

Vliv úhlu odtokové hrany a vzdálenosti od osy rotace na účinnost průtažného rotoru

Aneta Dostálková

Bakalářská práce
2011



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Aneta DOSTÁLKOVÁ**

Osobní číslo: **T08912**

Studijní program: **B 3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Technologická zařízení**

Téma práce: **Vliv úhlu odtokové hrany a vzdálenosti od osy rotace
na účinnost průtažného rotoru**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte rešerši na dané téma s přihlédnutím na patentovou literaturu
2. Navrhněte řešení odběhové hrany průtažného rotoru
3. Zkontrolujte proudění s využitím SW Flow Simulation
4. Zhodnoťte navržené řešení

Rozsah bakalářské 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:

14. února 2011

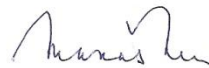
Termín odevzdání bakalářské práce:

3. června 2011

Ve Zlíně dne 6. ledna 2011



doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.
děkan



doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.
ředitel ústavu

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 obhajoby¹⁾;
- 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. 3²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60³⁾ 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 § 60³⁾ odst. 2 a 3 mohu užit 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 nevydělečně 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 vzdělávacího 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). Odpírá-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 výtěžku 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 výtěžku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Teoretická část bakalářské práce se zabývá shrnutím dostupných informací o větrných elektrárnách, jejich rozdělení a rozvoji u nás i ve světě. Dále je zde uvedena patentová literatura státu Francie. V praktické části byly navrženy tři varianty rotorů lišící se úhlem odtokové hrany a vzdáleností od osy rotace. Pomocí programu SolidWorks Flow Simulation byly provedeny simulace pro tři stanovené rychlosti proudění větru. Výsledné kroutící momenty byly vyhodnoceny.

Klíčová slova: Vítr, větrná energie, větrné elektrárny, odtoková hrana

ABSTRACT

Theoretical part of Bachelor's thesis occupy resume available informations about wind turbine, classify and development in our country and in world. In practical part was design three variants rotors different in angle trailing edge and distance from axis of rotation. With the assistance of program SolidWorks Flow Simulation was conduct simulation for three specify velocity wind. Resultant moment of torque was appraise.

Keywords: Wind, wind power, wind turbine, trailing edge

Poděkování

Tímto bych chtěla poděkovat mému vedoucímu Ing. Jaroslavu Malochovi, CSc., za jeho ochotu, čas, trpělivost a cenné rady při psaní 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 VĚTRNÁ ENERGIE	12
1.1 VÍTR.....	12
1.2 VÝKON A ENERGIE VĚTRU	14
1.3 MĚŘENÍ RYCHLOSTI VĚTRU	16
1.3.1 Beaufortova stupnice síly větru.....	17
1.3.2 Anemometry.....	18
2 VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY	21
2.1 PRINCIP FUNGOVÁNÍ VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY	21
2.1.1 Rotor.....	22
2.1.2 Gondola	27
2.1.3 Stožár.....	30
2.1.4 Přípojka k elektrické síti.....	30
2.2 ROZDĚLENÍ VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN	31
2.2.1 Podle aerodynamického principu	31
2.2.2 Podle výkonu.....	31
2.3 AERODYNAMIKAPROFILULOPATEK	35
2.4 VÝPOČETVĚTRNÉ ELEKTRÁRNY	37
2.5 ÚČINNOST VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY	39
2.6 KRITÉRIA VÝBĚRU LOKALIT	40
2.6.1 Technická hlediska.....	41
2.6.2 Ekologická hlediska	43
2.6.3 Ekonomická hlediska	44
2.7 VÝHODY A NEVÝHODY VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN	44
3 SVĚTOVÝ ROZVOJ VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN	46
3.1 ROZVOJ V ČESKÉ REPUBLICE	46
3.2 ROZVOJ VE FRANCII	48
4 PATENTY	50
4.1 FRANCOUZSKÉ PATENTY	50
II PRAKTICKÁ ČÁST	56
5 SIMULACE VĚTRNÝCH PODMÍNEK	57
5.1 SOFTWARE SOLIDWORKS FLOW SIMULATION	57
5.2 NASTAVENÍ PROGRAMU FLOW SIMULATION	60
5.3 NAVRHOVANÉ ROTORY	65
5.4 SIMULACE	72
5.4.1 Výpočet rotorů s nulovými otáčkami.....	72
5.4.2 Výpočet rotorů s nastavenými otáčkami	84
ZÁVĚR	100
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	102

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	106
SEZNAM OBRÁZKŮ	107
SEZNAM TABULEK.....	111
SEZNAM PŘÍLOH.....	112

ÚVOD

Větrná energie patří mezi nejstarší způsoby získávání energie z přírodních zdrojů na Zemi. Je formou sluneční energie a patří mezi nevyčerpatelné zdroje. Vítr vzniká v důsledku nerovnoměrného ohřívání Země, což způsobuje tlakové rozdíly v atmosféře, které jsou vyrovnávány prouděním vzduchu. V minulosti byla energie větru využívána pouze pro pohony lodí či větrných mlýnů. Stále silnějším impulsem k rozvoji byla bezesporu snaha čelit globálním klimatickým změnám, ropným krizím i ochraně životního prostředí. V evropských zemích se větrná energie stává důležitým průmyslovým odvětvím. Čisté zdroje snižují exhalace, vytvářejí tisíce nových pracovních míst a zásobují proudem už miliony domácností. Trendem je výstavba stále větších strojů a jejich sdružování se do tzv. větrných farem. Důvodem je snížení výrobních nákladů a co největší využitelnost vhodné lokality. V České republice nejsou možnosti využití energie větru tak velké, vzhledem k přírodním podmínkám (vnitrozemské klima s nepravidelným prouděním vzduchu), ale i přesto se chystá ČEZ (česká elektrárenská společnost) investovat do roku 2020 přibližně 20 miliard Kč na výstavbu nových větrných elektráren na našem území.

Studium využití větrné energie je proto velice důležité i z toho důvodu, že zásoby ropy, uhlí či jiných fosilních paliv, v dnešní době tak hojně využívaných, nejsou nevyčerpatelné, a proto je velice důležité hledat nové „čisté“ zdroje energie.

Tato práce je v teoretické části zaměřena na všeobecné shrnutí dostupných informací o větrné energii a seznámení se s patentovou literaturou čtvrté země, s největším potenciálem využití této energie v Evropě, s Francií.

Praktická část práce je zaměřena na porovnání vlivu úhlu odtokové hrany a vzdálenosti od osy rotace na účinnost průtažného rotoru a to pomocí krouticího momentu vzhledem k ose Z. Vliv úhlu odtokové hrany lopatky je znázorněn na třech rotorech v několika variantách a pomocí programu SolidWorks Flow Simulation jsou rotory zatíženy simulací tří základních rychlostí větru.

I. TEORETICKÁ ČÁST

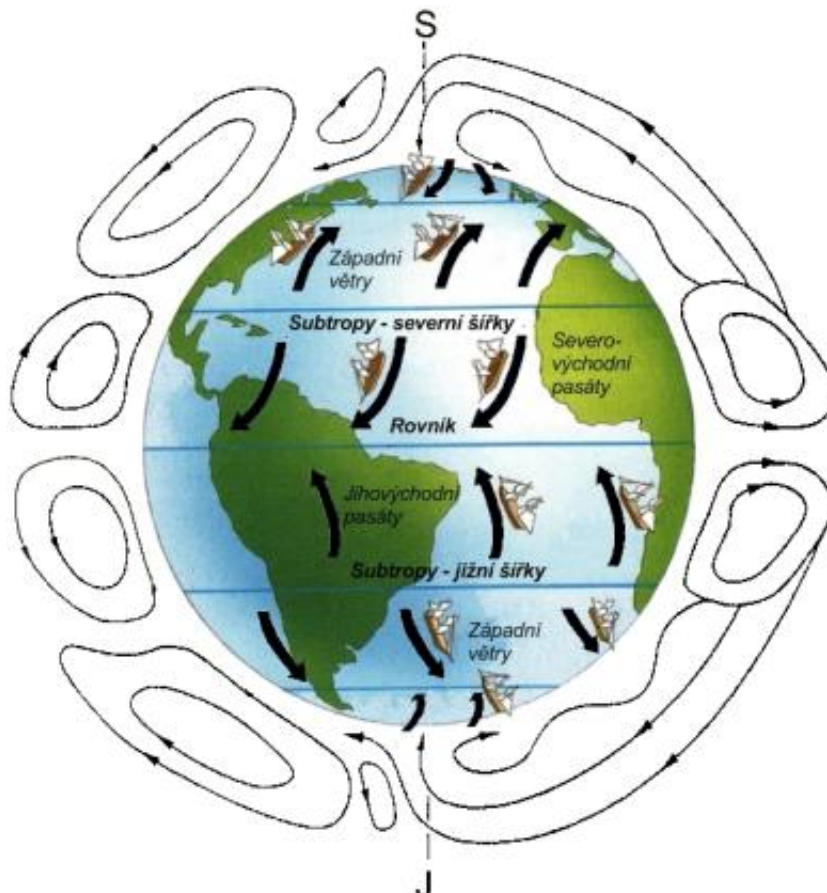
1 VĚTRNÁ ENERGIE

Možnost využití energie větru si lidé uvědomili velmi brzy, vítr byl zřejmě první živél, který se člověku podařilo ovládnout. Lze doložit, že Egypťané používali sílu větru k pohonu lodí již 5000 let př. n. l. Prvními prakticky využitelnými stroji se však staly až větrné mlýny. V Číně a Persii se používaly již v 7. století. Prostřednictvím Arabů se od 10. století objevují ve Španělsku a postupně pronikají do ostatních evropských zemí. Význam větrné energie vyvrcholil v 16. století a o století později dosáhl jejich počet 60 000. V Čechách, na Moravě a ve Slezsku se větrná energie využívala nejvíce v 18. a 19. století. Svědčí o tom asi 260 zcela nebo částečně zmapovaných lokalit, kde dříve stávaly větrné mlýny. Pro Holandsko se staly stejně typické jako tulipány. Jenom severozápadně od Amsterdamu v oblasti řeky Zaanjich bylo více než 700. Na rozdíl od Anglie a Německa, kde hlavním zdrojem energie bylo uhlí, v Holandsku v té době byly hlavním energetickým zdrojem právě větrné stroje. V roce 1850 mohl být výkon všech větrných mlýnů kolem 1 000 MW [1]. Posledních přibližně sto let se používají k výrobě větrné energie větrné elektrárny, které využívají sílu větru tak, že proudící vzduch předává lopatkám část své kinetické energie a ta se v turbíně mění na energii otáčivého pohybu a následně v generátoru na energii elektrickou [2].

1.1 Vítr

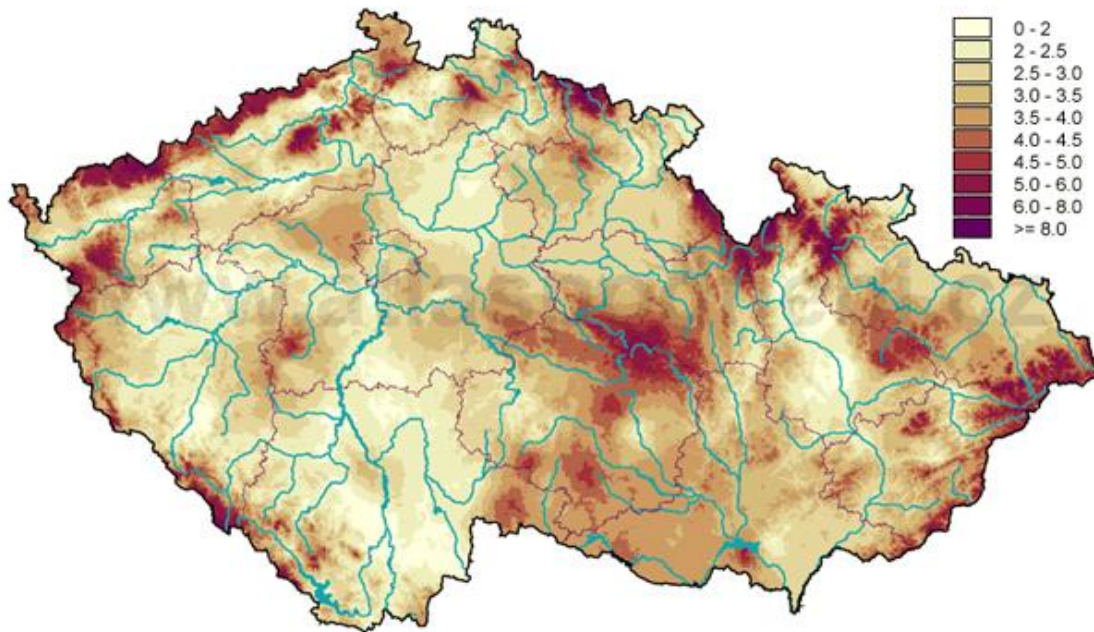
Vítr patří k nevyčerpatelným (obnovitelným) zdrojům energie. Za veškerý život na Zemi, a stejně tak i za vítr, vděčíme Slunci. Jeho tepelné záření nestejnoměrně zahřívá zemský povrch a nad ním ležící vzduchové vrstvy. Zahřátý vzduch stoupá vzhůru a dělá tak místo přicházejícímu, studenějšímu vzduchu. Rozdíly tlaků v atmosféře, vznikající působením Slunce, vzduch nestále vyrovnává. Takto vyvolaný vyrovnávací pohyb vzduchové hmoty označujeme jako vítr [3]. Nejvíce slunečních paprsků dopadá na Zemi nad rovníkem. Vzduch se od nich zahřívá a stoupá do výšky, kde vzniká bezvětrné pásmo. Poté co vzduch vystoupí velmi vysoko, ochladí se a v pásmech 30° severně a jižně od rovníku klesá zpět na zem. Odtud proudí směrem k rovníku a na druhou stranu směrem k pólům. Při přemísťování do míst s vyšší obvodovou rychlostí zemského povrchu, rotující vzduchový prsteneček předbíhá pevný povrch a vítr se stáčí na východ. Směr větru v tropických oblastech vane převážně východním směrem k rovníku a v pásmech mezi 40° a 60° severní a jižní šířky převážně západním směrem k pólům. Na obou polokoulích se

tak vytvářejí tři samostatné, příčně rotující prstence vzduchu. Jeden je nad tropickým pásmem, druhý nad mírným pásmem a třetí nad polární oblastí [4].



Obr. 1. Vznik větrů na Zemi[4]

Přírodní útvary jako hory, kopce, keře a budovy významně ovlivňují nestejný pohyb vzduchu v blízkosti zemského povrchu. Zatímco vyšší polohy stanoviště často příznivě ovlivňují použitelnou rychlost větru, vytvářejí stromy a budovy v přízemních vrstvách vzduchu poryvy a víry, které jsou pro využití větrné energie spíše nežádoucí [3]. V České republice jsou možnosti využití energie větru, vzhledem k přírodním podmínkám (vnitrozemské klima s nepravidelným prouděním vzduchu) dosti omezené. Vhodné lokality pro využití jsou většinou ve vyšších nadmořských výškách, kde vítr dosahuje rychlostí nad 5 m/s). Při využití všech lokalit s rychlostí větru vyšší než 4,8 m/s by bylo možné v České republice vyrobit 8,5% současné spotřeby elektrické energie [5].



Obr. 2. Průměrná sezónní rychlost větru v ČR na podzim[5]

1.2 Výkon a energie větru

Výkon vzdušného proudu je funkcí rychlosti větru, hustoty vzduchu a velikosti plochy, kterou vzduch protéká:

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

P_w je výkon protékající danou plochou při rychlosti větru $w(W)$

ρ je hustota vzduchu (kg/m^3)

v je rychlost vzduchu (m/s)

S je průtočná plocha (m^2)[6]

Pro přesné výpočty výkonu větru je nutno brát v úvahu mimo jiné i geometrickou charakteristiku listů rotoru, přesné stanovení všech účinností a rozdílnou rychlost větru před rotorem a v rovině rotoru. Uvedené vzorce slouží pouze pro orientační stanovení

výkonu. Přesnější výpočty lze provádět pomocí speciálních programů a výpočetní techniky.

Kinetická energie proudícího vzduchu se vyjadřuje vztahem:

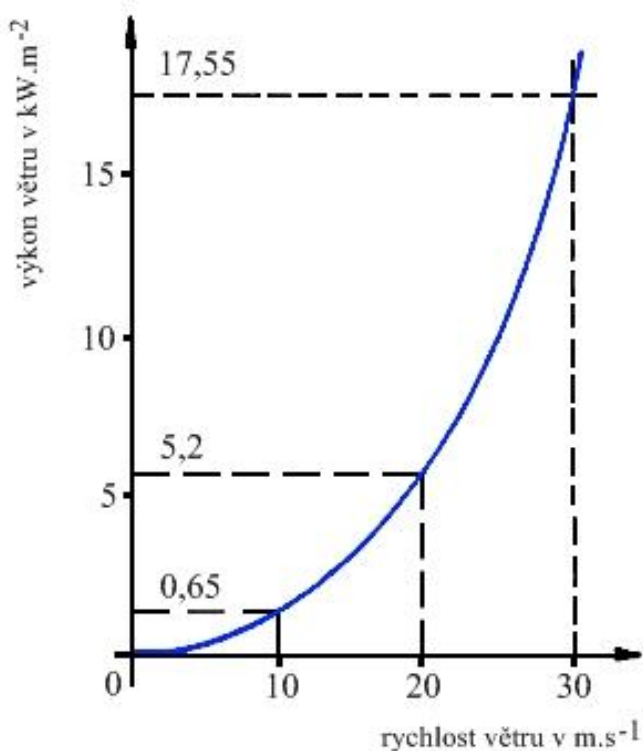
$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (2)$$

E_k kinetická energie vzduchu [J]

m hmotnost vzduchu [kg]

v rychlost větru [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$][7]

Z uvedeného vztahu pro výpočet výkonu 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 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Lze také říci, že výkon větru bude s rostoucí rychlostí silně stoupat a při menších rychlostech větru bude velmi malý. Správnost výsledku lze při provádění takového výpočtu zkontrolovat podle diagramu závislosti výkonu větru na jeho rychlosti[6].



Obr. 3. Závislost výkonu větru na rychlosti[6]

1.3 Měření rychlosti větru

Vítr je definován směrem a rychlostí. Nejdůležitějším údajem při využívání energie větru, je jeho rychlost, která je úměrná velikosti tlakového rozdílu a udává se převážně v m/s [6].

Směr větru dává údaj, odkud vítr vane, je dán světovou stranou a uvádí se převážně v desítkách stupňů azimutů, případně v meteorologii závaznými anglickými zkratkami. Lze ho sledovat pomocí větrné korouhve nebo větrného pytle.

Rozlišujeme 36 směrů větru (01, 02, 03, ..., 36). Údaj 00 označuje bezvětří, 36 severní vítr, 18 jižní vítr, 09 východní a 27 západní vítr.



Obr. 4. Větrný pytel

Rychlost větru se nejčastěji zjišťuje pomocí dvou metod. První metoda je vizuální, kdy se výsledky pozorování srovnávají s Beaufortovou stupnicí síly větru. Druhá metoda naopak využívá měřicího zařízení tzv. anemometrů, kde se otáčky rotoru přenášejí na ukazatel, příp. po elektronickém zpracování se údaje objeví na displeji. Měření ukazují, že rychlost větru se mění i během poměrně krátké doby (několika minut) [8].

Údaje o průměrné rychlosti větru mají pouze informativní charakter a nejsou pro stanovení výkonu a vyrobené energie dostatečné. Nejvhodnějším a jediným relativně objektivním způsobem je dlouhodobé měření rychlosti v krátkých časových intervalech na vybraném místě ve výšce předpokládaného středu plochy uvažovaného odběru energie.

Proudění vzduchu je většinou turbulentní, což se projevuje kolísáním rychlosti a směru větru. Výsledky měření směru a rychlosti jsou proto průměrované za určitý časový

interval, tzv. vzorkovací dobu. Zejména se jedná o běžně dostupná měření na meteorologických stanicích [6].

1.3.1 Beaufortova stupnice síly větru

Sir Francis Beaufort (1774-1857), anglický kontraadmirál, sestavil stupnici síly větru roku 1806 zejména pro námořní účely na základě jevů pozorovatelných na širém moři [2]. Za dobu svého používání Beaufortova stupnice prodělala množství změn, které reagovaly na aktuální potřeby měření síly větru. Např. v roce 1946 International Meteorological Committee rozšířil počet stupňů z původních 12 na 17 stupňů a dále je definoval rozsahem rychlosti větru měřeným ve výšce 10 metrů nad povrchem. Tím byla Beaufortova stupnice síly větru změněna na Beaufortovu stupnici rychlosti větru. Její velkou výhodou je praktičnost, představitelnost a použitelnost bez jakýchkoliv přístrojů [9].

Tabulka 1. Beaufortova stupnice rychlosti větru[9]

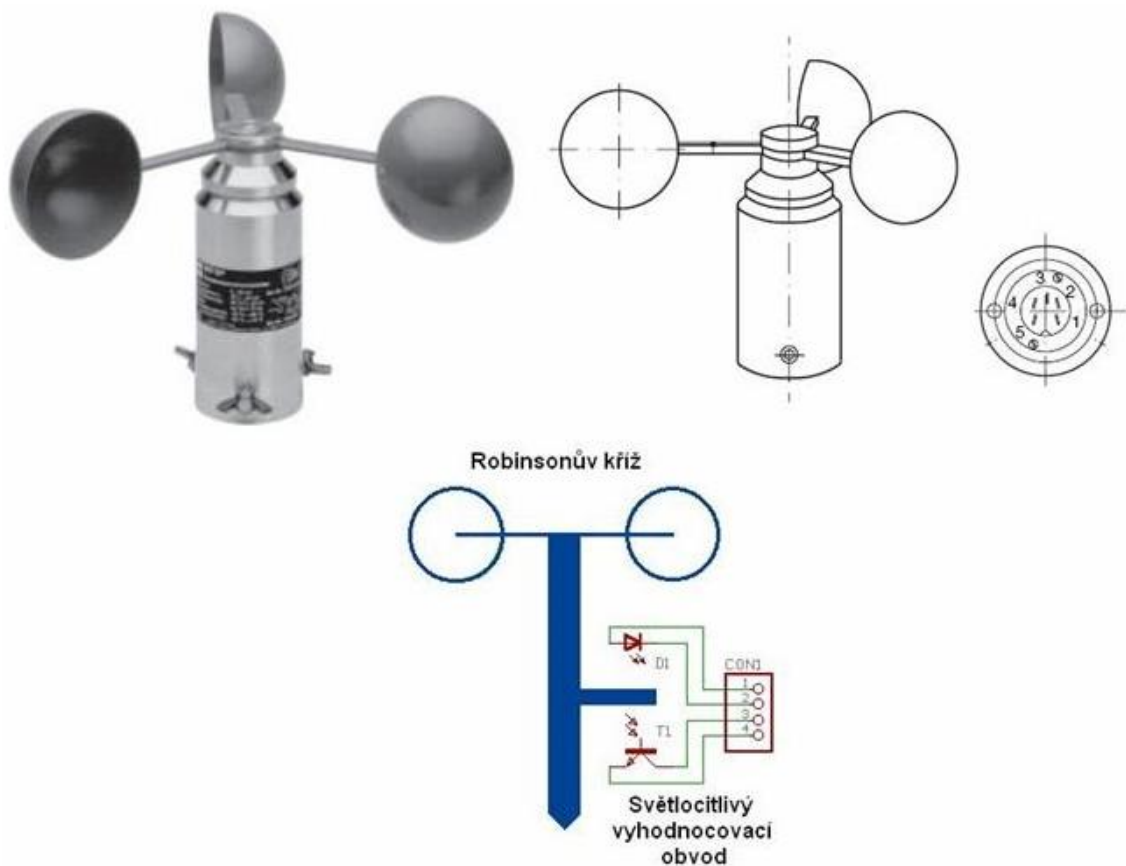
Stupeň	Vítr	Rychlost		Projevy větru na souši
		m.s^{-1}	km.h^{-1}	
0	bezvětrí	< 0,5	< 1	kouř stoupá kolmo vzhůru
1	vánek	~ 1,25	1 – 5	směr větru je poznatelný podle pohybu kouře
2	větrík	~ 3	6 – 11	listy stromů šelestí
3	slabý vítr	~ 5	12 – 19	listy stromů a větvičky jsou v trvalém pohybu
4	mírný vítr	~ 7	20 – 28	zdvihá prach a útržky papíru
5	čerstvý vítr	~ 9,5	29 – 39	listnaté keře se začínají hýbat
6	silný vítr	~ 12	40 – 49	telegrafní dráty sviští, používání deštníků je nesnadné
7	mírný vichr	~ 14,5	50 – 61	chůze proti větru je nesnadná, celé stromy se pohybují
8	čerstvý vichr	~ 17,5	62 – 74	ulamují se větve, chůze proti větru je téměř nemožná
9	silný vichr	~ 21	75 – 88	vítr strhává komíny, tašky a břidlice ze střech
10	plný vichr	~ 24,5	89 – 102	vyvrací stromy, působí škody na obydlích
11	vichřice	~ 29	103 – 114	působí rozsáhlá pustošení
12-17	orkán	> 30	> 117	ničivé účinky (odnáší střechy, hýbe těžkými

				hmotami)
--	--	--	--	----------

1.3.2 Anemometry

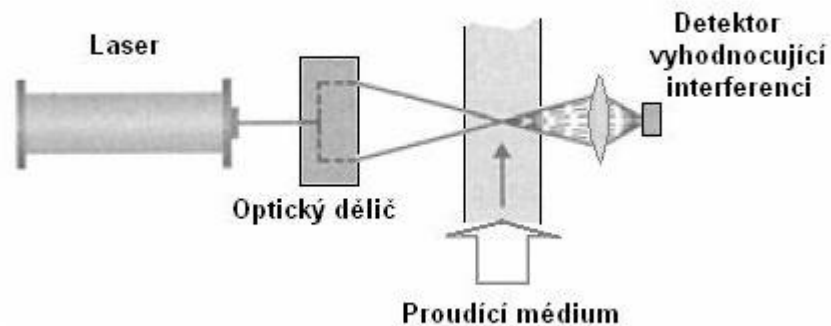
Anemometr neboli větroměr je přístroj pro měření rychlosti a směru proudění větru. Je častým příslušenstvím meteorologických stanic. První anemometr postavil v 15. století Leone Battista Alberti, italský umělecký architekt. Jeho anemometr byl ve tvaru větrné korouhvičky, na jejímž konci byla svisle upevněna otočná destička. Pokud foukal vítr, korouhvička se natočila v jeho směru a vítr (tlak vzduchu) vychýlil destičku ze svislé polohy o úhel odpovídající rychlosti větru [10].

Během let byly vypracovány další konstrukce anemometrů na různých fyzikálních principech (sonický, žárový, laserový, termický). Nejběžnější je však anemometr otáčivý, u něhož rychlost otáčení měřícího ústrojí ukazuje na stupnici anemometrického tachometru rychlost proudění vzduchu. Tyto anemometry jsou buď křídélkové nebo miskové [11].



Obr. 5. Miskový mechanický anemometr[11]

Dopplerovy anemometry jsou založeny na principu Dopplerova jevu. Jde tedy o laserové přístroje, kde se paprsek laseru opticky rozděljuje na dvě části, které mají stejnou frekvenci. V bodě měření rychlosti média dochází k jejich sbíhání. Světlo směřující po proudu média má frekvenci vyšší, zatímco světlo rozptýlené proti proudu má frekvenci nižší. Světlo z obou paprsků vzájemně interferuje a vytváří třetí frekvenci, která je přímo úměrná rychlosti kolmé na osu úhlu obou paprsků [11].



Obr. 6. Princip Dopplerova laserového anemometru[11]

Ultrazvukový anemometr je tvořen dvěma ultrazvukovými snímači sloužícími současně jako vysílací a snímací, upevněnými na koncích držáků zabudovaných v rouře. Tato roura slouží zároveň k jejich ochraně proti mechanickým poškozením. Vně roury je uchycena skříňka, ve které je umístěna elektronika a displej. Do skříňky vstupuje přes kabelovou vývodku stíněný kabel, kterým je přivedeno napájecí napětí a současně vychází analogový signál do přenosného systému. Přes kabelovou vývodku je vyveden binární signál pro světelnou nebo zvukovou signalizaci. Měřící místo je rovněž nutné vybrat tak, aby se proudění ovzduší blížilo co nejvíce laminárnímu proudění, a je nutno se vyhýbat místům, kde dochází k turbulencím nebo jiným dynamickým vlivům, majícím vliv na přesnost měření [11].



Obr. 7. Ultrazvukový anemometr[11]

Termický anemometr je zvláště vhodný pro měření nízkých rychlostí proudění. Hlavní senzor je vyhříván na konstantní teplotu a proudící vzduch jej ochlazuje, přičemž velikost tohoto ochlazení je přímo úměrná rychlosti proudění [30].



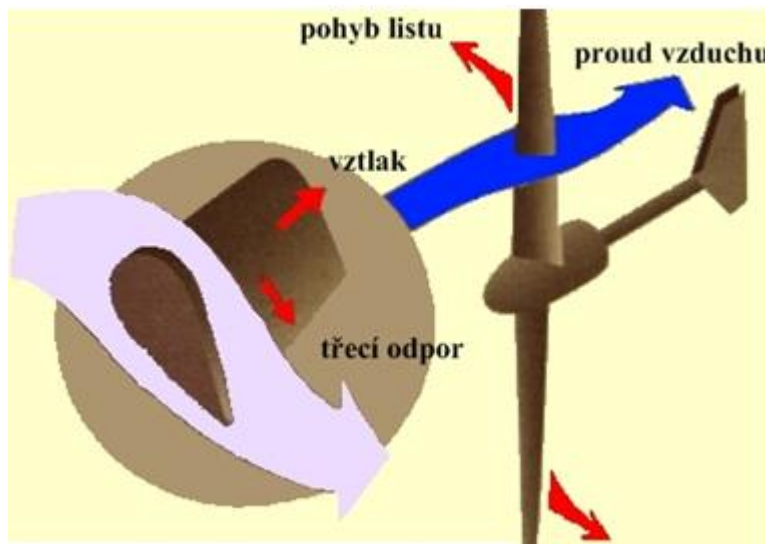
Obr. 8. Termický anemometr[30]

2 VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY

Na území České republiky se větrná energie využívala po dlouhou dobu pouze k pohonu větrných mlýnů. První doložený mlýn byl postaven v zahradě Strahovského kláštera v roce 1277. Rozkvět výstavby větrných mlýnů byl zaznamenán ve 40. až 70. letech 19. století. Počátkem 20. století se již k pohonu vodních čerpadel využívali větrné turbíny. Zvýšený zájem o využívání větrné energie pro výrobu elektřiny v České republice, tak jako v celé Evropě, se datuje v 70. letech minulého století v důsledku ropné krize.

2.1 Princip fungování větrné elektrárny

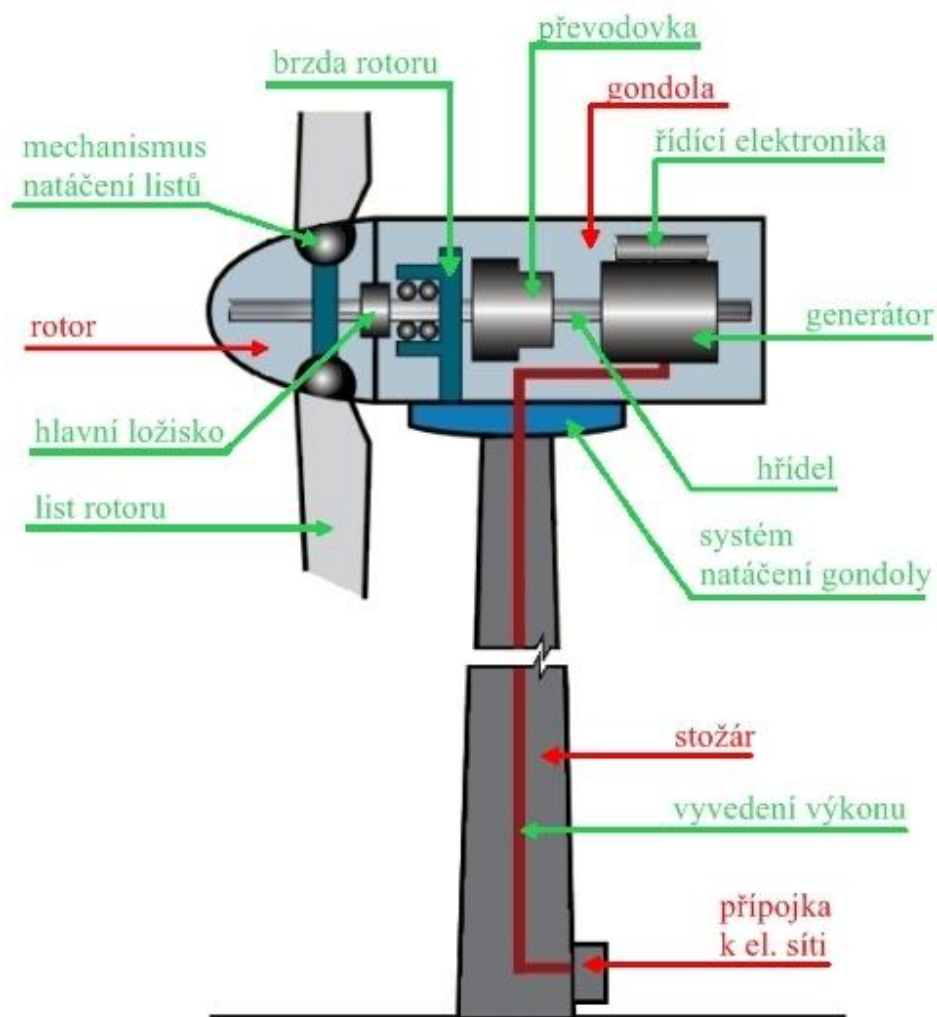
Působením aerodynamických sil na listy rotoru převádí větrná turbína, která je umístěná na stožáru, energii větru na rotační energii mechanickou. Ta je poté prostřednictvím generátoru zdrojem elektrické energie. Na podobném principu turbogenerátoru pracuje jak klasická, tak vodní či jaderná elektrárna. Podél rotorových listů vznikají aerodynamické síly. Z toho důvodu musejí mít listy speciálně tvarovaný profil, velmi podobný profilu křídel letadla [12].



Obr. 9. Schéma působení síly proudu vzduchu
na lopatku turbíny[12]

Větrné elektrárny s vyšším výkonem a s horizontální osou rotace se zpravidla skládají z těchto základních částí:

- Rotor
- Gondola
- Stožár
- Přípojka k elektrické síti



Obr. 10. Základní části větrných elektráren[13]

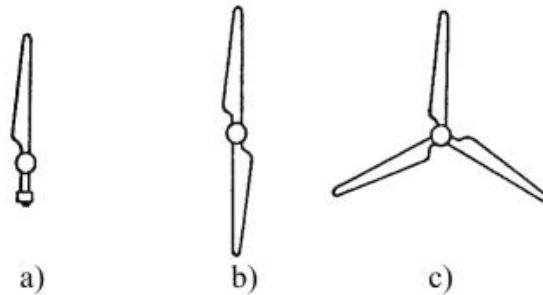
2.1.1 Rotor

V praxi se vyskytují čtyři typy rotorů podle osy rotace.

- **Vrtule**

Je rychloběžný typ větrného rotoru s horizontální osou rotace. Je to technické zařízení, které slouží buď k přeměně energie rotačního pohybu na tah (letadla), nebo naopak tah

na rotační pohyb (výroba energie). Většinou je tvořena dvěma nebo třemi listy uchycenými na rotoru. Listy jsou vyrobené ze sklolaminátu a jsou zkonstruovány tak, aby jejich optimální tvar umožňoval efektivní přenášení síly větru na rotor s největší dosažitelnou účinností 40% až 45%. Průměr listů rotoru se pohybuje od 25 m do 150 m[13].

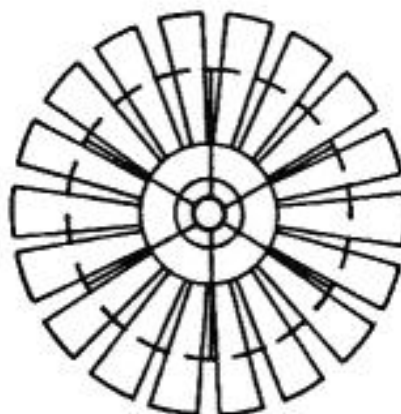


Obr. 11. Schéma provedení vrtulí:

a) jednolistá, b) dvoulistá, c) třílistá

- **Lopátkové kolo**

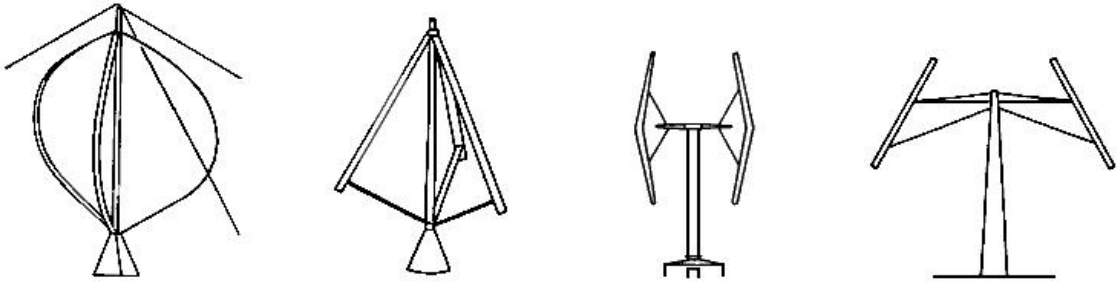
Je pomaloběžný typ větrného rotoru s horizontální osou rotace. Počet lopatek bývá 12 nebo 24, což způsobuje, že se rotor začne otáčet už při nízkých rychlostech větru (2 m/s až 7 m/s). Běžný průměr lopátkového kola je 5 až 8 m a jeho účinnost se pohybuje v rozmezí 20% až 43%. Používá se pro pohon vodních čerpadel a pro výrobu elektrického proudu pro vlastní spotřebu. Nevýhodou je poměrně těžký rotor, z toho důvodu, že jeho nosným prvkem je ocelový rám [13].



Obr. 12. Lopátkové kolo[13]

- **Darrieův rotor**

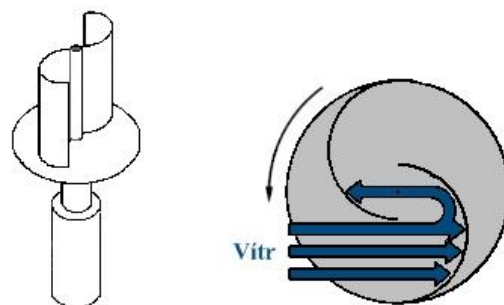
Byl patentován v roce 1931. Jedná se o rychloběžný typ rotoru skládající se ze dvou či více křídel, které rotují kolem vertikální osy. Křídla mohou v průběhu rotace vytvářet válcovou, kuželovou, kulovou nebo parabolickou plochu. Účinnost Darrieova rotoru je až 38% a používá se pro výrobu stejnosměrného i střídavého proudu. Nevýhodou je špatná schopnost rozběhu [13].



Obr. 13. Různé podoby Darrieova rotoru se svislou osou rotace[13]

- **Savoniův rotor**

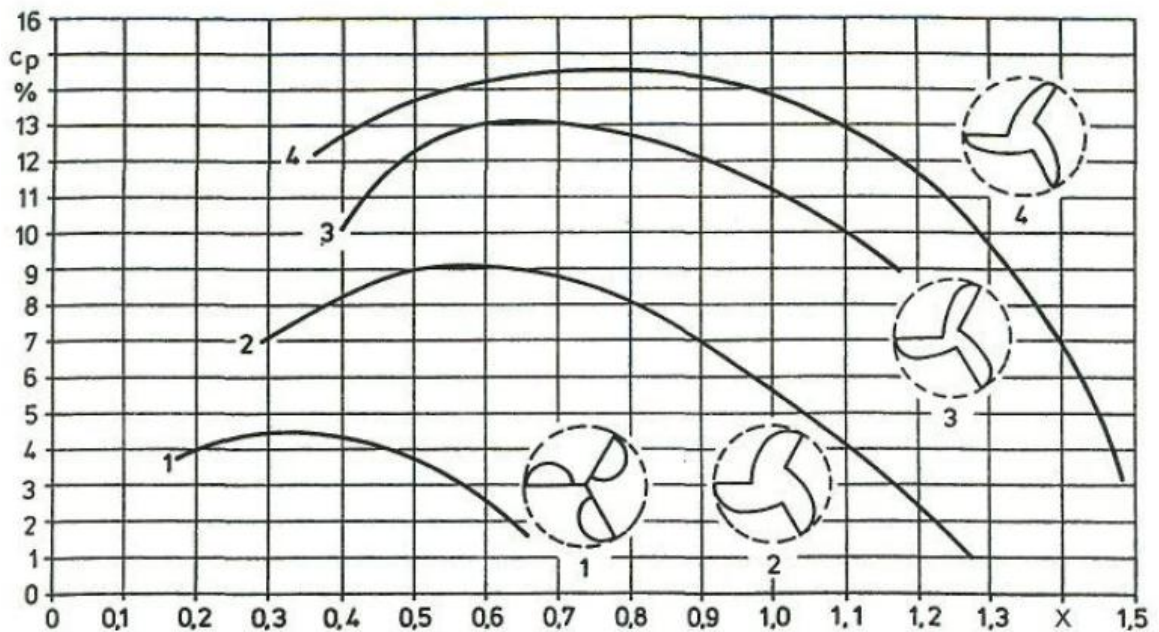
Byl patentován v roce 1929. Patří mezi pomaloběžné větrné rotory s vertikální osou rotace. Je tvořen dvěma plochami ve tvaru půlválců, které jsou navzájem přesazeny. Rotor pracuje na tlakovém principu, využívající rozdíl tlaků působících na vypouklou a dutou stranu půlkruhových lopatek. Maximální účinnost Savoniova rotoru je 23%. Používá se pro výrobu proudu a k čerpání vody. Výhodou jsou dobré rozběhové vlastnosti, jednoduchost a levnost výroby. U dvoustupňového Savoniova rotoru má procházející hřídel důležitou funkci neboť přenáší nejen točivý moment z lopatek na pracovní stroj, nýbrž musí také přijímat ohýbací síly vyvolané tlakem větru a nevyvážeností. Konstrukční výška rotorů vyráběných svépomocí by neměla přesáhnout 2,5 až 3 m [13].



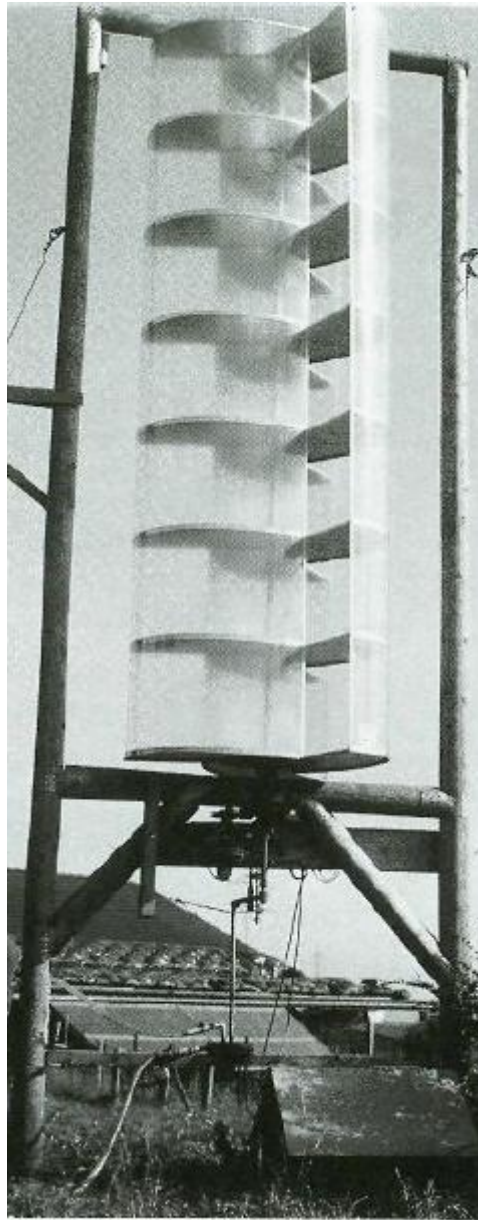
Obr. 14. Schéma Savoniova rotoru[13]

- **Průtažný rotor**

Nový typ rotoru, který je samonosný, tuhý v ohybu a konstruovaný jako prostorový nosník. Dovoluje nám dosáhnout výšky až 6 m. Průtažný rotor je jednostupňový třílopatkový. Svislé lopatky jsou vyrobeny z ohebného materiálu (např. polyester zpevněný skelným vláknem, lodní překližka nebo plech) a tvoří s vodorovnými segmenty konstrukční jednotku podobnou lodnímu trupu nebo křídlu letadla. Jednotlivé části jsou tudíž namáhány jen v tlaku a tahu, nikoliv v ohybu. První prototyp průtažného rotoru je v provozu od roku 1981. V rámci výzkumu bylo zjištěno, že tvar lopatek má velmi výrazný vliv na součinitel využití energie větru [29].



Obr. 15. Závislost součinitele využití energie větru C_p a součinitele rychloběžnosti X na tvaru lopatek[29]



Obr. 16. Průtažný rotor[29]

Součástí rotorů je i systém regulace vrtule, který má za úkol udržovat požadované otáčky, případně vrtuli zabrzdit. Rozlišují se systémy s pevnou vrtulí, vybavené aerodynamickou brzdou, která se vychýlí v případě vysokých otáček rotoru a systémy s nastavitelnou vrtulí, kde je brzdného efektu dosaženo pomocí mechanismu natáčení listů a to tak, že dojde ke změně úhlu jejich nastavení.

Pro zabrzdění rotoru je určena speciální kotoučová brzda, která musí být schopna zastavit rotor a to i při maximálních možných rychlostech větru. U elektráren malých a středních

výkonů je proces brzdění řízen jednoduchým odstředivým regulátorem. Vlastní ovládání brzd může být elektrické, hydraulické a mechanické.

2.1.2 Gondola

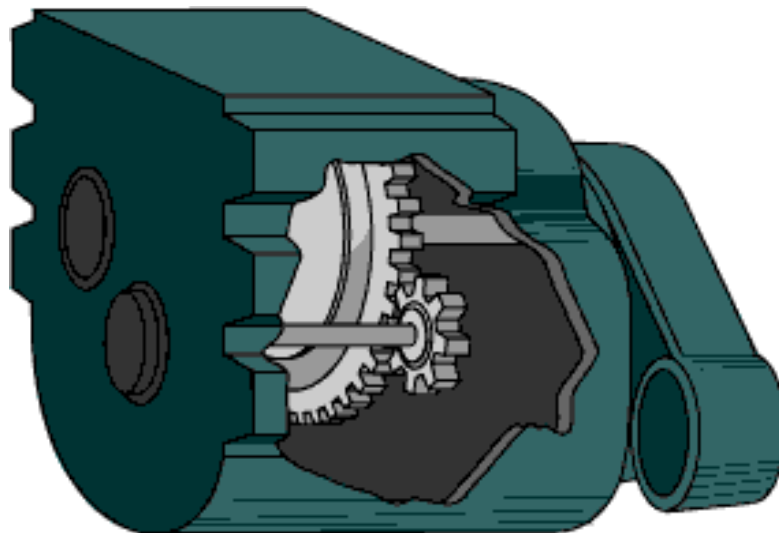
Je „hlava“ větrné elektrárny umístěná na vrcholu stožáru, ve které je uložena celá strojová část elektrárny [13].

- **Hřídel**

Je polodlouhá rotační součást zařízení, která slouží k přenosu krouticího momentu. Jsou na ní připevněny další součásti, které se spolu s hřídelí otáčejí kolem její osy. Sama hřídel je upevněna pomocí jednoho nebo několika ložisek [13].

- **Převodovka**

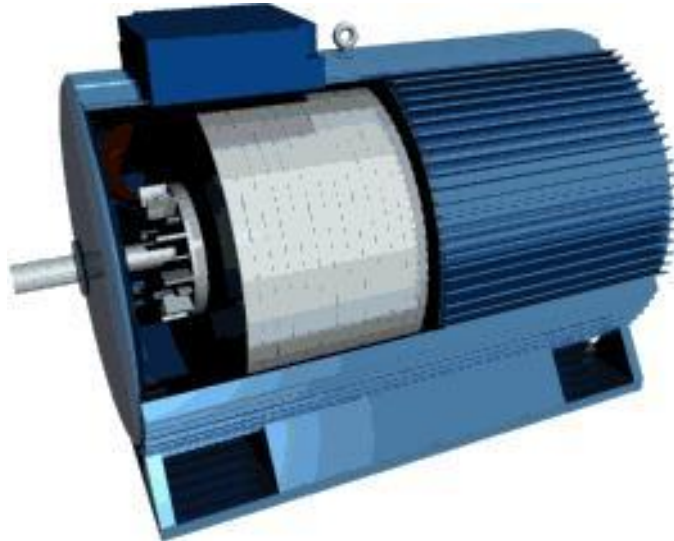
Slouží k přizpůsobení rychlosti otáček potřebám elektrického generátoru. V současnosti se používají speciální několikastupňové převodovky, na jejichž těleso je obvykle připojena brzda. Z důvodů velké životnosti, nízké hlučnosti a vysoké těsnosti jsou požadavky na kvalitu převodových ústrojí velmi vysoké [13].



Obr. 17. Převodovka větrné turbíny[13]

- **Generátor**

Slouží k přeměně mechanické energie větru na energii elektrickou. Obvykle se používají třífázové generátory s frekvencí 50 Hz a s napětím 700 V [13].



Obr. 18. Generátor větrné turbíny[13]

Generátory využívané ve větrných elektrárnách je možné rozdělit na stejnosměrné, synchronní a asynchronní.

Stejnoseměrné generátory jsou vhodné pro malé větrné elektrárny, pro dobíjení akumulátorů.

Synchronní generátory (alternátory) jsou vhodné pro střední a velké větrné elektrárny. Jejich výhodou je velká účinnost a schopnost pracovat s velkým rozsahem rychlostí větru. Používají se jako záložní zdroje elektrické energie v případě přerušení dodávky energie z rozvodné sítě.

Asynchronní generátory jsou rovněž vhodné pro střední a velké větrné elektrárny, ale oproti synchronním generátorům mají levnější konstrukci a velmi snadné připojení k síti, kdy nevyžadují složitý připojovací systém. Ten pouze hlídá otáčky a rozhoduje o okamžiku připojení k síti [13].

- **Pomocná zařízení**

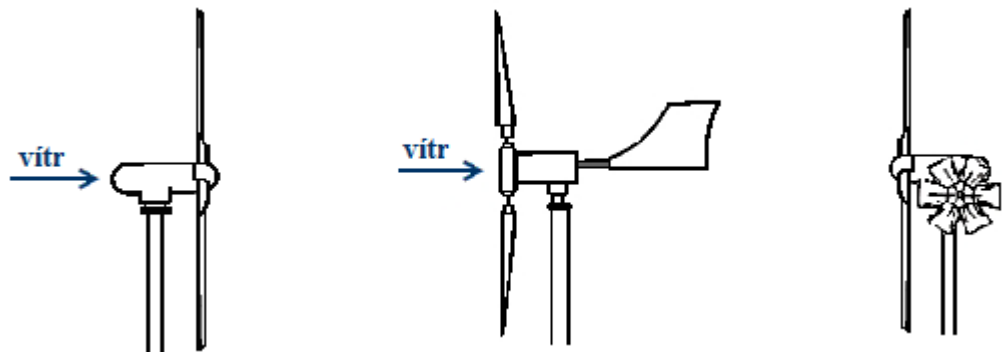
Mezi pomocná zařízení se obvykle řadí ovládací a kontrolní systémy, systémy natáčení do směru větru a anemometry pro měření směru a rychlosti větru[13].

Ovládací a kontrolní systém (řídící elektronika) lze rozdělit na část technickou, tvořenou řídícím počítačem a ovládacími prvky a část programovou, kam patří speciálně vyvinutý balík programů, určený ke sledování a ovládání jednotlivých částí větrné elektrárny a režimů jejich činnosti. Na řídícím panelu lze snadno sledovat údaje ze soustavy čidel umístěných na jednotlivých částech elektrárny. Tato čidla sledují například vznik nadměrných vibrací způsobených námrazou nebo poškozením rotoru, teplotu ložisek, otáčky rotoru, vychýlení brzd, okamžitý výkon generátoru atd. Jednoduše lze říci, že ovládací a kontrolní systém kontroluje údaje o chodu celého zařízení a chrání jej před poškozením [13].

Systém natáčení strojovny do směru větru slouží k dosažení co největšího výkonu. K zajištění správné orientace rotoru vzhledem ke směru větru se standardně používá některý z uvedených způsobů:

1. Umístění rotoru na závětrné straně gondoly – výsledná aerodynamická síla, působící na rotor vyvolává moment síly, který rotor natáčí kolmo na směr větru. Tento způsob se používá pouze u menších rychloběžných větrných elektráren s výkony do několika desítek kilowattů.
2. Ocasní plocha (kormidlo) – gondola větrné elektrárny je opatřena plochou, specifického tvaru a velikosti, pevně spojenou s rámem gondoly. Při změně směru větru dojde ke vzniku točivého momentu, který nastaví větrnou elektrárnu do požadovaného směru. Uvedený způsob se využívá zejména u malých větrných elektráren o výkonu do 5 kW [13].
3. Boční pomocné rotory – jsou tvořeny dvojicí lopatkových kol, které se při změně směru větru roztočí a natočí strojovnu do požadované polohy. Nevýhodou je složitá konstrukce.
4. Systém natáčení gondoly – jde o servomotor řízený regulačním systémem elektrárny napojený na anemometr a snímač směru větru. Princip spočívá v tom, že vyhodnocovací člen sleduje okamžitý směr a rychlost větru a předá signál do elektromotoru, který natočí strojovnu do požadovaného směru. Výhodou je přesné a pozvolné natočení. Tento způsob se používá převážně u větrných

elektráren velkých výkonů připojených k síti [13]. Nevýhodou je vysoká pořizovací cena.



Obr. 19. Systémy natáčení rotoru (a) uspořádání rotoru za gondolou se samočinnou orientací rotoru, (b) uspořádání rotoru před gondolou s orientací rotoru pomocí kormidla, (c) uspořádání rotoru před gondolou s orientací rotoru pomocí bočních pomocných rotorů[13]

2.1.3 Stožár

Je hlavní částí nosného systému větrné elektrárny. Rotor spolu s gondolou jsou na stožáru namontované tak, aby se mohly otáčet okolo vertikální osy do směru větru.

Konstrukce velmi úzce souvisí s velikostí a typem větrné elektrárny. Obecně se dá říci, že se zvětšováním výkonu turbín se zvyšují stožáry, a to v současné době na 100 až 120 m. Při návrhu jakéhokoliv stožáru je nutno řešit problém vlastní frekvence celého systému, která nesmí být v oblasti vlastních otáčkových frekvencí, protože by hrozilo rozkmitání konstrukce a nebezpečí jejího porušení. Pro dosažení co největší pevnosti a nejmenšího odporu jsou konstruovány tzv. stožáry trubkové, které jsou vyrobené z oceli nebo betonu. U menších elektráren se můžeme setkat jen s trubkou ukotvenou lany [13].

2.1.4 Přípojka k elektrické síti

Je z hlediska efektivnosti provozu větrné elektrárny velmi důležitá a může rozhodujícím způsobem ovlivnit návratnost investovaných prostředků. Jde o část větrné elektrárny, která rozhoduje o okamžiku připojení generátoru k síti, popřípadě o jeho odpojení. Postup připojení generátoru k síti se liší podle typu generátoru [13].

2.2 Rozdělení větrných elektráren

Větrné elektrárny se dělí podle mnoha kritérií, mezi které patří aerodynamický princip, typ generátoru, výkon a mnoho dalších.

2.2.1 Podle aerodynamického principu

Tento princip má pro činnost elektráren největší význam a podle něj dělíme větrné elektrárny pracující na principu vztlakovém nebo odporovém.

- **Vztlakový princip**

Mezi větrné elektrárny pracující na vztlakovém principu patří elektrárny jak s horizontální osou rotace (vrtule, lopatková kola), tak i s osou vertikální (typ Darrieus). U vrtulí a lopatkových kol většinou platí, že při stejném průměru rotoru dochází k nepřímé závislosti počtu listů a frekvence otáčení. Moderní elektrárny mají obvykle tři listy, byly však vyvinuty i typy s jedním nebo dvěma listy [14].

- **Odporový princip**

Tyto elektrárny patří mezi nejstarší a mohou mít horizontální i vertikální osu otáčení (typ Savonius). Jejich podstatou je, že plocha nastavená proti větru klade aerodynamický odpor, zpomaluje proud vzduchu a je na ní vyvozována síla, která je mechanicky přeměňována na rotační pohyb. Výhodou elektráren se svislou osou je, že mohou dosahovat vyšší rychlosti otáčení a tím i vyšší účinnosti, není je třeba natáčet do směru převládajícího větru. V praxi se však příliš neuplatnily, neboť u nich dochází k mnohem vyššímu dynamickému namáhání, které značně snižuje jejich životnost [14].

2.2.2 Podle výkonu

Nejčastěji rozdělujeme elektrárny podle jejich výkonu na mikroelektrárny, malé, středně velké a velké větrné elektrárny.

- **Mikroelektrárny**

Jsou vhodné pro osobní použití nebo malé firmy. Jsou vhodnou alternativou k slunečním článkům v místech, kde je dost větrno a naopak méně svítí slunce. Neslouží k dodávání energie do sítě. Jejich výkon se pohybuje v rozsahu 1W až cca 1kW. Na svém výstupu dávají napětí 12V až 24V. Mikroelektrárny s malými výkony (cca 100 W) tak mohou například napájet osvětlení reklamních panelů podél dálnic, aktivní inteligentní dopravní

značky, měřiče teploty, hodiny apod. Jejich skládací verze mohou sloužit v přírodě jako mobilní nabíječe akumulátoru, k napájení světel, vařiče, vysílačky, počítače nebo televizoru. Mikroelektrárny, které dosahují výkonů až několik jednotek kW, již mají pevnou instalaci a mohou napájet domácí spotřebiče (např. v rekreační chatě)[15].



Obr. 20. Mikroelektrárna[31]

- **Malé větrné elektrárny**

Poskytují výkony do cca 15kW, které již dostačují na spotřebu velké chaty nebo běžného rodinného domku. Na svém výstupu dosahují napětí 230 až 400V [15].

Výkon od 1kW již plně dostačuje na čerpání vody ze studně a její rozvod do kohoutků objektu. Konstrukce malých větrných elektráren se mohou z pohledu lišit podle jejich výkonu. Zatímco elektrárny s výkonem okolo 1 až 5 kW mohou připomínat svou konstrukcí mikroelektrárny, tak výkony nad 10kW naopak připomínají zmenšeniny středních či velkých elektráren. Mají již gondolu vybavenou převodovkou, brzdou a generátorem. Vše je pak připevněno na sloupu, kterým vedou výkonové a signálové kabely [14].



Obr. 21. Malé větrné elektrárny [32]

- **Středně velké a velké větrné elektrárny**

Jsou určeny k dodávce energie do veřejné rozvodné elektrické sítě. Jejich výkon se pohybuje cca od 300 až do 3000 kW. Většina těchto elektráren má konstantní otáčky, které se regulují natáčením listů rotoru a proměnným převodovým poměrem převodovky. Mohou mít i proměnné otáčky podle okamžité rychlosti větru. V praxi se používají většinou větrné elektrárny s horizontální osou rotace. Struktura střední a velké větrné elektrárny je velmi podobná. Rozdíl je často jen ve velikosti a dimenzování mechanických částí a v provedení gondoly a samotné věže. Velké elektrárny mají dutý tubus se schody či výtahem a velkou strojovnu [14].

Popis částí velké větrné elektrárny: viz obr. 22

1-rotor s rotorovou hlavici a listy

3-planetová převodovka

5-generátor

7-brzda točny strojovny

9-čidla rychlosti a směru větru

11-betonový armovaný základ elektrárny

13-elektrická přípojka

2-brzda rotoru

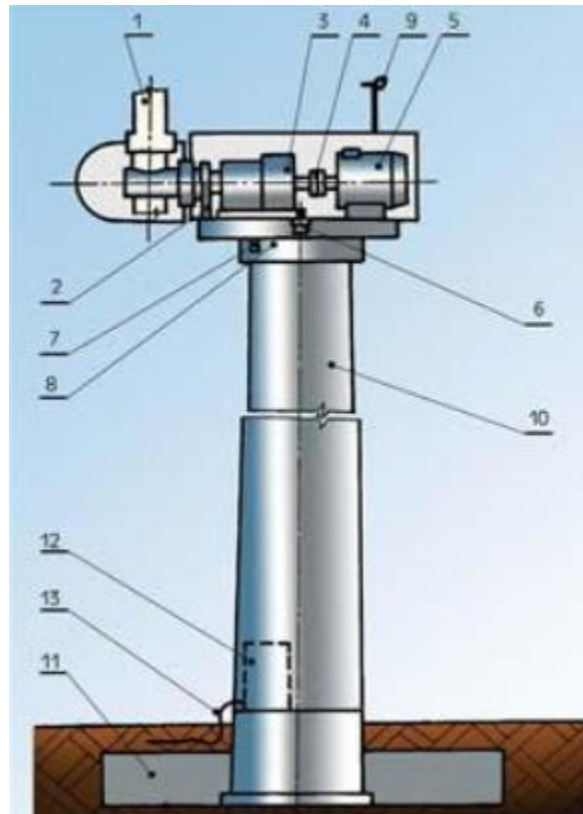
4-spojka

6-servo-pohon natáčecí strojovny

8-ložisko točny strojovny

10-několikadílná věž elektrárny

12-elektrozvaděče silnoprúdeho a řídicího obvodu



Obr. 22. Struktura velké větrné elektrárny[14]

Velké elektrárny mají průměr rotoru až 80 m a věž o výšce více než 80 metrů. K zefektivnění provozu a snížení nákladů na projektování a výstavbu se velké větrné elektrárny sdružují do skupin (obvykle 5 až 30 elektráren) tzv. větrných farem[14].



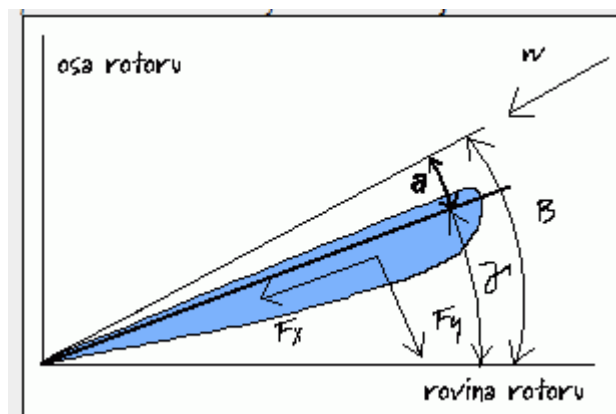
Obr. 23. Větrná farma[14]

2.3 Aerodynamika profilu lopatek

U větrných chrotorů je základním a nejdůležitějším prvkem vrtulový list (lopatka). Tento list můžeme brát jako rotující křídlo, tudíž celá aerodynamika je podobná letecké.

Osa rotoru je zároveň hřídel, na které se rotor otáčí. Vítr dopadá na lopatku pod určitým úhlem, který svírá vektor větru a tětiva profilu. Vítr fouká v rovnoběžném směru s osou rotoru, ten se zároveň otáčí kolem osy, tudíž dochází ke skládání vektorů rychlosti. Tětiva profilu je pomyslná přímka mezi odtokovou a náběžnou hranou lopatky.

Na vypouklé straně profilu vzniká podtlak, dochází ke zhušťování proudnic a zvyšování rychlosti. Na opačné straně profilu vzniká přetlak a rychlost proudění klesá. Vzniklý podtlak je asi dvakrát větší než vzniklý přetlak. Z toho lze vyvodit, že vypouklejší strana profilu se podílí na vzniku síly F_y více [33].



Obr. 24. Rozložení sil a úhlů působících na profil lopatky[33]

Síly působící na profilu:

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

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

F_x je odporová složka síly [N]

F_y je vztlaková složka síly [N]

- S je plocha křídla [m^2]
 ρ je hustota vzduchu [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
 v je rychlost skutečného proudu vzduchu (vektorový součet rychlosti větru a rychlosti otáčení) [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
 C_x je součinitel odporu
 C_y je součinitel vztlaku

Při návrhu profilu lopatky se snažíme dosáhnout co největší vztlakové síly a co nejmenší síly odporové, tudíž co největší hodnoty C_y/C_x . Hodnoty součinitelů odporu a vztlaku jsou závislé na volbě profilu, délce tětiny, rychlosti vzduchu a hlavně na úhlu náběhu α [33].

Jednotlivé aerodynamické profily se hodí na odlišné podmínky využití, tudíž při měření je nutno uvádět tzv. Reynoldsovo číslo, které právě vystihuje tyto vlastnosti profilů.

$$Re = \frac{v \cdot l}{\nu} \quad (5)$$

- v je rychlost obtékání profily (skutečná rychlost vzduchu na profilu) [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
 l je délka tětiny [m]
 ν je kinematická viskozita [$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$][33]

Obecně platí, že čím je větší Reynoldsovo číslo tím se dosahuje většího poměru C_y/C_x . Takže malé větrné elektrárny nikdy nemohou dosáhnout takové účinnosti jako velké větrné elektrárny, což je dáno i větší délkou tětiny profilu, ovšem zároveň platí, že čím je Reynoldsovo číslo větší tím přesnější musí být tvar profilu a čistota provedení lopatek.

Správný návrh profilu lopatky má vliv nejen na výkon větrné elektrárny, ale i na rozběh při malých rychlostech větru [33].

2.4 Výpočet větrné elektrárny

Výkon větrné elektrárny vypočítáme ze vztahu:

$$P = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot S \cdot \rho \cdot v^3 \quad (6)$$

P je výkon vrtule [W]

C_p je součinitel výkonu (účinnost) [0-0,5]

S je plocha rotoru

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

v je rychlost větru [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] [33]

Rychloběžnost je poměr mezi obvodovou rychlostí konce lopatky a rychlostí větru. Podle součinitele rychloběžnosti dělíme elektrárny na rychloběžné a pomaloběžné. Optimální součinitelé rychloběžnosti jsou:

Holandský větrný mlýn	2,1
Americký mnoholistový rotor	0,9
Rotor Darrieus	4,5
Moderní dvoulistový rotor	6

Otáčky rotoru můžeme vypočítat, pokud známe rychloběžnost, rychlost větru a průměr rotoru.

$$n = \frac{60 \cdot \lambda \cdot v}{\pi \cdot D} \quad (7)$$

n otáčky rotoru [min^{-1}]

λ součinitel rychloběžnosti

D průměr rotoru [m]

Součinitel výkonu je dán vztahem:

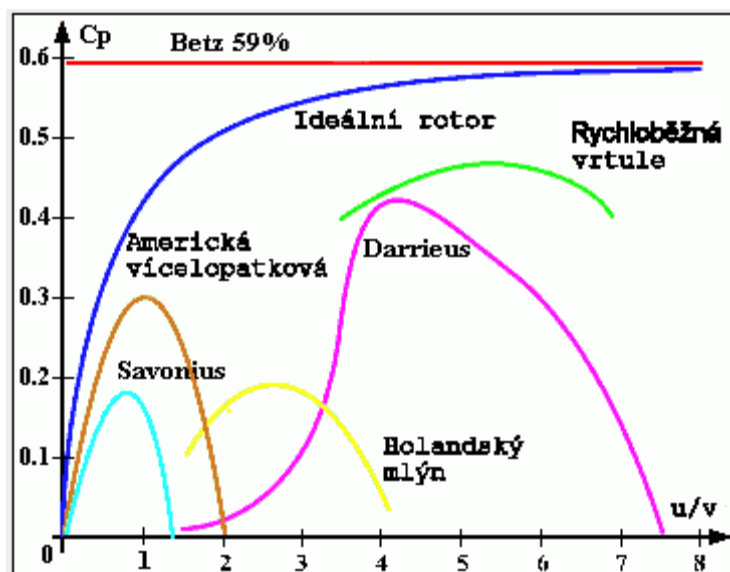
$$C_p = \frac{2 \cdot P}{\rho \cdot S \cdot v^3} \quad (8)$$

P je výkon získaný rotorem [W]

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

S je plocha v průmětu rotoru [m^2]

ρ je hustota vzduchu [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] [33]



Obr. 25. Závislost mezi typem větrné elektrárny, rychloběžností a součinitelem výkonu[33]

Albert Betz v roce 1919 odvodil teoreticky maximální dosažitelnou účinnost větrné elektrárny, které lze dosáhnout. Z pohybujícího se vzduchu se nemůže odebrat veškerá energie, kdyby se tak stalo, tak by se vzduch za rotorem zastavil a začal se hromadit, z toho důvodu je teoretická účinnost přibližně 59% (0,59).

Ideální rotor by musel mít nekonečný počet lopatek, které nemají tření se vzduchem a pohybují se s nekonečně velkou rychlostí [33].

Tabulka 2. Hodnoty rychloběžnosti a součinitele výkonu v závislosti na typu rotoru[33]

Typ	$C_{P_{opt}}$	λ_{opt}	λ_{max}
Mnoholopátkový rotor (americký)	0,35	1,1	2,0
Třilistý rotor	0,18 až 0,39	2,5 až 6	
Dvoulistý rotor	0,20 až 0,48	6 až 10	
Savonius, dělený	0,23	0,85	1,8
Rotor Darrieus třilistý	0,362	4,66	6,76
Rotor Darrieus jednolistý	0,236	6,1	10,0
Miskový kříž	0,019 5	0,14	0,31

2.5 Účinnost větrné elektrárny

Přeměna kinetické energie větru na energii mechanickou může proběhnout jen v omezené míře, limitované kinetickou energií proudu vystupujícího z motoru.

Celková účinnost větrné elektrárny se podle druhu generátoru pohybuje v rozmezí 15-45%. Nevýhodou je, že větrné elektrárny vyžadují značnou jednorázovou investici s dlouhou dobou návratu, naopak ihned po uvedení do provozu jsou schopné plného výkonu a doba jejich výstavby je velice krátká. V chladnější části roku (listopad-duben) vyprodukují asi 2/3 z celoročního úhrnu energie, pokud si ovšem klimatické podmínky nevynutí jejich odstavení. Náklady na 1kWh klesají se zvyšováním výkonu elektrárny. Optimální výkon se pohybuje v rozmezí 300-500kW[16].

Tabulka 3. Vliv rychlosti větru na součinitel využití, průměrný výkon za rok a výrobní náklady na 1kWh[16]

Rychlost větru (c_s)	4	5	6	7	8
	(m/s)				
Součinitel využití (K)	0,89	0,159	0,237	0,308	0,365
Průměrný výkon za rok (P_{CR}), (kWh/kW.rok)	788,4	1 400	2 080	2 700	3 200
Výrobní náklady (Kč) na 1 kWh	4,5	2,5	1,7	1,3	1,1

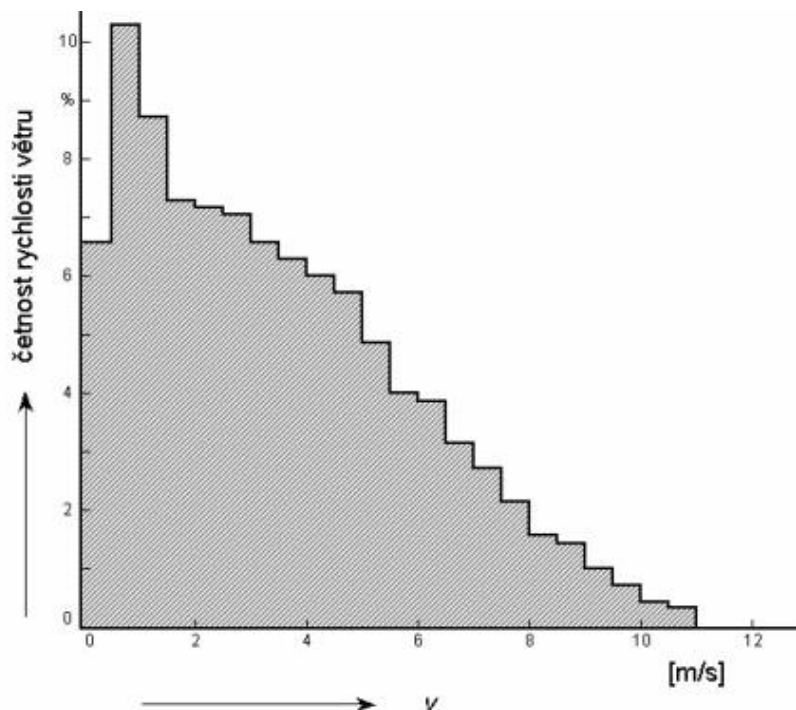
Tabulka 4. Průměrná roční výroba elektrického proudu u malých elektráren[16]

Průměr rotoru (m)	Výkon (W) při rychlosti větru 10 m/s	Očekávaný přínos (kWh/rok) při rychlosti větru (m/s)				
		4	5	6	7	8
1,5	150	274	426	576	710	820
1,7	250	305	527	747	944	1 107
2,2	500	581	977	1 421	1 854	1 240
2,4	700	670	1 420	2 290	3 110	3 800
3,0	900	1 430	2 048	2 597	3 040	3 387

2.6 Kritéria výběru lokalit

Nejpodstatnější vliv na množství vyrobené energie má volba lokality pro umístění větrné elektrárny. Moderní elektrárny mají rozběhovou rychlost kolem 4 m/s, ale pro posun z rozběhové do výrobní části výkonové křivky je potřeba rychlosti vyšší a to minimálně 5 m/s. K výběru konkrétní lokality je nejvhodnější stanovení distribuční charakteristiky rychlosti větru. Ideální je alespoň roční měření (minimálně však 6 měsíců) porovnané s dlouhodobými údaji na blízkých meteorologických stanicích [6].

Výsledky měření se zpracovávají tabelárně do sloupcových grafů, kde na vodorovné ose jsou vynášeny měřené rychlosti větru a na svislé ose jejich četnost v hodinách nebo v procentech za rok [17].



Obr. 26. Distribuční charakteristika rychlosti větru[6]

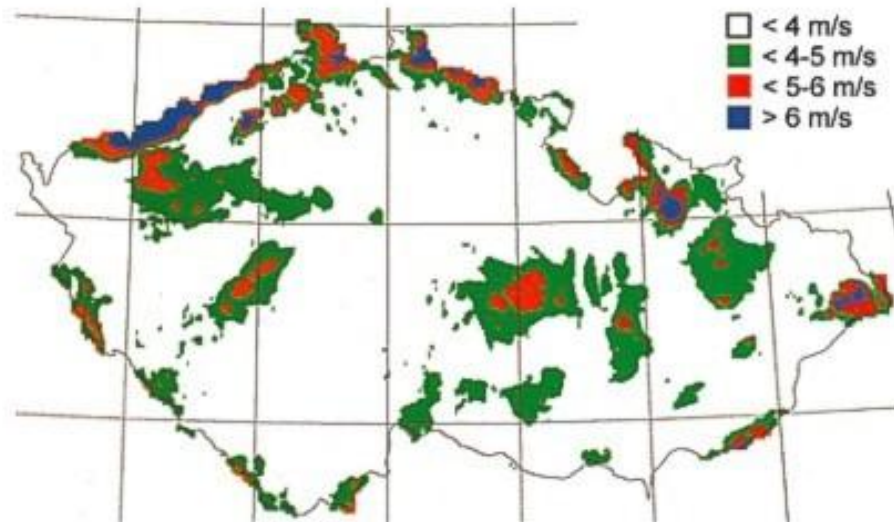
Výběr vhodných lokalit pro větrné elektrárny se podřizuje základním požadavkům, které rozdělujeme do tří skupin hlediska technická, ekologická a ekonomická.

2.6.1 Technická hlediska

- **Dostatečná rychlost a četnost větru**

Minimální průměrná roční rychlost větru měřená v 10 m nad povrchem musí být vyšší než 5 m/s (90km/h)[6].

Česká republika vzhledem ke své vnitrozemské poloze nemá příliš mnoho vhodných lokalit k výstavbě většího počtu větrných elektráren. Ústav fyziky atmosféry Akademie věd sestavil tzv. větrnou mapu České republiky, kde pomocí přesného měření zaznamenal průměrnou sílu větru i jeho směr a pravidelnost větrného proudění[2].



Obr. 27. Větrná mapa České republiky[2]

- **Nepřítomnost překážek**

Vítr ve vybrané lokalitě musí být pokud možno stálý, bez velkých rychlostních výkyvů a turbulencí. Lokalita nesmí být zalesněná (nejlépe bez porostů), nebo s překážkami bránícími laminárnímu proudění větru (stromy, stavby, budovy) [6].

Tabulka 5. Vliv krajiny na výrobu elektrické energie [6]

Třída terénu	Typ krajiny	Relativní energetický koeficient	Roční produkce elektřiny (MWh) ve výši (m)		
			12	18	24
0	Vodní plocha	10	162	173	180
1	Plochá krajina bez budov, řídká vegetace	7	104	121	132
2	Venkov, domky vzdálené od sebe 1 km	5	75	92	105
3	Les, krajina se zástavbou	3	34	50	63

- **Nadmořská výška**

V řidším vzduchu je rychlost proudění větru vyšší [2]. Minimální nadmořská výška lokality pro výpočet je 500 m.n.m. [6].

- **Dostupnost lokality**

Lokalita musí být dostupná pro těžké mechanismy nejlépe po zpevněné komunikaci, které jsou důležité pro výstavbu a montáž, nebo musí být vhodná pro vybudování potřebné zpevněné komunikace [2].

- **Vzdálenost od přípojky vysokého napětí**

Přijatelná vzdálenost od přípojky s dostatečnou kapacitou, což je nezbytné k tomu, aby elektřina získaná z jednotlivých větrníků byla dodávána do veřejné sítě [2].

2.6.2 Ekologická hlediska

- **Dostatečná vzdálenost od obydlí**

Je důležitým kritériem pro výstavbu elektráren z toho důvodu, aby mohlo být minimalizováno rušení obyvatel hlukem. Při činnosti větrných elektráren vznikají dva druhy hluků. Jedním je mechanický a druhým aerodynamický hluk. Zdrojem mechanického hluku je samotná činnost strojovny zařízení, která se dá do značné míry omezit konstrukčními úpravami. Aerodynamický hluk vzniká při obtékání listů vrtule, gondoly a dřívku stavby proudícím vzduchem a je zdrojem infrazvuků [2].

Podle hygienických předpisů je nejvyšší přípustná hladina hluku ve venkovním prostoru na obytném území ve dne 50dB a v noci 40dB (většinou splněno při vzdálenosti 200 m od obydlí) [6].

Tabulka 6. Hlučnost větrných elektráren [6]

Vzdálenost od větrné elektrárny (m)	Hlučnost (dB)
150	45,3
200	42,9
300	39,4
400	36,9

- **Míra zásahu do krajinného rázu a do okolní přírody**

Výstavba nesmí nijak nevhodně zasahovat do okolní přírody (zátěž při výstavbě, budování přípojky, umístění v CHKO) a nesmí mít přímý vliv na podmínky života rostlin a živočichů.

2.6.3 Ekonomická hlediska

- **Majetkoprávní vztahy**

Při stavbě větrných elektráren je důležité zabývat se i cenou pozemků pro umístění větrného zařízení, řešením majetkoprávních vztahů ohledně pozemku, postojem místních úřadů a možnostem vlastnictví či dlouhodobého pronájmu [6].

- **Náklady**

Do výroby je třeba zahrnout náklady na vybudování elektrické přípojky, na dopravu a instalaci větrného zařízení, projekční náklady, náklady pro zajištění bezpečnosti provozu a mnoho dalších [6].

2.7 Výhody a nevýhody větrných elektráren

Využití síly větru jako alternativního zdroje energie se v současné době dostává stále více do popředí zájmu vědců i široké veřejnosti vzhledem k ubývajícím zásobám fosilních paliv, jako jsou uhlí, ropa a zemní plyn.

Velkou výhodou větrné energie je, že je nevyčerpatelná a je zdarma. Samotná její výroba neuvolňuje žádné skleníkové plyny ani jiné škodlivé látky do ovzduší[2].

Může sloužit jako zdroj energie v místech mimo rozvodnou síť, např. v horách nebo na samotách. Získanou energii lze zálohovat a překlenout tak období bezvětrí[18]. Provoz větrných elektráren je bezpečný z toho pohledu, že v případě havárie nehrozí zamoření prostředí, jako je tomu např. u jaderné elektrárny. Výstavba blízko míst spotřeby energie znamená snížení závislosti na velkých zdrojích elektřiny, což snižuje riziko výpadku v případě havárie[2].

Při objektivním hodnocení větrných elektráren je třeba také zvážit argumenty, které připomínají úskalí výroby elektřiny v těchto zařízeních.

Oproti tepelným, jaderným nebo vodním elektrárnám mají poměrně malý výkon. Vítr není spolehlivý zdroj energie, neboť souvisí s proměnlivostí počasí. Námraza odletující z větrných elektráren může ohrožovat život či majetek. Při velké rychlosti větru může dojít k celkové destrukci větrné elektrárny[2].

3 SVĚTOVÝ ROZVOJ VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN

V evropských zemích se větrná energie stává důležitým průmyslovým odvětvím. Čisté zdroje snižují exhalace, vytvářejí tisíce pracovních míst a zásobují proudem už milióny domácností. Evropské sdružení pro větrnou energii (European Wind Energy Association) oznámilo, že do konce desetiletí plánuje zvýšit instalovanou kapacitu větrných elektráren v zemích současné Evropské unie na trojnásobek, tedy 75 000 megawattů. Takový objem zajistí elektřinu pro 86 milionů průměrných Evropanů a pokryl by tak třetinu závazku snížit exhalace oxidu uhličitého, ke kterému se EU zavázala v Kjótském protokolu (523 milionů tun). Podle posledních údajů světové asociace větrné energetiky (WWEA) k 30. červnu 2010 jsou světovou jedničkou v instalované kapacitě větrných elektráren Spojené státy americké, v první pětce světového pořadí již figurují i Čína a Indie. Evropské „větrné lize“ nadále podle údajů evropské asociace větrné energetiky (EWEA) vévodí Německo [19].

Pořadí – Země	Instalovaný výkon 2009 (MW)	Přrůstek za 1. pololetí 2010 (MW)	Přrůstek (%)	Instalovaný výkon k 30. 6. 2010 (MW)
1. USA	35 159	1 200	+ 3,41	36 300
2. Čína	26 010	7 800	+ 29,99	33 800
3. SRN	25 777	660	+ 2,56	26 400
4. Španělsko	19 149	400	+ 2,09	19 500
5. Indie	10 925	1 200	+ 10,98	12 100
6. Itálie	4 850	450	+ 9,28	5 300
7. Francie	4 521	500	+ 11,06	5 000
8. Velká Británie	4 092	500	+ 12,22	4 600
9. Portugalsko	3 535	230	+ 6,51	3 800
10. Dánsko	3 497	190	+ 5,43	3 700
Ostatní země celkem	21 698	2 870	+ 13,23	24 500
CELKEM	159 913	16 000	+ 10,01	175 000

Obr. 28. Přehled instalovaných výkonů větrných elektráren [19]

3.1 Rozvoj v České republice

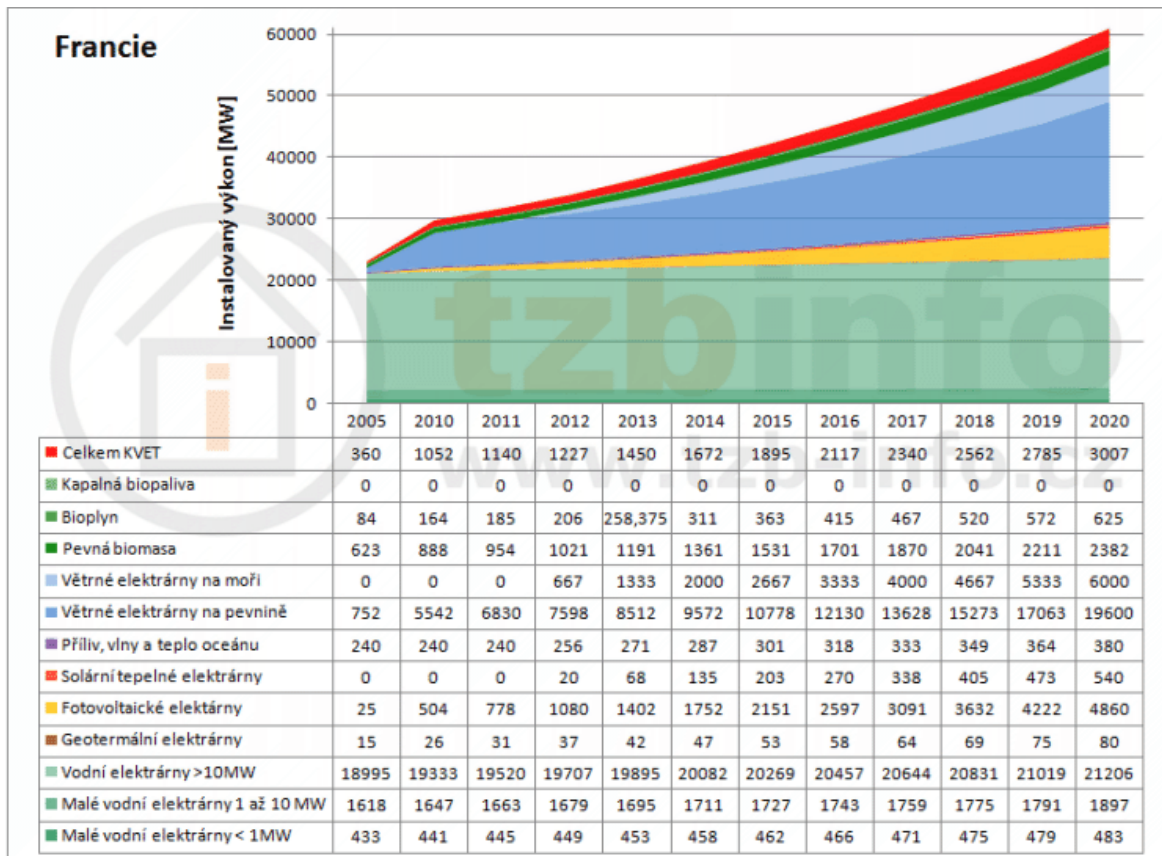
Podle statistických dat zveřejněných Energetickým regulačním úřadem České republiky se za první čtvrtletí roku 2009 množství elektřiny vyrobené ve větrných elektrárnách v České republice meziročně zvýšilo o 115 procent. Od ledna do konce března roku 2009 vyrobily

větrné elektrárny v ČR 77 GWh, zatímco v roce 2008 to bylo ve stejném období pouhých 35 GWh. Celkový instalovaný výkon se během posledního roku zvýšil na 191 MW.

K 1. červnu 2009 se počet velkých větrných elektráren s výkonem nad 100 kW pohyboval zhruba kolem padesáti. Po České republice je však rozseto ještě několik desítek malých větrných elektráren s nižším výkonem, které slouží pouze pro soukromou potřebu svých majitelů (jejich výkon nepřesáhne 60 kW)[20].

Tabulka 7. Větrné elektrárny v ČR [20]

Lokalita	Počet parků	Počet větrníků	Celkový instalovaný výkon
Karlovarský kraj	5	12	9,49 MW
Ústecký kraj	10	44	82,8 MW
Středočeský kraj	1	2	6 MW
Liberecký kraj	2	8	4,3 MW
Vysočina	2	5	7,7 MW
Pardubický kraj	4	15	15,45
Jihomoravský kraj	2	6	6,25 MW
Olomoucký kraj	13	32	37,1 MW
Moravskoslezský kraj	1	2	4 MW
Zlínský kraj	1	1	0,225 MW



Obr. 30. Předpokládaný instalovaný výkon větrné energie ve Francii do roku 2020[34]

4 PATENTY

Patent je zákonná ochrana vynálezů zaručující vlastníkovvi patentu výhradní právo k průmyslovému využití vynálezu. Vynález se považuje za nový, jestliže není součástí stavu techniky. Stavem techniky je všechno, co bylo zveřejněno přede dnem přihlášení patentu, ať již v České republice nebo v zahraničí. Majitel patentu má výlučné právo vynález využívat (tj. výrobek vyrábět, uvádět do oběhu nebo upotřebit postup), dále poskytnout souhlas k využívání vynálezu jiným osobám (např. licenční smlouvou) a má právo převést patent na jinou osobu. Proto, aby patent zůstal v platnosti, je nutno platit tzv. udržovací poplatky, a to v každém státu zvlášť. Maximální možná délka patentové ochrany je 20 let [23].

Databáze Evropského patentového úřadu obsahuje přes 30 mil. patentových dokumentů, které jsou dostupné prostřednictvím EPÚ (Evropského patentového úřadu) a některých národních patentových úřadů členských zemí [24]. Široké veřejnosti jsou patenty k nahlédnutí na internetovém portálu European Patent Office (espacenet).

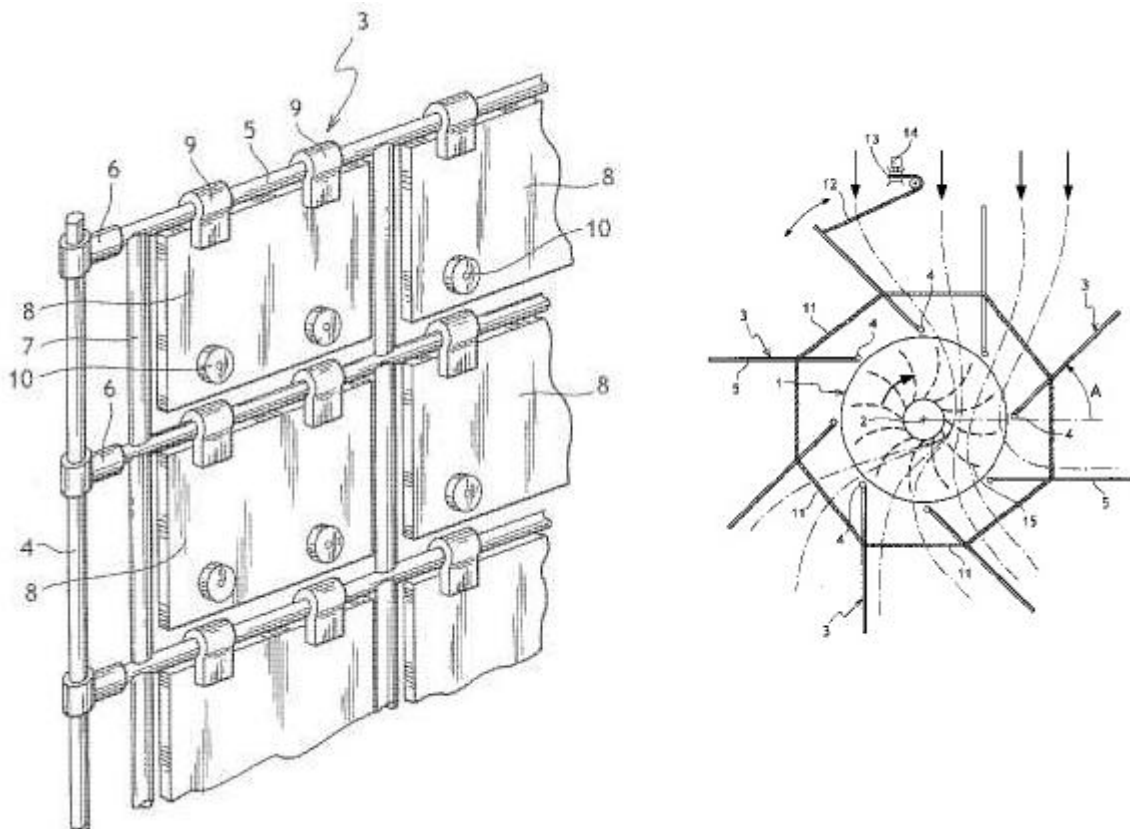
4.1 Francouzské patenty

V současné době je ve Francii zaregistrováno dvacet patentů týkajících se vertikálních větrných turbín (VAWT – Vertical Axis Wind Turbine). Z toho 2 patenty jsou zároveň platné mezinárodně (mají status WO), jeden v USA (US) a další v Nizozemsku (NZ). Nejstarší patent je z roku 1994 naopak nejnovější z roku 2010. V letech 2004 až 2009 bylo zaregistrováno celkem 13 patentů. V roce 2010 bylo registrováno šest patentů.

Mezi nejzajímavější bezpochyby patří:

Wind Concentrating device for vertical axis wind turbine

Patent z roku 2004 je platný mezinárodně a zabývá se větrnou turbínou s vertikální osou rotace. Toto zařízení představují nejméně dva svislé panely (3), sbíhající se k větranému prvku (1). Každý panel (3) včetně podpůrného rámu (5), na kterém jsou klapky (8), je namontován na čepu kolem vodorovné osy bez ohledu na směr proudění větru vzhledem ke klapkám viz obr. 31. Klapky, které se vracejí do roviny vymezené rámem, nejsou žádným způsobem v této rovině blokovány [25].

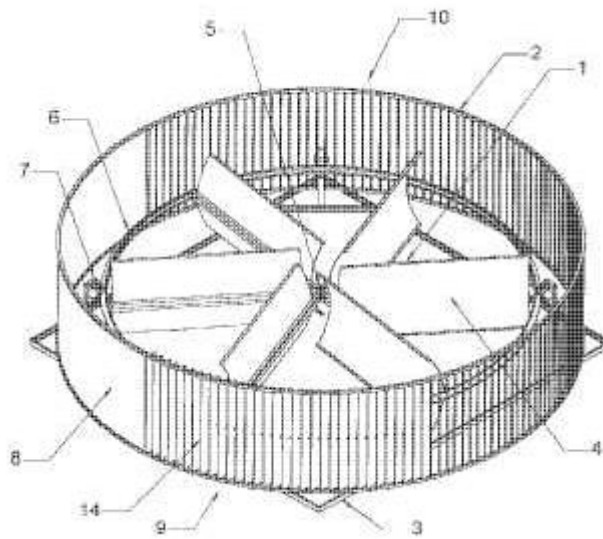


Obr. 31. Panel s klapkami[25]

Electrical generator drive device for e.g. service building, has vertical axis wind turbine with large diameter and enclosure with free sectors, where one of sectors has shutters whose position is adjusted with wind force by servomotors

Patent z roku 2007 je platný pouze ve Francii. Vynálezem je větrná turbína s vertikální osou sloužící pro elektrický pohon generátorů např. v provozních budovách. Jedná se o turbínu s velkým průměrem krytou sektory, kde jeden z nich má okenice, jejichž poloha se nastavuje servomotorem.

Zařízení má vertikální turbínu (1) s velkým průměrem a obvodovým krytem (2) se sektory (8-10). Sektor (8) je uzavřen tenkou stěnou nepropustnou pro vzduch. Sektory (8,9) mají délku kolem čtvrtiny obvodu. Sektor (9) má automaticky orientované rolety (14) navádějící proudící vzduch na lopatky (4). Natočení rolety se nastavuje silou větru, pomocí servomotorů v rozmezí od maximální otevřené pozice do úplně uzavřené. Sektor (10) uzavírá zbývající okraj obvodu turbíny viz obr. 32 [26].

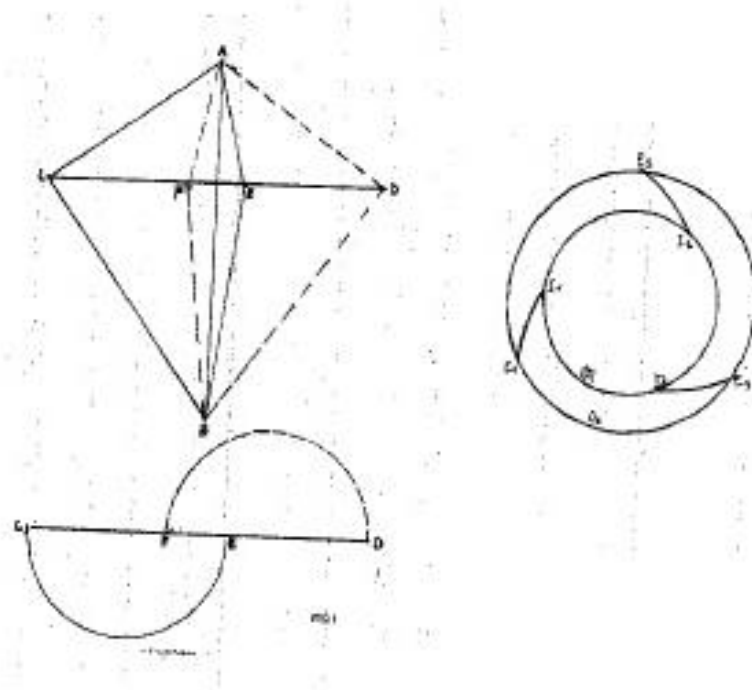


Obr. 32. Větrná turbína s velkým průměrem
a obvodovým krytem[26]

Vertical axis wind turbine i.e. Darrieus wind turbine, has concentric circular cradles arranged between ends of mast and connected by arches that support sail-wings, where assembly of sail-wings and cradles is subsided along mast as desired

Tento patent platný ve Francii od roku 2009 se zabývá Darrieovým typem turbín. Má soustřednou kruhovou kostru pohybující se mezi sloupy a spojenou obloukem podporovanou plachtami.

Větrná turbína má lopatky tvořené nataženými horními a dolními plachtami uchycenými na konci centrálního stožáru. Soustředná kruhová kostra je uspořádána mezi koncem stěžně a je spojena oblouky, které podporují plachty v souladu se zásadou Darrieových větrných turbín. Kostra zařízení je umístěna v rovině, která je ve vodorovné poloze kolmo k stožáru viz obr. 33[27].

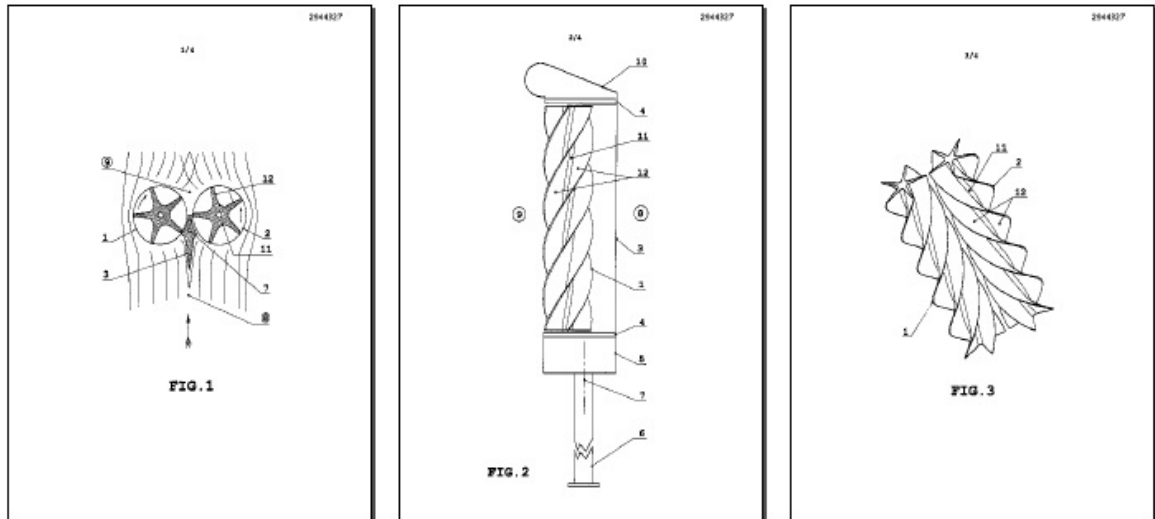


Obr. 33. Konstrukce plachet[27]

Vertical axis wind turbine device for producing electrical energy to e.g. individual dwelling, has pivoting vertical shaft fixed under frame that integrates mechanical transmissions, for supporting screws, guide and assembling plates

Francouzský patent z roku 2010 obsahuje větrnou turbínu pro výrobu elektrické energie např. pro jednotlivá obydlí. Má otočnou vertikální osu pevně uchycenou pod rámem, který integruje mechanické převody pro podporu šroubů a montážní desky.

Přístroj má dva spirálové šrouby (1,2), které jsou vertikálně spojeny oddělovačem (3), který je mezi těmito šrouby jednostranně uchycen. Mechanické polohování spirálových šroubů je prováděno tak, že každé dva závity jsou vychýlené viz obr. 34 [28].

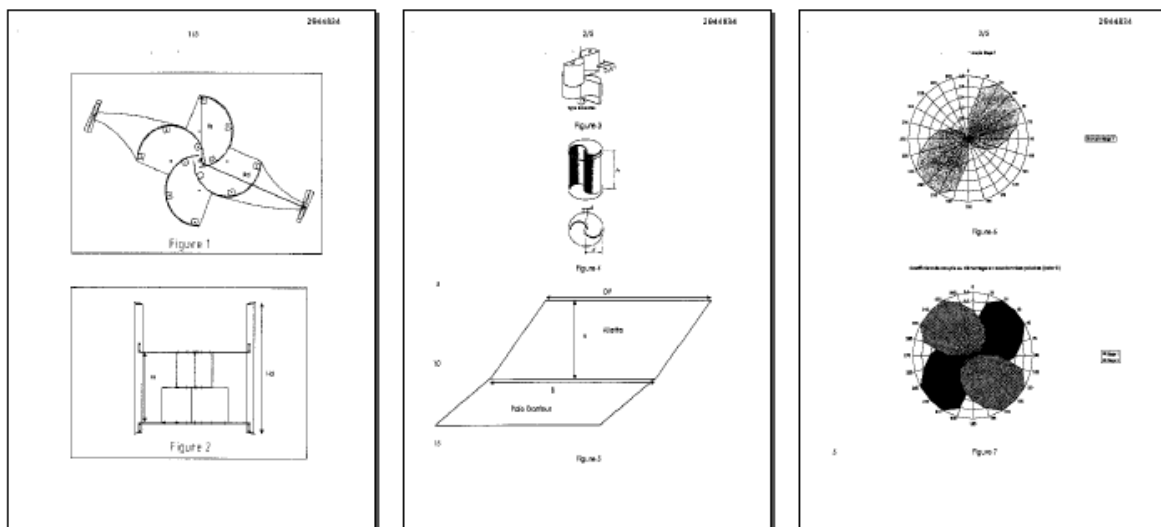


Obr. 34. Větrná turbína se dvěma spirálovými šrouby[28]

Savonius and Darrieus hybrid vertical axis wind turbine for use by e.g. small/ average industrial/ commercial structure, has baffles symmetrical with respect to each other or slightly asymmetrical to faces of blades

Patent z roku 2010 platný pouze ve Francii je kombinací využití Savoniova a Darriova principu větrných turbín. Byl vynalezen pro použití na malé/ středně průmyslové/ obchodní využití.

Větrná turbína má Savoniův rotor složený z několika částí, z nichž každá je k té následující posunuta o 90 stupňů. Jednotlivé části se skládají z poloválcových lopatek uložených podél svislé osy. Darrieův rotor je propojen se Savoniovým a zahrnuje rovné i vertikální lopatky mající bikonvexní profil. Zařízení obsahuje dva regulátory na koncích lopatek, které směřují dovnitř a ven z Darrieova rotoru. Regulátory jsou symetrické nebo lehce asymetrické s ohledem na konstrukci lopatek viz obr. 35 [29].



Obr. 35. Kombinace Savoniova a Darriova rotoru[29]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

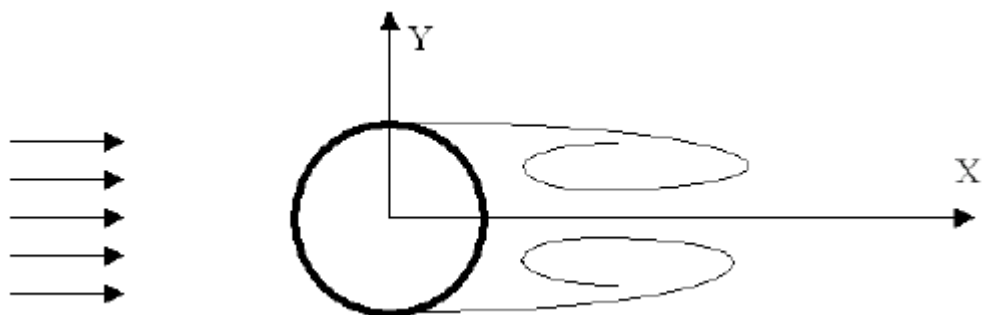
5 SIMULACE VĚTRNÝCH PODMÍNEK

Praktická část této práce se zabývá vlivem úhlu odtokové hrany a vzdálenosti od osy rotace na účinnost lopatky větrných elektráren s průtažným rotorem. Cílem bylo zjistit, zda změna úhlu a vzdálenosti výrazně ovlivní výkon elektrárny a navrhnout takový tvar lopatky, který by splňoval požadavky jednoduché výroby a zároveň co nejlépe ovlivňoval výkon větrné elektrárny. K simulaci větrných podmínek byl využit software SolidWorks Flow Simulation, ve kterém lze znázornit proudění nepřeberného množství fluid. Tento program se zabývá jednak simulací proudění, tak sdílením tepla či výpočtem tlaků v tekutinách. Aerodynamické proudění vzduchu je velice složitý proces, a proto je potřeba zdůraznit, že program Flow Simulation nenahrazuje zkoušky v aerodynamických tunelech, ale můžeme ho využít k vyloučení takových variant řešení, které nesplňují naše požadavky, aniž bychom byli nuceni vložit jakýkoliv kapitál do výroby prototypu a následné zkoušky v aerodynamických tunelech.

5.1 Software SolidWorks Flow Simulation

V technické dokumentaci programu Flow Simulation si na případových studiích můžeme ověřit přesnost výpočtů tohoto programu.

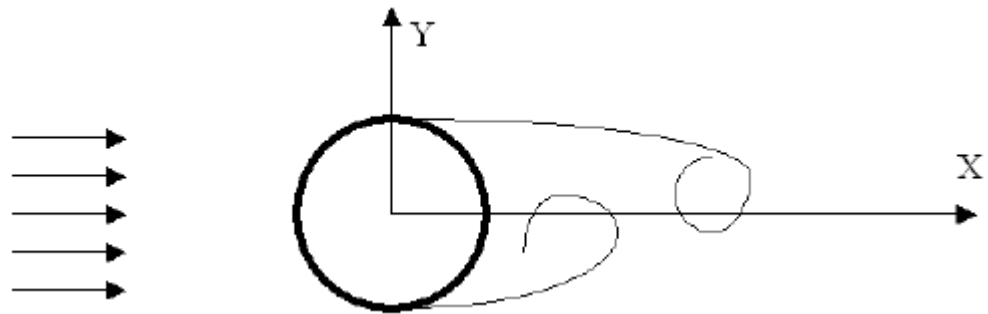
Případová studie válce o průměru 0,01m obtékaného fluidem o teplotě 293,2K a tlaku 1atm. Proudění do značné míry závisí na Reynoldsově čísle, při jeho nízkých hodnotách $4 < Re < 60$ vznikají dva stabilní víry, které se tvoří na zadní straně válce viz obr. 36 [35].



Obr. 36. Obtékání válce při nízkých hodnotách

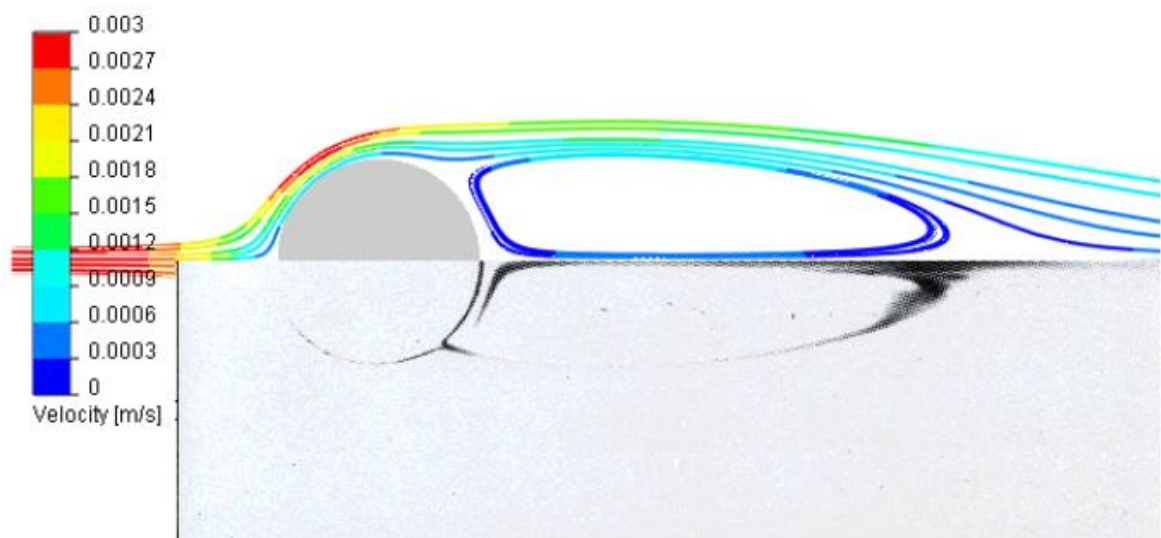
Reynoldsova čísla ($4 < Re < 60$) [35]

Naopak u vyšších Reynoldsových čísel $Re \geq 60$ se tok stane nestálý viz obr. 37.



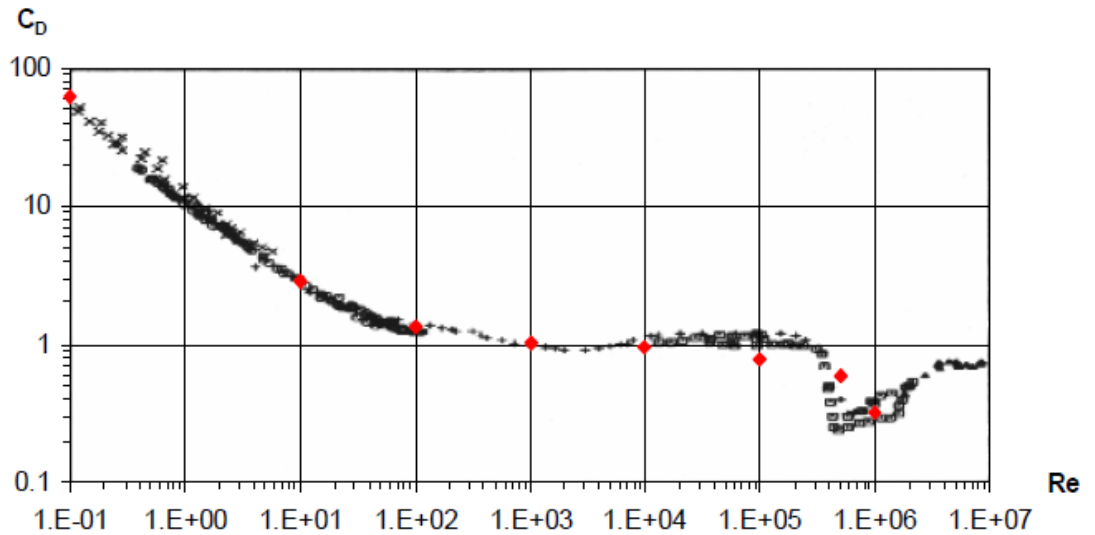
Obr. 37. Obtékání válce při vyšších hodnotách
Reynoldsova čísla ($Re \geq 60$)[35]

Na obrázku je barevně porovnán výsledek výpočtu, který provedl program Flow Simulation (s nastavenou přesností výpočtu 7), s fotografií pořízenou v aerodynamickém tunelu při Reynoldsově čísle rovno 41 viz obr. 38 [35].



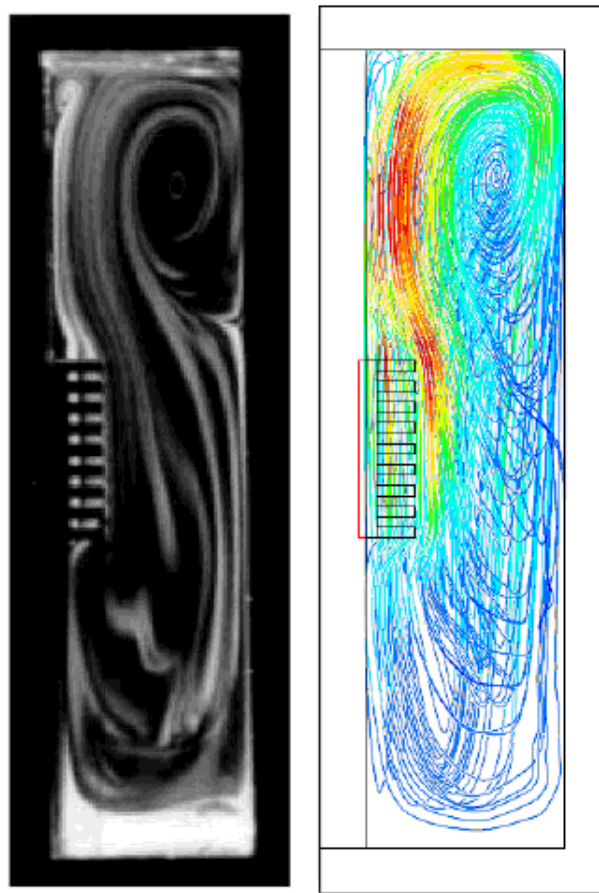
Obr. 38. Proudění trajektorií vypočtených programem Flow Simulation
v porovnání s fotografií z aerodynamického tunelu ($Re=41$)[35]

Závislost součinitele odporu C_D a Reynoldsova čísla Re podle programu Flow Simulation (červené označení) v porovnání s experimentálními výpočty (černé označení) viz obr. 39 [35].



Obr. 39. Závislost součinitele odporu C_D a Reynoldsova čísla Re [35]

Dalším příkladem viz obr. 40 je vizualizace průtoku vzduchu pomocí kouře v porovnání k získaným výsledkům rychlosti proudění z programu Flow Simulation.



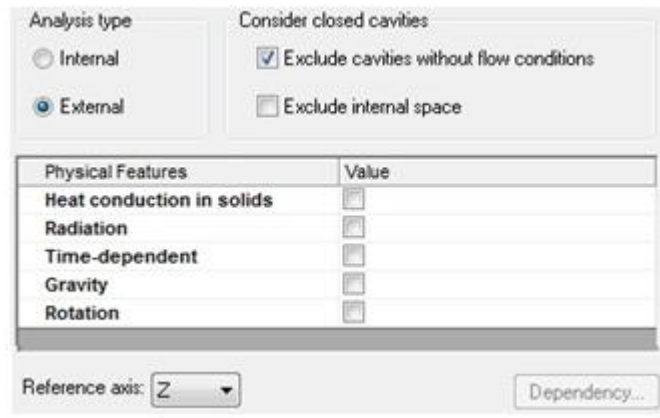
*Obr. 40. Zobrazení průtoku kouře v porovnání
s vypočtenými trajektoriemi [35]*

5.2 Nastavení programu Flow Simulation

Pro přesné výpočty a možnost srovnání vlivu změn úhlů a vzdáleností je nutné nastavit u každého typu rotoru stejné podmínky simulace.

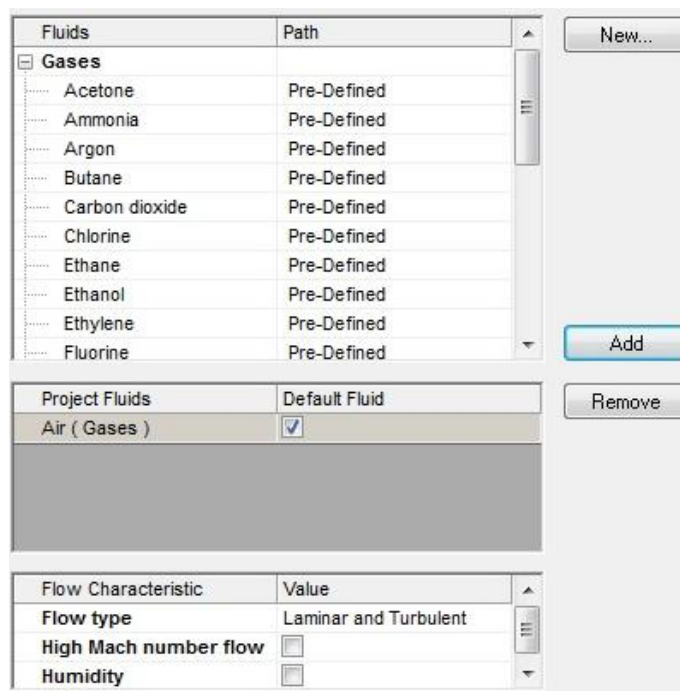
V dialogovém okně pro nastavení obecných podmínek (General Settings) byly změněny pouze následující parametry, ostatní byly ponechány ve výchozích hodnotách.

Změna typu analýzy na externí (vnější obtékání) a změna referenční osy na osu Z.



Obr. 41. Typ analýzy a referenční osa

Výběr fluida na Air (vzduch).



Obr. 42. Výběr fluida

Nastavení termodynamických vlastností a rychlosti proudění.

Parameter	Value
Parameter Definition	User Defined
Thermodynamic Parameters	
Parameters:	Pressure, temperature
Pressure	101325 Pa
Temperature	20 °C
Velocity Parameters	
Parameter:	Velocity
Velocity in X direction	2 m/s
Velocity in Y direction	0 m/s
Velocity in Z direction	0 m/s
Turbulence Parameters	

Obr. 43. Nastavení rychlosti proudění

Termodynamické vlastnosti jako teplota a tlak byly změněny na standardní pokojovou teplotu 20°C a tlak 101325 Pa. Rychlosti proudění byly voleny podle Beaufortovy stupnice síly větru a to na rychlost 2m/s, která odpovídá věříku, rychlost 5m/s což je slabý vítr a rychlost 10m/s, která již odpovídá větru silnému.

Nastavení přesnosti výpočtu, minimální velikosti mezery a tloušťky stěny.

Level of initial mesh

1 2 3 4 5 6 7 8

Minimum gap size

Manual specification of the minimum gap size

Minimum gap size refers to the feature dimension

Minimum gap size:

0.01 m

Minimum wall thickness

Manual specification of the minimum wall thickness

Minimum wall thickness refers to the feature dimension

Minimum wall thickness:

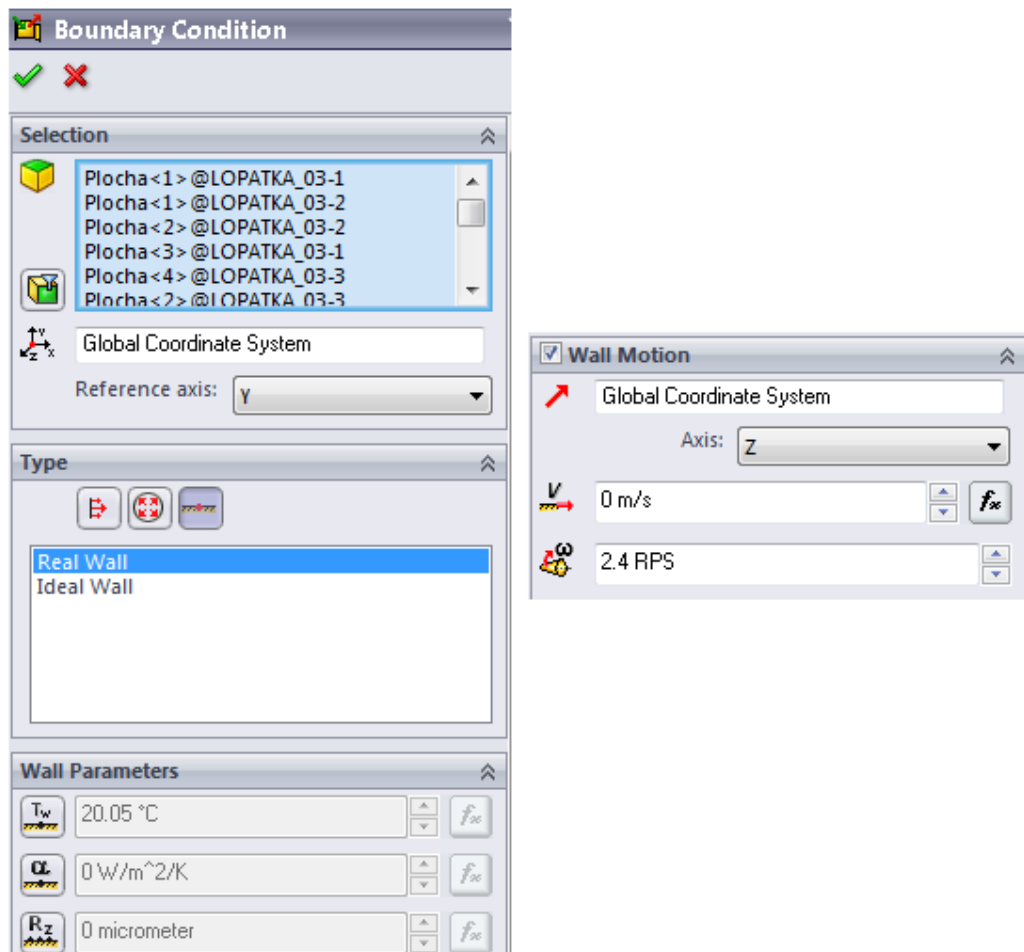
0.002 m

Advanced narrow channel refinement Optimize thin walls resolution

Obr. 44. Nastavení přesnosti, mezery a tloušťky stěny

Stupeň přesnosti výpočtu se nastavuje pokud možno co nejvyšší, s ohledem na vybavení výpočetní techniky. V tomto případě byla přesnost 4 maximální, které šlo na počítačovém vybavení, které bylo k dispozici, dosáhnout.

Nastavení okrajových podmínek (Boundary Condition). Zde dochází mimo jiné i k nastavení počtu otáček rotoru.



Obr. 45. Nastavení okrajových podmínek a počtu otáček

Kvůli přehlednosti, jednoznačnosti a zamezení vzniku chyb při přepočtu a přenosu vypočítaných a zadaných hodnot otáček byly využity přednastavené jednotky programu Flow Simulation a to RPS (revolutions per second), které odpovídají otáčkám za sekundu.

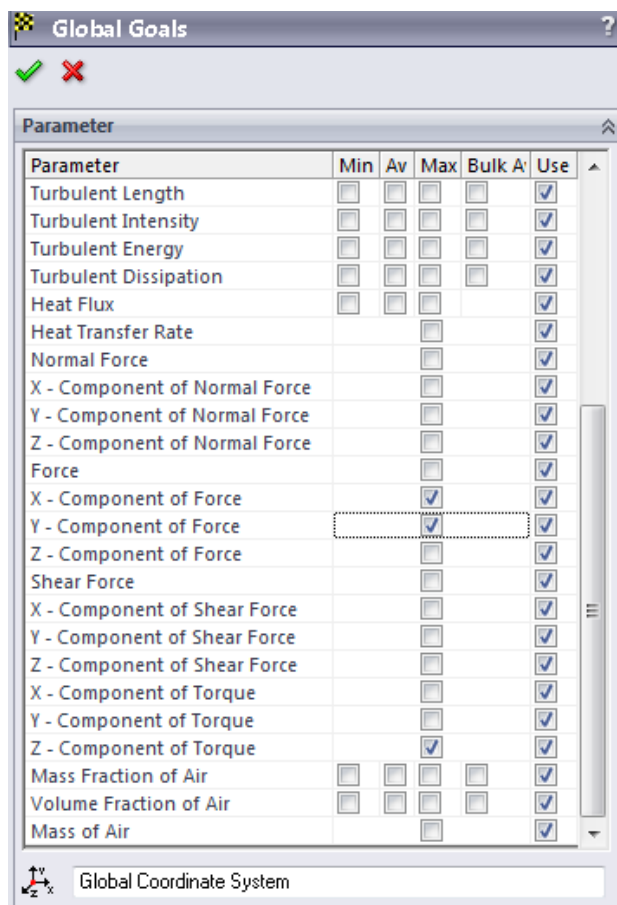
Otáčky rotoru závisí hlavně na součiniteli rychloběžnosti, který byl zvolen. Výsledek je ovšem jen orientační, neboť skutečný součinitel rychloběžnosti se zjistí až při provozu

elektrárny. Výpočet přibližné řady otáček rotoru za sekundu, které byly použity k simulacím, je uveden v tabulce.

Tabulka 9. Přibližná řada otáček rotoru za sekundu ot/s v závislosti na součiniteli rychloběžnosti X a rychlosti proudění větru v

součinitel rychloběžnosti X	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2
ot/s pro $v = 2 m/s$	0,16	0,32	0,48	0,64	0,80	0,96
ot/s pro $v = 5 m/s$	0,4	0,8	1,2	1,6	2,0	2,4
ot/s pro $v = 10 m/s$	0,8	1,6	2,4	3,2	4,0	4,8

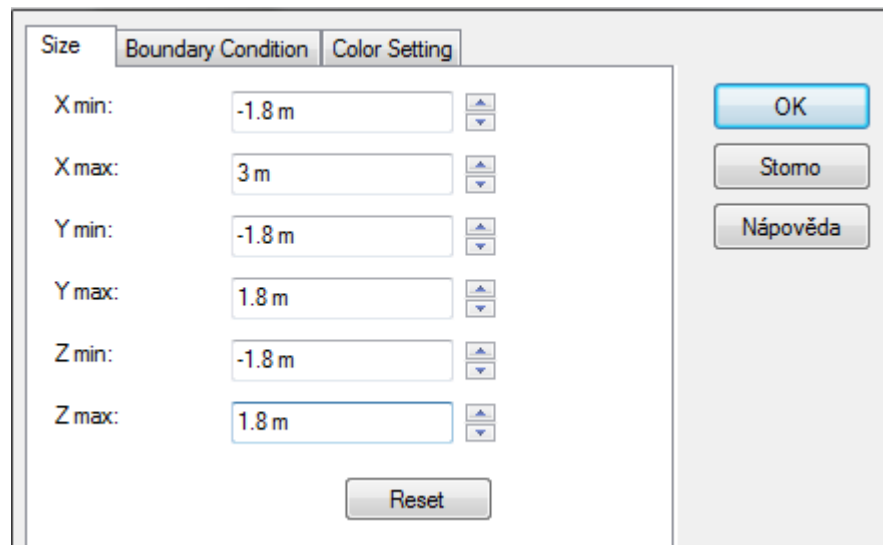
Nastavení cílů výpočtu (Global Goals). V této části dochází k vybrání parametrů, které budou vypočítány. V tomto případě se jedná o síly v ose X a Y a krouticí moment vzhledem k ose Z .



Obr. 46. Nastavení cílů výpočtu

Rozložení sil do osy X a Y nám umožňuje pomocí vektorového součtu vypočítat celkovou sílu F působící na rotor. Nejdůležitějším parametrem pro porovnání účinnosti rotorů je krouticí moment vzhledem k ose Z.

Nastavení výpočetní oblasti (Computational Domain). V této části se nastavuje oblast simulace proudění.

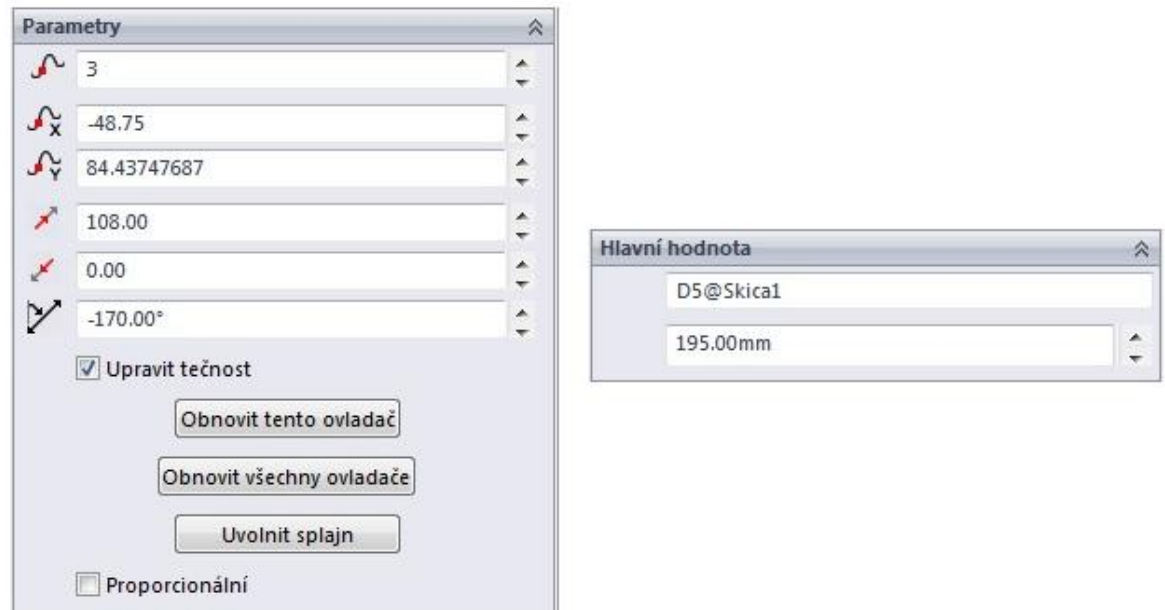


Obr. 47. Nastavení oblasti simulace proudění

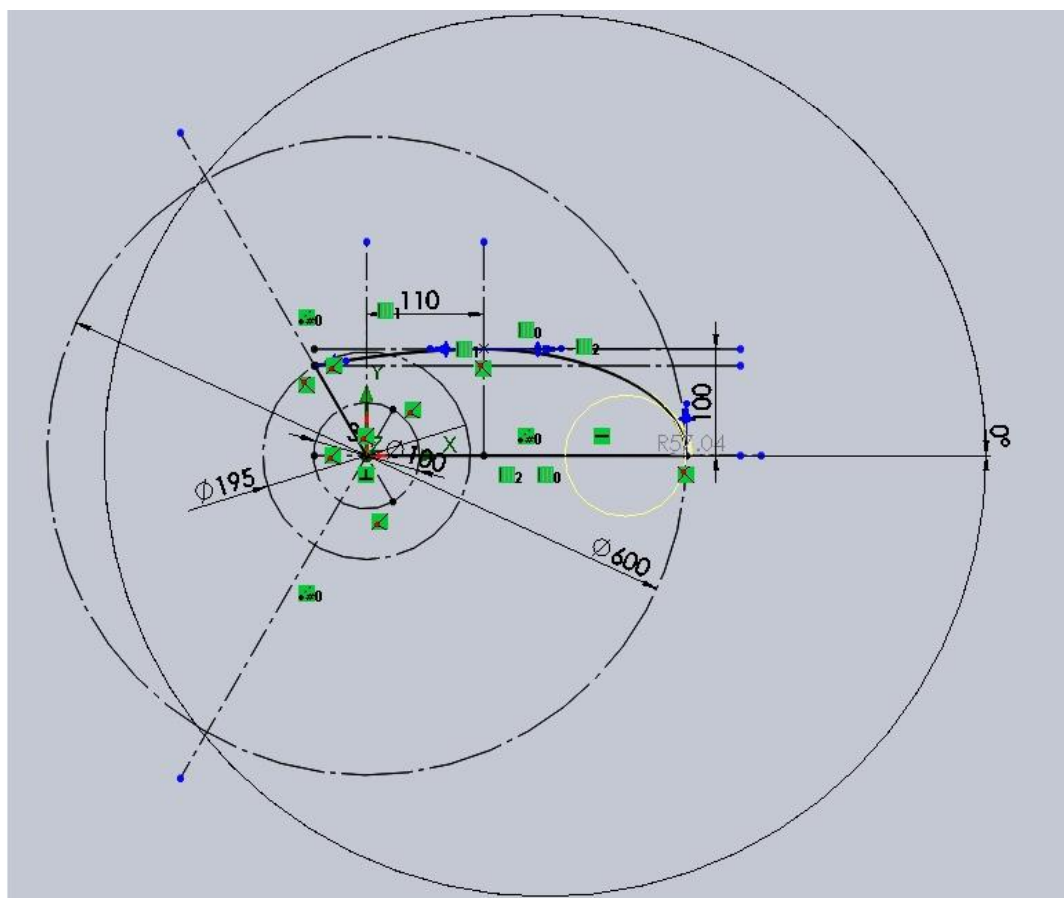
5.3 Navrhované rotory

Byly navrženy celkem tři varianty lopatek, lišící se úhlem odtokové hrany a vzdáleností od osy rotace. Z těchto lopatek byly vytvořeny tři rotory o výšce 700 mm. Vzdálenost od osy rotace je pro jednoznačnost znázorněna pomocnou kružnicí a úhel odtokové hrany byl volen tak, aby zůstala zachována monotónnost a nedošlo ke vzniku ostrých přechodů.

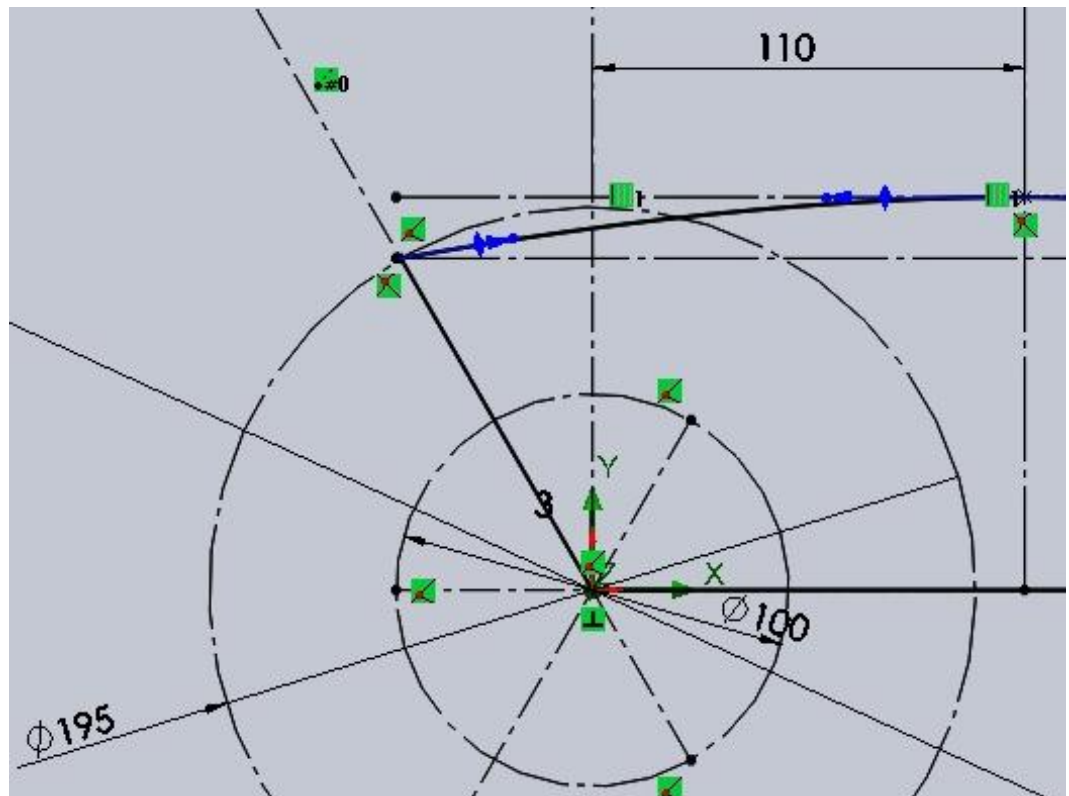
LOPATKA 1 – referenční tvar převzatý z literatury [29]



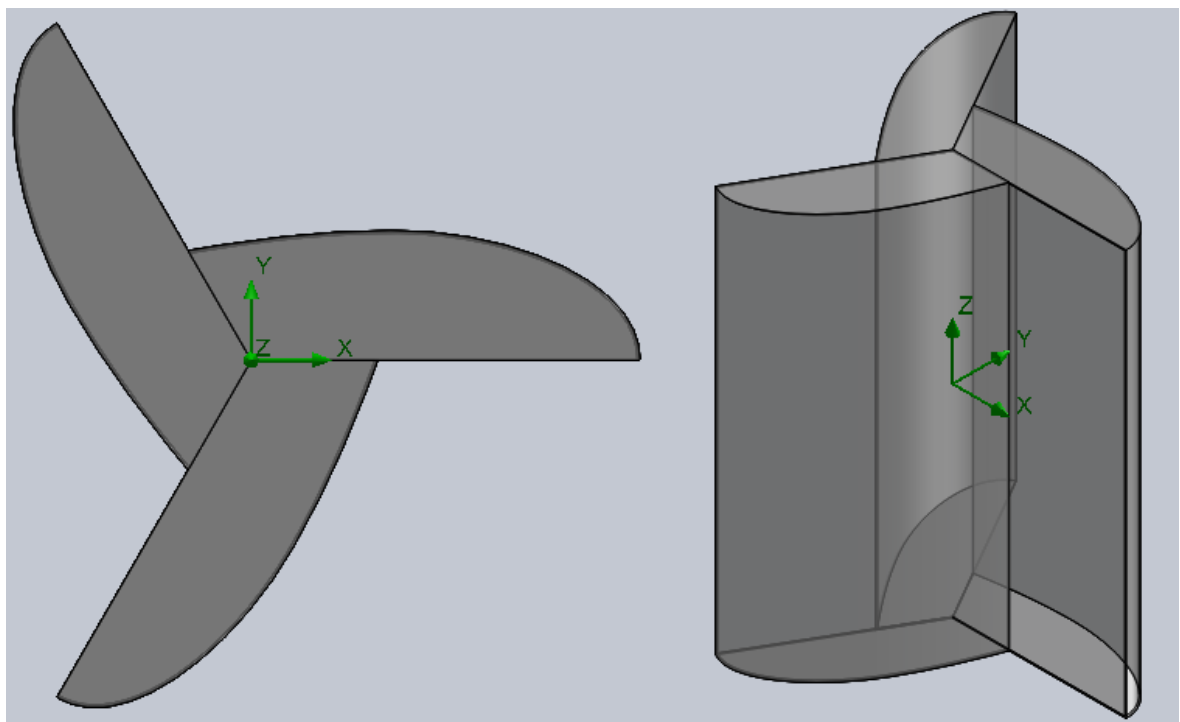
Obr. 48. Parametry úhlu odtokové hrany a vzdálenosti od osy rotace lopatky 1



Obr. 49. Skica lopatky 1

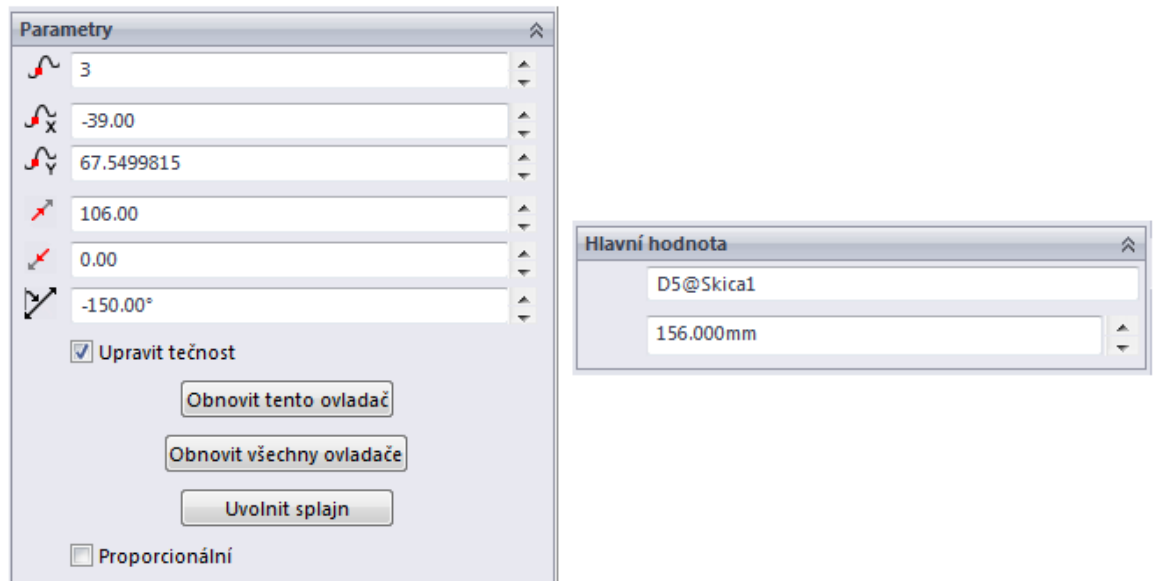


Obr. 50. Detail skici lopatky 1

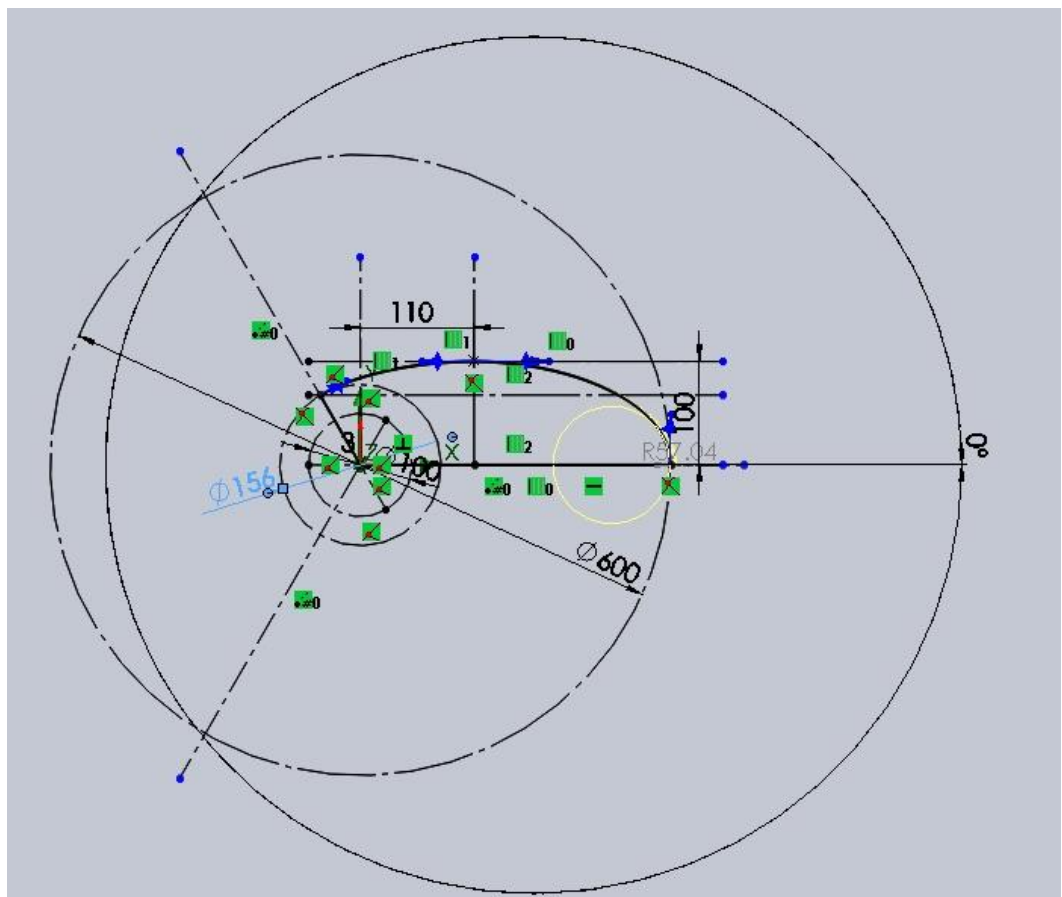


Obr. 51. Rotor 1

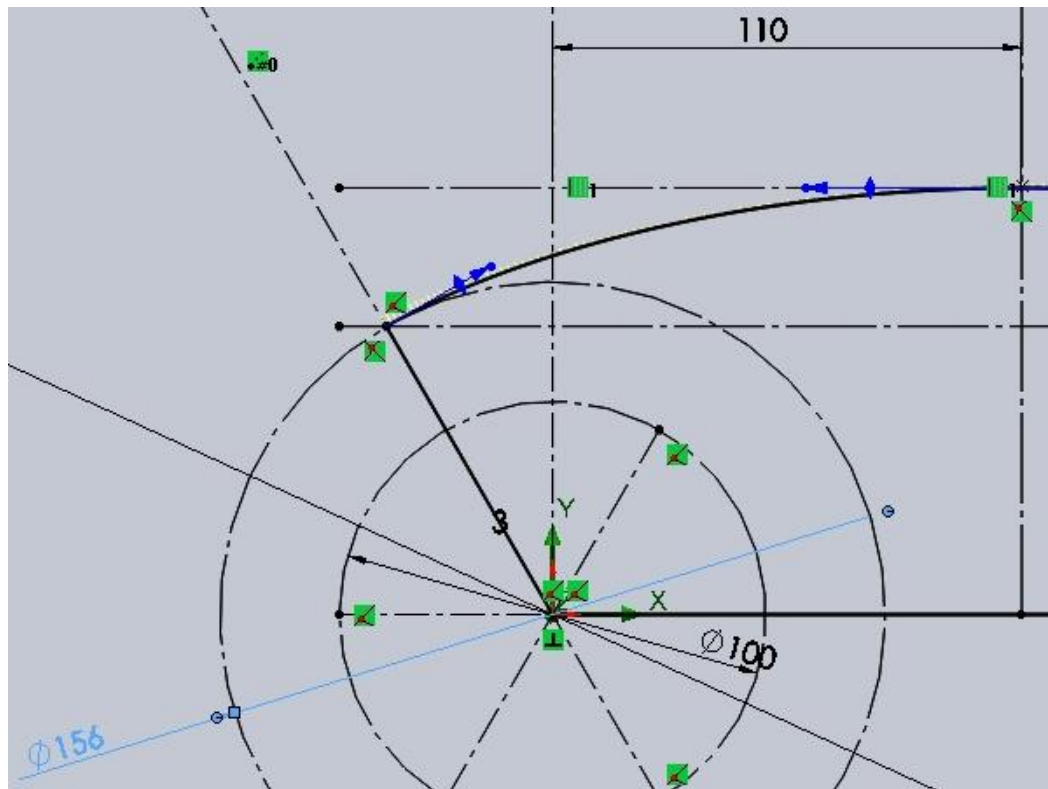
LOPATKA 2 – zmenšená vzdálenost od osy rotace a více uzavřený úhel odtokové hrany



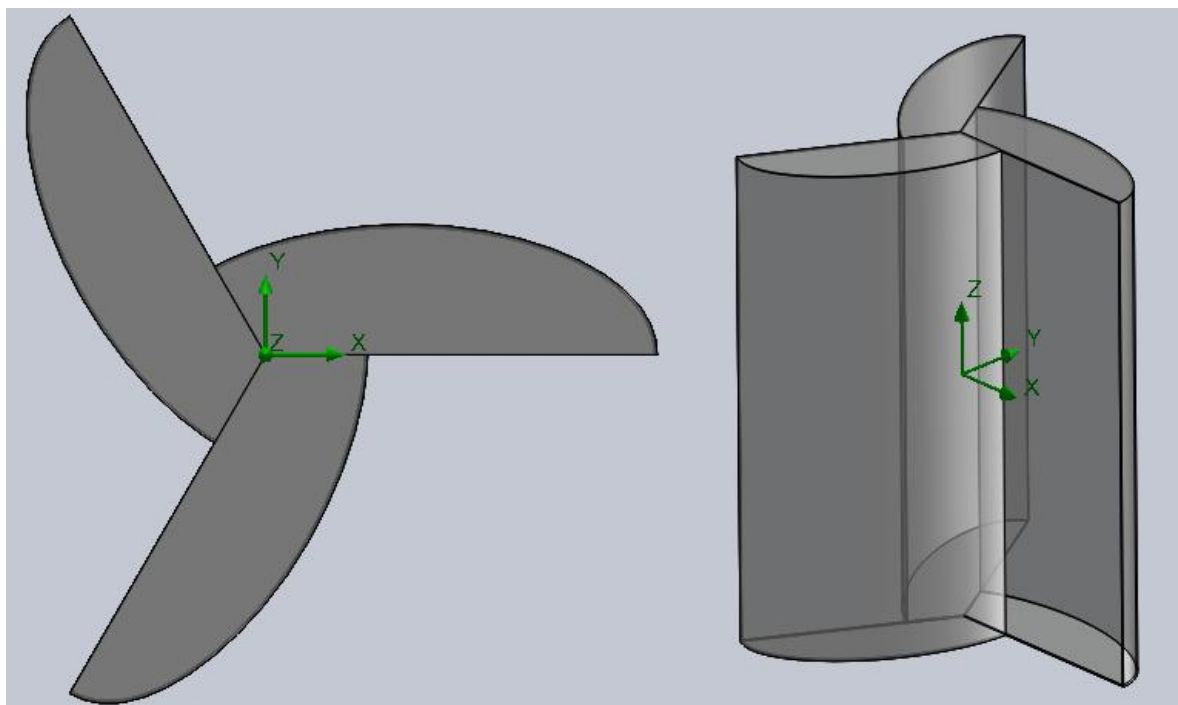
Obr. 52. Parametry úhlu odtokové hrany a vzdálenosti od osy rotace lopatky 2



Obr. 53. Skica lopatky 2

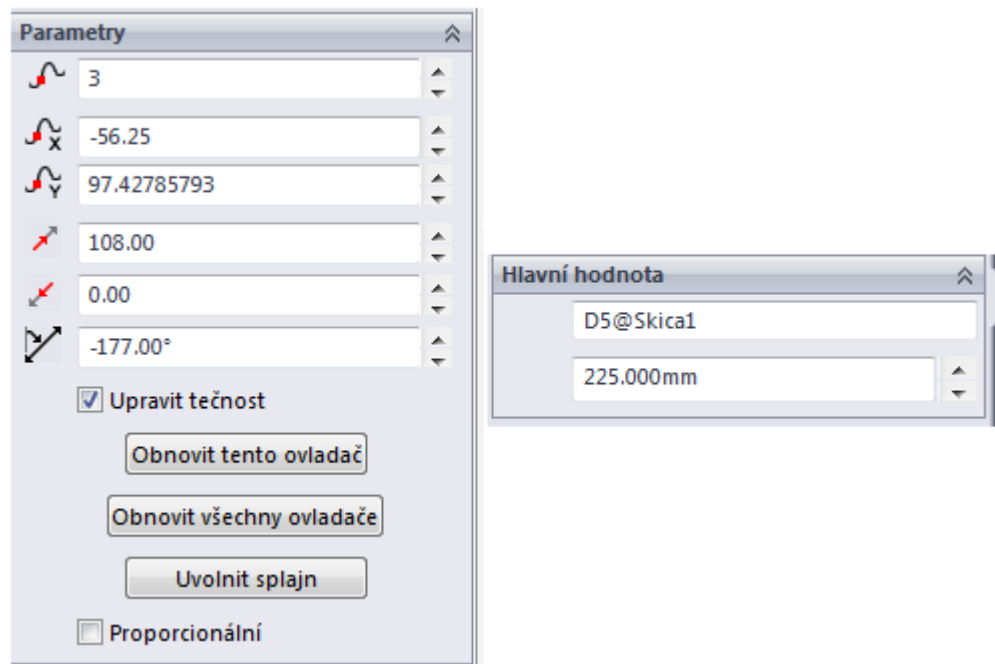


Obr. 54. Detail skici lopatky 2

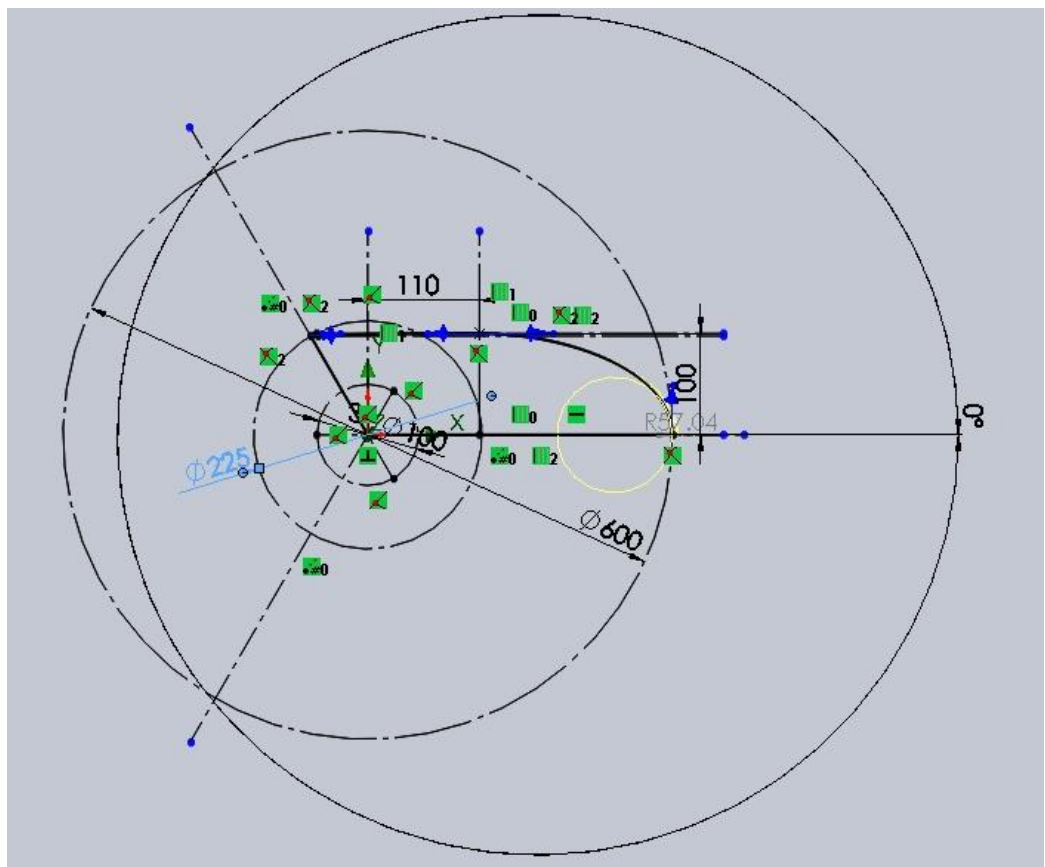


Obr. 55. Rotor 2

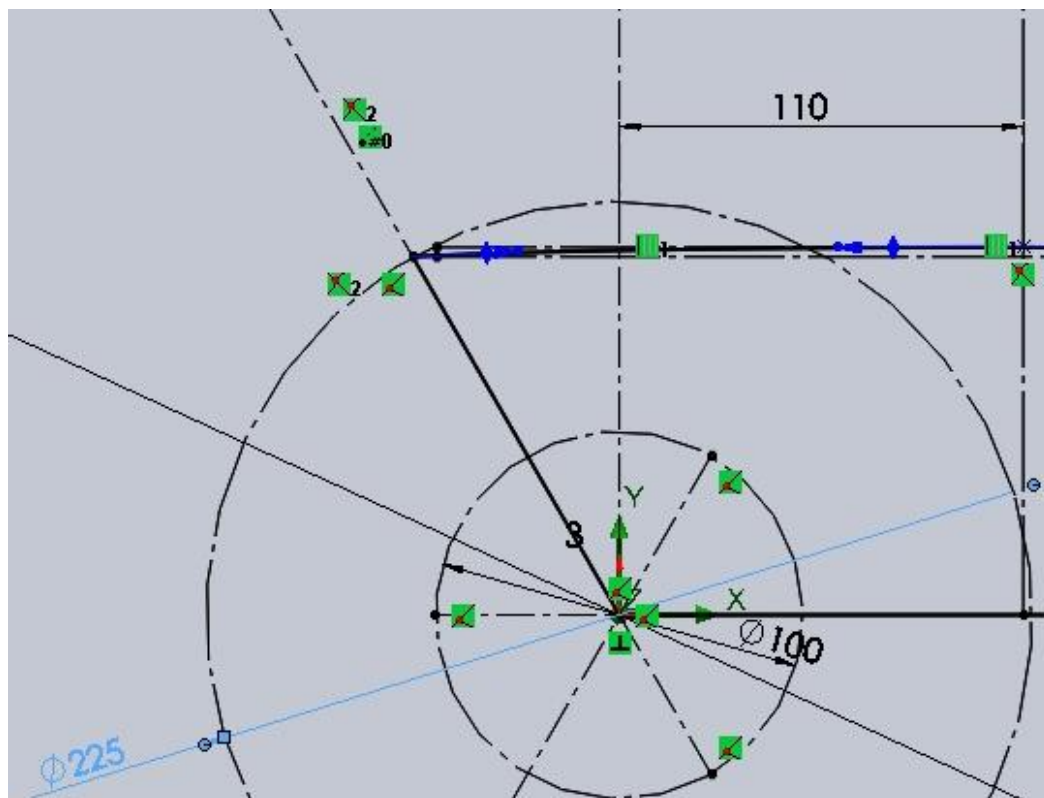
LOPATKA 3 – zvětšená vzdálenost od osy rotace a více otevřený úhel



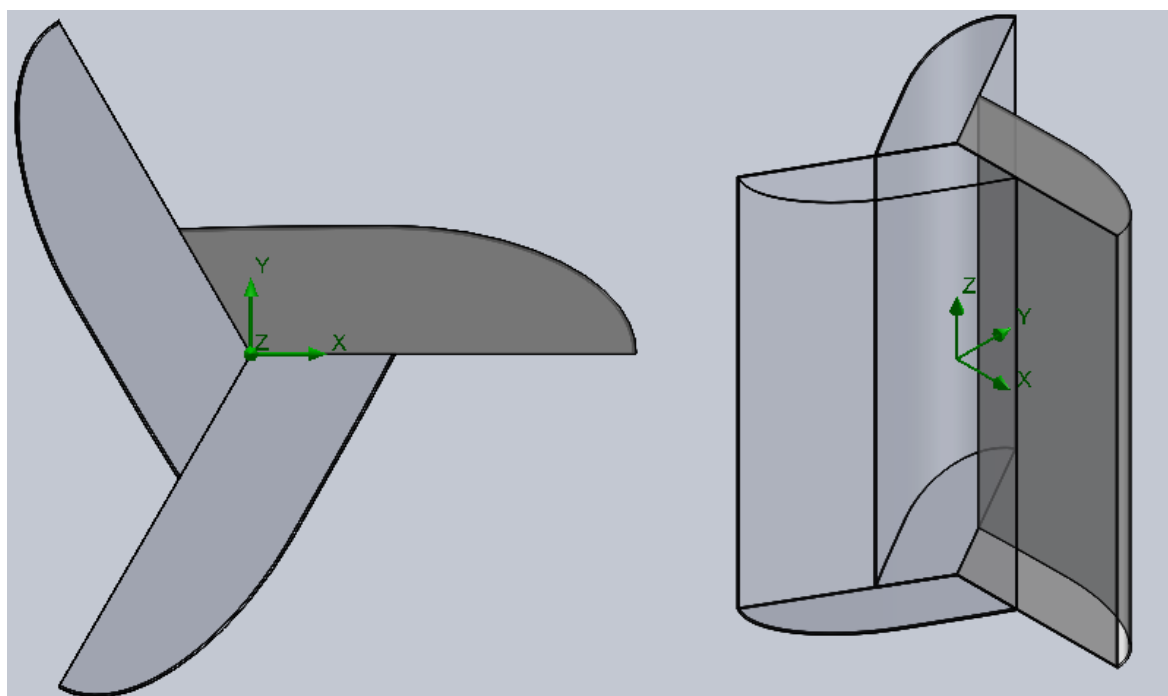
Obr. 56. Parametry úhlu odtokové hrany a vzdálenosti od osy rotace lopatky 3



Obr. 57. Skica lopatky 3



Obr. 58. Detail skici lopatky 3



Obr. 59. Rotor 3

5.4 Simulace

Výpočet byl rozdělen na statické řešení rotorů bez nastavení otáček a to nejprve pro nulový úhel natočení a později pro natočení rotorů o 30°, 60° a 90°.

Další simulace byly nastaveny již s otáčkami odvozenými ze součinitele rychloběžnosti.

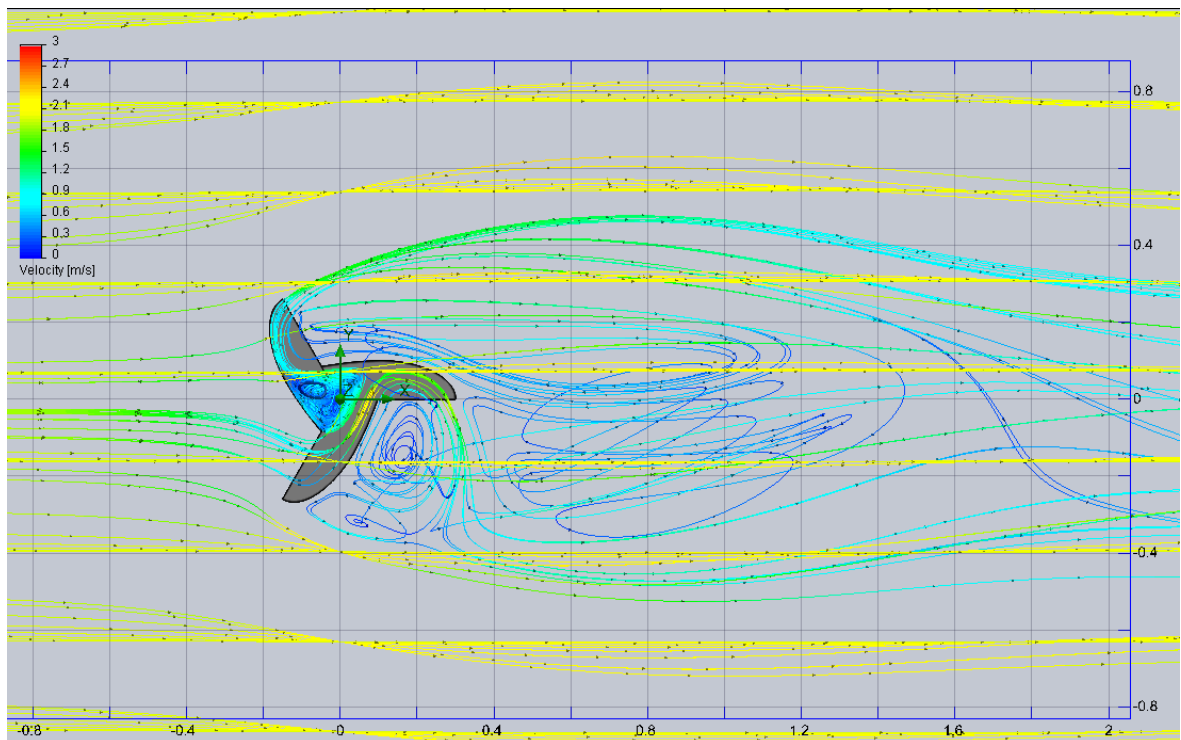
5.4.1 Výpočet rotorů s nulovými otáčkami

U každého rotoru byla nejdříve provedena simulace při jeho nulovém natočení a stanovených rychlostech proudění.

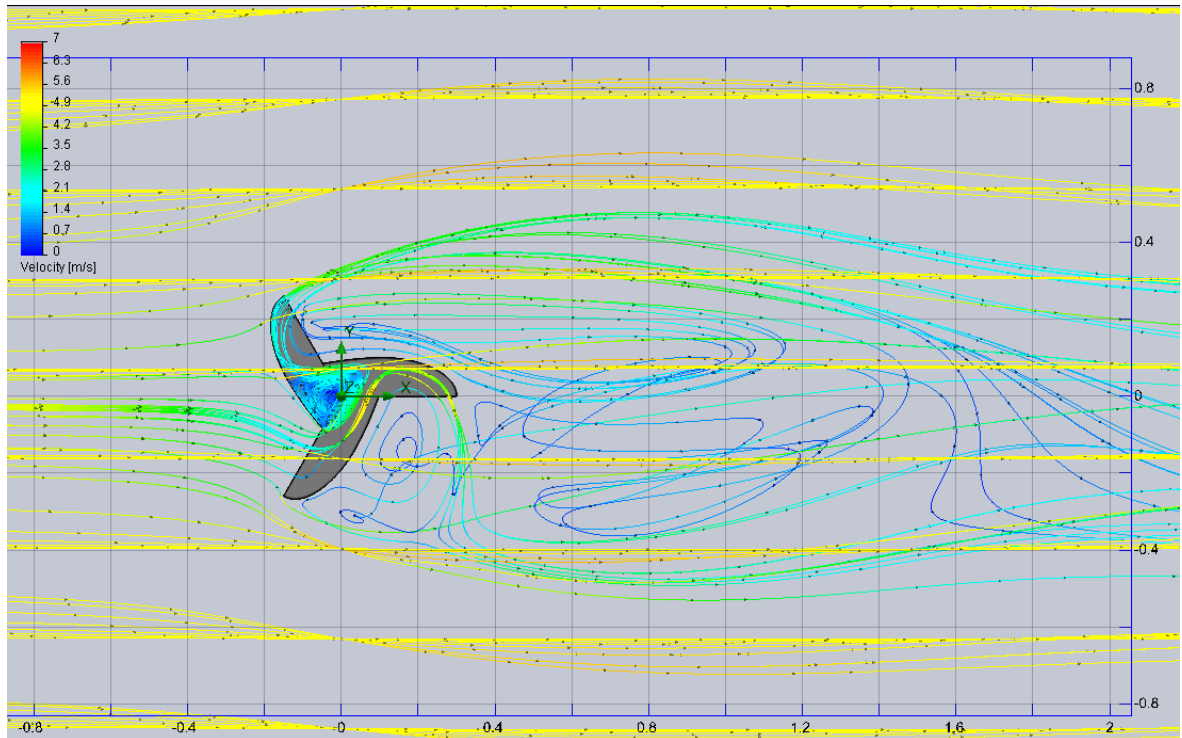
ROTOR 1

Tabulka 10. Rotor 1

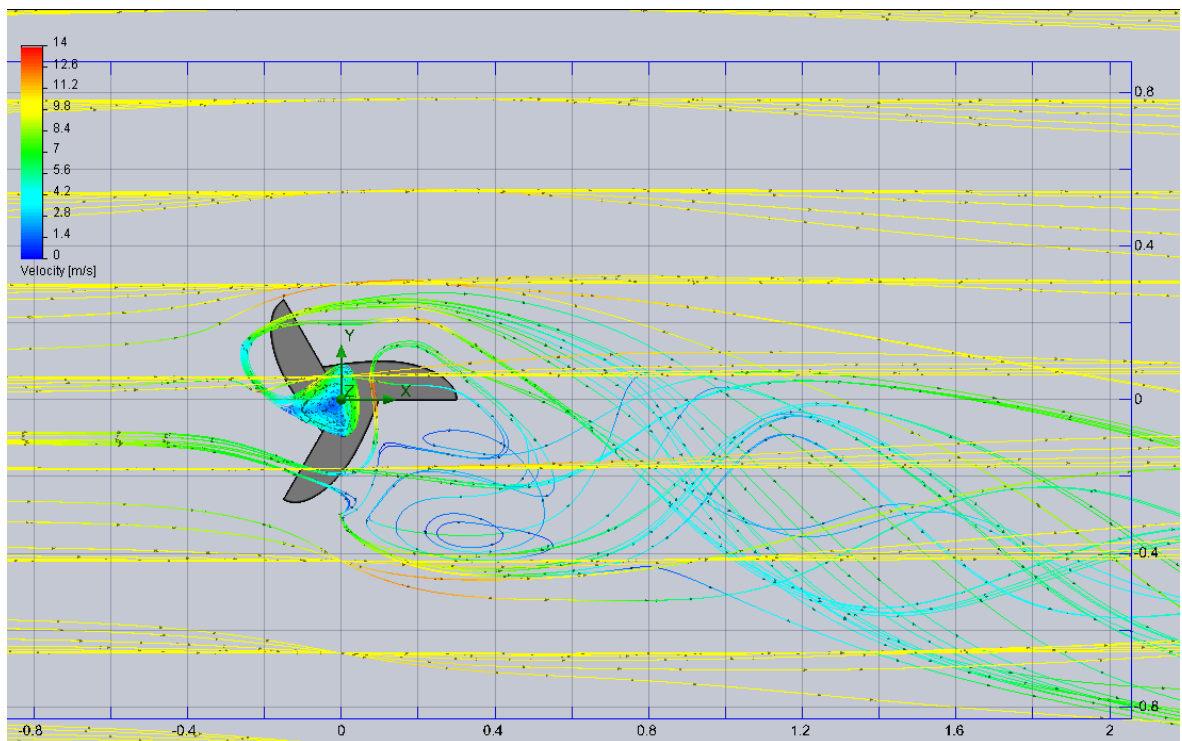
	v(air) [m/s]	α [°]	rps [ot/s]	Mz [Nm] <i>ROTOR_01</i>
1	2	0	0	0,067612290
2	5	0	0	0,428600450
3	10	0	0	1,811204016



Obr. 60. Trajektorie proudění větru při rychlosti 2 m/s u rotoru 1



Obr. 61. Trajektorie proudění větru při rychlosti 5 m/s u rotoru 1



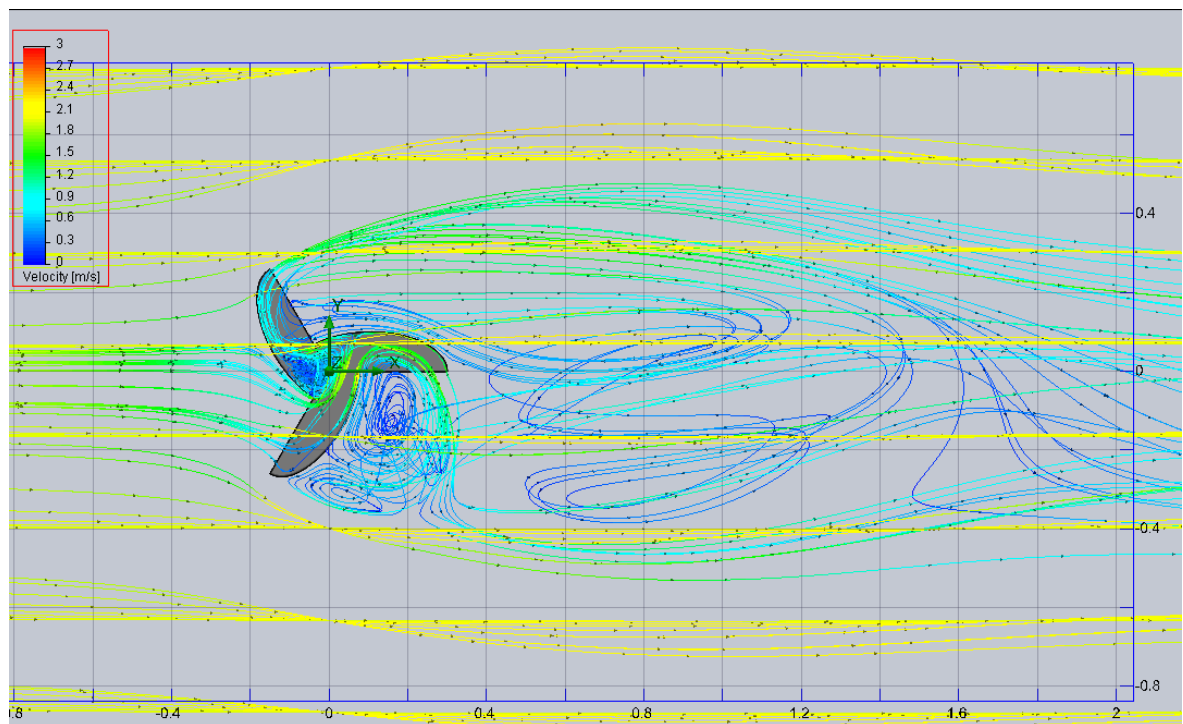
Obr. 62. Trajektorie proudění větru při 10 m/s u rotoru 1

Při rychlosti 10m/s dochází za tímto rotorem k výraznému vyhnutí proudu vzduchu a rychlejšímu nabírání na rychlosti.

ROTOR 2

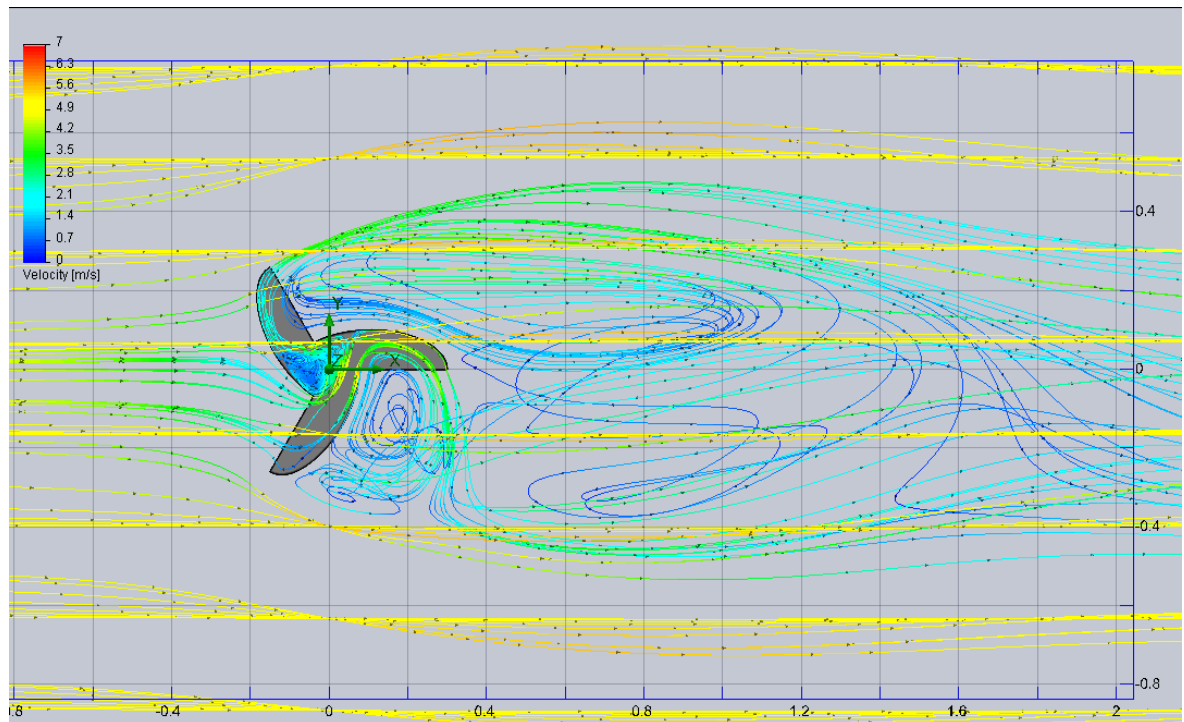
Tabulka 11. Rotor 2

	v(air) [m/s]	α [°]	rps [ot/s]	Mz [Nm] <i>ROTOR_02</i>
1	2	0	0	0,066797915
2	5	0	0	0,421928693
3	10	0	0	1,705161845

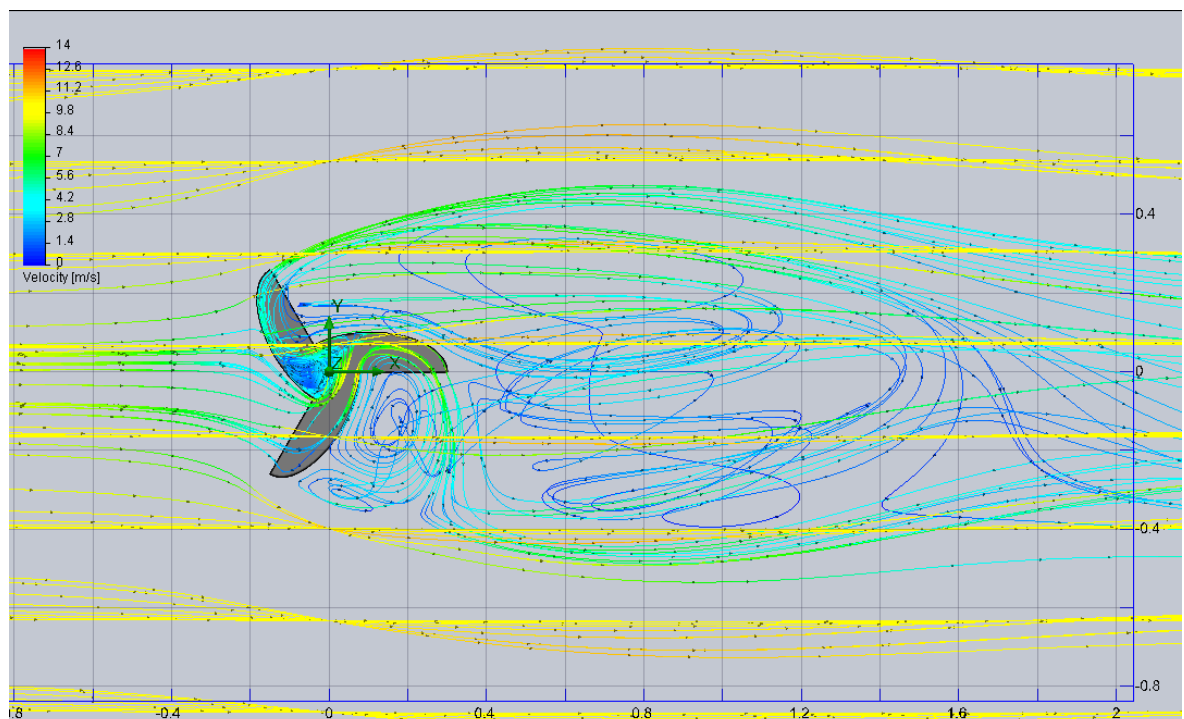


Obr. 63. Trajektorie proudění větru při rychlosti 2 m/s u rotoru 2

Při rychlosti 2m/s vznikají znatelné vzduchové víry na stěnách rotoru.



Obr. 64. Trajektorie proudění větru při rychlosti 5 m/s u rotoru 2

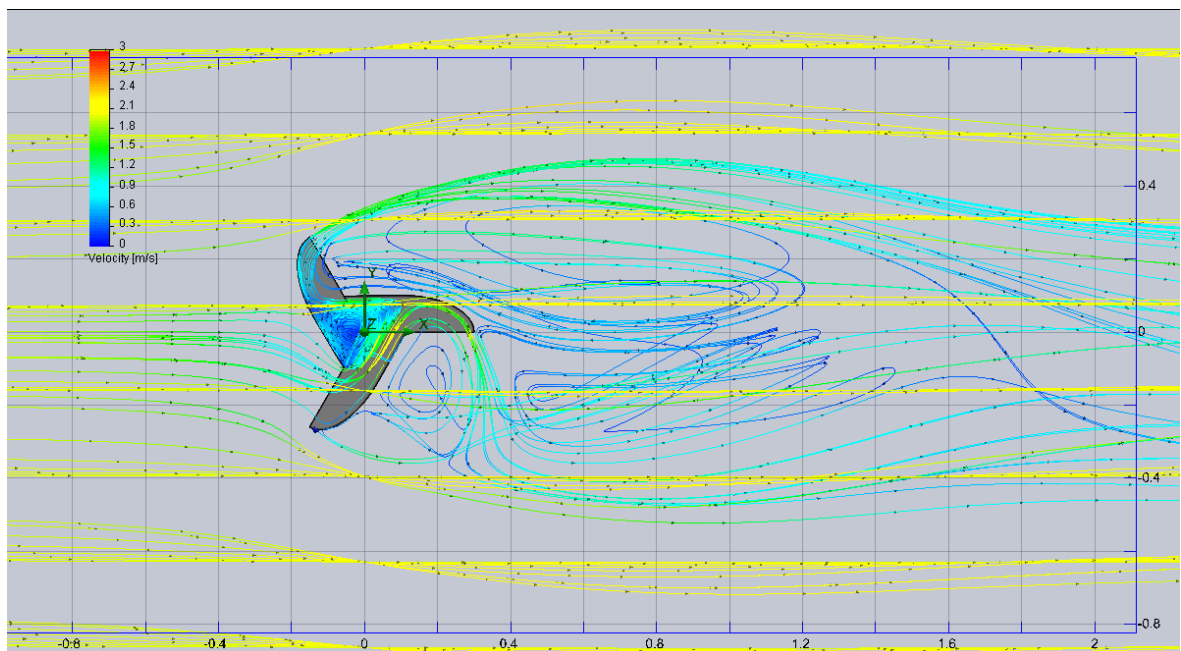


Obr. 65. Trajektorie proudění větru při rychlosti 10 m/s u rotoru 2

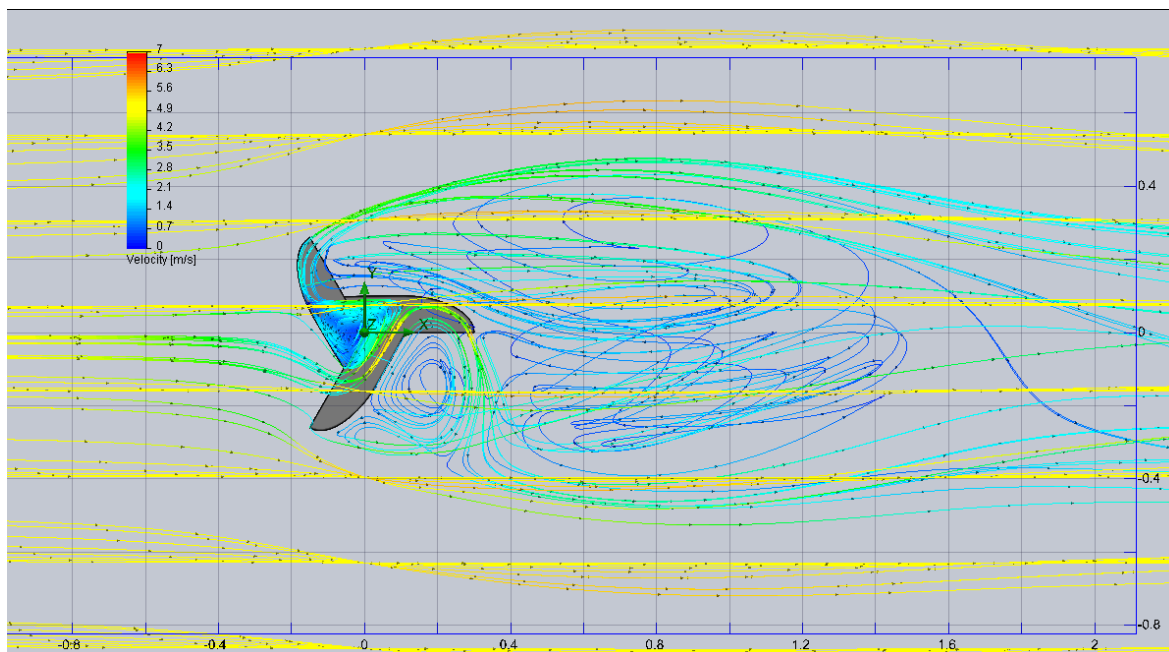
ROTOR 3

Tabulka 12. Rotor 3

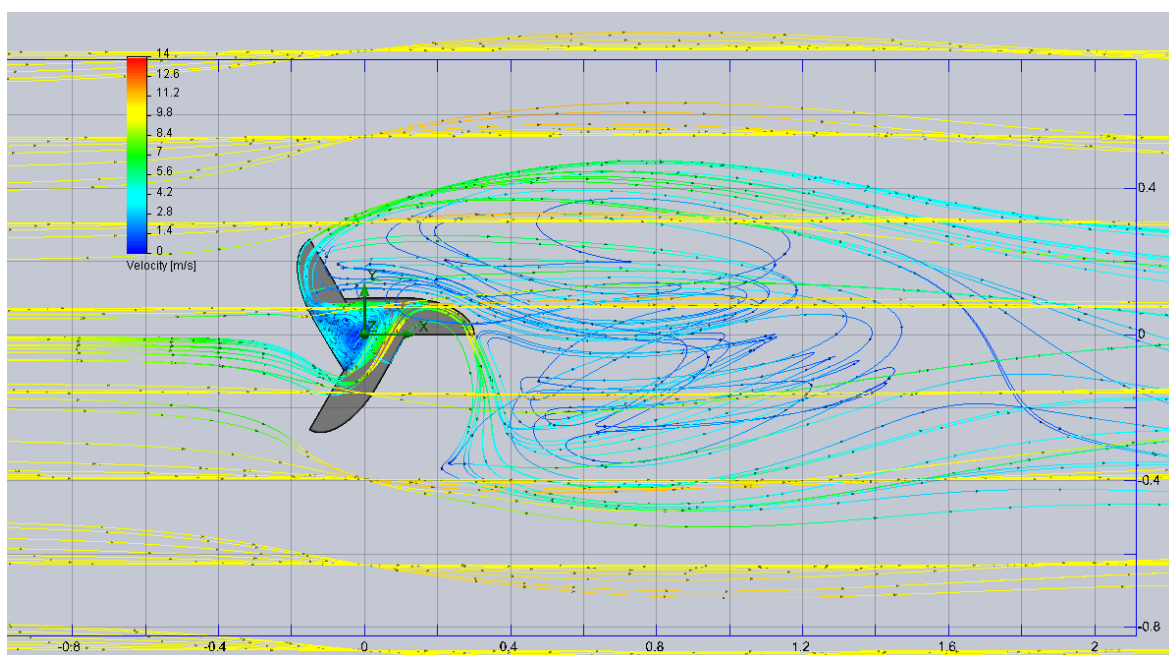
	v(air) [m/s]	α [°]	rps [ot/s]	Mz [Nm] ROTOR_03
1	2	0	0	0,066858315
2	5	0	0	0,421440127
3	10	0	0	1,701759449



Obr. 66. Trajektorie proudění větru při rychlosti 2 m/s u rotoru 3



Obr. 67. Trajektorie proudění větru při rychlosti 5 m/s u rotoru 3



Obr. 68. Trajektorie proudění větru při rychlosti 10 m/s u rotoru 3

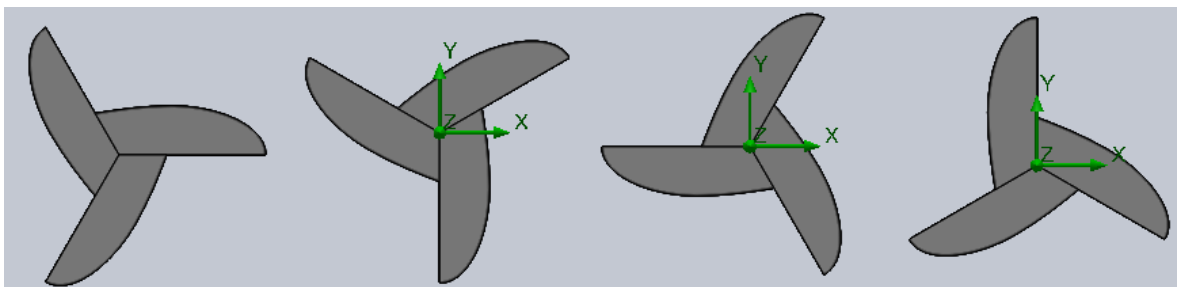
Z obrázku trajektorií je patrné, že za rotorem vzniká turbulentní oblast proudění větru, která se až ve vzdálenosti přibližně 2 metrů mění opět na proudění laminární, ale již o výrazně nižší rychlosti větru. Z tohoto důvodu je třeba důkladně zvážit vzdálenost případných dalších rotorů, aby nedocházelo ke snížení jejich účinnosti.

Tabulka 13. Porovnání momentů vzhledem k ose Z při nulovém natočení

	v(air) [m/s]	α [°]	rps [ot/s]	Mz [Nm] ROTOR_01	Mz [Nm] ROTOR_02	Mz [Nm] ROTOR_03
1	2	0	0	0,067612290	0,066797915	0,066858315
2	5	0	0	0,428600450	0,421928693	0,421440127
3	10	0	0	1,811204016	1,705161845	1,701759449

Z tabulky vyplývá, že při nulovém natočení bez působení otáček dosahuje rotor 1 vyšších kroutících momentů vzhledem k ose Z oproti rotorům 2 a 3. Rozdíl se pohybuje v jednotkách procent.

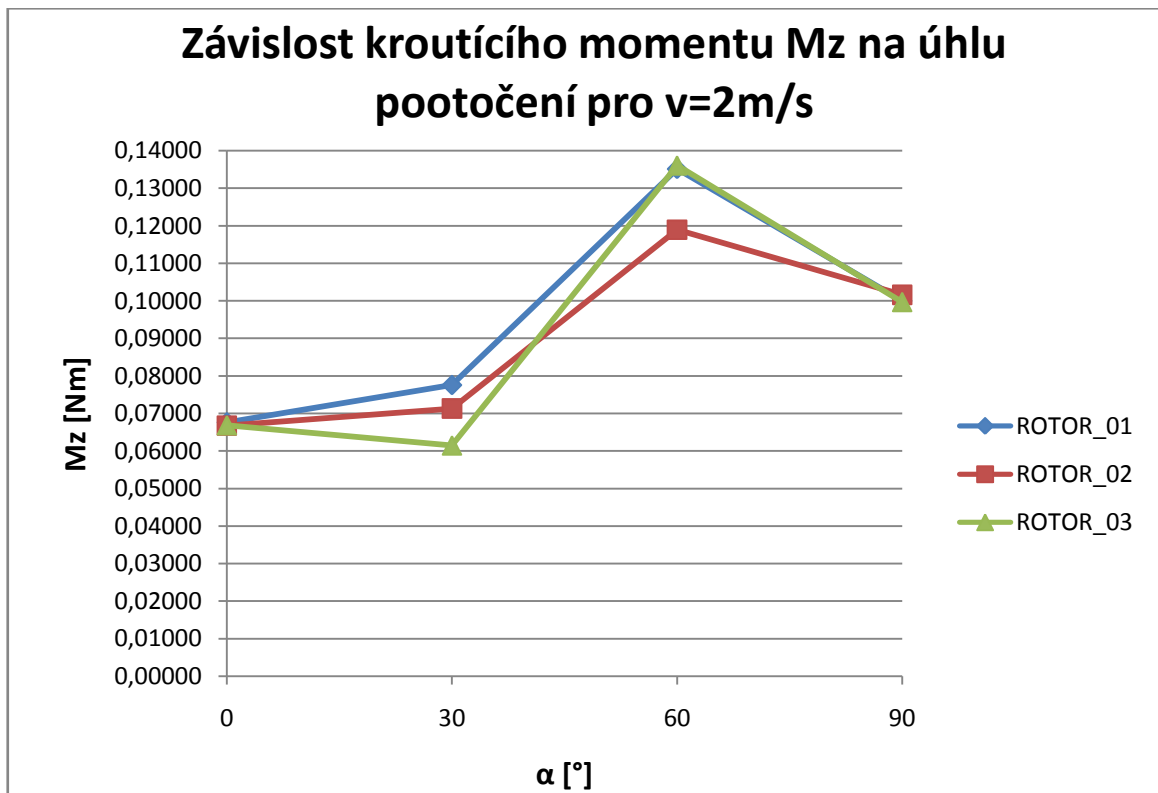
U dalších simulací byly rotory pootočený o 30°, 60° a 90°.



Obr. 69. Pootočení rotoru při 0°, 30°, 60° a 90°

Tabulka 14. Pootočené rotory pro konstantní rychlost $v = 2\text{m/s}$

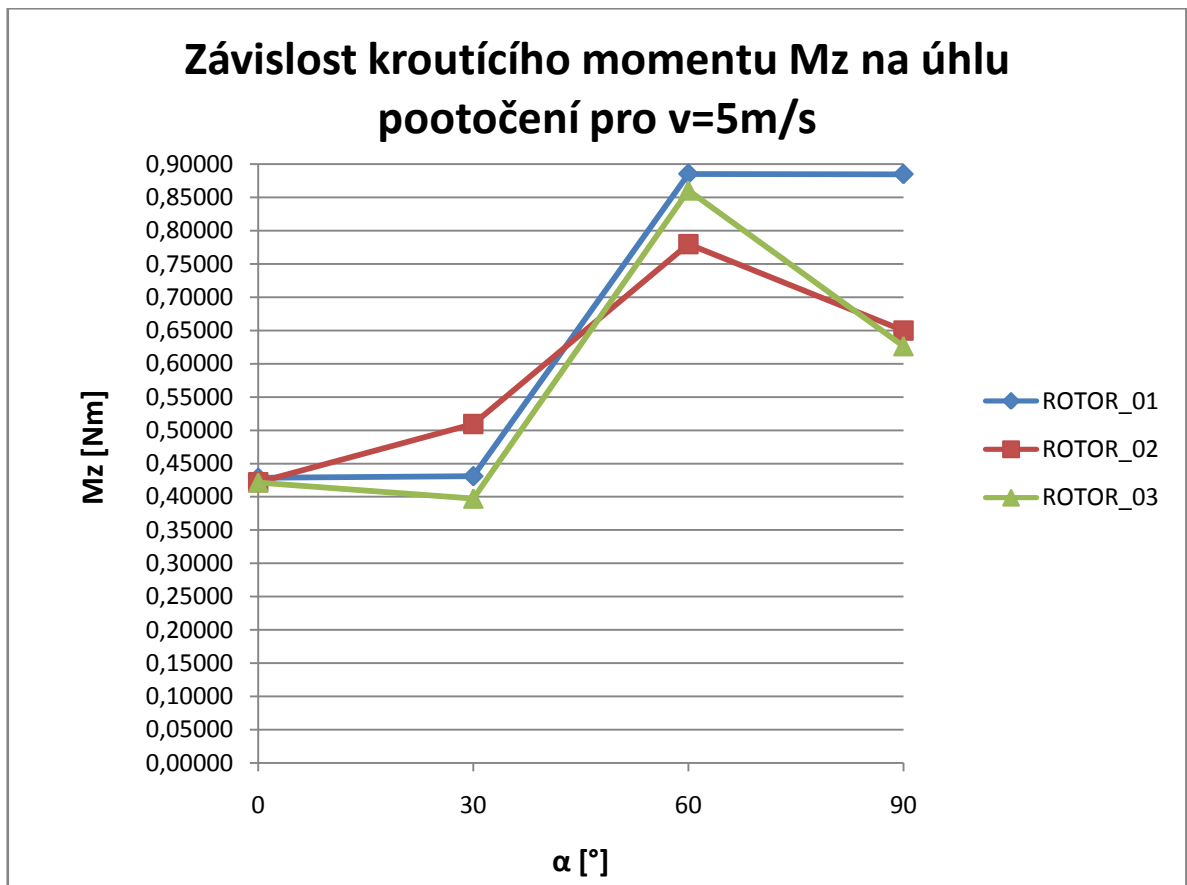
ROTOR_i	α [0°]	α [30°]	α [60°]	α [90°]
ROTOR_01	0,067612290	0,077556592	0,135198309	0,100004789
ROTOR_02	0,066797915	0,071351258	0,118949291	0,101626754
ROTOR_03	0,066858315	0,061495036	0,136091237	0,099710977



Obr. 70. Závislost kroučícího momentu M_z na úhlu pootočení pro konstantní rychlost $v=2\text{m/s}$

Tabulka 15. Pootočené rotory pro konstantní rychlost $v = 5\text{m/s}$

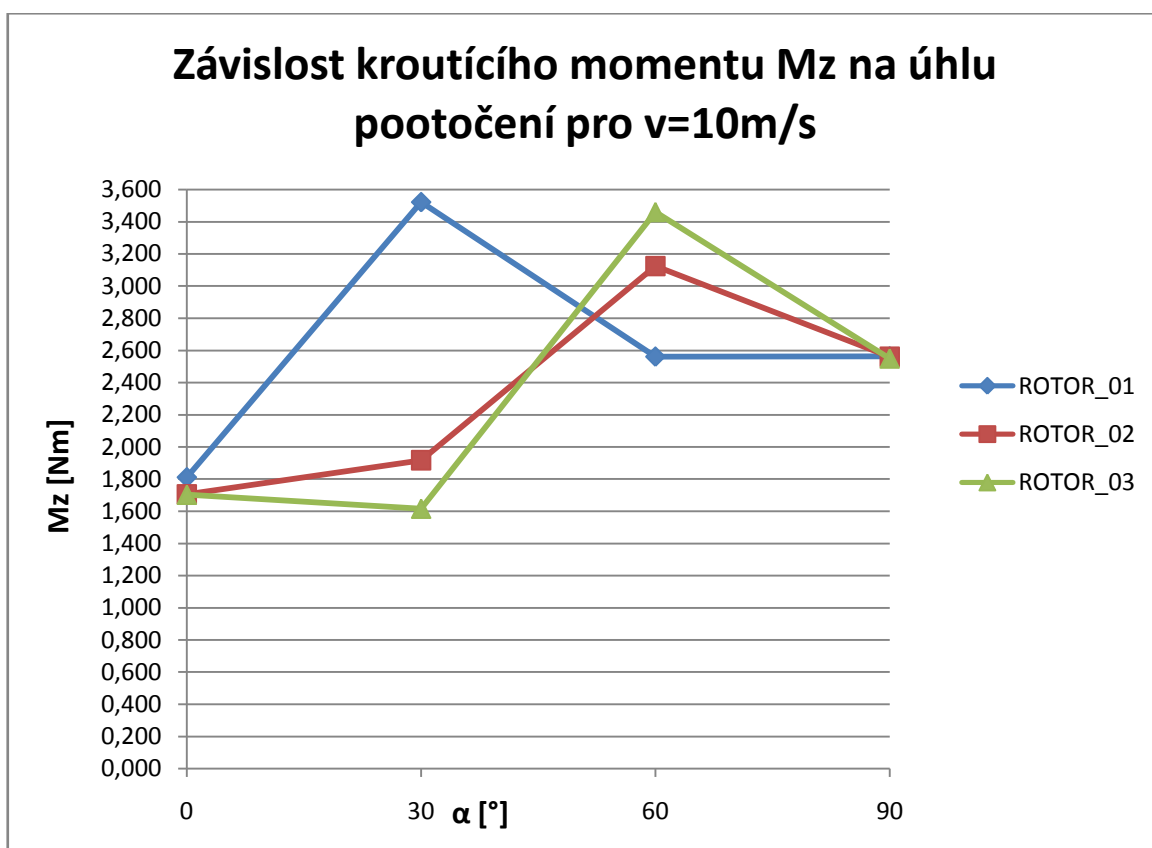
ROTOR_i	α [0°]	α [30°]	α [60°]	α [90°]
ROTOR_01	0,428600450	0,430966964	0,885330876	0,884888229
ROTOR_02	0,421928693	0,509449685	0,779653000	0,649938697
ROTOR_03	0,421440127	0,397219195	0,860359948	0,626300188



Obr. 71. Závislost kroučícího momentu M_z na úhlu pootočení pro konstantní rychlost $v=5\text{m/s}$

Tabulka 16. Pootočené rotory pro konstantní rychlost $v = 10\text{m/s}$

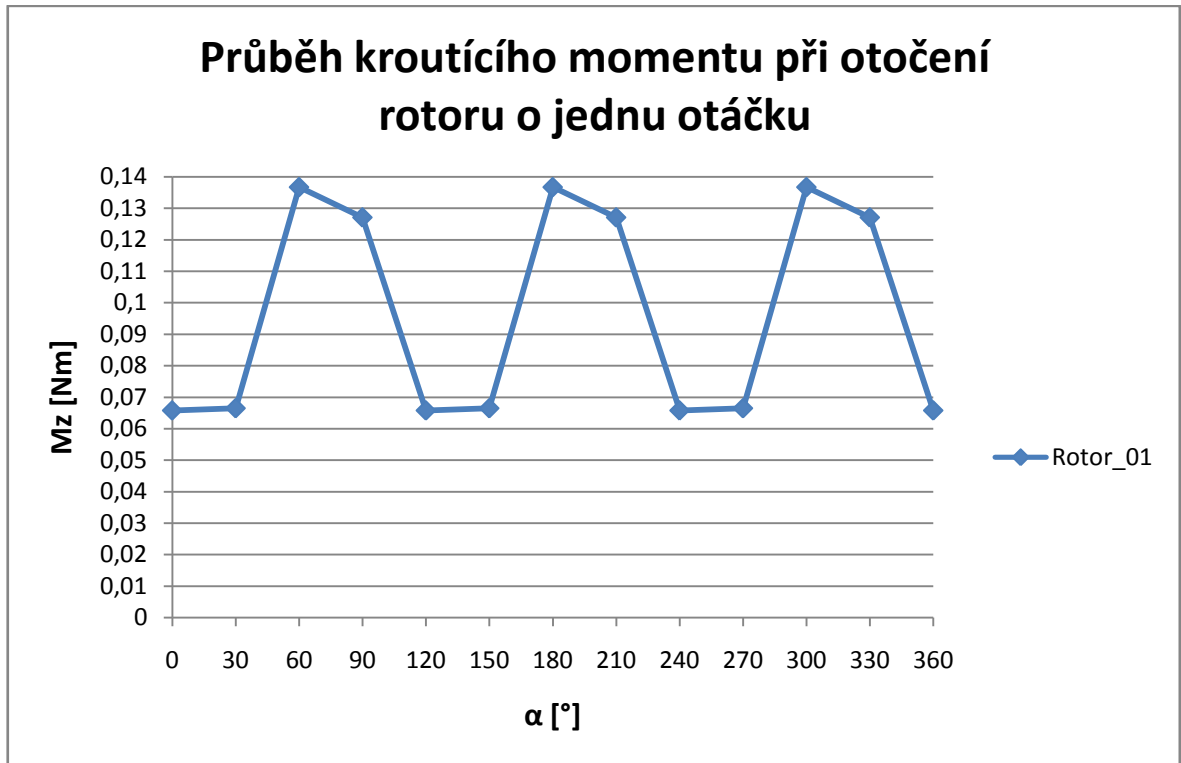
ROTOR_i	α [0°]	α [30°]	α [60°]	α [90°]
ROTOR_01	1,811204016	3,520866548	2,560751550	2,561777985
ROTOR_02	1,705161845	1,916377916	3,123005672	2,559559825
ROTOR_03	1,701759449	1,615002519	3,459464625	2,548809652



Obr. 72. Závislost kroučícího momentu M_z na úhlu pootočení pro konstantní rychlost $v=10\text{m/s}$

Trend nárůstu kroučícího momentu v závislosti na pootočení rotoru odpovídá předpokladům z literatury.

Z grafů je patrné, že je nutno zpřesnit měřítko, provádět výpočet minimálně po 10° pootočení, aby bylo dosaženo většího rozsahu výsledků a tím větší přesnosti výpočtů.

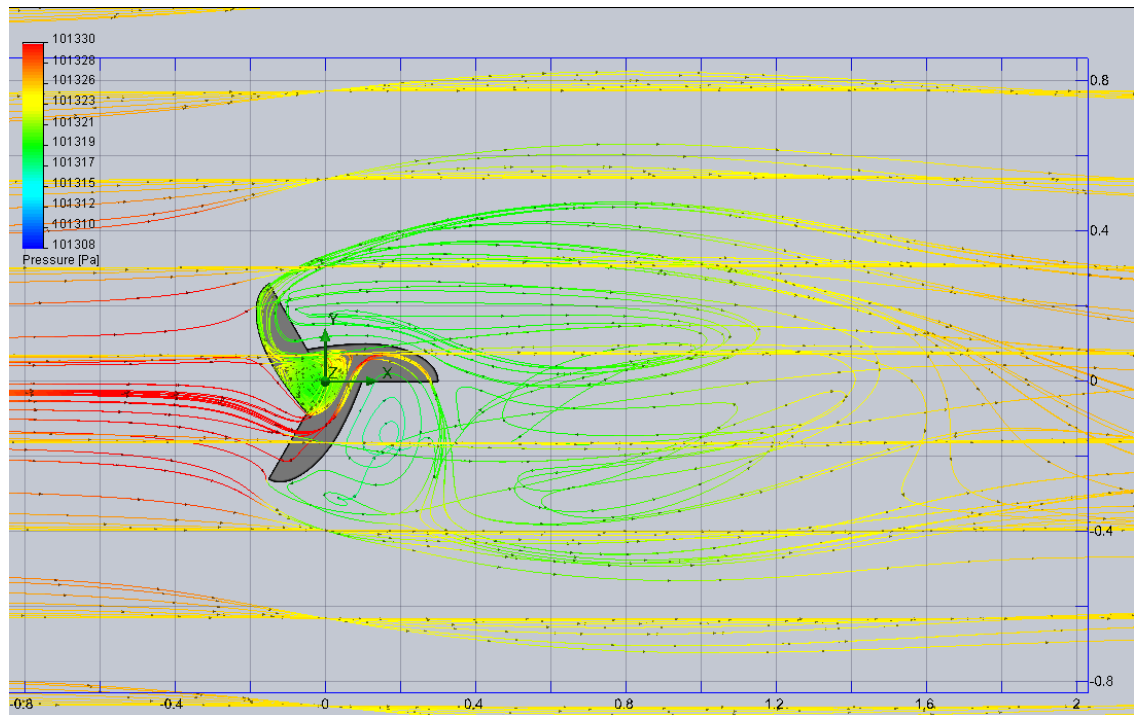


*Obr. 73. Průběh kroutícího momentu při otočení rotoru o jednu otáčku (360°)
pro rotor 1 při rychlosti 5m/s*

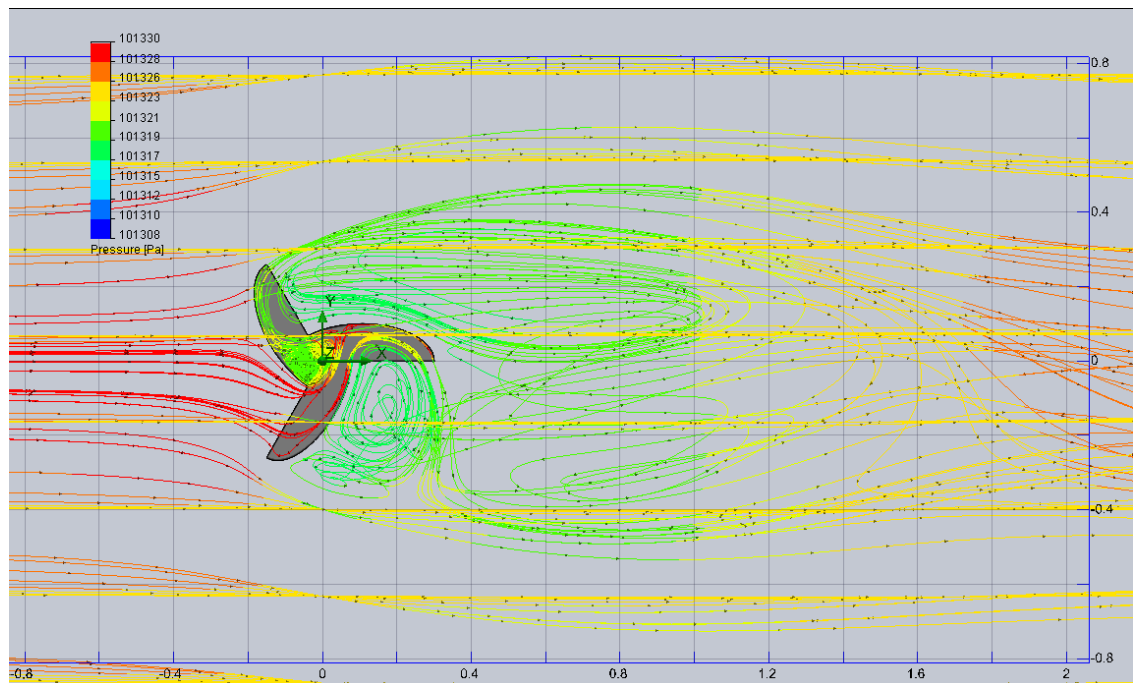
Z obr. 73 vyplývá, že hodnota kroutícího momentu se výrazně mění – pokles až o 50% oproti maximální hodnotě.

Při pootočení rotoru o jednu celou otáčku (o 360°) vznikají na křivce tři maxima a minima z čehož předpokládáme, že dochází k ohybovému namáhání rotoru i lopatek a ke vzniku nerovnoměrného torzního namáhání.

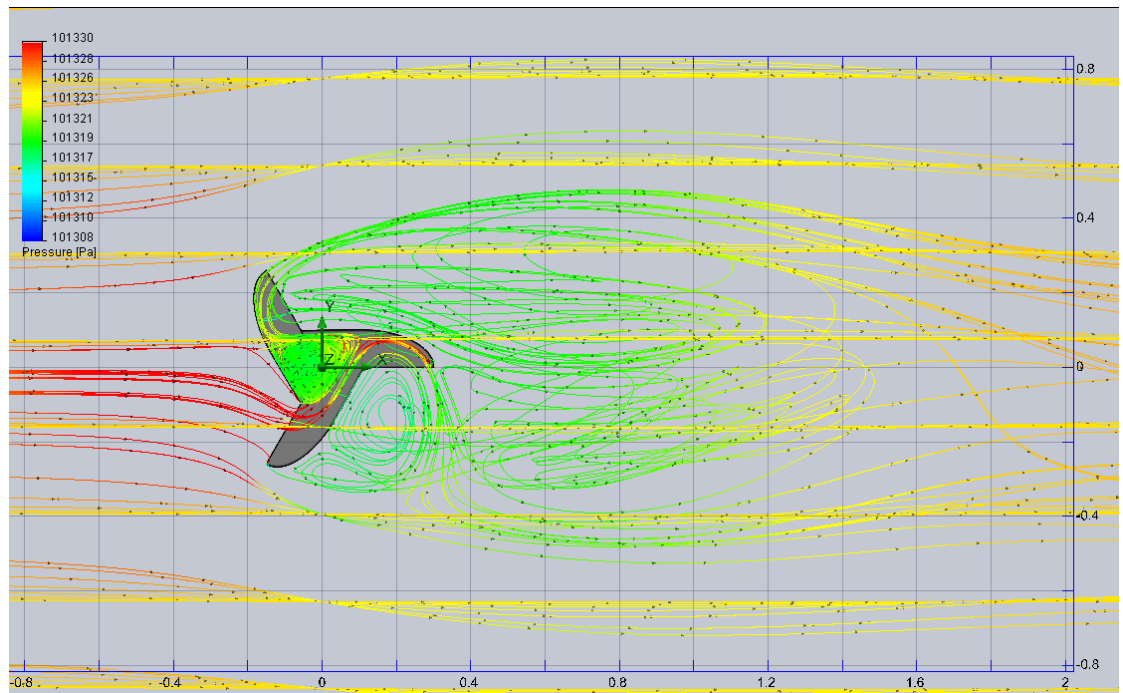
Rozložení tlaků při nulovém natočení rotorů a konstantní rychlosti proudění větru 5m/s.



Obr. 74. Rozložení tlaků u rotoru 1



Obr. 75. Rozložení tlaků u rotoru 2

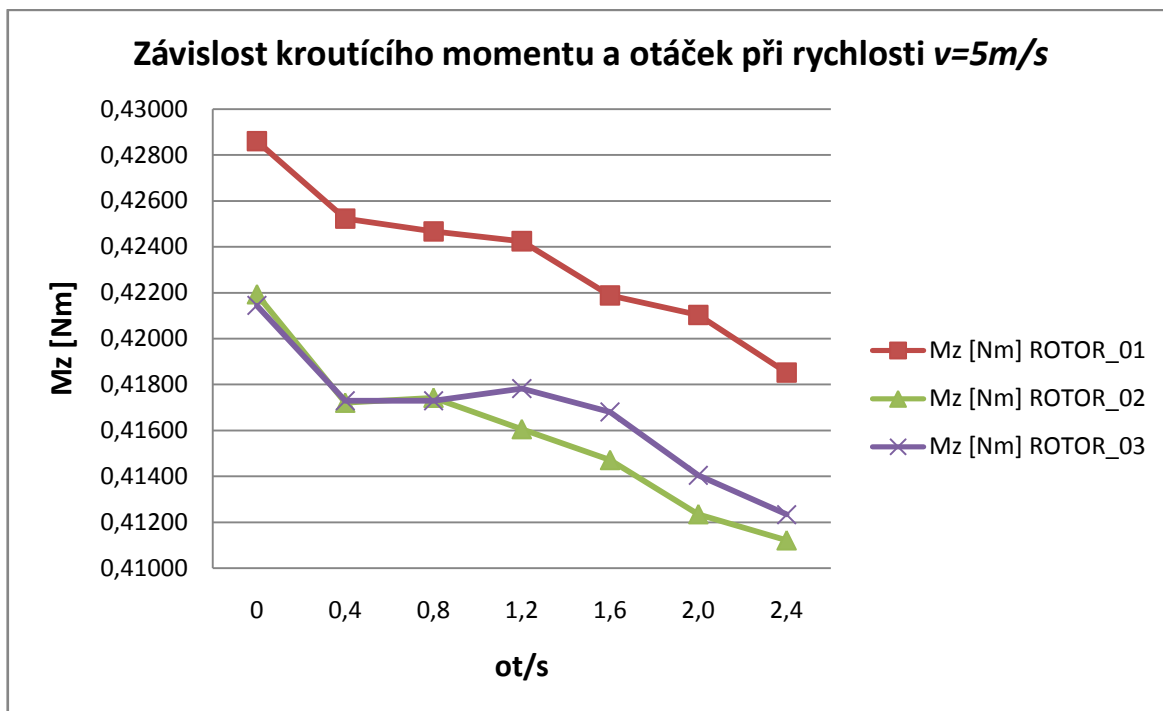


Obr. 76. Rozložení tlaků u rotoru 3

Rozložení tlaků odpovídá předpokladům, že před rotorem jsou působící tlaky větší než za rotorem, kde se zmenšují.

5.4.2 Výpočet rotorů s nastavenými otáčkami

Při konstantní rychlosti proudění větru se vzrůstajícím počtem otáček dochází ke klesání kroutícího momentu vzhledem k ose Z.



Obr. 77. Závislost kroutícího momentu a otáček při konstantní rychlosti proudění větru $v=5\text{m/s}$ a natočení rotoru 0°

Z grafu je patrné, že trend klesání momentů v závislosti na otáčkách je správný, ale je potřeba to ověřit přesnějšími výpočty. Při nulových otáčkách by měl moment vykazovat nejvyšší hodnoty, zatímco při nejvyšších otáčkách by měl moment klesnout na 0.

Předpokládáme, že rychlost 5m/s bude ve vnitrozemském klima České republiky zároveň rychlostí pracovní, tudíž se zaměříme na porovnávání vlastností zkoušených rotorů právě při této rychlosti.

Porovnání hodnot kroutících momentů při nulovém natočení rotorů s nastavenými otáčkami pro tři různé rychlosti proudění větru.

Tabulka 17. Kroutící momenty v závislosti na *ot/s* při nulovém natočení rotoru

	v(air) [m/s]	α [°]	rps [ot/s]	Mz [Nm] ROTOR_01	Mz [Nm] ROTOR_02	Mz [Nm] ROTOR_03
1	2	0	0,16	0,067268867	0,066242576	0,066269262
2	2	0	0,32	0,066995914	0,066069884	0,066028029
3	2	0	0,48	0,066833286	0,065728684	0,065988086
4	2	0	0,64	0,066750097	0,065698116	0,065687219
5	2	0	0,80	0,066322723	0,065054203	0,064547257
6	2	0	0,96	0,065767661	0,064738618	0,064792870
7	5	0	0,4	0,425228410	0,417205697	0,418494565
8	5	0	0,8	0,424673761	0,417421814	0,417292568
9	5	0	1,2	0,424246200	0,416054406	0,417816863
10	5	0	1,6	0,421886617	0,414707983	0,416806173
11	5	0	2,0	0,421031410	0,412348176	0,414043538
12	5	0	2,4	0,418526926	0,411211024	0,412334885
13	10	0	0,8	1,716819958	1,687785251	1,687698010
14	10	0	1,6	1,712751703	1,676421640	1,683448145
15	10	0	2,4	1,711719265	1,682225921	1,685572639
16	10	0	3,2	1,702639034	1,675332086	1,679540138
17	10	0	4,0	1,701098123	1,668971677	1,683625862
18	10	0	4,8	1,698685538	1,660909298	1,672941189

Při nulovém natočení je z tabulky 17 patrné, že rotor 1 dosahuje nejvyšších kroutících momentů. Z porovnání rotorů 2 a 3 vychází lépe rotor s plně otevřenou odtokovou hranou (rotor 3).

V následujících tabulkách jsou uvedeny hodnoty momentů vzhledem k úhlu pootočení, vždy pro konstantní rychlost proudění větru.

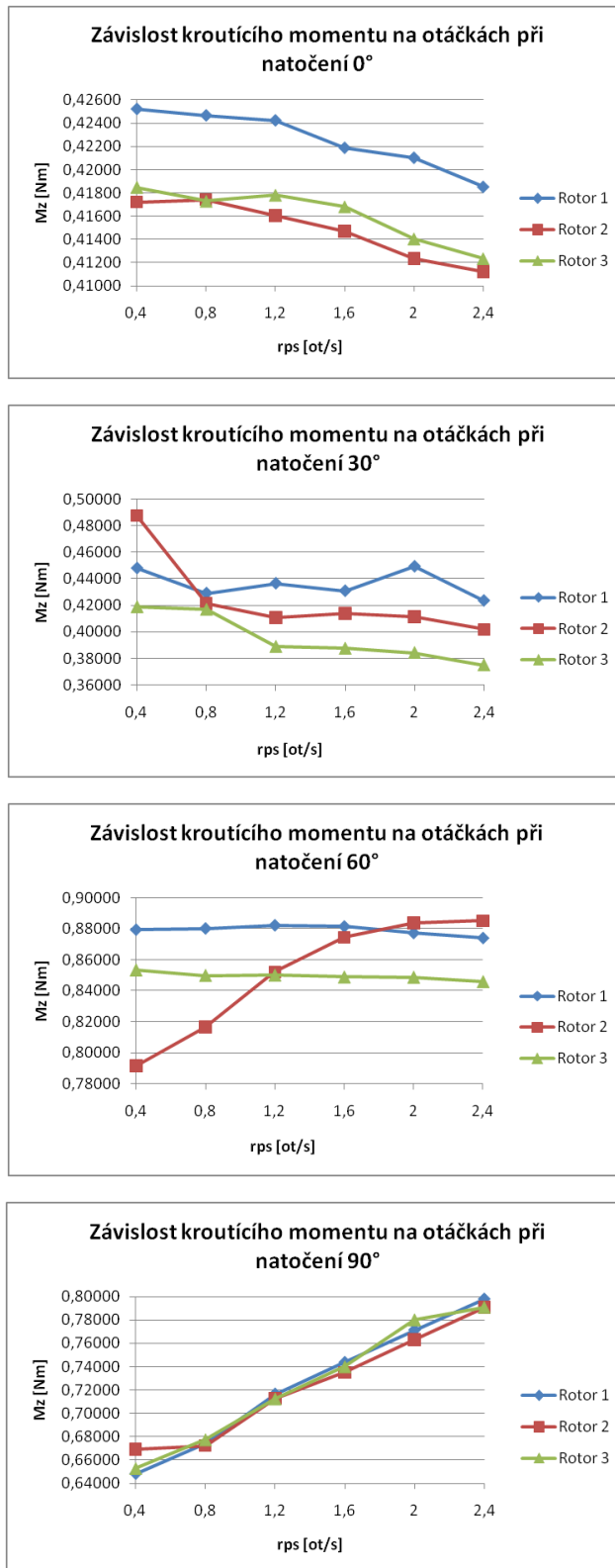
Tabulka 18. Kroucí momenty v závislosti na otáčkách při rychlosti větru $v=2\text{m/s}$

	$v(\text{air})$ [m/s]	α [°]	rps [ot/s]	M_z [Nm] <i>ROTOR_01</i>	M_z [Nm] <i>ROTOR_02</i>	M_z [Nm] <i>ROTOR_03</i>
1	2	0	0,16	0,067268867	0,066242576	0,066269262
2	2	0	0,32	0,066995914	0,066069884	0,066028029
3	2	0	0,48	0,066833286	0,065728684	0,065988086
4	2	0	0,64	0,066750097	0,065698116	0,065687219
5	2	0	0,80	0,066322723	0,065054203	0,064547257
6	2	0	0,96	0,065767661	0,064738618	0,064792870
7	2	30	0,16	0,073001631	0,070599260	0,073562057
8	2	30	0,32	0,064878574	0,066138727	0,056483695
9	2	30	0,48	0,068098477	0,068536769	0,068609687
10	2	30	0,64	0,057147134	0,070634897	0,068189402
11	2	30	0,80	0,080907619	0,067004361	0,061062298
12	2	30	0,96	0,066474514	0,072740912	0,055631220
13	2	60	0,16	0,102666863	0,122001259	0,134217039
14	2	60	0,32	0,137986062	0,125333987	0,132642838
15	2	60	0,48	0,141959808	0,131296488	0,132276297
16	2	60	0,64	0,138289902	0,132766277	0,132611253
17	2	60	0,80	0,136142252	0,133858696	0,132556134
18	2	60	0,96	0,136717109	0,138105392	0,131613558
19	2	90	0,16	0,102944289	0,105711804	0,103880986
20	2	90	0,32	0,106104150	0,111398010	0,106898661
21	2	90	0,48	0,112094264	0,111615466	0,111712631
22	2	90	0,64	0,119553130	0,119843603	0,120133922
23	2	90	0,80	0,125223282	0,120342578	0,123504671
24	2	90	0,96	0,127099097	0,127790648	0,125016142

Tabulka 19. Kroucí momenty v závislosti na otáčkách při rychlosti větru $v=5m/s$

	v(air) [m/s]	α [°]	rps [ot/s]	Mz [Nm] ROTOR_01	Mz [Nm] ROTOR_02	Mz [Nm] ROTOR_03
1	5	0	0,4	0,425228410	0,417205697	0,418494565
2	5	0	0,8	0,424673761	0,417421814	0,417292568
3	5	0	1,2	0,424246200	0,416054406	0,417816863
4	5	0	1,6	0,421886617	0,414707983	0,416806173
5	5	0	2,0	0,421031410	0,412348176	0,414043538
6	5	0	2,4	0,418526926	0,411211024	0,412334885
7	5	30	0,4	0,447954859	0,487581062	0,418734354
8	5	30	0,8	0,429052309	0,421294052	0,416762741
9	5	30	1,2	0,436467294	0,410715461	0,388822321
10	5	30	1,6	0,430828686	0,414023068	0,387427955
11	5	30	2,0	0,449239768	0,411427811	0,384271540
12	5	30	2,4	0,423474207	0,401817003	0,374911291
13	5	60	0,4	0,879300781	0,791330570	0,853242759
14	5	60	0,8	0,880086685	0,816448466	0,849854444
15	5	60	1,2	0,882154778	0,852009712	0,850023557
16	5	60	1,6	0,881402583	0,874429003	0,848852625
17	5	60	2,0	0,877147510	0,883789857	0,848742687
18	5	60	2,4	0,873880459	0,885062027	0,845886213
19	5	90	0,4	0,648205494	0,669196517	0,652934359
20	5	90	0,8	0,674024800	0,672336531	0,677557430
21	5	90	1,2	0,716403446	0,712829994	0,712527444
22	5	90	1,6	0,743523237	0,735105058	0,740062010
23	5	90	2,0	0,771186021	0,762927752	0,780259118
24	5	90	2,4	0,797728796	0,790732154	0,791119954

V grafech jsou znázorněny kroučící momenty v závislosti na otáčkách při konstantní rychlosti proudění větru $v=5\text{m/s}$.



Obr. 78. Porovnání kroučícího momentu v závislosti na otáčkách při pootočení rotoru

Tabulka 20. Kroucí momenty v závislosti na otáčkách při rychlosti větru $v=10\text{m/s}$

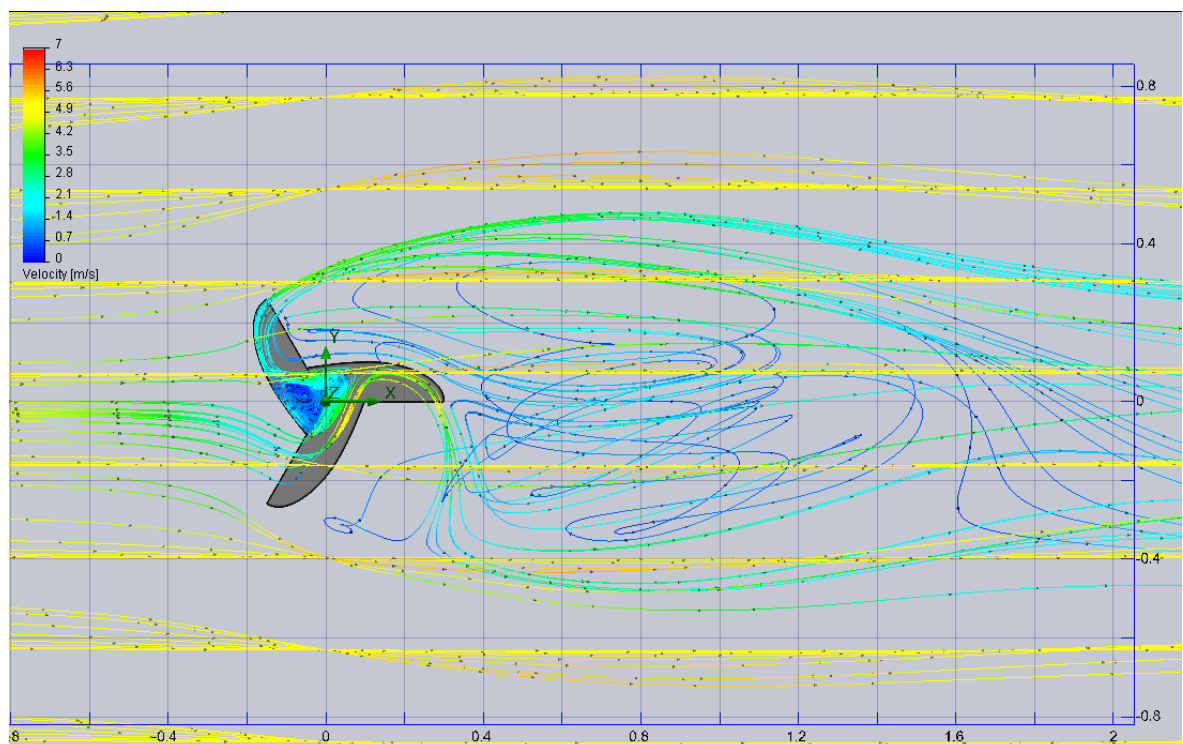
	v(air) [m/s]	α [°]	rps [ot/s]	Mz [Nm] ROTOR_01	Mz [Nm] ROTOR_02	Mz [Nm] ROTOR_03
1	10	0	0,8	1,716819958	1,687785251	1,687698010
2	10	0	1,6	1,712751703	1,676421640	1,683448145
3	10	0	2,4	1,711719265	1,682225921	1,685572639
4	10	0	3,2	1,702639034	1,675332086	1,679540138
5	10	0	4,0	1,701098123	1,668971677	1,683625862
6	10	0	4,8	1,698685538	1,660909298	1,672941189
7	10	30	0,8	3,532663001	2,015208934	1,591467989
8	10	30	1,6	1,774878200	1,995692845	1,569763006
9	10	30	2,4	1,935584534	1,908951762	1,550792615
10	10	30	3,2	1,943139614	1,945009151	1,564421305
11	10	30	4,0	1,910521503	1,778126044	1,559869394
12	10	30	4,8	1,796982815	1,677044333	1,576020938
13	10	60	0,8	3,535628600	3,206777028	3,434087717
14	10	60	1,6	3,530889799	3,283380901	3,414374896
15	10	60	2,4	3,545843309	3,443591890	3,432438528
16	10	60	3,2	3,551091338	3,540522683	3,441739587
17	10	60	4,0	3,544809783	3,570039511	3,437521440
18	10	60	4,8	3,530816928	3,577010236	3,416085729
19	10	90	0,8	2,642036338	2,644032789	2,648187165
20	10	90	1,6	2,740107738	2,768544522	2,762047402
21	10	90	2,4	2,886930623	2,916570266	2,910276308
22	10	90	3,2	2,982671678	3,016496918	3,024524199
23	10	90	4,0	3,174311747	3,102704023	3,084497572
24	10	90	4,8	3,276710649	3,206904931	3,201738955

Z tabulek je patrné, že rotor 1 vykazuje stabilně nejvyšší kroutící momenty vzhledem k ose Z. Při rychlosti 2m/s jsou rozdíly mezi momenty u rotorů 2 a 3 téměř nepatrné. Se vzrůstající rychlostí dochází mezi těmito variantami ke kolísání hodnot, a proto nelze přesně určit, který z rotorů dosahuje lepších výsledků.

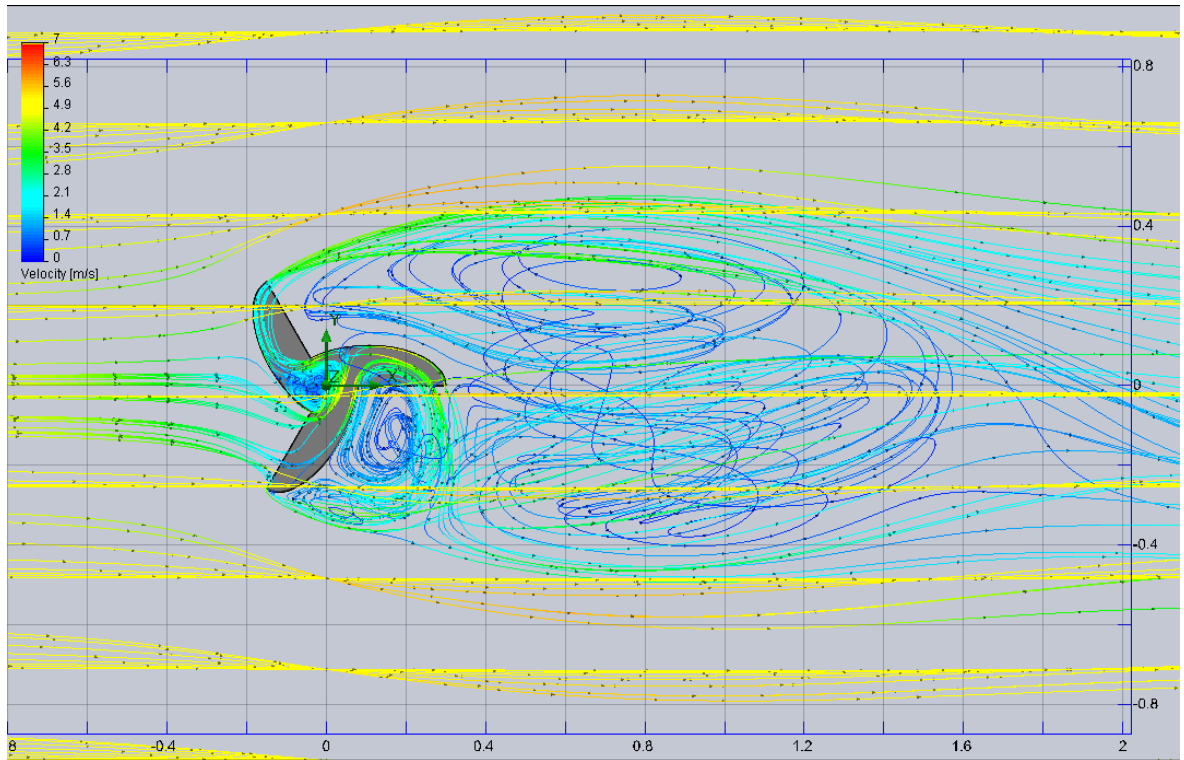
V příloze jsou uvedeny další tabulky závislosti kroutícího momentu na otáčkách, rychlostech proudění, úhlech pootočení a variantách rotorů.

Porovnání trajektorií proudění větrů u rotorů 1, 2 a 3 při konstantní rychlosti $v=5\text{m/s}$ a jejich natočení po 30° pro střední otáčky 1,6ot/s.

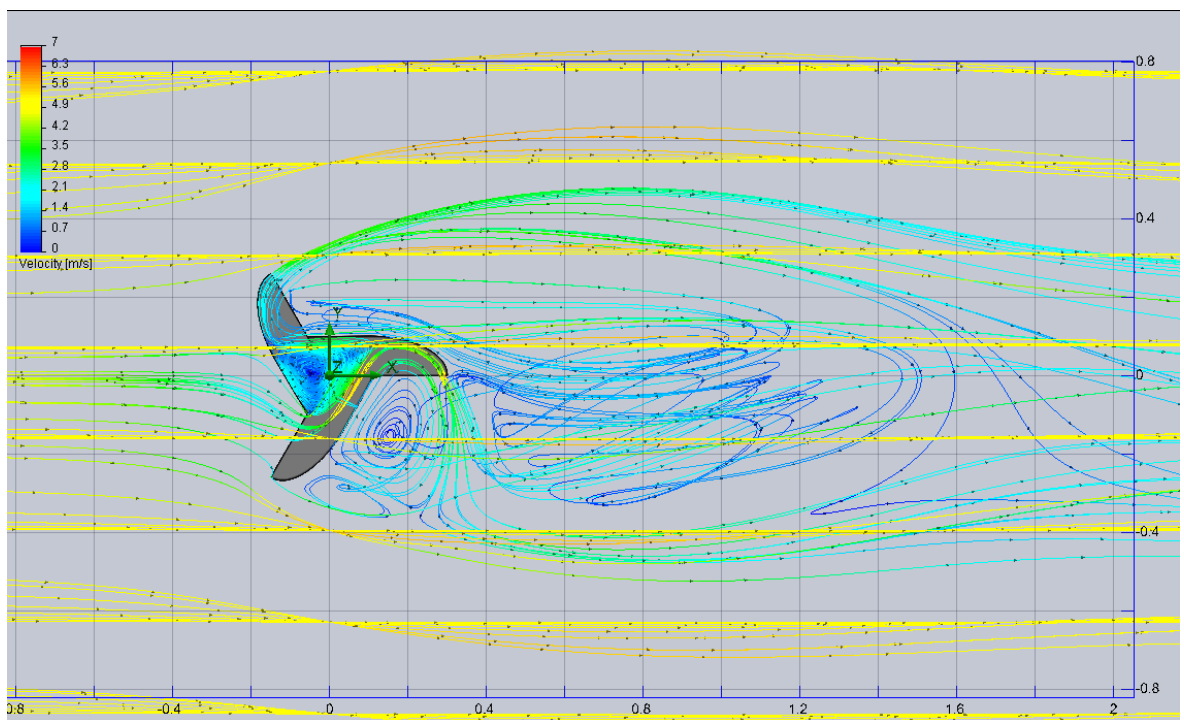
Natočení 0°



Obr. 79. Trajektorie proudění větru rotoru 1 při natočení 0°



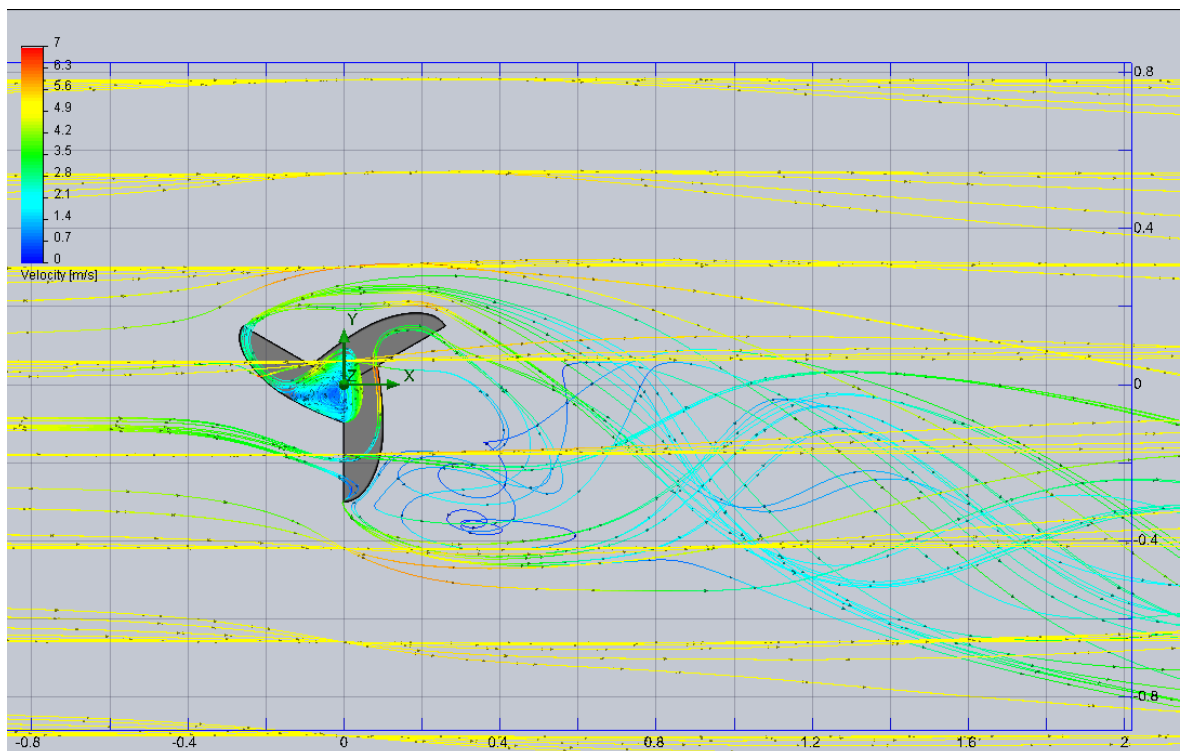
Obr. 80. Trajektorie proudění větru rotoru 2 při natočení 0°



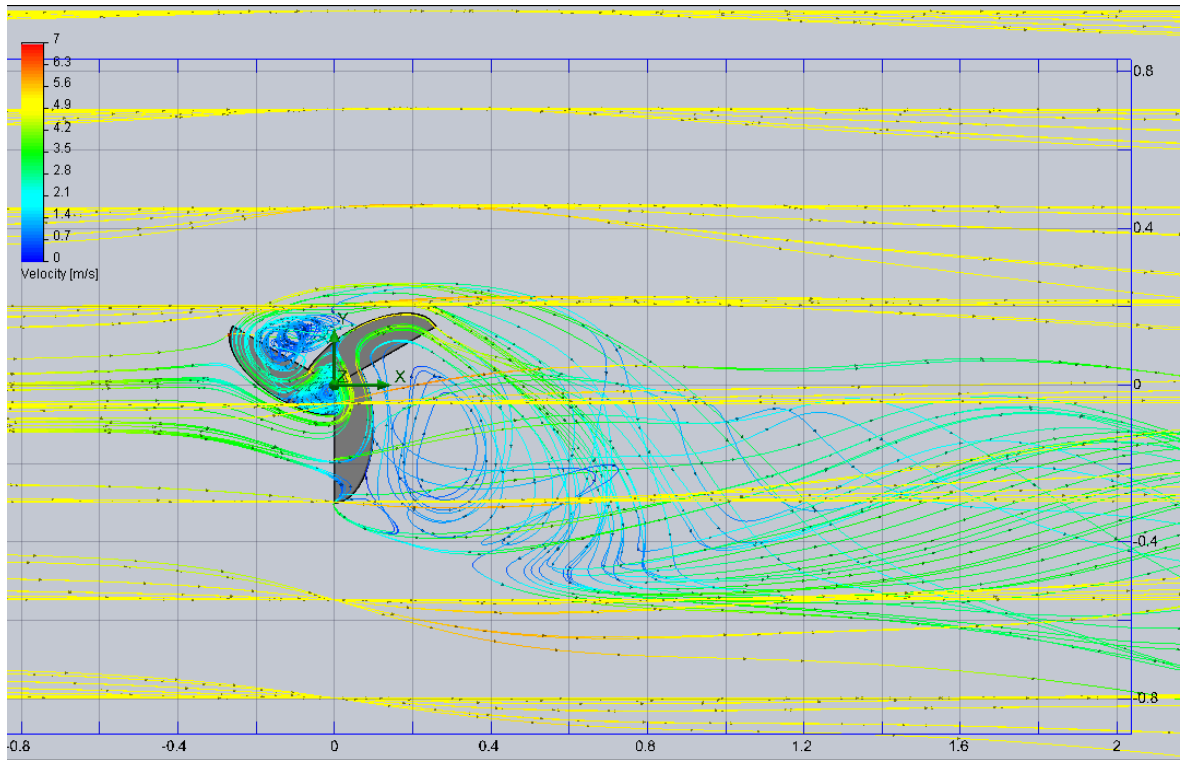
Obr. 81. Trajektorie proudění větru rotoru 3 při natočení 0°

Při nulovém natočení a středních otáčkách vzniká při konstantní rychlosti větru 5m/s za rotory velké turbulentní proudění, které je nejvíce patrné u rotoru 2. Z tohoto důvodu je důležité zvážit jeho využití v oblasti, kde počítáme s možností výstavby několika rotorů za sebou.

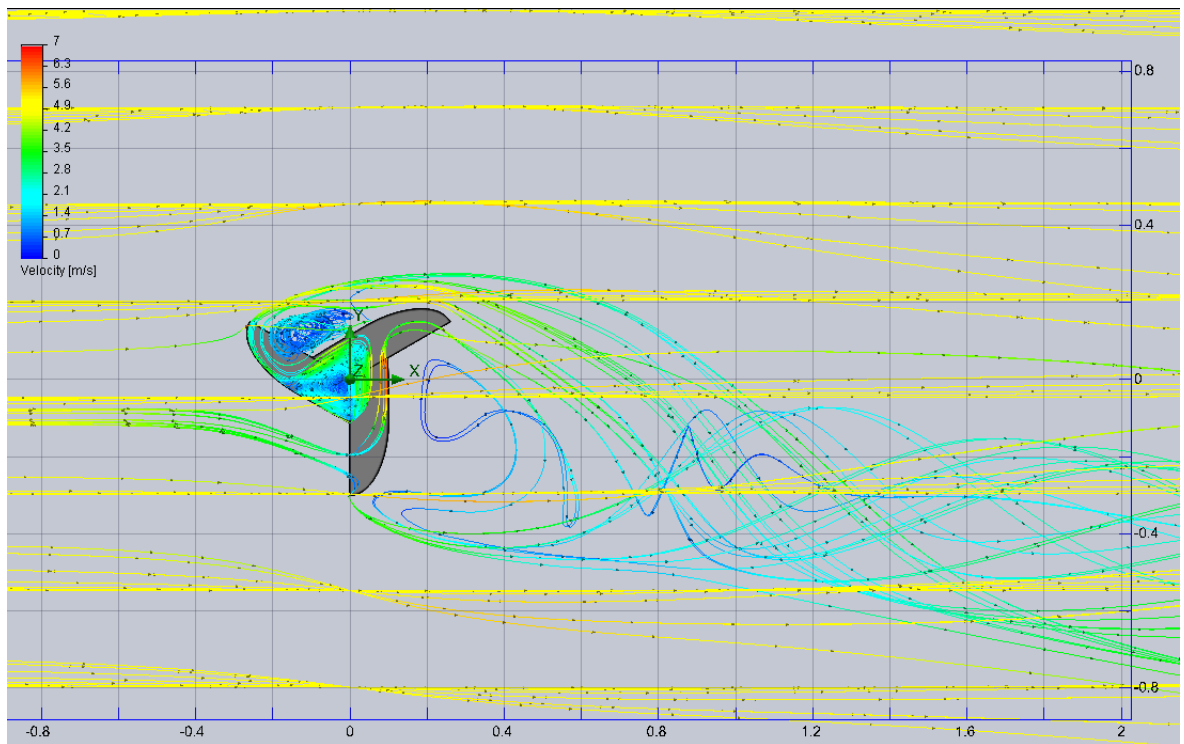
Natočení 30°



Obr. 82. Trajektorie proudění větru rotoru 1 při natočení 30°



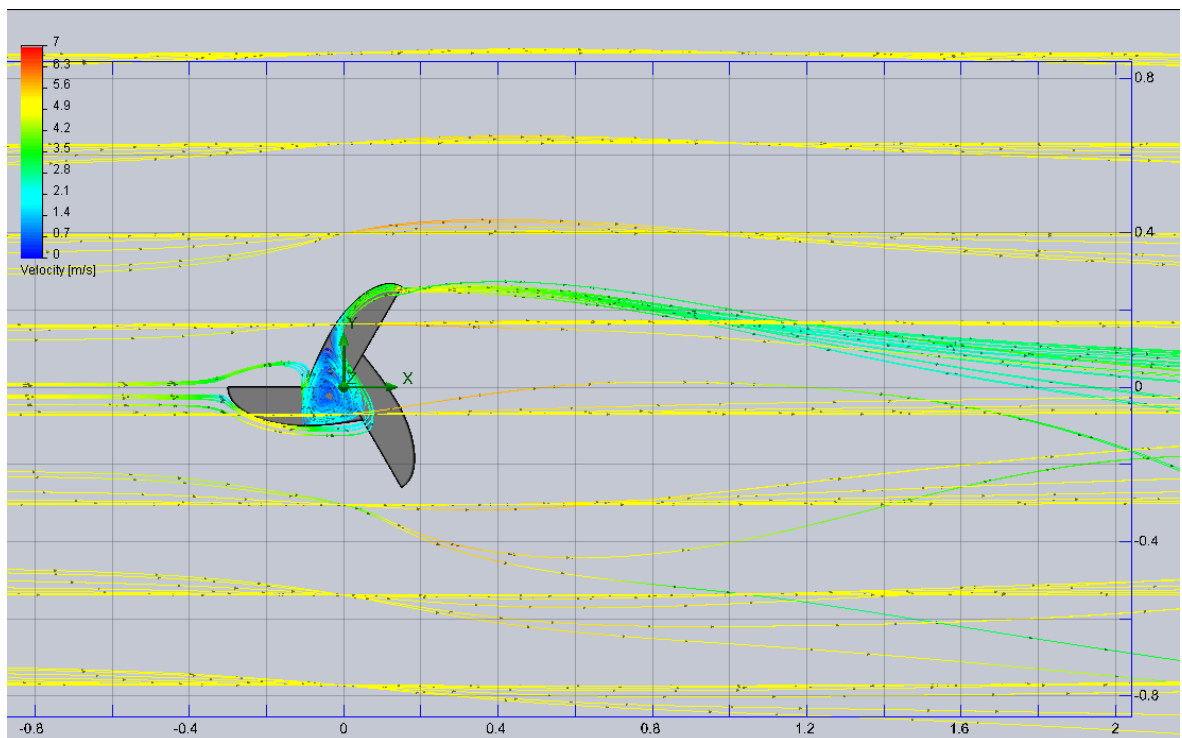
Obr. 83. Trajektorie proudění větru rotoru 2 při natočení 30°



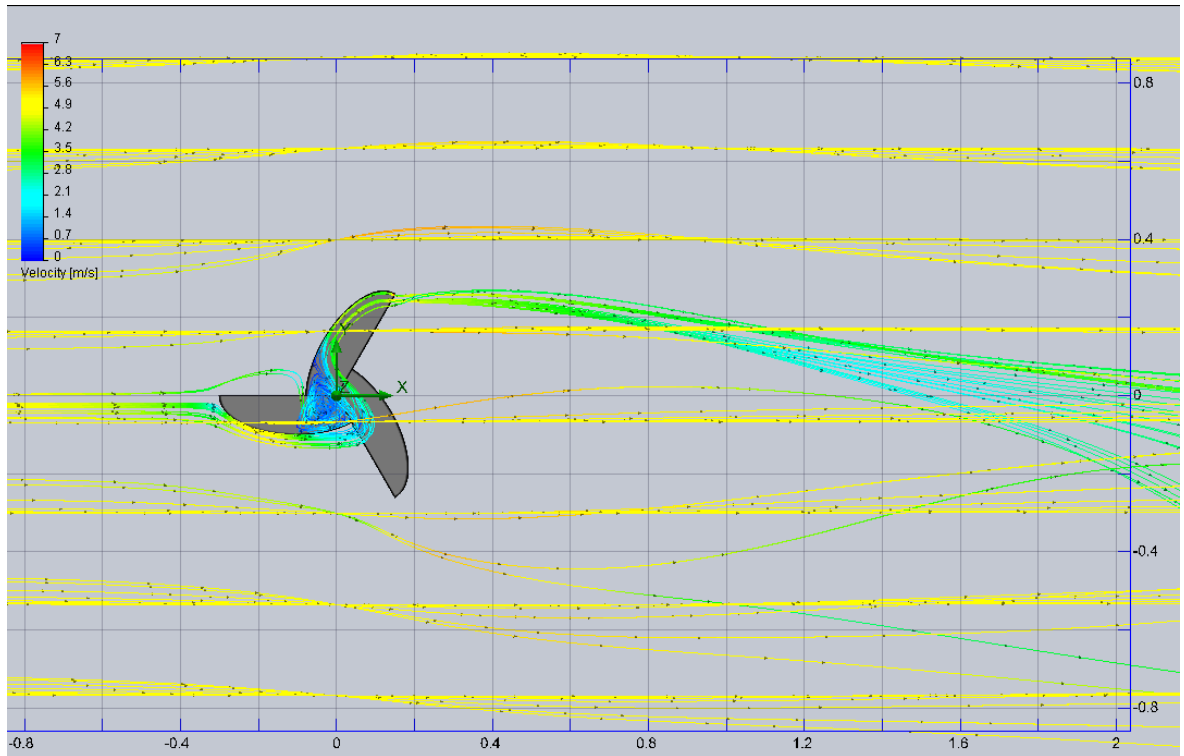
Obr. 84. Trajektorie proudění větru rotoru 3 při natočení 30°

U natočení rotorů o 30° dojde k vyhnutí proudu vzduchu, které je nejvíce patrné u rotorů 1 a 3. U varianty 2 dochází k tvorbě ztuhlšího proudu vzduchu za rotorem a vítr nabývá rychleji na původní rychlosti. Dosahované kroučící momenty jsou o něco málo větší než při nulovém natočení.

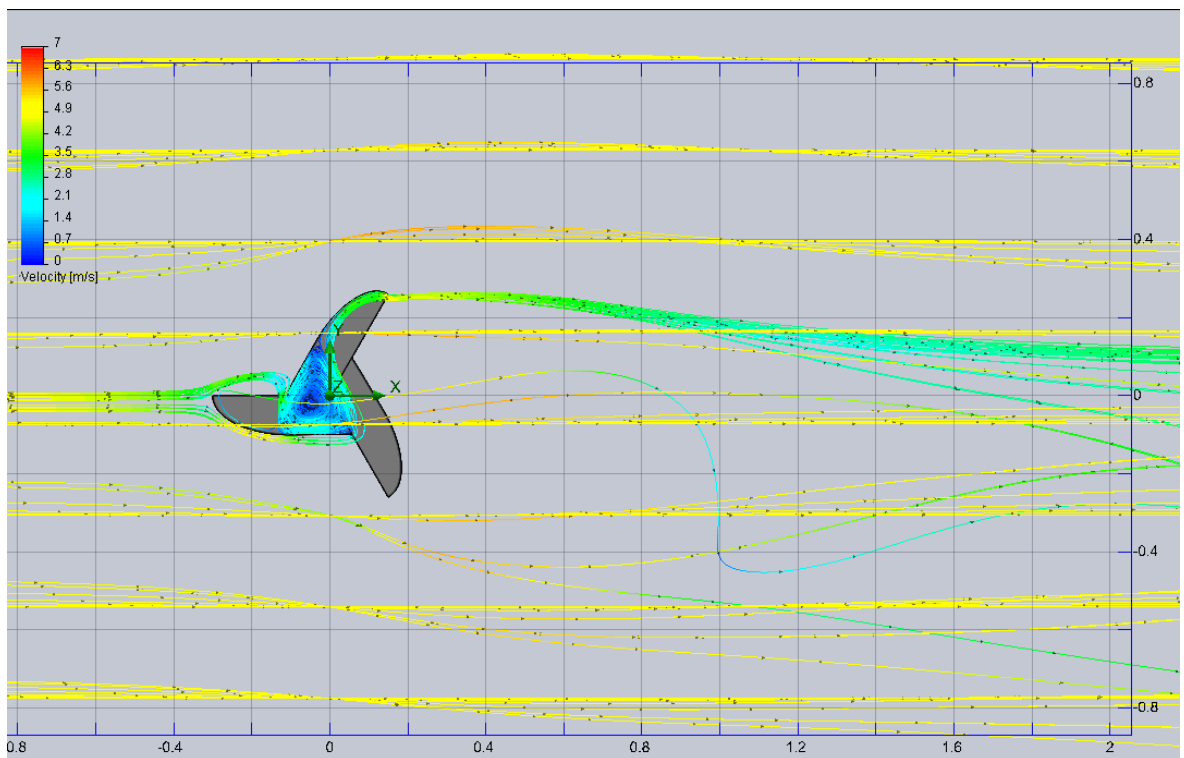
Natočení o 60°



Obr. 85. Trajektorie proudění větru rotoru 1 při natočení 60°



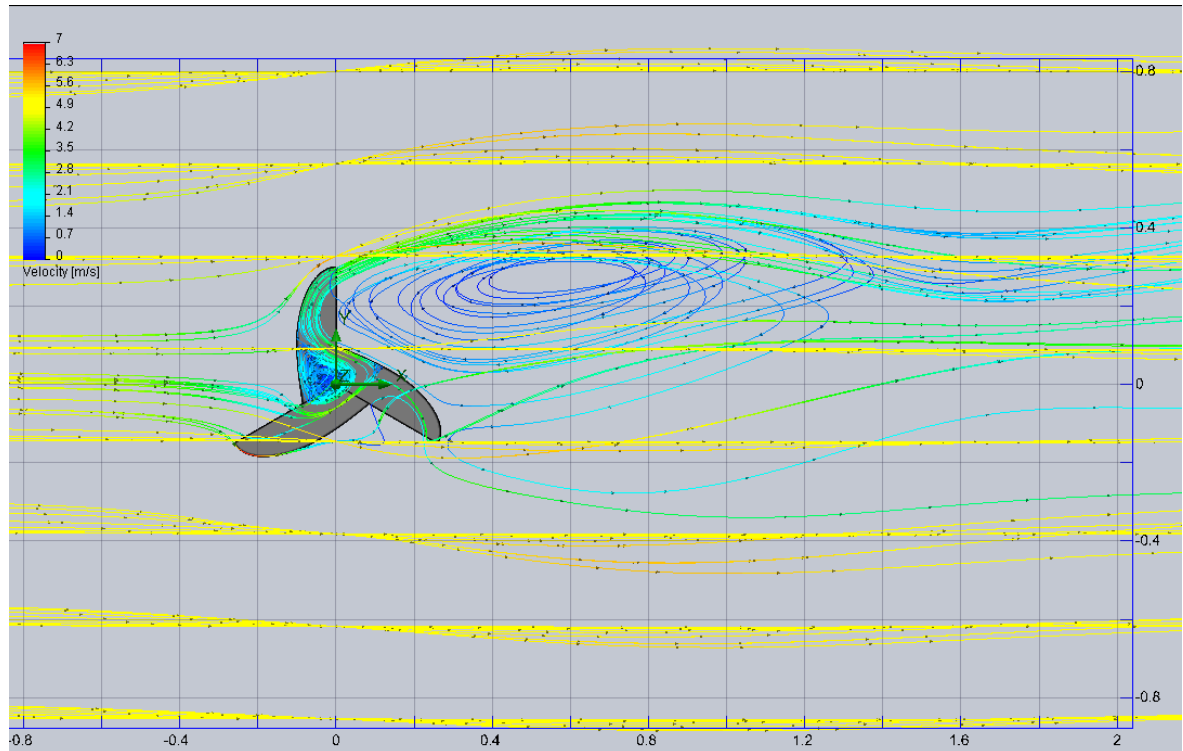
Obr. 86. Trajektorie proudění větru rotoru 2 při natočení 60°



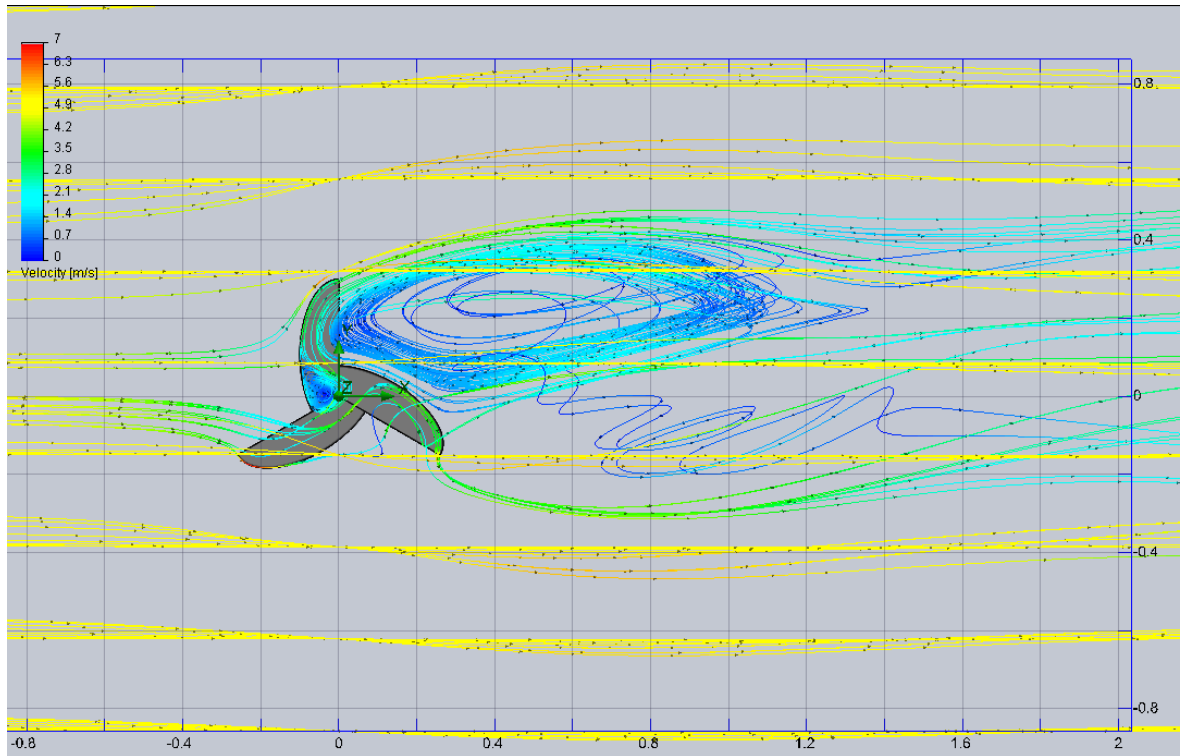
Obr. 87. Trajektorie proudění větru rotoru 3 při natočení 60°

Při natočení o 60° nedochází za rotory k tvorbě žádných vírů a vítr nabývá rychle na původní rychlosti. Kroutící momenty v této poloze dosahují maximálních hodnot.

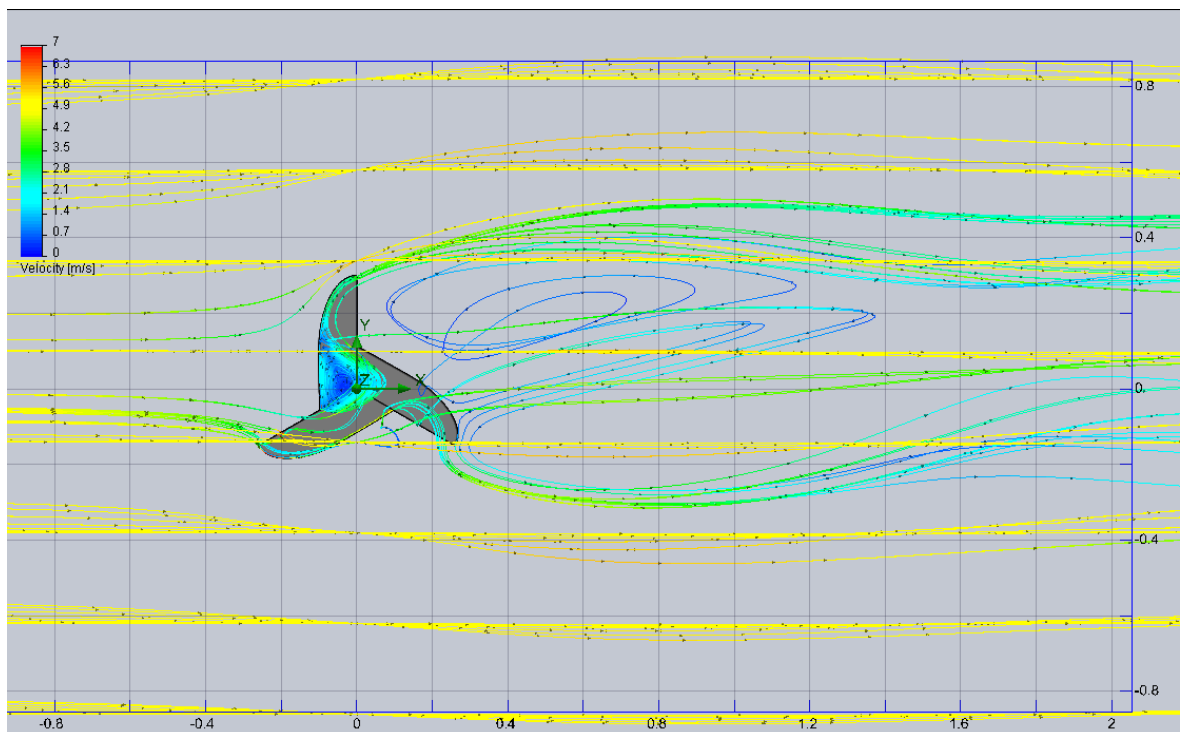
Natočení o 90°



Obr. 88. Trajektorie proudění větru rotoru 1 při natočení 90°



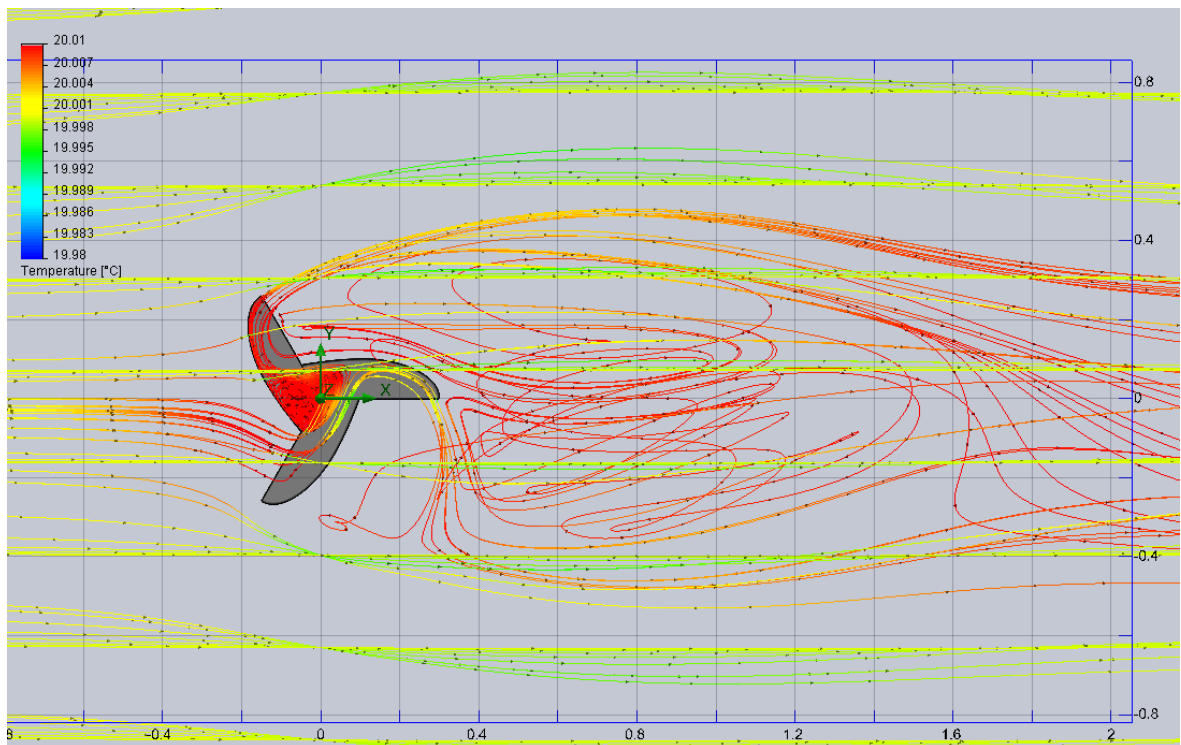
Obr. 89. Trajektorie proudění větru rotoru 2 při natočení 90°



Obr. 90. Trajektorie proudění větru rotoru 3 při natočení 90°

Při pootočení rotorů o 90° vznikají vzduchové víryv horní části zkoumané oblasti. U varianty 3 je vír sotva znatelný, zatímco u variant 2 a 1 je velmi výrazný. Dochází k poklesu hodnot kroutících momentů.

Průběh teploty u rotoru 1 při nulovém natočení, rychlosti 5m/s a otáčkách 1,6 ot/s.



Obr. 91. Průběh teploty u rotoru 1

Z obr. 90 je patrné, že i když jen ve velmi malém rozsahu teplot (setiny stupňů), dochází těsně před a za rotorem k ohřátí vzduchu, které trvá i ve vzdálenosti více jak 2 m.

ZÁVĚR

Teoretická část této práce byla zaměřena na shrnutí dostupných informací o větrné energii a zároveň na seznámení se s patentovou literaturou země s největším potenciálem rozvoje větrné energie ve světě s Francií. Cílem praktické části této práce bylo zjistit vliv úhlu odtokové hrany a vzdálenosti od osy rotace na účinnost průtažného rotoru. K tomuto účelu byly namodelovány tři rotory lišící se zkoumanými parametry. K simulaci proudění větru byl vybrán program SolidWorks Flow Simulation, který je v rámci Univerzity Tomáše Bati licencovaný a dosahuje v tomto odvětví dobrých výsledků.

Simulace byly vytvořeny pro 3 varianty rotorů s různými úhly natočení a to jak pro statické řešení, tak i pro výpočty s nastavenými otáčkami, které jsme odvodili od součinitele rychloběžnosti. Zkoumané rychlosti proudění větru jsou navrženy tak, aby co nejvíce odpovídali větrným podmínkám v České republice. Předpokládáme, že rychlost 5m/s je přibližná pracovní rychlost elektráren v našem vnitrozemském podnebí, a proto jsme se zaměřili na porovnávání výsledků simulací právě při této rychlosti.

Mezi první výsledky, které je potřeba zdůraznit patří především poznatek o různém chování rotorů v závislosti na otáčkách. Se vzrůstajícím počtem otáček dochází ke klesání momentů. Nejlépe tuto podmínku splňuje rotor 1, u zbylých variant klesání není tak intenzivní.

Při statickém výpočtu pro nulové natočení bylo zjištěno, že rotor 1 dosahuje prokazatelně vyšších kroutících momentů oproti rotorům 2 a 3. Mezi rotory s více uzavřenou a plně otevřenou odtokovou hranou (tudíž mezi druhou a třetí variantou) dochází k velice malým rozdílům kroutících momentů (v řádech jednotek procent). Jakmile dojde k pootočení rotorů o 60° kroutící momenty se zdvojnásobí a rotor 3 dosahuje lepších výsledků oproti variantě rotoru 2.

Z výsledných hodnot simulací je patrné, že rotor 1 stabilně vykazuje lepší hodnoty kroutících momentů a tudíž i výkonů než rotory 2 a 3. Tyto dva rotory mají kolísavé hodnoty, které nám nedovolují přesně určit, který z nich dosahuje lepších výsledků, avšak ani jeden z nich nedosahuje hodnot varianty rotoru 1.

Výpočty jsou velice náročné na počítačové vybavení a čas. Průměrná délka jednoho výpočtu je 1 hod 45min na přesnosti 4. Při zvýšení přesnosti na 5 se nám délka výpočtu prodlouží až na 17 hod.

Z dostupných výsledků jsem došla k závěru, že vliv úhlu odtokové hrany a vzdálenosti od osy rotace má u zkoušených variant na účinnost průtažného rotoru zanedbatelný vliv.

Z této práce můžeme brát trendy výsledků, ale pro využití v praxi by bylo vhodné provést další výzkum. Je nutné zmenšit rozsah pootočení rotorů z původních 30° minimálně na 10°, zvýšit přesnost výpočtů na co nejvyšší úroveň, zvýšit rozsah otáček a rychloběžnosti a v neposlední řadě provést výpočty pro větší rozsah rychlostí proudění větru. Pro ověření výsledků je možné provést kontrolu dat jiným softwarem, nebo vytvořením prototypu a jeho následného odzkoušení v aerodynamickém tunelu či v provozu.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] *Quido: Větrná elektrárna* [online]., [Cit. 28.1.2011].
<<http://www.quido.cz/objevy/vitr.htm>>
- [2] NOVÁKOVÁ D., KRYŠTOFOVÁ S., VÁCLAVKOVÁ M., *Obnovitelné zdroje energie.*, Učební texty pro environmentální výchovu SŠ., Hodonín 2008
- [3] UWE HALLENGA, *Malá větrná elektrárna*, nakladatelství HEL, Ostrava 2006, 96s. ISBN 80-86127-6-5
- [4] BERANOVSKÝ, J.; TRUXA, J. *Alternativní energie pro váš dům.* 2. vyd. Brno: EkoWATT: ERA group, 2004. 125s. ISBN 80-86517-89-6.
- [5] *Referáty: Větrná energie*[online]., [Cit. 8.2.2011].
<<http://pohodaveskole.net/referaty/vetrna-energie>>
- [6] *EkoWATT: Metody hodnocení a výtěžnosti obnovitelných zdrojů energie*[online]., [Cit. 8.2.2011].
<<http://www.ekowatt.cz/cz/publikace/metody-hodnoceni-a-vyteznosti-obnovitelnych-zdroju-energie>>
- [7] KLENOVČANOVÁ, A.; IMRIŠ, I. *Zdroje a přeměny energie.* 1. vyd. Prešov: ManaCon, 2006. 492 s. ISBN 80-89040-29-2.
- [8] RANDA M., *Větrná energie* [online]., Časopis ŠKOLSKÁ FYZIKA., ISSN:1211-151., [Cit. 8.2.2011].
<<http://sf.zcu.cz/rocnik07/cislomm/1-4def.html>>
- [9] *Český hydrometeorologický ústav: Beaufortova stupnice síly větru.*, [online]., [Cit. 3.2.2011].
<http://old.chmi.cz/meteo/olm/Let_met/beaufort/Beaufortova_stupnice.htm>
- [10] *Quido: Anemometr* [online]., [Cit. 28.1.2011].
<<http://www.quido.cz/objevy/anemometr.htm>>
- [11] MARTINEK R., *Senzory v průmyslové praxi.*, Praha: BEN., 2004., ISBN 80-7300-114-4

[12] KAMEŠ J., *Alternativní zdroje energie.*, Česká zemědělská univerzita v Praze., [online]., [Cit. 18.1.2011].

<<http://vipor.czu.cz>>

[13] KOLEKTIV AUTORŮ pod vedením časopisu Elektro., *Obnovitelné zdroje energie.* Praha: Nakladatelství FCC PUBLIC, s.r.o., 1994. 176 s.

[14] HOLUB P., *Větrné elektrárny.*, [online]., [Cit. 28.1.2011].

<<http://www.vetrnaelektrarna.cz/Documents/VE.pdf>>

[15] *Automatizace.hw:Větrné elektrárny – mikro, malé i velké – princip, provedení, regulace.*, [online]., [Cit. 2.2.2011].

<<http://automatizace.hw.cz/vetrne-elektrarny-mikro-male-i-velke-princip-provedeni-regulace>>

[16] JIŘÍČEK I., RÁBL V., *Větrná energie, eolická energie.*, AZE 04/2005., [online]., [Cit. 2.2.2011].

<http://www.vscht.cz/ktt/zdrene/3.0_V%E1Ctrn%E1_energie.pdf>

[17] *Svaz podnikatelů pro využití energetických zdrojů: Vitr.*, [online]., [Cit. 28.1.2011].

<<http://www.spvez.cz/pages/vitr.htm>>

[18] ŠINDELÁŘOVÁ L., PĚKNÁ P., *Větrné elektrárny.*, .., [online]., [Cit. 18.1.2011].

<<http://www.fs.cvut.cz/stretech/2009/pdf/1001.pdf>>

[19] *Nazeleno: Větrné elektrárny v ČR zažívají boom. Kolik energie vyrobí.*, [online]., [Cit. 5.2.2011].

<<http://www.nazeleno.cz/energie/vetrna-energie/vetrne-elektrarny-v-cr-zazivaji-boom-kolik-energie-vyrobi.aspx>>

[20] *Nazeleno: Větrná energie: Bude hrát v Evropě prim?.*, [online]., [Cit. 5.2.2011].

<<http://www.nazeleno.cz/energie/vetrna-energie/vetrna-energie-bude-hrat-v-evrope-prim.aspx>>

[21] *Investice ve Francii: Větrná energie.*, [online]., [Cit. 18.1.2011].

<<http://www.invest-in-france.org/Medias/Publications/235/Wind%20Power.pdf>>

[22] *Globální větrná energie: Francie.*, [online]., [Cit. 18.1.2011].

<<http://www.gwec.net/index.php?id=128>>

[23] *Wikipedie: Větrné elektrárny ve Francii.*, [online]., [Cit. 18.1.2011].

<http://en.wikipedia.org/wiki/Wind_power_in_France>

[24] *Úřad průmyslového vlastnictví: Zahraniční databáze.*, *Evropský patentový úřad* [online]., [Cit. 18.1.2011].

<<http://www.upv.cz/cs/sluzby-uradu/database-on-line/database-patentu-a-uzitnych-vzoru/zahranicni-databaze.html>>

[25] *European Patent Office: Wind concentrating device for vertical axis wind turbine.*, [online]., [Cit. 18.1.2011].

<http://v3.espacenet.com/publicationDetails/biblio?DB=EPODOC&adjacent=true&locale=en_EP&FT=D&date=20040729&CC=WO&NR=2004063565A1&KC=A1>

[26] *European Patent Office: Electrical generátor drive device for e.g. service building, has vertical axis with large diameter and enclosure with free sectors, where one of sectors has shutters whose position is adjusted with wind force by servomotors.*, [online]., [Cit. 18.1.2011].

<http://v3.espacenet.com/publicationDetails/biblio?DB=EPODOC&adjacent=true&locale=en_EP&FT=D&date=20071012&CC=FR&NR=2899651A1&KC=A1>

[27] *European Patent Office: Vertical axis wind turbine i.e. Darrieus wind turbine, has concentric circular cradles arranged between ens of mast and connected by arches that support sail-wings, where assembly of sail-wings and cradles is subsided along mast as desired.*, [online]., [Cit. 18.1.2011].

<http://v3.espacenet.com/publicationDetails/biblio?DB=EPODOC&adjacent=true&locale=en_EP&FT=D&date=20090814&CC=FR&NR=2927375A1&KC=A1>

[28] *European Patent Office: Vertical axis wind turbine device for producing electrical energy to e.g. individual dwelling, has pivoting vertical shaft fixed under frame that integrates mechanical transmissions, for supporting screws, guide and assembling plates.*, [online]., [Cit. 18.1.2011].

<http://v3.espacenet.com/publicationDetails/biblio?DB=EPODOC&adjacent=true&locale=en_EP&FT=D&date=20101015&CC=FR&NR=2944327A1&KC=A1>

- [28] *European Patent Office: Savonius and Darrieus hybrid vertical axis wind turbine for use by e.g. small/ average industrial/ commercial structure, has baffles symmetrical with respect to each other or slightly asymmetrical to faces of blades.*, [online]., [Cit. 18.1.2011].
<http://v3.espacenet.com/publicationDetails/biblio?DB=EPODOC&adjacent=true&locale=en_EP&FT=D&date=20101029&CC=FR&NR=2944834A1&KC=A1>
- [29] HEINZ SCHULZ, *Savonius rotor*, nakladatelství HEL, Ostrava 2005, 77s. ISBN 80-86167-26-7
- [30] *Airflow: Termický anemometr.*, [online]., [Cit. 18.5.2011].
<<http://www.airflow.cz/pdf/pdfnavody/ta5.pdf>>
- [31] *Obnovitelné energie: Větrné mikroelektrárny.*, [online]., [Cit. 10.5.2011].
<<http://www.obnovitelne-energie.cz/vetrne-elektrarny-whisper-100.php>>
- [32] *Nazeleno: Jak se staví větrná elektrárna v Česku. Vítejte ve Stříbře!.*, [online]., [Cit. 5.4.2011].
<<http://www.nazeleno.cz/energie/jak-se-stavi-vetrna-elektrarna-v-cesku-vitejte-ve-stribre.aspx>>
- [33] *Malé větrné elektrárny: Aerodynamika profilu.*, [online]., [Cit. 16.5.2011].
<<http://ve.ic.cz/index.php?id=3>>
- [34] *Energie.tzb-info: Národní akční plány zemí EU-instalovaný výkon OZE elektráren.*, [online]., [Cit. 16.5.2011].
<<http://energie.tzb-info.cz/7266-narodni-akcni-plany-zemi-eu-instalovany-vykon-oze-elektraren>>
- [35] *Flow Simulation 2010 Technical reference: Flow over a circular cylinder.*, výukový materiál k programu SolidWorks

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

ČEZ	Česká elektrárenská společnost
CHKO	Chráněná krajinná oblast
WWEA	Světová asociace větrné energetiky
EWEA	Evropská asociace větrné energetiky
EPÚ	Evropský patentový úřad
VAWT	Větrné turbíny se svislou osou
Re	Reynoldsovo číslo
RPS	Otáčka za sekundu

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Vznik větrů na Zemi [4]</i>	13
<i>Obr. 2. Průměrná sezónní rychlost větru v ČR na podzim[5]</i>	14
<i>Obr. 3. Závislost výkonu větru na rychlosti[6]</i>	15
<i>Obr. 4. Větrný pytel</i>	16
<i>Obr. 5. Miskový mechanický anemometr [11]</i>	18
<i>Obr. 6. Princip Dopplerova laserového anemometru [11]</i>	19
<i>Obr. 7. Ultrazvukový anemometr [11]</i>	20
<i>Obr. 8. Termický anemometr [30]</i>	20
<i>Obr. 9. Schéma působení síly proudu vzduchu</i>	21
<i>Obr. 10. Základní části větrných elektráren [13]</i>	22
<i>Obr. 11. Schéma provedení vrtulí:</i>	23
<i>Obr. 12. Lopatkové kolo[13]</i>	23
<i>Obr. 13. Různé podoby Darrierova rotoru se svislou osou rotace[13]</i>	24
<i>Obr. 14. Schéma Savoniova rotoru [13]</i>	24
<i>Obr. 15. Závislost součinitele využití energie větru C_p a součinitele</i>	25
<i>Obr. 16. Průtažný rotor [29]</i>	26
<i>Obr. 17. Převodovka větrné turbíny [13]</i>	27
<i>Obr. 18. Generátor větrné turbíny [13]</i>	28
<i>Obr. 19. Systémy natáčení rotoru (a)uspořádání rotoru za gondolou se samočinnou orientací rotoru, (b) uspořádání rotoru před gondolou s orientací rotoru pomocí kormidla, (c) uspořádání rotoru před gondolou s orientací rotoru pomocí bočních pomocných rotorů [13]</i>	30
<i>Obr. 20. Mikroelektrárna [31]</i>	32
<i>Obr. 21. Malé větrné elektrárny [32]</i>	33
<i>Obr. 22. Struktura velké větrné elektrárny [14]</i>	34
<i>Obr. 23. Větrná farma [14]</i>	34
<i>Obr. 24. Rozložení sil a úhlů působících</i>	35
<i>Obr. 25. Závislost mezi typem větrné elektrárny,</i>	38

<i>Obr. 26. Distribuční charakteristika rychlosti větru [6]</i>	41
<i>Obr. 27. Větrná mapa České republiky [2]</i>	42
<i>Obr. 28. Přehled instalovaných výkonů</i>	46
<i>Obr. 29. Přehled větrných elektráren v ČR [20]</i>	48
<i>Obr. 30. Předpokládaný instalovaný výkon větrné energie</i>	49
<i>Obr. 31. Panel s klapkami[25]</i>	51
<i>Obr. 32. Větrná turbína s velkým průměrem</i>	52
<i>Obr. 33. Konstrukce plachet[27]</i>	53
<i>Obr. 34. Větrná turbína se dvěma spirálovými šrouby[28]</i>	54
<i>Obr. 35. Kombinace Savoniova a Darriova rotoru[29]</i>	55
<i>Obr. 36. Obtékání válce při nízkých hodnotách</i>	57
<i>Obr. 37. Obtékání válce při vyšších hodnotách</i>	58
<i>Obr. 38. Proudění trajektorií vypočtených programem Flow Simulation</i>	58
<i>Obr. 39. Závislost součinitele odporu C_D a Reynoldsova</i>	59
<i>Obr. 40. Zobrazení průtoku kouře v porovnání</i>	60
<i>Obr. 41. Typ analýzy a referenční osa</i>	61
<i>Obr. 42. Výběr fluida</i>	61
<i>Obr. 43. Nastavení rychlosti proudění</i>	62
<i>Obr. 44. Nastavení přesnosti, mezery a tloušťky stěny</i>	62
<i>Obr. 45. Nastavení okrajových podmínek a počtu otáček</i>	63
<i>Obr. 46. Nastavení cílů výpočtu</i>	64
<i>Obr. 47. Nastavení oblasti simulace proudění</i>	65
<i>Obr. 48. Parametry úhlu odtokové hrany a vzdálenosti od osy</i>	66
<i>Obr. 49. Skica lopatky 1</i>	66
<i>Obr. 50. Detail skici lopatky 1</i>	67
<i>Obr. 51. Rotor 1</i>	67
<i>Obr. 52. Parametry úhlu odtokové hrany a vzdálenosti od osy</i>	68
<i>Obr. 53. Skica lopatky 2</i>	68
<i>Obr. 54. Detail skici lopatky 2</i>	69

<i>Obr. 55. Rotor 2</i>	69
<i>Obr. 56. Parametry úhlu odtokové hrany a vzdálenosti od osy</i>	70
<i>Obr. 57. Skica lopatky 3</i>	70
<i>Obr. 58. Detail skici lopatky 3</i>	71
<i>Obr. 59. Rotor 3</i>	71
<i>Obr. 60. Trajektorie proudění větru při rychlosti 2 m/s u rotoru 1</i>	72
<i>Obr. 61. Trajektorie proudění větru při rychlosti 5 m/s u rotoru 1</i>	73
<i>Obr. 62. Trajektorie proudění větru při 10 m/s u rotoru 1</i>	73
<i>Obr. 63. Trajektorie proudění větru při rychlosti 2 m/s u rotoru 2</i>	74
<i>Obr. 64. Trajektorie proudění větru při rychlosti 5 m/s u rotoru 2</i>	75
<i>Obr. 65. Trajektorie proudění větru při rychlosti 10 m/s u rotoru 2</i>	75
<i>Obr. 66. Trajektorie proudění větru při rychlosti 2 m/s u rotoru 3</i>	76
<i>Obr. 67. Trajektorie proudění větru při rychlosti 5 m/s u rotoru 3</i>	77
<i>Obr. 68. Trajektorie proudění větru při rychlosti 10 m/s u rotoru 3</i>	77
<i>Obr. 69. Pootočení rotoru při 0°, 30°, 60° a 90°</i>	78
<i>Obr. 70. Závislost kroutícího momentu M_z na úhlu pootočení pro konstantní rychlost $v=2\text{m/s}$</i>	79
<i>Obr. 71. Závislost kroutícího momentu M_z na úhlu pootočení pro</i>	80
<i>Obr. 72. Závislost kroutícího momentu M_z na úhlu pootočení pro</i>	81
<i>Obr. 73. Průběh kroutícího momentu při otočení rotoru o jednu otáčku (360°)</i>	82
<i>Obr. 74. Rozložení tlaků u rotoru 1</i>	83
<i>Obr. 75. Rozložení tlaků u rotoru 2</i>	83
<i>Obr. 76. Rozložení tlaků u rotoru 3</i>	84
<i>Obr. 77. Závislost kroutícího momentu a otáček při konstantní rychlosti</i>	85
<i>Obr. 78. Porovnání kroutícího momentu v závislosti</i>	89
<i>Obr. 79. Trajektorie proudění větru rotoru 1 při natočení 0°</i>	91
<i>Obr. 80. Trajektorie proudění větru rotoru 2 při natočení 0°</i>	92
<i>Obr. 81. Trajektorie proudění větru rotoru 3 při natočení 0°</i>	92
<i>Obr. 82. Trajektorie proudění větru rotoru 1 při natočení 30°</i>	93

<i>Obr. 83. Trajektorie proudění větru rotoru 2 při natočení 30°</i>	94
<i>Obr. 84. Trajektorie proudění větru rotoru 3 při natočení 30°</i>	94
<i>Obr. 85. Trajektorie proudění větru rotoru 1 při natočení 60°</i>	95
<i>Obr. 86. Trajektorie proudění větru rotoru 2 při natočení 60°</i>	96
<i>Obr. 87. Trajektorie proudění větru rotoru 3 při natočení 60°</i>	96
<i>Obr. 88. Trajektorie proudění větru rotoru 1 při natočení 90°</i>	97
<i>Obr. 89. Trajektorie proudění větru rotoru 2 při natočení 90°</i>	98
<i>Obr. 90. Trajektorie proudění větru rotoru 3 při natočení 90°</i>	98
<i>Obr. 91. Průběh teploty u rotoru 1</i>	99

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1. Beaufortova stupnice rychlosti větru[9].....	17
Tabulka 2. Hodnoty rychloběžnosti a součinitele výkonu v závislosti na typu rotoru [33].....	39
Tabulka 3. Vliv rychlosti větru na součinitel využití, průměrný výkon za rok a výrobní náklady na 1kWh [16].....	39
Tabulka 4. Průměrná roční výroba elektrického proudu u malých elektráren [16].....	40
Tabulka 5. Vliv krajiny na výrobu elektrické energie [6].....	42
Tabulka 6. Hlučnost větrných elektráren [6].....	43
Tabulka 7. Větrné elektrárny v ČR [20].....	47
Tabulka 8. Rozvoj větrné energie ve Francii do roku 2009 [22].....	48
Tabulka 9. Přibližná řada otáček rotoru za sekundu ot/s v závislosti na součiniteli rychloběžnosti X a rychlosti proudění větru v	64
Tabulka 10. Rotor 1.....	72
Tabulka 11. Rotor 2.....	74
Tabulka 12. Rotor 3.....	76
Tabulka 13. Porovnání momentů vzhledem k ose Z při nulovém natočení.....	78
Tabulka 14. Pootočené rotory pro konstantní rychlost $v = 2m/s$	79
Tabulka 15. Pootočené rotory pro konstantní rychlost $v = 5m/s$	80
Tabulka 16. Pootočené rotory pro konstantní rychlost $v = 10m/s$	81
Tabulka 17. Kroucí momenty v závislosti na ot/s při nulovém natočení rotoru.....	86
Tabulka 18. Kroucí momenty v závislosti na otáčkách při rychlosti větru $v=2m/s$	87
Tabulka 19. Kroucí momenty v závislosti na otáčkách při rychlosti větru $v=5m/s$	88
Tabulka 20. Kroucí momenty v závislosti na otáčkách při rychlosti větru $v=10m/s$	90

SEZNAM PŘÍLOH

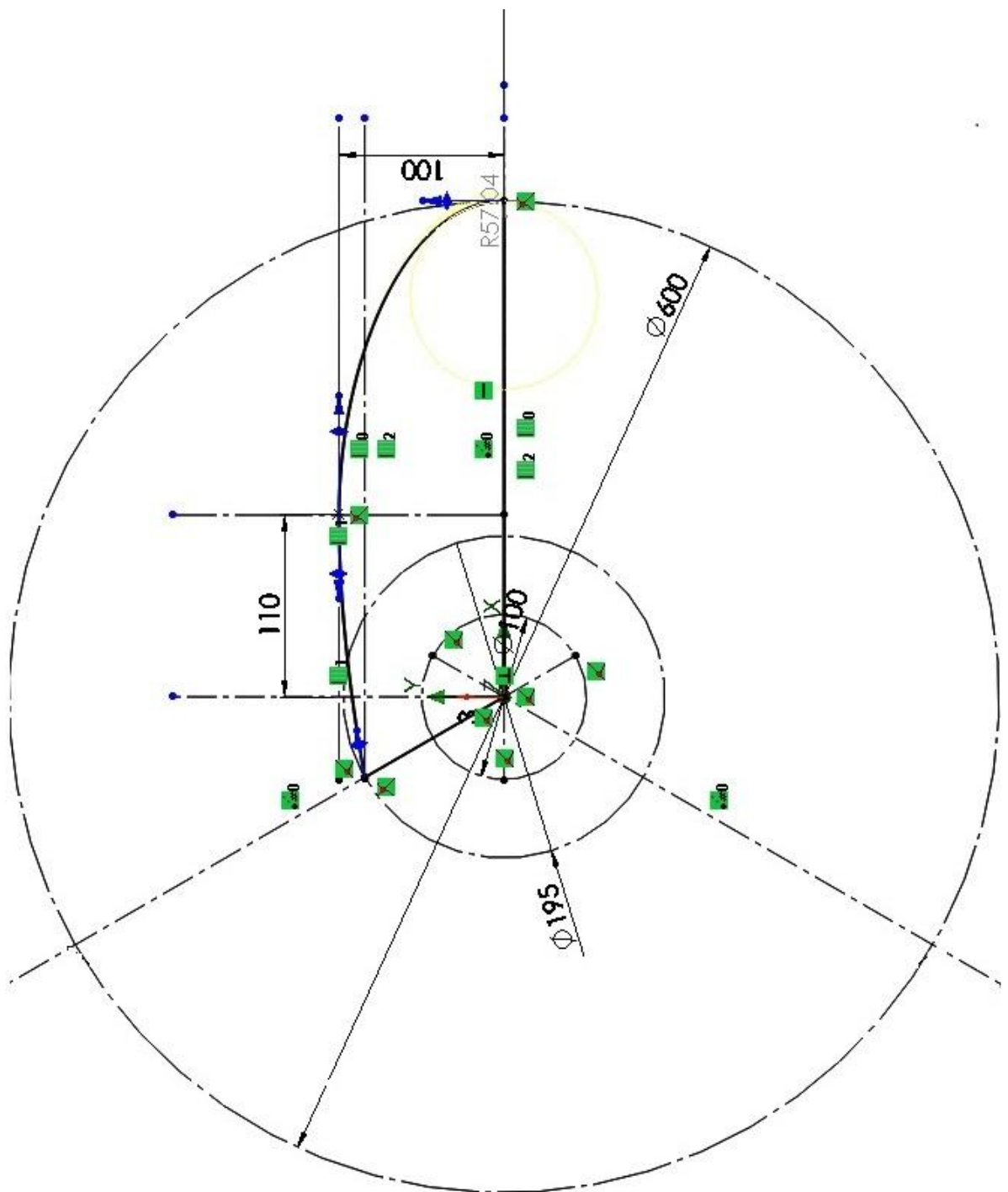
P I: Skica SolidWorks definující tvar lopatky 1

P II: Skica SolidWorks definující tvar lopatky 2

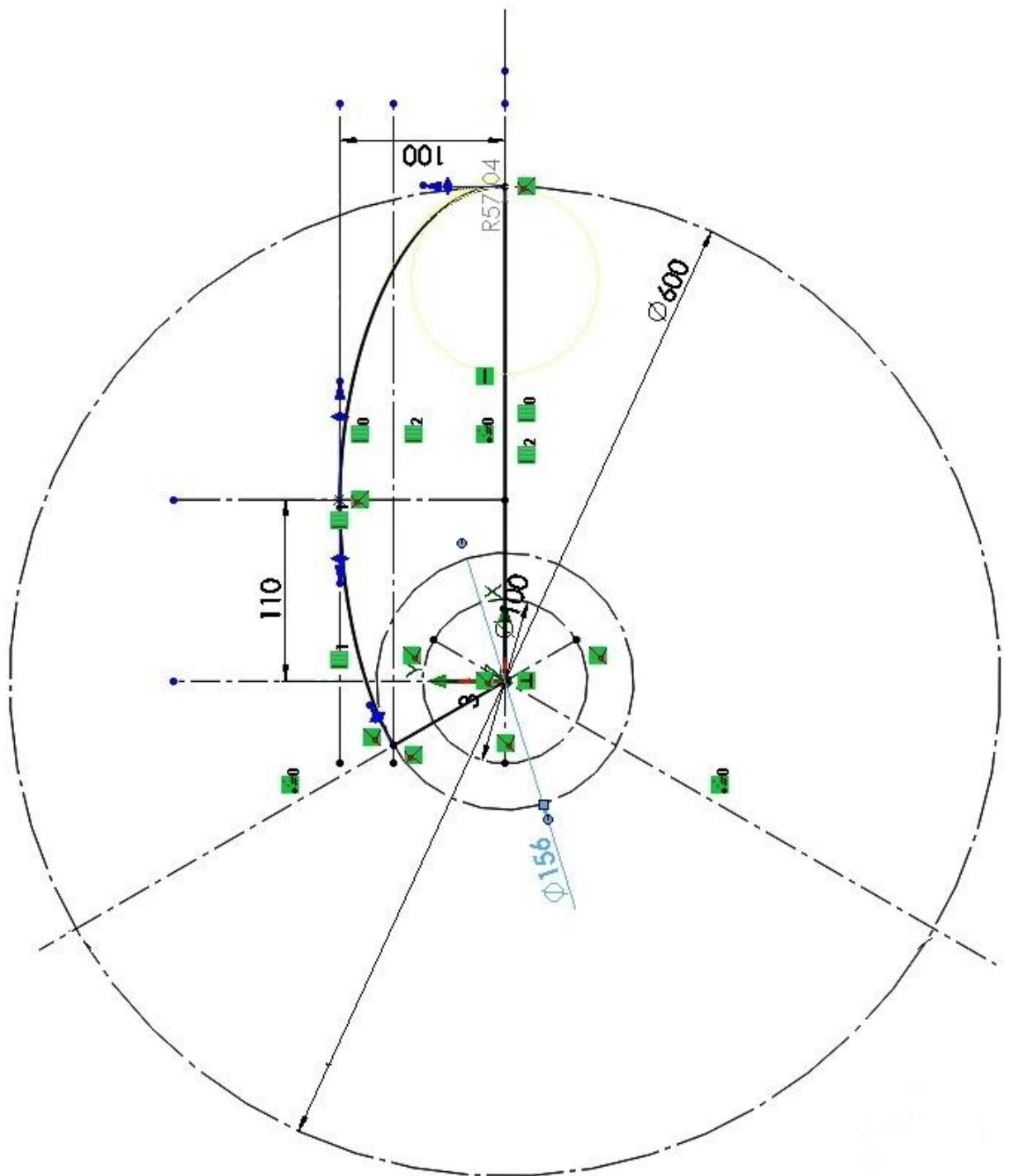
P III: Skica SolidWorks definující tvar lopatky 3

P IV: DVD ROM s bakalářskou prací v přenosném formátu (.pdf), 3D modely rotorů (.bmp), videa simulací proudění (.avi), tabulky hodnot (.xlsx), obrázky trajektorií proudění větru (.bmp)

PŘÍLOHA P I: SKICA SOLIDWORKS DEFINUJÍCÍ TVAR LOPATKY 1



PŘÍLOHA P II: SKICA SOLIDWORKS DEFINUJÍCÍ TVAR LOPATKY 2



PŘÍLOHA P III: SKICA SOLIDWORKS DEFINUJÍCÍ TVAR LOPATKY 3

