

Využití větru jako alternativního pohonu k výrobě elektrického proudu

Lukáš Frýza

Bakalářská práce
2010



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Lukáš FRÝZA**

Studijní program: **B 3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Technologická zařízení**

Téma práce: **Použití větru jako alternativního zdroje pro výrobu elektrické energie**

Zásady pro vypracování:

Student vypracuje rešerši na dané téma.

Student navrhne vhodný model větrné turbíny.

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího práce

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Jaroslav Maloch, CSc.

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

19. února 2010

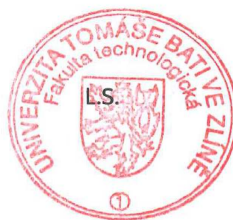
Termín odevzdání bakalářské práce:

2. června 2010

Ve Zlíně dne 22. ledna 2010



doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.
děkan



doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.
vedoucí katedry

Příjmení a jméno: Obor:

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně

.....

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevýdělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpirá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá využitím větru jako alternativního zdroje pro výrobu elektrické energie.

Práce je rozdělena do dvou částí. V teoretické části byla popsána problematika větrných elektráren, jejich rozdělení a popis jednotlivých dílů. V praktické části byl sestaven model malé větrné elektrárny pomocí 3D software.

Klíčová slova: Vítr, větrná energie, větrná elektrárna

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with wind as alternative source of electrical energy. Thesis is divided into theoretical and experimental part. In theoretical part are basic information about wind energy and wind power stations. In experimental part was created 3D model of rotor.

Keywords: wind, wind energy, wind power station

Chtěl bych poděkovat panu Ing. Jaroslavu Malochovi Csc. za odborné vedení, připomínky a rady, které mi poskytl při zpracování této práce.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 VÍTR	12
1.1 PŘÍČINA VZNIKU VĚTRU.....	12
1.2 ENERGIE VĚTRU.....	12
1.3 RYCHLOST A SÍLA VĚTRU.....	14
1.3.1 Beaufortova stupnice větru.....	14
1.3.2 Měření rychlosti větru anemometrem	16
1.4 VÝPOČET VÝKONU VĚTRNÉ ENERGIE.....	16
2 VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY	18
2.1 HISTORIE VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN.....	18
2.1.1 Větrné mlýny.....	18
2.1.2 Větrné čerpadla	19
2.2 ROZDĚLENÍ VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN	20
2.2.1 Rozdělení podle výkonu.....	20
Mikroelektrárny	20
Malé větrné elektrárny	21
Velké větrné elektrárny	21
2.2.2 Dělení podle aerodynamického principu.....	22
Vztlakové se svislou osou otáčení	22
Odporové	22
2.2.3 Rozdělení podle závislosti na elektrické síti.....	23
Systémy nezávislé na rozvodné síti	23
Systémy dodávající energii do rozvodné sítě.....	23
2.3 NEGATIVNÍ VLIVY VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN	24
2.3.1 Hluk.....	24
2.3.2 Ohrožení ptáků	24
2.3.3 Vliv stínu rotující vrtule (tzv. disko efekt).....	25
2.3.4 Infrazvuk	25
2.3.5 Vliv na krajinu.....	25
2.4 VÝHODY A NEVÝHODY VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN.....	25
2.4.1 Výhody větrných elektráren	26
2.4.2 Nevýhody větrných elektráren.....	26
3 ROZDĚLENÍ VĚTRNÝCH TURBÍN	27
3.1 TURBÍNY S HORIZONTÁLNÍ OSOU	27
3.1.1 Výhody HAWT	28
3.1.2 Nevýhody HAWT	28
3.2 TURBÍNY S VERTIKÁLNÍ OSOU	28
3.2.1 Darrieuův rotor.....	29
3.2.2 Savoniův rotor.....	29

3.3	SHRNUTÍ TEORETICKÉ ČÁSTI.....	30
II	PRAKTICKÁ ČÁST	31
4	OBTĚKÁNÍ SAVONIOVA ROTORU VĚTREM.....	32
4.1	VLIV ÚHLU NATOČENÍ VĚTRNÉ TURBÍNY NA PROUDĚNÍ VZDUCHU	33
4.2	SAVONIŮV ROTOR DVOULOPATKOVÝ	35
4.2.1	Působení větru na dvoulopatkový rotor.....	35
4.2.2	Působení větru na válcové okraje rotoru	36
4.2.3	Působení větru na přední stranu rotoru	36
4.2.4	Působení větru na zadní stranu rotoru	37
4.3	SAVONIŮV ROTOR TŘÍLOPATKOVÝ	38
4.3.1	Působení větru na třílopatkový rotor	38
4.3.2	Působení větru na přední stranu třílopatkového rotoru	39
4.3.3	Působení větru na zadní stranu třílopatkového rotoru.....	39
4.3.4	Působení větru na boční stranu třílopatkového rotoru	40
4.4	PRŮTAŽNÝ ROTOR	41
4.4.1	Působení větru na průtažný rotor.....	42
4.4.2	Působení větru na válcové okraje rotoru	42
4.4.3	Působení větru na přední lopatku rotoru	43
4.4.4	Působení větru na boční lopatku průtažného rotoru.....	44
4.4.5	Působení větru na zadní lopatku průtažného rotoru	45
4.5	VLIV VÝŠKY UMÍSTĚNÍ ROTORU NA PROUDĚNÍ VZDUCHU	45
4.6	ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	46
	ZÁVĚR	47
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	48
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	50
	SEZNAM OBRÁZKŮ	51
	SEZNAM TABULEK.....	52
	SEZNAM PŘÍLOH.....	53

ÚVOD

Mnoho obyvatel naší planety bere elektrickou energii jako samozřejmost a nedokáže si představit život bez ní. Historie elektřiny sahá až do počátků lidské civilizace. Trvalo však téměř dva tisíce let, než se stala předmětem vědeckého zájmu. Lidé, kteří se pokoušeli na počátku 19. století elektřinu prakticky využít a nahradit tak parní stroje, byli považováni za bláznů a snílky. Situace se však změnila v roce 1860 sestrojením prvních parních generátorů. A když v roce 1880 vynalezl Thomas Edison žárovku, lidé začali přemýšlet nad novými způsoby využití elektrického proudu.

V současnosti žije na Zemi téměř 7 miliard lidí a neustále stoupají jejich nároky na spotřebu energie. Například země jako Čína nebo Indie, které jsou domovem pro celou polovinu obyvatel naší planety už nepatří mezi rozvojové a zaostalé státy. Právě naopak. Stávají se z nich průmyslové i politické velmoci. Kola v ulicích nahrazují automobily, ulice jsou plné zářivých neonů a místo lesů zde stojí továrny nadnárodních koncernů. Země ale není nafukovací a zásoby ropy, uranu nebo uhlí, které slouží jako největší zdroje energie, se postupně ztenčují. Proto je potřeba hledat nové zdroje energie.

Lidé se snaží více využívat obnovitelných zdrojů energie. Obnovitelný zdroj energie je označení některých vybraných, na Zemi přístupných forem energie. Mezi obnovitelné zdroje patří například sluneční, vodní nebo větrná energie.

Tato práce se zabývá eolickou neboli větrnou energií. Cílem teoretické části práce je shrnout dostupné informace týkající se větrné energie. Práce je rozdělena do dvou částí. Teoretická část popisuje vítr, výrobu elektrické energie z větru a obsahuje základní popis činnosti větrných elektráren a jejich rozdělení. V praktické části byly sestrojeny tři počítačové modely větrné turbíny pomocí software na modelování 3D součástí. Modely byly zatíženy větrem pomocí modulu Flow Simulation programu Solidworks.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 VÍTR

V minulosti vítr inspiroval mytologii, ovlivnil události z historie, rozšířil spektrum dopravy, ovlivnil i některé války. Vítr byl použit k nasměrování plachetnic, horkovzdušných balónů a vzducholodí, stavěly se větrné mlýny, pohané ho uctívali jako boha.

Vítr je proud vzduchu nebo jiných plynů, které tvoří atmosféru. V důsledku nerovnoměrného ohřívání atmosféry Sluncem proudí z jednoho místa na druhé.

Větry rozdělujeme podle jejich územního rozsahu, rychlosti, druhu sil, které je způsobují, geografické oblasti, ve kterých se vyskytují a podle jejich účinku. Vítr je většinou samostatný jev počasí, ale může se objevit i jako součást bouřkového systému. [1]

1.1 Příčina vzniku větru

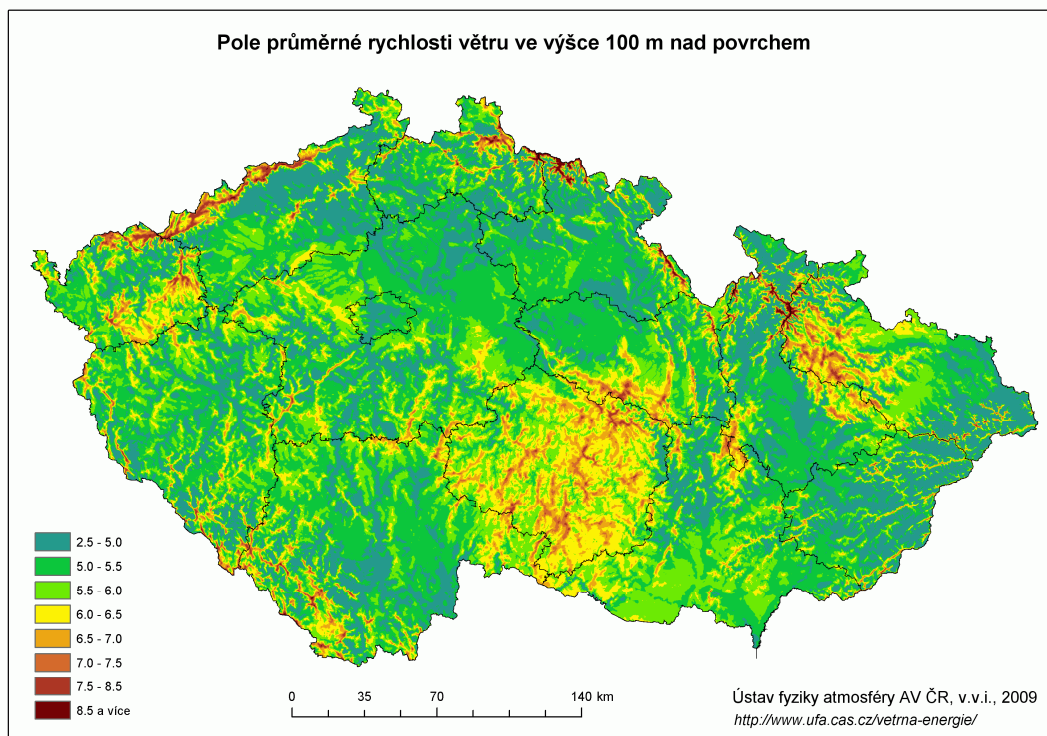
Vítr je způsoben především rozdíly v tlaku. Na Zemi existují místa s rozdílným tlakem vzduchu při zemském povrchu. Částice proudí ve směru tzv. tlakového gradientu (z oblasti o vyšším tlaku do oblasti s tlakem nižším). Na rotující planetě je vzduch vychýlený pomocí Coriolisovy síly, s výjimkou rovníku. Coriolisova síla způsobuje odklon částice od jejího původního směru. Tato síla je vždy kolmá ke směru pohybu částice. Na severní polokouli odklání tato síla částice doprava, na jižní doleva. [1], [2]

1.2 Energie větru

Větrná energie je jedna z forem sluneční energie. Vzniká díky nerovnoměrnostem zemského povrchu a tlakovým rozdílům způsobeným jeho nerovnoměrným zahříváním. Již naši předkové dokázali vítr využít a přeměnit jeho energii na energii mechanickou, např. farmářská větrná kola pro mletí obilí či čerpání vody. V současné době je však snaha využít ji hlavně k výrobě elektřiny. Proto u nás stále přibývá větrných elektráren a vyvíjejí se nové technologie k co nejefektivnějšímu využití energie větru.

Větrnou energií se zabývají prakticky všechny vyspělé státy, jak v Evropě, tak i ve světě. Je to doplňkový ekologicky čistý zdroj energie. Běžným předmětem světového obchodu jsou dnes větrná zařízení o výkonu od 20 W do 4 MW. [1], [2]

Největším problémem při výstavbě větrné elektrárny je stanovení využitelného energetického potenciálu větru. Rychlost větru se musí v určené lokalitě dlouhodobě měřit, ale i při nejpřesnějším měření se dá hovořit pouze o přibližných odhadech. Tento fakt je způsoben především tím, že neexistuje přímá závislost mezi průměrnou rychlostí větru a jeho energií. Dalším limitujícím faktorem je podíl na celkové ploše, který lze reálně zastavět elektrárnami. Energeticky využitelný podíl plochy se zmenšuje s rostoucí členitostí terénu. Pro dosažení potřebného výkonu je možné řadit větrné elektrárny do paralelní spolupráce. Paralelní spolupráce může existovat mezi skupinou větrných elektráren nebo se zdroji odlišného charakteru např. vodní elektrárnou, dieselovou či paroplynovou turbínou, elektrocentrálou nebo s veřejnou sítí. Pro nestálost větrné energie je kombinace s jinými energetickými zdroji výhodná, někdy až nezbytná. Energetické, ekonomické a ekologické přínosy se mohou realizovat jen za předpokladu, že se najdou podnikatelské subjekty, ochotné investovat do větrné energetiky. Větrná elektrárna představuje poměrně vysokou jednorázovou investici s dlouhou dobou návratnosti. Ta je navíc značně proměnlivá v závislosti na roční průměrné rychlosti resp. energii větru v dané lokalitě. Naproti tomu je velkou výhodou, že výstavba je mimořádně krátká, řádově trvá jen pár týdnů. Ihned po uvedení do provozu je elektrárna schopna prakticky plného výkonu. [2]

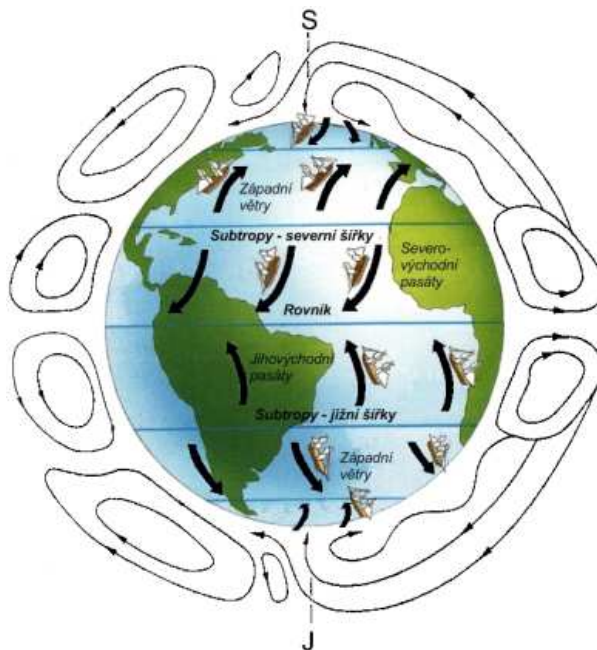


Obrázek 1. Pole průměrné rychlosti větru 100 m nad povrchem [3]

1.3 Rychlost a síla větru

Měření rychlosti a síly větru je velmi důležité zejména pro volbu vhodné lokality k výstavbě větrné elektrárny, nebo skupiny větrných elektráren. Základní charakteristiky větru jsou jeho směr, rychlost, stálost a nárazovitost. Rozhodující vliv na celkový výkon má jeho rychlost.

Měření síly a rychlosti větru můžeme provádět dvěma způsoby. Prvním způsobem je porovnávání pomocí tzv. Beaufortovy stupnice větru. Tato metoda není příliš přesná a používala se zejména v minulosti. Druhý způsob měření síly větru pomocí anemometru neboli větroměru. Tímto způsobem můžeme dosáhnout dostatečně přesných výsledků. [2], [3]



Obrázek 2. Hlavní směry větru na zeměkouli[12]

1.3.1 Beaufortova stupnice větru

Francouzský fyzik Francis Beaufort vymyslel v roce 1805 stupnici, která odhadovala sílu větru na moři. Stupnice se skládala z 12 stupňů. Nejnižší stupeň znamenalbezvětří a nemožnost plavby. Nejvyšší stupeň značil vichřici, při níž nemohla být rozvinuta žádná plachta.

Za dobu svého používání Beaufortova stupnice prodělala množství změn, které reagovaly na aktuální potřeby měření síly větru. V roce 1946 International Meteorological Committee rozšířil počet stupňů na 17 a definoval stupně rozsahem rychlostí větru měřených ve výšce 10 metrů nad povrchem. Tím byla Beaufortova stupnice síly větru změněna na Beaufortovu stupnici rychlosti větru. Tato podoba stupnice se používá dodnes. [2], [3]

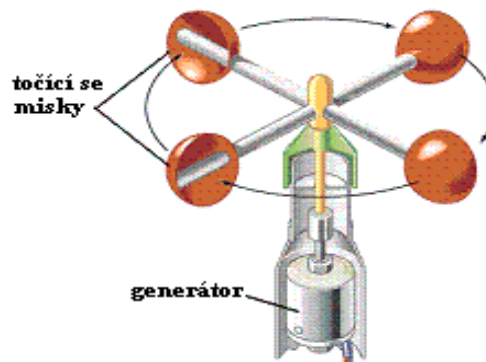
Tabulka 1. Beaufortova stupnice větru

Stupeň	Rychlost větru Km/h	Slovní označení	Chování větru na souši
1	1–5	Vánek	kouř stoupá svisle vzhůru
2	6–11	slabý vítr	kouř už nestoupá úplně svisle
3	12–19	mírný vítr	vítr je cítit ve tváři
4	20–28	dosti čerstvý vítr	listy a větvičky v pohybu
5	29–38	čerstvý vítr	vítr zvedá prach a papíry
6	39–49	silný vítr	hýbe listnatými keři
7	50–61	prudký vítr	pohybuje silnými větvemi
8	62–74	bouřlivý vítr	pohybuje celými stromy
9	75–88	Vichřice	láme větve
10	89–102	silná vichřice	menší škody na stavbách
11	103–117	mohutná vichřice	vyvrací stromy a ničí domy
12 – 17	118–133	Orkán	rozsáhlé zpusťování plochy
Stupeň	Rychlost větru Km/h	Slovní označení	Chování větru na moři
1	1–5	Vánek	Zrcadlo
2	6–11	slabý vítr	Vlnky
3	12–19	mírný vítr	světřejší hřbety vln
4	20–28	dosti čerstvý vítr	lom vln
5	29–38	čerstvý vítr	místy bílé hřebeny
6	39–49	silný vítr	nad vlnami vodní tříšť
7	50–61	prudký vítr	silná vodní tříšť
8	62–74	bouřlivý vítr	bílá pěna na vlnách
9	75–88	Vichřice	bílá pěna na vlnách
10	89–102	silná vichřice	vysoké rolující vlny
11	103–117	mohutná vichřice	přepadající hřebenatky
12 – 17	118–133	Orkán	vlny pokryté pěnou

1.3.2 Měření rychlosti větru anemometrem

Anemometr neboli větroměr je přístroj pro měření rychlosti a směru proudění. Rychlost větru se podle normy měří ve výšce 10 metrů nad zemí. [4]

Existuje mnoho typů anemometrů pracujících na různých principech. Nejznámější jsou mechanické anemometry. Jejich funkční část se skládá z rotoru, který se otáčí na svislé hřídeli, a je tvořen třemi či čtyřmi rameny, z nichž každé je zakončeno půlkruhovitými miskami. Otáčky rotoru se jednoduchým mechanismem přenášejí přímo na ručkový ukazatel, popřípadě je možné tento údaj zpracovat elektronicky. [4], [12]



Obrázek 3. Schéma rotačního anemometru [4]

1.4 Výpočet výkonu větrné energie

Uvedené vzorce slouží pouze pro orientační stanovení výkonu. Pro přesné výpočty je nutno brát v úvahu mimo jiné i geometrickou charakteristiku listů rotoru, přesné stanovení všech účinností, rozdílnou rychlost větru daleko před rotorem a v rovině rotoru. [12] Výpočet lze provést na počítači s pomocí speciálního software.

Kinetická energie proudícího vzduchu se vyjadřuje vztahem:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (1)$$

E_k – kinetická energie vzduchu [J]

m – hmotnost vzduchu [kg]

v – rychlost větru [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

Výkon větru lze vypočítat ze všeobecných vztahů:

$$P = \frac{E_k}{t} \quad (2)$$

P – výkon vzdušného proudu [W]

t – čas [s]

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V \cdot v^2 \quad (3)$$

ρ – hustota vzduchu [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

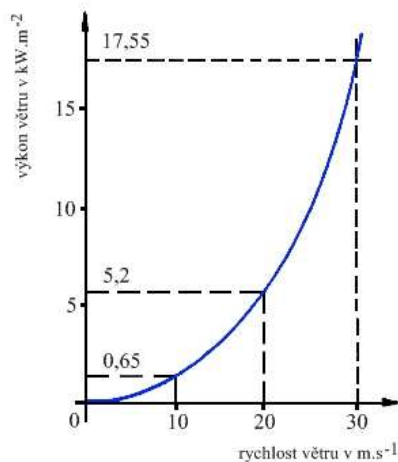
V – objemový průtok vzduchu [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]

Jelikož výkon větru je funkcí rychlosti větru, hustoty vzduchu a velikosti plochy, kterou proudí, tak lze uplatnit vzorec:

$$P = \frac{1}{2} \cdot S \cdot v \cdot \rho \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot S \cdot \rho \cdot v^3 \quad (4)$$

S – plocha, která je kolmá k proudícímu vzduchu [m^2]

Z uvedeného vztahu vyplývá, že výkon větru stoupá se třetí mocninou rychlosti větru. Při tlaku 101 325 Pa a teplotě 20°C se obvykle za hustotu vzduchu dosazuje přibližná hodnota $1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. [6], [12]



Obrázek 4. Závislost výkonu větru proudícího plochou 1 m^2 na jeho rychlosti. [12]

2 VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY

Větrná elektrárna je zařízení, které slouží k výrobě elektrické energie. Využívá pohybovou energii větru pomocí větrných rotorů umístěných na ocelových stožárech. Větrné elektrárny se staví na místech, kde často fouká vítr dostatečnou rychlostí, nejčastěji na ostrovech nebo pobřeží. Výkon větrné elektrárny je závislý na trvání a intenzitě větru.

Větrná turbína převádí energii větru na rotační mechanickou energii působením aerodynamických sil na listy rotoru. Ta je prostřednictvím generátoru zdrojem elektrické energie. Podél rotorových listů vznikají aerodynamické síly, proto musí mít rotory speciálně tvarovaný profil, podobný křídům letadla. [5]

2.1 Historie větrných elektráren

Předchůdcem větrných elektráren byly větrné mlýny a větrná čerpadla. Mechanický energetický výkon průměrného větrného mlýna z posledního období jejich reálného využívání (první polovina devatenáctého století) činil kolem 20 kW. Od dob největšího rozšíření větrných mlýnů ke spuštění první větrné elektrárny však uplynulo mnoho let. V roce 1920 sestrojil M. Jacobs z USA první větrný mlýn, který plnil funkci elektrického generátoru. I přesto, že v roce 1960 pracovalo na světě milion větrných turbín, docházelo k výraznému útlumu všech projektů větrných elektráren. Důvodem byla velmi vysoká cena takto vyrobené energie, která byla při tehdejších cenách kapalných a jiných paliv výrazně dražší než energie z tepelných elektráren. Časem se však ukázalo, že tepelné elektrárny značně znečišťují životní prostředí a začali se hledat možnosti ekologické výroby energie. Během celé historie využívání větrné energie bylo vyvinuto a postaveno mnoho různých forem větrných kol. Neustálé hledání výkonných, odolných a zároveň jednoduše sestavitelných větrných zařízení umožnilo vznik i mnoha kuriózních staveb. [1], [5]

2.1.1 Větrné mlýny

I když klasické větrné mlýny nevyráběly elektrickou energii, je na místě zmínit je z hlediska základního principu přeměny síly větru v mechanickou práci a z hlediska způsobů regulace chodu těchto zařízení. [6]

Zatímco větrné mlýny využívaly tlak větru na plochu křídel nebo lopatek, využívají větrné elektrárny aerodynamických vlastností přesně definovaných profilů křídel. Výkon větrných mlýnů byl regulován přidáváním nebo ubíráním výplně křídel. U větrných elektráren se proti větru natáčí gondola se strojovnou i křídly a u některých typů je provoz regulován i natáčením křídel podle jejich podélné osy. [6], [7]



Obrázek 5. Větrný mlýn [7]

2.1.2 Větrné čerpadla

Využívání větrné energie nemusí mít jen podobu větrných mlýnů a v současnosti pak větrných elektráren. Už v Holandsku většina „mlýnů“ nesloužila k mletí obilí, ale k čerpání vody. Právě větrné „mlýny“, známé z pohlednic a turistických prospektů o této zemi, pomáhaly odvodňovat území, ležící za hrázemi a pod úrovní mořské hladiny, a staly se tak spojenci Holanďanů v tisíciletém souboji s mořem o pevnou zemi.

Také v České Republice má čerpání vody pomocí větrné energie svou tradici. Větrná čerpadla neměla podobu tradičních mlýnů a jejich historie je pouze 110 let stará. Přesto však stojí za zmínku i jako inspirace pro možné využití v dnešní době. V roce 1893 byla v Hranicích na Moravě založena továrna, která začala pod vedením strojníka Antonína Kunze s výrobou malých zemědělských strojů.

Brzy se však hlavním výrobním programem firmy stávají větrná čerpadla, postupem času v ucelené výkonové a vývojové řadě stále dokonalejších typů, s lepší regulací a většími výkony. Tato větrem hnaná čerpadla sloužila na statcích, v zahradnictvích, ale i v průmyslových závodech nebo pro napájení zásobníků pitné vody u obecních vodovodů.

O tom, že větrem hnaná čerpadla nejsou zdaleka jen slepou vývojovou uličkou při hledání práce pro vítr, svědčí i jejich rozšíření po celém světě. Známa jsou například z klasických filmů o „divokém západu“, kde čerpala vodu do vodojemů na slavné Pacifické dráze, v některých přímořských zemích čerpají slanou vodu do bazénů, kde se odpařováním získává sůl, jinde slouží k tradičním závlahám nebo napájení dobytka na pastvinách. [6], [7]

2.2 Rozdělení větrných elektráren

Větrné elektrárny se rozdělují podle mnoha faktorů, ať už podle velikosti, výkonu nebo podle aerodynamického principu.

2.2.1 Rozdělení podle výkonu

Nejčastěji se větrné elektrárny rozdělují podle jejich výkonu. Dělí se na mikroelektrárny, malé větrné elektrárny a velké větrné elektrárny.

Mikroelektrárny

Tento typ větrných elektráren je vhodný zejména pro osobní použití. Jsou alternativou k slunečním článkům v místech, kde je dost větrno a naopak méně svítí slunce. Mikroelektrárny dosahují poměrně malých výkonů pohybujících se většinou okolo 1 kW. Nejčastěji se tak používají na napájení osvětlení reklamních panelů, měření teploty, stavu ovzduší nebo měření času. Jejich skládací verze mohou sloužit v přírodě jako mobilní nabíječky akumulátoru, vařiče nebo vysílačky.

Některé výkonné mikroelektrárny mají pevnou instalaci a mohou napájet i celé chaty. Velkou překážkou je však vysoká pořizovací cena. Ta se ale s rostoucí životností moderních větrných elektráren vrací. Elektrická energie větrné elektrárny se akumuluje do akumulátorů, které pokrývají spotřebu při špičkových zatíženích, nebo když vítr nefouká. Větrnou mikroelektrárnu je možné doplnit o solární panely. Tento případ však vyžaduje vhodný systém, který přerozdělování výroby elektrické energie řídí. Největší překážkou takovému řešení je opět cena. Až pořizovací cena poklesne, nebude k rozšíření kombinace sluneční a větrné elektrárny na úrovně jednotlivých domácností již nic stát v cestě. [1], [8]

Na světovém trhu nalezneme mnoho výkonných a zajímavých mikroelektráren. V České republice je situace podstatně horší. Elektrický proud vedený dráty je dostupný téměř všude a větrné podmínky taktéž nejsou ideální. Lidé tak nechtějí investovat do finančně a technologicky náročných projektů jako jsou mikroelektrárny. [1], [8]

Malé větrné elektrárny

Malé větrné elektrárny mohou mít výkony až několik kW, což stačí na spotřebu velké chaty nebo běžného rodinného domku. Například výkon od 1 kW již plně postačuje na čerpání vody ze studně a její rozvod do kohoutků v objektu. Tyto elektrárny často vyrábí elektřinu pomocí synchronních generátorů vybavených permanentními magnety. [8]

Z pohledu konstrukce mohou vypadat různě. Zatímco malé elektrárny s výkonem okolo 1 až 5 kW mohou ještě vypadat jako "větší" mikroelektrárny konstrukce pro výkony nad 10 kW již někdy vypadají jako zmenšeniny středních a velkých elektráren, mají již gondolu vybavenou převodovkou, brzdou a generátorem připojené přes hřídel na rotor vrtnule s listy. Vše je pak připevněno na sloupu, kterým vedou výkonové a signálové kabely. [1], [8]

Velké větrné elektrárny

Elektrárny velkých výkonů (300 až 3000 kW) jsou určeny k dodávce energie do veřejné rozvodné sítě. Mají asynchronní nebo synchronní generátor, který dodává střídavý proud o napětí 660 V a vyšších. Tím pádem však nemohou pracovat jako autonomní zdroje energie. Existují i elektrárny se speciálním vícepólovým generátorem, který nevyžaduje převodovou skříň. Většina elektráren má konstantní otáčky regulované natáčením listů a proměnným převodovým poměrem převodovky. Některé typy mají i dvě rychlosti otáčení. Některé velké elektrárny tak mohou mít i proměnné otáčky podle okamžité rychlosti větru. V praxi se používají většinou větrné elektrárny s horizontální osou rotace, mohou mít průměr rotoru až 80 m a věž o výšce více než 80 metrů. Trendem poslední doby je zvětšování výkonu větrných elektráren a zvyšování stožárů. Nejnovější zařízení jsou instalovaná ve výšce 100 metrů a více. Hlavním důvodem jsou nižší náklady na výrobu energie a optimální využití lokalit, kterých je omezený počet. Ke zvýšení efektivity provozu a snížení nákladů na projektování a výstavbu se velké elektrárny sdružují do skupin. [8], [10]

2.2.2 Dělení podle aerodynamického principu

Podle aerodynamického principu se větrné elektrárny rozdělují na vztlakové a odporové.

Vztlakové s vodorovnou osou otáčení

Vítr obtéká lopatky s profilem podobným letecké vrtuli. Na podobném principu pracovaly již historické větrné mlýny, nebo tak pracují větrná kola vodních čerpadel. Při stejném průměru rotoru většinou platí nepřímá závislost počtu listů a frekvence otáčení. Moderní elektrárny mají obvykle tři listy, byly však vyvinuty i typy s jediným nebo se dvěma listy. [8], [10]

Vztlakové se svislou osou otáčení

Výhodou elektráren se svislou osou pracujících na vztlakovém principu je, že mohou dosahovat vyšší rychlosti otáčení a tím i vyšší účinnosti. Proto není třeba natáčet je do směru převládajícího větru. Elektrárny se svislou osou otáčení se v praxi příliš neuplatnily, neboť u nich dochází k mnohem vyššímu dynamickému namáhání, které značně snižuje jejich životnost. Nevýhodou je malá výška rotoru nad terénem, tj. i menší rychlost větru. V praxi se téměř nepoužívají. [8], [10]

Odporové

Využívá rozdílného odporu těles při obtékání z opačných směrů. Pokud se ze zařízení neodebírá energie, obvodová rychlost je stejná jako rychlost větru. Nevýhodou tohoto typu je velmi malá účinnost, která dosahuje pouze 5%. Proto se využívá pouze pro měření rychlosti větru, ve větrné energetice se nepoužívá. [10]

2.2.3 Rozdělení podle závislosti na elektrické síti

Podle závislosti větrné elektrárny na elektrické síti se rozdělují větrné elektrárny na systémy nezávislé na rozvodové síti a systémy dodávající energii do rozvodové sítě.

Systémy nezávislé na rozvodné síti

Jsou to autonomní systémy, sloužící objektům, které nemají možnost se připojit k rozvodné síti. Zde se obvykle používají mikroelektrárny s výkonem 0,1-5 kW. V objektu pak může být buď rozvod stejnosměrného proudu s nízkým napětím (12 nebo 24 V), nebo je v systému zapojen ještě střídač pro dodávku střídavého proudu 230 V. Takový objekt je nutno vybavit energeticky úspornými spotřebiči. Autonomní systémy bývají často doplněny fotovoltaickými panely pro letní období, kdy nefouká tolik větru, ale více svítí slunce. [9]

Často se také setkáváme s myšlenkou využití větrné energie k vytápění rodinného domu nebo chaty. Toto využití je trochu problematické. Dům pro bydlení by měl stát na místě chráněném před větrem. Větrná elektrárna naopak potřebuje větru co nejvíce. Nízko nad zemí je vzduch omezován stromy, bytovou výstavbou a dalšími překážkami. Proto je nutno umístit turbínu na co nejvyšší stožár. Kabel mezi domem a elektrárnou zvyšuje náklady, pokud by měl vést přes cizí pozemky, může jít o nepřekonatelnou překážku. [9], [11]

Systémy dodávající energii do rozvodné sítě

Jsou nejrozšířenější a používají se v oblastech s velkým větrným potenciálem. Slouží téměř výhradně pro komerční výrobu elektřiny. Velké větrné elektrárny mají asynchronní generátor, který dodává střídavý proud většinou o napětí 660 V, a tudíž nemohou pracovat jako autonomní zdroje energie. Elektrárny velkých výkonů (300-3.000 kW) jsou určeny k dodávce energie do veřejné rozvodné sítě, mají průměr rotoru 40-80 m a věž o výšce více než 80 m. [9], [11]

2.3 Negativní vlivy větrných elektráren

Výstavbu větrných elektráren limitují některé negativní vlivy, které mohou způsobovat problémy. Mezi tyto problémy patří zejména hluk, dopad na životní prostředí a ohrožování zvířat.

2.3.1 Hluk

Pokud mají větrné elektrárny stát v blízkosti obytných domů, je důležité nechat zpracovat odborný posudek – akustickou studii, která spočítá hladinu slyšitelného zvuku v konkrétním místě. Aby větrná elektrárna neprodukovala mimo elektřiny nadměrný hluk, musí splnit normované limity hluku. Ty jsou v okolí obytných staveb 50 dB ve dne a 40 dB v noci. Jestliže panují pochyby, zda turbíny limity dodržují, uskuteční se tzv. hygienické měření. Při něm se výsledky hlukové studie ověřují přímo měřením hluku u nejbližších obytných domů. Měření musí porovnávat hluk z provozu větrné elektrárny s přirozeným hlukem okolního prostředí. Úroveň hluku závisí také na terénu a jeho povrchu. Od určité rychlosti větru, obvykle 7 – 8 m/s, převažuje hluk okolního prostředí nad hlukem větrných elektráren. Naopak při mírném větru až bezvětří nehlučí ani větrné elektrárny. Pokud by hrozilo překročení hygienických limitů hluku, lze situaci řešit pevným nastavením ovládacího programu elektráren. [16]

S tímto problémem se konstruktéři moderních větrných elektráren dokázaly vypořádat a tak se negativní zkušenosti s hlukem vztahují hlavně k větrným elektrárnám starší konstrukce, zejména z první poloviny 90. let minulého století.

2.3.2 Ohrožení ptáků

Špatně naplánované a postavené větrné elektrárny mohou vést k ohrožení některých druhů ptáků. Většina projektů však pro ptáky nepředstavuje větší riziko. Letící opeřenci vnímají otáčející se lopatky rotoru jako viditelnou překážku, kterou oblétají. Dle výzkumu britské Královské společnosti pro ochranu ptáků na základě měření ve Walesu, připadá na každých deset tisíc ptáků pouze jedna smrtelná kolize. To znamená, že více ptáků zahyne pod koly aut nebo nárazem do vedení vysokého napětí. [10], [16]

2.3.3 Vliv stínu rotující vrtule (tzv. disko efekt)

Tento jev se projeví pouze za slunečného počasí, je-li slunce nízko nad obzorem ráno nebo večer. Pro obyvatele objektů v okolí větrných elektráren může být tento jev velmi nepříjemný. Proto se při umísťování větrných elektráren dbá na tento problém již ve fázi projektu. [10]

2.3.4 Infrazvuk

Českým specifikem jsou velmi silné obavy z infrazvuku, který by větrné elektrárny měly vydávat. Výsledky měření prokázaly, že větrné elektrárny nevydávají žádné škodlivé zvuky takto nízké frekvence. Podobně nebyly zjištěny ani vysoké frekvence z oblasti ultrazvuku. Dá se tedy předpokládat, že obavy z infrazvuku jsou způsobeny mylnou záměnou za hluk větrného proudění. [10], [16]

2.3.5 Vliv na krajinu

Názory na tento problém se velmi různí. Zatímco některým lidem turbíny v okolí vadí, najdou se i takoví, kterým se líbí. Vlivy větrných elektráren na krajinný ráz by měly být vnímány v kontextu, nakolik tyto čisté zdroje do budoucna nahradí jiné zdroje. Čím více elektřiny dokážeme vyrobit pomocí obnovitelných zdrojů energie, tím méně krajiny si zničíme těžbou uhlí, uranu, popelem, úložišti jaderného odpadu a samozřejmě stavbou uhelných či jaderných elektráren. Větrné elektrárny mohou být po skončení životnosti rozebrány.

Jsou místa, kde by větrné elektrárny stát neměli. Jedná se především o přírodní památky, místa s výskytem chráněných živočichů, chráněné přírodní oblasti a národní parky. [10], [16]

2.4 Výhody a nevýhody větrných elektráren

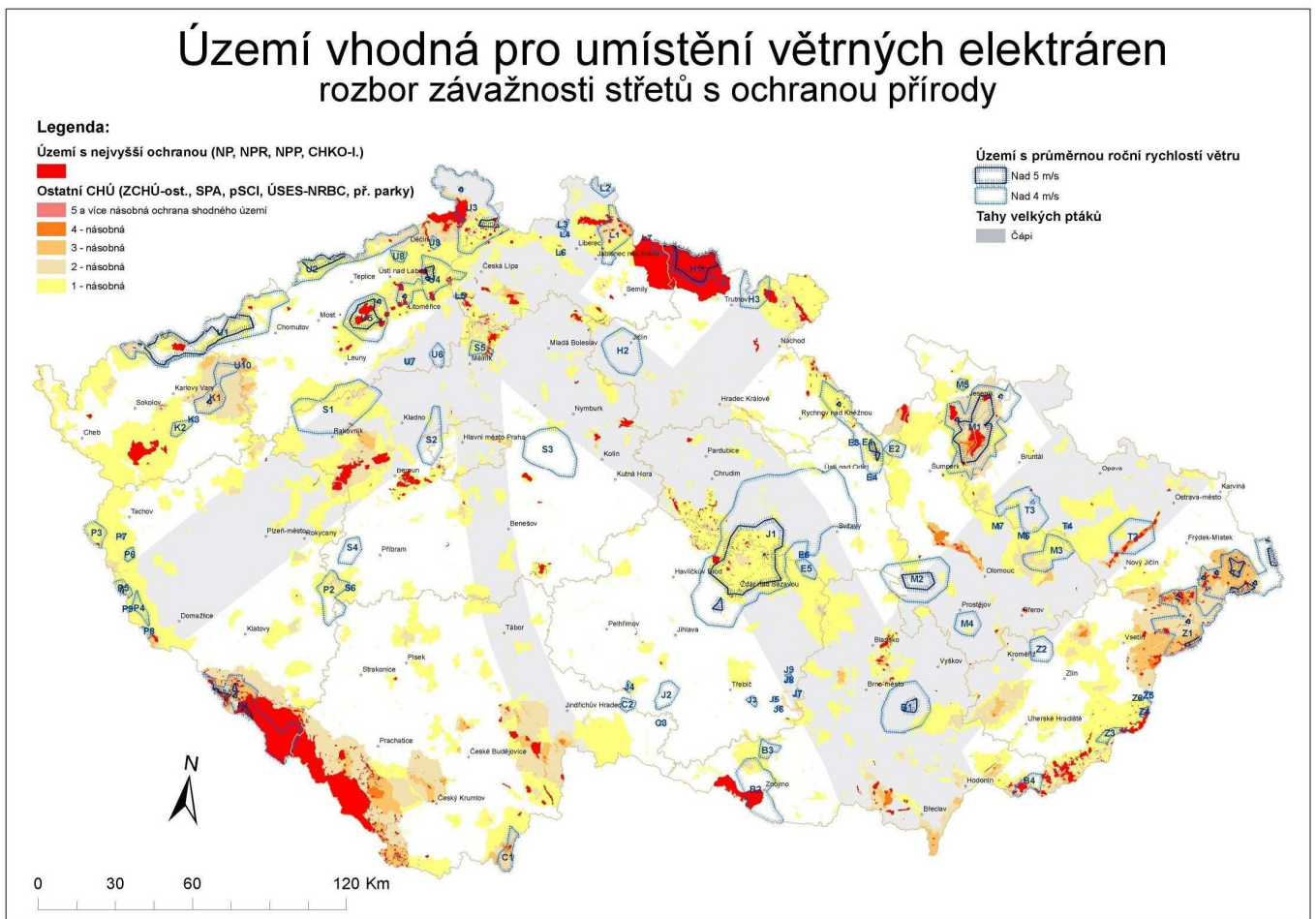
V této kapitole jsme se seznámili s problematikou větrných elektráren. Větrné elektrárny mají spoustu výhod, kvůli kterým se vyplatí investovat do výstavby tohoto zařízení. Mají však i své nevýhody, které nás od investice do větrné energie mohou odradit.

2.4.1 Výhody větrných elektráren

- možnost instalace i ve špatně dostupných místech
- relativně velký výkon na malé rozměry
- jen málo zatěžuje životní prostředí

2.4.2 Nevýhody větrných elektráren

- složitá instalace elektrárny
- použití je jen na místech s optimálními větrnými podmínkami
- velké elektrárny svým vzhledem narušují krajinu
- vysoké investiční náklady



Obrázek 6. Území vhodná pro umístění větrných elektráren [3]

3 ROZDĚLENÍ VĚTRNÝCH TURBÍN

Větrné turbíny se dělí do dvou obecných typů, založených na ose rotace turbíny. Nejběžnější jsou turbíny, které se točí kolem horizontální osy (HAWT). Turbíny s rotací kolem vertikální osy (VAWT) jsou méně používané.

Větrné turbíny můžeme také používat v kombinaci se sluneční elektrickou věží. První komerční sluneční elektrická věž tohoto typu je ve výstavbě a nachází se v Austrálii. [13]

3.1 Turbíny s horizontální osou

Větrné turbíny s horizontální osou (HAWT) mají hlavní rotorovou šachtu s generátorem umístěným na vrcholu věže a musí být uvedeny do větru pomocnými prostředky. Malé turbíny jsou vybaveny jednoduchým větrníkem, zatímco velké turbíny používají senzory větru spojené se servomotorem. Většina z nich má také převodovku, která mění otáčky z pomalé rotace lopatek do rychlejší rotace generátoru. Použití převodovky je vhodnější s ohledem na řízení elektrického výkonu generátoru. [14]

Protože vítr proudí turbulentně, turbína je obvykle natočena proti směru proudění. Lopatky turbíny musí být dostatečně pevné, aby nebyly silným větrem prohnuty do kolizní trajektorie s věží. Konstrukce vrtule proto musí být navržena v dostatečné vzdálenosti od stožáru.

Turbíny horizontálních větrných elektráren pro komerční výrobu elektrické energie jsou obvykle tříbřité a uvádí se do pohybu pomocí počítačem řízených motorů. Mohou dosahovat maximální obvodové rychlosti přes 320 km/hod. Vysoká účinnost a nízké zvlnění točivého momentu přispívají k dobré spolehlivosti. Listy jsou obvykle světle šedé barvy, aby splynuly s mraky. Obvykle mají rozsah 20 až 40 metrů. Stožáry jsou nejčastěji vysoké 60 až 90 metrů. Lopatky dosahují rychlosti 10 až 22 otáček za minutu. Některé modely fungují při konstantních otáčkách, ale více se používají modely s proměnlivou rychlostí turbíny, protože mají větší účinnost. Všechny turbíny jsou vybaveny automatickým vypínačem turbíny, z důvodu možného poškození listů při vysoké rychlosti větru. [14], [15]

3.1.1 Výhody HAWT

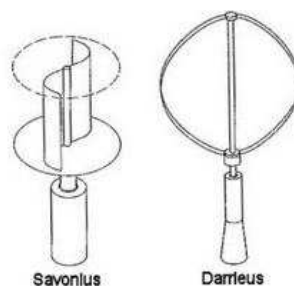
- Variabilní rozteč vrtulových listů, která umožňuje nastavení lopatky turbíny do optimálního úhlu.
- Vysoká věžová základna umožňuje přístup k silnějšímu větru. V některých lokalitách se může rychlost větru zvětšit až o 20%, a výkon o 34% na každých 10 metrů výšky.
- Vysoká účinnost, protože vrtulové listy se vždy pohybují kolmo k větru

3.1.2 Nevýhody HAWT

- Náklady na dopravu proto mohou činit až 20% z pořizovací hodnoty.
- Velmi obtížná instalace. Je potřeba velmi vysokých jeřábů a kvalifikovaných pracovníků.
- Odrazy od vysokých konstrukcí mohou mít nepříznivý vliv na správný chod radarových zařízení v okolí.
- Požadují dodatečný kontrolní mechanismus pro otáčení gondoly směrem do větru.

3.2 Turbíny s vertikální osou

Turbíny s vertikální osou (VAWT) mají hlavní rotorový běh ve svislém směru. Výhody tohoto uspořádání jsou takové, že generátor nebo převodovka mohou být umístěny dole, a že turbína nepotřebuje být uvedena do rotace. Nevýhody jsou obvykle pulsující točivý moment produkovaný během každé otáčky. Obtížná instalace turbíny na věži znamená, že musí pracovat v pomalejším proudu vzduchu blízko země. Tím se však snižuje jejich efektivita. [14], [15]



Obrázek 7. Rotory VAWT typu Savonius a Darrieus [15]

3.2.1 Darrieův rotor

Darrieův rotor je typ svislé větrné turbíny používaný k výrobě elektrické energie z energie větru. Turbína se skládá z několika úzkých lopatek vertikálně namontovaných na rotující hřídel. Darrieův rotor je teoreticky stejně efektivní jako vrtule, pokud je rychlost větru konstantní. V praxi je tato účinnost zřídka realizovatelná vzhledem k fyzickému namáhání, nedokonalému designu a nekonstantní rychlosti větru.

Turbínu vynalezl francouzský inženýr Georges Jean Marie Darrieus v roce 1931 (patentováno 8. 12. 1931). V původní verzi vyžadovala počáteční roztočení (sama se nebyla schopna z klidu roztočit). Dvě lopatky byly symetricky uspořádány a měly nulový úhel nastavení, pod kterým jsou nastaveny vzhledem ke konstrukci, na které jsou namontovány. Toto uspořádání je stejně účinné bez ohledu na to, kterým směrem vítr vane - na rozdíl od klasického typu, který se musí otočit směrem do větru. Později byla vybavena i zařízením pro samostatný start a regulaci. Účinnost se běžně uvádí v rozsahu 35 - 38%, tedy o něco málo vyšší než například Savoniova turbína. V současné době se používá třílopatkové uspořádání, které nevyžaduje vnucené počáteční roztočení. [12], [14], [15]

Výhody konstrukce:

- není nutno natáčet rotor proti větru
- generátor a ostatní součásti se dají uložit pod stožár
- menší nároky na stožár

Nevýhody konstrukce:

- problémovější regulovatelnost
- v původní konstrukci vyžadovala vyšší rychlost větru pro start turbíny

3.2.2 Savoniův rotor

Savoniův rotor vynalezl kolem roku 1925 finský lodní důstojník Sigurd J. Savonius. Tento typ rotoru je sestaven ze dvou vodorovných kruhových kotoučů, mezi něž jsou svisle postavena dvě polokruhovitě zahnutá křídla, respektive lopatky. Tyto lopatky jsou uprostřed přesazeny do protisměru, takže část větru je ze zadní strany momentálně pasivní lopatky

směřována na přední stranu aktivní lopatky. Podle uspořádání lopatek lze postavit rotory s otáčením doleva, nebo doprava. [12], [15]

Savoniův rotor byl v malých provedeních velmi často používán k pohonu ventilátorů na střechách nákladních vozidel, kde při jízdě lopatky roztáčel vítr. V současné době nabývá tento rotor na významu pro nízkovýkonové aplikace v decentralizovaném zásobování energií. [14], [15]

Výhody Savoniových rotorů:

- Jednoduchá stavba ze snadno dostupných materiálů.
- Nezávislost na stávajícím směru větru, proto není nutné natáčení do směru větru.
- Využití širokého pásma síly větru
- Je možné spojování několika rotorů do většího zařízení s relativně vysokými otáčkami.
- Vysoká odolnost vůči bouřím

Nevýhody Savoniových rotorů:

- Vysoká hmotnost rotoru
- Malá rychloběžnost
- Relativně nízká účinnost

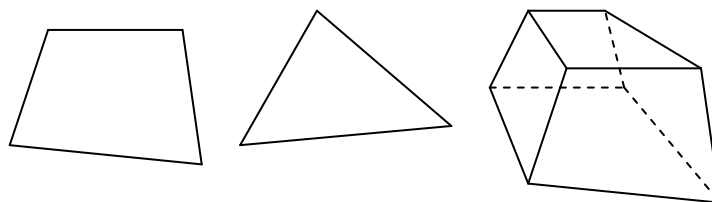
3.3 Shrnutí teoretické části

Teoretická část se zabývá problematikou větrné energie. Byla shrnuta do třech kapitol. První kapitola se zabývá větrem samotným. Je zde popsáno co je to vítr, jak vzniká, jakou má energii a jak ho dokážeme měřit. Druhá kapitola se zabývá problematikou větrných elektráren. Dozvíme se zde o historii větrných elektráren, jejich rozdělení a také jejich negativní vlivy na životní prostředí. Třetí kapitola se zabývá rozdělením větrných turbín. Turbíny dělíme do dvou základních skupin, založených podle osy rotace turbíny. Povětrnostní podmínky v ČR nejsou větrné energetice příliš nakloněny. Proto je vhodnější používat větrné turbíny s vertikální osou rotace. Ty mají menší účinnost, ale nemusí být moc vysoké a jejich pořizovací cena je výrazně nižší než turbíny s horizontální osou rotace. Proto se problematikou turbín s vertikální osou rotace budu zabývat dále v praktické části bakalářské práce.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 OBTEKÁNÍ SAVONIOVA ROTORU VĚTREM

V praktické části bakalářské práce bylo nasimulováno obtékání rotoru proudem větru pomocí software SOLIDWORKS a jeho modulu Flow simulation. Byly vymodelovány tři možné provedení Savoniova rotoru. Kolem rotorů proudil vzduch za konstantního atmosférického tlaku, který je definován jako průměrná hodnota tlaku vzduchu při mořské hladině na 45° severní šířky při teplotě 15 °C a tíhovém zrychlení $g_n = 9,80665 \text{ ms}^{-2}$. Hmotnostní průtok větru činil $0,5 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$. Hmotnostní průtok je definován jako hmotnost kapaliny, která proteče za jednotku času daným průřezem kolmým ke směru toku. Byl zvolen externí způsob analýzy. Externí způsob se vyznačuje tím, že kapalina proudí kolem rotoru v trubici uzavřené dvěma víky. Byla zvolena trubice obdélníkového průřezu. Velmi důležité jsou rozměry trubice. Ty musí být dostatečně velké, aby neovlivňovali trajektorie toku kapaliny. Rozměry trubice byly voleny 240 mm x 270 mm x 200 mm. Výška rotoru, který byl válcového tvaru, měl hodnotu 90 mm a průměr 80 mm. Trajektorie vzduchu v blízkosti trubice měli laminární charakter. Tím pádem byla trubice dostatečně velká a neovlivňovala správnost výsledků. Prakticky výpočet probíhal tak, že za pomoci počítačového programu pro přípravu vstupních dat (preprocesingu) se vytvořil geometrický model tělesa nebo soustavy, který se spojitě rozdělí na prvky konečných rozměrů. Základním prvkem v rovině je čtyřúhelník, v prostoru pak šestistěn (anglicky brick = kostka, cihla), někdy je nutné použít zjednodušené tvary prvku (trojúhelník, čtyřstěn). Rohy těchto prvků, případně některé další význačné body, jsou uzlovými body, v nichž se určují neznámé hodnoty posuvů, strany (hrany) prvků vytvářejí síť, jejíž hustota je rozhodující pro přesnost výsledků. [17], [18], [19]



Obrázek 8. Základní elementy sítě (čtyřúhelník, trojúhelník, šestistěn) [19]

4.1 Vliv úhlu natočení větrné turbíny na proudění vzduchu

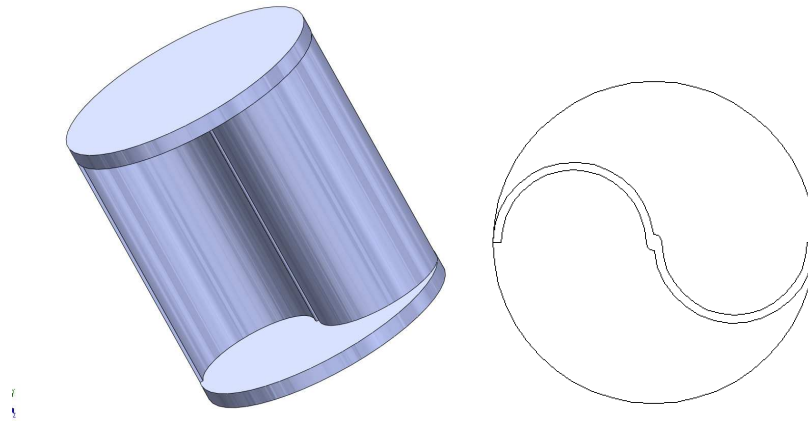
V této části práce byl ověřen vliv natočení turbíny na chování větru při působení na lopatky rotoru. Vítr proudil kolem turbíny, která se postupně otáčela o určitý úhel. Vzhledem k náročnosti software a z toho vyplývající době výpočtu, byl u Savoniova dvoulopatkového rotoru zvolen úhel 30° . U třílopatkového rotoru a průtažného rotoru byl zvolen úhel 15° . Pro přesné vyhodnocení výsledků by bylo vhodné natáčet turbínu o 1° . Vzhledem k symetrii rotorů nebylo třeba otáčet celý rotor, stačilo natočit polovinu respektive třetinu rotoru. Slovní popisy výsledků proudění jsou uvedeny v tabulce 2.

Tabulka 2. Vliv úhlu natočení větrné turbíny na proudění vzduchu

Stupeň natočení	Dvoulopatkový rotor	
	Proudění větru	Chování větru uvnitř rotoru
0°	velké turbulence	V zadní straně rotoru vznikají velké turbulentní proudy vzduchu
30°	malé turbulence	Turbulence se zmenšují, začínají vznikat zárodky větrných vírů
60°	velmi malé turbulence	Turbulence jsou minimální, vznikají vzdušné víry
90°	vznik větrných vírů	Uvnitř lopatek proudí pravidelné větrné víry
120°	velmi malé turbulence	Pozvolna začínají vznikat turbulentní proudy, větrné víry ustupují
150°	malé turbulence	Turbulence se zvětšují, větrné víry jsou minimální
180°	velké turbulence	V zadní straně rotoru vznikají velké turbulentní proudy vzduchu
Stupeň natočení	Třílopatkový rotor	
	Proudění větru	Chování větru uvnitř rotoru
0°	velké turbulence	V zadní straně rotoru vznikají velké turbulentní proudy vzduchu
15°	střední turbulence	Turbulence se zmenšují, začínají vznikat zárodky větrných vírů
30°	malé turbulence	Turbulence jsou na ústupu, stále se tvoří větrné víry
45°	velmi malé turbulence	Turbulence jsou minimální, vznikají vzdušné víry
60°	vznik větrných vírů	Uvnitř lopatek proudí pravidelné větrné víry
75°	velmi malé turbulence	Pozvolna začínají vznikat turbulentní proudy, větrné víry ustupují
90°	malé turbulence	Turbulence jsou na vzestupu, větrné víry mizí
105°	střední turbulence	Turbulence se zvětšují, větrné víry jsou minimální
120°	velké turbulence	V zadní straně rotoru vznikají velké turbulentní proudy vzduchu
Stupeň natočení	Průtažný rotor	
	Proudění větru	Chování větru uvnitř rotoru
0°	lineární prodění	Vítr proudí kolem rotoru laminárně, nevznikají turbulence
15°	lineární prodění	Vítr proudí kolem rotoru laminárně, nevznikají turbulence
30°	lineární prodění	Vítr proudí kolem rotoru laminárně, nevznikají turbulence
45°	lineární prodění	Vítr proudí kolem rotoru laminárně, nevznikají turbulence
60°	lineární prodění	Vítr proudí kolem rotoru laminárně, nevznikají turbulence
75°	lineární prodění	Vítr proudí kolem rotoru laminárně, nevznikají turbulence
90°	lineární prodění	Vítr proudí kolem rotoru laminárně, nevznikají turbulence
105°	lineární prodění	Vítr proudí kolem rotoru laminárně, nevznikají turbulence
120°	lineární prodění	Vítr proudí kolem rotoru laminárně, nevznikají turbulence

4.2 Savoniův rotor dvoulopatkový

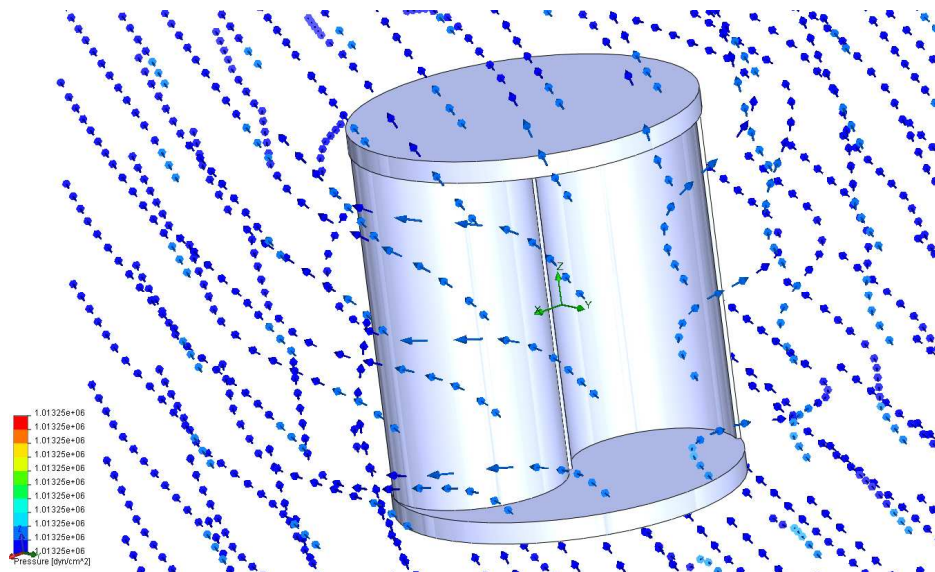
Tento typ rotoru je konstrukčně nejjednodušší. Má však jednu velkou nevýhodu. Tzv. mrtvou polohu. Mrtvá poloha je taková poloha, při které se rotor nedokáže rozběhnout sám a musí být uveden do pohybu pomocí vnějších sil. Tento problém se dá lehce řešit a to tak, že se při instalaci umístí dva rotory na sebe, pootočené o 90°.



Obrázek 9. Savoniův rotor dvoulopatkový

4.2.1 Působení větru na dvoulopatkový rotor

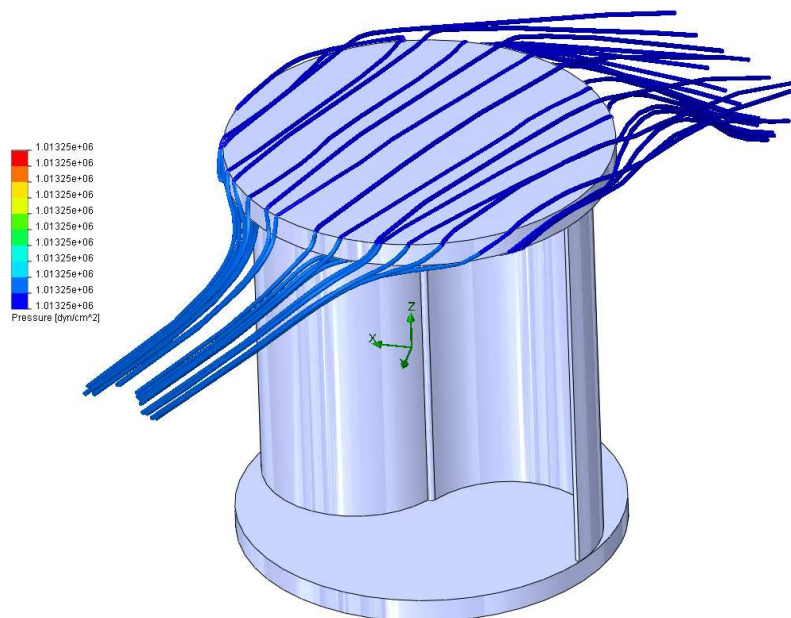
Vítr obtéká kolem rotoru. Tlak vzduchu zůstává konstantní a při kontaktu s rotorem se mění pouze v řádu několika Pascalů. Změna tlaku je tedy zanedbatelná. Aby byla situace přehledná, byl použit režim zobrazení arrows. Je velmi obtížné najít směr pohledu tak, aby nedocházelo k překrývání trajektorií a pohled byl dostatečně průkazný.



Obrázek 10. Působení větru na dvoulopatkový rotor

4.2.2 Působení větru na válcové okraje rotoru

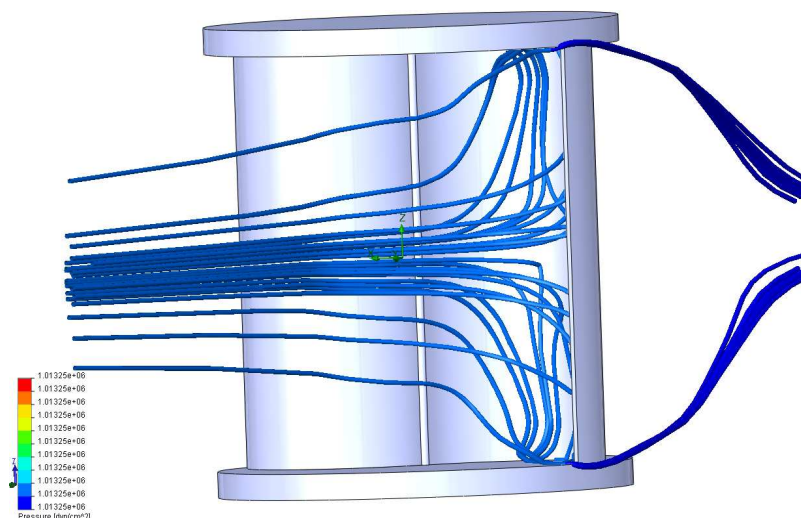
Savoniův rotor je symetrický. Situace na horním a spodním okraji je tedy stejná. Na obrázku vidíme trajektorie větru při obtékání těchto ploch. Vítr proudí z levé strany.



Obrázek 11. Působení větru na válcové okraje rotoru

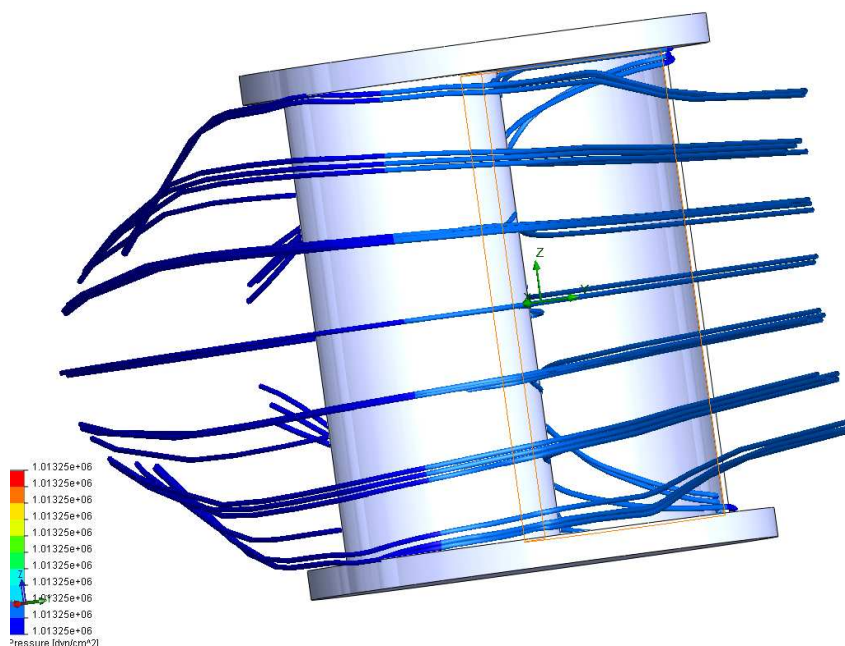
4.2.3 Působení větru na přední stranu rotoru

Při nárazu větru na vnitřní část přední strany rotoru se trajektorie stáčí k nejbližšímu styku rotoru s válcovou plochou. Situace je opět symetrická, nevznikají žádné víry nebo jiné nepravdělné útvary. Vítr proudí z levé strany.



Obrázek 12. Působení větru na vnitřní část přední strany rotoru

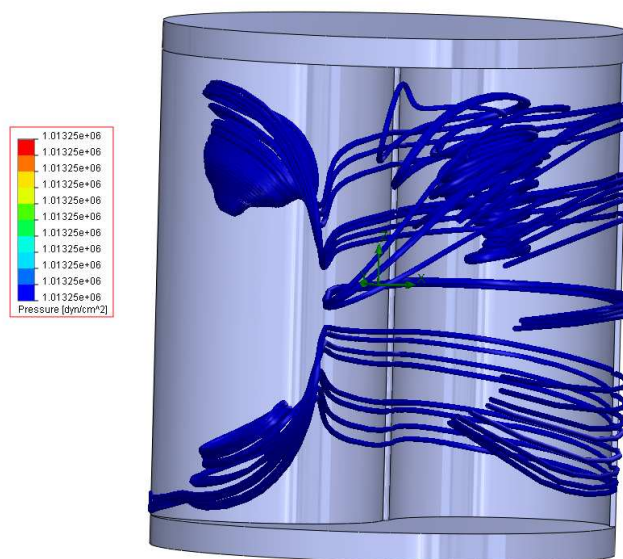
Při působení větru na vnější část přední strany rotoru obkreslují trajektorie větru tvar lopatky. Vítr proudí z pravé strany.



Obrázek 13. Působení větru na vnější část přední strany rotoru

4.2.4 Působení větru na zadní stranu rotoru

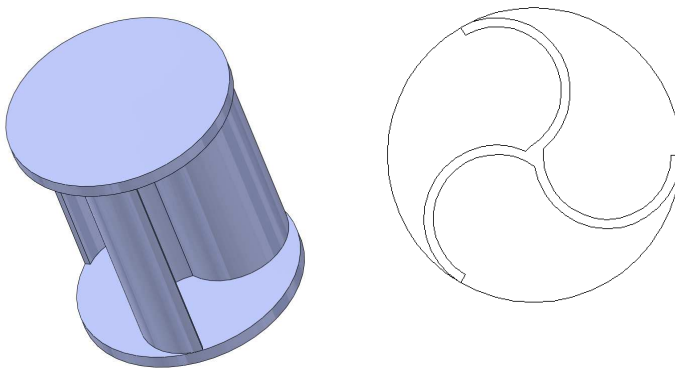
Situace na zadní straně rotoru je komplikovanější. Trajektorie větru již nejsou symetrické a tvoří větrné víry. Vítr proudí z pravé strany pohledu.



Obrázek 14. Působení větru na zadní stranu rotoru

4.3 Savoniův rotor třílopatkový

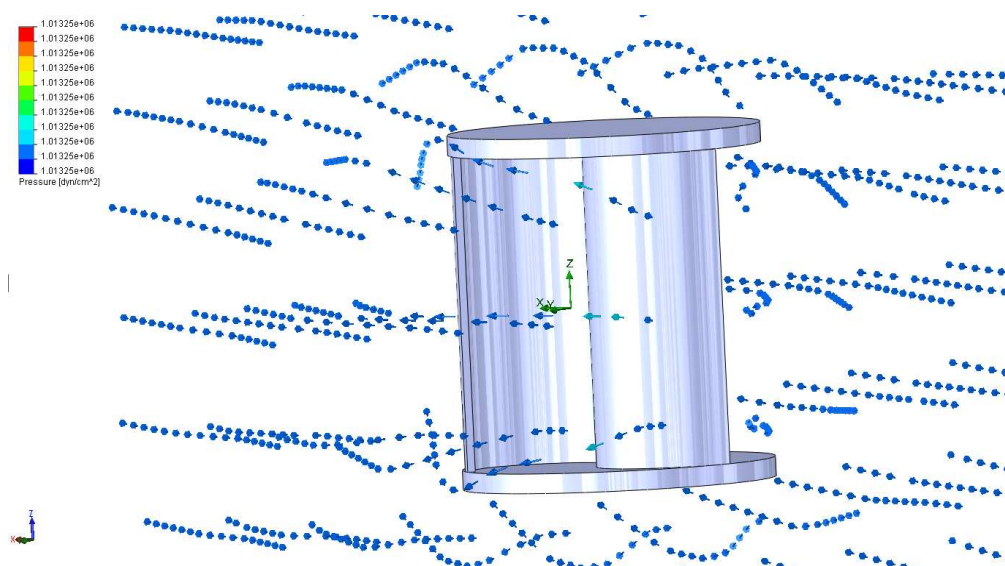
Tento typ rotoru je konstrukčně náročnější než dvoulopatková varianta. Na rozdíl od dvoulopatkového rotoru nemá žádné mrtvé místo a může fungovat samostatně. Třílopatkový rotor má přibližně stejnou účinnost jako dvoulopatkový. V praxi se vzhledem ke složitější konstrukci téměř nepoužívá.



Obrázek 15. Třílopatkový savoniův rotor

4.3.1 Působení větru na třílopatkový rotor

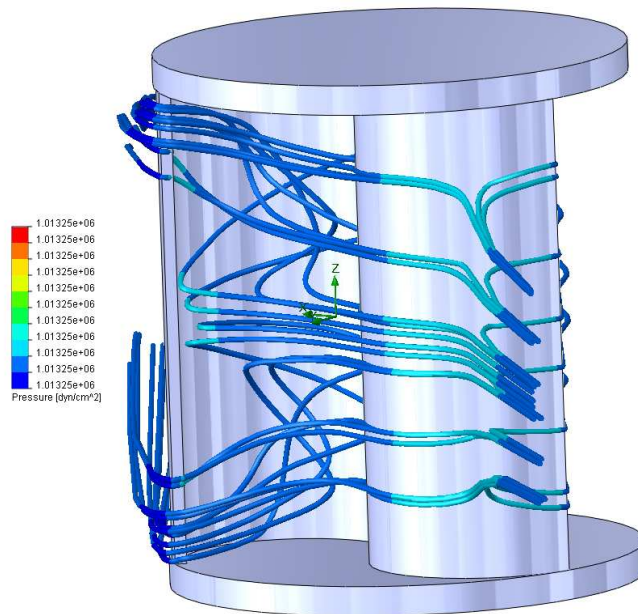
Zde můžeme sledovat trajektorie větru při obtékání třílopatkového rotoru. Situace je obdobná jako při obtékání dvoulopatkového rotoru. Aby byla situace přehledná, opět byl použit režim zobrazení arrows.



Obrázek 16. Působení větru kolem třílopatkového rotoru

4.3.2 Působení větru na přední stranu třílopatkového rotoru

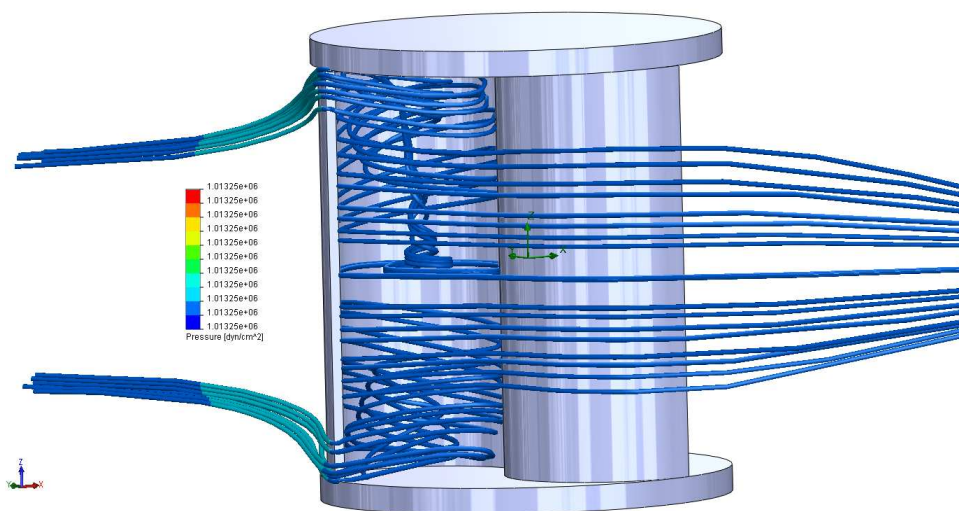
Podle trajektorií větru působící na přední stranu třílopatkového rotoru jde vidět, že situace je obdobná jako u dvoulopatkového rotoru. Vítr proudí z pravé strany zepředu.



Obrázek 17. Působení větru na přední stranu třílopatkového rotoru

4.3.3 Působení větru na zadní stranu třílopatkového rotoru

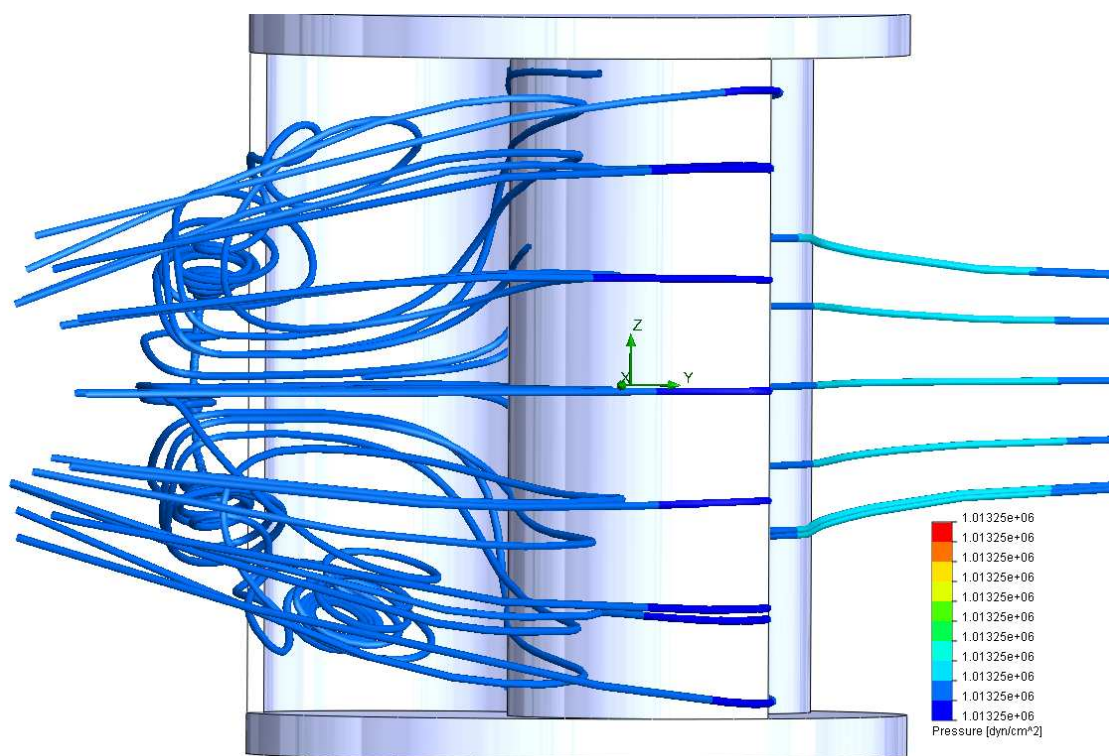
Vítr proudí z pravé strany. Zde můžeme vidět, že se proudnice větru stáčí do středu a potom kopírují vnější oblouk lopatky. Vítr proudí z pravé strany.



Obrázek 18. Působení větru na zadní stranu třílopatkového rotoru

4.3.4 Působení větru na boční stranu třílopatkového rotoru

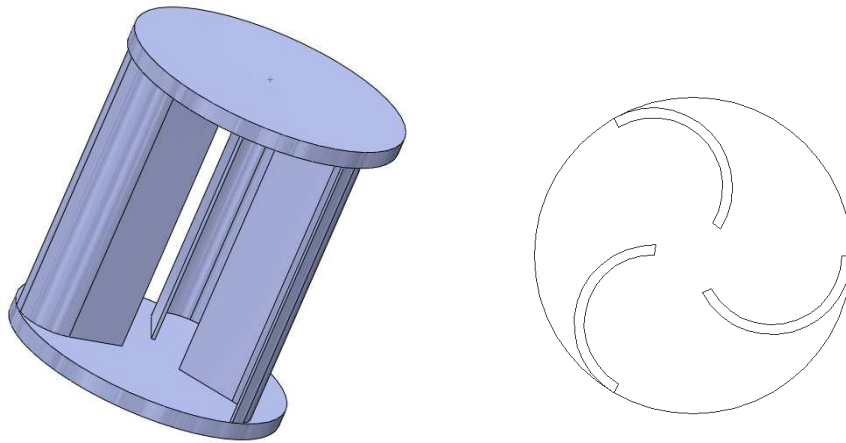
Vítr proudí z pravé strany. Na boční straně rotoru vznikají větrné víry. Nejsou však tak intenzivní, jako je tomu u dvoulopatkového provedení Savoniova rotoru. Vítr proudí z levé strany.



Obrázek 19. Působení větru na boční stranu třílopatkového rotoru

4.4 Průtažný rotor

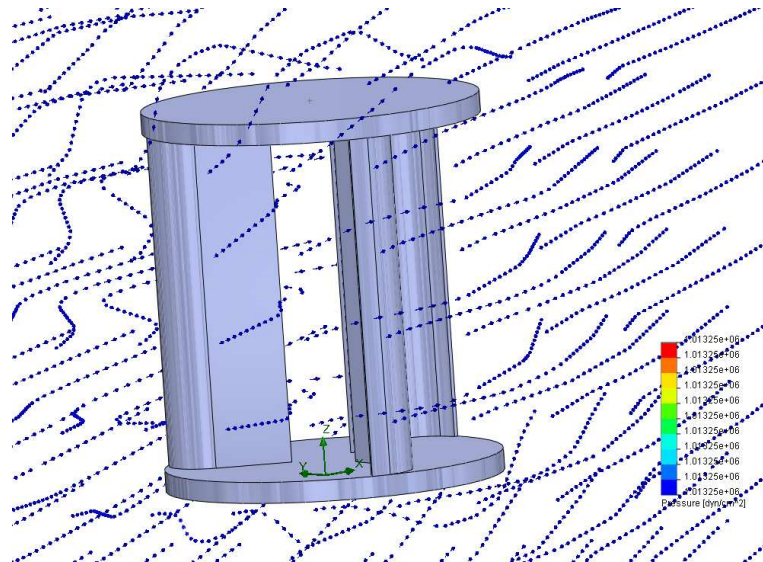
Předchozí typy Savoniova rotoru přenáší nejen točivý moment z lopatek na pracovní stroj, ale musí také přijímat ohýbací síly vyvolané tlakem větru a nevyvážeností. Proto je konstrukční výška rotoru omezena na 2,5 až 3 m. Pokud bychom chtěli rotor zvětšit, hrozilo by nebezpečí, že se hřídel za bouře kriticky rozkmitá do stran. Byl proto vyvinut nový typ rotoru, který je samonosný, tuhý v ohybu a co do statiky koncipovaný jako prostorový nosník. Toto řešení dovoluje stavět větší rotory. Horním limitem je v současnosti průměr cca 3 m a výška 6 m. Tento rotor je třílopatkový. Konstrukční princip spočívá v tom, že svislé lopatky z ohebného materiálu (např. umělá hmota zpevněná skelným vláknem, lodní překližka nebo plech) tvoří s vodorovnými segmenty nebo žebry konstrukční jednotku podobnou lodnímu trupu nebo křídlu letadla. V důsledku jsou pak jednotlivé stavební části stejně jako hřídel namáhány jen v tlaku a tahu, nikoli v ohybu. Rotor je díky tomu velmi lehký a zároveň tuhý



Obrázek 20. Průtažný rotor

4.4.1 Působení větru na průtažný rotor

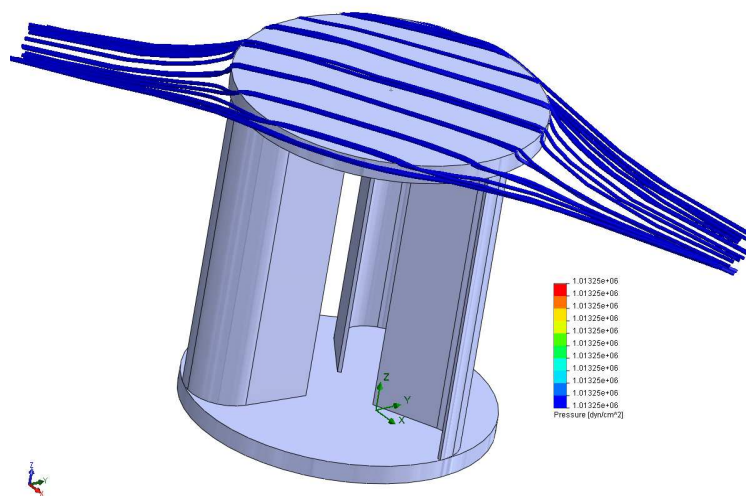
Vidíme zde velký rozdíl oproti předešlým typům rotoru. Vítr proudí i skrze turbínu. Vítr proudí z pravé strany.



Obrázek 21. Působení větru na průtažný rotor

4.4.2 Působení větru na válcové okraje rotoru

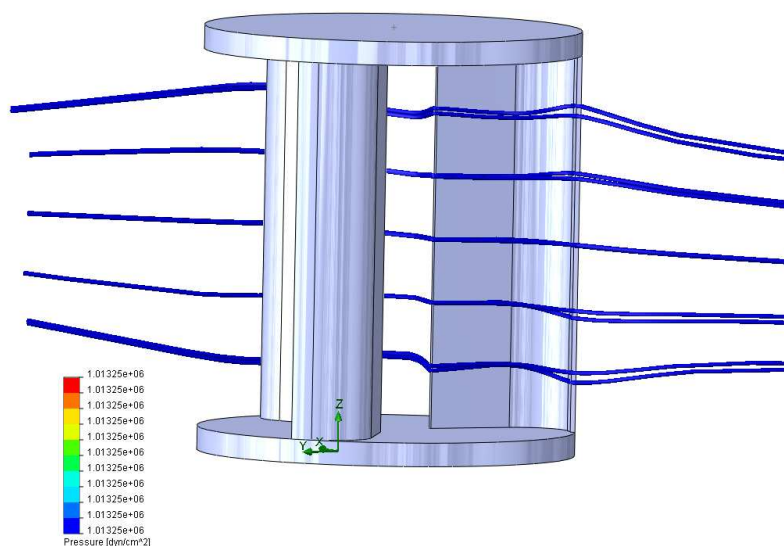
Podle trajektorií větru působících na válcové okraje rotoru lze usoudit, že tvar lopatek nemá na tuto plochu žádný vliv. Rotor je symetrický, situace na spodním okraji je stejná. Vítr proudí z pravé strany.



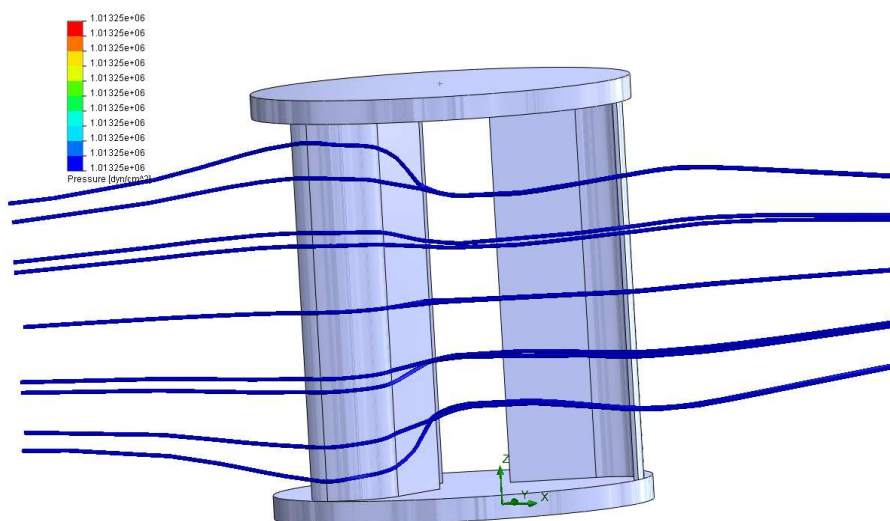
Obrázek 22. Působení větru na vrchní válcový okraj třílopatkového rotoru

4.4.3 Působení větru na přední lopatku rotoru

Vítr proudí z pravé strany a působí na přední lopatku rotoru rovnoměrně. Kopíruje její tvar. Nevznikají zde žádné víry nebo jiné nepravidelné útvary.



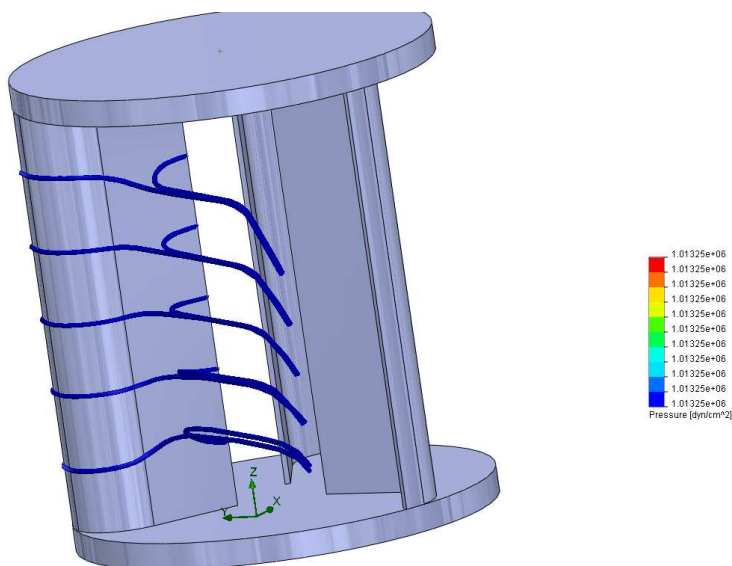
Obrázek 23. Působení větru na vnitřní plochu přední lopatky



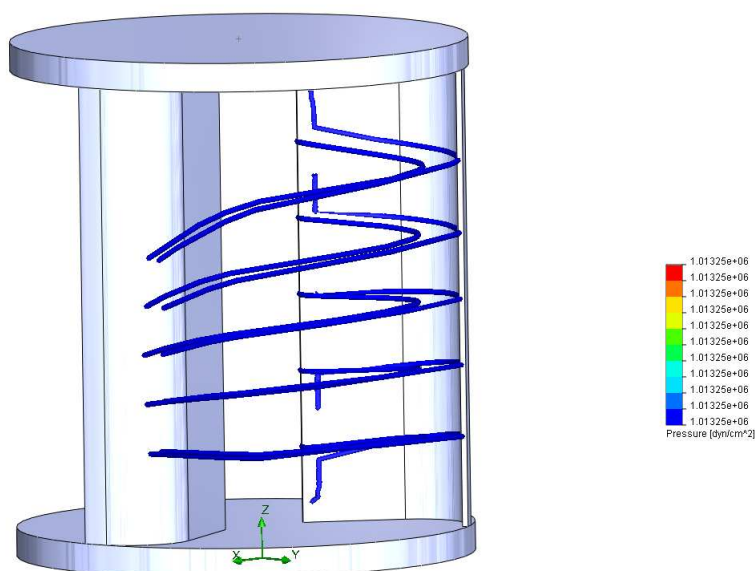
Obrázek 24. Působení větru na vnější plochu přední lopatky

4.4.4 Působení větru na boční lopatku průtažného rotoru

V této oblasti vznikají drobné vzdušné víry. Oproti předešlým typům Savoniiova rotoru jsou však tyto víry minimální a pravidelné. Z vnější strany lopatky kopíruje vítr její tvar. Vítr proudí z pravé strany zepředu.



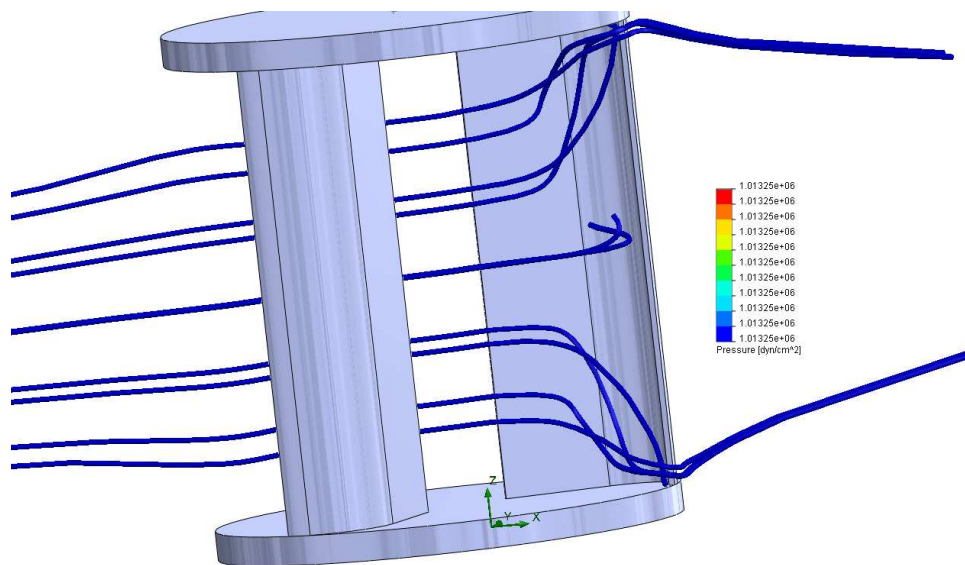
Obrázek 25. Působení větru na vnější plochu boční lopatky



Obrázek 26. Působení větru na vnitřní plochu boční lopatky Vítr proudí zleva.

4.4.5 Působení větru na zadní lopatku průtažného rotoru

Trajektorie větru se stáčí k nejbližšímu styku rotoru s válcovou plochou, podobně jako při nárazu větru na přední stranu dvoulopatkového Savoniova rotoru. Vítr proudí z levé strany.



Obrázek 27. Působení větru na vnitřní plochu zadní lopatky

4.5 Vliv výšky umístění rotoru na proudění vzduchu

V modulu Flow Simulation programu byl proveden pokus, který zkoumá vliv výšky umístění rotoru na proudění vzduchu. Vítr proudil kolem turbíny při nulové výšce. Postupně se rotor zvedal. Při malých výškách se vítr odrazil od spodní hrany rotoru a způsoboval turbulentní proudění, které má negativní vliv na účinnost rotoru. Postupně se tento vliv vytratil. Vzhledem k náročnosti výpočtu bylo provedeno jen 5 měření.

Tabulka 3. Vliv výšky umístění rotoru na proudění vzduchu

Vliv výšky umístění rotoru na proudění vzduchu	
Vzdálenost rotoru od země	chování větru
0% Výšky rotoru	vítr proudí kolem rotoru rovnoměrně
25% Výšky rotoru	na spodní hraně rotoru vznikají velké turbulentní proudy
50% Výšky rotoru	na spodní hraně rotoru vznikají velké turbulentní proudy
75% Výšky rotoru	vznikají turbulentní proudy, už ne tak intenzivní
100% Výšky rotoru	vítr proudí kolem rotoru rovnoměrně

4.6 Zhodnocení výsledků

Podle analýzy obtékání rotoru vzduchem má nejlepší vlastnosti průtažný rotor. Během obtékání rotoru větrem téměř nevznikají větrné víry a proudění má tedy lineární charakter. Naopak dvoulopatkové i třílopatkové provedení savoniova rotoru jsou ovlivňovány turbulentním prouděním, které může v případě velké nárazové rychlosti větru deformovat rotor. Účinnost dvoulopatkového a třílopatkového rotoru je velmi podobná. Největší účinnost má tedy pravděpodobně průtažný rotor, který není zatěžován vlivem turbulentního proudění vzduchu. Je však nejnáročnější na konstrukci.

Při zkoumání vlivu úhlu natočení větrné turbíny na proudění vzduchu bylo vyzorováno, že u dvoulopatkového i třílopatkového rotoru má úhel natočení větrné turbíny nezanedbatelný vliv. U průtažného rotoru tomu tak není. Proudění kolem průtažného rotoru je laminární. Průtažný rotor se tedy zdá být nejlepší ze zkoušených modelů.

Při zkoumání vlivu výšky umístění rotoru na proudění vzduchu bylo zjištěno, že výška umístění rotoru má na proudění vzduchu kolem rotoru nezanedbatelný vliv. Proto je vhodné umístit rotor dostatečně vysoko, aby nebyla negativně ovlivněna účinnost rotoru.

Součástí práce jsou videa, která jsou na přiloženém CD, znázorňující trajektorie větru při obtékání větrné turbíny.

ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývá větrnou energetikou. V teoretické části je shrnuta teorie týkající se větru, větrných elektráren a jejich rozdělení. V České republice nejsou příliš vhodné podmínky pro stavbu velkých větrných elektráren, přesto se s nimi můžeme setkat. Potenciál využití větrné energie v České republice je situován do vhodných lokalit s rychlostí větru vyšší než 5 m/s. Tyto lokality jsou zpravidla situovány v příhraničních horských oblastech, kde je případný další rozvoj omezen požadavky na ochranu přírody a svůj vliv mají i nepříznivé sezónní klimatické podmínky.

V praktické části byly vytvořeny tři počítačové modely větrné turbíny pomocí programu Solidworks a testovány v modulu Flow Simulation. Byl vymodelován Savoniův rotor dvoulopatkový, Savoniův rotor třílopatkový a průtažný rotor. Na modely působil vítr o konstantním tlaku, který obtékal lopatky rotoru. Na modelech byl zkoumán vliv úhlu natočení větrné turbíny na proudění vzduchu, vliv výšky umístění rotoru na proudění vzduchu a byly znázorněny jeho trajektorie při obtékání rotoru.

Oba Savoniovy rotory vykazují při simulaci tendenci k turbulentnímu proudění. U průtažného rotoru, za stejných podmínek, k turbulencím nedocházelo. V literatuře [15] je uveden graf porovnávající praktické zkoušky Savoniova a průtažných rotorů. Vypočítané výsledky ukazují, že charakteristiky proudění větru při obtékání modelů, jsou v úzké vazbě s výsledky dosaženými experimentální cestou. Pro další, přesnější ověření výsledků, by bylo vhodné porovnat teoretické výsledky s praktickými při dlouhodobém sledování modelu v reálných podmínkách. Simulace v modulu Simulation programu Solidworks jsou velmi náročné na operační paměť počítače a čas. Každá simulace s hustě definovanou výpočtovou sítí trvá přes 30 minut. Pro lepší představu vlivu úhlu natočení větrné turbíny na proudění vzduchu by bylo třeba zkoumat turbínu po 1° .

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Wikipedia, otevřená encyklopedie [online].c2000, [cit. 2009-10-11]. **Dostupné z World Wide Web:** <<http://en.wikipedia.org/wiki/Wind>>.
- [2] Alternativní zdroje energie, [online].c2008, [cit. 2009-10-11]. **Dostupné z World Wide Web:** <<http://www.alternativni-zdroje.cz/vetrne-elektrarny.htm>>
- [3] Český hydrometereologický ústav, [online].c2008, [cit. 2009-10-10]. **Dostupné z World Wide Web:** <http://www.chmu.cz/meteo/olm/Let_met/beaufort/Beaufortova_stupnice.htm>.
- [4] Quido,online magazín, [online]c2008, [cit.2009-10-11] **Dostupné z World Wide Web:** <<http://www.quido.cz/objevy/anemometr.htm>>.
- [5] Navajo, online encyklopedie [online]c2008 **Dostupné z World Wide Web:** <<http://vetrna-turbina.navajo.cz/>>.
- [6] Větrné mlýny[online]c2005, [cit.2009-10-11] **Dostupné z World Wide Web:** <<http://vetrnemlyny.unas.cz/index2.htm>>.
- [7] Osel, objektivní zdroj e-learning, [online]c2005, [cit.2009-10-11] **Dostupné z World Wide Web:** <<http://www.osel.cz/index.php?clanek=4122>>.
- [8] České vysoké učení technické, [online]c2005, [cit.2009-10-11] **Dostupné z World Wide Web:** <<http://www.fs.cvut.cz/stretech/2009/pdf/1001.pdf>>.
- [9] POLANECKÝ, K.; BURSA, J. Jak využívat obnovitelné zdroje energie: Praktický rádce pro domácnosti a obce. Hnutí DUHA – Přátelé Země ČR, 2002. 87 s. ISBN 80-902823-6-5
- [10] Obnovitelné zdroje [online]c2008 **Dostupné z World Wide Web:** <<http://www.vosvdf.cz/cmsb/userdata/489/obnovitelne-zdroje/Vetrne%20elektrarny.pdf>>.
- [11] TZBInfo, technické zařízení budov [online]c2008 **Dostupné z World Wide Web:** <<http://www.tzb-info.cz/>>.
- [12] Jana Fojtíková, Větrné elektrárny. MASARYKOVA UNIVERZITA , PEDAGOGICKÁ FAKULTA ,Katedra technické a informační výchovy, Brno 2008
- [13] *EkoWatt*, *Centrum pro obnovitelné zdroje a úspory energie* [online]. c2000, [cit. 2009-12-12]. **Dostupné z World Wide Web:** <<http://www.ekowatt.cz>>.
- [14] Uwe Hallenga, Malá větrná elektrárna, nakladatelství HEL, Ostrava 2006, 96s. ISBN 80-86127-6-5
- [15] Heinz Shulz, Savoniův rotor, nakladatelství HEL, Ostrava 2006, 88s. ISBN 80-86567-6-5
- [16] Ekoporadna, [online] **Dostupné z World Wide Web** <http://www.ekoporadna.cz/wiki/doku.php?id=energie:jaky_maji_vetrne_elektrarny_vliv_na_zivotni_prostredi>.
- [17] Wikipedia, otevřená encyklopedie [online].c2000, [cit. 2009-10-11]. **Dostupné z World Wide Web:** <http://cs.wikipedia.org/wiki/Atmosférický_tlak>.

[18] Wikipedia, otevřená encyklopedie [online].c2000, [cit. 2009-10-11]. **Dostupné z World Wide Web:** <
http://cs.wikipedia.org/wiki/objemovy_prutok >.

[19] Vysoké učení technické Brno, [online]c2005, [cit.2009-10-11] **Dostupné z World Wide Web:**
www.umt.fme.vutbr.cz/~jbursa/MKP4.doc >.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

E_k	Kinetická energie vzduchu [J]
M	Hmotnost vzduchu [kg]
V	Rychlost větru [$m \cdot s^{-1}$]
P	Výkon vzdušného proudu [W]
T	Čas [s]
ρ	Hustota vzduchu [$kg \cdot m^{-3}$]
V	Objemový průtok vzduchu [$m^3 \cdot s^{-1}$]
S	Plocha, která je kolmá k proudícímu vzduchu [m^2]
HAWT	Horizontal axis wind turbine
VAWT	Vertical axis wind turbine
AVI	Audio Video Interleave

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1. Pole průměrné rychlosti větru 100 m nad povrchem [3].....	13
Obrázek 2. Hlavní směry větru na zeměkouli[12]	14
Obrázek 3. Schéma rotačního anemometru [4].....	16
Obrázek 4. Závislost výkonu větru proudícího plochou 1 m ² na jeho rychlosti. [12]	17
Obrázek 5. Větrný mlýn [7]	19
Obrázek 6. Území vhodná pro umístění větrných elektráren [3].....	26
Obrázek 7. Rotory VAWT typu Savonius a Darrieus [15]	28
Obrázek 8. Základní elementy sítě (čtyřúhelník, trojúhelník, šestistěn) [19]	32
Obrázek 9. Savoniův rotor dvoulopatkový	35
Obrázek 10. Působení větru na dvoulopatkový rotor.....	35
Obrázek 11. Působení větru na válcové okraje rotoru	36
Obrázek 12. Působení větru na vnitřní část přední strany rotoru.....	36
Obrázek 13. Působení větru na vnější část přední strany rotoru.....	37
Obrázek 14. Působení větru na zadní stranu rotoru	37
Obrázek 15. Třílopatkový savoniův rotor	38
Obrázek 16. Působení větru kolem třílopatkového rotoru	38
Obrázek 17. Působení větru na přední stranu třílopatkového rotoru	39
Obrázek 18. Působení větru na zadní stranu třílopatkového rotoru.....	39
Obrázek 19. Působení větru na boční stranu třílopatkového rotoru.....	40
Obrázek 20. Průtažný rotor	41
Obrázek 21. Působení větru na průtažný rotor.....	42
Obrázek 22. Působení větru na vrchní válcový okraj třílopatkového rotoru	42
Obrázek 23. Působení větru na vnitřní plochu přední lopatky.....	43
Obrázek 24. Působení větru na vnější plochu přední lopatky.....	43
Obrázek 25. Působení větru na vnější plochu boční lopatky	44
Obrázek 26. Působení větru na vnitřní plochu boční lopatky Vítr proudí zleva.....	44
Obrázek 27. Působení větru na vnitřní plochu zadní lopatky	45

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1. Beaufortova stupnice větru	15
Tabulka 2. Vliv úhlu natočení větrné turbíny na proudění vzduchu.....	34
Tabulka 3. Vliv výšky umístění rotoru na proudění vzduchu.....	45

SEZNAM PŘÍLOH