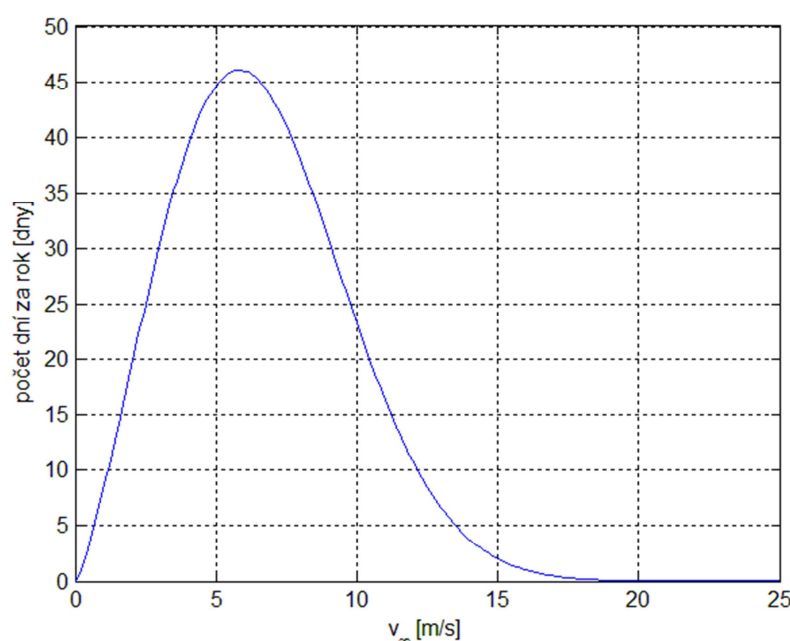
Nejdůležitějším údajem pro výstavbu větrné elektrárny je rychlost větru v dané lokalitě. Ta je však ovlivněna členitostí terénu, terénními překážkami, druhem povrchu terénu a výškou od zemského povrchu. Pro měření větru existují mezinárodní standarty, které deklarují měřicí výšku pro měření rychlosti a směru větru na 10 metrů nad zemským povrchem. Základní informaci o rychlostech větru v daných lokalitách lze získat z výsledků měření meteorologických stanic. Tyto informace jsou však jen málo vypovídající, protože rychlost větru se svzrůstající výškou mění přibližně podle logaritmické závislosti, přičemž je závislá na několika dalších faktorech. Pro základní výpočet průměrných ročních rychlostí větru slouží počítačový program VAS, který vznikl v Ústavu fyziky atmosféry České republiky. Ten umožňuje výpočet průměrných rychlostí větru pro danou lokalitu, přičemž interpoluje data získaná měřením sítí meteorologických stanic a zahrnuje numerické proudění větru na našem území. Pro usnadnění rozhodnutí podnikatelského záměru se dále využívá software WASP a PIAP. V případě příznivých takto získaných výsledků následně probíhá měření přímo ve vytipované lokalitě, v předpokládané výšce osy rotoru a po dobu alespoň jednoho roku. [15]



Obr. 23 Schématické znázornění vlivu terénu na rychlost větru [16]

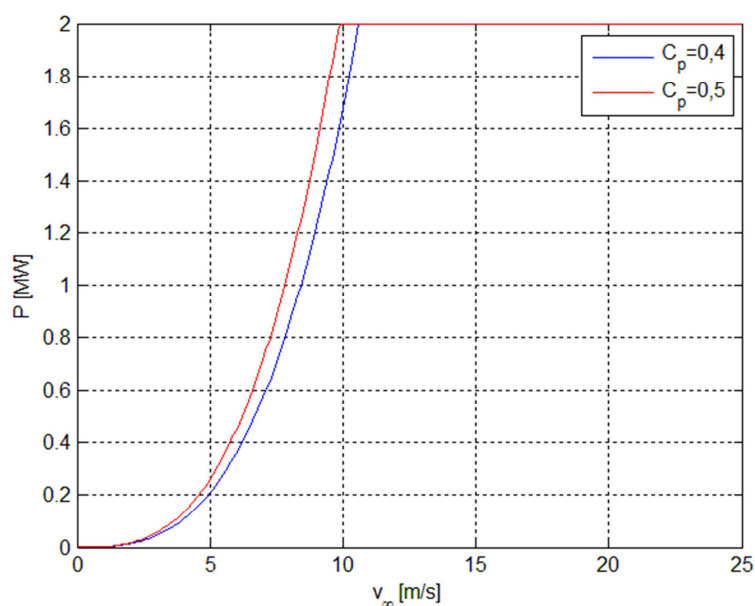
Popis obrázku: H – výška nad zemským povrchem [m]

Ukázka predikce povětrnostních podmínek stanovené Ústavem fyziky atmosféry ČR za pomoci výše zmíněného softwaru je uvedena v příloze. V příloze uvedená lokalita – Dolní Lhota je uvažována jako vztažná lokalita pro samotný návrh větrné turbíny. Distribuce rychlosti větru nejlépe odpovídá tzv. Weibullovu rozdělení, pro jehož konstrukci je nutné znát střední rychlost větru a tvarový faktor. Pro uvažovanou lokalitu Dolní Lhota a pro předpokládanou výšku stožáru 90m je tvarový koeficient stanoven na 2,29 a střední rychlost $v_{střední} = 6,63 \text{ m/s}$ je distribuce rychlosti větru znázorněna na obrázku.



Obr. 24 Weibullovu rozdělení větru v dané lokalitě

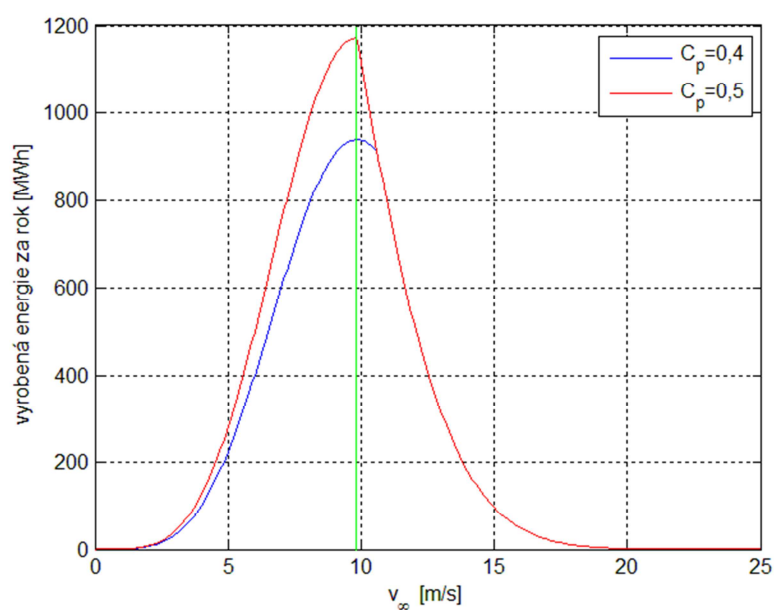
Střední rychlost větru v dané lokalitě se však ne vždy shoduje s rychlostí, při které turbína vyrobí největší množství energie a která je z hlediska návrhu nejpodstatnější. K determinaci této rychlosti je však znát výkonovou charakteristiku dané turbíny. V této prvotní fázi výpočtu lze charakteristiku turbíny pouze predikovat na základě uvažovaných výkonových koeficientů, poloměru rotoru turbíny a hustoty vzduchu. Pro tento účel byl zvolen interval $C_p \cong < 0,4 \div 0,5 >$. Hustota vzduchu je stanovena s ohledem na průměrnou roční teplotu 7°C v Moravskoslezském kraji v letech 2010-2012 - $\rho_{\text{vzduchu}} = 1,2607 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$. Výkonová charakteristika turbíny je zřejmá z obr.25.



Obr. 25 Výkonová charakteristika větrné turbíny

Poznámka k obrázku : Charakteristika je dána průběhem výkonu turbíny v závislosti na rychlosti větru, přičemž je uvažován konstantní výkonový koeficient. Shora je charakteristika limitována přípustným elektrickým výkonem generátoru. Pro základní přehled je považována tato charakteristika jako dostačující.

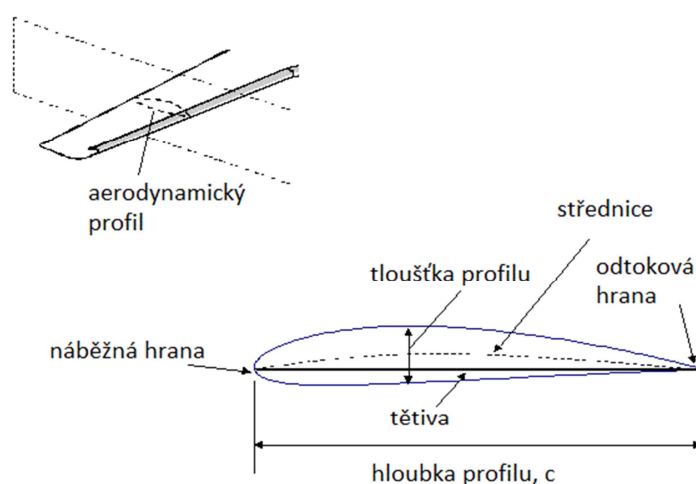
Při známé výkonové charakteristice uvažované větrné turbíny je již snadné se dopátrat rychlosti, při které větrná elektrárna vyrobí největší množství elektrické energie. Dle obr. 26 byla stanovena návrhová rychlost $v_\infty = 9,8 \text{ m/s}$.



Obr. 26 Stanovení návrhové rychlosti

6.2. Výběr vhodného aerodynamického profilu

Aerodynamické profily pro větrné turbíny vychází z poznatků leteckého průmyslu. Typickým příkladem je úzký profil na konci křídla s vysokým poměrem vztlak/odpor zatímco u trupu letadla je použita zvětšená verze téhož profilu zaručující dostatečnou pevnost křídla. Letecké profily byly katalogizovány do tříd NACA a rozřazeny do jednotlivých kategorií s vlastním označením.



Obr. 27 Definice pojmů [17]

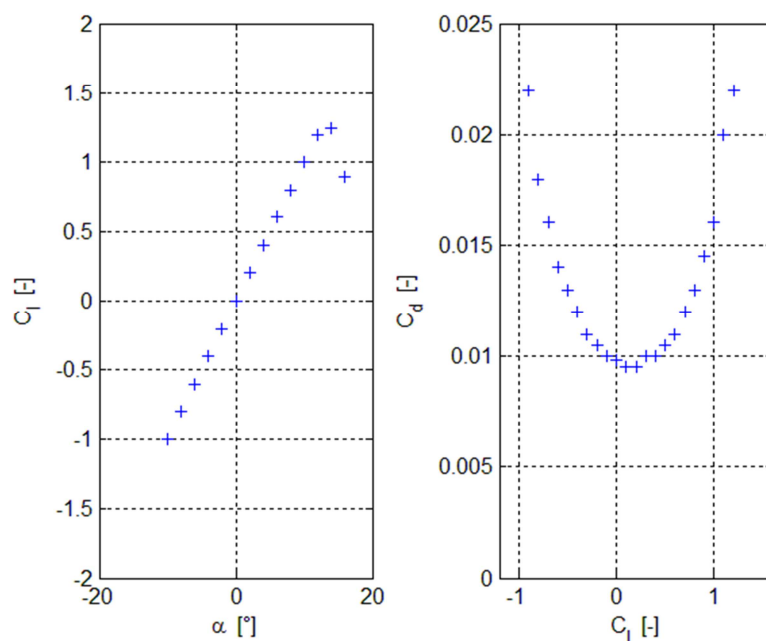
Poznámky k obrázku: Tloušťka se vždy měří kolmo k tětívě.

Katalogizované profily byly dále vyvíjeny a upravovány speciálně pro větrnou energetiku. Důraz byl kladen především na snížení citlivosti vůči zanášení lopatek nečistotami, které snižovaly výkon turbíny až o 40%. [4]

Vývoj numerických výpočtových metod a komputizace dovolila nejprve navrhnout rozložení tlaku a z této distribuce pak přímo odvodit geometrii profilu. Geometrie nejnovějších upravených profilů a jejich empiricky získané parametry nutné pro následný výpočet jsou know-how jednotlivých společností a veřejnosti jsou tak nedostupné.

V této práci však bude použit profil typu **NACA 63-215**, který byl ve větrné energetice používán především v 90. letech. Volba tohoto poněkud historického profilu je dána snadnou dostupností naměřených křivek pro vztlakový a odporový koeficient

z katalogu profilů dle [18]. Odečet byl proveden pro očekávané Reynoldsovo číslo $R_e = 6 \cdot 10^6$. Získané závislosti byly následně převedeny do elektronické formy, viz obr. 28. Veškerý odečet hodnot pro aerodynamické koeficienty byl proveden lineární interpolací mezi těmito body.



Obr. 28 Aerodynamické koeficienty pro NACA 63-215

6.3. Postup výpočtu větrné turbíny pro danou lokalitu

V následující sekci budou názorně uvedeny a vysvětleny jednotlivé kroky výpočtu větrné turbíny založené na předchozích kapitolách. Výpočet vychází ze známého aerodynamického profilu, jehož koeficienty vztlaku a odporu jsou určeny křivkami v závislosti na úhlu náběhu dle katalogu aerodynamických profilů. Výpočet rovněž vychází ze známé rychlosti proudu vzduchu, jejíž určení je předmětem samostatné kapitoly viz 6.1 *Výběr vhodné lokality*. Výpočet zahrnuje vliv rotace, ztráty konečným počtem lopatek a je rovněž korigován dle Glauerta. Ve výpočtu jsou vždy uvedeny teoretické vztahy a následně pod čarou jejich aplikace ve vlastním výpočtu a s demonstrací vypočítaných výsledků.

1. Na základě rychlosti proudu vzduchu je nutné odhadnout očekávaný výkon větrné turbíny, přičemž mechanická účinnost a výkonový koeficient se rovněž volí. Následně z rovnice (6.1) je určen maximální poloměr rotoru větrné elektrárny.

$$P = \frac{1}{2} C_p \eta \rho \pi R^2 v_\infty^3 \quad (6.1)$$

$$\rightarrow R = \sqrt{\frac{\frac{1}{2} C_p \eta \rho v_\infty^3}{P}}$$

Odhady:

P	C_p	η
[MW]	[-]	[-]
2	0,46	0,9

Tabulka 1 Odhady parametrů větrné turbíny

Výkon turbíny byl stanoven s ohledem na současné větrné elektrárny na našem území. Účinnost (mechanickou, elektrickou) lze předpokládat přibližně 90% dle [7]. Výkonový koeficient je odhadnut na 0,46. Na základě odhadnutých parametrů byl stanoven poloměr turbíny na $R = 47,92\text{m}$.

2. Dle typu uvažovaného stroje je nutné zvolit koeficient rychloběžnosti odpovídající maximálnímu poloměru lopatky. Ten se volí na základě počtu lopatek, přičemž pro použití u větrných elektráren je doporučený interval $4 < \lambda < 10$. [4]

Pro výpočet byl zvolen koeficient rychloběžnosti $\lambda = 8$.

3. Na základě uvedené tabulky lze následně stanovit počet lopatek odpovídající zvolenému intervalu koeficientu rychloběžnosti.

λ	B
[-]	[-]
1	8-24
2	6-12
3	3-6
4	3-4
>4	1-3

Tabulka 2 Stanovení počtu lopatek turbíny na základě koeficientu rychloběžnosti

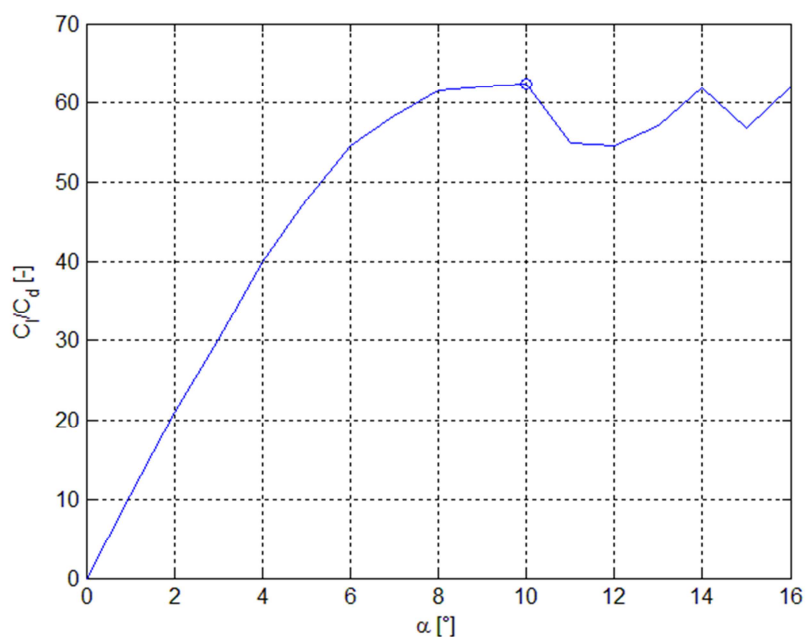
Z tabulky uvedené výše a s ohledem na současné větrné elektrárny byl zvolen počet lopatek $B = 3$

4. Zvolení aerodynamického profilu.

Volba aerodynamického profilu, její zdůvodnění a grafické zobrazení aerodynamických koeficientů v závislosti na úhlu náběhu je uveden v kapitole 6.2 *Výběr vhodného aerodynamického profilu.*

5. Odečtení křivek vztakového a odporového koeficientu v závislosti na úhlu náběhu pro zvolený aerodynamický profil. Stanovení optimálního návrhového úhlu náběhu α_{DESIGN} za předpokladu maximální hodnoty poměru návrhových koeficientů $\frac{C_{l,design}}{C_{d,design}}$

Pro stanovení maxima $\frac{C_{l,design}}{C_{d,design}}$ byl tento poměr vykreslen v závislosti na úhlu náběhu. Z obr. 29 je patrné, že maximum připadá na úhel $\alpha = 10^\circ$.



Obr. 29 Průběh poměru aerodynamických koeficientů na úhlu náběhu

6. Rozdělení lopatky na N elementů a stanovení jednotlivých poloměrů r_i vždy ke středu elementu. Na základě teorie zmíněné v 5.1 *Metoda osamoceného profilu* deklarace geometrie lopatky ve smyslu výpočtu distribuce těživy po lopatce a stanovení jednotlivých úhlů pro daný element.

$$\lambda_{r,i} = \lambda \left(\frac{r_i}{R} \right) \quad (5.2)$$

$$\varphi_i = \left(\frac{2}{3} \right) \tan^{-1} \left(\frac{1}{\lambda_{r,i}} \right) \quad (5.3)$$

$$c_i = \frac{8\pi r_i}{BC_{l,design,i}} (1 - \cos \varphi_i) \quad (5.4)$$

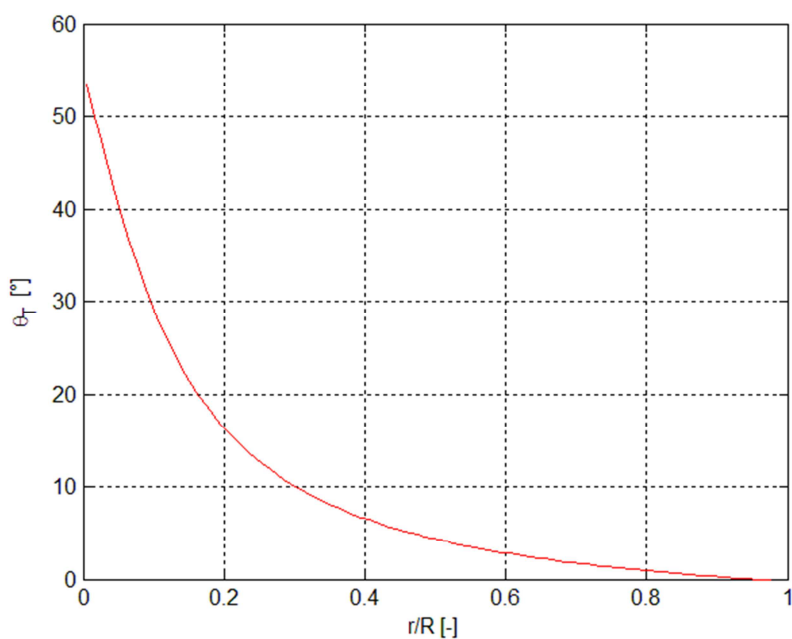
$$\theta_{T,i} = \theta_{p,i} - \theta_{p,0} \quad (5.5)$$

$$\varphi_i = \theta_{p,i} + \alpha_{design,i} \quad (5.6)$$

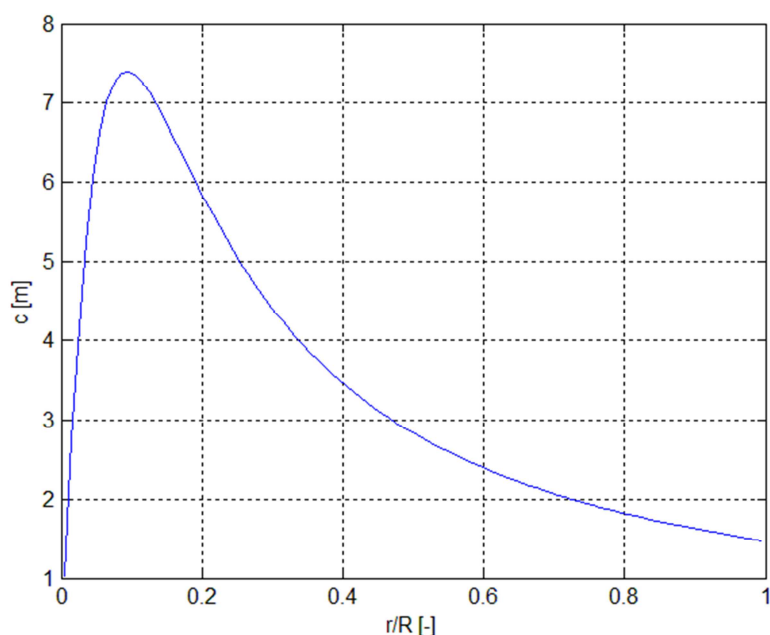
Lopatka byla ve výpočtu rozdělena na 100 elementů. Veškeré grafy uvedené níže tak mohou být linearizovány s dostatečnou přesností. Pro větší přehlednost a kontrolu výsledků budou hodnoty v následujících tabulkách uvedeny pro každý desátý element lopatky.

r/R	r	c	θ_T	φ	θ_p
[-]	[m]	[m]	[°]	[°]	[°]
0,045	2,29	6,05	41,80	46,80	36,80
0,145	7,38	6,83	22,18	27,18	17,18
0,245	12,47	5,13	13,02	18,02	8,02
0,345	17,56	3,93	8,28	13,28	3,28
0,445	22,66	3,15	5,46	10,46	0,46
0,545	27,75	2,62	3,61	8,61	-1,39
0,645	32,84	2,24	2,31	7,31	-2,69
0,745	37,93	1,95	1,35	6,35	-3,65
0,845	43,02	1,73	0,61	5,61	-4,39
0,945	48,11	1,55	0,02	5,00	-4,98

Tabulka 3 Parametry lopatky na daném poloměru



Obr. 30 Distribuce úhlu kroucení po lopatce větrné turbíny



Obr. 31 Rozložení tětiny po lopatce větrné turbíny

Poznámka k obrázku: Výpočet rozložení tětiny po lopatce větrné turbíny vychází čistě z aerodynamických předpokladů. Z tohoto důvodu se může jevit tvar lopatky především v oblasti blízké ose otáčení jako ne plně korespondující s reálnou větrnou turbínou. Ve výpočtu nejsou nijak zahrnuty pevnostní výpočty.

7. Řešení rovnic popisujících výkon uvažované turbíny. Existují dvě řešení. Vzhledem k omezené platnosti první z nich bude uvedena pouze iterační metoda, jejíž použití není nijak limitováno. Tato metoda spočívá v iteraci soustavy rovnic, jejíž konvergence vede ke zjištění indukčního faktoru jak pro axiální, tak pro obvodový směr. Na začátku řešení jsou nutné počáteční odhady, dané následujícími rovnicemi.

$$\varphi_{i,1} = \left(\frac{2}{3}\right) \tan^{-1} \left(\frac{1}{\lambda_{r,i}} \right) \quad (6.7)$$

$$a_{i,1} = \frac{1}{\left[1 + \frac{4 \sin^2(\varphi_{i,1})}{\sigma_{i,design} c_{l,design} \cos \varphi_{i,1}} \right]} \quad (6.8)$$

$$a'_{i,1} = \frac{1 - 3a_{i,1}}{4a_{i,1} - 1} \quad (6.9)$$

S uvedenými počátečními odhady již lze zahájit iterační výpočet, přičemž pořadí iterace je v následujících rovnicích demonstrováno písmenem j .

$$\tan\varphi_{i,j} = \frac{v_{\infty} \cdot (1-a_{i,j})}{\Omega r (1+a'_{i,j})} = \frac{(1-a_{i,j})}{(1+a'_{i,j})\lambda_{r,i}} \quad (6.10)$$

$$F_{i,j} = \left(\frac{2}{\pi}\right) \cos^{-1} \left[\exp \left(- \left\{ \frac{\frac{B}{2} \left[1 - \frac{r_i}{R} \right]}{\left(\frac{r_i}{R} \right) \sin \varphi_{i,j}} \right\} \right) \right] \quad (6.11)$$

$$\alpha_{i,j} = \varphi_{i,j} - \theta_{p,i} \quad (6.12)$$

Na základě aktuálního úhlu náběhu dle předchozí rovnice je nutné odečíst hodnoty z grafu pro koeficienty vztlaku a odporu.

$$C_{l,i,j} = f(\alpha_{i,j}) \dots \text{dle grafu}$$

$$C_{d,i,j} = f(\alpha_{i,j}) \dots \text{dle grafu}$$

Následně musí být vypočten místní tahový koeficient dle následující rovnice.

$$C_{T,i,j} = \frac{\sigma_i (1-a_{i,j})^2 (C_{l,i,j} \cos \varphi_{i,j} + C_{d,i,j} \sin \varphi_{i,j})}{\sin^2 \varphi_{i,j}} \quad (6.13)$$

Na základě hodnoty vypočteného tahového koeficientu musí být rozhodnuto, zda budou pro nové hodnoty indukčních faktorů použity vztahy odvozené na základě hybnostní teorie, či s pomocí empirických vztahů dle Glauerta.

Jestliže $C_{T,i,j} < 0,96$ pak:

$$a_{i,j+1} = \frac{1}{\left[1 + \frac{4 F_{i,j} \sin^2(\varphi_{i,j})}{\sigma_i C_{l,i,j} \cos \varphi_{i,j}} \right]} \quad (6.14)$$

Jestliže $C_{T_{i,j}} > 0,96$ pak:

$$a_{i,j+1} = \left(\frac{1}{F_{i,j}}\right) \left[0,143 + \sqrt{0,0203 - 0,6427(0,889 - C_{Tr,i,j})}\right] \quad (6.15)$$

$$a'_{i,j+1} = \frac{1}{\frac{4F_{i,j}\cos\varphi_{i,j}}{\sigma C_{l,i,j}} - 1} \quad (6.16)$$

Pro názornost bude následně demonstrován příklad průběhu iterace na libovolném poloměru lopatky. Podmínkou iterace byla stanovena absolutní hodnota rozdílu mezi novou a předchozí hodnotou jak pro axiální indukční faktor, tak pro indukční faktor v obvodovém směru. Iterace je tedy ukončena za podmínky:

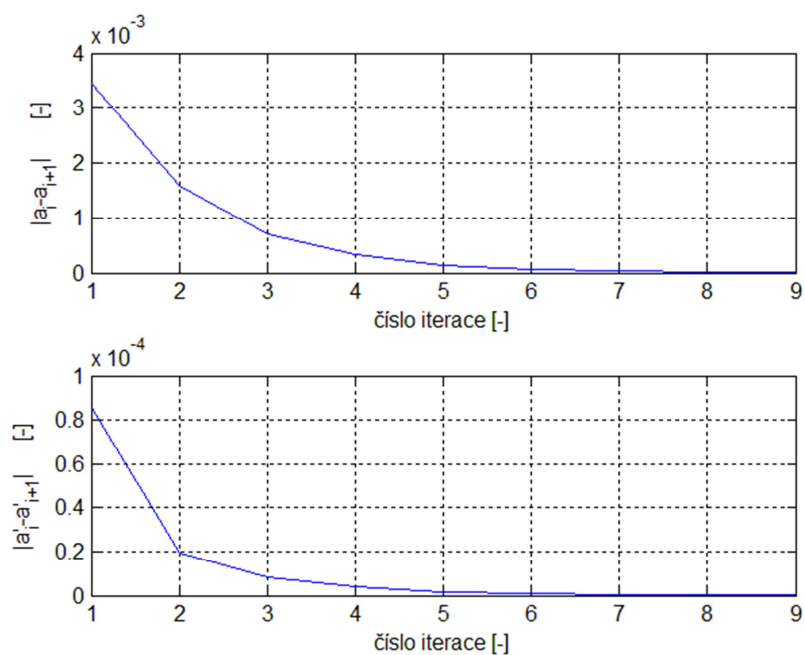
$$|a_i - a_{i+1}| < 0,00001 \quad (6.17)$$

a zároveň musí platit

$$|a'_i - a'_{i+1}| < 0,00001 \quad (6.18)$$

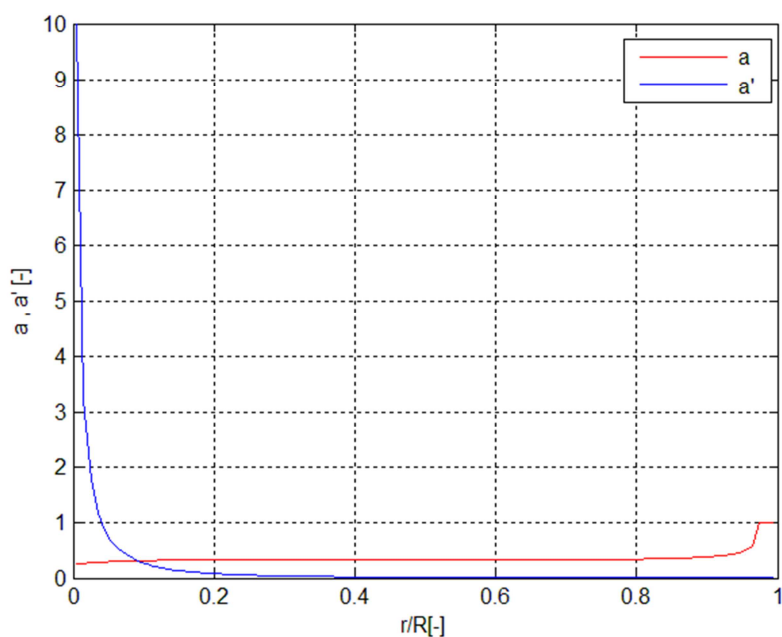
Číslo iterace	a	a'	$ a_i - a_{i+1} $	$ a'_i - a'_{i+1} $
[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
1	0,336168	0,005544	0,003437	8,54E-05
2	0,337742	0,005525	0,001573	1,92E-05
3	0,338449	0,005517	0,000707	8,58E-06
4	0,338768	0,005513	0,000319	3,86E-06
5	0,338912	0,005511	0,000144	1,74E-06
6	0,338977	0,00551	6,51E-05	7,86E-07
7	0,339007	0,00551	2,94E-05	3,55E-07
8	0,33902	0,00551	1,33E-05	1,60E-07
9	0,339026	0,00551	6,02E-06	7,26E-08

Tabulka 4 Průběh iterace pro poloměr lopatky $r=38,0971\text{m}$

Obr. 32 Průběh iterace na poloměru lopatky $r=38,0971\text{m}$

r/R	a	a'
[-]	[-]	[-]
0,045	0,288947	0,854738
0,145	0,320093	0,141668
0,245	0,327699	0,054391
0,345	0,33031	0,028241
0,445	0,331471	0,01719
0,545	0,332121	0,011536
0,645	0,332792	0,008271
0,745	0,33512	0,006234
0,845	0,348821	0,004946
0,945	0,457833	0,004324

Tabulka 5 Přehled indukčních faktorů ve vztažných bodech



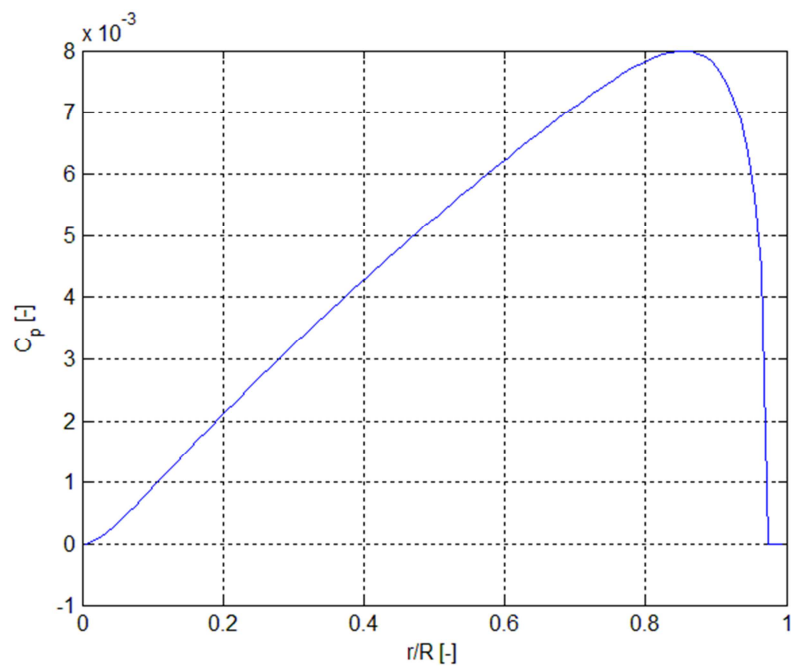
Obr. 33 Průběh indukčních faktorů po celé délce lopatky

8. V případě, kdy jsou vyřešeny indukční faktory pro každý element lopatky, je možné přistoupit k výpočtu výkonového koeficientu dle vztahu:

$$C_p = \frac{8}{\lambda N} \sum_{i=1}^N F_i \sin^2 \varphi_i (\cos \varphi_i - \lambda_{r,i} \sin \varphi_i) (\sin \varphi_i - \lambda_{r,i} \cos \varphi_i) \left[1 - \left(\frac{c_{d,i}}{c_{l,i}} \right) \cot \varphi_i \right] \lambda_{r,i}^2 \quad (6.19)$$

r/R	C_p
$[-]$	$[-]$
0,045	0,000279
0,145	0,001457
0,245	0,002618
0,345	0,003707
0,445	0,004735
0,545	0,00571
0,645	0,006629
0,745	0,007463
0,845	0,007992
0,945	0,006358

Tabulka 6 Hodnoty výkonového koeficientu ve vztažných bodech



Obr. 34 Průběh výkonového koeficientu po délce lopatky

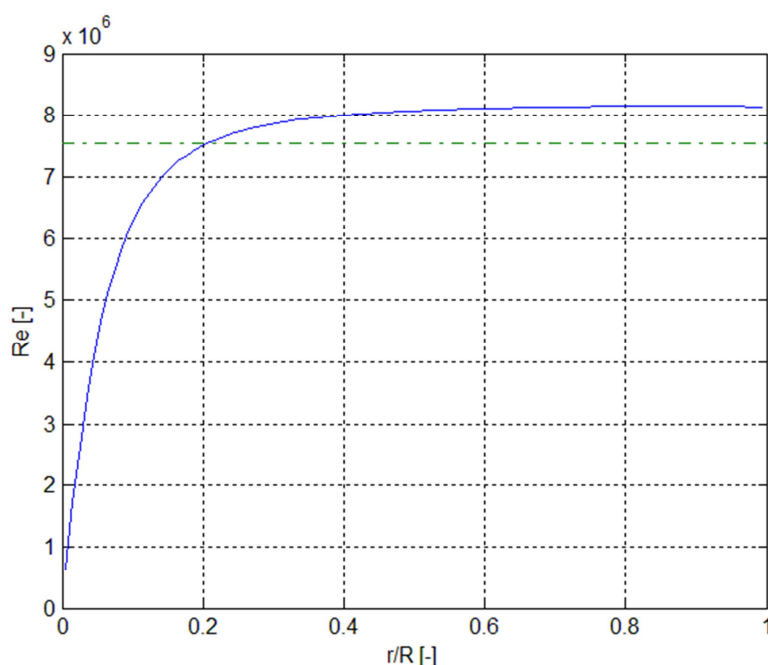
Celkový výkonový koeficient vypočítán dle vztahu (6.19) je:

$$C_p \doteq 0,455$$

6.4. Kontrola počátečních odhadů

Vypočítaný výkonový koeficient se od odhadované hodnoty na začátku výpočtu liší jen zanedbatelně, a tudíž získaná tolerance mezi oběma hodnotami je považována za akceptovatelnou. V případě nutnosti dalšího zpřesňování výsledku by výpočet proběhl stejným způsobem, pouze počáteční odhady by byly aktualizovány nově vypočítanými hodnotami.

Na počátku výpočtu, při volbě vhodného profilu, byla uvažována hodnota Reynoldsova čísla $Re = 6 \cdot 10^6$, pro niž byly použity hodnoty obou aerodynamických koeficientů. Průběh vypočítané hodnoty lze pozorovat na obr. 35, přičemž průměrná hodnota stanovená na $Re_{průměr} = 7,5 \cdot 10^6$ je vyznačena čerchovanou čarou. Vzhledem k faktu, že tato hodnota leží přesně na pomezí mezi dostupnými křivkami pro daný aerodynamický profil, hodnota $Re = 6 \cdot 10^6$ bude ponechána jako nejlépe vypovídající.

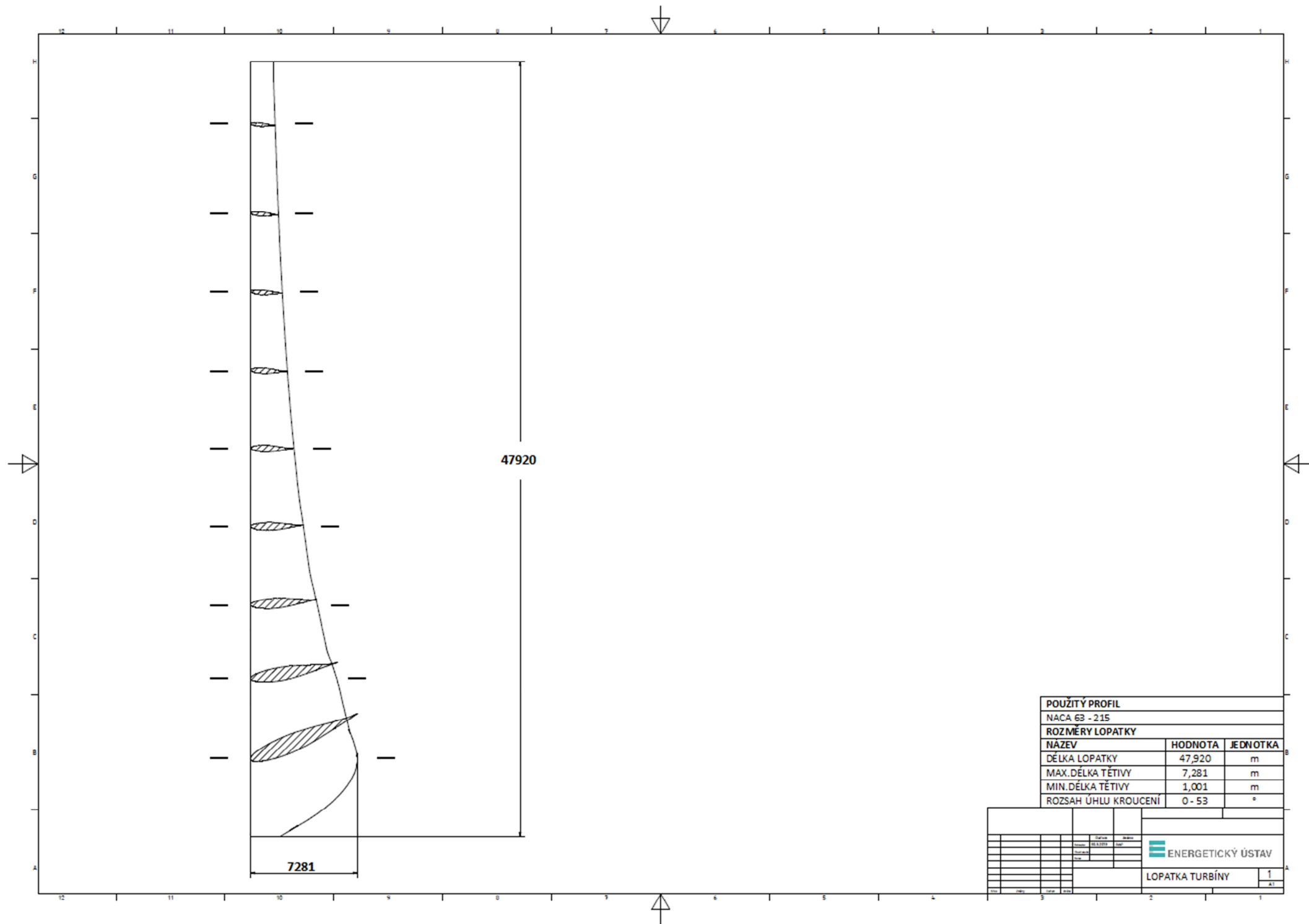


Obr. 35 Průběh Reynoldsova čísla po poloměru lopaty větrné turbíny

Poznámka k obrázku: Čerchovaná čára značí průměrnou hodnotu Reynoldsova čísla na lopatce uvažované turbíny

6.5. Výsledná podoba lopatky

Lopátka navržené větrné turbíny byla vymodelována v programu Autodesk Inventor. Výsledná podoba je schematicky znázorněna viz níže. Pro lepší přehlednost byly vytvořeny jednotlivé průřezy za použití horizontální řezné roviny.



7. ZÁVĚR

Cílem této práce bylo shrnout dosavadní stav poznání v oblasti aerodynamického návrhu větrných turbín a následná aplikace těchto poznatků při jejím návrhu pro konkrétní lokalitu. První část této práce shrnuje základní pojmy, jež detailněji vysvětluje a dává do souvislostí. Důraz je především kladen na mezní vrstvu a podmínky vedoucí ke vzniku jejího odtržení. Tento děj je jedním z klíčových faktorů pro silové poměry na aerodynamickém profilu, a tedy velmi významný při návrhu i provozu větrných elektráren. V následující kapitole je odvozena základní teorie založená především na zákonu zachování hybnosti, která je doposud stavebním kamenem při predikci výkonu větrné elektrárny. Při odvození jsou rovněž uvedeny zjednodušující předpoklady. V souvisejících podkapitolách práce je vysvětlen obecný postup výpočtu, který je založen na výše zmíněné teorii aplikované na jednotlivé elementy větrné turbíny. Vlivy mající signifikantní vliv na výkon větrné elektrárny jsou vyjádřeny korekčními faktory, které jsou shrnuty v samostatných kapitolách.

V závěrečné sekci kapitoly 5. *Výpočet větrné turbíny* jsou nastíněny další efekty, jež značně porušují zjednodušující předpoklady předchozího výpočtu. Konstatováním těchto jevů je naznačen směr vývoje větrné energetiky v posledních dekádách.

Postup výpočtu opírající se o předpoklady hybnostní teorie a zahrnující základní korekční faktory je aplikován na příkladu návrhového výpočtu větrné elektrárny pro lokalitu Dolní Lhota. Práce rovněž shrnuje základní problematiku stanovení vhodného umístění a následnou determinaci rychlosti větru, pro niž jsou lopatky větrné turbíny koncipovány. Vzhledem k obtížnější dostupnosti přesných měření je tvarový koeficient pro Weibullovo rozdělení stanoven na základě získaných výsledků numerických výpočtů pro lokalitu Dolní Lhota a uvažovanou výšku stožáru 90m nad zemským povrchem.

Výběrem vhodného profilu je pak věnována samostatná kapitola. Současné aerodynamické profily jsou hlavním know-how společností zabývajících se konstrukcí rotorů větrných elektráren, a proto byl použit profil často používaný v 90. letech minulého století, pro něhož je závislost aerodynamických koeficientů na úhlu náběhu snáze dostupná.

Vlastní výpočet je pak přehledně rozdělen do jednotlivých bodů, které tvoří hlavní iterační smyčku. Veškeré počáteční odhady byly stanoveny na základě dostupné literatury a současných větrných elektráren a následně srovnány s vypočítanými hodnotami. Jejich vzájemný rozdíl, a tedy i přesnost výpočtu je

považována za akceptovatelnou. Průběh všech důležitých parametrů po lopatce je prezentován ve formě grafů a tabulek pro vztažné poloměry.

Je nutné podotknout, že uvedený návrh lopatky pro vztažné podmínky se opírá pouze o aerodynamický výpočet. Pevnostní výpočet nebyl cílem této práce. Lze předpokládat, že v oblasti blízké osy rotace by v praxi musel být aerodynamický profil modifikován tak, aby splnil pevnostní požadavky.

8. SEZNAM SYMBOLŮ A VELIČIN

<i>Symbol</i>	<i>Význam</i>	<i>Jednotka</i>
A_1	plocha rotoru	$[m^2]$
A_2	plocha ovlivněného proudu tekutiny kolmá na směr rychlosti v dostatečné vzdálenosti za rotorem	$[m^2]$
A_{KO}	plocha kontrolního objemu	$[m^2]$
a	indukční faktor	$[-]$
a'	indukční faktor v obvodovém směru	$[-]$
B	počet lopatek	$[-]$
C_d	odporový koeficient	$[-]$
C_l	vztakový koeficient	$[-]$
C_m	momentový koeficient	$[-]$
C_T	tahový koeficient	$[-]$
c	tětiva	$[m]$
c_1	absolutní rychlost na náběžné hraně	$[m.s^{-1}]$
c_2	absolutní rychlost proudu na odtokové hraně	$[m.s^{-1}]$
c_{2a}	axiální složka absolutní výstupní rychlosti proudu	$[m.s^{-1}]$
c_{2u}	obvodová složka absolutní výstupní rychlosti proudu	$[m.s^{-1}]$
F	Prandtlův korekční faktor	$[-]$
F_D	odporová síla	$[N.m^{-1}]$
F_L	vztaková síla	$[N.m^{-1}]$
F_N	normálová síla	$[N.m^{-1}]$
F_T	tečná síla	$[N.m^{-1}]$

$F_{\text{tlaková}}$	tlaková síla	$[\text{N} \cdot \text{m}^{-1}]$
M	klopivý moment	$[\text{N} \cdot \text{m}]$
$\dot{m}$	hmotnostní tok	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$
$\dot{m}_{\text{KO}}$	hmotnostní tok opouštějící kontrolní objem	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$
T	tahová síla	$[\text{N}]$
R	maximální průměr lopatky rotoru větrné turbíny	$[\text{m}]$
r	aktuální průměr lopatky rotoru větrné turbíny	$[\text{m}]$
P	výkon větrné turbíny	$[\text{W}]$
p	tlak	$[\text{Pa}]$
p_{∞}	tlak v dostatečné vzdálenosti od rotoru	$[\text{Pa}]$
Δp	rozdíl tlaku po obou stranách disku	$[\text{Pa}]$
$V_{\text{střední}}$	střední rychlost proudu vzduchu v dané lokalitě	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
v_1	rychlost proudu vzduchu na v místě rotoru	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
v_2	rychlost proudu vzduchu v dostatečné vzdálenosti za rotorem	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
v_{∞}	neovlivněná rychlost proudu vzduchu	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
w	relativní rychlost proudu vzduchu	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
α	náběžný úhel	$[\text{°}]$
ρ	hustota	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
$\tau_{\text{LAMINÁRNÍ}}$	tečné napětí v případě laminárního proudění	$[\text{Pa}]$
$\tau_{\text{TURBULENTNÍ}}$	tečné napětí v případě turbulentního proudění	$[\text{Pa}]$
μ	dynamická viskozita	$[\text{Pa} \cdot \text{s}]$
Ω	uhlová rychlost rotoru	$[\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}]$
λ	koeficient rychloběžnosti	$[-]$
λ_h	koeficient rychloběžnosti nejbližše ose otáčení	$[-]$
λ_r	koeficient rychloběžnosti pro daný poloměr	$[-]$

τ	krouticí moment	[N.m]
θ_P	úhel stoupání na daném elementu	[deg]
$\theta_{P,0}$	úhel stoupání na prvním elementu (počítáno od konce lopatky)	[deg]
θ_T	úhel kroucení lopatky	[deg]
φ	úhel relativní rychlosti k rovině rotace	[deg]

9. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. Česká společnost pro větrnou energii. [Online] [Citace: 7. duben 2013.] <http://www.csve.cz/cz/clanky/vetrne-elektrarny-ve-svete/283>.
2. Wikipedia. *Wind power in Denmark*. [Online] [Citace: 7. duben 2013.] http://en.wikipedia.org/wiki/Wind_power_in_Denmark.
3. Mervento. [Online] [Citace: 7. duben 2013.] http://www.expo21xx.com/wind-energy/20175_st3_onshore-wind-turbine/default.htm.
4. **J.F.Manwell, J.G.McGowan, A.L.Rogers.** *Wind Energy Explained - Theory, Design and Applications*. [Electronic document] místo neznámé : John Wiley & Sons Ltd, 2002. ISBN 0-470-84612-7.
5. Wikipedia. *Wikipedia*. [Online] [Citace: 1. listopad 2012.] http://en.wikipedia.org/wiki/Boundary_layer.
6. **J.Mitrov.** CS EDU. [Online] 13. březen 2009. [Citace: 27. únor 2013.] <http://www.cs.cdu.edu.au/homepages/jmitroy/eng243/>.
7. **Hansen, Martin O.L.** *Aerodynamics of wind turbines*. London : Earthscan, 2008.
8. InNet. *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava*. [Online] [Citace: 30. říjen 2012.] <http://homen.vsb.cz/~kod31/vyuka/inzsit/InzSite02%20Vetve.pdf>.
9. Answers. *Stagnation point*. [Online] [Citace: 28. říjen 2012.] <http://www.answers.com/topic/stagnation-point>.
10. **Claes Johnson, Johan Jansson.** *The Secret of Flight*. [Online] Wordpress. [Citace: 5. prosinec 2012.] <http://secretoflight.wordpress.com/why-prandtl-is-incorrect/>.
11. CIVE 1400. *Fluid mechanics*. [Online] [Citace: 3. listopad 2012.] http://www.efm.leeds.ac.uk/CIVE/CIVE1400/Section4/boundary_layer.htm.
12. Marine Current Resource and Technology Methology. *Technology: Turbine Theory*. [Online] [Citace: 4. listopad 2012.] http://www.esru.strath.ac.uk/EandE/Web_sites/05-06/marine_renewables/technology/Froude.htm.
13. **A.Staino, B.Basu, S.R.K.Nielsen.** Science Direct. *Actuator control of edgewise vibrations in wind turbine blades*. [Online] 12. březen 2012. [Citace: 3. leden 2013.] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022460X11008819>.
14. Acusim software. [Online] 2010. [Citace: 25. únor 2013.] <http://www.acusim.com/html/applications.html>.

15. Jiří Beranovský, Monika Kašparová, František Macholda, Karel Srdečný, Jan Truxa. Energie větru. *EKOWATT*. [Online] 2007. [Citace: 8. únor 2013.] <http://www.ekowatt.cz/cz/informace/obnovitelne-zdroje-energie/energie-vetru>.
16. Windpower Program. *Estimating Wind Speed*. [Online] [Citace: 4. únor 2013.] <http://www.wind-power-program.com/windestimates.htm>.
17. Paper Airfoil Aerodynamics. *Paper Airfoil Design Characteristics*. [Online] [Citace: 8. únor 2013.] <http://ffden-2.phys.uaf.edu/211.fall2000.web.projects/c.%20Schaefer/aero6.htm>.
18. Ira.H.Abbot, Albert E.Von Doenhoff. *Theory of wing sections*. New York : DOVER PUBLICATIONS,INC., 1959. ISBN-13:978-0-486-60586-9.
19. Letecký ústav VUT Brno. [Online] [Citace: 27. říjen 2012.] <http://lu.fme.vutbr.cz/ucebnice/opory/aerodynamics.php>.
20. Wikipedia. *Boundary Layer*. [Online] [Citace: 27. říjen 2012.] http://en.wikipedia.org/wiki/Boundary_layer.
21. Wikipedia. [Online] 24. září 2009. [Citace: 12. únor 2013.] <http://cs.wikipedia.org/wiki/V%C3%ADtr>.
22. Chemical Engineering Gate. [Online] Word Press. [Citace: 16. listopad 2012.] <http://www.roliv.com/boundary-layer-thickness-in-turbulent-flow.html>.
23. Cartage. [Online] [Citace: 12. listopad 2012.] <http://www.cartage.org>.
24. **McMahon, Niall**. Niall McMahon. [Online] [Citace: 3. prosinec 2012.] <http://www.niallmcmahon.com/>.

10. SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 1 Roční přírůstky instalovaného výkonu v regionech v letech 2004 – 2012 [1]
- Obr. 2 Celkový instalovaný výkon ve větrných elektrárnách v ČR [1]
- Obr. 3 Schéma strojovny větrné elektrárny VESTAS V52 [1]
- Obr. 4 Příklad větrné elektrárny bez převodovky MERVENTO [3]
- Obr. 5 Rychlostní a napěťový profil laminárního proudění
- Obr. 6 Rychlostní a napěťový profil turbulentního proudění
- Obr. 7 Mezní vrstva [6]
- Obr. 8 Silové poměry na aerodynamickém profilu
- Obr. 9 Závislost odporového a vztlakového koeficientu na úhlu náběhu
- Obr. 10 Odtržení mezní vrstvy [10]
- Obr. 11 Vývoj rychlostních profilů v mezní vrstvě při přechodu z nižšího tlaku do vyššího [11]
- Obr. 12 Grafické znázornění průběhu tlaku a rychlosti v 1-D systému [12]
- Obr. 13 Geometrie kontrolního objemu po korekci [12]
- Obr. 14 Průběh bezrozměrných koeficientů C_p a C_T v závislosti na indukčním faktoru a
- Obr. 15 Rychlosti na náběžné a odtokové hraně uvažovaného aerodynamického profilu
- Obr. 16 Znázornění kontrolního objemu pro aplikaci Eulerovy turbínové rovnice
- Obr. 17 Geometrická závislost
- Obr. 18 Závislost korigované účinnosti (vztaženo k Betzovu maximu) větrné turbíny na koeficientu rychloběžnosti s uvažováním rotace
- Obr. 19 Dělení lopatky větrné turbíny [13]
- Obr. 20 Geometrie lopatky jednotlivých elementů [4]
- Obr. 21 Oblast platnosti empirického vztahu podle Glauerta [4]
- Obr. 22 Vznik vírů při provozu větrné turbíny [14]
- Obr. 23 Schématické znázornění vlivu terénu na rychlost větru [16]
- Obr. 24 Weibullovo rozdělení větru v dané lokalitě
- Obr. 25 Výkonová charakteristika větrné turbíny
- Obr. 26 Stanovení návrhové rychlosti
- Obr. 27 Definice pojmů [17]
- Obr. 28 Aerodynamické koeficienty pro NACA 63-215
- Obr. 29 Průběh poměru aerodynamických koeficientů na úhlu náběhu
- Obr. 30 Distribuce úhlu kroucení po lopatce větrné turbíny
- Obr. 31 Rozložení tětiny po lopatce větrné turbíny
- Obr. 32 Průběh iterace na poloměru lopatky $r=38,0971\text{m}$
- Obr. 33 Průběh indukčních faktorů po celé délce lopatky
- Obr. 34 Průběh výkonového koeficientu po délce lopatky
- Obr. 35 Průběh Reynoldsova čísla po poloměru lopaty větrné turbíny

11. SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA A	ODVOZENÍ EULEROVY TURBÍNOVÉ ROVNICE
PŘÍLOHA B	ALGORITMUS KE STANOVENÍ NÁVRHOVÉ RYCHLOSTI
PŘÍLOHA C	ALGORITMUS KE STANOVENÍ PRVOTNÍCH ODHADŮ
PŘÍLOHA D	ITERACE
PŘÍLOHA E	VÝSLEDKY HYBRIDNÍHO MODELU VAS/WASP PRO LOKALITU DOLNÍ LHOTA