

Vliv hloubky lopatky a vzdálenosti nejhlubšího místa od osy rotace na účinnost průtažného rotoru

Pavel Soukup

Bakalářská práce
2012



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlině
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Pavel SOUKUP**
Osobní číslo: **T08652**
Studijní program: **B 3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Technologická zařízení**

Téma práce: **Vliv hloubky lopatky a vzdálenosti nejhlubšího místa od osy rotace na účinnost průtažného rotoru**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte rešerši na dané téma s přihlédnutím na patentovou literaturu
2. Navrhněte řešení nejhlubšího místa lopatek 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: **13. února 2012**

Termín odevzdání bakalářské práce: **25. května 2012**

Ve Zlíně dne 7. února 2012


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan




prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

Příjmení a jméno: Soukup Pavel

Obor: Procesní inženýrství

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, považuji se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, pupí. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 22.5.2013

Pavel Soukup

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 zvěřejnitelných prací:

(1) Vysoká škola nejvýše možně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledků 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 nejmeně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlédnutí 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 za zveřejněné práce pořizovat na své náklady výtisky, copy nebo rozmnožiny.

(3) Může, ze zveřejněných prací autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

² zákon č. 111/2000 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, ušije-li nárok za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k užití nebo k vlastní potřebě jako živatelem žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

³ zákon č. 111/2000 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 užití díla určené zvláště k užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odporů-li autor takového díla užití stvoří bez svého důvodu, mohou se tyto osoby domáhat namázané chybné licenze projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 působí restrikčně.

(2) Není-li zejména jinak, může autor školního díla své dílo užití či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněným zájmem školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

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

ABSTRAKT

V bakalářské práci byl zkoumán vliv hloubky lopatky průtažného rotoru s cílem dosažení co nejlepšího krouticího momentu při daných podmínkách.

Práce byla rozdělena na teoretickou a praktickou část. V teoretické práci jsou popsány všeobecné problematiky všech druhů rotorů a problematika energie větru. V praktické části jsou návrhy jednotlivých rotorů s odlišnou hloubkou lopatky a různou rychlostí proudění větru. Výsledky jsou shrnuty v tabulkách a grafech.

Klíčová slova: Vítr, Průtažný rotor, Krouticí moment, SolidWorks, Hloubka lopatky

ABSTRACT

In the bachelor thesis, the influence of the blade depth of VAWT was searched to achieve the best moment of force by certain conditions.

The thesis is divided into practical and theoretical part. In the theoretical part, all general problems of all types of rotors and the problematic of wind energy are described. In the practical part, there are proposals of individual rotors with a different blade depth and a different velocity of flowing wind. The results are summarized in charts and graphs.

Keywords: Wind, VAWT, Moment of torque, SolidWork, Bladedepth

Tímto bych chtěl poděkovat panu Ing. Jaroslavu Malochovi, CSc. za jeho čas, ochotu, trpělivost, odborné rady a připomínky, které mi pomohly při psaní této bakalářské práce.

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

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 VÍTR	12
1.1 SMĚR VĚTRU	12
1.2 RYCHLOST VĚTRU	13
1.3 MĚŘENÍ RYCHLOSTI VĚTRU.....	14
1.3.1 Beaufortova stupnice rychlosti větru.....	14
1.3.2 Měření rychlosti větru pomocí anemometru.....	16
1.4 VĚTRNÁ ENERGIE	17
1.4.1 Větrná energie a její využití v České republice.....	17
1.4.2 Výpočet výkonu větrné energie.....	18
2 VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY	21
2.1 HISTORIE	21
2.2 ROZDĚLENÍ ELEKTRÁREN	22
2.2.1 Podle koncepce uložení rotoru	22
2.2.2 Podle aerodynamického principu	24
2.2.3 Podle výkonu větrných elektráren.....	24
2.3 HLUKY TYPICKÉ PRO VĚTRNÝ ZDROJ.....	25
2.4 ZÁKLADNÍ ČÁSTI VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN S VERTIKÁLNÍ OSOU ROTACE	26
2.5 VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY V ČR.....	27
3 ROTORY S VERTIKÁLNÍ OSOU	30
3.1 SAVONIŮV ROTOR	30
3.1.1 Základní údaje	30
3.1.2 Konstrukce	31
3.1.3 Požadavky na bezpečnost	32
3.1.4 Výkon.....	32
3.2 PRŮTAŽNÝ ROTOR.....	33
3.3 DARRIEŮV ROTOR	35
3.4 JACKSONOVO KOLO.....	36
4 PATENTOVÁ LITERATURA	38
4.1 PATENT.....	38
4.2 PODMÍNKY UDĚLENÍ PATENTU	38
4.3 PATENTOVÁ LITERATURA VELKÁ BRITÁNIE	38
4.3.1 Patent Fletchera Johna Kennedyho	38
4.3.2 Patent ST-Germain Andre.....	39
4.3.3 Patent Manninga Howarda Johna.....	40
4.3.4 Patent Redcliffa Stephana Martina.....	41
5 SOUHRN TEORETICKÉ ČÁSTI	43
II PRAKTICKÁ ČÁST	44
6 PROGRAM SOLIDWORKS SYSTEM	45

6.1	SOLIDWORKS FLOW SIMULATION.....	45
6.1.1	Další funkce softwaru Flow Simulation:	46
6.2	NASTAVENÍ PROGRAMU SOLIDWORKS FLOW SIMULATION A JEHO PROSTŘEDÍ	46
6.2.1	Zhotovení lopatky.....	47
6.2.2	Zhotovení rotoru.....	48
6.2.3	Nastavení Flow Simulation – referenční rotor	49
6.2.4	Nový projekt.....	50
6.2.5	Definice jednotkové soustavy	50
6.2.6	Výběr typu analýzy.....	51
6.2.7	Volba proudící látky (Fluid).....	51
6.2.8	Vnější podmínky	52
6.2.9	Zvolené termodynamické podmínky a rychlost proudění vzduchu	52
6.2.10	Přesnost výsledků a zobrazení výsledků.....	53
6.2.11	Nastavení výpočtové oblasti	53
6.2.12	Cíle výpočtů	54
6.2.13	Nastavení konfiguračních tabulek	55
6.2.14	Spuštění výpočtu	56
6.2.15	Vyhodnocení výsledků – nastavení	57
7	SIMULACE A VÝSLEDKY ROTORŮ	59
7.1	ÚVOD	59
7.2	VÝSLEDKY PRO RYCHLOST VĚTRU 5 M/S (PRO VŠECHNY ROTORY).....	59
7.3	VÝSLEDKY PRO RYCHLOST VĚTRU 5 M/S	61
7.4	VÝSLEDKY PRO RYCHLOST VĚTRU 7 M/S	64
7.5	VÝSLEDKY PRO RYCHLOST VĚTRU 10 M/S.....	67
7.6	VÝSLEDKY PRO RYCHLOST VĚTRU 12 M/S.....	70
7.7	NÁRŮST KROUTICÍHO MOMENTU VZHLEDEM K RYCHLOSTI VĚTRU	73
7.8	ROZDÍLY MAXIMÁLNÍHO A MINIMÁLNÍHO KROUTICÍHO MOMENTU U ROTORU	79
7.8.1	Rotory při rychlosti proudícího větru 5 m/s.....	79
7.8.2	Rotory při rychlosti proudícího větru 7 m/s.....	83
7.8.3	Rotory při rychlosti proudícího větru 10 m/s.....	87
7.8.4	Rotory při rychlosti proudícího větru 12 m/s.....	91
	ZÁVĚR	95
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATUR	97
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	100
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	101
	SEZNAM TABULEK	106
	SEZNAM PŘÍLOH	107

ÚVOD

Většina populace na celé Zemi si život bez elektrické energie nedokáže ani představit, avšak není tomu tak dávno, kdy lidé nevěděli, co pojem elektrická energie znamená a sedávali doma jen při rozsvícených svíčkách. V současné době je pro nás elektrická energie samozřejmostí, bez které se nedokážeme obejít. Většina této energie je vyráběna v jaderných elektrárnách nebo tepelných elektrárnách spalujících uhlí. Tyto způsoby výroby elektrické energie mají špatný vliv na životní prostředí, jako je například znečištění ovzduší, problém s uskladněním radioaktivního vyhořelého paliva nebo vyčerpávané zásoby zemního plynu, ropy a uhlí, proto se je snažíme nahradit ekologičtějšími zdroji energie. Jedním takovým zdrojem je větrná energie, která nemá tak nepříznivý dopad na ekologii Země. Větrná energie se využívala již v dávných dobách a donedávna se využívala hlavně pro pohánění lodí nebo větrných mlýnů. Výroba elektřiny pomocí větru se začala provozovat ke konci 80. let. Tato elektřina se vyráběla převážně v horských oblastech, ale v současné době se elektrická energie za pomoci větrné energie vyrábí i v níže položených oblastech.

Teoretická část této práce se zabývá obecnou charakteristikou větru, jak vítr vzniká, jak proudí v České republice, kde na Zemi jsou nejlepší podmínky pro výstavbu a použití větrných elektráren. Dále je zde objasněn princip měření rychlosti větru na moři či na souši pouhým okem pomocí Beaufortovy stupnice. Práce se dále zabývá rozsahem využití větrné energie v České republice a výpočtem větrné energie, čímž se dostáváme k samotným větrným elektrárnám, jejich historii, jejich rozdělení a výkonům. Najdeme zde důkladný popis a složení větrné elektrárny nejčastěji používané v České republice a rozdělení jednotlivých rotorů. V poslední části je patentová literatura a příklady patentů.

V praktické části je popsáno samotné nastavení programu SolidWorks Flow Simulation a následnými výpočty krouticích momentů a zkoumán vliv hloubky lopatky rotoru na rostoucí nebo klesající krouticí moment. Tyto výpočty probíhaly pro 15 rotorů po pootočení o 10 stupňů pro rychlost větru 5 m/s. Pro tři rotory s nejlepšími výsledky a referenční rotor bylo provedeno zpřesnění po 5 stupních a pro rychlosti 5 m/s, 7 m/s, 10 m/s a 12 m/s. Tyto výsledky jsou vyhodnoceny v tabulkové dokumentaci s grafy a obrázky rotorů, kolem kterých proudí vítr.

V poslední části je závěr a konečné zhodnocení všech výsledků bakalářské práce.

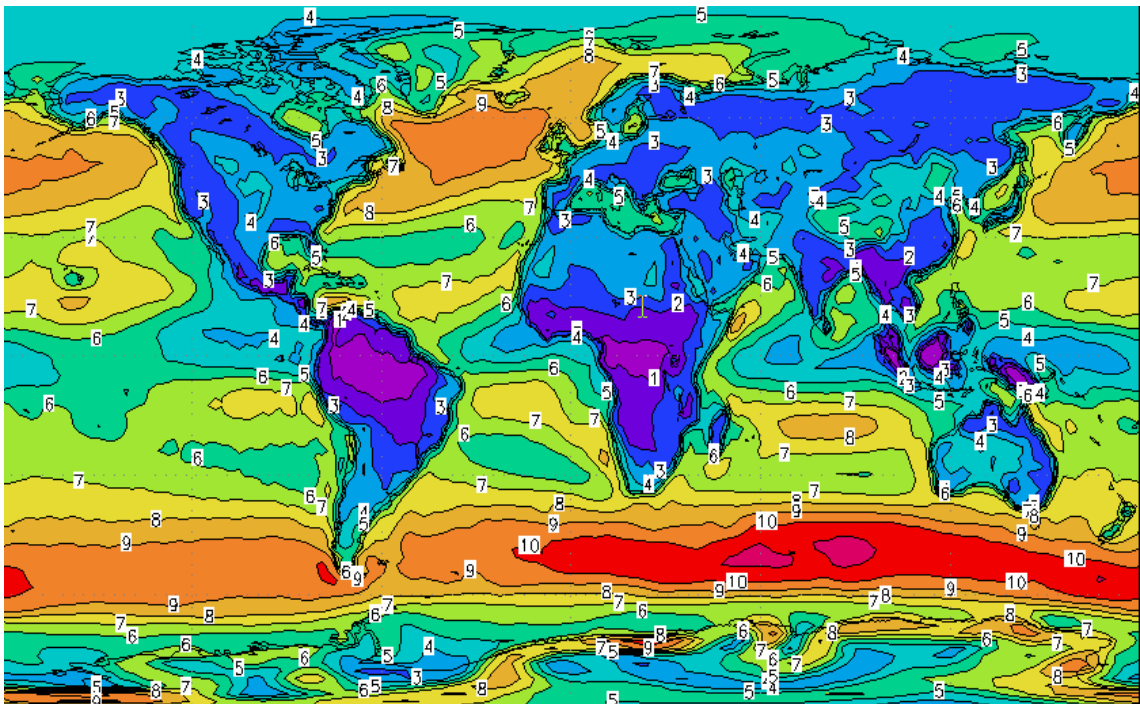
I. TEORETICKÁ ČÁST

1 VÍTR

Vítr je základní meteorologický prvek popisující pohyb vzduchu v určitém místě atmosféry v daném časovém okamžiku vzhledem k zemskému povrchu. Za vítr se považuje jen horizontální složka vektoru pohybu vzduchu. Určuje se směr a rychlost. [1]

Vítr je pohyb vzduchu způsobený rozdíly atmosférického tlaku, které jsou samy důsledkem různých teplot a jim odpovídajících různých hustot vzduchu. [2]

Teplý vzduch stoupá vzhůru, na jeho místo klesá vzduch studený. Zemská rotace způsobuje stáčení větrných proudů, jejich další ovlivnění (v přízemních výškách) způsobuje morfologie krajiny, rostlinstvo, vodní plochy atd. Některá místa na zemském povrchu mají horší větrné podmínky, jiná lepší. [3]



Obrázek 1: Větrná mapa Země ve výšce 10 m nad povrchem. Údaje jsou v m/s. [3]

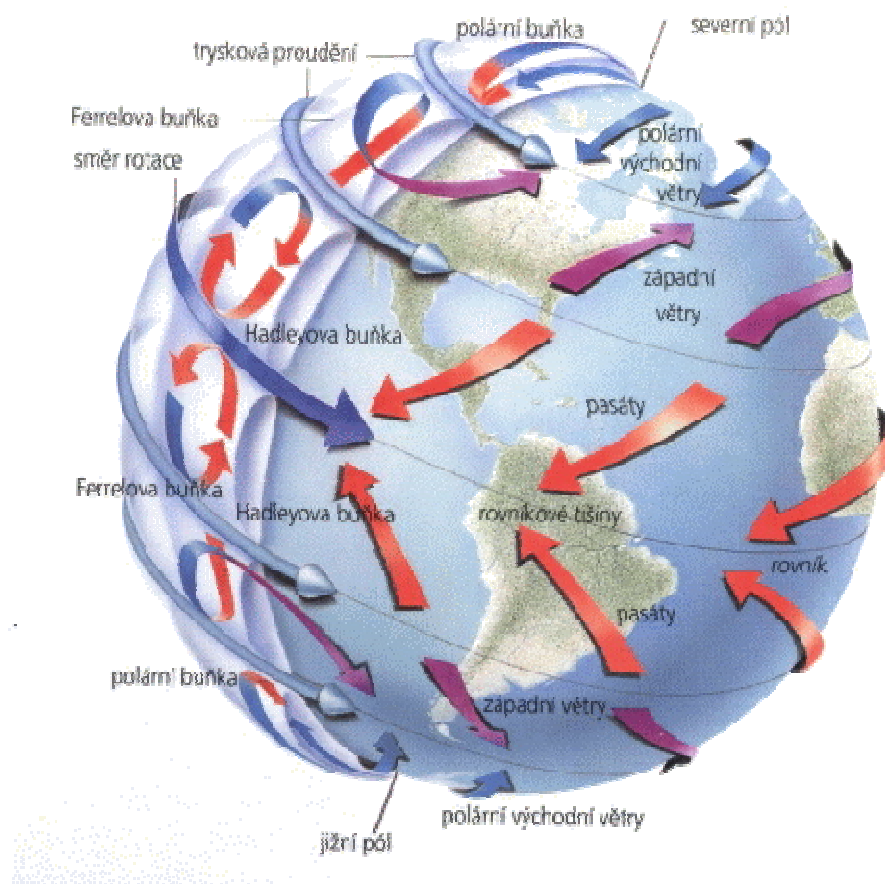
1.1 Směr větru

Vzduch se nepohybuje jen horizontálně, ale i vertikálně. Toho využívají například piloti paraglidingů, kteří, ač mají hustotu vyšší než je hustota vzduchu, umí stoupat vzhůru a udržet se tak v atmosféře i několik hodin. Na proudění větru závisí i srážky. Pokud prochází teplá vlna, tak se pohybuje ve vyšších vrstvách atmosféry. Studená vlna zase “klouže” po povrchu a podsouvá se pod teplý vzduch. [4] Směrem větru se rozumí směr, odkud kam vítr vane. Udává se obvykle v úhlových stupních (např.: 90° = východní vítr,

180° = jižní vítr, 270° = západní vítr, 360° = severní vítr, 0° = bezvětří atp.). Směr větru se určuje pomocí větrných směrovek, které se umísťují na stožárech ve výšce 10 metrů nad zemským povrchem. V této výšce je rušivý vliv místních překážek a terénu výrazně menší než v těsné blízkosti povrchu. [1] Tyto naměřené hodnoty se dále zaznamenávají do tzv. větrných map, které se dále zpracovávají a vyhodnocují.

1.2 Rychlost větru

Rychlost větru je vzdálenost, kterou urazí pohybující se vzduch za jednotku času, nejčastěji se udává v metrech za sekundu. [1] Rychlost větru vždy znamenala proudění vzduchu ve vnějším prostředí, ale rychlost pohybu vzduchu uvnitř je důležitá v mnohých oblastech, obsahujících předpovídání počasí, letadlech a námořních operacích, stavbách a stavebním inženýrství. Rychlosti silného větru mohou způsobit nepříjemné vedlejší efekty a silné větry často mají zvláštní jména, obsahující vichřice, hurikány a typhoons. [5]



Obrázek 2: Všeobecná cirkulace vzduchu. [6]

1.3 Měření rychlosti větru

Vítr se měří na pozemních meteorologických stanicích staničními přístroji anemometry, které jsou vybaveny registračním zařízením. Čidla měřících přístrojů těchto stanic by měla být umístěna ve výšce 10 m nad zemí. Vítr v této výšce se nazývá v meteorologii přízemní. Tyto hodnoty jsou dále zpracovány např. do větrných map atd. U rychlosti větru se má dávat přednost vyjádření v metrech za sekundu. [2]

Proudění vzduchu v atmosféře je většinou turbulentní a jeho rychlost i směr neustále kolísají. Proto výsledky naměřené na meteorologických stanicích se nikdy nevztahují k jednomu okamžiku, ale jsou to průměrované údaje za určitý časový interval. Údaje o průměrné rychlosti větru jsou pouze informativní a nestačí pro stanovení výkonu energie, větru a výpočet energie, kterou lze větrným motorem na daném místě vyrobit. [2] Dále jde rychlost větru měřit pomocí Beaufortovy stupnice, která slouží k odhadu rychlosti větru bez použití přístrojů. [1]

1.3.1 Beaufortova stupnice rychlosti větru

Dvanáctistupňová Beaufortova stupnice má již přes 200 let. V letech 1805 - 1808 ji sestavil admirál Francis Beaufort. Tato stupnice měla 14 stupňů a vycházela z účinku různé síly větru plachty lodi. [1] Stupnice pro odhad síly (rychlosti) větru bez užití přístrojů, tj. podle účinku větru na různé objekty. Udává se ve stupních Beauforta. Rychlosti větru se týkají standardní výšky 10 m nad zemí ve volném terénu. [7] 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 na 17 z původních 12 stupňů a definoval stupně rozsahem rychlostí větru měřených ve výšce 10 metrů nad povrchem. Tím byla Beaufortova stupnice síly větru změněna na Beaufortovu stupnici rychlosti větru. [8] Beaufortova stupnice byla sestavena jak pro použití na souši, tak pro použití na moři.

Tabulka 1: Beaufortova stupnice rychlosti větru na souši. [8]

Stupeň	Vítr	Rychlost		Na souši
		m/s	km/h	
0	bezvětří	< 0,5	< 1	kouř stoupá kolmo vzhůru
1	vánek	1,25	1.5	směr větru poznatelný podle pohybu kouře
2	větřík	3	6.11	listí stromů šelestí
3	slabý vítr	5	12.19	listy stromů a větvičky 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 nsnadné
7	mírný víchř	14,5	50 - 61	chůze proti větru je nsnadná, celé stromy se pohybují
8	čerstvý víchř	17,5	62 - 74	ulamují se větve, chůze proti větru je normálně nemožná
9	silný víchř	21	75 - 88	vítr strhává komíny, tašky a břidlice ze střech
10	plný víchř	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)

Tabulka 2: Beaufortova stupnice rychlosti větru na hladině moře. [8]

Stupeň	Vítr	Rychlost		Hladina moře	Výška vln[m]
		Uzly (kt)	km/h		
0	bezvětří	< 1	< 1	zrcadlo	< 0,03
1	vánek	1.3	1.5	vlnky	0,03
2	větřík	4.6	6.11	světlejší hřbety vln	0,13
3	slabý vítr	7.10	12.19	lom vln	0,3 - 0,7
4	mírný vítr	11.16	20 - 28	místy bílé hřebeny	0,6 - 1,2
5	čerstvý vítr	17 - 21	29 - 39	nad vlnami vodní tříšť	1,2 - 2,4
6	silný vítr	22 - 27	40 - 49	silná vodní tříšť	2,4 - 4,0
7	mírný víchř	28 - 33	50 - 61	bílá pěna na vlnách	4.6
8	čerstvý víchř	34 - 40	62 - 74	bílá pěna na vlnách	4.6
9	silný víchř	41 - 47	75 - 88	vysoké rolující vlny	6
10	plný víchř	48 - 55	89 - 102	přepadající hřebenatky	6.9
11	vichřice	56 - 62	103 - 114	vlny pokryté пеноu	9.14
12-17	orkán	> 62	> 117	vlnobití, pěna ve vzduchu	> 14

1.3.2 Měření rychlosti větru pomocí anemometru

Rychlost větru se měří pomocí anemometru. Anemometry pracují na těchto principech:

- a. Mechanickém - větrem se roztáčí otočné miskové nebo vrtulové čidlo, jehož počet otáček za jednotku času je ve známé závislosti na rychlosti větru.
- b. Aerodynamickém - rychlost větru se určí rozdílem mezi dynamickým tlakem ve speciálně konstruované aerodynamické trubici obtékané vzduchem a statickým tlakem v téže trubici za bezvětří.
- c. Zchlazovacím - čidlem anemometru je drát vyhřátý na vyšší teplotu než je teplota okolního vzduchu. Čím větší je rychlost větru, tím více se sníží teplota drátu. Tenhle způsob se běžně používá v měření sání vzduchu automobilů.

Nejrozšířenější je mechanický miskový anemometr. Anemometr, vybavený registračním zařízením, se nazývá anemograf. [1]

Princip Anemometru je takový: Rotor miskového anemometru se třemi nebo čtyřmi půlkulovými miskami, připevněnými ke hřídeli, se otáčí rychlostí proměnlivou podle rychlosti větru. Na stejné hřídeli je připevněn kotouč s otvory, který přerušuje světlo dopadající ze žárovky na fototranzistor. Impulsy vznikající na fototranzistoru se zaznamenávají, zpracovávají a vyhodnocuje se jejich četnost. [9]



Obrázek 3: Elektrický Anemometr. [10]

1.4 Větrná energie

Větrná energie je formou sluneční energie a patří mezi obnovitelné zdroje energie. Vzniká při nerovnoměrném ohřívání Země, což způsobuje tlakové rozdíly v atmosféře, které se vyrovnávají prouděním vzduchu. Energie větru je v dnešní době využívána především k výrobě elektřiny. Existují různá členění větrných elektráren. Podle připojení rozlišujeme systémy dodávající elektřinu do rozvodné sítě (grid-on) a systémy nezávislé na rozvodné síti (grid-off). Podle výrobní kapacity a velikosti vrtule jde o 3 základní typy: velké, střední a malé, kam řadíme i tzv. mikrozdroje. [11]

1.4.1 Větrná energie a její využití v České republice

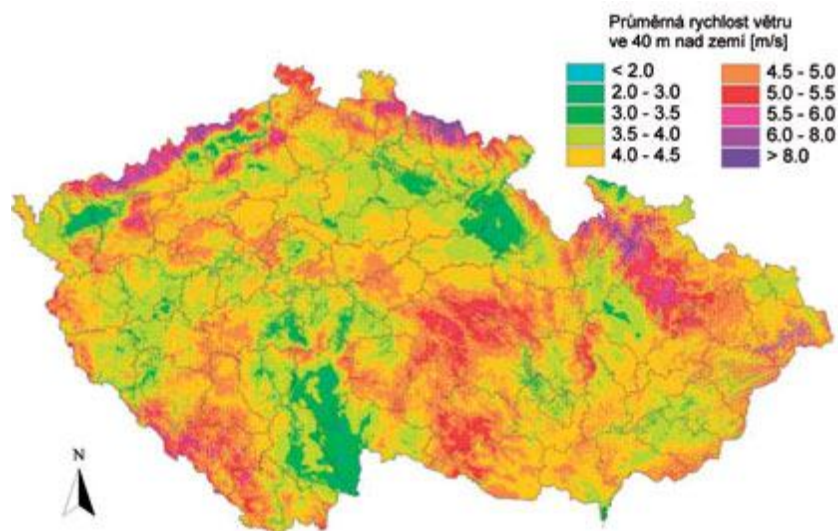
Každý stát má jiné přírodní a geografické podmínky, od nichž se odvíjí možnosti využití větrné energie. Nejlépe jsou na tom země, které mohou pro instalaci větrných elektráren využít mořské pobřeží či přímo mořský pás. Česká republika má ve srovnání s některými dalšími státy EU nízký potenciál větrné energie. [11]

Přesto se i zde (alespoň částečně) větrná energetika rozvinula. V České republice se začaly větrné elektrárny stavět v 80. a 90. letech 20. století. Jedním z prvních podniků, který začal vyrábět větrné elektrárny v ČR, jsou frýdecko-místecké Mostárny. Růst zájmu o větrnou energetiku v tuzemsku bylo možné pozorovat zejména mezi lety 1990 – 1995. Od druhé poloviny 90. let 20. století se však tento „boom“ zastavil. [11]

V České republice patří mezi oblasti vhodné pro stavbu větrných elektráren Krušnohorská, Jesenická a Českomoravská vrchovina. Některá místa z těchto oblastí však nelze využít, protože se jedná o chráněné oblasti. Podle údajů ERÚ bylo v srpnu 2008 v ČR využito pouze 133 MWh větrné energie z celkového potenciálu 900 MWh, což víceméně odpovídá odhadovanému 13 % využití výkonu větrných elektráren. Toto číslo (tzv. koeficient ročního využití) udává předpokládané množství dodané energie v porovnání s hypotetickým výkonem, kdyby pracovaly bez přestávky (pro porovnání vodní elektrárny mají 17 %, tepelné 55 %, jaderné 79 %). [11]

Tabulka 3: Výroba elektřiny v ČR z obnovitelných zdrojů. [11]

Zdroj	MWh
Vodní elektrárny	2 089 600
Biomasa	968 062
Bioplyn	215 223
Tuhé komunální odpady (BRKO)	11 975
Větrné elektrárny	125 100
Fotovoltaické systémy (odhad)	2 127
Kapalná biopaliva	9
Celkem	3 412 097



Obrázek 4: Větrná mapa České republiky. [12]

1.4.2 Výpočet výkonu větrné energie

Uvedené vzorce slouží pouze pro orientační stanovení výkonu. Pro přesné výpočty je nutno brát v úvahu mimo jiné i geometrickou charakteristiku listů rotoru, přesné stanovení všech účinností, rozdílnou rychlost větru daleko před rotorem a v rovině rotoru. Takové výpočty lze provádět pomocí speciálních programů na počítači. [13]

Kinetická energie proudícího vzduchu se vyjadřuje vztahem: [6]

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

E_k – kinetická energie vzduchu [J]

m – hmotnost vzduchu [kg]

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

Výkon větru lze vypočítat ze všeobecných vztahů: [6]

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

P – výkon vzdušného proudu [W]

t – čas [s]

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

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

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

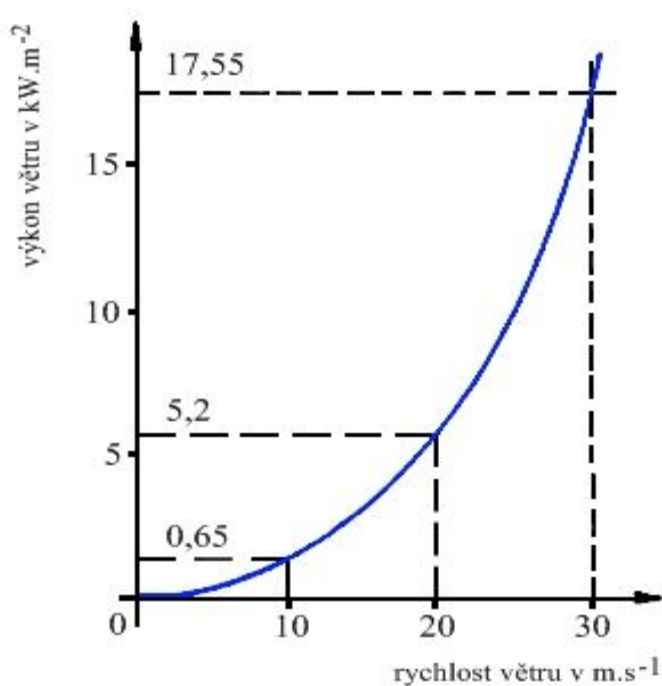
Jelikož výkon větru je funkcí rychlosti větru, hustoty vzduchu a velikosti plochy, kterou proudí, tak lze upravit rovnici (3) do následujícího tvaru. [6]:

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

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

Z uvedeného vztahu vyplývá, že výkon větru stoupá se třetí mocninou rychlosti větru. Při tlaku 101 325 Pa a teplotě 20° C se obvykle za hustotu vzduchu dosazuje přibližná hodnota 1,2 kg.m⁻³. [6] [13]

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. [13]



Obrázek 5: Závislost výkonu větru proudícího plochou 1 m² na jeho rychlosti. [13]

$$Mk = \left(\frac{v}{v_{ref}} \right)^2 \cdot Mk_{ref} \quad (5)$$

Mk – Krouticí moment [N.m]

v_{ref} – Rychlost proudění větru referenčního rotoru [m/s]

Mk_{ref} – Krouticí moment referenčního rotoru [N.m]

2 VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY

Větrná elektrárna je zařízení, které vyrábí elektrickou energii pomocí větru. Větrnou energii můžeme využít hned dvěma způsoby. Na mechanickou práci a k výrobě elektrické energie. V prvním případě máme zařízení typu mlýn. Pomocí mlýnu může například brousit kameny nebo čerpat vodu. V druhém případě máme zařízení s názvem větrná elektrárna. Větrná elektrárna přeměňuje sílu větru na elektrickou energii. [14]

2.1 Historie

Větrné stroje se využívaly již kolem roku 200 p. n. l. v Persii. Řecký matematik, známý Heron (někdy přezdívaný také jako Heron z Alexandrie) již v tuto dobu vymyslel zařízení, které se hodně podobalo pozdějším větrným mlýnům. V 7. století našeho letopočtu byly na území tehdejšího Sitanu (oblast mezi Afghánistánem a Iránem) postaveny první větrné mlýny. Konstrukcí se podobaly těm, které se objevily mnohem později na našem území. Byly využívány k mletí obilí a čerpání vody. [14]

Ve 14. století byly holandské větrné mlýny využívány k odvodnění oblastí kolem delty řeky Rýn. V Dánsku v roce 1900 bylo 2500 větrných mlýnů využíváno na mechanické práce, jako jsou například pumpování vody a mletí obilí. První známý elektrický mlýn byl sestaven ve Skotsku roku 1887 Jamesem Blythem. V roce 1930 se větrné mlýny na výrobu elektřiny stavěly na většině amerických farem, které neměly dosud nainstalované rozvody elektrické energie. [14]

První větrný mlýn, který byl připojen do elektrické sítě a vyráběl elektrickou energii, byl postaven ve Velké Británii v roce 1954. Jeho výkon byl 100 kW. [14]

Začátek výroby novodobých větrných elektráren v ČR se datuje na konec 80. let minulého století. Jejich rozkvět proběhl v letech 1990 – 1995, poté však došlo ke stagnaci (třetina ze všech 24 větrných elektráren postavených do roku 1995 patřila do skupiny s nevyhovující nebo vysoce poruchovou technologií, některá z těchto zařízení byla vybudována v lokalitách, které nevyhovovaly podmínkám pro správnou funkci větrných elektráren. [15]

2.2 Rozdělení elektráren

Existují 3 druhy větrných elektráren a záleží, jestli se jejich rotor otáčí po horizontální nebo po vertikální ose. [14]

2.2.1 Podle koncepce uložení rotoru

Větrné elektrárny s horizontální osou otáčení

Tento typ otáčení má většina větrných elektráren u nás v České republice. Na vysoké věži je umístěn rotor (otáčí lopatkami) a elektrický generátor (přeměňuje mechanickou energii otáčivých lopatek na elektrickou energii). [14]

Výhody

- Lze na dálkové ovládání natáčet elektrárnu tak, aby využila co nejvíce větrné energie.
- Díky vysoké konstrukci lze využít i silnější větry, které se pohybují ve vyšších výškách.
- Vysoká účinnost. [14]

Nevýhody

- Díky vysoké konstrukci jsou problémy s dopravou.
- Na instalaci elektrárny jsou zapotřebí vysoké jeřáby a kvalifikovaný personál.
- Jsou vidět na velké vzdálenosti a narušují ráz krajiny.
- Výrobně náročné. [14]



Obrázek 6: Horizontální elektrárna. [16]

Větrné elektrárny s vertikální osou otáčení

Tento typ má rotor umístěn svisle ve věži. Hlavní výhodou je, že turbína nemusí být nasměrovaná vzhledem k proudění větru, aby větrná elektrárna vyráběla elektřinu. Tento typ větrných elektráren se staví hlavně na místech, kde je proudění větru proměnlivé. Elektrárny s vertikální osou mohou mít generátor a převody umístěny blízko země a v případě poruchy jsou dobře přístupné. Na druhou stranu jsou instalovány blíže k zemi a nedosahují takových výšek jako větrné elektrárny s horizontální osou otáčení a rychlost větru je pomalejší. U nás tyto elektrárny nejsou moc běžné, protože na českém trhu nabízí tento typ elektráren málo firem. [14]

Výhody

- Umístění generátoru a převodů blízko k zemi.
- Snadná oprava.
- Vyrábí elektřinu už i při rychlosti větru 10 km/h.
- Levnější pořizovací náklady. [14]

Nevýhody

- Neprodukují tolik elektrické energie jako větrné elektrárny s horizontální osou otáčení. [14]



Obrázek 7: Vertikální elektrárna. [14]

2.2.2 Podle aerodynamického principu

Tento princip má pro činnost elektráren největší význam a podle něj dělíme větrné elektrárny na:

Větrné elektrárny pracující na odporovém principu

Tyto elektrárny patří mezi nejstarší a mohou mít horizontální i vertikální osu otáčení (vzor Savonius). Jejich podstatou je, že plocha nastavená proti větru mu klade aerodynamický odpor, proud vzduchu zpomaluje a je na ní vyvozována síla, která je mechanicky přeměňována obvykle na rotační pohyb. [17]

Větrné elektrárny pracující na vztlakovém principu

Tyto větrné elektrárny pracují na vztlakovém principu. Patří sem jak vrtule a lopatková kola s horizontální osou rotace, tak elektrárny s vertikální osou rotace (typ Darrieus). U rotorů pracujících na vztlakovém principu jsou listy rotoru tvarované tak, aby vznikla potřebná vztlaková síla uvádějící rotor do pohybu. [17]

2.2.3 Podle výkonu větrných elektráren

Podle výkonu můžeme rozlišovat:

Malé větrné elektrárny

Za malé větrné elektrárny se považují turbíny s nominálním výkonem menším než 60 kWh a s průměrem vrtulí do 16 m. [17]

Nejvýznamnější kategorií jsou elektrárny do 10 kWh, které lze dále rozdělit na:

- Mikroelektrárny, s výkonem zhruba do 2,5 kWh a průměrem vrtulí od 0,5 m do 3 m, což jsou zařízení na výrobu stejnosměrného proudu při napětí 12 V nebo 24 V, které jsou výhradně určeny pro dobíjení baterií. Takto nahromaděná energie může sloužit k osvětlení, k napájení komunikačních systémů, rádiových a televizních přijímačů a dalších elektrických spotřebičů. [17]
- Elektrárny s nominálním výkonem v rozsahu 2,5 kWh až 10 kWh a průměrem vrtulí od 3 m do 8 m. Jedná se o zařízení mající vstupní napětí 48 V až 220 V a jsou určena pro vytápění domů, pro ohřev vody, případně pro pohon motorů. [17]

Střední větrné elektrárny

Za střední větrné elektrárny se považují turbíny s nominálním výkonem v rozsahu 60 kWh až 750 kWh a s průměrem vrtulí od 16 m do 45 m. [17]

Velké větrné elektrárny

Za velké větrné elektrárny jsou považovány turbíny s nominálním výkonem v rozsahu 750 kWh až 6400 kWh a s průměrem vrtulí od 45 m do 128 m. [17]

Elektrárny velkých výkonů (300 kWh až 3000 kWh) jsou určeny k dodávce energie do veřejné rozvodné sítě. [17]

2.3 Hluky typické pro větrný zdroj

Infrazvuky

Zdrojem infrazvuků jsou zejména mechanické části konstrukce větrných turbín. Pro stanovení jejich intenzity nelze používat hlukoměry s filtrem křivky A (ekvivalent citlivosti ucha), který infrazvuky potlačuje. Hluk větrných elektráren, emitovaný v infrazvukové oblasti vykazuje vysoké špičky, dosahující až 70 dB (Vestas V-52 s hlučností 70 dB na frekvenci 16 Hz, Vestas V-80 s hlučností 72 dB ve frekvenčním rozsahu 4-26 Hz). Infrazvukové vlnění se kromě vzdušné cesty šíří i konstrukcí dřívku a základovou deskou do okolí. [16]

Tabulka 4: Přehled zdrojů hluku. [16]

Zdroj hluku	Frekvenční rozsah	Typická intenzita	Charakter hluku
Turbulence na koncích listu	500-1000 Hz	91,2 dBA	širokopásmové hučení, modulované otáčkami listu (wish-wish)
Hluk na náběžné hraně	750-2000 Hz	99,2 dBA	širokopásmové svištění
Hluk odtrhávání proudnic	typický tón	84,8 dBA	tón, měnící se dle rychlosti větru
Strojovna	směs hluků	97,4 dBA	směs hluků, měnících se s různou periodicitou (zapínání a vypínání servohonů, čerpadel, ventilátorů)
Generátor	Tón	87,2 dBA	tón, jehož výška se mění s otáčkami vrtule

2.4 Základní části větrných elektráren s vertikální osou rotace

Rotor

Rotor větrné elektrárny je zařízení, které odebírá energii větru. Přímočarý pohyb vzdušné masy rotor převede na točivý pohyb, který se využívá k roztáčení elektrického generátoru a výrobě elektrické energie. [15]

Strojovna

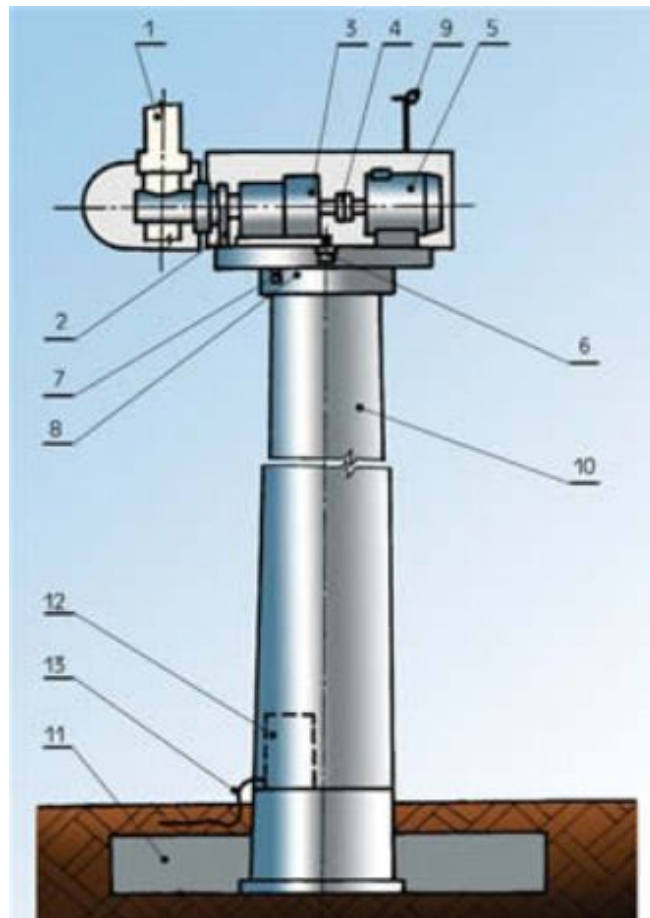
Srdce větrné elektrárny. Každý výrobce používá svůj princip soustrojí, tedy liší se i vybavení strojovny. Celá strojovna je ale vždy umístěna v sklolaminátové gondole. Nejčastěji je rotor umístěn na hřídeli. [15]

Stožár

Výška stožáru se v dnešní době standardně pohybuje od 40 do 110m. Najdeme ale nižší i vyšší instalace. [15]

Základ

Stožár je přišroubován k betonovému základu. To je nejtěžší součást z celé větrné elektrárny (hmotnost bývá přes 1000 tun), ale nebývá vůbec vidět. [15]

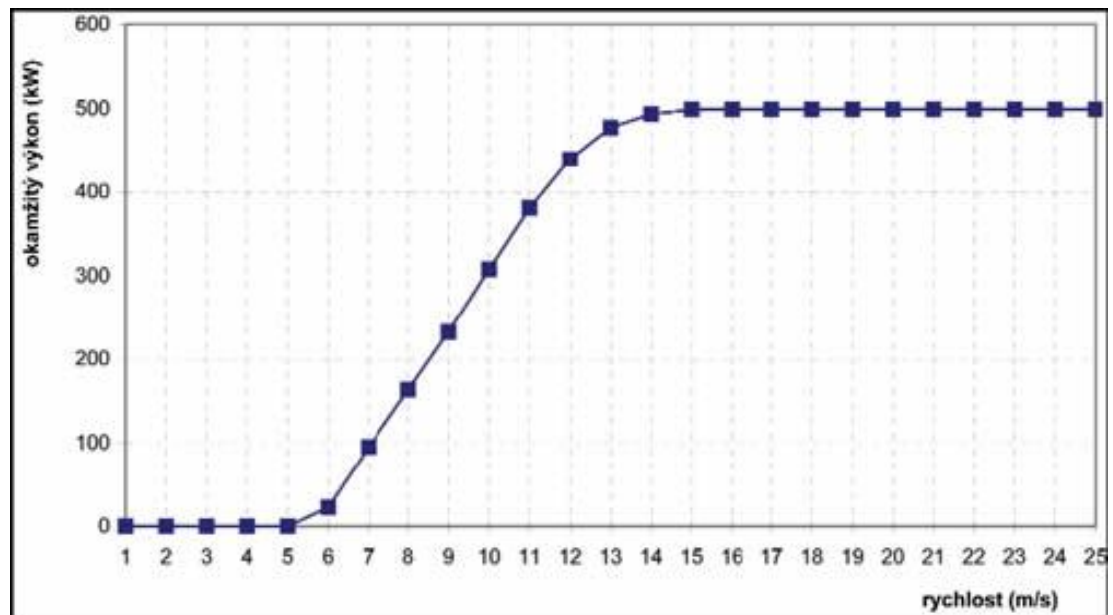


Obrázek 8: Schéma větrné elektrárny. [18]

1. Rotor s rotorovou hlavicí, 2. brzda rotoru, 3. planetová převodovka, 4. spojka, 5. generátor, 6. servo-pohon natáčení strojovny, 7. brzda točny strojovny, 8. ložisko točny strojovny, 9. čidla rychlosti a směru větru, 10. několikadílná věž elektrárny, 11. betonový armovaný základ elektrárny, 12. elektrorozvaděče silnoproudého a řídicího obvodu, 13. elektrická přípojka. [18]

2.5 Větrné elektrárny v ČR

V případě vnitrozemských oblastí, tedy v podmínkách ČR, jsou příhodné lokality převážně ve vyšších nadmořských výškách, obvykle nad 500 m n. m. V nižších nadmořských výškách je roční průměrná rychlost větru nízká (kolem 2 až 4 m/s). Rychlost větru je naprosto zásadní parametr, neboť energie větru roste se třetí mocninou rychlosti. Při zdvojnásobení rychlosti větru (např. ze 4 m/s na 8 m/s) vzroste jeho energie čtyřikrát a výkon osmkrát viz rovnice (1) a (4). Je zřejmé, že i malá odchylka v rychlosti větru se výrazně projeví na množství získané elektřiny. [19]

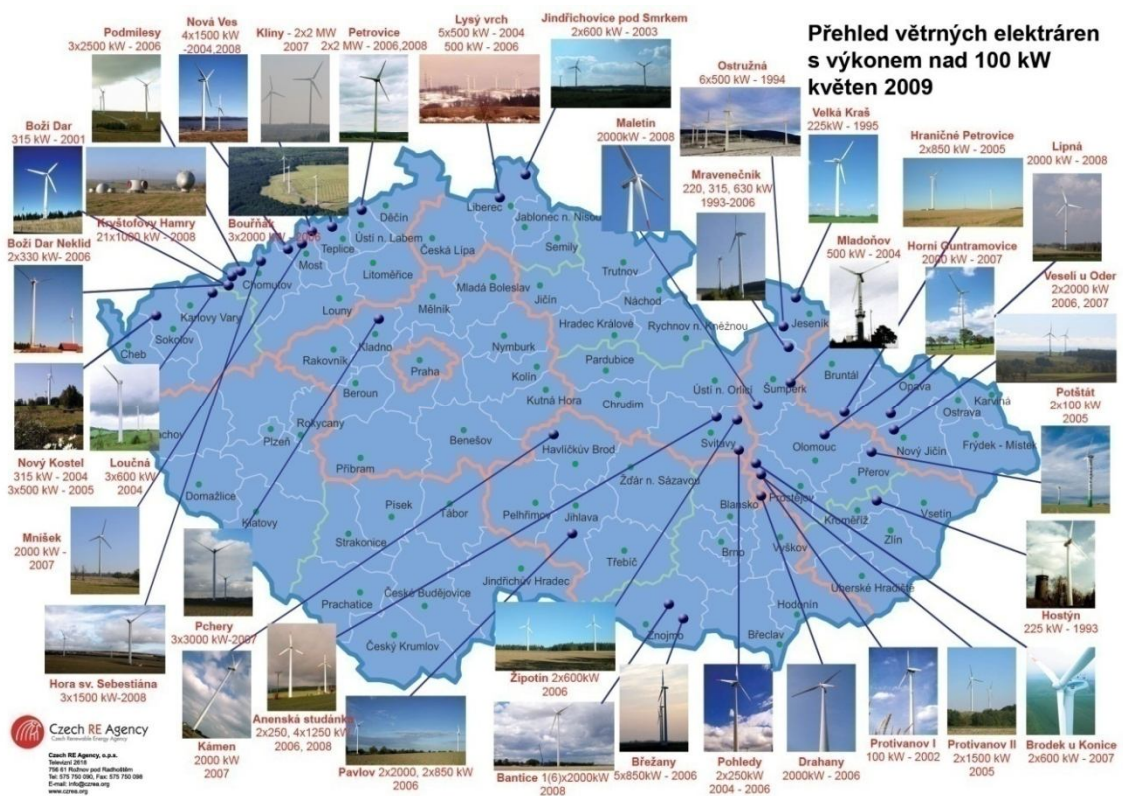


Obrázek 9: Výkonová charakteristika větrné elektrárny s výkonem 500 kWh. [19]

K ohodnocení konkrétní lokality je nejvhodnější stanovení distribuční charakteristiky, což je rozdělení četnosti rychlostí větru zjištěné kontinuálním měřením rychlosti ve výšce osy rotoru. Ideální je alespoň roční měření porovnané s dlouhodobými údaji na blízkých meteorologických stanicích. Jednotlivé roky se od sebe mohou značně lišit. Před rozhodnutím o stavbě elektrárny je tedy třeba znát následující vstupní údaje:

- měřené průměrné rychlosti větru včetně četnosti směru, ideálně roční měření;
- množství a parametry překážek, které způsobují turbulenci a brání laminárnímu proudění větru (porosty, stromy, stavby, budovy);
- chod ročních venkovních teplot či jiných nepříznivých meteorologických jevů (např. námrazy způsobují odstávky);
- nadmořská výška (hustota vzduchu);
- možnost umístění vhodné technologie:
 - únosnost podloží, kvalita podkladu a seismická situace, geologické podmínky pro základy elektrárny;
 - dostupnost lokality pro těžké mechanismy, možnosti pro vybudování potřebné zpevněné komunikace;
 - vzdálenost od přípojky VN nebo VVN s dostatečnou kapacitou;

- vzdálenost od obydlí, která by měla být dostatečná kvůli minimalizaci možného rušení obyvatel hlukem (nejvyšší přípustná hladina hluku ve venkovním prostoru na obytném území je ve dne 50 dB a v noci 40 dB);
 - míra zásahu do okolní přírody - zátěž při výstavbě elektrárny, zátěž budováním elektrické přípojky, zásah do vzhledu krajiny (umístění lokality v CHKO velmi komplikuje povolená řízení).
- majetkové vztahy k pozemku, postoj místních úřadů, občanů, vlastnictví či dlouhodobý pronájem pozemků. [19]



Obrázek 10: Rozmístění větrných elektráren v ČR. [20]

3 ROTORY S VERTIKÁLNÍ OSOU

3.1 Savoniův rotor

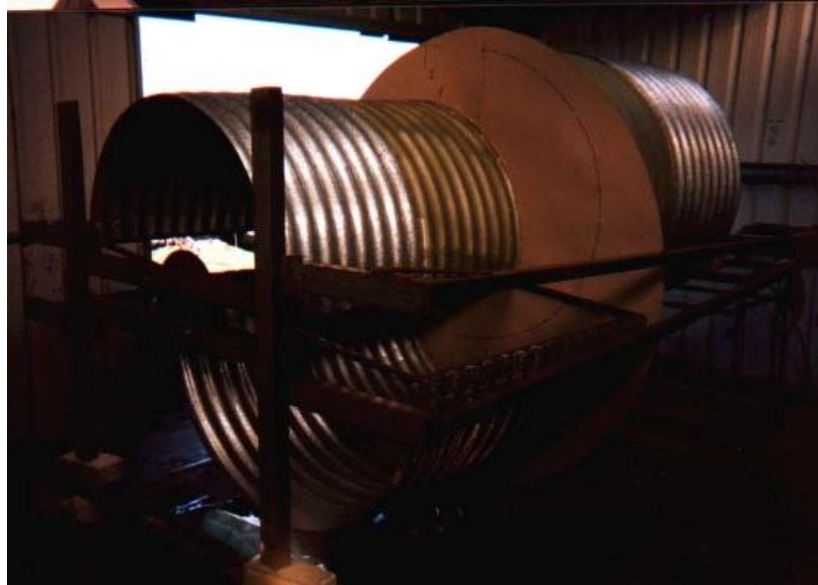
3.1.1 Základní údaje

Savoniův rotor vynalezl kolem roku 1925 finský lodní důstojník Sigurd J. Savonius. Tento rotor sestává ze dvou vodorovných kruhových kotoučů, mezi něž jsou svisle postavena dvě polokruhovitě zahnutá křídla, respektive lopatky. Tyto lopatky jsou uprostřed přibližně o 20 % průměru rotoru přesazeny do protisměru, takže část větru je ze zadní strany momentálně pasivní lopatky směřována na přední stranu aktivní lopatky. Podle uspořádání lopatek lze postavit rotory s otáčením doleva nebo doprava. Savoniův rotor byl v malých provedeních velmi často používán k pohonu ventilátorů na střeších nákladních vozidel, kde při jízdě roztáčel vítr lopatky. V současné době nabývá tento rotor na významu pro nízko výkonné aplikace v decentralizovaném zásobování energií. [21]

Výhody Savoniových rotorů:

- Jednoduchá stavba ze snadno dostupných materiálů, případně z materiálů použitých (200 litrový barel).
- Nezávislost na stávajícím směru větru, proto není nutné natáčení do směru větru.
- Přímé předávání síly na svislou hřídel, která může vést až k zemi a tam střídavě nebo zároveň pohánět pracovní stroje.
- Využití širokého pásma síly větru. Správně zkonstruované Savoniovy rotory mohou využít vítr jak o rychlosti extrémně nízké (2 až 3 m/s), tak i o rychlosti střední (4 až 12 m/s).
- Je možné spojování několika Savoniových rotorů do většího zařízení s relativně vysokými otáčkami. Savoniův rotor nabízí možnost zvětšit plochu turbíny, a tím i výkon, aniž dojde k výraznému poklesu otáček.
- Možnosti rozšíření u zařízení s rotory spojenými horizontálně: lze nejdříve instalovat malé zařízení a to posléze v závislosti na rostoucí potřebě energie rozšiřovat na jednu nebo na obě strany připojováním dalších rotorů.
- Vysoká odolnost vůči bouřím při správném provedení: Savoniovy rotory mají zvláště sníženou citlivost vůči vírům a turbulencím.

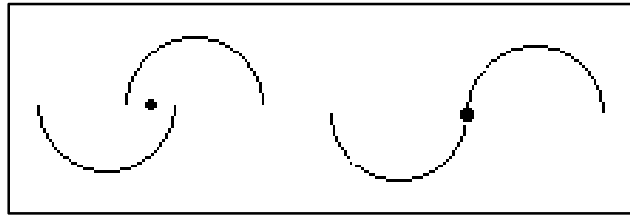
- Vysoká hmotnost rotoru, což sice díky použití levných materiálů neznamená vysoké náklady, avšak vyžaduje pečlivé vyvážení, aby se zabránilo kritickému kmitání při vysokých otáčkách.
- Malá rychloběžnost, to znamená relativně nízké otáčky a vysoké točivé momenty.
- Relativně nízký součinitel využití energie větru (účinnost): moderní lopatkové turbíny dosahují vyšších hodnot, ale jen za určité rychlosti větru. [21]



Obrázek 11: Savoniův rotor. [22]

3.1.2 Konstrukce

Savoniovy rotory mohou být konstruovány různým způsobem a z různých materiálů, přičemž pro talíře a lopatky se nabízí ocelový plech, plech z lehkých kovů, plasty zesílené skleněným vláknem a vodovzdorně klížená překližka. Pro dosažení rovnoměrného točivého momentu se doporučuje konstruovat zařízení jako dvoustupňové, kde stupně rotoru jsou pootočený proti sobě o 90° . Pak bude jedno křídlo stát vždy plně ve větru a rotor se i při malé síle větru může snadno rozběhnout. Ještě lépe se osvědčilo dvojité uložení procházející hřídele. Průřez vzduchového kanálu mezi křídly se hřídelí sice zmenší, avšak ukázalo se, že v praktickém provozu to nezpůsobuje snížení výkonu. Průměr hřídele by ovšem měl být větší než 25 % šířky vzduchového kanálu. [21]



Obrázek 12: Průřez Savoniovou turbínou. [22]

Při stavbě rotoru se musí postupovat exaktně, aby se docílilo co nejlepší rotace. Při této velikosti rotoru nelze vynechat stabilizační paprsky kola, jinak by bylo nutné použít pro talíře příliš silný materiál. Velmi důležité jsou táhla uprostřed křídel obou stupňů, která zabraňují vyboulení, resp. vibracím vnějších hran křídel vlivem odstředivé síly při vysokých rychlostech větru. Před namontováním je nutno rotor pečlivě vyvážit. Velikost a uspořádání závaží se zkouší tak dlouho, až rotor zůstává staticky a dynamicky vyvážen v každé pozici a zastaví se vždy do určitého postavení. Vyvažovací závaží se poté napevno přišroubují, a to tak bezpečně, aby se neuvolnily ani při vysokých otáčkách. Pro uložení rotoru se osvědčila naklápěcí válečková ložiska. [21]

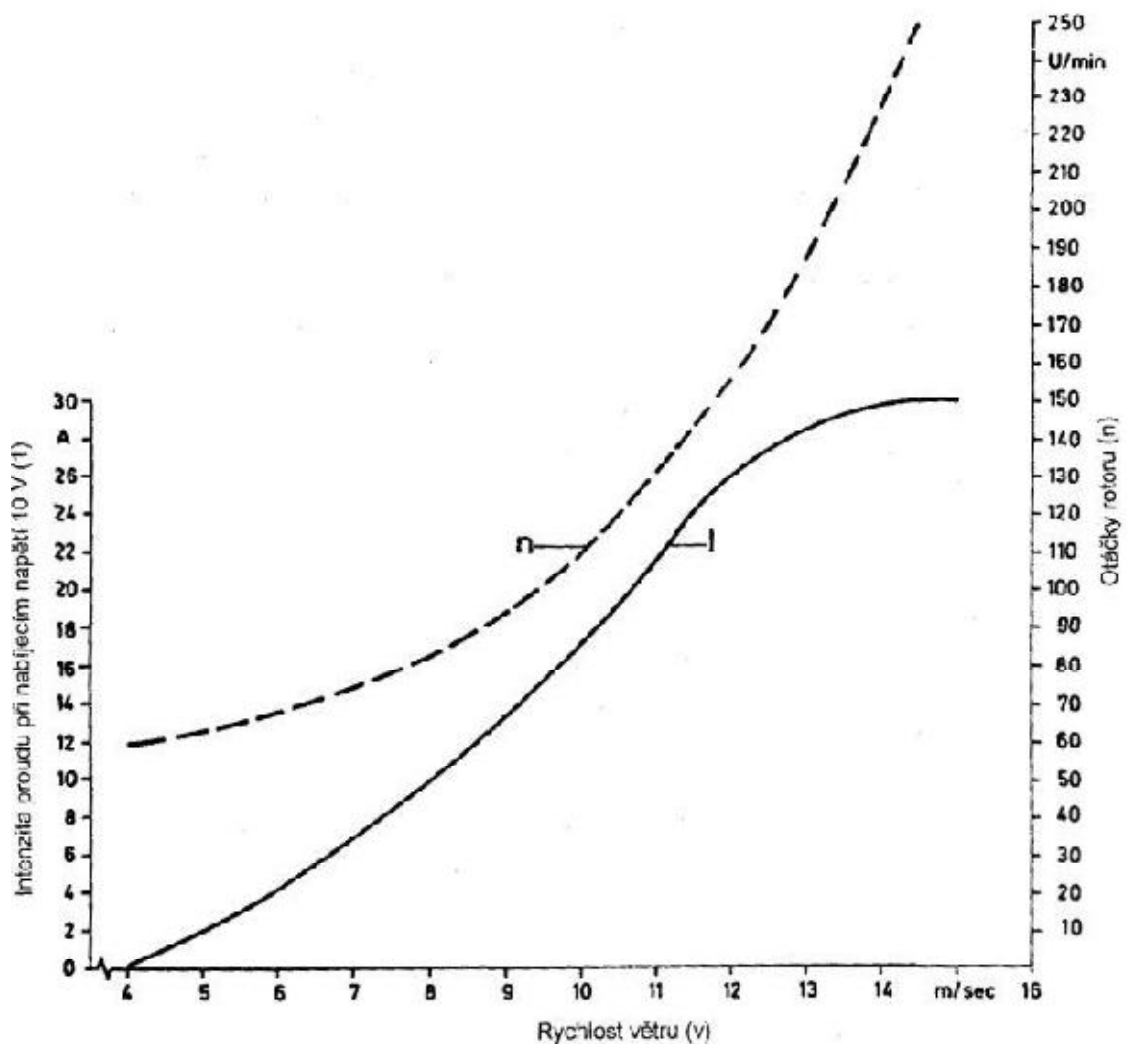
3.1.3 Požadavky na bezpečnost

Všechny důležité šrouby se musí zajistit a po záběhu znovu utáhnout. Větrná turbína není přístroj, který by bylo možno instalovat a dále se o něj nestarat. Určitá minimální údržba (kontrola ukotvení lan, péče o ložiska, dotáhnutí uvolněných šroubů) je pro bezpečnost a spolehlivost provozu nezbytná. Velmi důležitou částí je brzdicí zařízení, které musí bezpodmínečně být schopno rotor při nejvyšších rychlostech větru z plných otáček zabrzdit a znehybnit. [21]

3.1.4 Výkon

Počet otáček Savoniova rotoru závisí na průměru rotoru, rychlosti větru a zatížení. Čím větší je průměr rotoru, tím menší je počet otáček, a tím vyšší je točivý moment. Bez zatížení je obvodová rychlost dobře postaveného dvoustupňového Savoniova rotoru přibližně 1,8 krát vyšší, než rychlost větru. Z toho lze snadno vypočítat otáčky naprázdno v závislosti na průměru rotoru a střední rychlosti větru. [21]

Pod zátěží počet otáček rotoru přirozeně klesá. Nejvyšší výkon (součin točivého momentu a otáček) podává rotor tehdy, když jeho obvodová rychlost přibližně odpovídá rychlosti větru. [21]



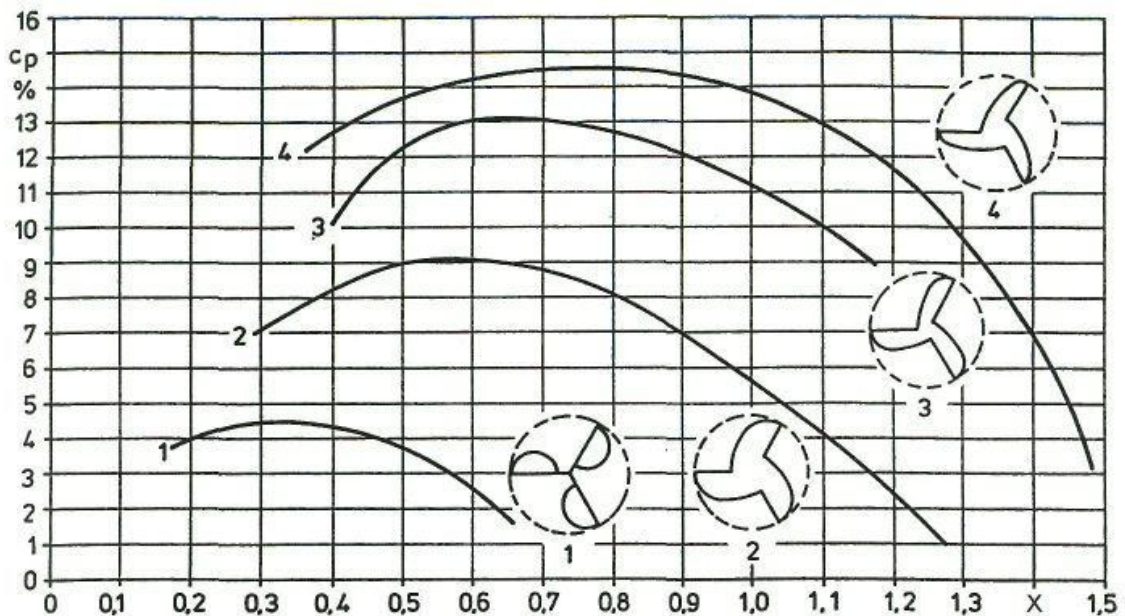
Obrázek 13: Otáčky rotoru a intenzita elektrického proudu z generátorův závislosti na rychlosti větru. [21]

3.2 Průtažný rotor

U výše popsaného dvoustupňového Savoniova rotoru má procházející hřídel důležitou statickou funkci. Přenáší nejen točivý moment z lopatek na pracovní stroj, nýbrž musí také přijímat ohýbací síly vyvolané tlakem větru a nevyvážeností. Lopatky a talíře rotoru této konstrukce nesmí dosahovat až k rámu - proto je konstrukční výška rotoru omezena na 2,5 až 3 m. Pokud bychom chtěli rotor zvětšit, hrozilo by nebezpečí, že se hřídel za bouře kriticky rozkmitá do stran. Byl proto vyvinut nový typ rotoru, který je samonosný, tuhý v ohybu a co do statiky koncipován jako prostorový nosník. Toto řešení dovoluje stavět větší rotory, přičemž horním limitem je v současnosti průměr cca 3 m a výška 6 m. Tento rotor je tří lopatkový, ale jedno stupňový. Konstrukční princip spočívá v tom, že svislé lopatky z ohebného materiálu (např. umělá hmota zpevněná skelným vláknem, lodní pře-

kližka nebo plech) tvoří s vodorovnými segmenty nebo žebry konstrukční jednotku podobnou lodnímu trupu nebo křídlu letadla. Rotor je díky tomu velmi lehký a zároveň tuhý. Segmenty upevněné na hřídeli dodávají lopatkám žádoucí tvar a přenášejí točivý moment rovnoměrně na hřídel. [21]

Zatímco součinitel rychloběžnosti při chodu naprázdno činí u tohoto tvaru lopatky okolo 1,5 (obvodová rychlost špiček lopatek je 1,5 krát vyšší než rychlost větru), lze rotor odpovídající zátěži zbrzdít na hodnoty mezi 0,4 a 1,1, aniž nastane velký pokles výkonu. Tato kladná vlastnost v praktickém provozu alespoň částečně vyrovnává nepříznivý fakt, že oproti rotoru s horizontální osou je v tomto případě součinitel využití energie větru, respektive účinnost podstatně nižší. [21]



Obrázek 14: Součinitel využití energie větru c_p a součinitel rychloběžnosti X u tří lopatkového průtažného rotoru s rozdílnými tvary lopatek. [21]



Obrázek 15: Ukázka průtažného rotoru v praxi. [26]

3.3 Darrieův rotor

Dne 8. prosince 1931 nechal patentovat G. M. Darrieus rotor s vertikální osou rotace. Jeho účinnost je asi 38 %. [22]

Výhody:

- není třeba ho natáčet do směru větru;
- generátor a ostatní těžká strojní zařízení není problém uložit pod stožár;
- menší nároky na stožár; [22]

Nevýhody:

- problémovější regulovatelnost;
- pro „rozběh“ potřebuje vyšší rychlosti větru (proto se pro potřeby využití i při nižších rychlostech nuceně roztáčí - např. malou Savoniovou turbínou). [22]

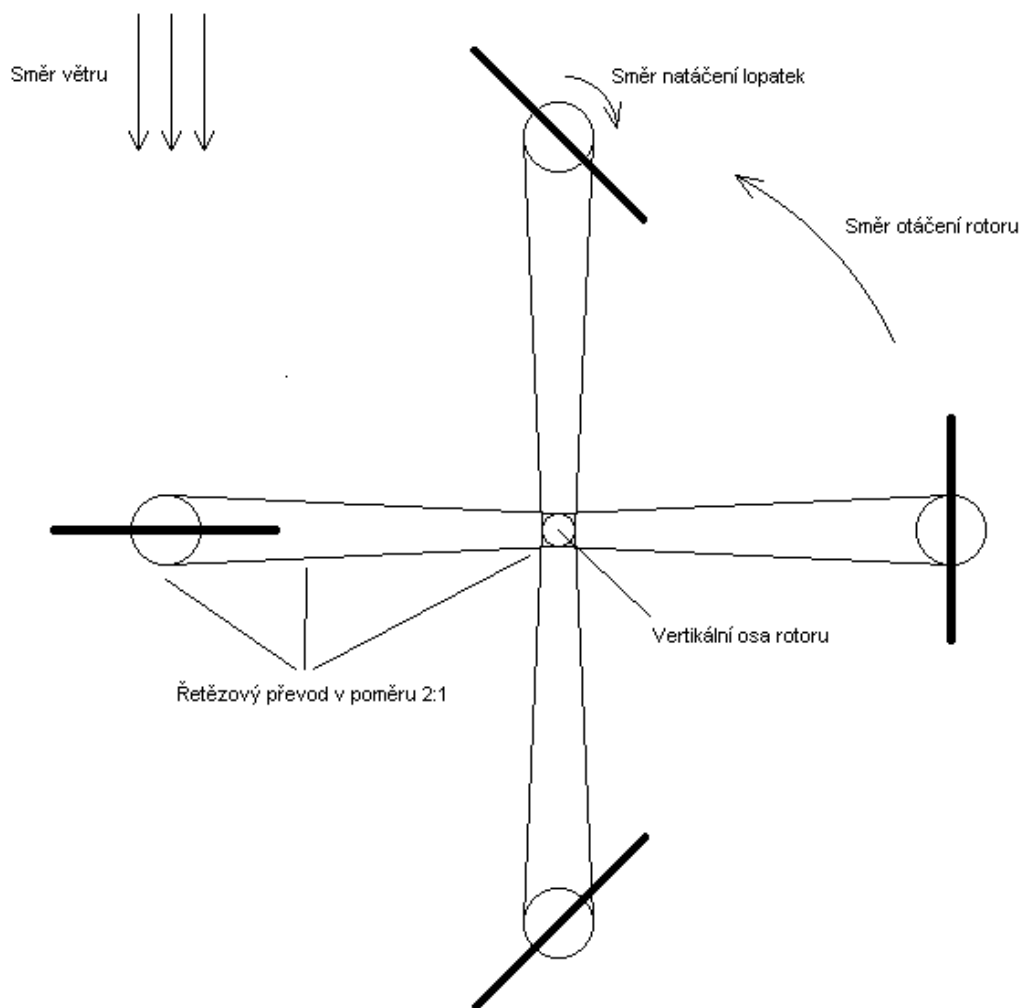


Obrázek 16: Darrieův rotor. [22]

3.4 Jacksonovo kolo

Jedná se o rotor s vertikální osou, ale z obrázku a popisu není zřejmá přesná orientace osy (zda je uložena vodorovně či svisle - obojí je možné, ale vodorovná varianta je technicky náročnější). Pokud je třeba malého zdroje energie, stojí tento rotor za zvážení. Jedná se o rotor, který má pohyblivé lopatky. [22]

Při otočení rotoru kolem osy rotoru o 360° se lopatka otočí pouze o 180° . Toto je zajištěno např. řetězovým převodem (např. řetěz a ozubená kolečka z kola), přičemž ozubené kolečko otáčející lopatkou má dvojnásobný počet zubů než ozubené kolečko v ose rotoru. Lopatky rotoru (na tomto nákresu) jsou téměř stále v záběru - mimo mrtvý bod (poloha vpravo), kde se lopatka překlápí pro změnu směru výsledných sil. Tento typ větrné elektrárny vyžaduje natočení lopatky do počátečního záběru. [22]



Obrázek 17: Jacksonovo kolo. [22]

4 PATENTOVÁ LITERATURA

4.1 Patent

Patent je jeden z předmětů průmyslového vlastnictví. Patent ve velmi jednoduchém zjednodušení představuje dokument, kterým jeho majitel chrání vlastnickými právy nějaký vynález. Majitel tohoto patentu má výhradní právo využívat předmět ochrany vynálezu, poskytovat souhlas k využívání vynálezu druhým osobám za pomoci licenční smlouvy a má také právo tento patent převádět na další osoby. Ochrana vynálezu prostřednictvím patentu je udělována státními orgány. V České republice Úřadem průmyslového vlastnictví. Doba, pro kterou platí tato licence, je omezena 20 lety od data podání přihlášky patentu. [27]

4.2 Podmínky udělení patentu

Patent se uděluje na vynález, který je nový, je výsledkem vynálezecké činnosti a průmyslově využitelný. Patent musí splňovat podmínky stanovené zákonem. Vynález je nový, není-li součástí stavu techniky a je výsledkem vynálezecké činnosti. [27]

4.3 Patentová literatura Velká Británie

Byla vyhledána patentová literatura z Velké Británie. Pro vyhledávání byl použit server www.worldwide.espacenet.com, ve kterém byly zadány klíčová slova, horizontal axis, wind, turbine, vertical axis a klíčová zkratka GB – Great Britain.

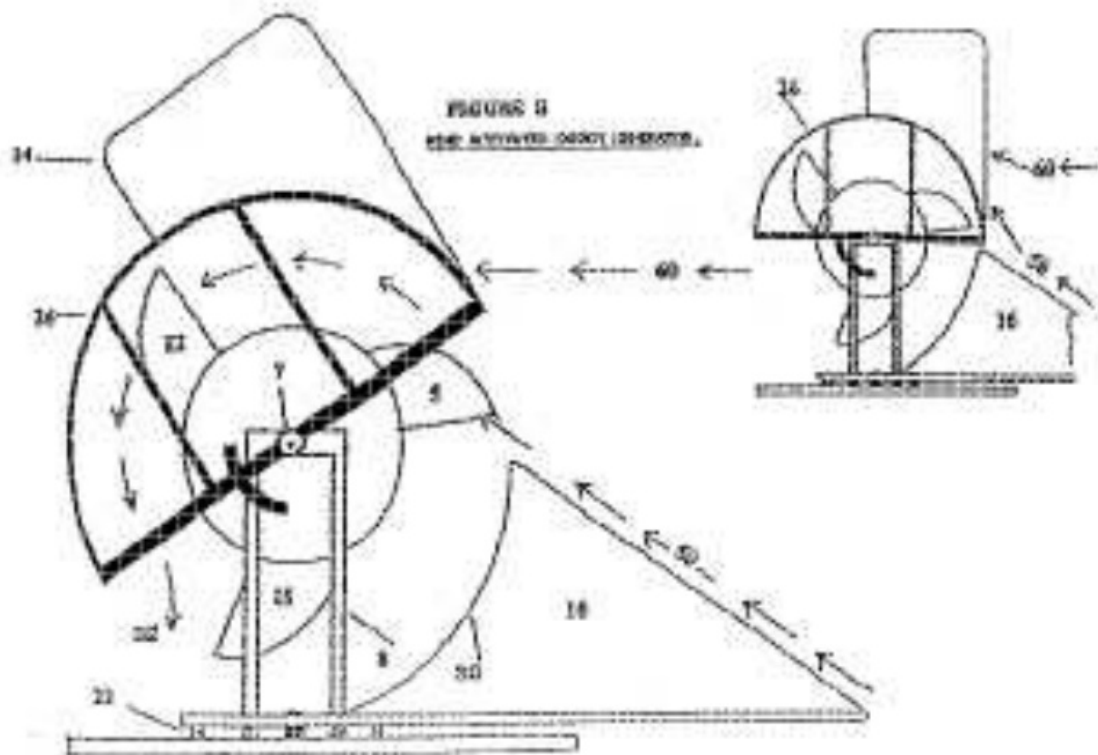
4.3.1 Patent Fletchera Johna Kennedyho

Tabulka 5: Patent 1. [28]

Patent 1	
Původce	Fletcher John Kennedy [GB]
Přihlašovatel	Fletcher John Kennedy [GB]
Číslo přihlášky	GB20090021027 20091201
Číslo priority	GB20090021027 20091201
Den přihlášky	1.12.2009

Tento typ horizontální větrné turbíny s osou Z, zahrnuje rotor s křivočarými lopatkami 5, 12, 15, připevněnými přes osu 7 na otočné hřídeli, připevněné k zemi 21 přes rám 8 nastavitelného korouhvičkou 14, a naháněče větru 16, který přivádí vítr k vrcholu rotoru pod ochranné sklo. Stator nebo větrný průvodce 26 je také otočný a připevněn k ose. Stator

je otočný od vrcholu rotoru po 90° doleva či doprava a zamezuje dalšímu přístupu větru 60 k lopatkám a pomáhá plynulému provozu rotoru. Díky tomuto statoru je dosaženo stálým tlakům při otočení rotoru o 360°. [28]



Obrázek 18: Patent od Fletcher John Kennedy. [28]

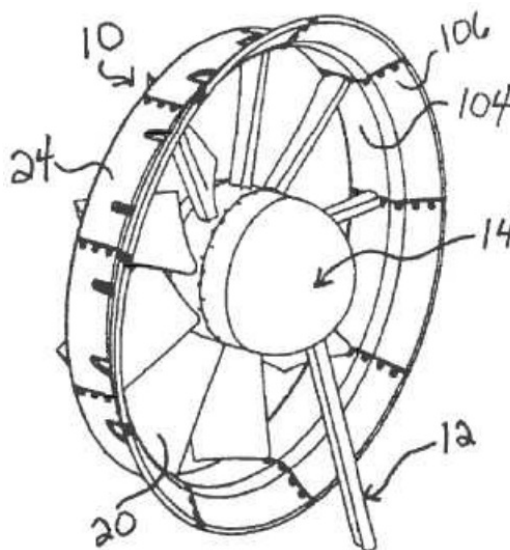
4.3.2 Patent ST-Germain Andre

Tabulka 6: Patent 2. [29]

Patent 2	
Původce	ST-GERMAIN ANDRE [CA]
Příhlašovatel	ST-GERMAIN ANDRE [CA]
Číslo přihlášky	WO2009CA00769 20090604
Číslo priority	GB20080010149 20080604
Den přihlášky	4.6.2008

Větrná turbína s vodorovnou osou otáčení pro výrobu elektrické energie za pomoci větru. Ve větrné turbíně se nachází množství paprskovitých prodloužených a rovnoměrně rozložených větrných ostří, posouvatelně namontovaných mezi otočným středem. Tato ostří jsou ohraničena vnějším lemem. Střed a vnější lem je zformovaný tak, aby přiváděl vítr

směrem k ostřím, která jsou vymodelována na způsob letadla. [29]



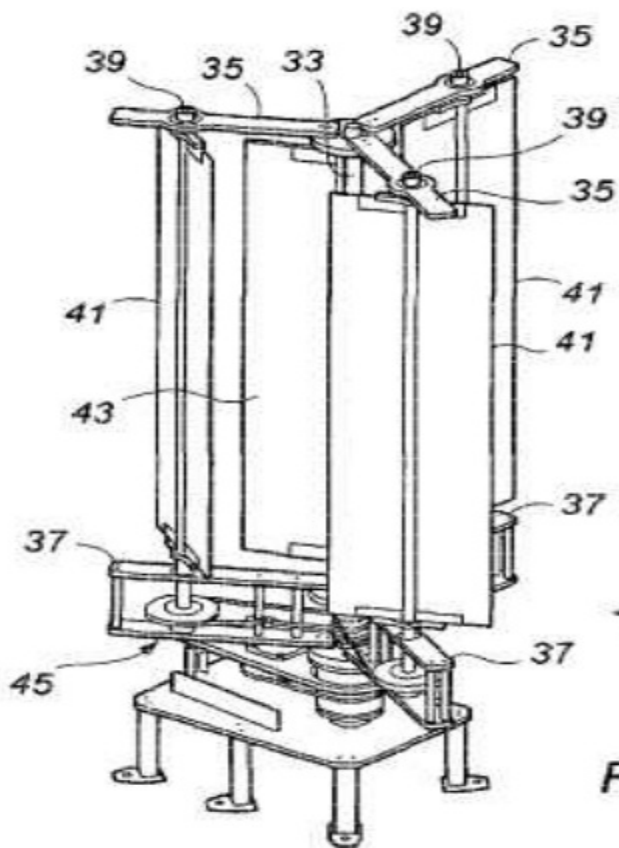
Obrázek 19: Patent od ST-GERMAIN ANDRE. [29]

4.3.3 Patent Manninga Howarda Johna

Tabulka 7: Patent 3. [30]

Patent 3	
Původce	Manning Howard John
Příhlašovatel	Manning Howard John
Číslo přihlášky	WO2011GB00795 20110526
Číslo priority	GB20110002993 20110222
Den přihlášky	28.5.2010

Rotor s vertikální osou a lopatkami, které se otáčí, aby nedocházelo do záběru v protivětru. Hodí se pro použití u generátoru malého měřítka. Turbína má lopatky, které jsou otočné v ose otáčení rotoru, osa rotoru se otáčí po vertikální ose. Korouhvička je připojena k ose otáčení rotoru, aby měnila orientaci lopatek při změnách proudícího větru. [30]



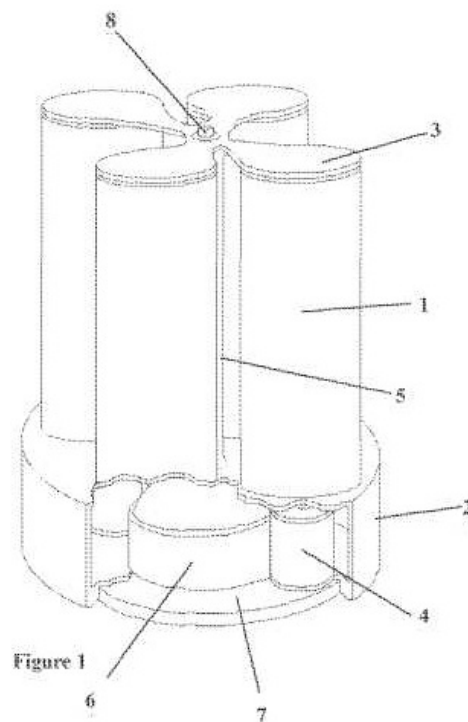
Obrázek 20: Rotor Manninga Howarda Johna. [30]

4.3.4 Patent Redcliffa Stephana Martina

Tabulka 8: Patent 4. [31]

Patent 4	
Původce	Redcliffe Stephen Martin
Příhlašovatel	Redcliffe Stephen Martin
Číslo přihlášky	GB20090010640 20090622
Číslo priority	GB20090010640 20090622
Den přihlášky	22.6.2009

Rotor se svislou osou otáčení. Větrou poháněná turbína, která využívá jeden nebo více rotujících válců 1. Úv Magnusův jev poskytuje hybnou sílu za účelem výroby elektrické energie. Zařízení zahrnuje rotační část s ložným pouzdem 2, 3, které je používáno pro podporu jednoho nebo více rotujících válců 1. Rotační část může být připojena ke kardanové hřídeli generátoru 6, která je při otáčení napojena na nehybnou platformu 7. Turbína může být nainstalována například na lodi a mohla by být užívána pro napájení generátoru, lodního hnacího mechanismu, lodní vrtule, čerpadla nebo převodovky. [31]



Obrázek 21: Rotor od Manning
Howarda Johna. [31]

5 SOUHRN TEORETICKÉ ČÁSTI

V první části teoretické práce byly vysvětleny základní pojmy týkající se větru, jeho fyzikální podstaty, rovnice související s výpočty silového působení, energie a výkonu. Dále byly uvedeny statistické údaje o rozložení rychlosti větru na Zemi a v České republice.

V druhé části byla vypsána historie větrných elektráren, jednotlivé rozdělení větrných elektráren, jejich typické hluky a rozmístění větrných elektráren v České republice.

V další části je rozdělení jednotlivých druhů rotorů, z nichž velmi zajímavou variantou je průtažný rotor, ze kterého dále vychází tvar lopatky v praktické části.

V poslední části se nachází patentová literatura s příklady různých patentů.

Větrná energie je velmi důležitým obnovitelným zdrojem pro výrobu elektrické energie. Patří mezi nejhůře předvídatelný obnovitelný zdroj, za jehož pomoci lze vyrábět elektrickou energii. I přes tyto nedostatky má větrná energie velký potenciál a je jedním z nejvíce se rozvíjejících odvětví pro výrobu elektrické energie. Využití větrné energie se neustále inovuje a čím dál více firem se snaží najít co nejvhodnější a co nejefektivnější způsob konstrukce větrných elektráren s ohledem na jejich výkon, ekologii krajiny a snaží se co nejvíce eliminovat dopady na životní prostředí člověka.

Navazující praktická část se věnuje řešení, které zkoumá co nejvhodnější tvar lopatky průtažného rotoru pomocí počítačové simulace softwaru SolidWorks Flow Simulation. Tento program umožňuje vypočítat krouticí moment rotoru se zadaným tvarem lopatek při různých rychlostech proudění větru kolem průtažného rotoru. Porovnáním dosažených hodnot vypočítaného krouticího momentu lze nalézt nejvhodnější teoretický tvar lopatky.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 PROGRAM SOLIDWORKS SYSTEM

SolidWorks, je systémem pro 3D strojírenské modelování. Jak bylo uvedeno, systém 3D modelování znamená modelování trojrozměrných obrazců. Po vymodelování jakékoli součásti nebo více součástí, následuje ukládání do sestav a spojování součástí, jak je zapotřebí. S těmito vymodelovanými sestavami lze nadále pracovat v systému SolidWorks Flow Simulation, kde je možno zkoumat silové účinky a vlivy teploty proudění jakýchkoli tekutin apod. Používá se na více jak 4300 hlavních výukových institucích po celém světě i na univerzitě TGM ve Zlíně fakulty technologické. Kromě 3D modelů těles systému SolidWorks obsahuje Studentská verze SolidWorks a výuková verze SolidWorks řadu doplňkových produktů pro studium 3D návrhu a 3D analýzy. [23]

6.1 SolidWorks Flow Simulation

Flow Simulation je programová nástavba pro simulaci proudění kapalin a teplotní analýzu plně integrovaný do systému SolidWorks. Software SolidWorks Flow Simulation eliminuje potřebu úprav návrhu pro jinou aplikaci výpočtu dynamiky kapalin (CFD), a tím značně šetří čas a náklady. [24]

S jeho funkcemi analýz lze simulovat proudění kapalin a plynů v podmínkách skutečného světa, zkoumat scénáře „co kdyby“ a rychle analyzovat účinky proudění kapalin, přenosu tepla a souvisejících sil na ponořené nebo okolní komponenty. Mezi kapaliny, které lze analyzovat, patří například vzduch, voda, tekuté chemikálie, plyny, zmrzlina, med, roztažený plast, zubní pasta, krev a mnoho dalších látek a plynů. [24]

Práce se zabývá prouděním, kde proudící látkou je vzduch a jeho silovými účinkyna tři lopatky průtažného rotoru.

6.1.1 Další funkce softwaru Flow Simulation:

Pomocí software Flow Simulation lze analyzovat další jevy při proudění tekutin a přestupu tepla, které zahrnují:

- Externí a vnitřní proudění tekutiny
- Ustálený stav a časově závislé proudění tekutiny
- Stlačitelné plyny a nestlačitelné proudění tekutin
- Podzvukové a nadzvukové proudění plynu
- Volný, nucený a smíšený přestup tepla
- Proudění tekutiny s okrajovými polohami
- Laminární a turbulentní proudění tekutiny
- Proudění tekutiny v modelech s pohyblivými nebo rotačními povrchy a částmi
- Vedení tepla v tekutině, pevné a pórovité s nebo bez časového přestupu tepla nebo kontaktní odolnost proti žáru mezi hmotami v tuhé fázi nebo radiační přestup tepla mezi matnými hmotami v tuhé fázi
- Různé typy tepelné vodivosti v pevném médiu, to jest izotropní, jednosměrný, dvouosý AXISYMMETRICAL a ORTHOTROPIC
- Proudění tekutiny a přestup tepla v porézních látkách
- Proudění v ne-Newtonových kapalinách
- Proudění stlačitelných kapalin
- Zkoumání reálných plynů
- Kavitace v nestlačitelných vodních prouděch
- Relativní vlhkost vzduchu v plynech a směsích plynů
- Dvoufázové (kapalina + částice) proudění
- Periodické kritické podmínky. [25]

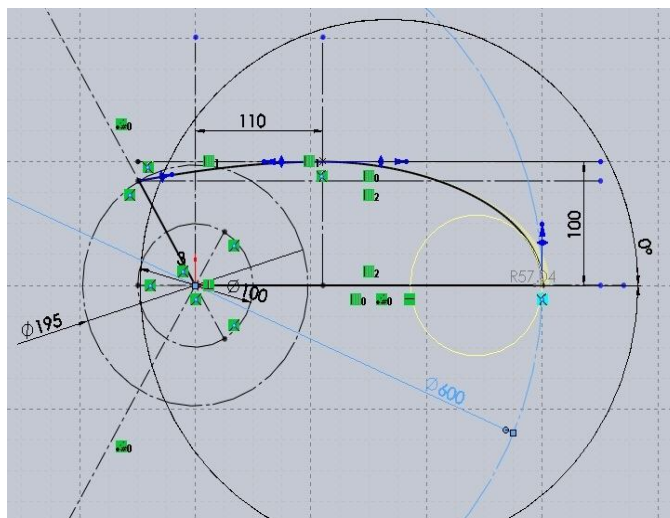
Software SolidWorks Flow Simulation zvládá další různé simulace, které nejsou do práce zahrnuty a nebudou použity.

6.2 Nastavení programu SolidWorks Flow Simulation a jeho prostředí

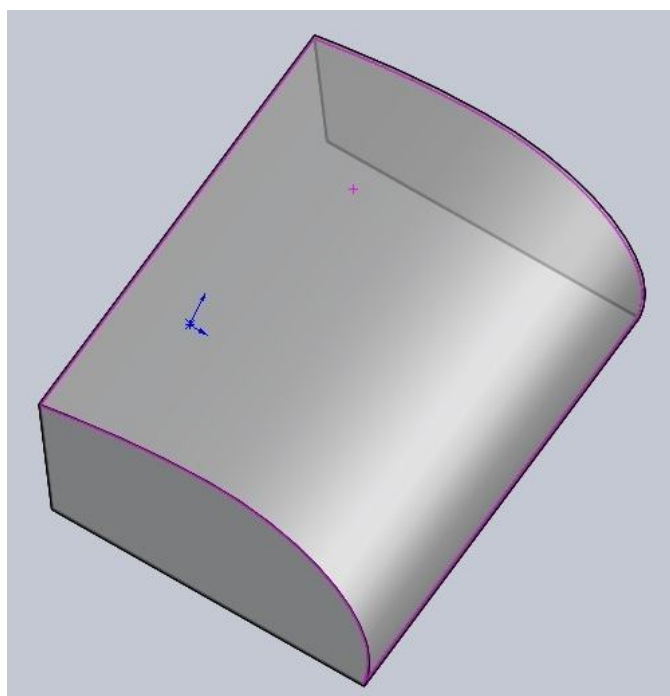
Pro výpočet a správné nastavení je potřeba zhotovit lopatku, jejíž tvar je převzat z literatury a následně je z lopatky vytvořen celý průtažný rotor. Dále je nutné nastavit referenční rotor tak, aby se mohl spustit výpočet proudění vzduchu okolo předem vymodelovaného rotoru a mohlo se přejít k přibližným výpočtům jednotlivých rotorů. Tyto výpočty jsou zjednodušeným řešením aerodynamického tunelu. Software Flow Simulation nám počítačovou simulací nahrazuje výsledky měření z aerodynamického tunelu. Po vypočtení a vyhodnocení výsledku je možno určit, který z rotorů je nejvhodnější a má největší krouticí moment. Tyto výsledky se nadále mohou ověřit modelem v aerodynamickém tunelu.

6.2.1 Zhotovení lopatky

Je nutné si uvědomit, co všechno je potřeba k výpočtům a co všechno je potřeba nastavit. Náčrt byl modelován v programu SolidWork, který je používán pro modelování 3D modelů. Nejdříve je spuštěn program Solid Works. Pro náčrt a zhotovení jedné lopatky je použito třírozměrného zpodobnění jedné součásti návrhu „Díl“. V tomto prostředí je vytvořen výchozí náčrt lopatky podle zadaných referencí práce. Lopatka byla zhotovena pomocí funkce „splajn“, která je dána třemi výchozími body. Následně byla skica vysunuta a byl zhotoven za pomoci skořepiny plášť.



Obrázek 22: Náčrt skici referenčního rotoru.



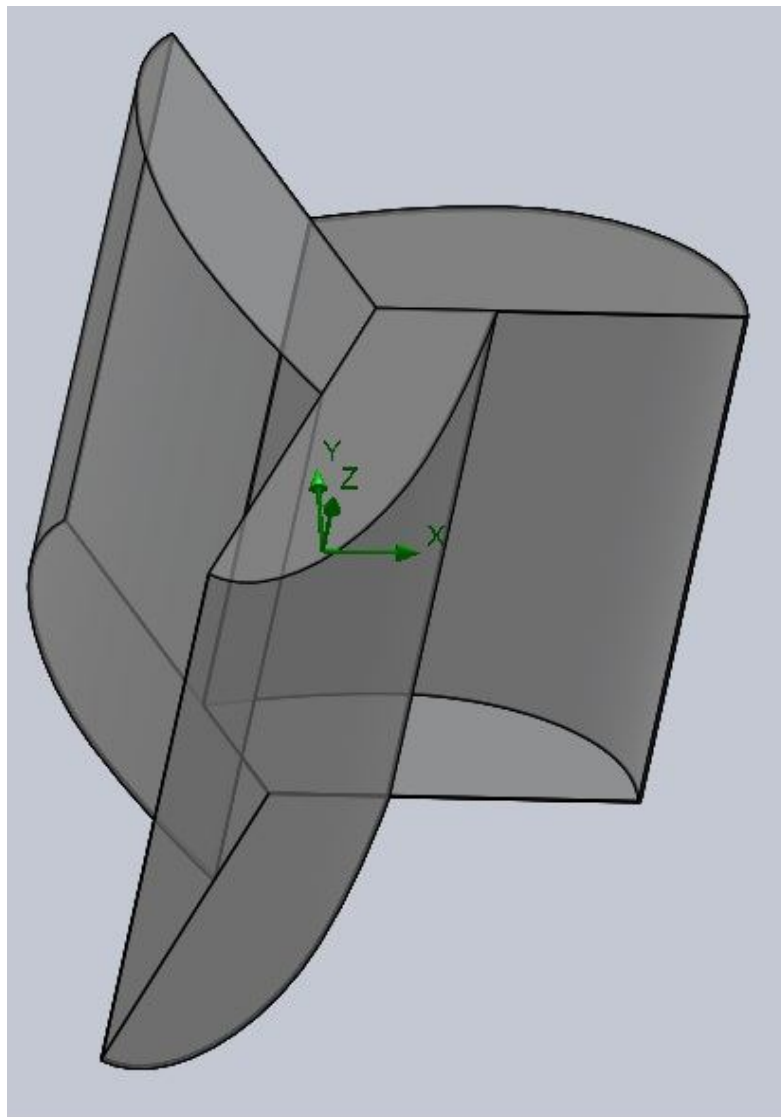
Obrázek 23: Vysunutá lopatka ref. rotoru.

6.2.2 Zhotovení rotoru

V Nabídce Hlavní panel – Soubor – Nový – Sestava. Ve zvoleném prostředí „Sestava“ lze skládat součásti pomocí vzájemných vazeb dohromady v jeden díl. V práci se jedná o rotor složený ze tří lopatek. Pomocí kruhového pole a rotace byl vytvořen rotor za pomoci tří lopatek, tak aby úhel mezi lopatkami byl 120° .

Všechny lopatky musí být mezi sebou patřičně svázané vazbou tak, aby bylo zamezeno vzájemnému pohybu.

Dále byla vytvořena otočná vazba, pro otáčení s celým rotorem po desítkách nebo jednotlivých stupních.



Obrázek 24: Referenční rotor.

6.2.3 Nastavení Flow Simulation – referenční rotor

Pro správnou orientaci v určitých rotorech se musí vytvořit pojmenování každého rotoru.

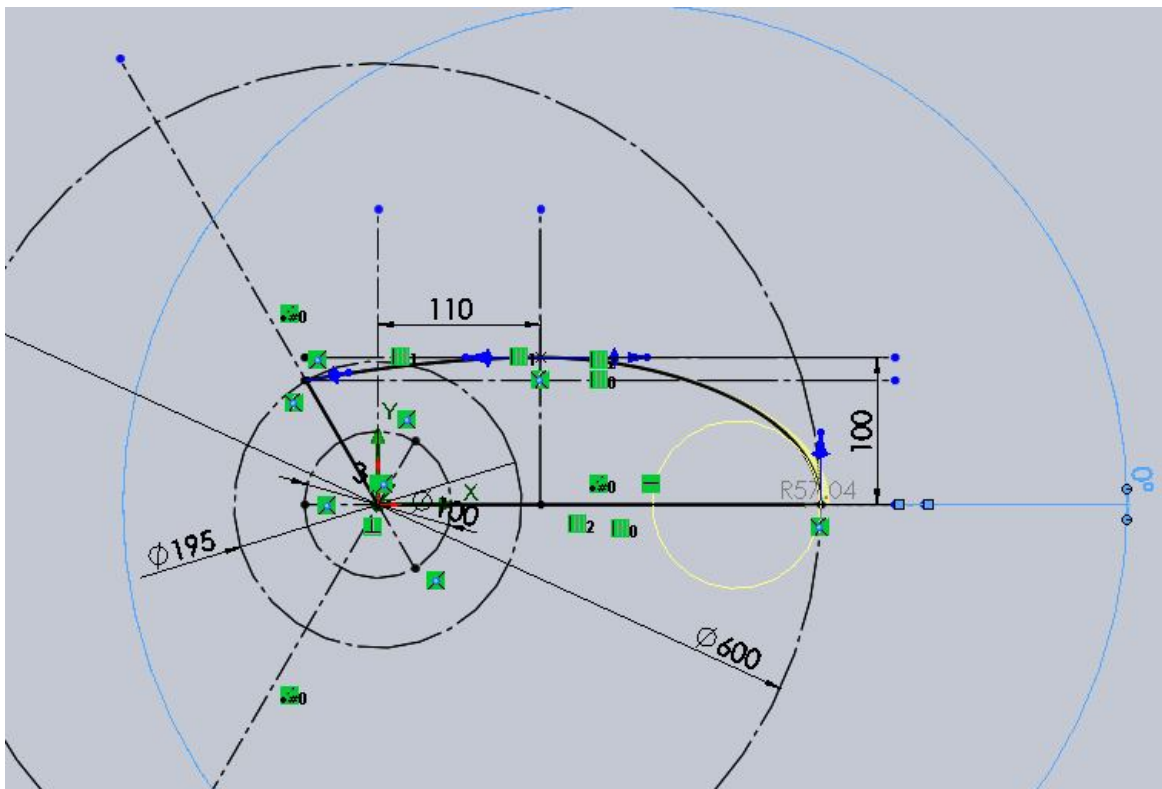
Jelikož je zkoumána hloubka lopatky, tak značení bylo stanoveno dvěma kótami a to svislou kótou a vodorovnou kótou pro určení hloubky lopatky, viz obr. 25.

V práci je tedy použito pojmenování: 110-100 nebo 110-100-st0-v5.

Kóty, které jsou měněny, jsou svislá kóta na obrázku 25 s hodnotou 100 mm a vodorovná s hodnotou 110 mm.

Dále je v práci změněno natočení rotoru od 0° do 115° a to změnou kóty 0° , která je na obrázku vyznačena modrou barvou. Kóta 0° je úhlová vzdálenost od osy X po hranu čela lopatky.

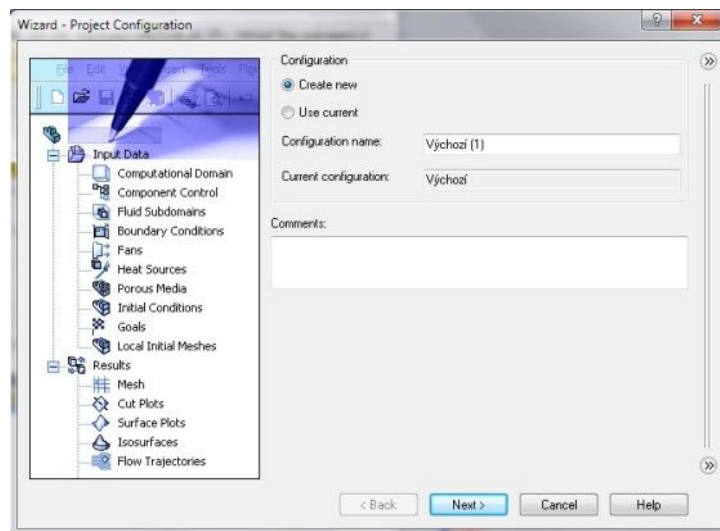
Symbol v5 znamená, že se jedná o vítr, který proudí rychlostí 5 m/s.



Obrázek 25: Orientace ve skici a bodech.

6.2.4 Nový projekt

Panel Flow Simulation: V hlavní nabídce je vybráno Wizard - Create New. V Configuration name bylo zvoleno výchozí (1), pro lepší orientaci v základním nastavení od projektu a práci s konfigurační tabulkou. Celé nastavení je potvrzeno tlačítkem Next.

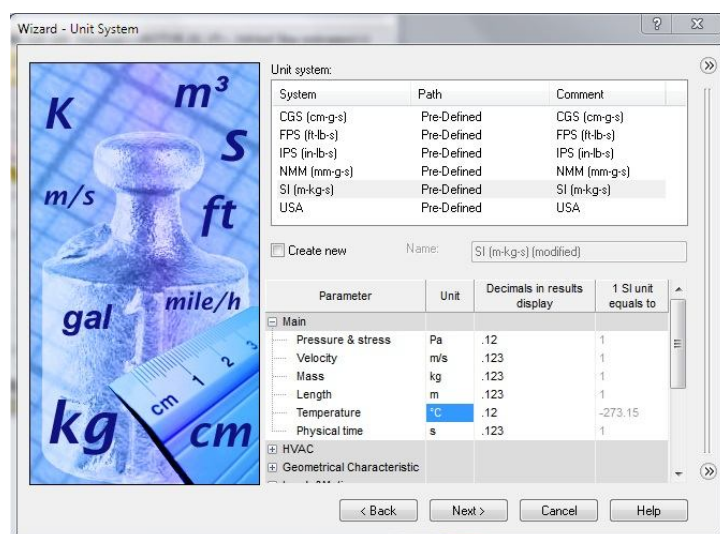


Obrázek 26: Nový projekt Wizard.

6.2.5 Definice jednotkové soustavy

V této nabídce je automaticky předdefinováno několik jednotkových soustav. V práci byla použita normovaná soustava SI v metrech, kilogramech a sekundách.

V kolonce Temperature (Teplota) je přepnuto z K – Kelvin na °C pro jednodušší orientaci.



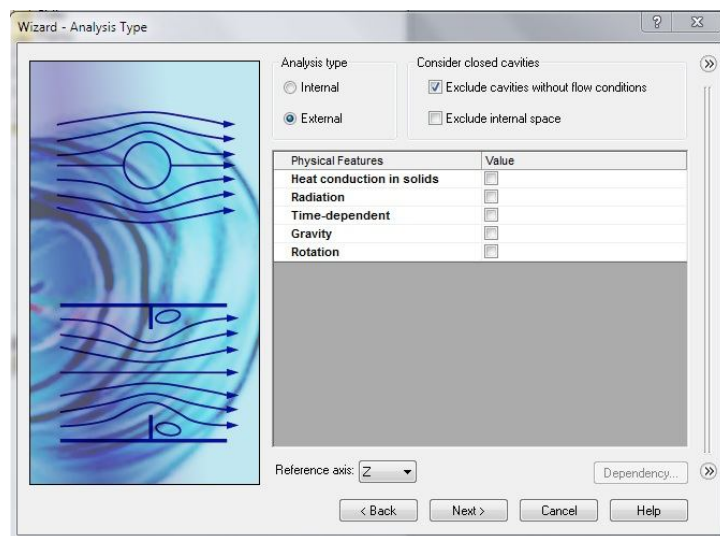
Obrázek 27: Jednotková soustava.

6.2.6 Výběr typu analýzy

Analysis type je změněn na externí typ. Byl zvolen externí, protože do výpočtů zahrne jak vnější proudění, tak i vnitřní proudění. Do interního je zahrnuto pouze vnitřní proudění.

Reference axis (osa otáčení) je zvolena osa Z. Dále je zatrhnuto exclude cavities.

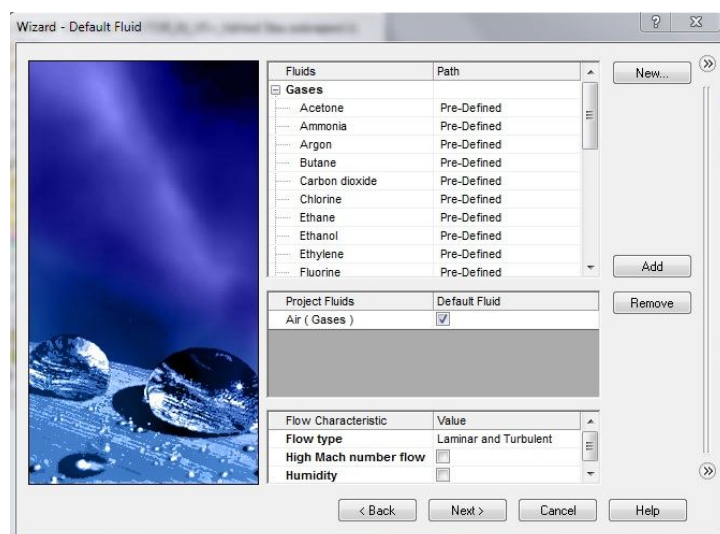
Physical features byly zvoleny nezatrhnuté, protože při výpočtech s radiací, vedením tepla, rotací a gravitací není počítáno.



Obrázek 28: Typ analýzy.

6.2.7 Volba proudící látky (Fluid)

V následující tabulce je zadán typ proudící kapaliny nebo vzduchu. Pod kolonkou Gases je vybrán jako proudící látka Air (Vzduch). Další vnější podmínky nebudou uvažovány.

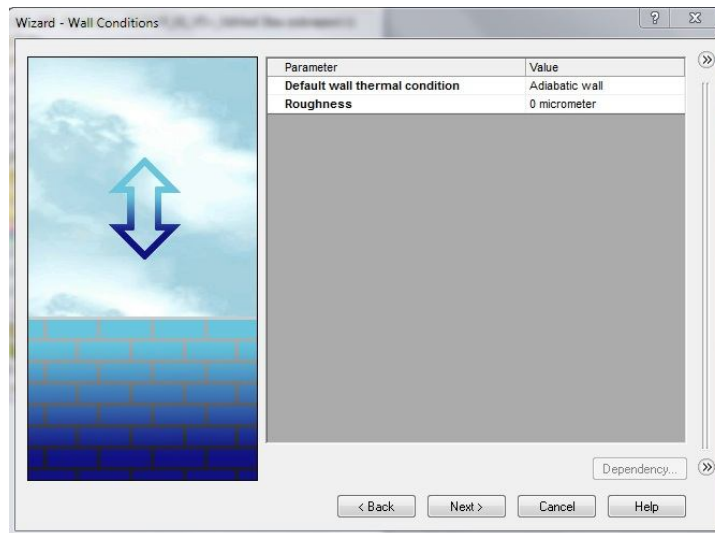


Obrázek 29: Volba proudící látky – Fluid.

6.2.8 Vnější podmínky

Drsnost lopatky není uvažována, proto je nastavena jako nulová.

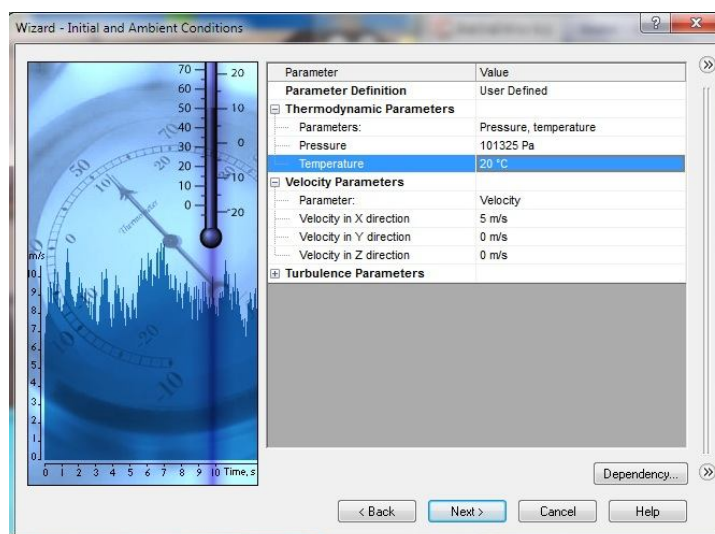
Sdílení tepla je adiabatické, tzn., že nebude počítat se sdílením tepla lopatky s okolním prostředím.



Obrázek 30: Vnější podmínky.

6.2.9 Zvolené termodynamické podmínky a rychlost proudění vzduchu

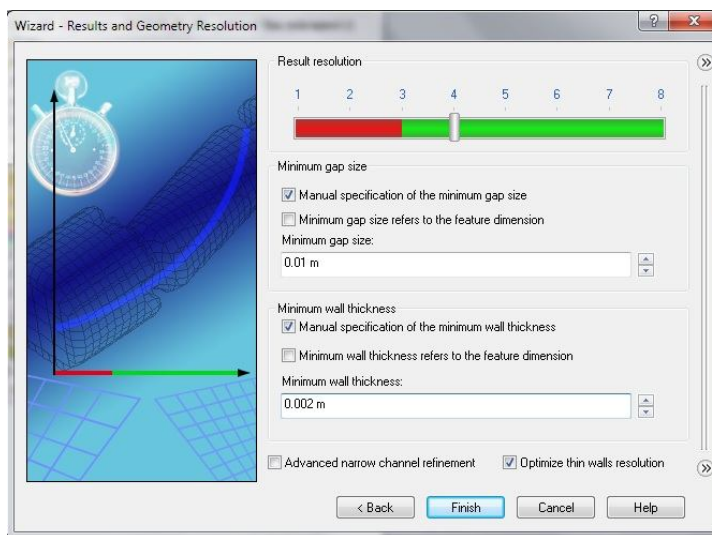
Temperature (teplota) je nastavena na 20 °C. Rychlost větru: je změněna na 5 m/s. Postupně se tato hodnota měnila pro jednotlivé druhy rotorů na 7 m/s, 10 m/s a 12 m/s. Zbylé parametry byly ponechány jako výchozí, viz obr. 31.



Obrázek 31: Termodynamické podmínky.

6.2.10 Přesnost výsledků a zobrazení výsledků

Přesnost výpočtu byla zvolena na stupeň 4. Čím větší číslo, tím větší přesnost výpočtu, ale i větší zatížení počítače. Minimální mezera je nastavena manuálně na 0,01 m. Tato mezera odpovídá nejmenší možné mezeře mezi lopatkami rotoru. Tloušťka stěny v závislosti na tloušťce skořepiny je nastavena také manuálně na 0,002 m, viz obr. 32.



Obrázek 32: Přesnost a zobrazení výsledku.

6.2.11 Nastavení výpočtové oblasti

V záložce Flow Simulation analysis tree – Input data – Computation domain

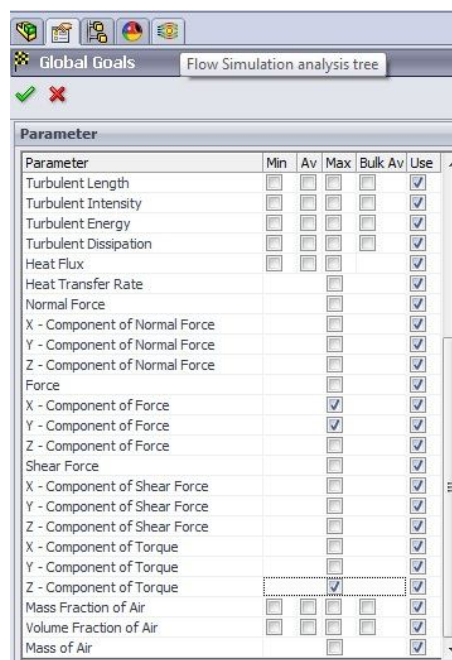
Edit Definition: Zde je nastavena oblast výpočtu, ve které proudí vzduch. Tato oblast musí být u každého rotoru nastavena stejně. Hodnoty jsou nastaveny pomocí os X, Y, Z, které jsou rozděleny na minimum a maximum. Hodnoty byly nastaveny dle obrázku, viz obr. 33.



Obrázek 33: Oblast proudění.

6.2.12 Cíle výpočtů

V záložce Flow Simulation analysis tree – Goals je voleno pouze Insert Global Goals, bylo zatrhnuto dle obrázku v kolonce max. X a Y – Component of Force (síla v ose X a Y) a Z – Component of Torque (krouticí moment v ose Z), viz obr. 34.



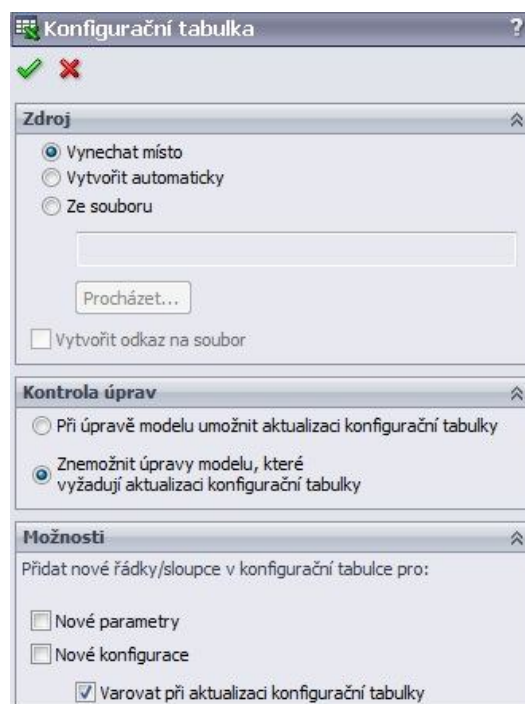
Obrázek 34: Cíle výpočtů.

6.2.13 Nastavení konfiguračních tabulek

Konfigurační tabulky jsou použity pro výpočet více různých variant najednou. Bez konfiguračních tabulek nelze počítat více výpočtů najednou, s tabulkou lze počítat jeden stejný rotor pootočený o libovolný počet stupňů nebo jedno pootočení pro různé druhy rotorů. Pro práci byla vybrána možnost jednoho stejného rotoru s různým pootočením kolem své osy.

Hlavní panel – Vložit – Tabulky – Konfigurační tabulka

V konfigurační tabulce je zatrženo vše, viz obr. 35 a potvrzeno zeleným tlačítkem.



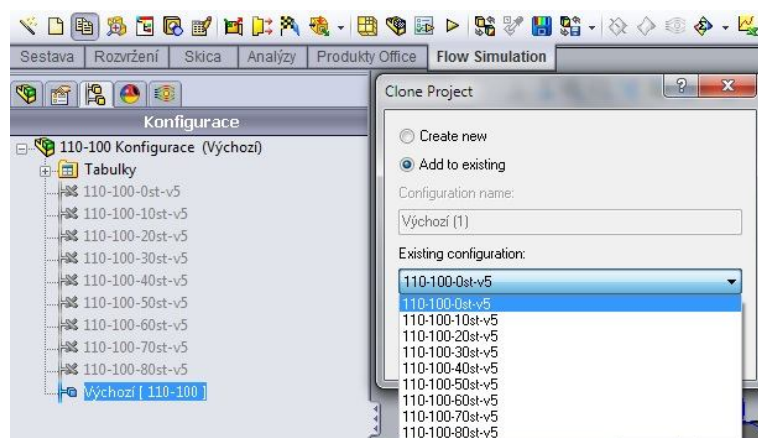
Obrázek 35: Konfigurační tabulka.

Po potvrzení je zobrazena excelová tabulka, ve které se klikne na sloupec B2 a následně se klikne na kótu, která má být proměnlivá. Do sloupce A3 jsou vypsány názvy jednotlivých rotorů pod sebe a do sloupce B3 hodnoty proměnných kót. Následně je kliknuto na modelovací plochu v programu, tabulka je uzavřena a zobrazí se kontrolní hlášení přidávaných rotorů.

V configuration manager je rozbalena tabulka, kde jsou všechny přichystané rotory, do nichž je potřeba zkopírovat přichystaný projekt, viz obr. 36 a 37.

	A	B	C	D	E	F	G
1	Konfigurační tabulka pro: 110-100						
2		D1@Úhel1					
3	110-100-0st-v5	0					
4	110-100-10st-v5	10					
5	110-100-20st-v5	20					
6	110-100-30st-v5	30					
7	110-100-40st-v5	40					
8	110-100-50st-v5	50					
9	110-100-60st-v5	60					
10	110-100-70st-v5	70					
11	110-100-80st-v5	80					
12	110-100-80st-v5	90					
13							

Obrázek 36: Vyplnění tabulky.



Obrázek 37: Kopírování nastavení do projektu.

6.2.14 Spuštění výpočtu

Po zkontrolování nastavení mohou být spuštěny samotné výpočty.

Výpočty jsou zapnuty v menu: Hlavní panel – Flow Simulation – Solve – Run nebo Batch Run.

V našem případě pro počítání více rotorů najednou je použita volba Batch Run.

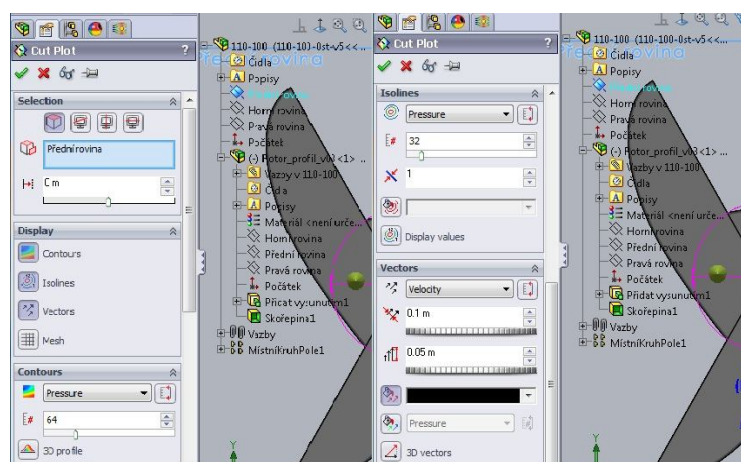
Jsou zaškrtnuty všechny potřebné rotory pro výpočet. Kliknutím na RUN se zahájí vlastní výpočet.

Délka výpočtů závisí na nastavení přesnosti výpočtu, jeho zobrazení a na výpočetní technice.

6.2.15 Vyhodnocení výsledků – nastavení

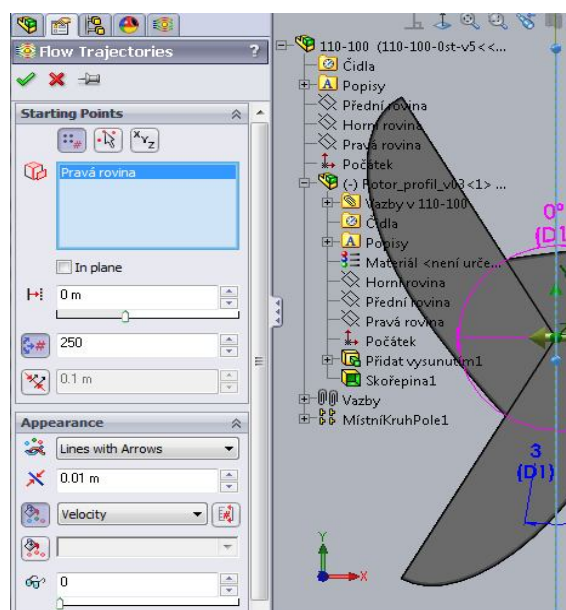
Po kliknutí na ikonu hlavního panelu Load/Unload Results se objeví tabulka, v níž je vybrán soubor s příponou (.fld). Jsou vyhodnoceny tři výsledky. Ve Flow Simulation analysis tree – Cut Plots (silové působení proudícího větru na průtažný rotor), Flow Trajectories (trajektorie proudícího vzduchu okolo průtažného rotoru) Goal Plot (zobrazení výsledků silových účinků na průtažný rotor v ose X a Y a velikost krouticího momentu M_k).

Po skončení výpočtu je kliknuto pravým tlačítkem na Cut Plot – Insert a vyplněno, viz obr. 38.



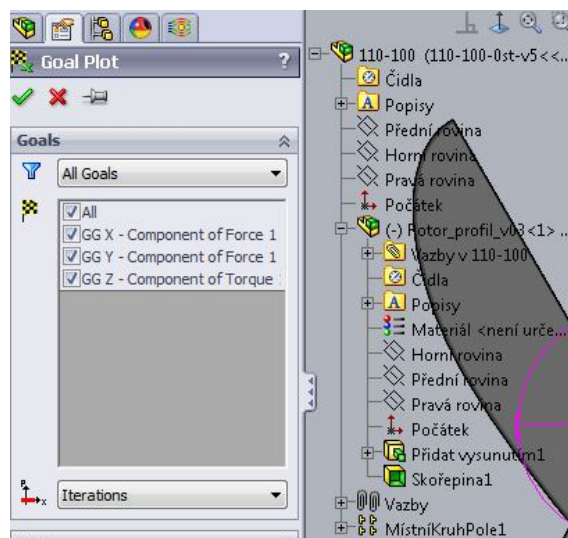
Obrázek 38: Výsledky – Cut plots.

Druhý výsledek je načten pomocí Flow Trajectories – Insert, a vše je znovu nastaveno, viz obr. 39.



Obrázek 39: Výsledky – Flow Trajectories.

Třetí výsledek je načten pravým tlačítkem Goals Plot – Insert a vyplněno, viz obr. 40. Po kliknutí na zelené zatržítko se otevře software Microsoft Excel s následující tabulkou, viz obr. 41, ze které je odečten výsledek ve sloupci Averaged Value, neboli průměrná hodnota krouticího momentu a řádku GG Z – komponent of torque. V tabulce hodnota 0,429 N*m, vizobr. 41. V záhlaví tabulky lze nalézt Goal Name – Název výpočtu, Unit – jednotka, Value – hodnota, Averaged, Minimum a Maximum Value – Průměrná, Minimální a Maximální hodnota, a v řádcích GG X a Y – Component of Force 1 – Působení sil v osách X a Y, a GG Z – Component of Torque – Působení krouticího momentu v ose Z.



Obrázek 40: Výsledky - krouticí moment.

110-100.SLDASM [110-100-0st-v5]

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value
GG X - Component of Force 1	[N]	6,464145281	6,444926546	6,388344761	6,464145281
GG Y - Component of Force 1	[N]	0,527617413	0,52492505	0,484993825	0,568634866
GG Z - Component of Torque	[N*m]	0,429494984	0,42754056	0,422828772	0,429494984

Iterations: 263

Analysis interval: 78

Obrázek 41: Tabulka působících sil a krouticího momentu.

7 SIMULACE A VÝSLEDKY ROTORŮ

7.1 Úvod

Simulace je spuštěna dle nastavení v návodu. Simulace probíhala ve statické poloze. Během simulace na počítači neprobíhaly další práce nebo úlohy kvůli značnému zpomalování výpočtů. Simulace probíhala pro 16 různých rotorů pootočených po 10° od 0° po 110° při rychlosti 5 m/s. Tyto výpočty byly zahrnuty do tabulek, grafů a obrázků.

Po vyhodnocení výsledků jsou vybrány 3 nejvhodnější rotory plus referenční rotor, které budou počítány po 5° pro rychlosti 5 m/s, 7 m/s, 10 m/s a 12 m/s od 0° do 115° . Výsledky budou zahrnuty do tabulek, grafů a obrázků.

7.2 Výsledky pro rychlost větru 5 m/s (pro všechny rotory)

Na začátku výpočtů bylo nastaveno pootočení průtažného rotoru po 10° . V následující tabulce a grafu lze najít všechny druhy použitých rotorů, výpočty krouticích momentů při pootočení o 10° a zprůměrované hodnoty krouticích momentů.

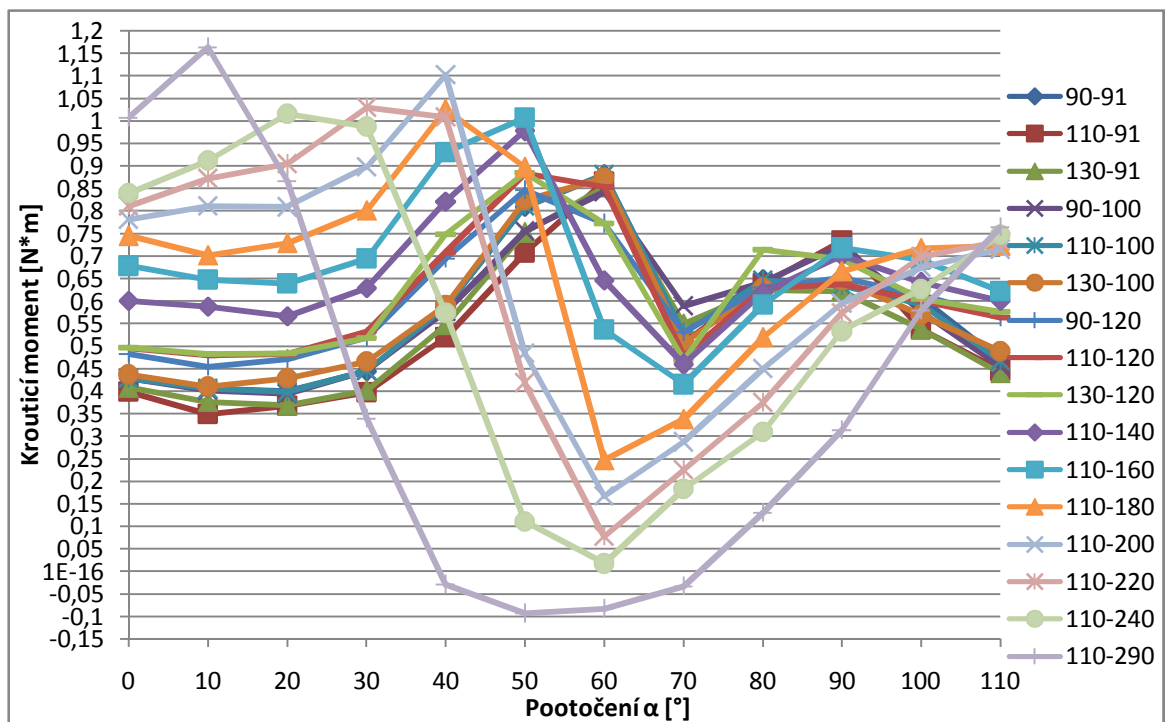
V tabulce bylo vyznačeno pozadí čtyř rotorů žlutou barvou a jeden zvýrazněn červenou barvou. Tento rotor je referenční rotor a bude vždy používán ke srovnávání s ostatními rotory. Další tři označené rotory jsou použity k dalším upřesněným výpočtům.

Po zhlédnutí a vyhodnocení z tabulky je jasně patrné, že čím je lopatka hlubší, tím většího krouticího momentu rotor dosahuje. Ovšem při větším prohloubení lopatky na rotoru 110-180 lze sledovat zvyšující se rozdíl mezi maximem a minimem, což může způsobovat torzní kmity. Rozdíly mezi maximem a minimem u dalších hlubších rotorů stoupají, jak lze vyčíst z grafu. Tyto rozdíly mohou mít v krajním případě za následek to, že se rotor nemusí roztočit nebo může kmitat. V rotoru 110-290 dochází až k záporným hodnotám krouticího momentu, což může mít za následek, že při záběru do staticky položeného rotoru v určitém stupni se rotor pootočí opačným směrem.

Proto tyto rotory dále nebudou použity v následujících výpočtech a budou použity jen čtyři rotory vyznačené žlutým pozadím.

Tabulka 9: Vypočet krouticího momentu a průměr při proudění větru 5 m/s, pootočení po 10°.

Rotory	Pootočení α [°]												Průměr Mk [N*m]
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	
90-91	0,428	0,405	0,400	0,444	0,586	0,810	0,880	0,531	0,649	0,634	0,608	0,469	0,570
110-91	0,399	0,349	0,367	0,397	0,519	0,707	0,865	0,508	0,637	0,734	0,537	0,445	0,539
130-91	0,408	0,376	0,368	0,402	0,547	0,752	0,853	0,549	0,625	0,622	0,538	0,440	0,540
90-100	0,428	0,402	0,394	0,446	0,576	0,756	0,842	0,589	0,641	0,724	0,576	0,454	0,569
110-100	0,428	0,405	0,398	0,446	0,587	0,811	0,880	0,528	0,646	0,634	0,593	0,467	0,569
130-100	0,437	0,410	0,428	0,466	0,590	0,824	0,874	0,507	0,629	0,646	0,569	0,488	0,572
90-120	0,483	0,454	0,471	0,519	0,695	0,847	0,772	0,531	0,630	0,652	0,613	0,564	0,603
110-120	0,495	0,479	0,482	0,532	0,708	0,884	0,853	0,478	0,629	0,638	0,600	0,564	0,612
130-120	0,496	0,483	0,484	0,518	0,749	0,885	0,772	0,470	0,714	0,693	0,605	0,577	0,611
110-140	0,601	0,588	0,566	0,629	0,821	0,978	0,646	0,459	0,619	0,701	0,641	0,600	0,654
110-160	0,678	0,647	0,639	0,695	0,931	1,007	0,537	0,415	0,592	0,718	0,692	0,622	0,681
110-180	0,745	0,701	0,729	0,801	1,025	0,897	0,246	0,337	0,520	0,666	0,717	0,723	0,676
110-200	0,781	0,811	0,809	0,898	1,103	0,484	0,167	0,287	0,450	0,595	0,674	0,715	0,648
110-220	0,811	0,872	0,905	1,030	1,009	0,418	0,077	0,225	0,375	0,573	0,699	0,733	0,644
110-240	0,839	0,912	1,016	0,987	0,573	0,110	0,017	0,182	0,309	0,533	0,626	0,747	0,571
110-290	1,007	1,164	0,866	0,339	-0,029	-0,094	-0,083	-0,034	0,130	0,313	0,579	0,764	0,410



Obrázek 42: Zobrazení krouticích momentů v závislosti na pootočení po 10° při proudění větru 5 m/s.

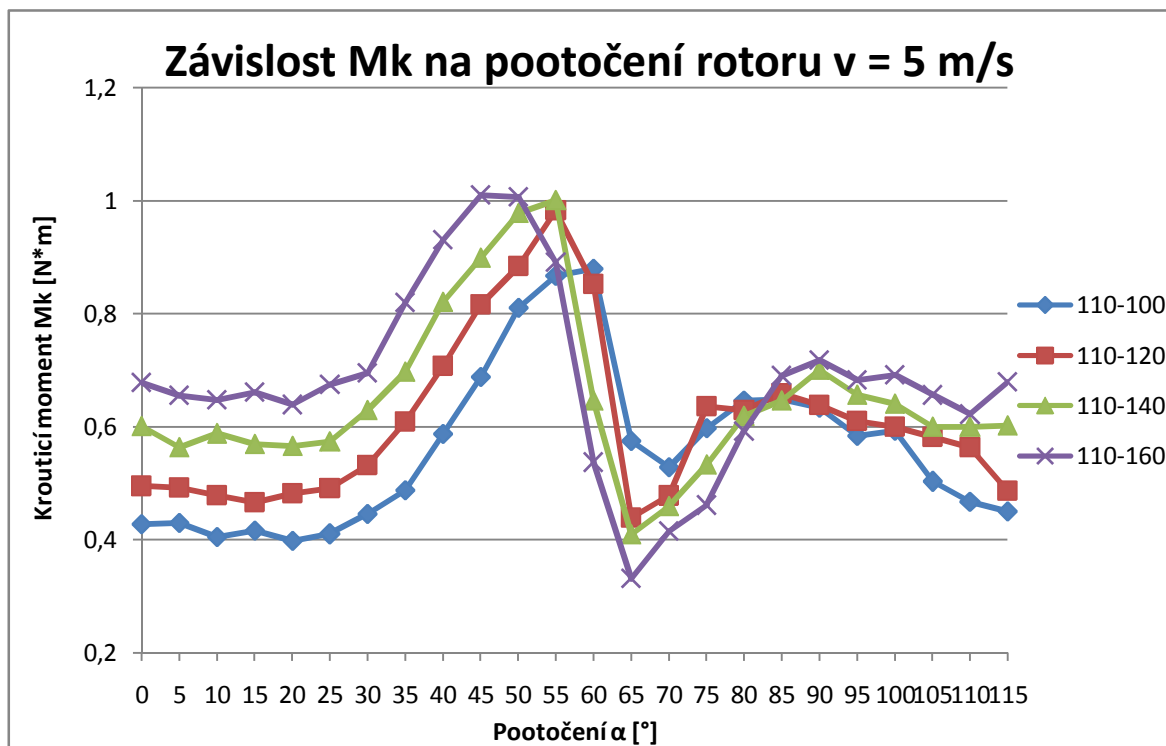
7.3 Výsledky pro rychlost větru 5 m/s

V tabulce 10 a obr. 43 jsou zobrazeny výsledky pro rychlost proudícího větru 5 m/s a pootočení rotoru po 5 stupních od 0° po 115°. Použité rotory 110-100, 110-120, 110-140, 110-160.

Z tabulky a z grafu můžeme odečíst, že každý rotor má své maximum a minimum krouticího momentu položené v jiném úhlu pootočení rotoru. Maximum u rotoru 110-100 je v úhlu 60°, u rotoru 110-120 v 55°, u rotoru 110-140 v 55° a rotoru 110-160 v 45°. Minimum u rotoru 110-100 v 70°, u rotoru 110-120 v 65°, u rotoru 110-140 v 65° a rotoru 110-160 v 65°. Jak bylo předpokládáno dříve, tak s rostoucí hloubkou lopatky se zvyšuje krouticí moment. Rozdíl krouticího momentu od nejmenší hloubky lopatky 110-100 po největší hloubku lopatky 110-160 při proudění větru 5 m/s kolem lopatky činí 0,121 N*m.

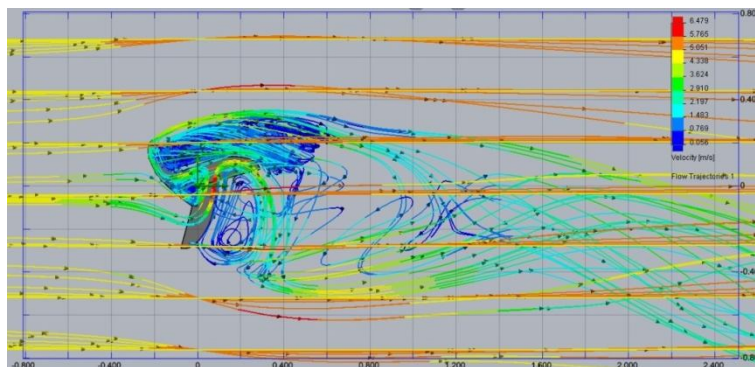
Tabulka 10: Vypočet krouticího momentu a průměru při proudění větru 5 m/s.

Pootočení α [°]	Rotor [rychlost proudění větru $v = 5$ m/s]			
	110-100	110-120	110-140	110-160
	Krouticí moment M_k [N*m]			
0	0,428	0,495	0,601	0,678
5	0,430	0,492	0,564	0,655
10	0,405	0,479	0,588	0,647
15	0,416	0,466	0,569	0,661
20	0,398	0,482	0,566	0,639
25	0,410	0,491	0,574	0,675
30	0,446	0,532	0,629	0,695
35	0,488	0,609	0,697	0,820
40	0,587	0,708	0,821	0,931
45	0,688	0,816	0,899	1,010
50	0,811	0,884	0,978	1,007
55	0,867	0,983	1,001	0,891
60	0,880	0,853	0,646	0,537
65	0,575	0,439	0,409	0,331
70	0,528	0,478	0,459	0,415
75	0,598	0,636	0,533	0,461
80	0,646	0,629	0,619	0,592
85	0,649	0,659	0,646	0,691
90	0,634	0,638	0,701	0,718
95	0,584	0,610	0,657	0,683
100	0,593	0,600	0,641	0,692
105	0,503	0,582	0,600	0,656
110	0,467	0,564	0,600	0,622
115	0,450	0,487	0,602	0,679
Průměr	0,562	0,609	0,650	0,683

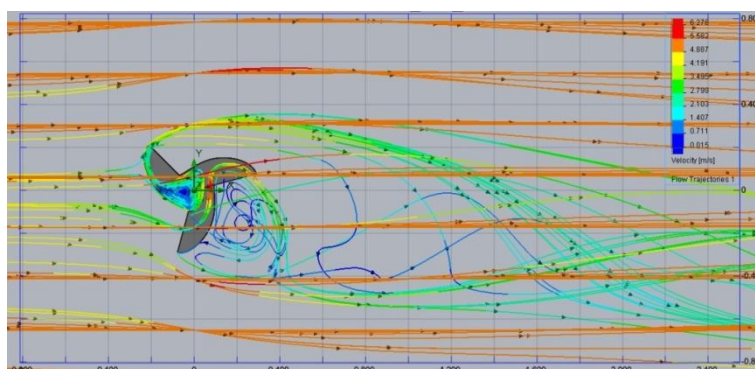


Obrázek 43: Zobrazení krouticích momentů v závislosti na pootočení po 5° při proudění větru 5 m/s .

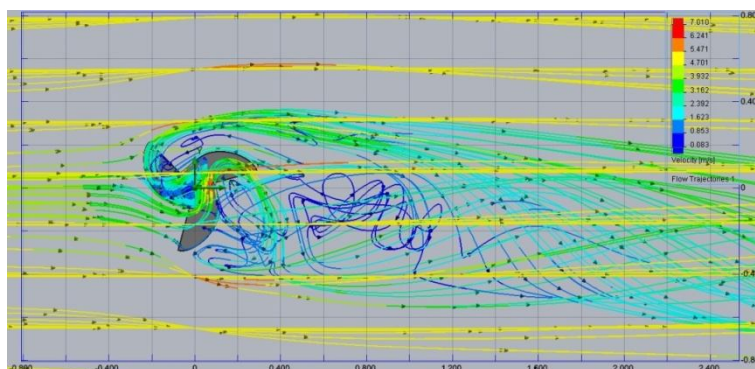
Na obrázcích 44 – 47 byly porovnány čtyři druhy rotorů stejné rychlosti 5 m/s při pootočení rotoru o 15° . Jsou zde vidět trajektorie proudícího větru okolo rotoru, které by měli přibližně odpovídat trajektoriím větrů v praxi. Na všech čtyřech rotorech lze vidět, jak vítr proudí okolo rotoru, jeho rychlosti v daném úseku rotorů a turbulence, které vznikají uvnitř rotorů a za rotorem. Pro přesné trajektorie by musely být tyto rotory vyzkoušeny prakticky, například v aerodynamickém tunelu.



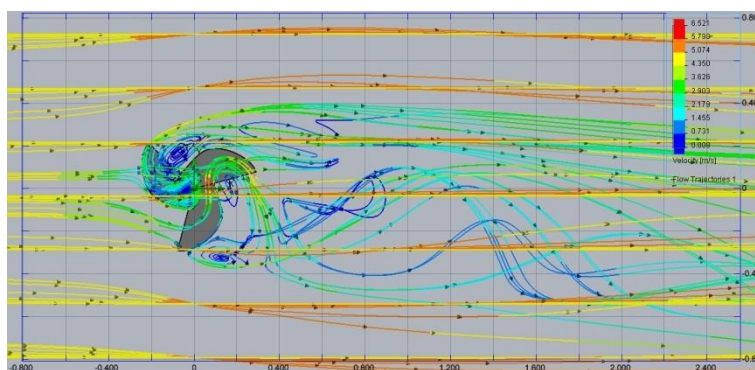
Obrázek 44: Rotor 110-100-15st-v5.



Obrázek 45: Rotor 110-120-15st-v5.



Obrázek 46: Rotor 110-140-15st-v5.



Obrázek 47: Rotor 110-160-15st-v5.

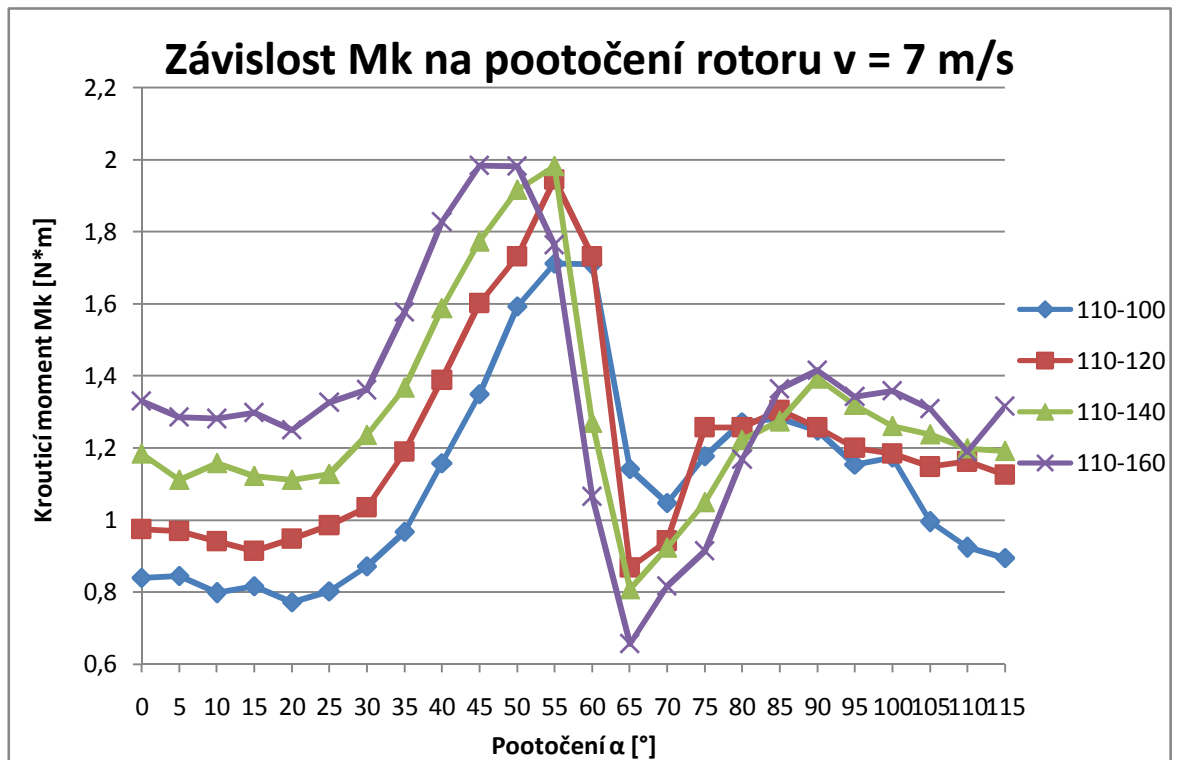
7.4 Výsledky pro rychlost větru 7 m/s

V dalších výpočtech bylo počítáno se zvýšenou rychlostí větru na 7 m/s. V následující tabulce a grafu lze vidět, že při stoupající rychlosti také stoupá krouticí moment. U rotoru 110-100 vzrostl průměrný krouticí moment na 1,106 N*m, u rotoru 110-120 na 1,211 N*m, u rotoru 110-140 na 1,284 N*m a u rotoru 110-160 na 1,341 N*m. Jak u rychlosti 5 m/s, tak i u rychlosti 7 m/s platí, že čím více lopatku prohloubíme, tím získáváme větší krouticí moment rotoru.

V grafu si lze všimnout rozdílného dosažení maxima a minima u všech čtyř rotorů. Tak jako u předchozí rychlosti proudění větru rotorem je zde patrný markantní pokles krouticího momentu mezi natočením 50 – 70 stupni.

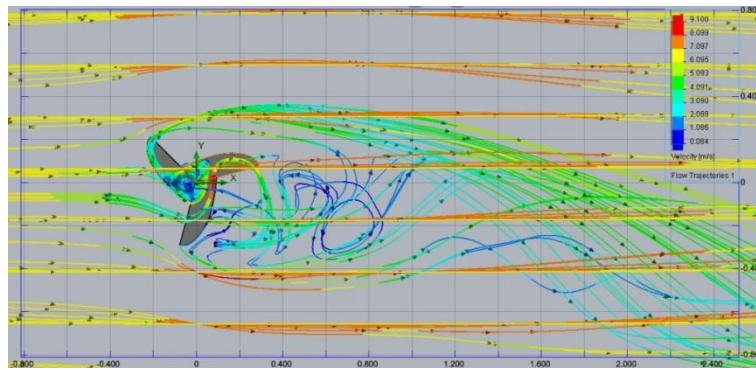
Tabulka 11: Vypočet krouticího momentua průměrpři proudění větru 7 m/s.

Pootočení	Rotor [rychlost proudění větru $v = 7$ m/s]			
	100-100	110-120	110-140	110-160
α [°]	Krouticí moment M_k [N*m]			
0	0,840	0,975	1,185	1,330
5	0,845	0,969	1,111	1,285
10	0,798	0,941	1,158	1,281
15	0,816	0,915	1,122	1,298
20	0,772	0,948	1,112	1,250
25	0,802	0,986	1,128	1,327
30	0,871	1,035	1,236	1,361
35	0,968	1,189	1,367	1,577
40	1,157	1,388	1,587	1,827
45	1,349	1,601	1,773	1,983
50	1,593	1,731	1,916	1,982
55	1,711	1,944	1,981	1,763
60	1,709	1,731	1,269	1,066
65	1,141	0,868	0,808	0,657
70	1,048	0,942	0,923	0,816
75	1,177	1,257	1,049	0,915
80	1,271	1,257	1,222	1,169
85	1,282	1,304	1,274	1,363
90	1,248	1,257	1,393	1,415
95	1,154	1,200	1,319	1,343
100	1,174	1,184	1,261	1,359
105	0,995	1,148	1,237	1,309
110	0,924	1,162	1,198	1,189
115	0,895	1,125	1,192	1,316
Průměr	1,106	1,211	1,284	1,341

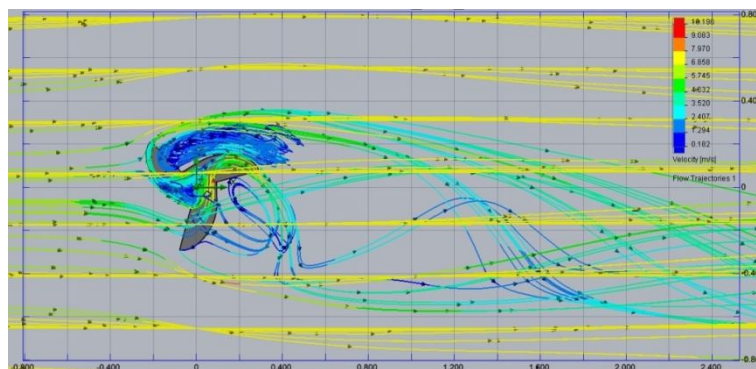


Obrázek 48: Zobrazení krouticích momentů v závislosti na pootočení po 5° při proudění větru 7 m/s.

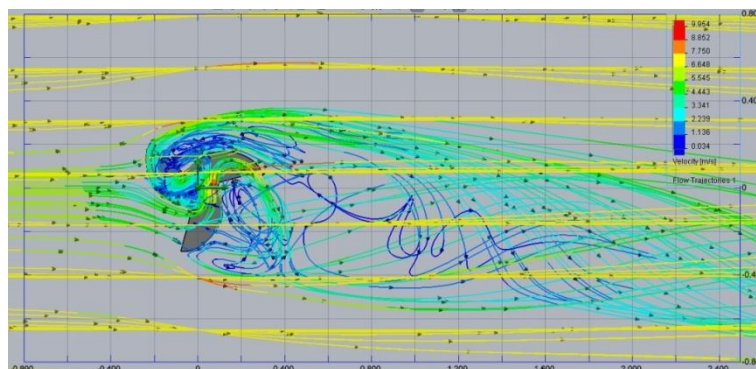
Na obrázcích 49 – 52 byly srovnány čtyři druhy rotorů stejné rychlosti 7 m/s při pootočení rotoru o 15° . Jsou zde vidět trajektorie proudícího větru okolo rotoru, které by měly přibližně odpovídat trajektoriím větrů v praxi.



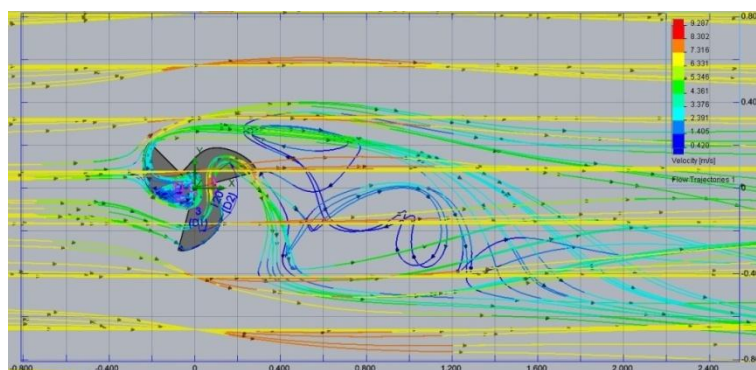
Obrázek 49: Rotor 110-100-15st-v7.



Obrázek 50: Rotor 110-120-15st-v7.



Obrázek 51: Rotor 110-140-15st-v7.



Obrázek 52: Rotor 110-160-15st-v7.

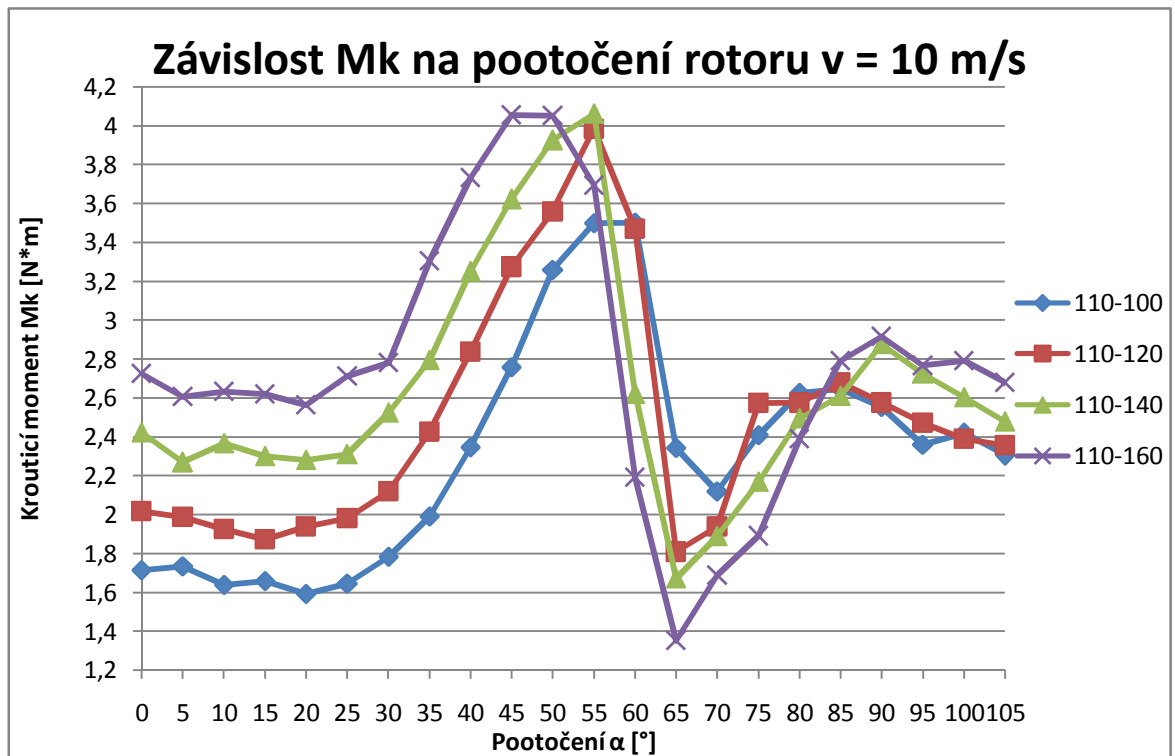
7.5 Výsledky pro rychlost větru 10 m/s

Následující rotory jsou počítány se zvýšenou rychlostí větru na 10 m/s. V tabulce a v grafu je znovu zobrazen výpočet krouticího momentu čtyř rotorů a jak vyšlo v rychlostech 5 a 7 m/s, tak znovu připrohlubování lopatky nám krouticí moment roste. U rotoru 110-100 vzrostl průměrný krouticí moment na 2,277 N*m, u rotoru 110-120 na 2,462 N*m, u rotoru 110-140 na 2,631 N*m a u rotoru 110-160 na 2,757 N*m.

V grafu si lze znovu všimnout rozdílného dosažení maxima a minima u všech čtyř rotorů. Tak jako v předchozích rychlostech proudění větru rotorem je zde patrný markantní pokles krouticího momentu mezi natočením 50 – 70 stupni.

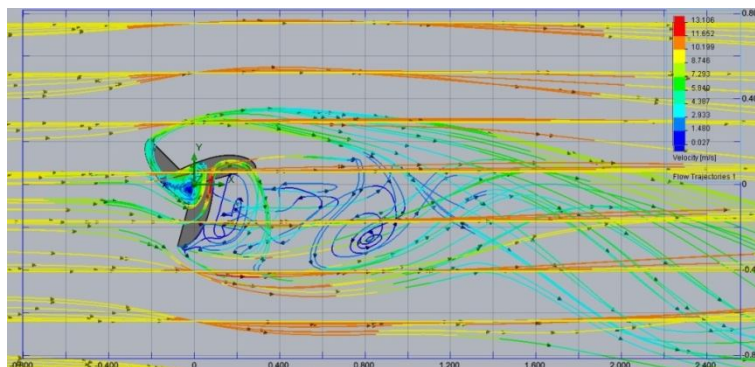
Tabulka 12: Výpočet krouticího momentu a průměr připroudění větru 10 m/s.

Pootočení α [°]	Rotor [rychlost proudění větru $v = 10$ m/s]			
	110-100	110-120	110-140	110-160
	Krouticí moment M_k [N*m]			
0	1,714	2,018	2,423	2,726
5	1,735	1,987	2,270	2,608
10	1,638	1,926	2,367	2,634
15	1,659	1,874	2,300	2,621
20	1,594	1,940	2,281	2,564
25	1,645	1,981	2,310	2,714
30	1,783	2,120	2,526	2,781
35	1,992	2,427	2,796	3,304
40	2,347	2,839	3,251	3,734
45	2,759	3,274	3,623	4,055
50	3,260	3,560	3,926	4,053
55	3,501	3,985	4,064	3,694
60	3,502	3,469	2,622	2,191
65	2,343	1,809	1,673	1,354
70	2,121	1,939	1,890	1,689
75	2,409	2,575	2,170	1,891
80	2,627	2,576	2,496	2,389
85	2,648	2,680	2,611	2,791
90	2,555	2,576	2,878	2,917
95	2,360	2,472	2,725	2,767
100	2,418	2,390	2,604	2,793
105	2,306	2,356	2,480	2,680
110	1,886	2,349	2,421	2,464
115	1,836	1,963	2,427	2,760
Průměr	2,277	2,462	2,631	2,757

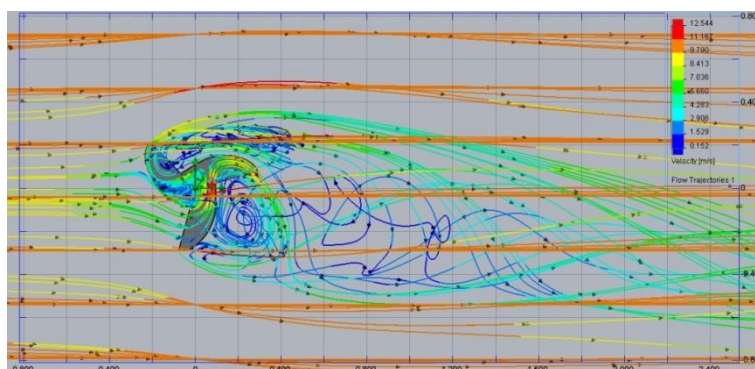


Obrázek 53: Zobrazení krouticích momentů v závislosti na pootočení po 5° při proudění větru 10 m/s.

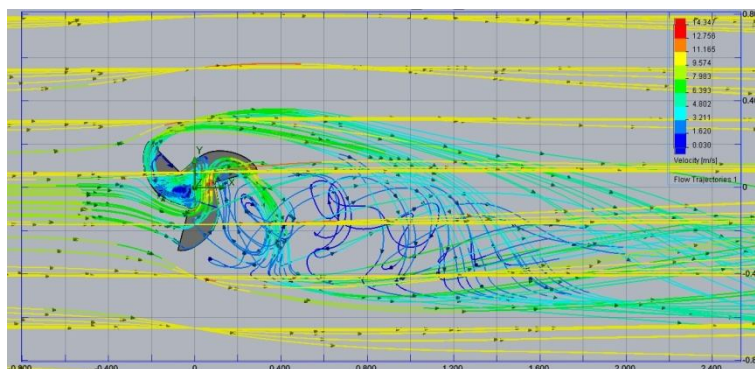
Na obrázcích 54 – 57 byly srovnány čtyři druhy rotorů stejné rychlosti 10 m/s při pootočení rotoru o 15° . Jsou zde vidět trajektorie proudícího větru okolo rotoru, které by měly přibližně odpovídat trajektoriím větrů v praxi.



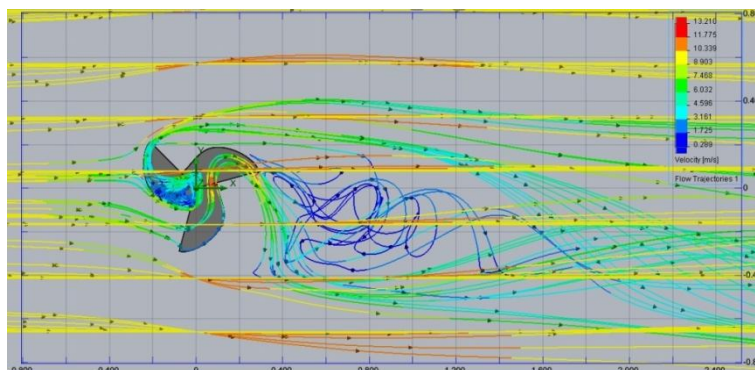
Obrázek 54: Rotor 110-100-15st-v10.



Obrázek 55: Rotor 110-120-15st-v10.



Obrázek 56: Rotor 110-140-15st-v10.



Obrázek 57: Rotor 110-160-15st-v10.

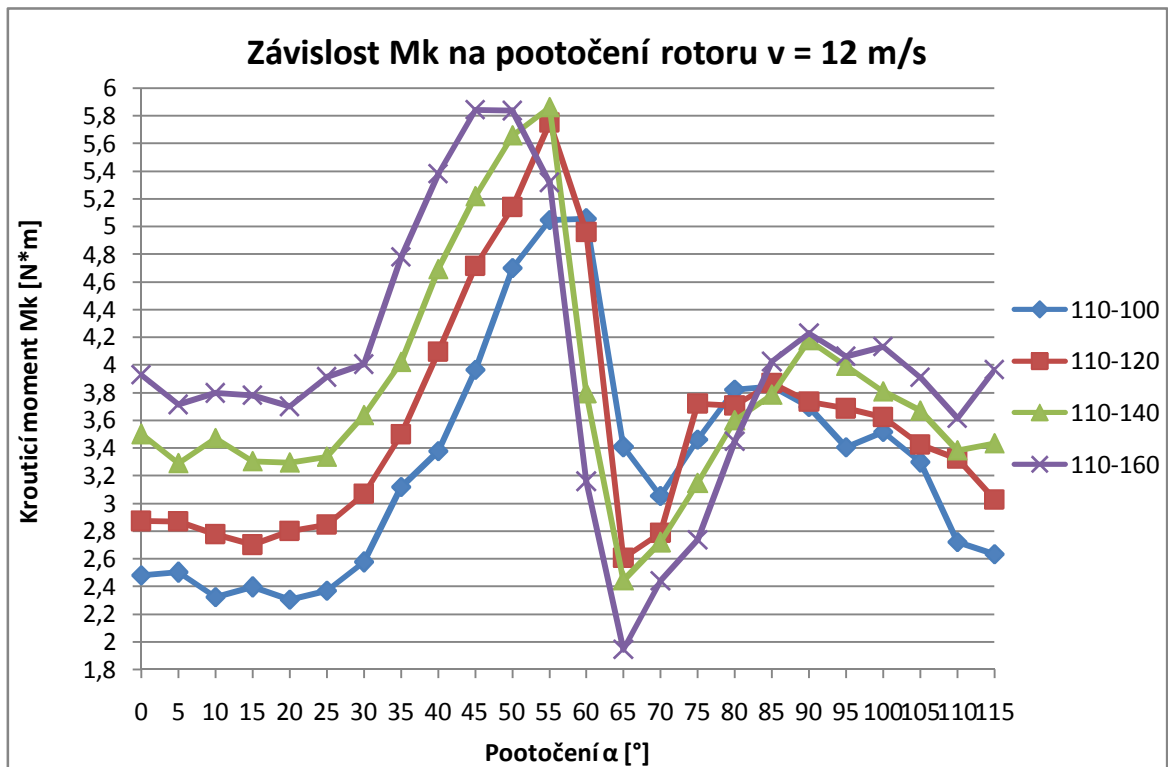
7.6 Výsledky pro rychlost větru 12 m/s

Následující rotory jsou počítány se zvýšenou rychlostí větru na 12 m/s. V tabulce a v grafu je znovu zobrazen výpočet krouticího momentu čtyř rotorů a jak vyšlo u rychlosti 5, 7 a 10 m/s, tak znovu při prohlubování lopatky nám krouticí moment roste. U rotoru 110-100 vzrostl průměrný krouticí moment na 3,296 N*m, u rotoru 110-120 na 3,567N*m, u rotoru 110-140 na 3,803 N*m a u rotoru 110-160 na 3,986 N*m.

V grafu si lze všimnout rozdílného dosažení maxima a minima u všech čtyř rotorů. Tak jako v předcházejících srovnáních je zde patrný markantní pokles krouticího momentu mezi natočením 50 – 70 stupni. Dále je z obrázků 59 – 62 patrné, že při zvyšující se rychlosti tento rozdíl krouticích momentů vzrůstá.

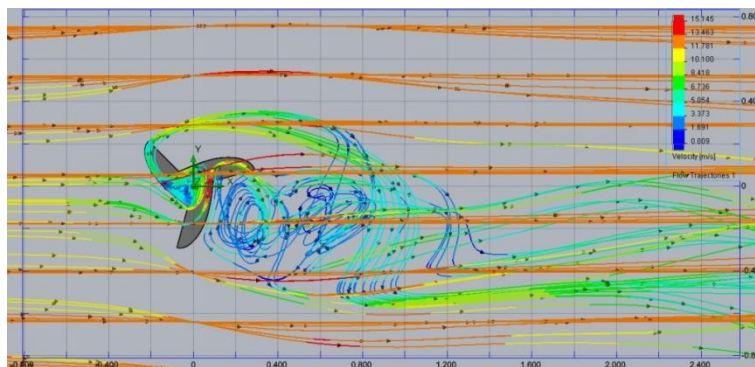
Tabulka 13: Výpočet krouticího momentu a průměr připroudění větru 12 m/s.

Pootočení α [°]	Rotor [rychlost proudění větru $v = 12$ m/s]			
	110-100	110-120	110-140	110-160
	Krouticí moment M_k [N*m]			
0	2,482	2,872	3,501	3,929
5	2,502	2,871	3,292	3,714
10	2,325	2,778	3,472	3,797
15	2,396	2,701	3,305	3,779
20	2,307	2,802	3,296	3,700
25	2,369	2,847	3,337	3,913
30	2,576	3,069	3,637	4,005
35	3,119	3,500	4,022	4,781
40	3,380	4,094	4,693	5,382
45	3,967	4,716	5,217	5,843
50	4,700	5,141	5,659	5,836
55	5,047	5,750	5,862	5,318
60	5,055	4,961	3,797	3,159
65	3,409	2,607	2,446	1,946
70	3,056	2,788	2,720	2,439
75	3,461	3,720	3,146	2,737
80	3,822	3,706	3,601	3,448
85	3,847	3,869	3,787	4,024
90	3,696	3,734	4,180	4,230
95	3,407	3,686	3,995	4,064
100	3,516	3,624	3,809	4,133
105	3,298	3,426	3,668	3,910
110	2,721	3,324	3,385	3,615
115	2,635	3,026	3,436	3,967
Průměr	3,296	3,567	3,803	3,986

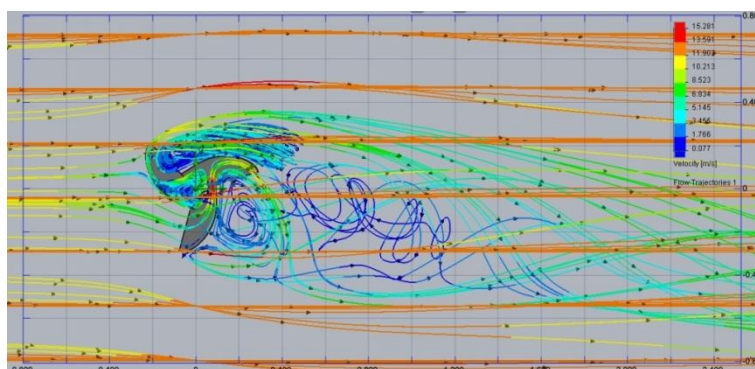


Obrázek 58: Zobrazení krouticích momentů v závislosti na pootočení po 5° při proudění větru 12 m/s.

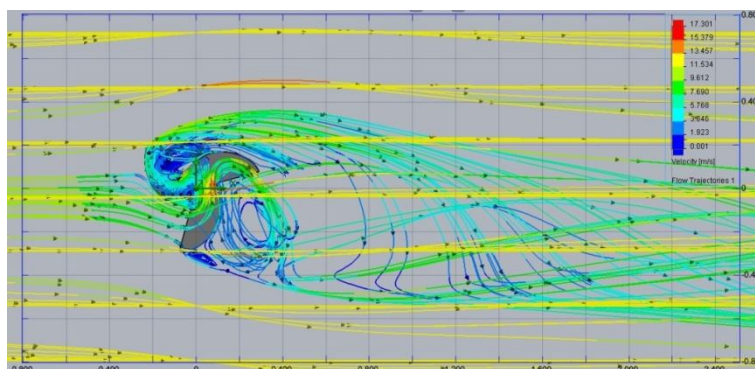
Na obrázcích 59 – 62 byly srovnány čtyři druhy rotorů stejné rychlosti 12 m/s při pootočení rotoru o 15° . Jsou zde vidět trajektorie proudícího větru okolo rotorů, které by měly přibližně odpovídat trajektoriím větrů v praxi.



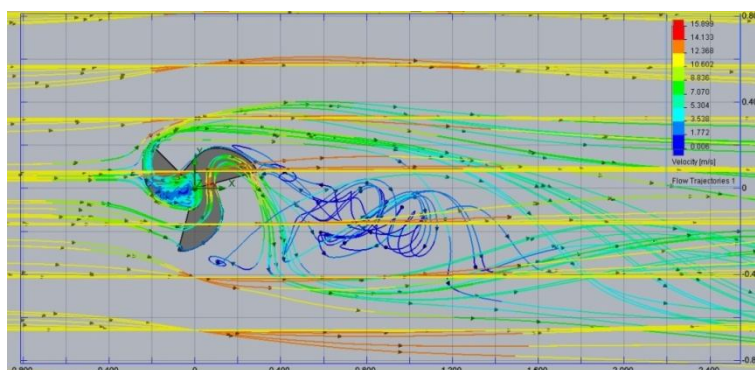
Obrázek 59: Rotor 110-100-15st-v12.



Obrázek 60: Rotor 110-120-15st-v12.



Obrázek 61: Rotor 110-140-15st-v12.



Obrázek 62: Rotor 110-160-15st-v12.

7.7 Nárůst krouticího momentu vzhledem k rychlosti větru

Tabulka 14: Vypočtené zprůměrované hodnoty rotorů při rychlostech 5, 7, 10 a 12 m/s.

Rotory	Průměrné hodnoty M_k [N*m]			
	$v = 5$ m/s	$v = 7$ m/s	$v = 10$ m/s	$v = 12$ m/s
110-100	0,562	1,106	2,277	3,296
110-120	0,609	1,211	2,462	3,567
110-140	0,650	1,284	2,631	3,803
110-160	0,683	1,341	2,757	3,986

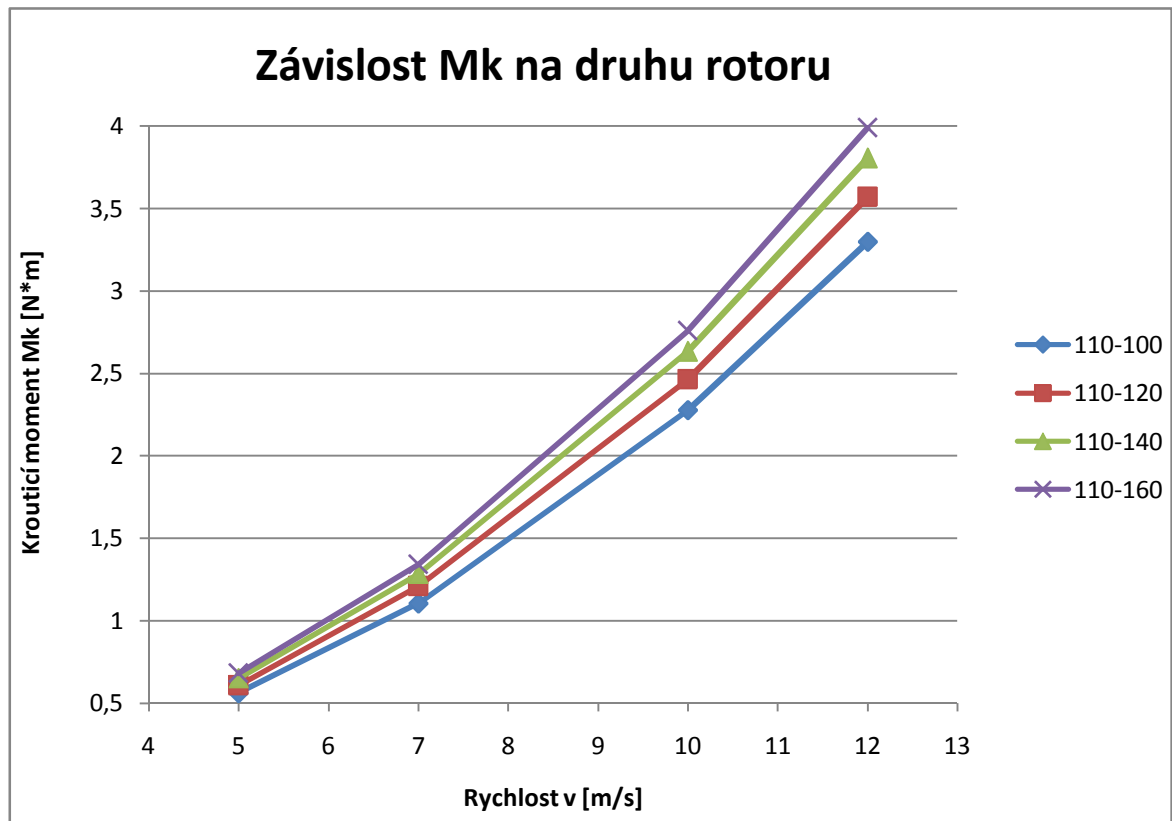
Tabulka 15: Hodnoty krouticího momentu vypočtené z rovnice (5) výkonu větru.

Rotory	Hodnoty M_k [N*m]			
	$v = 5$ m/s	$v = 7$ m/s	$v = 10$ m/s	$v = 12$ m/s
110-100	0,562	1,102	2,248	3,237
110-120	0,609	1,194	2,436	3,508
110-140	0,650	1,274	2,600	3,744
110-160	0,683	1,339	2,732	3,934

Tabulka 16: Odchyly z výpočtu z Flow Simulation a teoretického výpočtu pomocí rovnice (5).

Rotory	Průměrné hodnoty M_k [N*m]			
	$v = 5$ m/s	$v = 7$ m/s	$v = 10$ m/s	$v = 12$ m/s
110-100	0,000	0,004	0,029	0,059
110-120	0,000	0,017	0,026	0,059
110-140	0,000	0,010	0,031	0,059
110-160	0,000	0,002	0,025	0,052

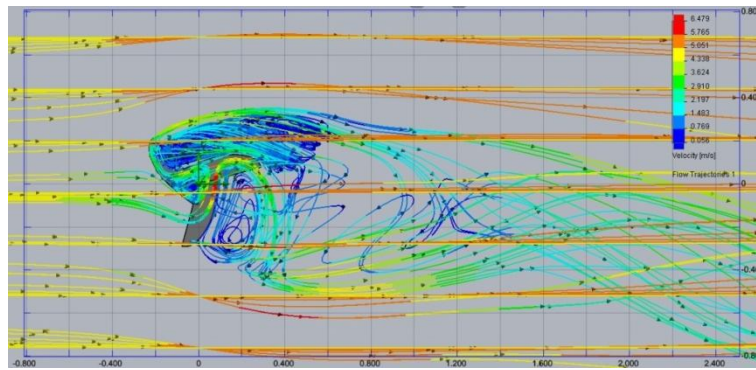
V tabulce 14 byly zprůměrovány hodnoty výpočtů jednotlivých rotorů a určitých rychlostí. V tabulce 15 byly tyto hodnoty vypočteny podle rovnice (5), odvíjející se od referenčního rotoru. Jak bylo předpokládáno v teorii, krouticí moment roste kvadraticky závisle na rychlosti proudění větru. Vypočtené výsledky z programu SolidWorks se téměř shodují s výpočty z rovnice. V tabulkách byly nalezeny nepatrné odchylky, které byly pravděpodobně způsobeny výpočty v programu SolidWorks.



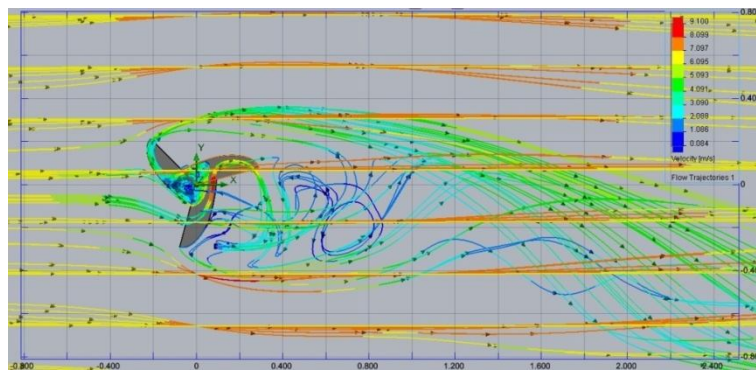
Obrázek 63: Graf závislosti zprůměrovaných Mk na rychlosti.

Z grafu je patrné, že s rychlostí proudícího větru, vzrůstá kroučící moment jednotlivých průtažných rotorů. U referenčního rotoru 110-100 je průměrný Mk 0,562 N*m při rychlosti 5 m/s. Při rychlosti 7 m/s stoupl průměrný Mk na 1,106 N*m, což je o 97 % při zvýšení rychlosti o 2 m/s. Při rychlosti 10 m/s stoupl Mk na 2,277 N*m, což je o 305 % při zvýšení rychlosti o 5 m/s a při rychlosti 12 m/s stoupl Mk na 3,296 N*m, což je o 486 % při zvýšení rychlosti o 7 m/s. Tento trend je zaznamenán i u ostatních druhů rotorů, tj. u rotorů 110-120, 110-140 a 110-160.

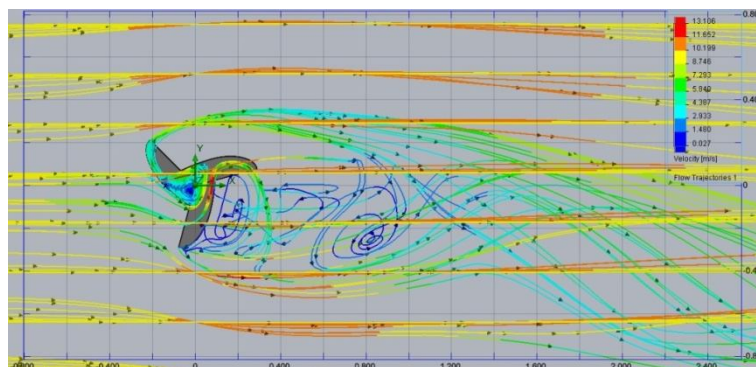
Na obrázcích 64 – 79 jsou zobrazeny čtyři rotory seřazené podle rychlostivětru 5, 7, 10 a 12 m/s pootočené o 15° takovým stylem, že je porovnán jeden rotor při různých rychlostech. Jsou zde vidět trajektorie a rychlosti proudícího větru okolo rotoru, značně zvyšující se turbulence v rotoru a za rotorem při zvyšující se rychlosti proudícího větru. Při zvyšující rychlosti proudění stoupá také silové namáhání v ose X a Y u jednotlivých rotorů.



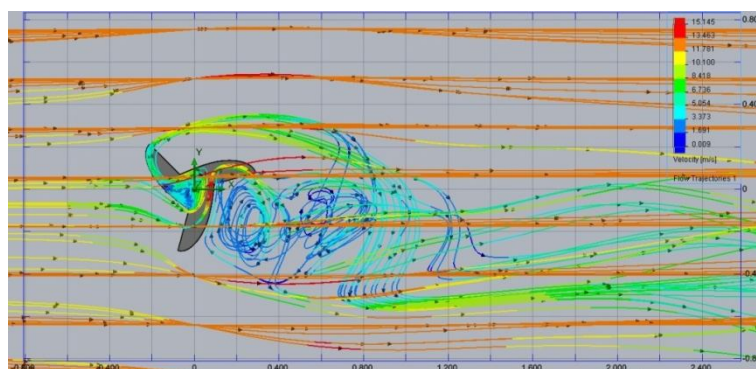
Obrázek 64: Rotor 110-100-15st-v5.



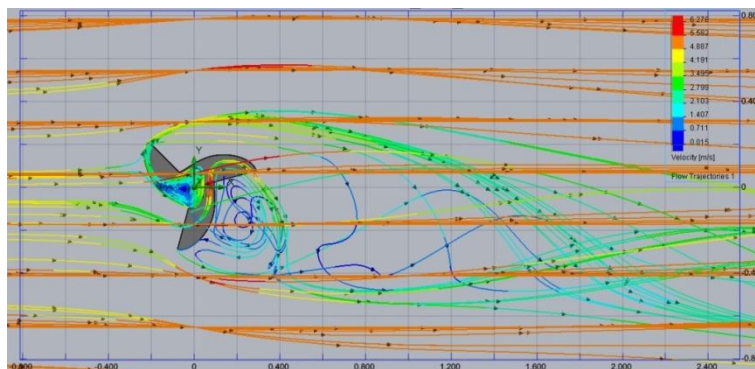
Obrázek 65: Rotor 110-100-15st-v7.



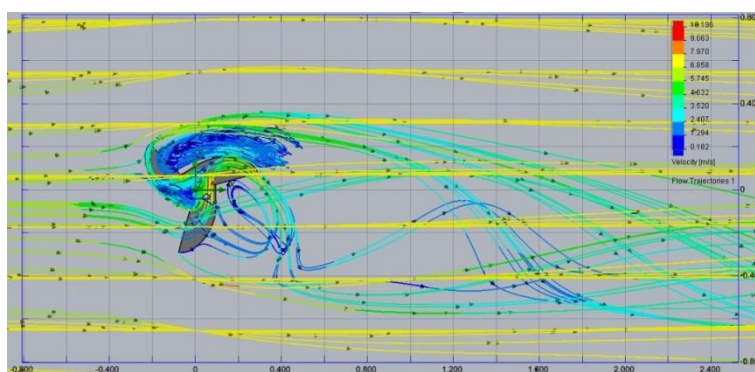
Obrázek 66: Rotor 110-100-15st-v10.



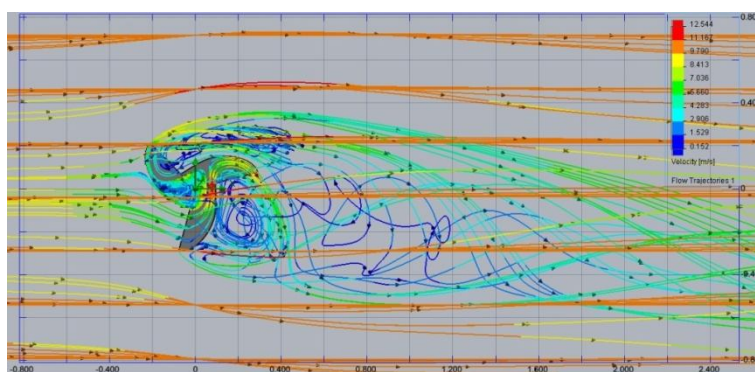
Obrázek 67: Rotor 110-100-15st-v12.



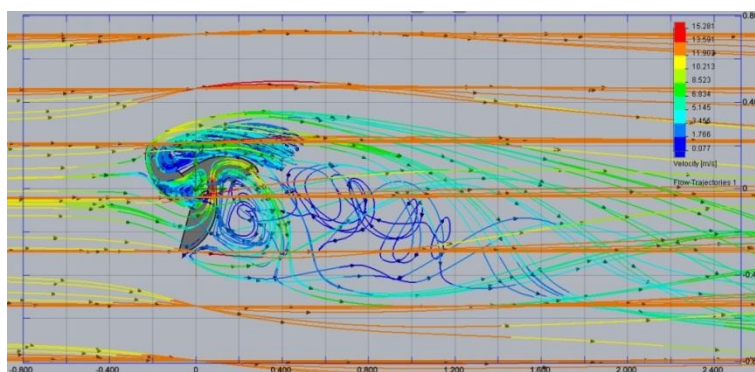
Obrázek 68: Rotor 110-120-15st-v5.



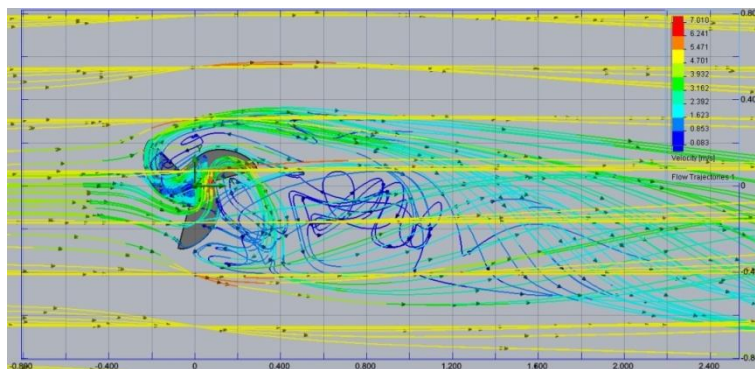
Obrázek 69: Rotor 110-120-15st-v7.



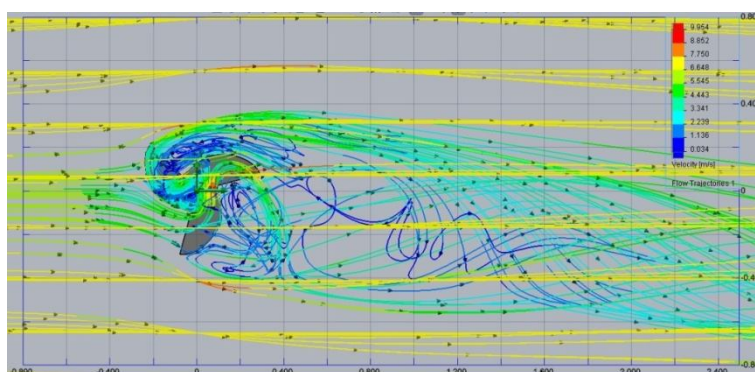
Obrázek 70: Rotor 110-120-15st-v10.



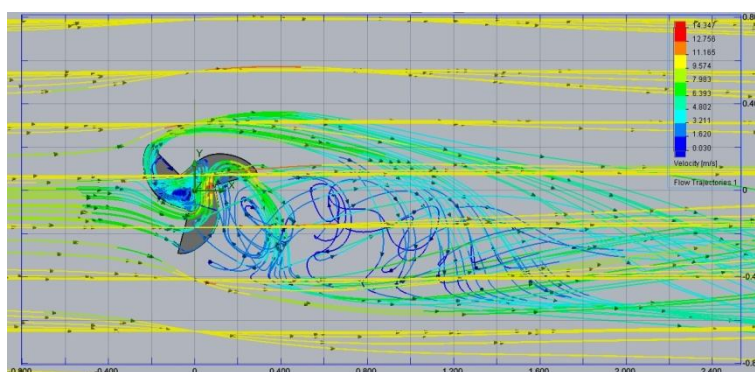
Obrázek 71: Rotor 110-120-15st-v12.



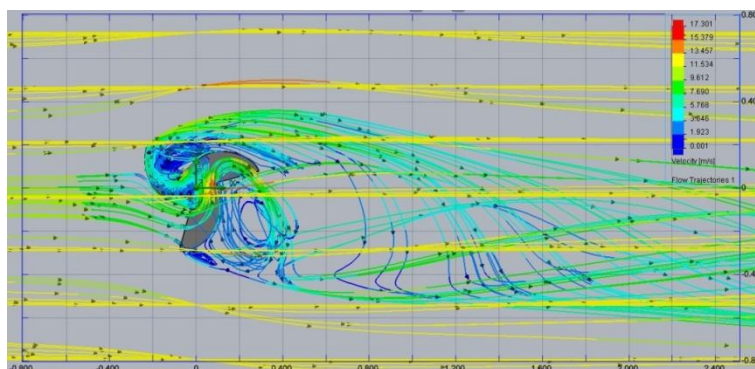
Obrázek 72: Rotor 110-140-15st-v5.



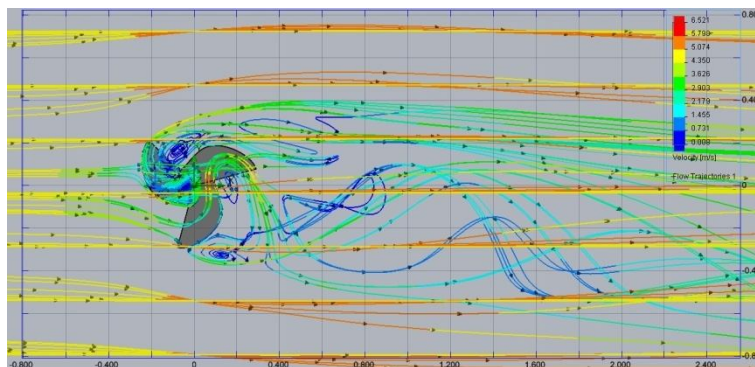
Obrázek 73: Rotor 110-140-15st-v7.



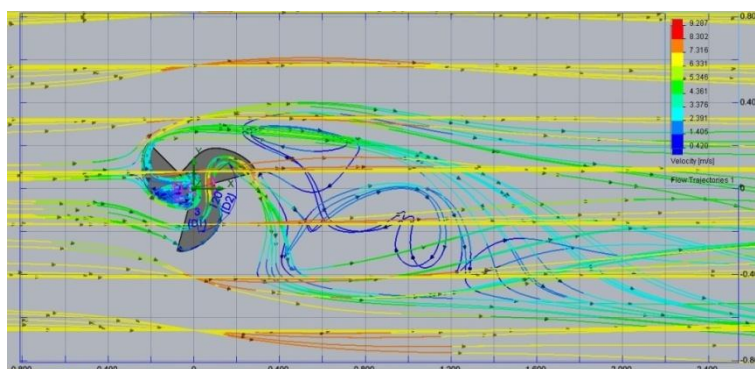
Obrázek 74: Rotor 110-140-15st-v10.



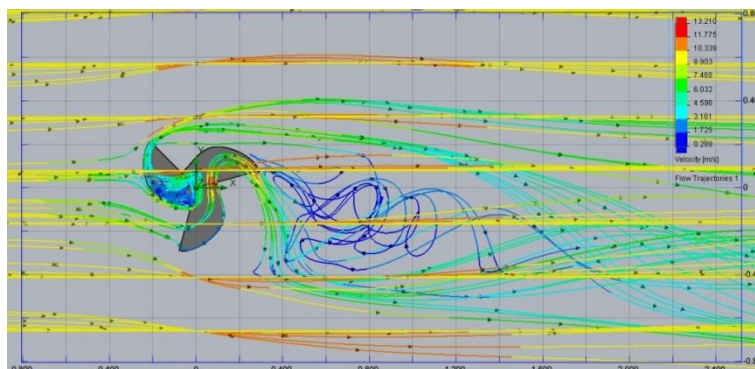
Obrázek 75: Rotor 110-140-15st-v12.



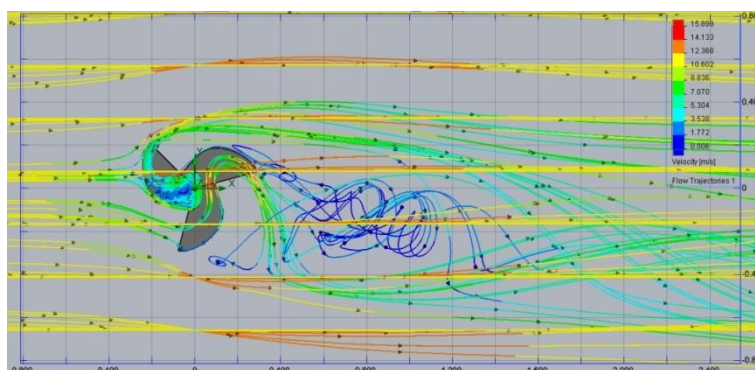
Obrázek 76: Rotor 110-160-15st-v5.



Obrázek 77: Rotor 110-160-15st-v7.



Obrázek 78: Rotor 110-160-15st-v10.

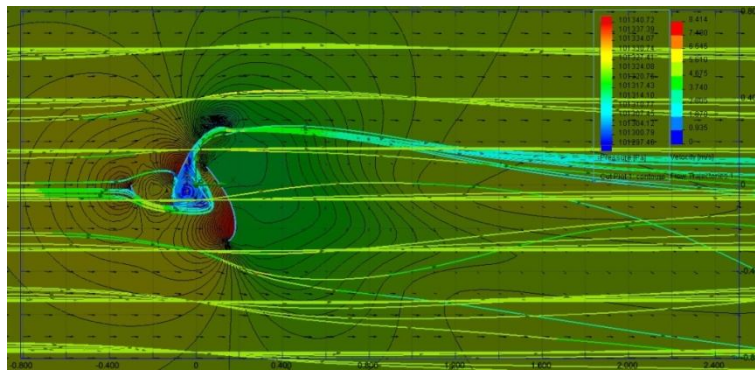


Obrázek 79: Rotor 110-160-15st-v12.

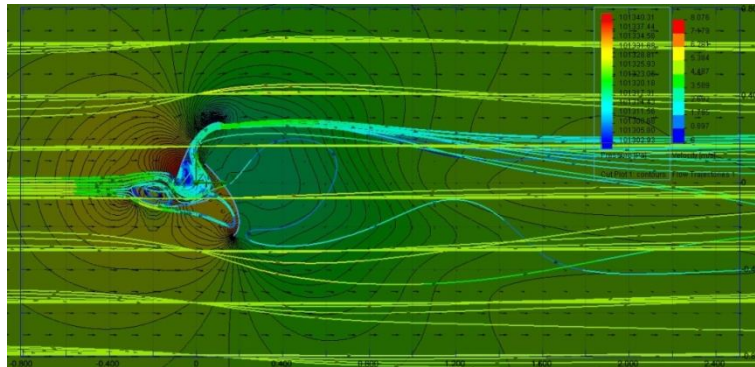
7.8 Rozdíly maximálního a minimálního krouticího momentu u rotoru

7.8.1 Rotory při rychlosti proudícího větru 5 m/s

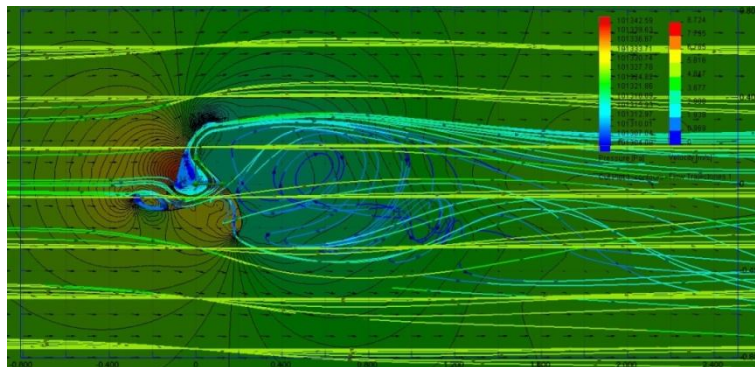
Na obrázcích 80 – 92 je zobrazen náhlý pokles z max. Mk na min. Mk všech čtyř rotorů při rychlosti větru 5 m/s, viz obr. 43. Na obrázku jsou zobrazeny trajektorie proudícího větru okolo rotoru a jednotlivé tlaky v místech rotoru. Tento prudký pokles je zapříčiněn natočením lopatky do určitého úhlu. S prohloubením lopatky dochází ke zvyšování cyklického zatížení rotorů. U těchto rotorů jde o úhly mezi 55 – 70 stupni pootočení.



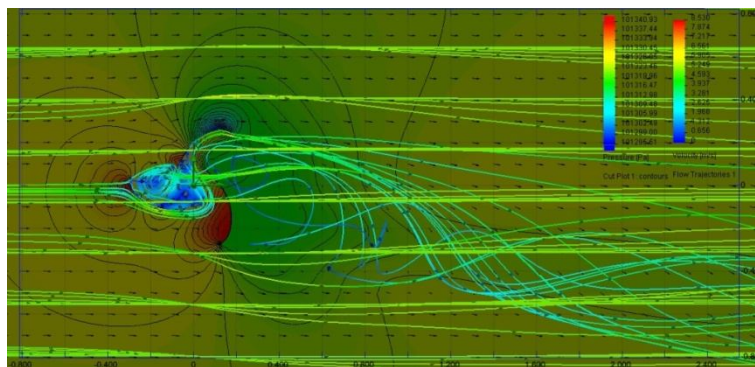
Obrázek 80: Rotor 110-100-60st-v5.



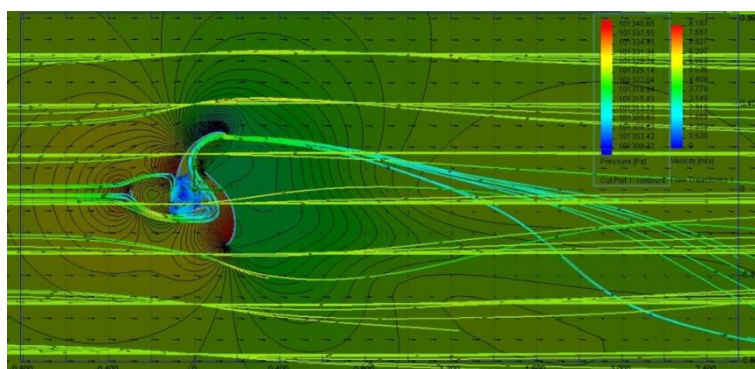
Obrázek 81: Rotor 110-100-65st-v5.



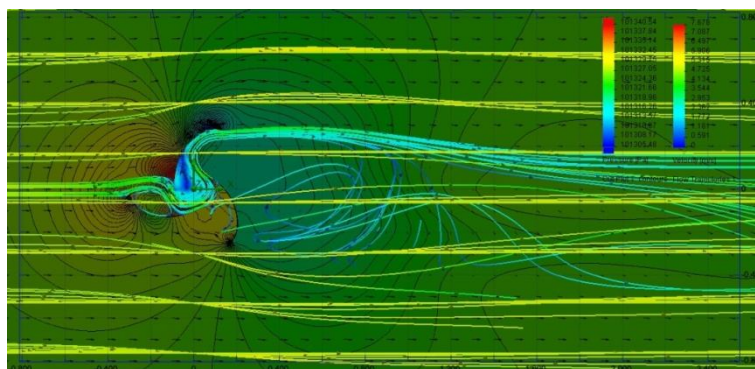
Obrázek 82: Rotor 110-100-70st-v5.



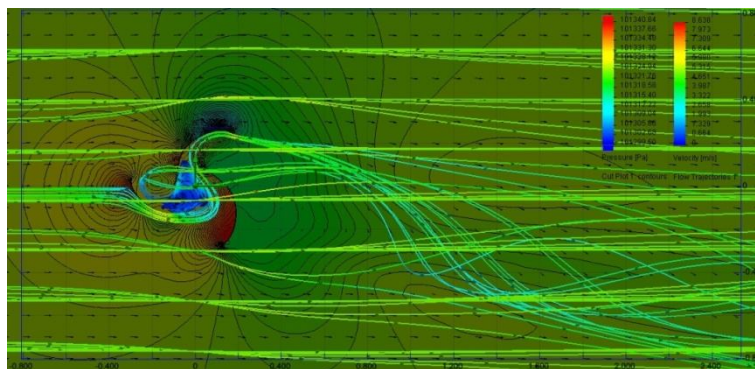
Obrázek 83: Rotor 110-120-55st-v5.



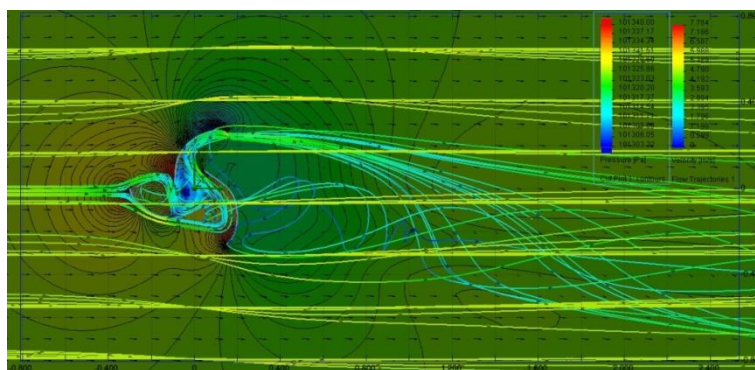
Obrázek 84: Rotor 110-120-60st-v5.



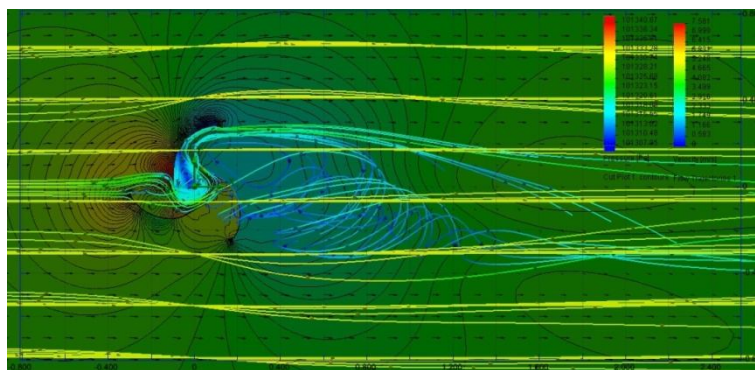
Obrázek 85: Rotor 110-120-65st-v5.



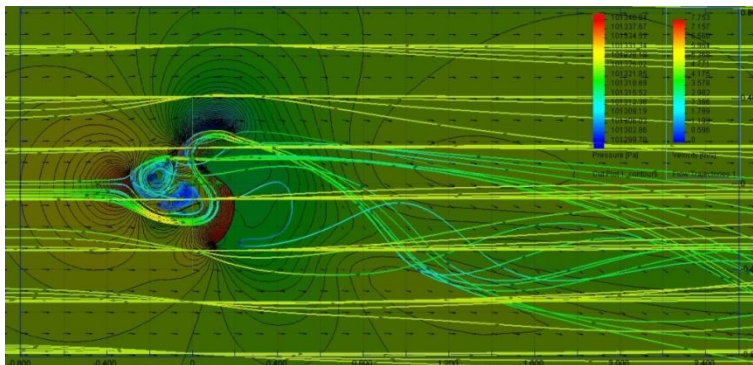
Obrázek 86: Rotor 110-140-55st-v5.



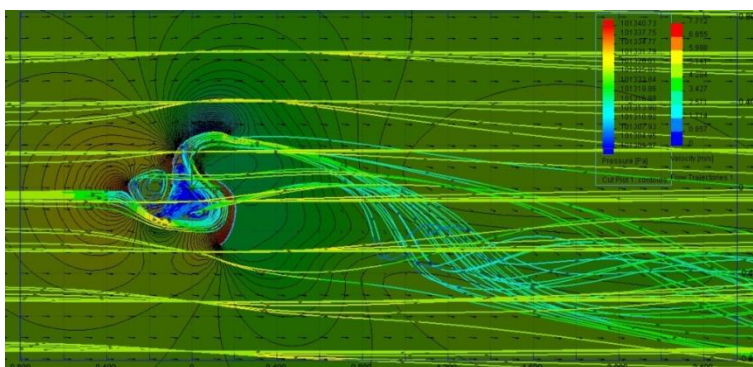
Obrázek 87: Rotor 110-140-60st-v5.



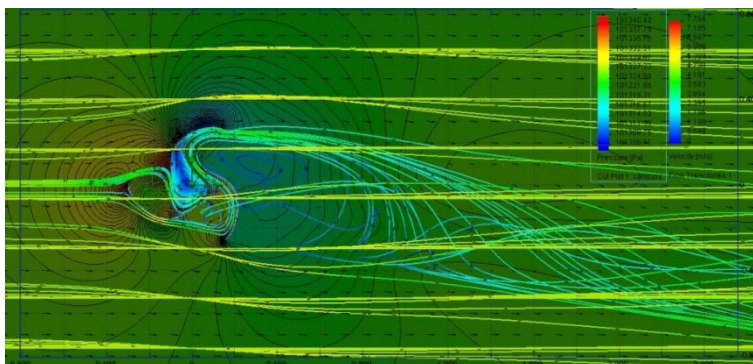
Obrázek 88: Rotor 110-140-65st-v5.



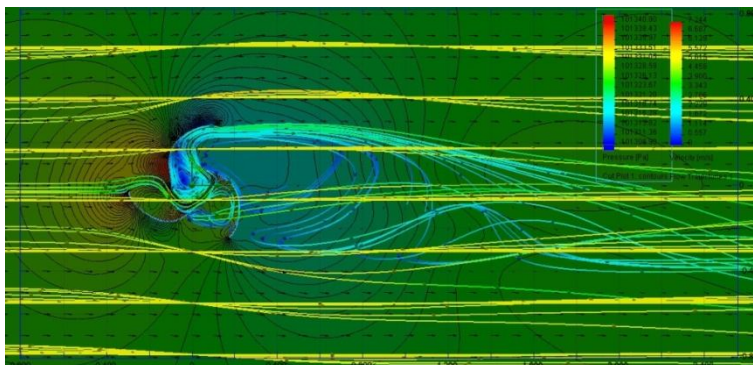
Obrázek 89: Rotor 110-160-50st-v5.



Obrázek 90: Rotor 110-160-55st-v5.



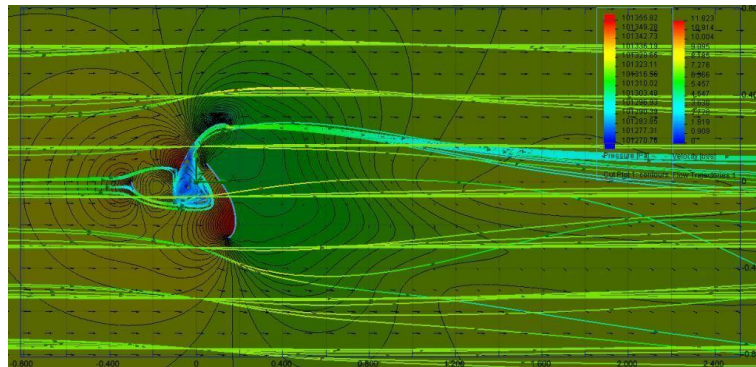
Obrázek 91: Rotor 110-160-60st-v5.



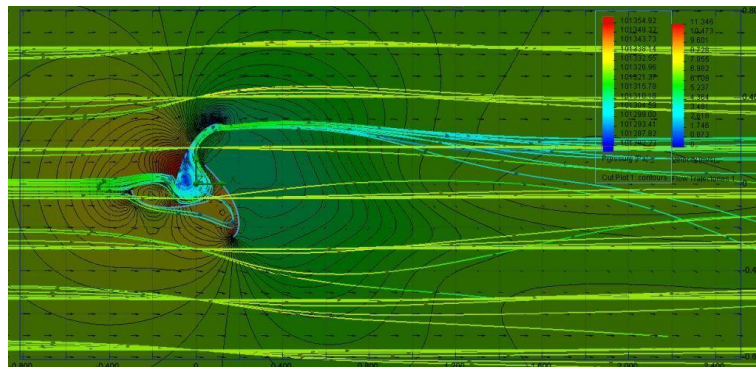
Obrázek 92: Rotor 110-160-65st-v5.

7.8.2 Rotory při rychlosti proudícího větru 7 m/s

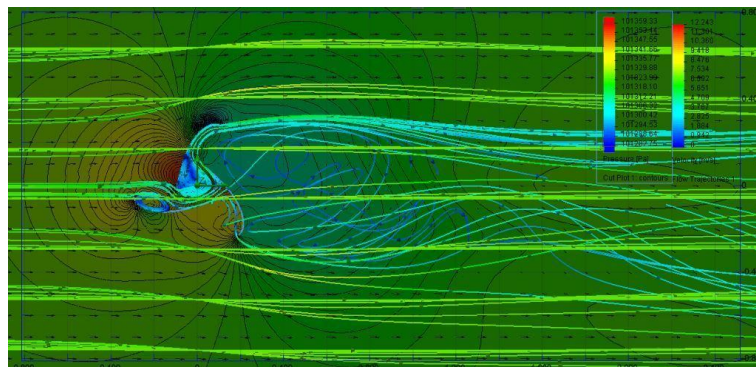
Na obrázcích 93 – 105 je zobrazen náhlý pokles z max. M_k na min. M_k všech čtyř rotorů při rychlosti větru 7 m/s, viz obr. 48. Na obrázku jsou zobrazeny trajektorie proudícího větru okolo rotoru a jednotlivé tlaky v místech rotoru. Tak, jak se chová rotor při rychlosti větru 5 m/s, tak se chová i při rychlosti větru 7 m/s, jen s rozdílem, že na něj působí větší síly a větší cyklické zatížení. Tento trend můžeme sledovat i při rychlostech 10 a 12 m/s.



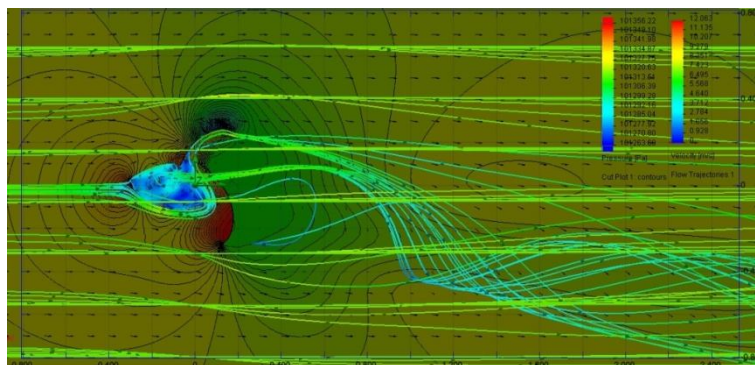
Obrázek 93: Rotor 110-100-60st-v7.



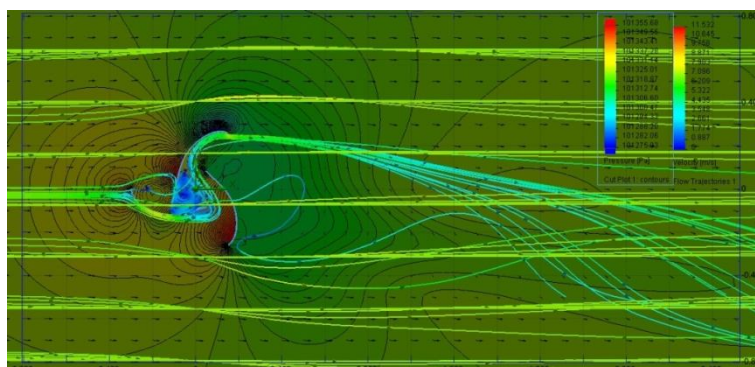
Obrázek 94: Rotor 110-100-65st-v7.



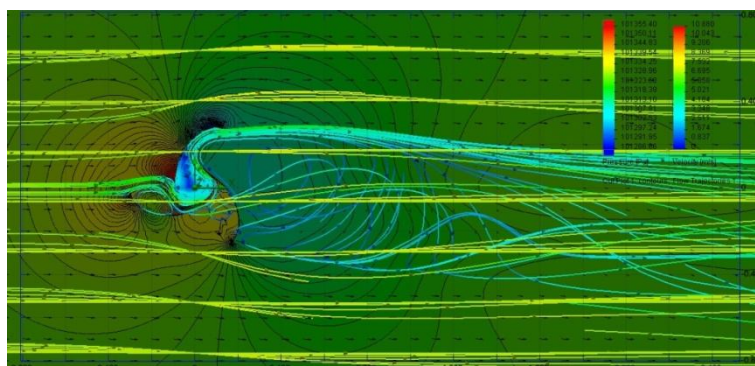
Obrázek 95: Rotor 110-100-70st-v7.



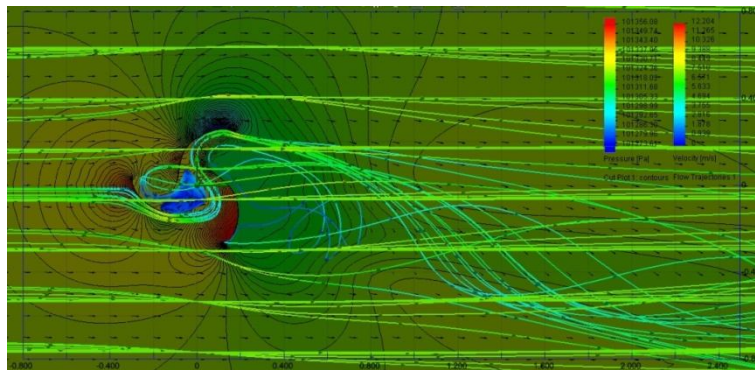
Obrázek 96: Rotor 110-120-55st-v7.



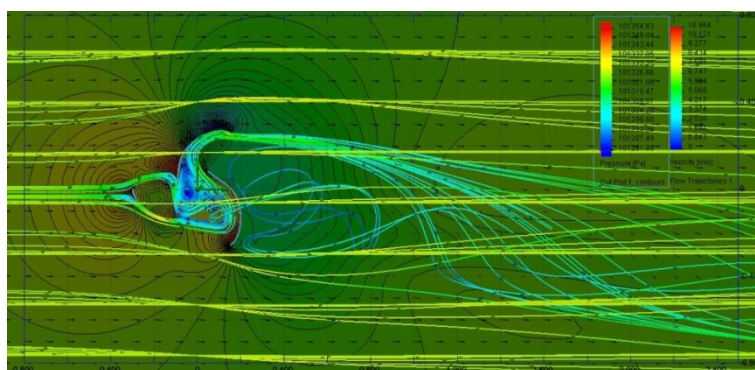
Obrázek 97: Rotor 110-120-60st-v7.



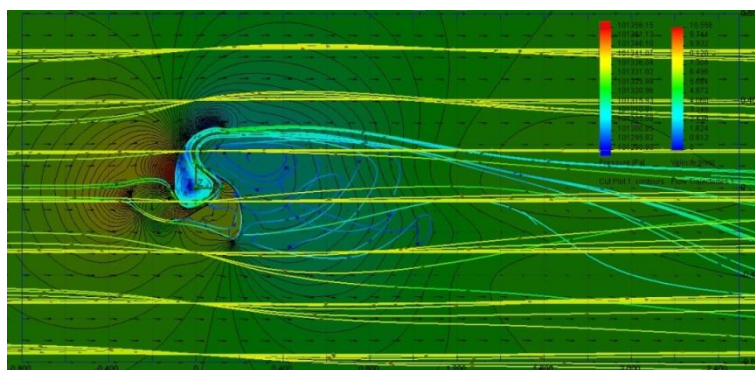
Obrázek 98: Rotor 110-120-65st-v7.



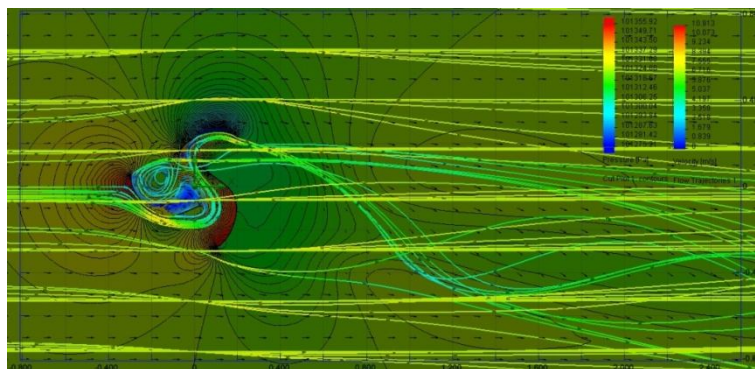
Obrázek 99: Rotor 110-140-55st-v7.



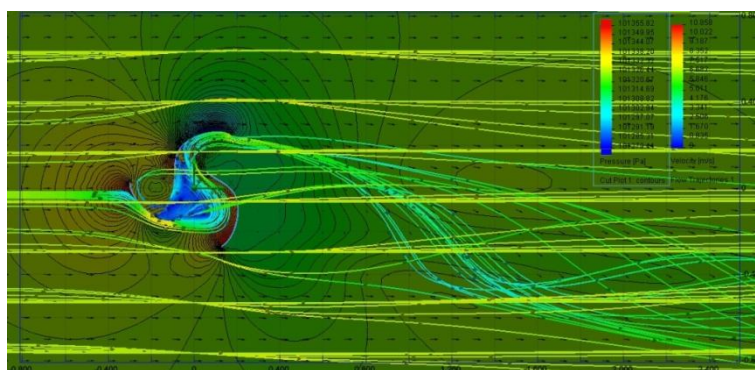
Obrázek 100: Rotor 110-140-60st-v7.



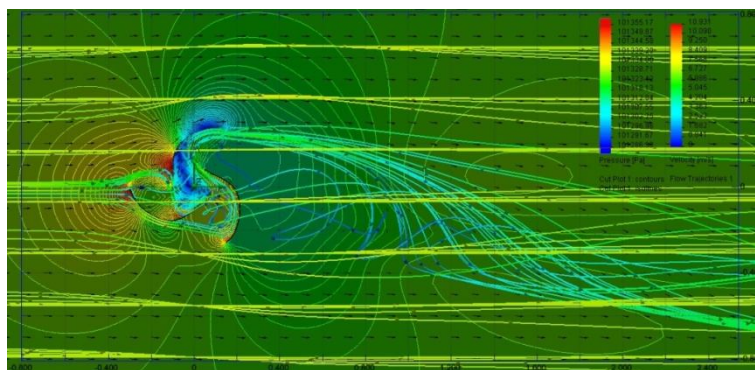
Obrázek 101: Rotor 110-140-65st-v7.



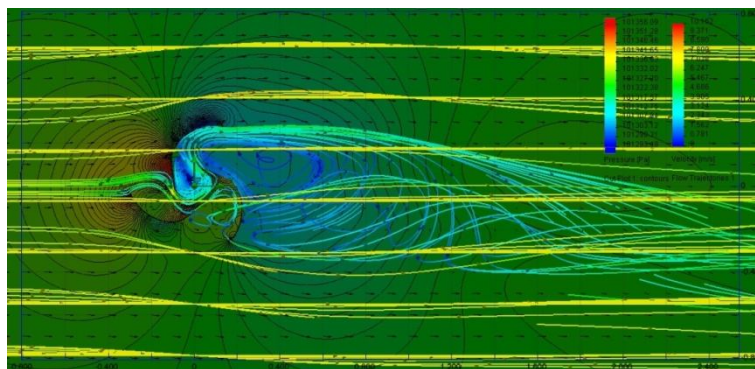
Obrázek 102: Rotor 110-160-50st-v7.



Obrázek 103: Rotor 110-160-55st-v7.



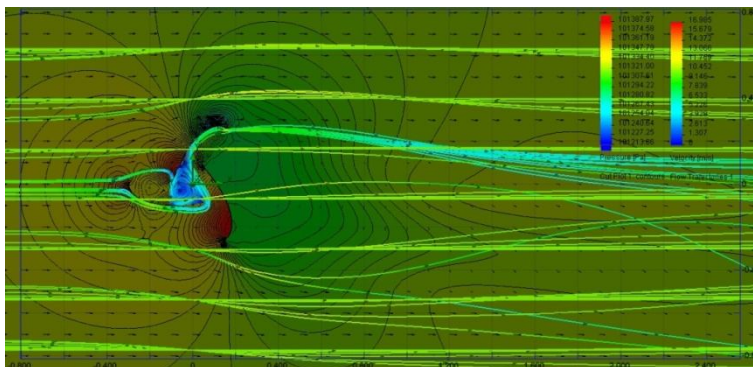
Obrázek 104: Rotor 110-160-60st-v7.



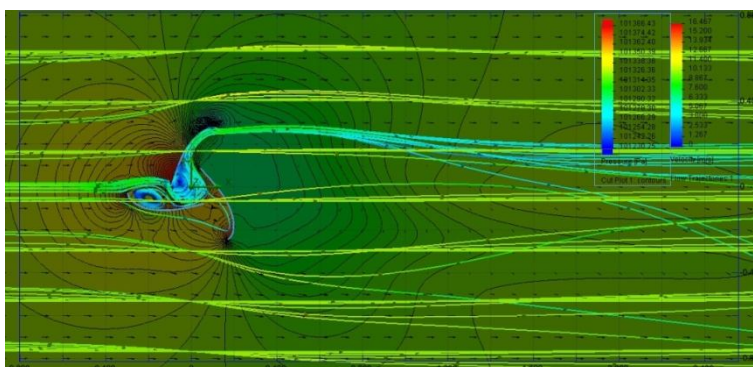
Obrázek 105: Rotor 110-160-65st-v7.

7.8.3 Rotory při rychlosti proudícího větru 10 m/s

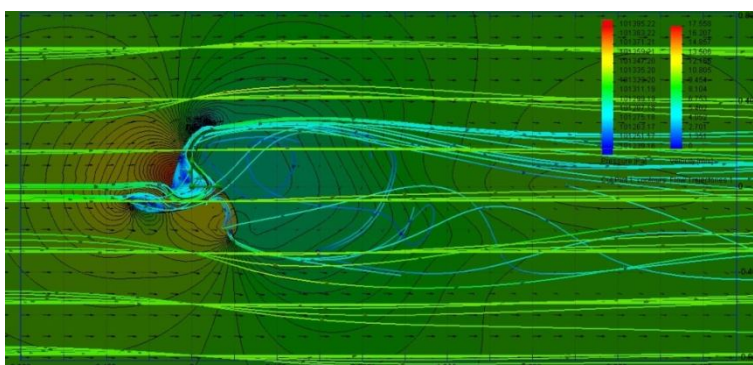
Na obrázcích 106 – 118 je zobrazen náhlý pokles z max. Mk na min. Mk všech čtyř rotorů při rychlosti větru 10 m/s, viz obr. 53. Na obrázku jsou zobrazeny trajektorie proudícího větru okolo rotoru a jednotlivé tlaky v místech rotoru.



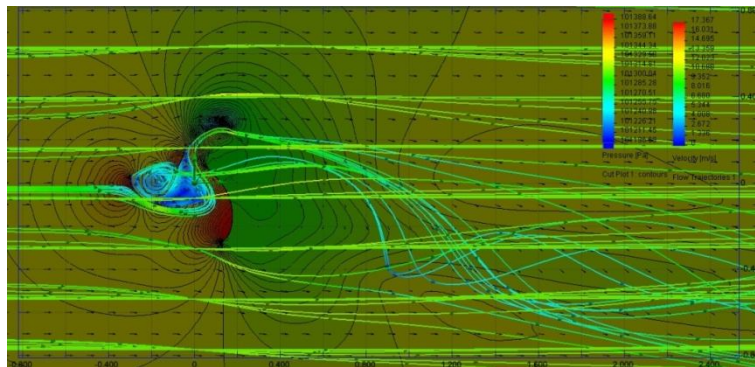
Obrázek 106: Rotor 110-100-60st-v10.



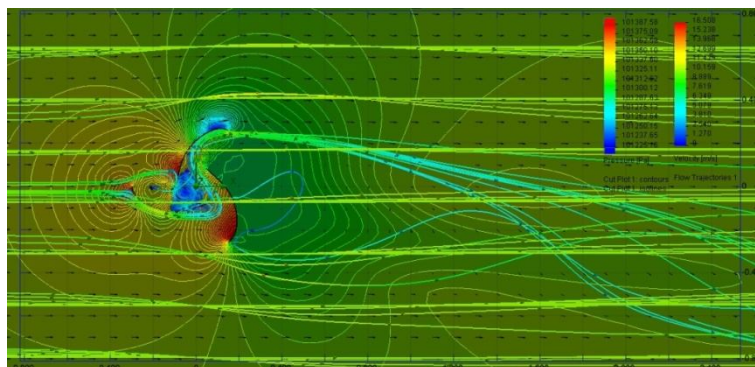
Obrázek 107: Rotor 110-100-65st-v10.



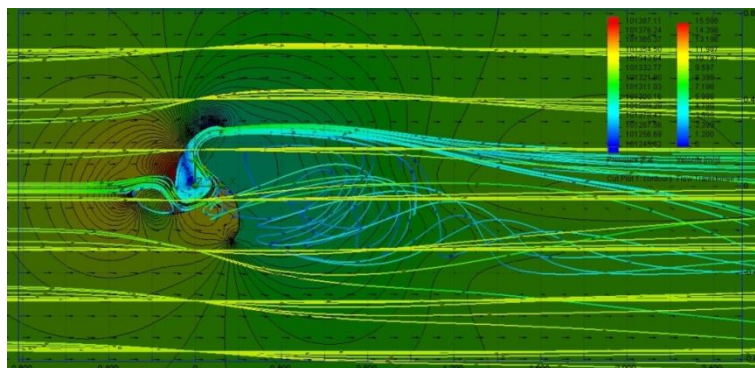
Obrázek 108: Rotor 110-100-70st-v10.



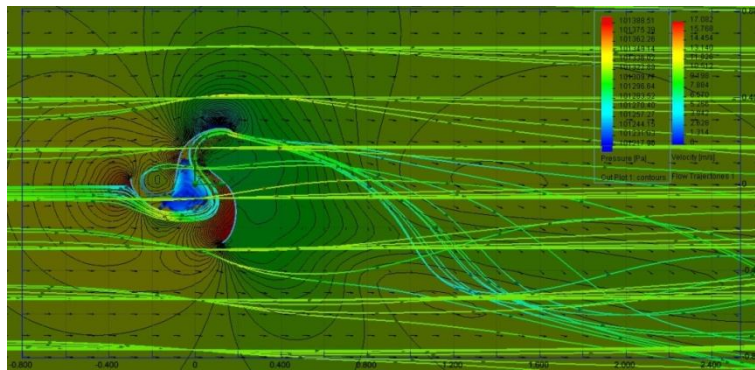
Obrázek 109: Rotor 110-120-55st-v10.



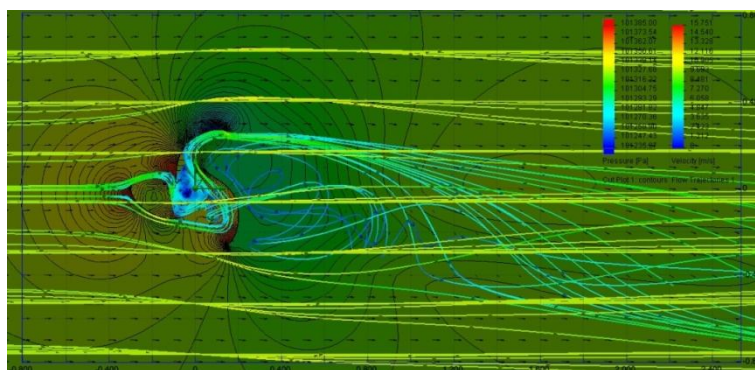
Obrázek 110: Rotor 110-120-60st-v10.



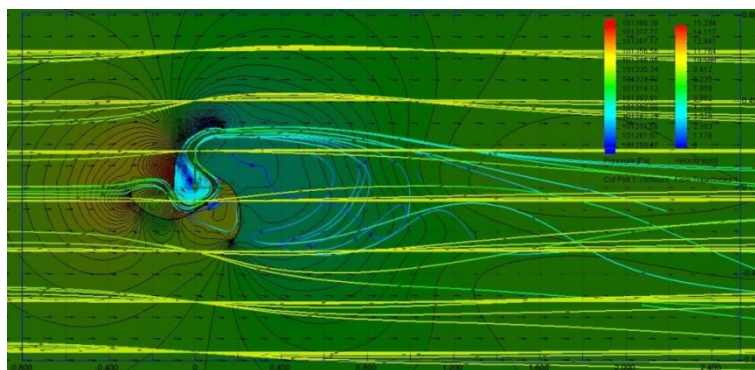
Obrázek 111: Rotor 110-120-65st-v10.



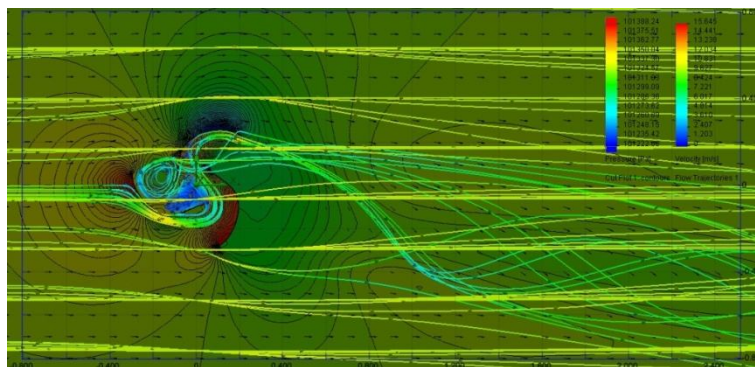
Obrázek 112: Rotor 110-140-55st-v10.



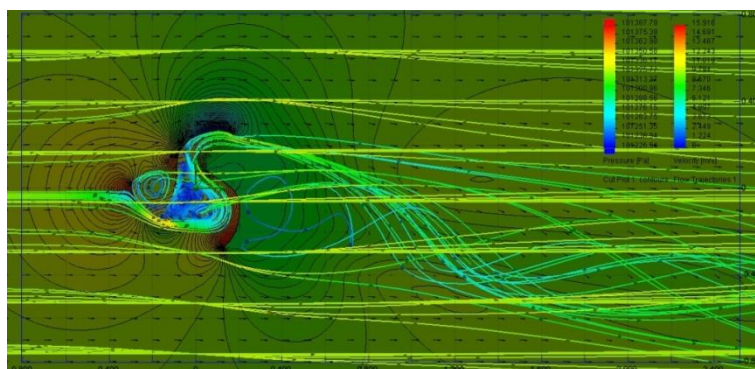
Obrázek 113: Rotor 110-140-60st-v10.



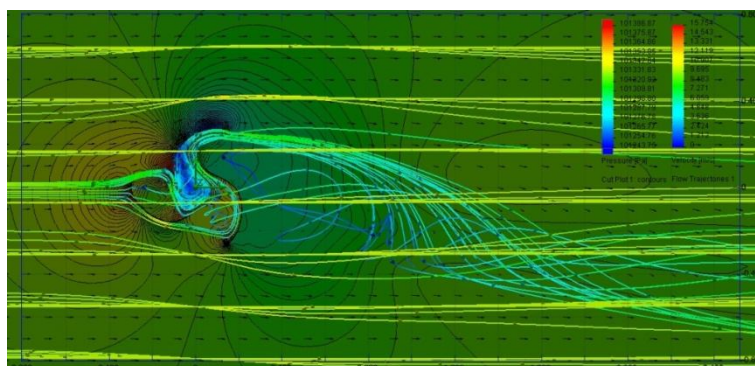
Obrázek 114: Rotor 110-140-65st-v10.



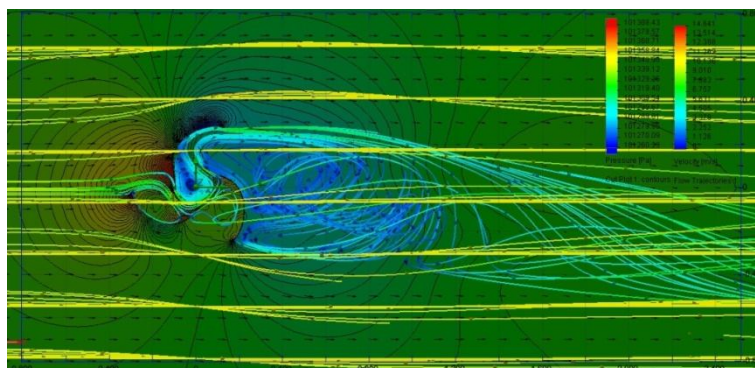
Obrázek 115: Rotor 110-160-50st-v10.



Obrázek 116: Rotor 110-160-55st-v10.



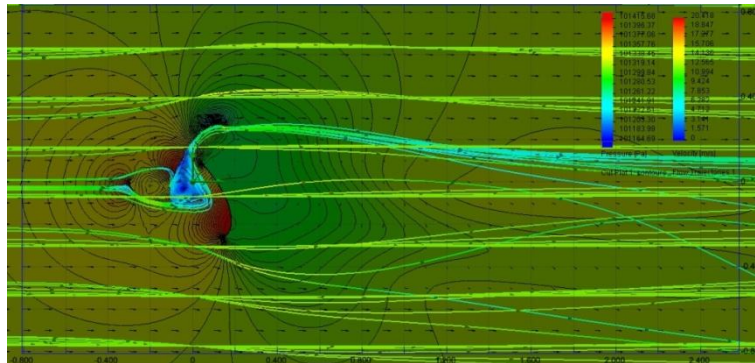
Obrázek 117: Rotor 110-160-60st-v10.



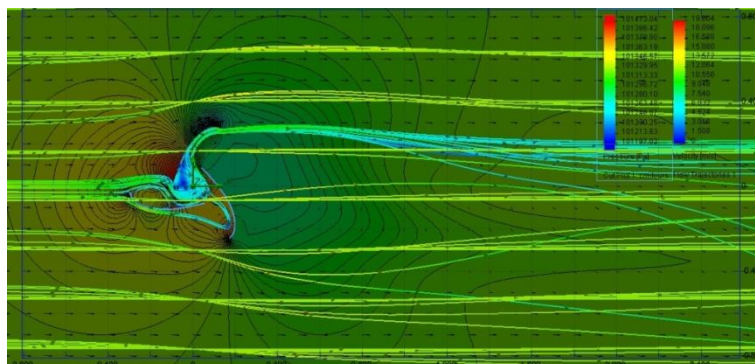
Obrázek 118: Rotor 110-160-65st-v10.

7.8.4 Rotory při rychlosti proudícího větru 12 m/s

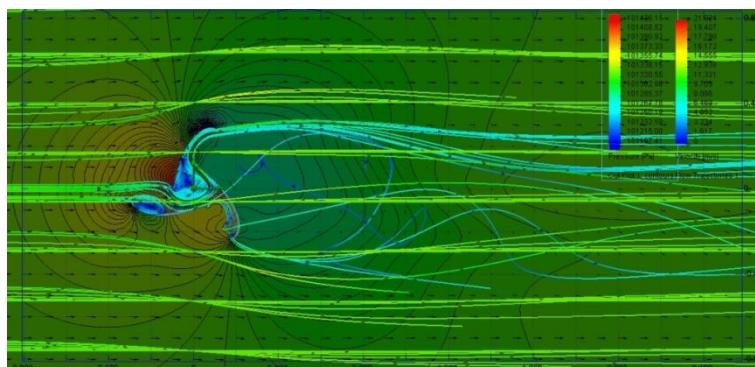
Na obrázcích 119 – 131 je zobrazen náhlý pokles z max. Mk na min. Mk všech čtyř rotorů při rychlosti větru 12 m/s, viz obr. 58. Na obrázku jsou zobrazeny trajektorie proudícího větru okolo rotoru a jednotlivé tlaky v místech rotoru.



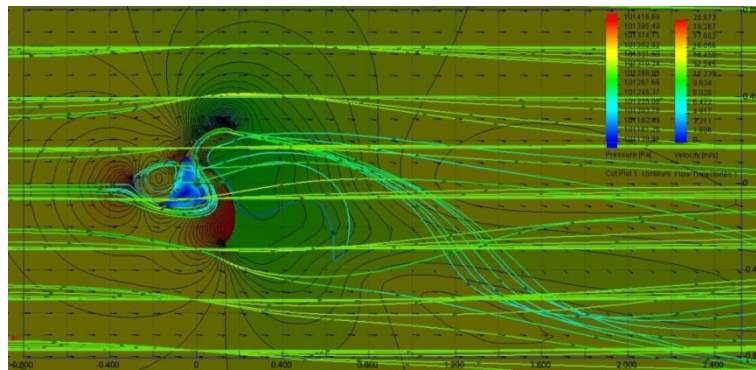
Obrázek 119: Rotor 110-100-60st-v12.



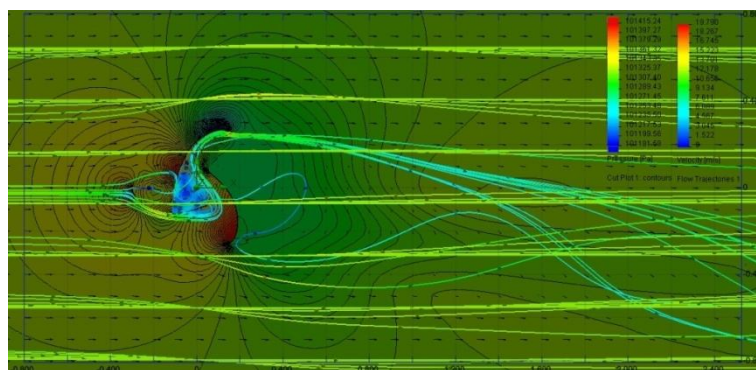
Obrázek 120: Rotor 110-100-65st-v12.



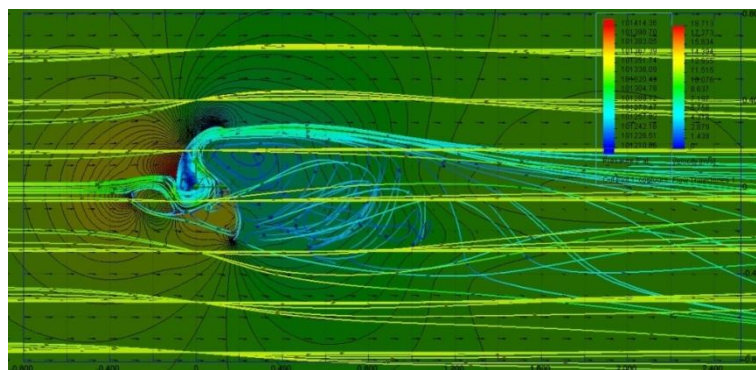
Obrázek 121: Rotor 110-100-70st-v12.



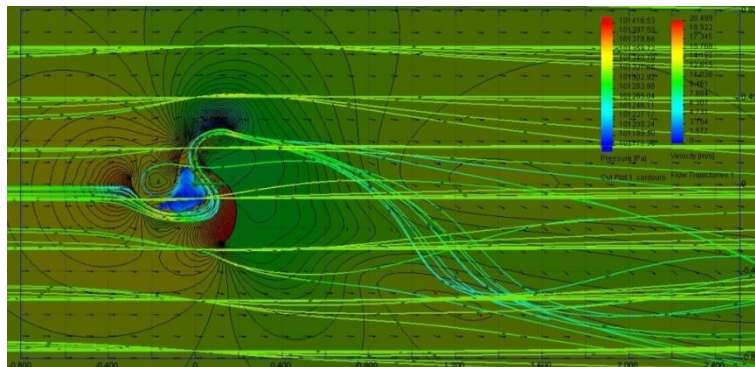
Obrázek 122: Rotor 110-120-55st-v12.



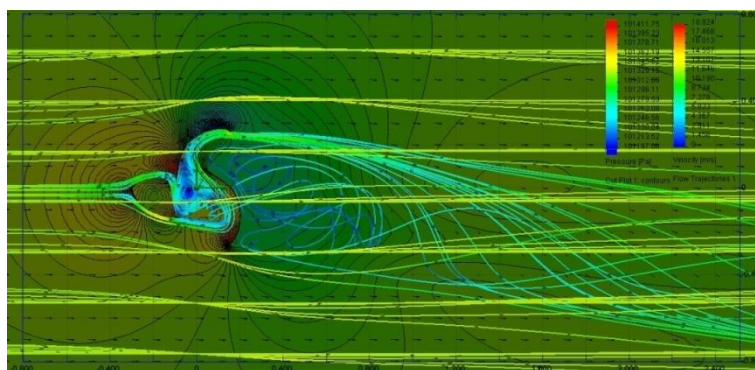
Obrázek 123: Rotor 110-120-60st-v12.



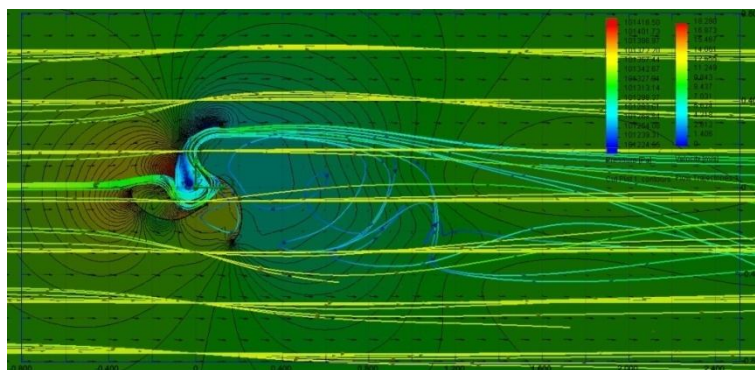
Obrázek 124: Rotor 110-120-65st-v12.



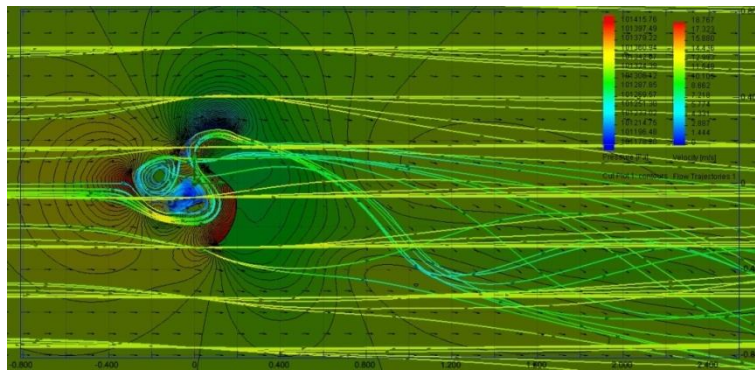
Obrázek 125: Rotor 110-140-55st-v12.



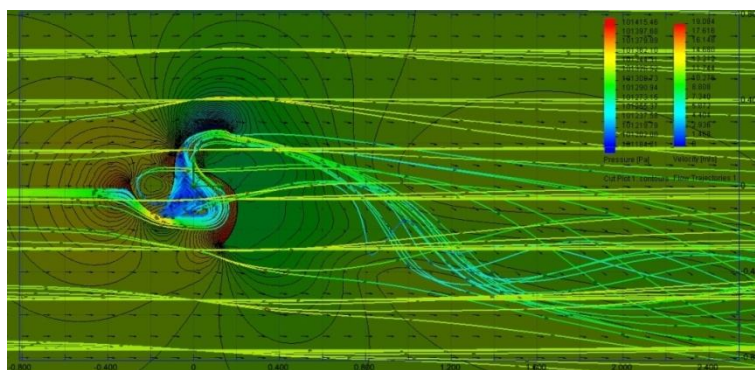
Obrázek 126: Rotor 110-140-60st-v12.



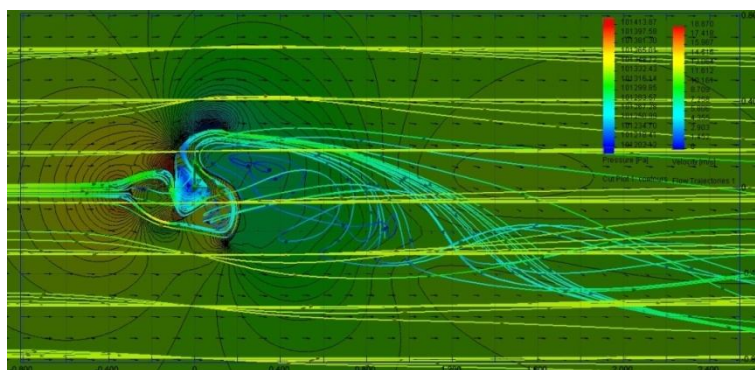
Obrázek 127: Rotor 110-140-65st-v12.



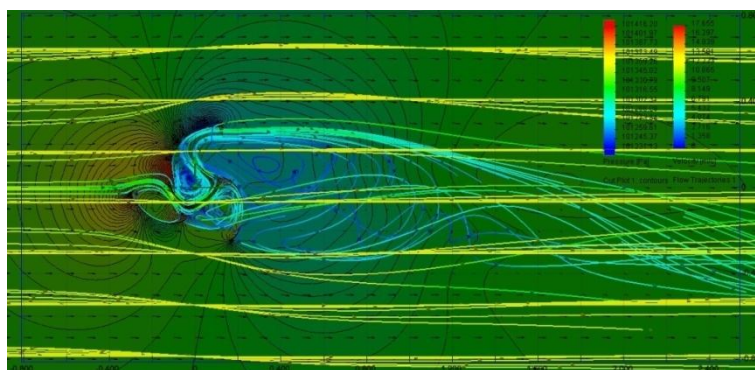
Obrázek 128: Rotor 110-160-50st-v12.



Obrázek 129: Rotor 110-160-55st-v12.



Obrázek 130: Rotor 110-160-60st-v12.



Obrázek 131: Rotor 110-160-65st-v12.

ZÁVĚR

Teoretická část je zaměřena na seznámení se s podmínkami větru, jeho rychlosti, směry větru na Zemi a jeho výpočty větrné energie, které byly použity v praktické části. Dále jsou zde druhy větrných elektráren a jednotlivé druhy rotorů. Nejzajímavějším rotorem byl průtažný rotor, od kterého se nadále odvíjel tvar lopatky v praktické části bakalářské práce. Závěr teoretické části je věnován patentové literatuře Velké Británie a jejím ukázkám patentů.

V praktické části bylo ukázáno nastavení softwarem SolidWorks Flow Simulation použité pro výpočet zadaného průtažného rotoru. Pro výpočet byl použit jeden referenční rotor, od kterého se dále odvíjely další rotory, tím, že se měnila hloubka lopatky. Pro vybranou skupinu rotorů se měnila i rychlost proudění větru. Výpočtem byla sledována velikost krouticího momentu, který má přímou souvislost s účinností průtažného rotoru. Celkově bylo prověřeno 16 rotorů, které byly počítány pro základní rychlost proudění větru 5 m/s při pootočení po 10° od referenční polohy v rozmezí 0° - 110°. Z 16ti vypočtených rotorů byly určeny tři nejvhodnější rotory plus referenční rotor, které byly vyznačeny v tabulce číslo 9 žlutou barvou pozadí. Tyto rotory byly vyhodnoceny na základě průměrného krouticího momentu od referenční polohy v rozmezí 0° - 110°, tedy jednoho cyklu jedné lopatky, jako nejvhodnější. Zbývající rotory dosahovaly menších krouticích momentů. Pokud byla lopatka prohloubena na 290 mm a více, tak docházelo v některých místech natočení rotoru k poklesu krouticího momentu k nule nebo až k záporným hodnotám. U těchto rotorů dochází až k příliš velkému periodickému zatěžování a odlehčování lopatek. Ve výsledku se může stát, že při provozu by se rotor neroztočil nebo by měl tendenci točit se na opačnou stranu. Případně místo rotace, by se rozkýval kolem polohy vykazující nulový krouticí moment. Pro zpřesnění výpočtů byly vybrány tři rotory a jeden referenční rotor s následným označením: 110-100, 110-120, 110-140 a 110-160, viz tabulka 10. Tyto rotory byly počítány pro pootočení vzhledem k referenční poloze po 5° při rychlostech větru 5, 7, 10 a 12 m/s od polohy 0° do 115°.

Z výpočtů vyplynulo, že závislost krouticího momentu se mění v závislosti na hloubce lopatky. Tyto výsledky potvrdily vzrůstající krouticí moment při prohlubování lopatky rotoru. Rotory vykazovaly následující krouticí momenty. Rotory při rychlosti 5m/s: 110-100 = 0,562 [N*m], 110-120 = 0,609 [N*m], 110-140 = 0,650 [N*m], 110-160 = 0,683 [N*m], což znamená v procentuálním vyjádření vzhledem k referenčnímu rotoru 110-100 = 100 %, rotor 110-120 = 8 %, rotor 110-140 = 16 %, rotor 110-160 = 22 %. Další vý-

sledky průměrných momentů při rychlostech $v = 7, 10, 12$ m/s, jsou uvedeny v tabulkách 11, 12 a 13. Přičemž vykazují obdobný trend nárůstu krouticího momentu.

Dále z výpočtů vyplynulo, že krouticí moment narůstá s rychlostí větru. Hodnoty vypočítané softwarem Flow Simulation byly porovnány s teoretickými výpočty dle rovnice (5) a zpracovány do tabulek 14 a 15. Při porovnání tabulek byly zjištěny minimální odchylky mezi výsledky počítačové simulace a výpočty podle rovnice (5), viz tabulka 16. Největší odchylka se vyskytla u rotorů při rychlosti 12 m/s, a představuje odchylku 0,59 [N*m], viz tabulka 16. Při porovnání mezi tabulkami lze konstatovat, že výsledky odpovídají teoretickým poznatkům z rovnice (5), tedy když je zvýšena rychlost z 5 m/s na 10 m/s, krouticí moment musí vzrůst čtyřikrát. U referenčního rotoru byly vypočtené průměry softwarem SolidWorks při rychlostech 5 m/s = 0,562 [N*m], 7 m/s = 1,106 [N*m], 10 m/s = 2,277 [N*m] a 12 m/s = 3,296 [N*m]. Ostatní výsledky vybraných tří rotorů nalezneme v tabulce 14.

Na všech charakteristikách v průběhu krouticího momentu je vidět prudká změna v oblasti mezi úhlem natočení $50^\circ - 70^\circ$, viz obrázky 43, 48, 53, 58. Na obrázcích 80 - 131 lze vidět tlaky kolem lopatek a trajektorie proudění větru okolo rotoru. Pravděpodobná příčina této prudké změny je, že lopatka, která nabírá vzduch, je náhle zastíněna lopatkou, která přechází do záběru. Pro další zkoumání tohoto jevu by bylo vhodné provést výpočty krouticího momentu pro jednotlivé lopatky zvlášť.

Pro ověření simulačních výsledků počítačové simulace by bylo vhodné zhotovit rotor a ověřit provozem v praxi nebo otestováním v aerodynamickém tunelu. Další možností ověření výpočtů je použít konkurenční software.

Jako nejvhodnějším rotorem se jeví rotor 110-140, tedy s prohloubením lopatky ze 100 mm na 140 mm. Důvodem tohoto výběru je menší periodické zatížení, než u rotoru 110-160 a dosažení vyššího krouticího momentu, než u rotoru 110-120.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Meteocentrum.cz [online]. 2007-2010 [cit. 2010-12-06]. Encyklopedie meteorologie a klimatologie. Dostupné z WWW: <<http://www.meteocentrum.cz/encyklopedie/vitr.php>>.
- [2] MG Plast WindEnergy Technology [online]. 12/2002 [cit. 2010-12-06]. Vznik větru. Dostupné z WWW: <http://home.tiscali.cz/cz438514/vznik_vetru.htm>.
- [3] Transformační technologie [online]. c2006-2010 [cit. 2010-12-06]. Zdroje a přeměna energie. Dostupné z WWW: <<http://oei.fme.vutbr.cz/jskorpik/vyuziti-energie-vetru.html>>.
- [4] Meteorologie [online]. 2006 [cit. 2010-12-06]. Směr a rychlost větru. Dostupné z WWW: <<http://artemis.osu.cz/Gemet/meteo2/směra.htm>>.
- [5] Wikipedia.infostar.cz [online]. 2008 [cit. 2010-12-06]. Rychlost větru. Dostupné z WWW: <http://wikipedia.infostar.cz/w/wi/wind_speed.html>.
- [6] CSVE [online]. 2006 [cit. 2010-12-06]. Všeobecná cirkulace atmosféry. Dostupné z WWW: <<http://csve.sweb.cz/odkazy/Info/Met/cirk.gif>>.
- [7] ConVERTER [online]. c2002 [cit. 2010-12-07]. Beaufortova stupnice. Dostupné z WWW: <<http://www.converter.cz/tabulky/beaufortova-stupnice.htm>>.
- [8] INTERFLAG [online]. c2010 [cit. 2010-12-07]. Beaufortova stupnice síly větru. Dostupné z WWW: <http://www.vlajky.cz/informace/informace_beaufortova_stupnice.php>.
- [9] JerryCB [online]. 5.11.2005 [cit. 2010-12-07]. Elektronicko - mechanický anemometr. Dostupné z WWW: <<http://www.jerrycb.wz.cz/schemata/sche17.htm>>.
- [10] NOVIS.r.o [online]. 5.11.2005 [cit. 2010-12-07]. Vítr. Dostupné z WWW: <http://www.novi.cz/04_cz.htm>.
- [11] *Nazeleno.cz* [online]. 2008 [cit. 2011-01-18]. Větrná energie a její využití v České republice. Dostupné z WWW: <<http://www.nazeleno.cz/energie/vetrna-energie/vetrna-energie-a-jeji-vyuziti-v-ceske-republice.aspx>>.
- [12] *Frigomont* [online]. 2010 [cit. 2011-01-18]. Mapy větrových oblastí v ČR. Dostupné z WWW: <<http://www.frigomont.cz/skladane-plaste/vetrove-oblasti.html>>.
- [13] KLENOVČANOVÁ, A. a I. IMRIŠ. 2006, *Zdroje a prameny energie*. Prešov: M Con, 492 s. ISBN 80-89040-29-2.

- [14] *Větrné elektrárny* [online]. 2009 [cit. 2011-01-18]. Vše o větrných elektrárnách. Dostupné z WWW: <<http://www.vetrne-elektrarny.com/>>.
- [15] *Česká společnost pro větrnou energii* [online]. 2010 [cit. 2011-01-18]. Vzdělávání. Dostupné z WWW: <<http://www.csve.cz/clanky/z-historie-vyuzivani-energie-vetru-v-ceskych-zemich/36>>.
- [16] *Wikipedie* [online]. 2010 [cit. 2011-01-18]. Větrná energie. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/V%C4%Btrn%C3%A1_energie>.
- [17] MOTLÍK, J. a kol. 2007, *Obnovitelné zdroje energie a možnosti jejich uplatnění v České republice*. Praha: ČEZ, 181 s. ISBN 978-80-239-8823-9.
- [18] *Vodni-vetrne-elektrarny.cz* [online]. 2009 [cit. 2011-01-19]. Informace o vodních a větrných elektrárnách. Dostupné z WWW: <<http://www.vodni-vetrne-elektrarny.cz/cz/blog/princip-fungovani-vetrne-elektrarny-5>>.
- [19] *WODAGREEN.COM* [online]. 2007 [cit. 2011-01-20]. Princip a vybavení , postup a obecná data. Dostupné z WWW: <<http://www.wodagreen.com/jaknato/wind/wdsvitr.htm>>.
- [20] *Ekoblog.cz* [online]. 2007-2009 [cit. 2011-01-20]. Větrné mapy a větrné elektrárny v České republice. Dostupné z WWW: <<http://www.ekoblog.cz/?q=node/242>>.
- [21] *Savoniůvrotor : Návod na stavbu*. Ostrava-plesná : Hel, 2005. 77 s. ISBN 80-86167-26-7.
- [22] *Ekodum* [online]. 2007 [cit. 2011-01-21]. Rotory s vertikální osou. Dostupné z WWW: <<http://www.ekodum.cz/energy/wind/vertikal.php>>.
- [23] SolidWorks: Produkty. [online]. [cit. 2012-04-02]. Dostupné z: WWW: <<http://www.solidworks.cz/produkty/software-pro-3d-navrh/solidworks-pro-studenty/>>
- [24] SolidWorks: Produkty. [online]. [cit. 2012-04-02]. Dostupné z: <http://www.solidworks.cz/produkty/software-simulation/solidworks-flow-simulation/>
- [25] Technicalparameter – Součást programu SolidWorksFlowSimulation 2011
- [26] *Jak bydlet.cz* [online]. 2009 [cit. 2012-05-11]. Průtažný rotor, Darrierův rotor, Savoniův rotor a malé větrné elektrárny. Dostupné z: WWW: http://www.jakbydlet.cz/clanek/481_prutazny-rotor-darrieruv-rotor-savoniuv-rotor-a-male-vetrne-elelkrarny.aspx

- [27] Vynálezpaten.cz: Patentové informace. Vynálezpatent.cz [online]. 2012 [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: <http://www.vynalez-patent.cz/co-je-to-patent>
- [28] Escapenet: Patent search. Bibliographic data [online]. 2009, 14.3.2012 [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: <http://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio>
- [29] Escapenet: Patent search. *Bibliographic data* [online]. 2009, 14.3.2012 [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: http://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?DB=EPODOC&II=1&ND=3&adjacent=true&locale=en_EP&FT=D&date=20091210&CC=WO&NR=2009146541A1&KC=A1
- [30] Escapenet: Patent search. *Bibliographic data* [online]. 2010 [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: http://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?DB=EPODOC&II=5&ND=3&adjacent=true&locale=cz_CZ&FT=D&date=20111201&CC=WO&NR=2011148133A2&KC=A2
- [31] Escapenet: Patent search. *Bibliographic data* [online]. 2009 [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: http://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?DB=EPODOC&II=11&ND=3&adjacent=true&locale=cz_CZ&FT=D&date=20101229&CC=GB&NR=2471272A&KC=A

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Ek	[J]	Kinetická energie.
m	[kg]	Hmotnost.
v	[m/s]	Rychlost větru.
P	[W]	Výkon.
t	[s]	Čas.
ρ	[kg.m ⁻³]	Hustota vzduchu.
V	[m ³ .s ⁻¹]	Objemový průtok vzduchu.
Mk	[N*m]	Krouticí moment.
v _{ref}	[m/s]	Rychlost proudění větru referenčního rotoru.
Mk _{ref}	[N*m]	Krouticí moment referenčního rotoru.
S	[m ²]	Plocha.
α	[°]	Stupeň pootočení rotoru.
Mk	[N*m]	Krouticí moment.
kWh		Kilowathodin.
MWh		Megawatthodina.
A		Ekvivalent citlivosti ucha.
VN		Vysoké napětí.
VVN		Velmi vysoké napětí.
CHKO		Chráněná krajinná oblast.
st		Stupně.
p. n. l		Před našim letopočtem.
m. n. m		Metrů nad mořem.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Větrná mapa Země ve výšce 10 m nad povrchem. Údaje jsou v m/s. [3]	12
Obrázek 2: Všeobecná cirkulace vzduchu. [6]	13
Obrázek 3: Elektrický Anemometr. [10].....	16
Obrázek 4: Větrná mapa České republiky. [12].....	18
Obrázek 5: Závislost výkonu větru proudícího plochou 1 m ² na jeho rychlosti. [13]	20
Obrázek 6: Horizontální elektrárna. [16].....	22
Obrázek 7: Vertikální elektrárna. [14].....	23
Obrázek 8: Schéma větrné elektrárny. [18].....	27
Obrázek 9: Výkonová charakteristika větrné elektrárny s výkonem 500 kWh. [19].....	28
Obrázek 10: Rozmístění větrných elektráren v ČR. [20]	29
Obrázek 11: Savoniův rotor. [22].....	31
Obrázek 12: Průřez Savoniovou turbínou. [22]	32
Obrázek 13: Otáčky rotoru a intenzita elektrického proudu z generátoru v závislosti na rychlosti větru. [21].....	33
Obrázek 14: Součinitel využití energie větru c_p a součinitel rychloběžnosti X u tří lopatkového průtažného rotoru s rozdílnými tvary lopatek. [21].....	34
Obrázek 15: Ukázka průtažného rotoru v praxi. [26].....	35
Obrázek 16: Darrieův rotor. [22]	36
Obrázek 17: Jacksonovo kolo. [22].....	37
Obrázek 18: Patent od Fletcher John Kennedy. [28]	39
Obrázek 19: Patent od ST-GERMAIN ANDRE.[29]	40
Obrázek 20: Rotor Manninga Howarda Johna. [30]	41
Obrázek 21: Rotor od Manninga Howarda Johna. [31]	42
Obrázek 22: Náčrt skici referenčního rotoru.	47
Obrázek 23: Vysunutá lopatka ref. rotoru.	47
Obrázek 24: Referenční rotor.....	48
Obrázek 25: Orientace ve skici a bodech.	49
Obrázek 26: Nový projekt Wizard.	50
Obrázek 27: Jednotková soustava.	50
Obrázek 28: Typ analýzy.....	51
Obrázek 29: Volba proudící látky – Fluid.	51
Obrázek 30: Vnější podmínky.	52

Obrázek 31: Termodynamické podmínky.	52
Obrázek 32: Přesnost a zobrazení výsledku.	53
Obrázek 33: Oblast proudění.	54
Obrázek 34: Cíle výpočtů.	54
Obrázek 35: Konfigurační tabulka.	55
Obrázek 36: Vyplnění tabulky.	56
Obrázek 37: Kopírování nastavení do projektu.	56
Obrázek 38: Výsledky - Cut plots.	57
Obrázek 39: Výsledky - Flow Trajectories.	57
Obrázek 40: Výsledky - krouticí moment.	58
Obrázek 41: Tabulka působících sil a krouticího momentu.	58
Obrázek 42: Zobrazení krouticích momentů v závislosti na pootočení po 10° při proudění větru 5 m/s.	60
Obrázek 43: Zobrazení krouticích momentů v závislosti na pootočení po 5° při proudění větru 5 m/s.	62
Obrázek 44: Rotor 110-100-15st-v5.	63
Obrázek 45: Rotor 110-120-15st-v5.	63
Obrázek 46: Rotor 110-140-15st-v5.	63
Obrázek 47: Rotor 110-160-15st-v5.	63
Obrázek 48: Zobrazení krouticích momentů v závislosti na pootočení po 5° při proudění větru 7 m/s.	65
Obrázek 49: Rotor 110-100-15st-v7.	66
Obrázek 50: Rotor 110-120-15st-v7.	66
Obrázek 51: Rotor 110-140-15st-v7.	66
Obrázek 52: Rotor 110-160-15st-v7.	66
Obrázek 53: Zobrazení krouticích momentů v závislosti na pootočení po 5° při proudění větru 10 m/s.	68
Obrázek 54: Rotor 110-100-15st-v10.	69
Obrázek 55: Rotor 110-120-15st-v10.	69
Obrázek 56: Rotor 110-140-15st-v10.	69
Obrázek 57: Rotor 110-160-15st-v10.	69
Obrázek 58: Zobrazení krouticích momentů v závislosti na pootočení po 5° při proudění větru 12 m/s.	71
Obrázek 59: Rotor 110-100-15st-v12.	72

Obrázek 60: Rotor 110-120-15st-v12.....	72
Obrázek 61: Rotor 110-140-15st-v12.....	72
Obrázek 62: Rotor 110-160-15st-v12.....	72
Obrázek 63: Graf závislosti zprůměrovaných M_k na rychlosti.....	74
Obrázek 64: Rotor 110-100-15st-v5.....	75
Obrázek 65: Rotor 110-100-15st-v7.....	75
Obrázek 66: Rotor 110-100-15st-v10.....	75
Obrázek 67: Rotor 110-100-15st-v12.....	75
Obrázek 68: Rotor 110-120-15st-v5.....	76
Obrázek 69: Rotor 110-120-15st-v7.....	76
Obrázek 70: Rotor 110-120-15st-v10.....	76
Obrázek 71: Rotor 110-120-15st-v12.....	76
Obrázek 72: Rotor 110-140-15st-v5.....	77
Obrázek 73: Rotor 110-140-15st-v7.....	77
Obrázek 74: Rotor 110-140-15st-v10.....	77
Obrázek 75: Rotor 110-140-15st-v12.....	77
Obrázek 76: Rotor 110-160-15st-v5.....	78
Obrázek 77: Rotor 110-160-15st-v7.....	78
Obrázek 78: Rotor 110-160-15st-v10.....	78
Obrázek 79: Rotor 110-160-15st-v12.....	78
Obrázek 80: Rotor 110-100-60st-v5.....	79
Obrázek 81: Rotor 110-100-65st-v5.....	79
Obrázek 82: Rotor 110-100-70st-v5.....	79
Obrázek 83: Rotor 110-120-55st-v5.....	80
Obrázek 84: Rotor 110-120-60st-v5.....	80
Obrázek 85: Rotor 110-120-65st-v5.....	80
Obrázek 86: Rotor 110-140-55st-v5.....	81
Obrázek 87: Rotor 110-140-60st-v5.....	81
Obrázek 88: Rotor 110-140-65st-v5.....	81
Obrázek 89: Rotor 110-160-50st-v5.....	82
Obrázek 90: Rotor 110-160-55st-v5.....	82
Obrázek 91: Rotor 110-160-60st-v5.....	82
Obrázek 92: Rotor 110-160-65st-v5.....	82
Obrázek 93: Rotor 110-100-60st-v7.....	83

Obrázek 94: Rotor 110-100-65st-v7.....	83
Obrázek 95: Rotor 110-100-70st-v7.....	83
Obrázek 96: Rotor 110-120-55st-v7.....	84
Obrázek 97: Rotor 110-120-60st-v7.....	84
Obrázek 98: Rotor 110-120-65st-v7.....	84
Obrázek 99: Rotor 110-140-55st-v7.....	85
Obrázek 100: Rotor 110-140-60st-v7.....	85
Obrázek 101: Rotor 110-140-65st-v7.....	85
Obrázek 102: Rotor 110-160-50st-v7.....	86
Obrázek 103: Rotor 110-160-55st-v7.....	86
Obrázek 104: Rotor 110-160-60st-v7.....	86
Obrázek 105: Rotor 110-160-65st-v7.....	86
Obrázek 106: Rotor 110-100-60st-v10.....	87
Obrázek 107: Rotor 110-100-65st-v10.....	87
Obrázek 108: Rotor 110-100-70st-v10.....	87
Obrázek 109: Rotor 110-120-55st-v10.....	88
Obrázek 110: Rotor 110-120-60st-v10.....	88
Obrázek 111: Rotor 110-120-65st-v10.....	88
Obrázek 112: Rotor 110-140-55st-v10.....	89
Obrázek 113: Rotor 110-140-60st-v10.....	89
Obrázek 114: Rotor 110-140-65st-v10.....	89
Obrázek 115: Rotor 110-160-50st-v10.....	90
Obrázek 116: Rotor 110-160-55st-v10.....	90
Obrázek 117: Rotor 110-160-60st-v10.....	90
Obrázek 118: Rotor 110-160-65st-v10.....	90
Obrázek 119: Rotor 110-100-60st-v12.....	91
Obrázek 120: Rotor 110-100-65st-v12.....	91
Obrázek 121: Rotor 110-100-70st-v12.....	91
Obrázek 122: Rotor 110-120-55st-v12.....	92
Obrázek 123: Rotor 110-120-60st-v12.....	92
Obrázek 124: Rotor 110-120-65st-v12.....	92
Obrázek 125: Rotor 110-140-55st-v12.....	93
Obrázek 126: Rotor 110-140-60st-v12.....	93
Obrázek 127: Rotor 110-140-65st-v12.....	93

Obrázek 128: Rotor 110-160-50st-v12.....	94
Obrázek 129: Rotor 110-160-55st-v12.....	94
Obrázek 130: Rotor 110-160-60st-v12.....	94
Obrázek 131: Rotor 110-160-65st-v12.....	94

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Beaufortova stupnice rychlosti větru na souši. [8]	15
Tabulka 2: Beaufortova stupnice rychlosti větru na hladině moře. [8].....	15
Tabulka 3: Výroba elektřiny v ČR z obnovitelných zdrojů. [11]	18
Tabulka 4: Přehled zdrojů hluku. [16].....	25
Tabulka 5: Patent 1. [28]	38
Tabulka 6: Patent 2. [29]	39
Tabulka 7: Patent 3. [30]	40
Tabulka 8: Patent 4. [31]	41
Tabulka 9: Vypočet krouticího momentu a průměr při proudění větru 5 m/s, pootočení po 10°.	60
Tabulka 10: Vypočet krouticího momentu a průměru při proudění větru 5 m/s.	61
Tabulka 11: Vypočet krouticího momentu a průměru při proudění větru 7 m/s.	64
Tabulka 12: Vypočet krouticího momentu a průměr při proudění větru 10 m/s.	67
Tabulka 13: Vypočet krouticího momentu a průměr při proudění větru 12 m/s.	70
Tabulka 14: Vypočtené zprůměrované hodnoty rotorů při rychlostech 5, 7, 10 a 12 m/s.	73
Tabulka 15: Hodnoty krouticího momentu vypočtené z rovnice (5) výkonu větru.....	73
Tabulka 16: Odchytky z výpočtu z Flow Simulation a teoretického výpočtu pomocí rovnice (5).....	73

SEZNAM PŘÍLOH

- P I:** DVD obsahující
- Bakalářskou práci (.pdf).
 - Tabulky a grafy výsledků (.xlsx).
 - Obrázky cyklického zatížení (.jpg).
 - Obrázky trajektories(.jpg).
 - Obrázky použity v praktické části (jpg).