

---

# AERODYNAMIKA VĚTRNÝCH TURBÍN

---

- strana 10.3 – **Rozdělení větrných turbín podle principu transformace kinetické energie větru na práci**
  - strana 10.4 – **Aerodynamické součinitelé větrných turbín**
  - strana 10.5 – **Porovnání ideálního a reálného rotoru větrné turbíny**
  - strana 10.9 – **Návrh tvaru lopatky větrné turbíny pomocí aerodynamických součinitelů**
    - **Úloha 166:** Výpočet úhlu nastavení profilu lopatky na vyšetřovaném poloměru
    - **Úloha 153:** Výpočet sil působící na element lopatky
    - **Úloha 900:** Výpočet výkonového a náporového součinitele elementu lopatky a otáček
  - strana 10.14 – **Výkonová charakteristika větrné elektrárny**
    - **Úloha 461:** Výpočet výkonu rotoru větrné turbíny
    - **Úloha 592:** Výpočet ročního využití instalovaného výkonu větrné turbíny, viz čl. 11.
  - strana 10.15 – **Provoz větrných elektráren**
  - strana 10.18 – **Konstrukce lopatky větrné turbíny**
  - strana 10.20 – **Odkazy**
  - strana 10.21-32 – **Přílohy**
-

- **autor:** – ŠKORPÍK, Jiří ([LinkedIn.com/in/jiri-skorpik](https://www.linkedin.com/in/jiri-skorpik))
- **datum vydání:** – Leden 2023; Leden 2025 (2. vydání)
- **název:** – Aerodynamika větrných turbín
- **web:** – *turbomachinery.education*
- **provenience:** – Brno (Česká republika)
- **email:** – [skorpik.jiri@email.cz](mailto:skorpik.jiri@email.cz)

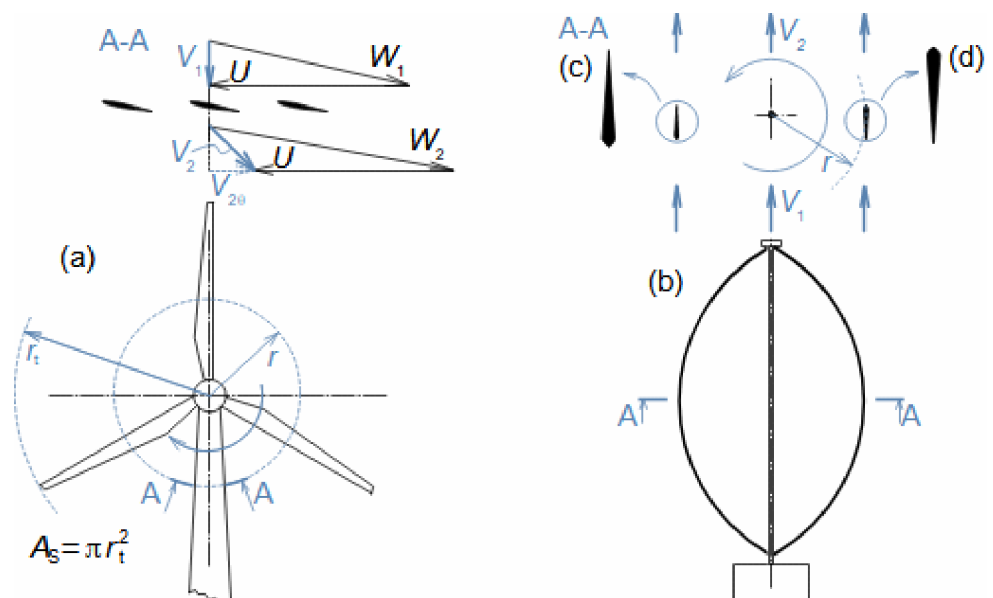
Copyright©Jiří Škorpík, 2023-2025  
Všechna práva vyhrazena.

---

## Rozdělení větrných turbín podle principu transformace kinetické energie větru na práci

Podle orientace osy rotace se rozdělují větrné turbíny na horizontální (HAWT– Horizontal axis wind turbine) a vertikální osou rotace (VAWT– Vertical axis wind turbine). Turbíny s horizontální osou rotace pracující na principu lopatkového stroje, ve kterém vzduch koná práci, když protéká lopatkovými kanály rotoru, viz **Obrázek 1283a**. Turbíny s vertikální osou rotace pracují na principu proměnlivého odporu lopatek během jedné otáčky, takže při stejném směru větru kladou v jednotlivých fázích otáčky rotoru různý odpor, viz **Obrázek 1283b**.

– **1283:** –  
Základní typy rotorů  
větrných turbín



(a) čelní pohled na větrnou turbínu s horizontální osou rotace a válcový řez A-A její lopatkové mříže; (b) čelní pohled na větrnou turbínu s vertikální osou rotace a řez A-A jejího rotoru (na obrázku je tzv. Darrieova turbína, ale existují i jiné koncepty turbín typu VAWT); (c), (d) detail změny orientace lopatek a jejich aerodynamický odpor při otáčení rotoru – v poloze (c) má lopatka větší odpor než v poloze (d) a tak vzniká moment sil na rotoru, který způsobuje otáčení turbíny.  $A_s$  [m<sup>2</sup>] opsaná plocha rotoru (swept area);  $r$  [m] vyšetřovaný poloměr rotoru;  $r_t$  [m] poloměr rotoru;  $U$  [m·s<sup>-1</sup>] obvodová rychlost na vyšetřovaném poloměru;  $V$  [m·s<sup>-1</sup>] absolutní rychlost proudu vzduchu;  $V_0$  [m·s<sup>-1</sup>] obvodová složka absolutní rychlosti;  $W$  [m·s<sup>-1</sup>] relativní rychlost proudu vzduchu. Index <sub>1</sub> označuje stav před rotorem, index <sub>2</sub> za rotorem.

HAWT vs. VAWT

Turbíny s vertikální osou rotace mají nějaké výhody (především nejsou závislé na směru větru a jsou schopny zpracovat i energii poryvu větru), ale dominantně používaným typem jsou turbíny s horizontální osou rotace, které mohou mít výrazně větší výkon a jsou účinnější – o těch je tento článek.

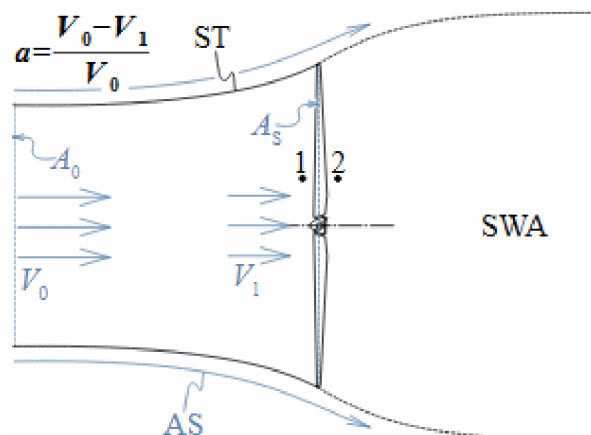
## Aerodynamické součinitelé větrných turbín

Aerodynamické veličiny rotorů větrných turbín poskytují informace pro návrh, výpočet rotoru i o jeho zatížení. Mezi aerodynamické veličiny větrné turbíny patří **axiální a obvodový součinitel**, které popisují změny rychlostí před a za rotorem, a **výkonový a náporový součinitel**, které popisují energetické, respektive silové zatížení rotoru.

~  
Definice axiálního  
součinitele

Axiální součinitel  $a$ , definovaný **Vzorcem 311**, kvantifikuje vztah mezi rychlostí větru daleko před rotorem a na vstupu do rotoru. Rychlost vzduchu před rotorem  $V_1$  je menší než rychlost větru v neovlivněné oblasti před větrnou turbínou  $V_0$ . To je dáno tím, že kolem rotoru se vytváří postupně se rozšiřující kanál, který je formován okolním proudem vzduchu obtékající zpomalený vzduch za rotorem, viz **Obrázek 311**. Tento kanál se nazývá proudová trubice. Axiální součinitel, respektive rychlost  $V_1$  se po poloměru lopatky mění. Přesné rozložení rychlostí v proudové trubici rotoru je uvedeno v [Miller et al., 1972, s. 1261].

– 311: –



ST-proudová trubice rotoru (stream tube); SWA-oblast zpomaleného proudu vzduchu (slowed wind area); AS-okolní proudění (ambient stream).  $A$  [ $\text{m}^2$ ] průtočná plocha;  $a$  [1] axiální součinitel (axial induction factor). Index  $0$  označuje stav na vstupu do proudové trubice, respektive rychlost větru.

~  
Definice obvodového  
součinitele

Obvodový součinitel  $a'$ , definovaný **Vzorcem 305**, kvantifikuje vztah mezi osovým vírem za rotorem a otáčkami turbíny. Větrná turbína je totiž stroj bez satorových lopatek (jedná se o tzv. vírový stroj), proto za rotorem musí nutně vznikat osový vír. Směr proudění vzduchu v tomto víru je proti směru otáčení rotoru.

– 305: –

$$a' = \frac{-V_{2\theta}}{2U} = \frac{-\Omega}{2\omega}$$

$a'$  [1] obvodový součinitel (angular induction factor);  $\Omega$  [ $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ ] úhlová rychlost osového víru za rotorem;  $\omega$  [ $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ ] úhlová rychlost rotoru. Záporné znaménko v čitateli neguje zápornou hodnotu rychlosti  $V_{2\theta}$ , respektive úhlovou rychlost víru za turbínou  $\Omega$ , které jsou záporné (směřují proti kladnému smyslu obvodového směru).

~  
Definice výkonového  
a náporového  
součinitele

Část kinetické energie vzduchu, který proudí skrz rotor, je transformována na práci, repektive výkon ve formě krouťícího momentu rotoru. Kromě toho, proud vzduchu působí ve směru proudění na turbínu i náporu stejně jako vítr působí na stromy, domy a další objekty. Kvantifikace výkonu a náporu větrné turbíny se provádí pomocí výkonového  $C_P$ , respektive náporového součinitele rotoru  $C_T$ . Výkonový součinitel je definován jako výkon přenesený větrem na turbínu ku kinetickému výkonu větru protékající stejnou plochou jako je opsaná plocha rotoru, viz **Rovnice 260a**. Náporový součinitel je definován jako poměr síly působící na rotor ve směru osy rotace (nápor) od proudu větru ku síle, kterou by působil dynamický tlak větru na opsanou plochu rotoru, viz **Rovnice 260a**. Je nutné odlišovat výkonový a náporový součinitel pro celý rotor a lokální na vyšetřovaném poloměru, viz **Rovnice 260b**.

– 260: –

$$(a) \quad C_P = \frac{P_i}{P_{wind}}; \quad P_{wind} = \frac{1}{2} \rho V_0^3 \cdot A_S$$

$$C_T = \frac{T}{\rho_d \cdot A_S}; \quad \rho_d = \frac{1}{2} \rho V_0^2$$

$$(b) \quad C_P = \frac{dP_i}{dP_{wind}}; \quad dP_{wind} = \frac{1}{2} \rho V_0^3 \cdot dA_S$$

$$C_T = \frac{dT}{\rho_d \cdot dA_S}; \quad dA_S = 2\pi r dr$$



(a) parametry pro celý rotor; (b) parametry na vyšetřovaném poloměru (lokální hodnota daného součinitele).  $C_P$  [1] výkonový součinitel;  $C_T$  [1] náporový součinitel;  $P_i$  [W] výkon větru přenesený na rotor větrné turbíny;  $P_{wind}$  [W]

kinetický výkon větru;  $P_d$  [Pa] dynamický tlak větru;  $T$  [N] nápor větru na rotor.  $\rho$  [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ] hustota vzduchu. Rovnice pro kinetický výkon větru  $P_{wind}$  je odvozena v **Příloze 260**.

### Porovnání ideálního a reálného rotoru větrné turbíny

Parametry **ideálního rotoru** větrné turbíny se označují jako **Betzův limit**. Reálné rotory těchto parametrů nemohou dosáhnout kvůli **ztrátám**, které nutně při transformaci kinetické energie větru na práci rotoru vznikají. Navíc u reálných rotorů dochází ke **zborcení proudové trubice**, což zvyšuje hodnotu náporového součinitele oproti ideálnímu stavu.

~  
Definice ideálního  
rotoru větrné turbíny

Teorie ideálního rotoru slouží k pochopení transformace energie ve větrné turbíně a ke stanovení ideálních hodnot axiálního, obvodového, výkonového a náporového součinitele. Nejčastěji je ideální rotor definován tak, že je přesně uprostřed proudové trubice, respektive opsaná plocha rotoru je stejně velká jako střední průtočný průřez proudové trubice; proudění proudovou trubicí je beze ztrát; rozložení axiální složky rychlosti je rovnoměrné, tj. v každém místě jednoho osového řezu konstantní; na výstupu z proudové trubice má rychlost pouze osový směr.

Betzův limit  
ideálního rotoru

Pro ideální rotor lze odvodit hodnoty axiálního, obvodového, náporového a výkonového součinitele, viz **Tabulka 326**. Hodnota výkonového součinitele ideálního rotoru se nazývá Betzův limit.

– **326:** –  
Parametry ideálního  
rotoru větrné turbíny

$a$	$a'$	$C_{P, \max} (C_{P, \text{Betz}})$	$C_T$
1/3	0	16/27	8/9

$a, a', C_p, C_T$  [1]. Odvození hodnot je uvedeno v **Příloze 326**. Jiný (novější) postup odvození je v [Tyagi and Schmitz, 2025].

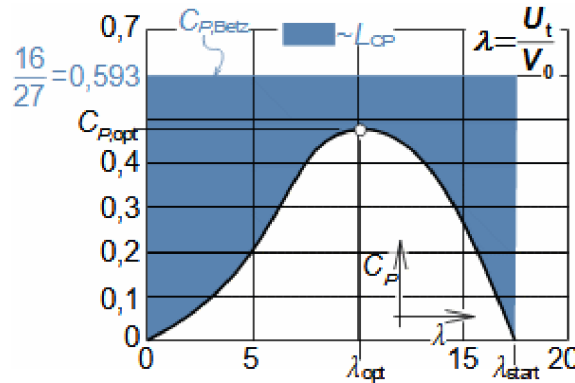
Otáčky ideálního  
rotoru

Z **tabulky 326** plyne, že ideální rotor má nekonečně vysoké otáčky ( $N \rightarrow \infty$ ), aby podíl obvodové složky absolutní rychlosti  $V_{20}$  a obvodové rychlosti  $U$  byl nulový ( $a'=0$ ). Reálné větrné turbíny mají obvodový součinitel nenulový odpovídající Eulerově práci na daném poloměru lopatky.

~  
Vliv ztrát na práci  
rotorů větrných  
turbín

Reálné větrné turbíny nemohou dosáhnout tak vysoké hodnoty výkonového součinitele jako je  $C_{P, \text{Betz}}$  kvůli ztrátám, které při proudění vzduchu proudovou trubicí rotoru vznikají. Velikost ztrát zejména závisí na počtu lopatek rychlosti větru, průměru rotoru a jeho otáčkách. Průměr rotor a jeho otáčky jsou charakterizovány obvodovou rychlostí u špic lopatek  $U_t$ . Německý aerodynamik Albert Betz, (1885-1968) při zkoumání naměřených dat rotorů větrných turbín zjistil, že ztráty rotoru turbíny se mění s velikostí poměru obvodové rychlosti  $U_t$  a rychlosti větru  $V_0$ , který nazval součinitel rychloběžnosti  $\lambda$ . Na **Obrázku 799, s. 10.7** je zakreslen průběh výkonového součinitele reálné větrné turbíny se dvěma lopatkami, přičemž ztráty odpovídají rozdílu mezi  $C_{P, \text{Betz}}$  (pro  $\lambda \rightarrow \infty$ ) a skutečnou hodnotou  $C_p$ . Součinitel rychloběžnosti, při kterém turbína dosahuje maximální hodnoty výkonového součinitele je označen jako optimální.

– **799:** –  
 Výkonový součinitel rotoru větrné turbíny a ztráty podle Betze



$L_{CP}$  [1] ztráty na výkonovém součiniteli;  $U_t$  [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ] obvodová rychlost na špičce lopatky;  $\lambda$  [1] součinitel rychloběžnosti;  $\lambda_{\text{start}}$  [1] součinitel rychloběžnosti, při kterém je větrná turbína schopna samostatného chodu. Index  $\text{opt}$  označuje optimální parametry. Data z [Hau, 2006, s. 98].

Optimální hodnoty součinitele rychloběžnosti s ohledem na ztráty

Hodnota maximálního neboli optimálního výkonového součinitele rotoru  $C_{p, \text{opt}}$  závisí zejména na počtu lopatek. Této hodnoty dosahuje pouze při konkrétní hodnotě součinitele rychloběžnosti označovaném jako  $\lambda_{\text{opt}}$ . Hodnota  $\lambda_{\text{opt}}$  závisí nejen na počtu lopatek, ale také na tvarech profilů lopatek, viz **Úloha 900, s. 10.14**. V **Tabulce 615** jsou uvedeny obvyklé parametry rotorů větrných turbín – úplné křivky  $C_p$ - $\lambda$  pro různé počty lopatek jsou uvedeny v [Hau, 2006, s. 98].

– **615:** –

Z	1	2	3
$\lambda_{\text{opt}}$	~15,5	~10,1	~5,75
$C_{p, \text{opt}}$	~0,42	~0,48	~0,455

Data z [Hau, 2006, s. 98]

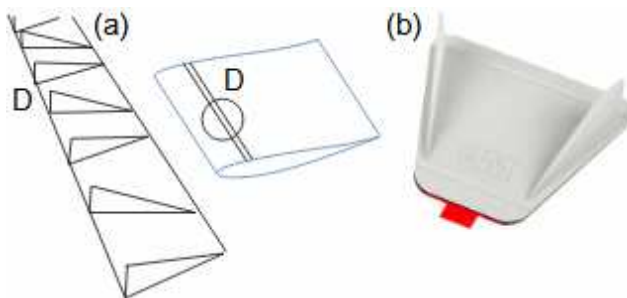
Ztráta osovým vírem za rotorem

Dominantní ztrátou je ztráta kinetickou energií osového víru za turbínou. Absolutní hodnota  $V_{20}$ , podle Eulerovy rovnice pro práci lopatkového stroje, pro stejnou Eulerovu práci s obvodovou rychlostí klesá, proto s klesajícími otáčkami ztráta v kinetické energii víru roste. Ztráta vírem za turbínou se projeví tak, že hodnota obvodového součinitele  $a'$  není rovna nule jako u ideálního rotoru.

Profilové ztráty rotorů

Profilové ztráty vznikají při proudění vzduchu kolem lopatky a projevují se odporem profilu, více o profilových ztrátách je v článku Aerodynamika profilů [Škorpík, 2022]. Typickým problémem lopatek větrných turbín je malé Reynoldsovo číslo u pat lopatek a tím i malá turbulizace proudu. To znamená i zvýšenou citlivost na ztrátu odtržením proudu. Tomu se zabráňuje například instalací turbulizátorů (ang. vortex generators), viz **Obrázek 599, s. 10.8**. Turbulizátory stabilizují mezní vrstvu i při nižších rychlostech větru než optimálních, proto se používají nejčastěji u suchozemských turbín, kde jsou nižší rychlosti větru.

– **599:** –  
*Turbulizátor lopatky  
 větrné turbíny (vortex  
 generators)*



(a) detail turbulizátoru na přetlakové straně lopatky; (b) turbulizátor od společnosti 3M s lepicí ploškou (foto 3m.com), který lze použít k dodatečnému vybavení lopatky turbíny (například při použití

turbíny v lokalitě s nižší rychlostí větru než na jakou byla navržena) – všimněte si profilu žeber turbulizátoru.

*Okrajové ztráty u pat  
 a špic lopatek*

Okrajové ztráty jsou ztráty vznikající mimo profilovou část lopatek. U pat lopatek ji ovlivňuje proudění kolem gondoly elektrárny. U špic se jedná především o ztrátu přetékáním proudu z přetlakové strany lopatky na sací stranu lopatky [Wilson et al., 1976, s. 32], takže u špice vzniká okrajový vír, který dále podporuje vznik víru po celé délce lopatky stejně jako u špic křídel letounů [Abbott and Doenhoff, 1959, s. 9], proto se tomu zamezuje podobnými způsoby jako u křídel.

*Opatření ke snížení  
 okrajových ztrát*

Okrajové ztráty lze snížit zahnutím špic lopatek (tzv. tip vane) [Hau, 2006, s. 127]. U malých větrných turbín lze použít i bandáže [Hansen, 2008, s. 41] (pevnou nebo statickou, která není spojená se špicemi lopatek). Bandáž následně zvyšuje výkonový součinitel turbíny i tím, že při poklesu okrajových ztrát roste hmotnostní tok vzduchu rotorem.

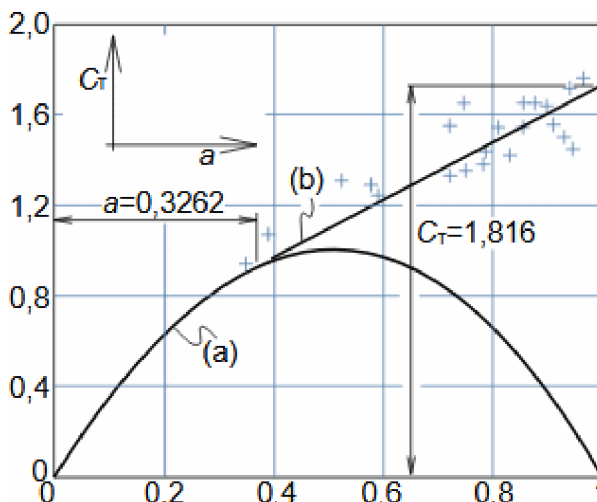
*Nestacionární  
 aerodynamické jevy v  
 okolí rotorů, které  
 zvyšují ztráty*

Mimo uvedené ztráty se na práci rotoru projevují nestacionární aerodynamické jevy, tedy jevy, které jsou během otáčky turbíny proměnné. Mezi ně patří vliv aeroelasticity lopatky včetně rozkrucování lopatek. U dlouhých lopatek se už projevuje rozdílný profil rychlosti větru mezi nejvyšší a nejnižší polohou lopatek, který způsobuje nerovnoměrné zatížení turbíny během jedné otáčky. Tato nerovnoměrnost může způsobit rozkmitání celé turbíny a následně i elektrárny a její poškození či destrukci – tomu zabraňuje diagnostika rotorové soustavy v reálném čase a natáčení lopatek. Stálé proudění rotorem je také ovlivňováno turbulencí a víry za turbínou, případně nestacionární proudění vzduchu (poryvy větru). Střídavě se také projevuje vliv sloupu. Více o těchto problémech například [Hansen, 2006, s. 85], [Manwell et al., 2002, s. 134].

~  
Zborcení proudové  
trubice

Rovnici pro hodnotu náporového součinitele lze odvodit pomocí věty o změně hybnosti, viz **Rovnice 357a**. Tato rovnice odpovídá výsledkům experimentů přibližně do hodnoty  $a \approx 1/3$ , za touto hodnotou následuje zborcení proudové trubice a nárůst náporového součinitele oproti výpočtu, viz **Obrázek 357c**. Přičemž u většiny reálných turbín maximální hodnota axiálního součinitele  $a$  nepřekračuje 0,6 [Sharpe, 1990]. Podle [Anderson, 1980] dojde ke zhroucení při hodnotě  $a=0,3262$  a navrhnul naměřená data aproximovat přímkou definovanou **Rovnicí 357b**, ale existují i další aproximace, viz [Wilson et al., 1976, s. 49], [Liew et al., 2024].

– **357:** –  
Náporový součinitel  
rotoru větrné turbíny



$$(a) C_T = 4a(1-a)$$

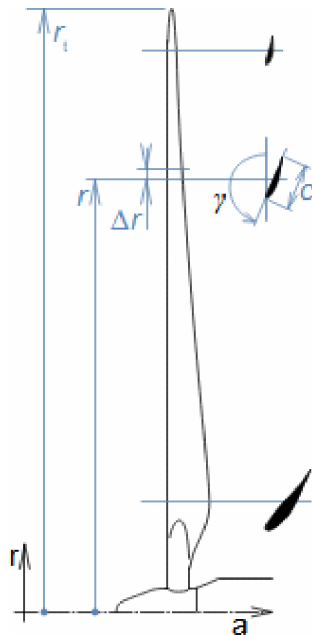
$$(b) C_T = 0,4256 + 1,3904 \cdot a$$

(a) rovnice odvozená pro ideální rotor; (b) aproximace naměřených hodnot náporového součinitele rotoru s počátkem v  $a=0,3262$ . Za axiální součinitel  $a$  je dosazena střední hodnota po délce lopatek. Odvození rovnice (a) je uvedeno v **Příloze 357**.

## Návrh tvaru lopatky větrné turbíny pomocí aerodynamických součinitelů

Návrh lopatky se provádí analytickým 2D výpočtem, tj. rozdělení lopatky na elementární stupně, proto též anglický název *Blade element method (BEM)*, viz **Obrázek 642, s. 10.10**. Předpokladem je, že proudění rotorem nemá radiální složku. Návrh začíná **výběrem vhodného profilu** a odhadem hodnot axiálního  $a$  a obvodového součinitele na vyšetřovaném poloměru. Z těchto predikcí lze vypočítat, pomocí teorie leteckého profilu, viz článek *Aerodynamika profilů* [Škorpík, 2022], rychlosti v rychlostních trojúhelnících, **úhel nastavení profilu**, **délku tětiny** i **síly působící na vyšetřovaný element lopatky**. Odtud lze stanovit i lokální hodnoty výkonového a náporového součinitele. Ověření přesnosti odhadu hodnot axiálního a obvodového součinitele na vyšetřovaném poloměru lze pomocí **energetické a silové rovnováhy** počítaného elementu lopatky. Celkový výkon turbíny je pak součtem výkonů všech elementů lopatky.

– **642:** –  
*Elementární stupeň  
 větrné turbíny*



Při 2D výpočtu elementárního stupně větrné turbíny očekáváme, že pro každý vyšetřovaný poloměr lopatky bude vycházet rozdílná délka těţivý profilu  $c$  a úhel nastavení profilu  $\gamma$ . U špičky lopatky bývají obvykle aerodynamické prvky pro snížení okrajových ztrát případně aerodynamickou regulací turbíny.  $c$  [m] délka těţivý;  $\gamma$  [°] úhel nastavení profilu v mříţi;  $\Delta r$  [m] výška elementu lopatky.

~  
*Kritéria pro výběr  
 profilu lopatky*

Základem návrhu výpočtu lopatky je výběr jejího vhodného profilu. Profil musí plnit zejména aerodynamické požadavky kladené na profil na vyšetřovaném poloměru. Například podle [Stiesdal, 1999] jsou pro větrné turbíny vhodné profily řady NACA 63. Správně navržený profil zajistí požadované zakřivení proudu (**Obrázek 1065, s. 10.11**) a tedy i práci na dané poloměru lopatky. To lze ovlivnit zejména nátokovým úhlem nebo otáčkami, respektive navrženým součinitelem rychloběžnosti s jehoţ velikostí potřebné zakřivení proudu klesá, viz **Úloha 900, s. 10.14**. Také se přihlíţí k citlivosti ulpívání prachu na ploše profilu a opotřebení, které jsou dány rozloţením rychlosti podél profilu, respektive průběhem tlakového součinitele profilu. Výběr profilu je ovlivněn také hygienickými požadavky na hlučnost v dané lokalitě.

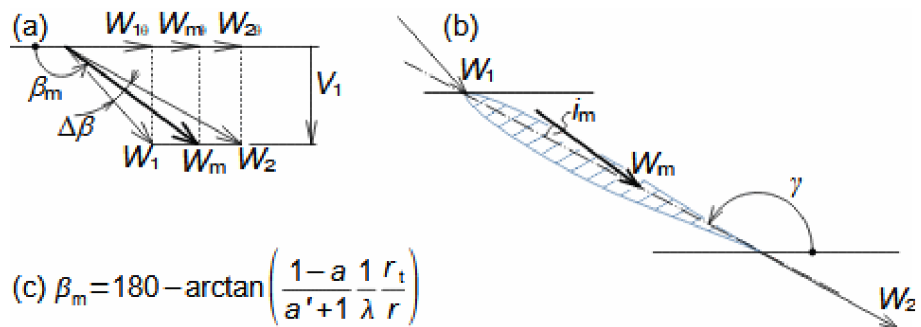
*Změna typu profilu  
 po délce lopatky*

Typ profilu se po délce lopatky může měnit, aby bylo dosaţeno co nejoptimálnějších aerodynamických i pevnostních vlastností lopatky na vyšetřovaném poloměru. Přičemţ u špic bývají velmi tenké profily s poměrem maximální tloušťky profilu ku těţivě cca 0,2, ale u pat 0,4, kde musí být tlustší z pevnostních důvodů lopatky [Hansen, 2008, s. 58].

~  
Výpočet úhlu  
nastavení profilu

Pomocí odhadnutých hodnot axiálního a obvodového součinitele a optimální hodnoty součinitele rychloběžnosti lze vypočítat (podle **Vzorce 1065c**) úhly rychlostí, zejména úhel střední aerodynamické rychlosti  $W_m$ . Nátokový úhel střední aerodynamické rychlosti odpovídá optimálnímu nátokovému úhlu profilu lopatky a pro navržené Reynoldsovo číslo. Z těchto údajů je možné vypočítat i úhel nastavení profilu v mříži  $\gamma$  na vyšetřovaném poloměru, viz **Obrázek 1065** a postup řešení **Úlohy 166, s. 10.12**.

– 1065: –



$W_m$  [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ] střední aerodynamická rychlost;  $\beta_m$  [ $^\circ$ ] úhel střední aerodynamické rychlosti;  $\Delta\beta$  [ $^\circ$ ] zakřivení proudu;  $i_m$  [ $^\circ$ ] nátokový úhel střední aerodynamické rychlosti (úhel mezi střední aerodynamickou rychlostí a tětivou). Index  $m$  označuje střední aerodynamickou rychlost.

Odvození tohoto vzorce je uvedeno v **Příloze 1065**.

Lopatky s  
konstantním úhlem  
nastavení profilu

Některé rotory větrných turbín mají přímé lopatky ( $c=\text{konst.}$ ,  $\gamma=\text{konst.}$ ). V takovém případě jsou optimální parametry profilu splněny pouze na jednom poloměru, obvykle středním kvadratickém poloměru. Důvodem ke stavbě takových lopatek jsou technologické. Například u lopatek vyrobené z kovu nebo dřeva, respektive materiálu, který nelze tvarovat za studena do potřebných složitějších tvarů nebo jen velmi těžce za vyšších nákladů. Například první větrná turbína o výkonu 1 MW z roku 1941 (viz **Obrázek 172, s. 10.12**) měla ocelové přímé lopatky, protože šlo o to snížit na minimum výrobní náklady [Hau, 2006]. Na druhou stranu takový jednoduchý tvar lopatek samozřejmě vede na větší aerodynamické ztráty i hluchost.

- **172:** –  
Větrná elektrárna  
Smith-Putnam



Větrná elektrárna Smith-Putnam z roku 1941 byla konstruována s ohledem na co nejmenší výrobní náklady. Přímé lopatky byly klasické žebrované konstrukce. Vnitřní žebra lopatek byly z oceli a vnější ocelový plášť z nerezové oceli. Lopatky byly dlouhé 20 m a každá vážila 8 tun. Průměr rotoru 53,3 m při jmenovitém výkonu 1 250 kW. Regulace výkonu elektrárny byla pomocí natáčení lopatek.

- **Úloha 166:** – Vypočítejte základní úhly lopatky rotoru větrné turbíny o průměru 140 m a třemi lopatkami. Výpočet proveďte na poloměru 10 m pro profil NACA 63-209. Hodnoty axiálního a obvodového součinitele zatím pouze odhadněte. Řešení úlohy je uvedeno v **Příloze 166**.

~  
Výpočet délky tětivy  
profilu

Jestliže jsou stanoveny základní úhly profilu, lze vypočítat i délku tětivy pro navrženou hodnotu Reynoldsova čísla. Nicméně k takovému výpočtu už je nutná znalost rychlosti větru, pro kterou je rotor počítán, viz **Úloha 153**.

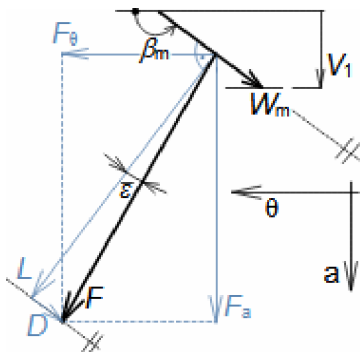
Korekce délky tětivy  
u paty lopatky

Vypočítaná délka tětivy s klesajícím vyšetřovaným poloměrem rotoru roste až do extrému. Z toho důvodu se v této oblasti délka tětivy koriguje a dává se přednost pevnosti a hmotnosti lopatky. Vzhledem k nízkému výkonovému přínosu v centrální oblasti rotoru ve vztahu k ploše celého rotoru není výkonová ztráta v důsledku zkrácením tětivy významná.

~  
Výpočet síly na  
vyšetřovaný element  
lopatky

Sílu na element lopatky na vyšetřovaném poloměru  $r$  od proudu vzduchu lze vypočítat se vztlaku a odporu profilu, viz článek Aerodynamika profilových mříží a **Obrázek 1084**. Příklad výpočtu síly působící na element lopatky je proveden v **Úloze 153**.

- **1084:** –  
Rozklad síly působící  
na lopatku na  
vyšetřovaném  
poloměru



$\theta$ -obvodový směr;  $\alpha$ -axiální směr (osový).  $D$  [N] odpor;  $F$  [N] síla působící na element lopatky od proudu vzduchu;  $L$  [N] vztlak;  $\epsilon$  [°] klouzácí úhel.

- **Úloha 153:** – Vypočítejte délku tětivy a jednotkové síly působící na element lopatky rotoru z **Úlohy 166**. Výpočet proveďte pro jmenovitou rychlost větru  $6,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  a hustotu vzduchu  $1,2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Řešení úlohy je uvedeno v **Příloze 153**.

~  
Rovnice energetické rovnováhy vyšetřovaného elementu lopatky

Přesnost odhadu axiálního  $a$  a obvodového  $a'$  součinitele lze ověřit z energetické rovnováhy lokálních hodnot výkonového součinitele na vyšetřovaném poloměru, kterou lze vypočítat dvěma způsoby. Jednak z obvodové síly  $F_\theta$ , respektive kroutícího momentu od této síly (**Vzorec 358a**), jednak z Eulerovy turbínové rovnice (**Vzorec 358b**). Obě hodnoty se musí rovnat (**Rovnice 358c**), viz **Úloha 900, s. 10.14**.

– 358: – (a)  $C_{P,EW} = \frac{w_E d \dot{m}}{\frac{1}{2} \rho V_0^3 d A_s} = 4 a' (1-a) \lambda^2 \left(\frac{r}{r_t}\right)^2$  (b)  $C_{P,AT} = \frac{Z \cdot F_\theta \cdot \lambda}{\rho V_0^2 \pi \cdot r_t}$   
(c)  $C_{P,EW} = C_{P,AT} = C_P$

$m$  [kg·s<sup>-1</sup>] hmotnostní tok;  $w_E$  [kg·s<sup>-1</sup>] Eulerova práce na vyšetřovaném poloměru. (a) výkonový součinitel podle definice Eulerovy práce (Euler work); (b) výkonový součinitel podle teorie leteckého profilu (Airfoil theory); (c) podmínka energetické rovnováhy. Odvození rovnic je uvedeno v **Příloze 358**.

Korekce rovnic energetické rovnováhy pomocí Prandtlůva součinitele

Rovnost definovaná **Rovnicí 358c** je založena na předpokladu, že Eulerova práce  $w_E$  je na celém vyšetřovaném poloměru stejná a odpovídající rychlostnímu trojúhelníku, respektive zakřivení proudu v okolí lopatek. Ve skutečnosti se zakřivení proudu po obvodu trochu mění, přičemž největší je v okolí lopatek a nejmenší v ose lopatkového kanálu. Rozdíl se zvyšuje s klesajícím počtem lopatek a v blízkosti špic lopatek, kde se významně projevuje vliv okrajových ztrát a radiální složka rychlosti proudění. Z toho důvodu navrhl Prandtl korigovat hodnotu Eulerovy práce pomocí součinitele  $C_F$ , viz **Rovnice 1089**. Na **Obrázku 448, s. 10.14** jsou výsledky výpočtu lopatky větrné turbíny z **Úloh 166, 153 a 900** s Prandtlovou korekcí.

– 1089: – (a)  $C_{P,EW} C_F = C_{P,AT} = C_P$  (b)  $C_F = \frac{2}{\pi} \arccos \frac{1}{e_f}; f = \frac{Z}{2} \frac{r_t - r}{r \cdot \sin \beta_m}$   
(a) podmínka správného návrhu hodnot axiálního a obvodového součinitele s Prandtlovou korekcí; (b) Prandtlův součinitel.  $C_F$  [1] Prandtlův součinitel. Součin  $w_E \cdot C_F$  představuje střední hodnotu Eulerovy práce na vyšetřovaném poloměru. Prandtlův součinitel  $C_F$  byl původně odvozen pro vrtule, nicméně se ho používá při výpočtu větrných turbín i v současnosti [Wilson et al., 1976], [Hansen, 2008, s. 52].

~  
Rovnice silové rovnováhy vyšetřovaného elementu lopatky

Současně s energetickou rovnováhou musí (**Rovnice 358c**) musí platit silová rovnováha pro náporový součinitel. Náporový součinitel na vyšetřovaném poloměru lze vypočítat dvěma způsoby. Jednak pomocí věty o změně hybnosti (**Vzorec 1088a**), jednak pomocí teorie leteckého profilu, respektive ze síly  $F_a$  (**Vzorec 1088b**). Obě hodnoty se musí rovnat (**Rovnice 1088c**), viz **Úloha 900, s. 10.14**.

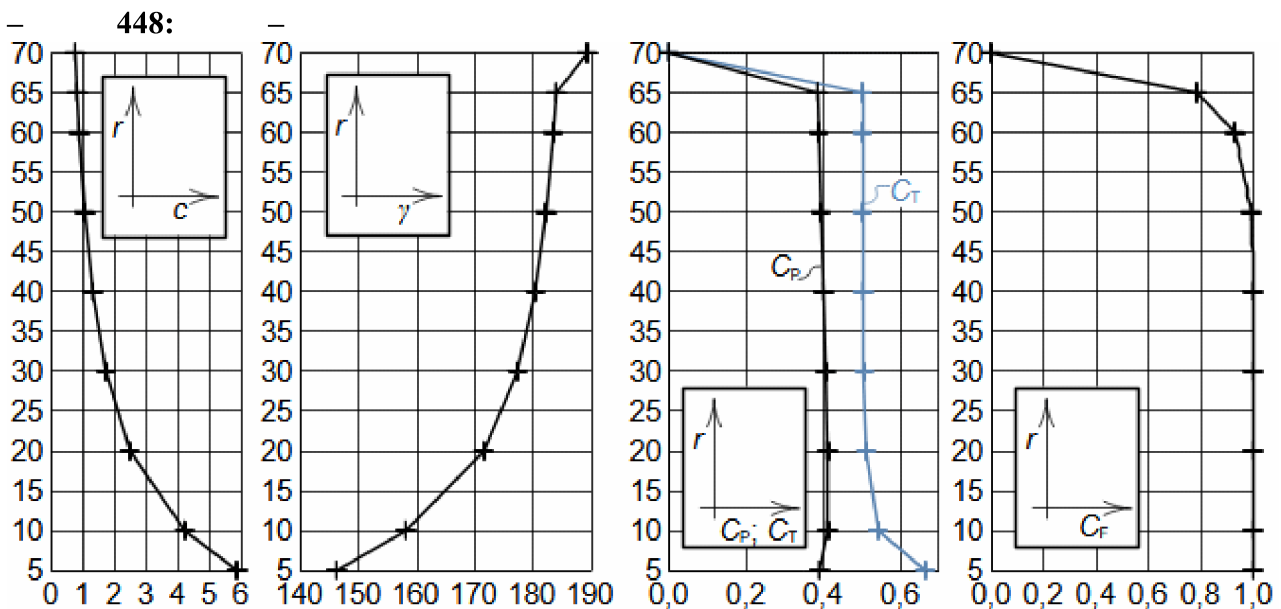
– 1088: – (a)  $C_{T, TM} = 4 a (1-a)$  (b)  $C_{T, AT} = \frac{Z \cdot F_a}{\rho_d \cdot 2 \pi r}$  (c)  $C_{T, TM} = C_{T, AT} = C_T$

(a) náporový součinitel odvozený z věty o změně hybnosti (Theorem of momentum change) – vzorec je odvozen již v **Příloze 1088** a je totožný se **Vzorcem 357, s. 10.9** a jeho platnost je potvrzena přibližně jen do hodnoty  $a=1/3$ ; (b) náporový součinitel podle teorie leteckého profilu; (c) podmínka silové rovnováhy. Odvození rovnice (b) je uvedeno v **Příloze 1088**.

Korekce rovnic silové rovnováhy pomocí Prandtlova součinitele

Někteří autoři (například [Wilson et al., 1976], [Hansen, 2008, s. 52]) doporučují korigovat hodnoty náporového součinitele pomocí Prandtlova součinitele podobně jako hodnoty výkonového součinitele, ale jak ukazuje **Obrázek 357, s. 10.9**, tak v oblasti cca do  $a=1/3$  jeho střední hodnota odpovídá **Vzorcem 357a, s. 10.9** bez korekcí – od této hodnoty se používají jiné typy korekcí [Hansen, 2008, s. 53].

- **Úloha 900:** – Proveďte výpočet výkonového a náporového součinitele v oblasti elementu lopatky větrné turbíny řešené v **Úloze 166** a **153**. Vypočítejte také otáčky rotoru. Řešení úlohy je uvedeno v **Příloze 900**.



Parametry lopatky rotoru větrné turbíny uvedené v **Úlohách 166, 153** a **900** s Prandtlovou korekcí. Parametry jsou počítány pro případ, kdy veličiny  $C_L$ ,  $C_D$  a  $i_m$  jsou konstantní.  $r$  [m];  $c$  [m];  $\gamma$  [°];  $C_P$ ,  $C_T$  [1];  $C_F$  [1]. Data pro konstrukci grafů jsou uvedena v **Příloze 448**.

### Výkonová charakteristika větrné elektrárny

Obvyklou výkonovou charakteristikou větrných elektren bývá závislost jejího výkonu  $P$  na rychlosti větru  $V_0$  pro provozní otáčky, viz **Obrázek 1098, s. 10.16**. Tuto charakteristiku lze zkonstruovat z bezrozměrné charakteristiky větrných turbín  $C_P$ - $\lambda$  [Manwell et al., 2002, s. 129] nebo přesněji výpočtem výkonu rotoru větrné turbíny pro jednotlivé rychlosti větru (v **Úloze 461, s. 10.15** je uveden výpočet výkonu pro optimální rychlost větru) a současným započítáním ztrát v mechanismech, elektrickém generátoru a vlastní spotřeby větrné elektrárny.

- **Úloha 461:** – Vypočítejte očekávaný výkon rotoru větrné turbíny z řešené v **Úlohách 166, 153 a 900**. Konečné parametry lopatek jsou uvedeny na **Obrázku 448, s. 10.14**. Vypočítejte také výkonový a náporový součinitel tohoto rotoru. Řešení úlohy je uvedeno v **Příloze 461**.

*Změny výkonu větrné turbíny s rychlostí větru*

Větrná elektrárna je schopna generovat výkon jen v určitém intervalu rychlostí větru. Existuje tedy startovací rychlost větru (minimální rychlost větru, při kterém elektrárna pracuje) a odstavoací rychlost větru (maximální povolená rychlost větru). Při startu větrné elektrárny se s rostoucí rychlostí větru její výkon zvětšuje až do jejího jmenovitého výkonu neboli instalovanému výkonu, který je dán maximálním výkonem generátoru. Od jmenovité rychlosti větru je výkon větrné turbíny udržován na konstantní hodnotě i při zvyšující se rychlosti větru, viz **Obrázek 1098, s. 10.16**.

### Provoz větrných elektráren

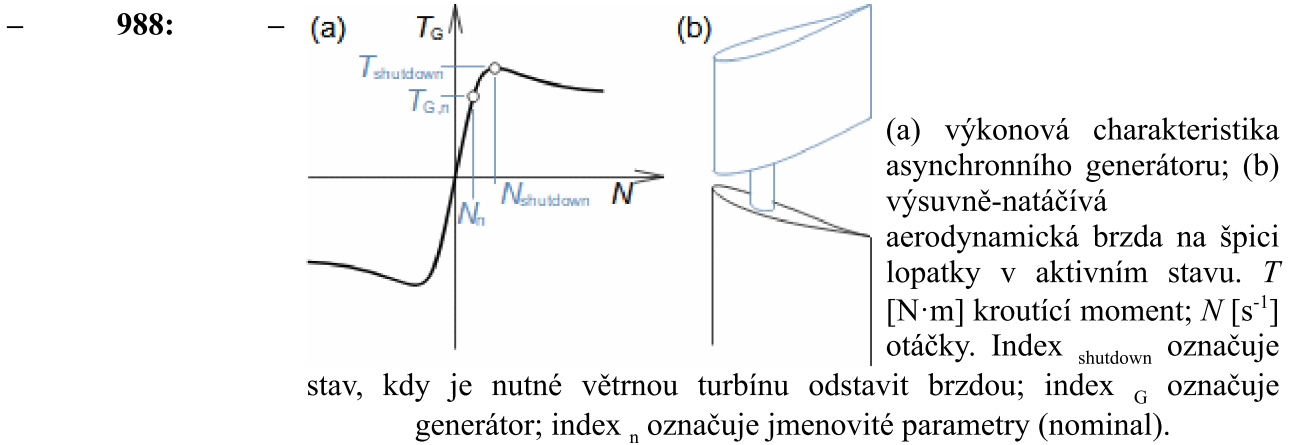
*Regulace větrné elektrárny reaguje na změny rychlosti větru s ohledem na výkonovou charakteristiku větrné elektrárny a její bezpečnost. Regulace větrné turbíny začíná jejím **startem** a lze ji provádět čtyřmi základními způsoby a to **aerodynamickou regulací, natáčením lopatek, změnou otáček a bočením**.*

~  
*Start větrné turbíny*

Regulace větrné turbíny už začíná jejím startem, při kterém obvykle nestačí pouhé odbrždění rotoru. S klesajícím počtem lopatek totiž klesají provozní otáčky a tedy roste kroutící moment a to i ten startovní. Takže turbíny s menším počtem lopatek pro start potřebují impuls k otáčení rotoru, buď přes generátor, a nebo natočením lopatek do jiných než optimálních úhlů navržených pro otáčející se rotor.

~  
*Aerodynamická regulace*

Aerodynamická regulace je jednoduchý způsob jak udržovat otáčky větrné turbíny v požadovaném rozmezí. Používá se v přídech, kdy větrná turbína pohání asynchronní generátor, který se zvyšujícím se výkonem zvyšuje i své otáčky, viz **Obrázek 988a, s. 10.16**. Se zvyšujícími se otáčkami se totiž zvyšují i síly působící na lopatku. Pomocí těchto sil se při jmenovitých otáčkách vysunou aerodynamické brzdy u špic lopatek (**Obrázek 988b, s. 10.16**), nebo podél lopatek – jeden z možných mechanismů aerodynamické brzdy je uveden v [Miller et al., 1972, s. 1255]. Při otáčkách maximálního výkonu generátoru  $P_{\text{shutdown}}$  dojde k zastavení turbíny, protože už rychlost větru dosahuje takové úrovně, kdy už aerodynamické brzdy nejsou schopny účinně regulovat otáčky turbíny.

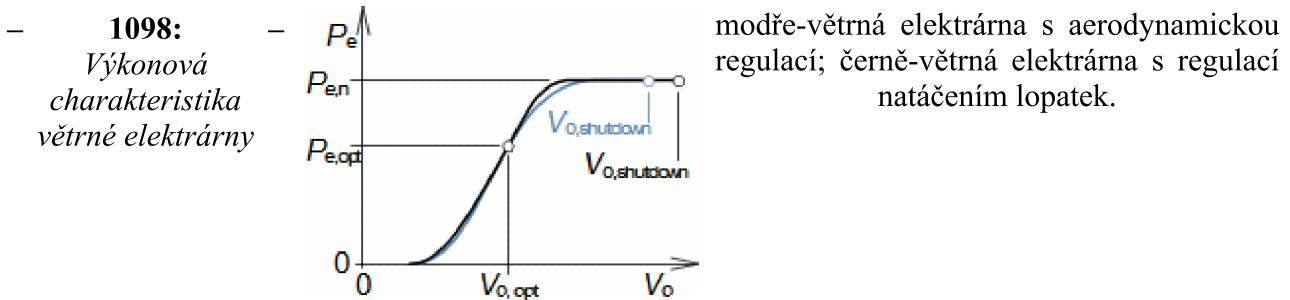


~  
Regulace výkonu  
turbíny natáčením  
lopatek

Výkon větrné turbíny lze i ovlivňovat natáčením lopatek pomocí mechanismu v náboji rotoru. Při výkonech menších než  $P_{e,n}$  (**Obrázek 1098**) je pomocí natáčení lopatek udržován optimální nátokový úhel lopatky  $i_m$ . Naopak při dosažení výkonu  $P_{e,n}$  jsou lopatky natočeny mimo optimální nátokový úhel, tak aby výkon  $P_{e,n}$  nebyl překročen.

Natáčení lopatek vs.  
Aerodynamická  
brzda

Výkony větrných elektráren s natáčivými lopatkami jsou vyšší oproti elektrárnám s aerodynamickou regulací zejména při rychlostech větru větších než optimálních, viz **Obrázek 1098**. Také mají obvykle i širší provozní rozsah rychlosti větru.



Start a odstavení  
větrné turbíny  
pomocí natáčení  
lopatek

Natáčení lopatek se využívá i při startu a odstavení turbíny. Při startu se nastavuje takový nátokový úhel, při kterém bude mít rotor co největší kroutící moment. Pokud ani to nestačí k roztočení turbíny, pak se musí rotor roztočit i pomocí generátoru pracující v motorovém chodu. Při odstavení se nastaví lopatky do pozice "praporování", tzn. do takové polohy, kdy se na lopatkách nevytváří vztlak a vítr turbínu neroztáčí.

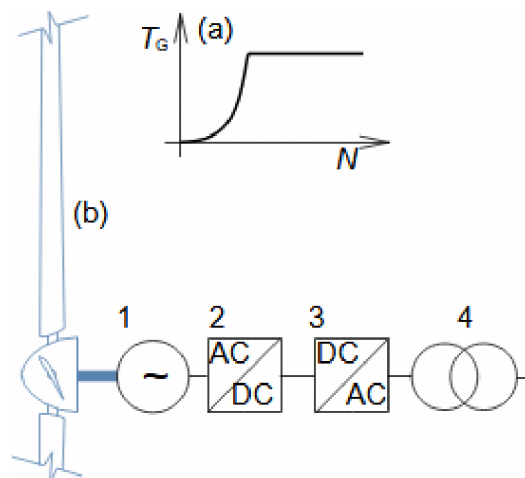
~  
Regulace výkonu  
větrných turbíny  
změnou otáček

Kombinace regulace natáčením lopatek se změnou otáček turbíny umožňuje dosáhnout maximálního ročního využití instalovaného výkonu větrné elektrárny. Jestliže je možnost měnit otáčky turbíny, pak to znamená, že při stejném kroutícím momentu lze dosáhnout různých výkonů generátoru podle jeho charakteristiky. Měnit otáčky turbíny lze stupňovitě pomocí víceúrovňové převodovky, nebo spojitě pomocí speciální převodovky nebo multifrekvenčního generátoru bez převodovky. Multifrekvenční generátory, nebo generátory s rychlostními převodovkami se používají tam, kde jsou velké výkyvy v rychlostech větru, respektive v oblastech, ve kterých je rychlost větru často pod jmenovitou hodnotou. Jedná se tedy o elektrárny suchozemské, tzv. onshore.

Změna otáček  
větrných turbíny s  
multifrekvenční  
generátory

Na **Obrázku 1095a** je charakteristika  $T-N$  multifrekvenčního generátoru. Všimněme si, že v širokém rozsahu otáček zůstává kroutící moment generátoru a tedy i turbíny konstantní. To umožňuje, udržovat součinitel rychloběžnosti v optimální oblasti a turbína pracuje s vysokou hodnotou výkonového součinitele v širokém rozsahu rychlostí větru.

— **1095:** —  
Schéma zapojení  
multifrekvenčního  
generátoru větrné  
elektrárny



(a) charakteristika multifrek. generátoru; (b) elektrárny s multifrek. generátorem musí obsahovat také výkonovou elektroniku pro změnu frekvence dodávaného proudu. 1-multifrek. generátor; 2-usměrňovač střídavého proudu na proud stejnosměrný; 3-střídač stejnosměrného proudu; 4-připojení elektrárny k přenosové soustavě. AC-střídavý proud; DC-stejnosměrný proud.

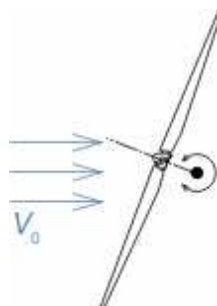
Změna otáček  
větrných turbíny s  
asynchronními  
generátory

Aerodynamická brzda není jediný regulační člen při spojení větrné turbíny s asynchronním generátorem. Při změně otáček a rychlostí se mění i nátokový úhel  $i_m$ , takže se zvyšují profilové ztráty a snižuje výkon.

~  
Regulace větrné  
turbíny bočením

Regulace bočením větrné turbíny se provádí natáčením turbíny kolem vertikální osy, viz **Obrázek 526, s. 10.18**. Používá se k natočení rotoru proti větru, případně k natočení do polohy zabraňující destrukci rotoru při větru překračující provozní možnosti turbíny. Některé malé turbíny umožňují i bočení podle horizontální osy, což funguje jako aerodynamická brzda.

526:

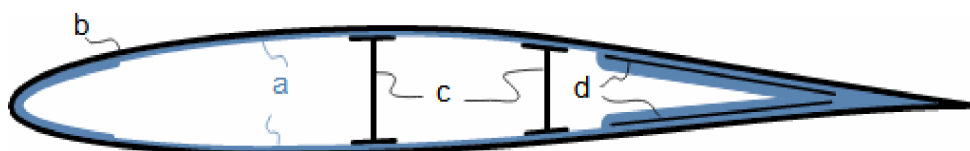


### Konstrukce lopatky větrné turbíny

Konstrukce lopatky větrné turbíny je většinou odvislá od velikosti turbíny. Nejmenší turbíny mají lopatky z jednoho kusu materiálu, tzv. plné lopatky. Větší lopatky jsou duté s žebrovanou konstrukcí uvnitř podobné konstrukcím křídel letadel. Lopatky velkých větrných turbín jsou skořepinové konstrukce s několika vrstvami a s výztuhami, viz **Obrázek 596**.

596:

Jednotlivé vrstvy skořepinové lopatky



Skořepinová konstrukce lopatky

V případě skořepinové konstrukce na **Obrázku 596** se vyrábí sací a přetlaková strana lopatky zvlášť z několika vrstev skelných vláken-a (**Obrázek 911**) – více vrstev se nachází u nátokové a odtokové hrany. Obě strany se následně spojí přetažením společné vrstvy skelných vláken. Povrch lopatky se vytvrdí a vyhladí pomocí krycí vrstvy z umělé pryskyřice-b. Uvnitř lopatky jsou centrální výztuhy z lehkých slitin nebo ztvrdlé pěny-c. Odtokové části sací a přetlakové strany obsahují výztuhy-d. Výroba lopatek ze skelných vláken nevyžaduje drahé materiály a tepelné zpracování. Hmotnosti lopatek bývají menší jak 2 tuny na deset metrů délky, přičemž ty nejdelší mají přes 100 m.

911:

Výroba lopatky větrné turbíny



Na obrázku je fáze nanášení vrstev skelných vláken před zalitím polyesterem v továrně společnosti LM Wind Power [Thomsen, 2004].

*Testování lopatek*

Lopatky jsou testovány nejen na vysokocyklovou únavu, ale také na další odolnost vůči povětrnostním vlivům, viz **Obrázek 218**. Nakonec je nutné provést certifikaci lopatky podle IECRE OD-501 (System for Certification to Standards Relating to Equipment for Use in Renewable Energy Applications – Type and Component Certification Scheme - Wind Turbines). Tento certifikát lze v současné době obstarat asi jen u deseti certifikačních institucí.

– **218:** –  
*Testování odolnosti  
 lopatky při úderu  
 bleskem*



Testování odolnosti lopatky v továrně společnosti LM Wind Power (Nizozemsko) [Thomsen, 2004].

*Vybavení lopatek  
 větrných turbín*

Mimo deformačních čidel a vibročidel jsou lopatky vybaveny bleskosvodem, čidly teplot a dalšími doplňky, které přímo nesouvisí s jejich primární funkcí – například prohřívání pro zamezení kondenzace vlhkosti a vzniku námraz v lopatkové dutině.

*Prohýbání dlouhých  
 lopatek*

Provozním problémem dlouhých lopatek je jejich ohyb v axiální směru, a nebezpečí že prohnutá lopatka zavadí o sloup. Proto se větrné elektrárny nekonstruují na vysoké rychlosti větru a rotory mají určitý sklon vůči horizontální rovině, tak aby lopatky v dolní úvrati byly dále od sloupu.

*Životnost lopatek  
 větrných turbín*

Lopatky se projektují přibližně na dobu životnosti 20 let. Po tuto dobu musí být plně funkční bez nutností nátěru, ale i pak lze jejich povrch renovovat přímo na pozicích (nemusí být demontovány z větrné elektrárny), viz **Obrázek 419, s. 10.20**.

– **419:** –  
 Lopatka větrné  
 turbíny po renovaci  
 svého povrchu –  
 první po dvaceti  
 letech provozu



Lopatka o délce 28 m  
 větrné turbíny Vestas  
 V52.

### Odkazy

- ŠKORPÍK, Jiří, 2022, Aerodynamika profilů, *fluid-dynamics.education*, Brno, <https://fluid-dynamics.education/aerodynamika-profilu.html>.
- ABBOTT, Ira, DOENHOFF, Albert, 1959, *Theory of wing sections, including a summary of airfoil data*, Dover publications, inc., New York, ISBN-10:0-486-60586-8.
- ANDERSON, M. B., 1980, A vortex-wake analysis of a horizontal axis wind turbine and a comparison with modified blade element theory, *Proceedings of the Third International Symposium on Wind Energy Systems*, Copenhagen, BHRA Fluid Engineering, paper no. H1 357–374.
- DIXON, S., HALL, C., 2010, *Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery*, Elsevier, Oxford, ISBN 978-1-85617-793-1.
- HANSEN, Martin, 2008, *Aerodynamics of wind turbines*, Earthscan Ltd., London, ISBN 978-1-84407-438-9.
- HAU, Erich, 2006, *Wind Turbines – fundamentals, technologies, Applications, Economics*, Springer, Berlin, Heidelberg, New York, ISBN-10-3-540-24240-6.
- LIEW, Jaime, HECK, Kirby, HOWLAND, Michael, 2024, Unified momentum model for rotor aerodynamics across operating regimes, *Nature Communications* 15, 6658, <https://doi.org/10.1038/s41467-024-50756-5>.
- MANWELL, J.F., MCGOWAN, J.G. and ROGERS A.L., 2002, *Wind Energy Explained – Theory, Design and Application*, John Wiley & Sons Ltd, ISBN: 0-471-49972-2.
- MILLER, Rudolf, HOCHRAINER, A., LÖHNER, K., PETERMANN, H., 1972, *Energietechnik und Kraftmaschinen*, Rowohlt taschenbuch verlag GmbH, Hamburg, ISBN 3-499-19042-7.
- SHARPE, D. J., 1990, Wind turbine aerodynamics, *Wind Energy Conversion Systems*, Englewood Cliffs.
- STIESDAL, Henrik, 1999, *The wind turbine components and operation*, Bonus Energy A/S, Brande. Dostupné z <http://www.windmission.dk>.
- THOMSEN, Troels, 2004, *Reliability of large rotor blades*, AusWIND 2004 in July 28 – 30, Launceston, Tasmania.
- TYAGI, Divya, SCHMITZ, Sven, 2025, Glauert's optimum rotor disk revisited – a calculus of variations solution and exact integrals for thrust and bending moment coefficients, *Wind Energy Science*, 10, 451–460, <https://doi.org/10.5194/wes-10-451-2025>.
- WILSON, R., LISSAMAN, P., WALKER, Stel, 1976, *Applied Aerodynamics of Wind Power Machines*, Oregon State University.