



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

LETECKÝ ÚSTAV

INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

LÉTAJÍCÍ VĚTRNÁ ELEKTRÁRNA

AIRBORNE WIND ENERGY SYSTEM

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Can Killioglu

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Pavel Zikmund, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání diplomové práce

Ústav:	Letecký ústav
Student:	Bc. Can Killioglu
Studijní program:	Letecká a kosmická technika
Studijní obor:	Stavba letadel
Vedoucí práce:	Ing. Pavel Zikmund, Ph.D.
Akademický rok:	2022/23

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

Létající Větrná Elektrárna

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Diplomová práce se týká problematiky létajících větrných elektráren. Tato oblast využití obnovitelných zdrojů energie prochází v současné době intenzivním vývojem. Hlavní výhodou oproti klasickým větrným elektrárnám spočívá v možnosti dosažení vyšších výšek a tím i silnějšího větru. Diplomová práce bude zaměřena na návrh aerodynamického demonstrátoru rotorové elektrárny.

Cíle diplomové práce:

- Aerodynamická analýza rotoru v režimu autorotace.
- Konceptní návrh létající větrné elektrárny.
- Konstrukční návrh aerodynamického demonstrátoru.

Seznam doporučené literatury:

- CHERUBINI, A., et al. Airborne Wind Energy Systems: A review of the technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 51: 1461-1476.
- QUASCHNING, Volker. Understanding renewable energy systems. Routledge, 2016.
- CORKE, Thomas; NELSON, Robert. Wind energy design. CRC Press, 2018.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D.

ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.

děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá problematikou létajících větrných elektráren, což je inovativní oblast využití obnovitelných zdrojů energie. Hlavním přínosem těchto elektráren oproti klasickým větrným turbínám je jejich schopnost dosáhnout vyšších výšek a tím využít silnějších větrných podmínek. Důležitou součástí diplomové práce je aerodynamická analýza rotoru v režimu autorotace, která zkoumá chování vrtulového rotoru. Dále je proveden koncepční a konstrukční návrh vybraného typu létající větrné elektrárny.

Klíčová slova: Vítr, obnovitelné energie, mlýn, větrné turbíny, koncepční návrh

ABSTRACT

The master's thesis deals with the issue of flying wind turbines, which is an innovative area of renewable energy. The main advantage of these power plants over conventional wind turbines is their ability to reach higher altitudes and thus take advantage of stronger wind conditions. An important part of the thesis is the aerodynamic analysis of the rotor in autorotation mode, which investigates the behaviour of the propeller rotor. Furthermore, the conceptual and structural design of a selected type of flying wind turbine is carried out.

Key words: Wind, renewable, energy, mill, wind turbines, conceptual propose

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KILLIOGLU, Can. Létající větrná elektrárna [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-01-25]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/149157>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav. Vedoucí práce Pavel Zikmund.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Létající Větrná Elektrárna** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Jméno a příjmení

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji svému vedoucímu diplomové práce Ing. Pavlu Zikmundovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování závěrečné práce. Dále děkuji svým rodičům a přítelkyni za morální podporu.

OBSAH

ÚVOD	1
1 Historie využití větrné energie	2
1.1 Větrné mlýny	2
1.2 Větrné elektrárny	3
2 Charakteristiky větrné elektrárny	6
2.1 Odporová větrná turbína	7
2.2 Vrtulová větrná turbína	8
2.3 Větrná turbína s americkým kolem	9
2.4 Darrierův typ větrné turbíny	9
2.5 Savoniův typ větrné turbíny	10
2.6 Výkon větrné turbíny	11
3 Rešerše létajících větrných elektráren	14
3.1 Klasifikace létajících větrných elektráren.....	14
3.1.1 Ground-Gen Airborne Wind Energy Systems	15
3.2 Systémy létajících větrných elektráren s palubním generátorem neboli Fly-Gen AWES	27
3.2.1 Aircraft Fly-Gen Systems	27
3.2.2 Projekt Makani	28
3.2.3 Joby Energy	29
3.2.4 Altaeros	29
3.2.5 Sky Windpower	30
4 Koncepční návrh létající větrné elektrárny	32
4.1 Aerostat jako létající větrná elektrárna	32
5 Vliv výšky na rychlosti větru	35
6 Konstrukční návrh aerodynamického demonstrátoru	40
6.1 Aerodynamická analýza rotoru v režimu autorotace	40
6.1.1 Rozhodnutí o profilu:.....	42
6.1.2 Zkroucení listu	48
6.1.3 Zhodnocení.....	50
6.2 Úvaha o výkonu	50
6.3 Návrh listu	52
6.4 Hmotnostní analýza.....	54
6.5 Volba Generátoru a Převodovky	57

6.6	Volba Lana	59
6.7	Volba Kabelu	59
ZÁVĚR.....		60
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....		61
SEZNAM OBRÁZKŮ.....		65
SEZNAM TABULEK.....		67
SEZNAM GRAFŮ		68
SEZNAM ROVNIC		69

ÚVOD

V oblasti obnovitelných zdrojů energie je důležité neustále vymyslet nové nápady, které by přispěly k efektivnějšímu využívání a maximalizaci energetického výkonu. Létaající větrné elektrárny představují inovativní koncept využívání větrné energie, který prochází intenzivním vývojem v oblasti obnovitelných zdrojů energie. Hlavní výhoda těchto zařízení spočívá v jejich schopnosti dosáhnout vyšších výšek, kde je vítr silnější a stabilnější. Tímto způsobem létaající větrné elektrárny poskytují možnost dosáhnout vyššího výkonu ve srovnání s klasickými větrnými elektrárnami na pevné zemi.

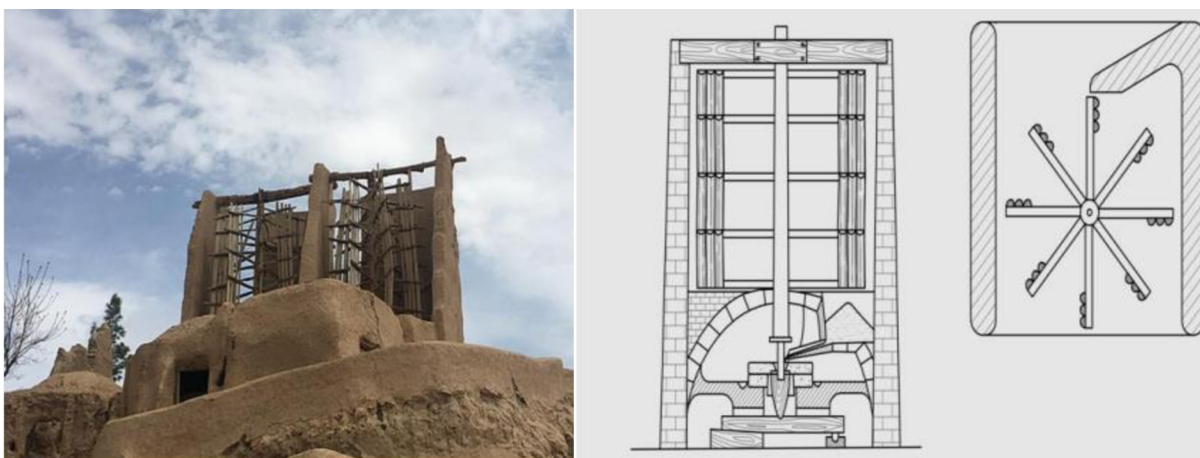
Cílem této diplomové práce bylo provést aerodynamickou analýzu rotoru létaající větrné elektrárny v režimu autorotace a navrhnout koncept takového zařízení. Je třeba také podotknout princip činnosti rotoru v režimu autorotace. Dále tato diplomová práce provádí rozbor o potenciálu létajících větrných elektráren.

1 Historie využití větrné energie

Vítr je v podstatě proudění vzduchu horizontálním směrem, které je způsobeno tlakovými diferencemi mezi jeho různě zahřátými oblastmi. Potenciál využívání větru, jako zdroje energie, si lidé uvědomovali již před několika tisíci lety. [1]

1.1 Větrné mlýny

První větrné mlýny byly používány v 7. století ve východní Persii (viz Obrázek 1) a později se ve 13. století rozšířily do Evropy. Středověké větrné mlýny fungovaly na principu přeměny energie větru v práci mechanickou, a to pomocí tlaku větru působícího na plochu lopatek. (viz Obrázek 2)



Obrázek 1: první větrný mlýn tzv. Panemone v Sístánu (vlevo)

Obrázek 2: schéma větrného mlýnu Panemone (vpravo)

Větrné mlýny tehdy ještě nevyráběly žádnou elektrickou energii, ale prováděly jiné úkoly. Větrné mlýny zejména sloužily ke mletí mouky a k pumpování vody. V Česku známe dva typy větrného mlýnu a to sloupový (tzv. německý) mlýn (viz Obrázek 3) a holandský mlýn (viz Obrázek 4). Většinou se používá typ mlýnu holandského, protože typ německého je historicky starší. [3] Na českém území byl podle druhého pokračovatele Kosmovy kroniky první větrný mlýn postaven v roce 1277 na zahradě Strahovského kláštera v Praze. V současné době v České republice zůstalo 56 větrných mlýnů ve funkčním stavu. [4]



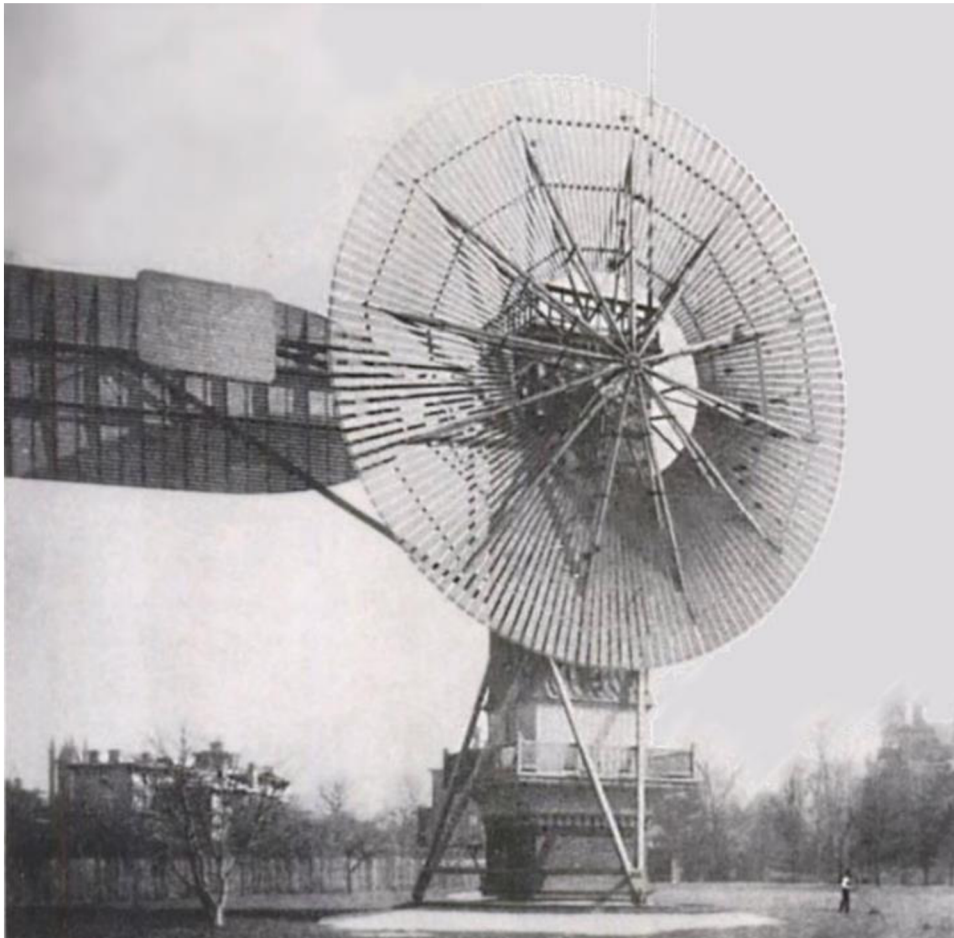
Obrázek 3: sloupový mlýn Starý Poddvorov (vlevo)

Obrázek 4: holandský mlýn Světlík v obci Horní Podluží (vpravo)

Větrné mlýny byly důležitým vynálezem, protože postupem času docházelo k jejich vývoji, a tedy i k souvisejícímu nástupu zařízení, které umožnilo výrobu elektrické energie. Takovému zařízení se říká větrná turbína.

1.2 Větrné elektrárny

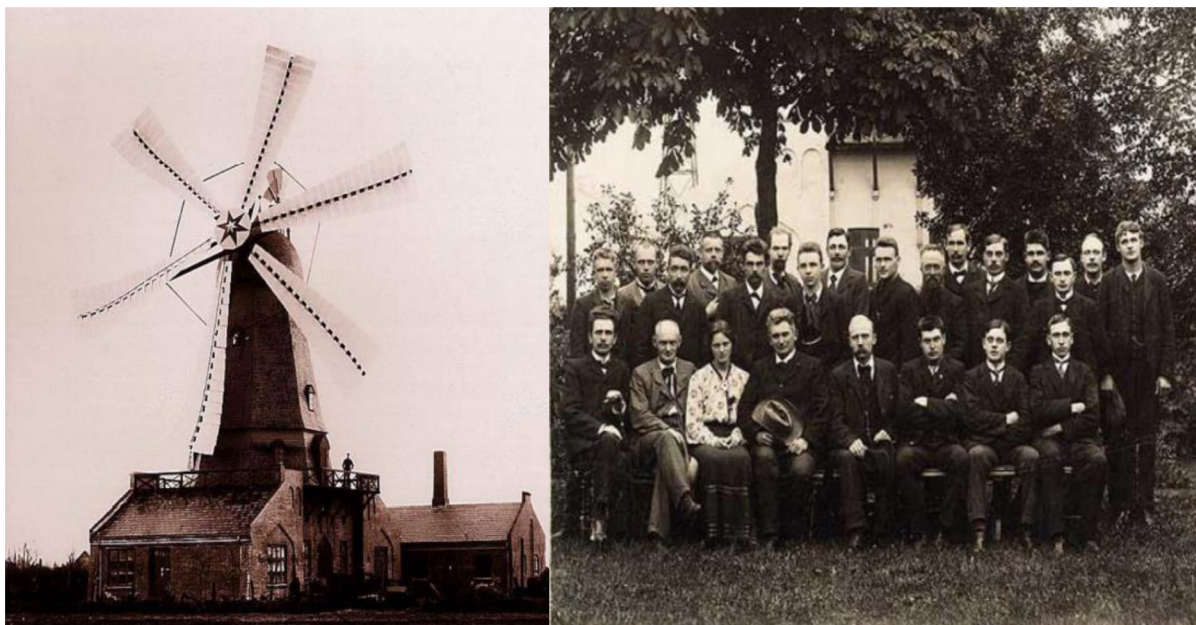
Větrná elektrárna nebo větrná turbína je zařízení, které přeměňuje kinetickou energii větru v energii elektrickou. Díky větrným turbínám větrná energie umožňuje výrobu elektřiny ekologickým způsobem. Vynálezcem první větrné elektrárny na světě byl americký inženýr Charles Francis Brush v letech 1887 až 1888. Právě on sestrojil první automatickou větrnou turbínu, kterou napojil na generátor elektrického proudu (viz Obrázek 5). Postavil tuto elektrárnu vedle svého obydlí v Clevelandu a používal ji ke generování elektřiny pro svůj dům. Rotor elektrárny o hmotnosti 4 tuny měl průměr cca 18,3 m a výkon generátoru byl 12 kW. [5]



Obrázek 5: první automatická větrná turbína v Clevelandu

O tři roky později dánský vědec Poul la Cour navrhl a postavil první větrnou elektrárnu v Evropě (viz Obrázek 6). Na rozdíl od Brushovy větrné elektrárny se jeho konstrukce podobala typickým větrným mlýnům a jeho turbína byla méně výkonnější než Brushova. To proto, že se nezabýval výhradně výkonem ale i aerodynamikou, a dokonce i vybudoval větrný tunel. Poul la Cour v roce 1903 založil asociaci elektrotechniků pro větrnou energetiku. Vědci měli obrovský zájem a v roce 1904 se stalo 356 lidí členem této asociace. [6]

Ve stejném roce začal vyučovat elektrikáře využívání větru jako zdroje elektrické energie (viz Obrázek 7), vydal první časopis o větrné energetice v Dánsku v Askově a v roce 1908 zemřel. Sice byla jeho práce kritizována kvůli tomu, že je do určité míry shodná s klasickým holandským větrným mlýnem, avšak rozdíl byl v tom, že on konstruoval větrný motor pro mlýn. Kvůli té podobnosti pak bohužel dánská vláda snížila svou finanční podporu, nicméně je považován za vizionáře. [6] Evropská asociace pro větrnou energii dává Poulou cenu za zásadní vědecký výzkum nebo technické objevy v oblasti větrné energie. [7]



Obrázek 6: první větrná elektrárna v Evropě (vlevo)

Obrázek 7: Poul la Cour se studenty (vpravo)

Výkon elektrárny je naprosto závislý na povětrnostních podmínkách, a proto se větrné elektrárny nejčastěji nachází na vysokých kopcích. Na území ČR je v dnešní době celkem 202 větrných elektráren. [8]

Větrné elektrárny v Česku mají výkon od 85 kW až po 2050 kW podle velikosti vrtule. Výkon záleží samozřejmě také na síle větru, která je zobrazena na takzvané větrné mapě. V určitých lokalitách vítr fouká až 2000 hodin za rok rychlostí 7 m/s, což je dostatečná rychlost pro roztočení velké vrtule. [8]

Vezměme si např. 2050 kW turbínu u Věžnice, která na tomto místě za rok vyrobí $2050 \times 2000 = 4\,100\,000$ kWh. Pokud si vezmeme jednu domácnost, která má v průměru spotřebu elektrické energie 4500 kWh/rok, tak jedna taková vrtule by dokázala elektřinou zásobit přes 911 domácnosti po celý rok. Pro město (např. Jihlava) se 55 000 obyvatel by stačilo 60 takových turbín.

2 Charakteristiky větrné elektrárny

Protože je provoz větrných elektráren ekologický a téměř bezplatný, stávají se stále více populární a jejich počty neustále rostou. Funkce větrné elektrárny je vlastně ta samá, jako jakákoliv jiná přeměna mechanické energie na energii elektrickou. V tomto případě je to díky asynchronnímu generátoru.

Podstata spočívá v tom, že velké cívky otáčí magnet uvnitř generátoru. Podle velikosti výkonu se větrné elektrárny rozdělí na 4 kategorie:

- Mikroelektrárny – mají výkon až do 1 kW, na rozdíl od komerčních větrných elektráren jsou rozměrově menší a jsou většinou určeny pro dobíjení baterie.
- Malé elektrárny – mají výkon až do 15 kW, jsou určeny pro účely vytápění, ohřev vody a případně pohon motoru. [9]
- Středně velké elektrárny – mají výkon 60 kW až 750 kW, různé uplatnění v praxi, zejména v námořnictví.
- Velké elektrárny – mají výkon 750 kW až 6400 kW, dodávají energie do veřejné rozvodné sítě. V Česku je celkem 160 velkých větrných elektráren.

V roce 2014 se u Zlaté Olešnice postavila větrná elektrárna, která má výkon 3 MW, což je zatím největší výkonná větrná elektrárna v Česku. [10] [11]

Následující charakteristiky jsou důležité pro výkon větrných elektráren:

1. Průměr rotoru: Průměr rotoru je velikost větrné turbíny, která určuje, kolik energie může být z větru zachyceno. Čím větší je průměr rotoru, tím větší je výkon elektrárny.
2. Výška větrné turbíny: Výška větrné turbíny určuje, jak vysoko je rotor nad zemí, kde vítr obvykle fouká silněji a konzistentněji. Vyšší větrné turbíny mají větší výkon.
3. Rychlost větru: Rychlost větru je klíčovým faktorem pro výkon větrné elektrárny. Většina větrných elektráren má minimální rychlost větru pro spuštění a maximální rychlost větru, při které musí se turbína vypnout, aby se zabránilo poškození.
4. Účinnost generátoru: Účinnost generátoru určuje, jak moc efektivně je energie větru přeměňována na elektřinu. Vyšší účinnost generátoru pochopitelně znamená větší výkon elektrárny.
5. Systém řízení: Systém řízení je též důležitým faktorem pro bezpečný a spolehlivý provoz větrné elektrárny. Systémy řízení mohou zahrnovat sledování výkonu, řízení rychlosti rotoru a servomechanismy, které řídí listy rotoru podle směru větru a případně mění úhel sklonu listů.

Existuje několik typů větrných elektráren, jako např. Darrierův typ, Savoniův typ, apod. Rozlišujeme-li jejich turbíny podle principu aerodynamiky, tak v tom smyslu rozeznáme dvě základní turbíny a to:

- Vztlková turbína, která má speciálně tvarované lopatky jako křídla, které vytváří vztlak při protékání vzduchu
- a odporová turbína, která využívajíc aerodynamický odpor funguje na základě rozložení sil působících na lopatky.

Větrné turbíny lze také rozdělit podle typů větrného rotoru, toto bude postupně vysvětleno v následujících podkapitolách.

2.1 Odporová větrná turbína



Obrázek 8: vertikální Savoniova Turbína

Konstrukce lopatek má zpravidla konvexní tvar a funguje na odporovém principu. Vše se opírá o Newtonův třetí zákon – Akce a reakce. Jedná se o rozložení sil, které působením na vypouklou a vydutou plochu lopatek vytvářejí točivý pohyb. Odporová větrná turbína je historicky nejstarší typ. [12] Pro výrobu elektrické energie se už moc nehodí, protože má malou účinnost, pohybující se kolem 5 %. Turbína má však své výhody, které se využívají pro jiné účely.

Jednou z výhod odporových turbín je jejich jednoduchá konstrukce a údržba. Díky nepřítomnosti složitých mechanismů a řídicích systémů jsou tyto turbíny velmi spolehlivé a mají delší životnost než ty ostatní. Další výhodou je schopnost pracovat i při nízkých rychlostech větru.

V současné době se odporové větrné turbíny využívají převážně v malých aplikacích, například pro zásobování elektrickou energií osamělých domů a chat nebo pro pohon malých zařízení, jako jsou vodní pumpy nebo větrné mlýny pro zpracování zemědělských plodin.

U této turbíny v podstatě obvodová rychlost odpovídá rychlosti větru, což znamená, že obvodová rychlost nemůže být nikdy větší než rychlost větru. Tento jev se označuje pomocí součinitele, kterému říkáme součinitel rychloběžnosti. Označuje se písmenem λ a je to poměr obvodové rychlosti μ k rychlosti větru v , tj. $\lambda = \mu/v$. U této turbíny je součinitel rychloběžnosti roven 1, tzn. že otáčky turbíny jsou přímo úměrné rychlosti větru, proto se např. v praxi používá jako větroměr (tzv. anemometr) pro měření rychlosti větru.

2.2 Vrtulová větrná turbína



Obrázek 9: vrtulová větrná turbína

Vrtulová větrná turbína funguje díky aerodynamickému vztlaku. Každý list turbíny vlastně slouží jako samostatné křídlo, které když fouká vítr, tak roztáčí turbínu. Avšak na rozdíl od profilu křídla letadla je důležité si uvědomit, že lopatka nečelí větru pouze z jedné strany. Záleží na jejím tvaru, který je různý po celé délce a toho, jakým způsobem je nastavená vůči větru. Je jeden z nejpoužívanějšího typu všech větrných turbín (viz Obrázek 9) a jsou pro to určité důvody. Vrtulová turbína má největší účinnost a rychlost otáčení ze všech větrných turbín, je navíc hojně testovaná. Snadná údržba také patří k jejím výhodám. Účinnost turbíny se pohybuje na úrovni od 35 až 45 procent. Vzhledem k maximální teoreticky dosažené účinnosti takových strojů, tj. 59,3 %, je tento typ turbíny velmi účinný. Nevýhodou je, že součinitel rychloběžnosti se pohybuje v rozmezí hodnot 6 až 10, tzn. že se točí velmi rychle a tím pádem čelí veliké odstředivé síle, což namáhá celou konstrukci turbíny. Rychloběžnost závisí na počtu lopatek, čím je menší počet lopatek, tím je stroj rychloběžnější. V praxi se používají 2 až 4 lopatky. [13]

2.3 Větrná turbína s americkým kolem



Obrázek 10: ukázka větrné turbíny s americkým kolem

Tento typ také využívá vztlakovou sílu. Má řádově od 12 do 24 lopatek po obvodu (viz Obrázek 9). Obvodová rychlost lopatkového (amerického) kola, stejně jako v případě odporové větrné turbíny, v podstatě odpovídá rychlosti větru. Oproti vrtulovým turbínám mají poměrně rychlý rozběh. Součinitel rychloběžnosti je roven 1. Umí se roztáčet při malém větru, a proto se tento typ turbíny také používá pro čerpání vody. Účinnost turbíny se pohybuje kolem 20 %.

Celkově lze říci, že větrné turbíny s americkým kolem jsou poměrně zastaralou technologií v oblasti větrné energie, ale nicméně stále se využívají.

2.4 Darrierův typ větrné turbíny



Obrázek 11: Darrierova turbína

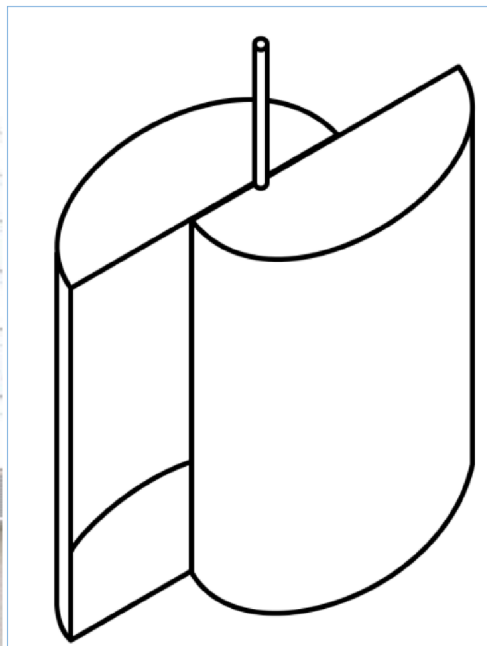
V roce 1931 francouzský inženýr Georges Jean Marie Darrieus sestrojil nový typ turbíny. Darrierova turbína má vertikální osu otáčení. Mívá dva nebo tři listy (viz Obrázek 11), které se skládají z aerodynamicky tvarovaných profilů. Má velikou rychloběžnost. Nevýhodou toho uspořádání je, že se turbína pomalu rozbíhá. Výhodou

je, že turbína v podstatě není podmíněna směrem větru a nemá vysoké nároky na údržbu. Součinitel rychloběžnosti je roven 7. Účinnost turbíny je až 35 %. Občas se používá tzv. varianta H Darrierovy turbíny, protože je konstrukčně jednodušší čili neklade vysoké nároky na výrobu. Listy této varianty jsou rovnoběžně s osou rotoru. V poslední době se Darrierův typ větrné turbíny stává trendem a čím dál víc běžnější volbou pro použití v domácích nebo malých větrných elektrárnách. I v České republice se lze s touto variantou větrných elektráren setkat. [14]

2.5 Savoniův typ větrné turbíny



Obrázek 12: Savoniova turbína (vlevo)



Obrázek 13: schéma turbíny (vpravo)

Vynálezcem toho typu turbíny je Sigurd Johannes Savonius a proto se nazývá Savoniova turbína. Savonius byl architekt, ale uplatnil svůj obor do oblasti návrhů rotoru (viz Obrázek 11). [10]

Savoniusova větrná turbína patří mezi osově vertikální otáčecí zařízení. Skládá se ze dvou půlměsíkových lopatek, které jsou umístěny proti sobě a jsou zakončeny dvěma zakřivenými konci. Lopatky jsou umístěny na vertikální ose a většinou jsou umístěny blízko sebe. Pohyb větru způsobuje rotaci lopatek, které jsou následně připojeny ke generátoru, který vyrábí elektrickou energii.

Turbína pracuje na aerodynamickém odporovém principu. Když vzduch prochází prvním pásem lopatek, dochází k vytvoření podtlaku na konvexní straně a k vytlačení vzduchu na konkávní straně. Tento proud vzduchu poté vstupuje do druhého pásu lopatek, který vytváří další podtlak a opět vytlačuje proud vzduchu. Výhodou je jednoduchost konstrukce (viz Obrázek 13). Velmi dobře se roztáčí. Nevýhodou je, že turbína není dostatečně účinná. Účinnost turbíny je až 20 %. Používá se pro zásobování menších staveb a čerpání vody.

2.6 Výkon větrné turbíny

Větrné elektrárny jsou závislé na síle a v některých případech i na směru větru, který může být proměnlivý. Pokud tedy fouká málo nebo vůbec, tak se energie neprodukuje. Stejně problémy se objevují i v době, kdy fouká až příliš. Vysoké rychlosti by totiž mohly zařízení poškodit, a proto se elektrárny během vysoké rychlosti větru vypínají [15]. Není to ku podivu, protože je známo, že existuje optimální rychlost větru a při překročení této optimální rychlosti je konstrukce namáhaná a dochází k ohybu a zkroucení listů. Taktéž odstředivé síly mohou v určitých situacích nadměrně namáhat konstrukci.

Pro zvýšení výkonu elektrárny je potřeba, aby se zvýšila rychlost větru. Jejich konstrukční řešení je však omezeno optimální rychlostí větru, a proto se začaly hledat jiné způsoby [15]. Při jejich hledání se ukázalo, že toto souvisí s rozměry točící se části turbíny.

Výkon se ve fyzice označuje jako práce vykonaná za jednotku času, a je příčinou změny energie.

U větrné turbíny se jedná o přeměnu kinetické energie. Tím pádem obecný vzorec výkonu větrné turbíny je následující:

Rovnice 1: výkon větrné turbíny

$$P = \frac{1}{2} \times \rho \times S \times V^3 \times c_p$$

ρ – hustota vzduchu (při stanovené výšce)

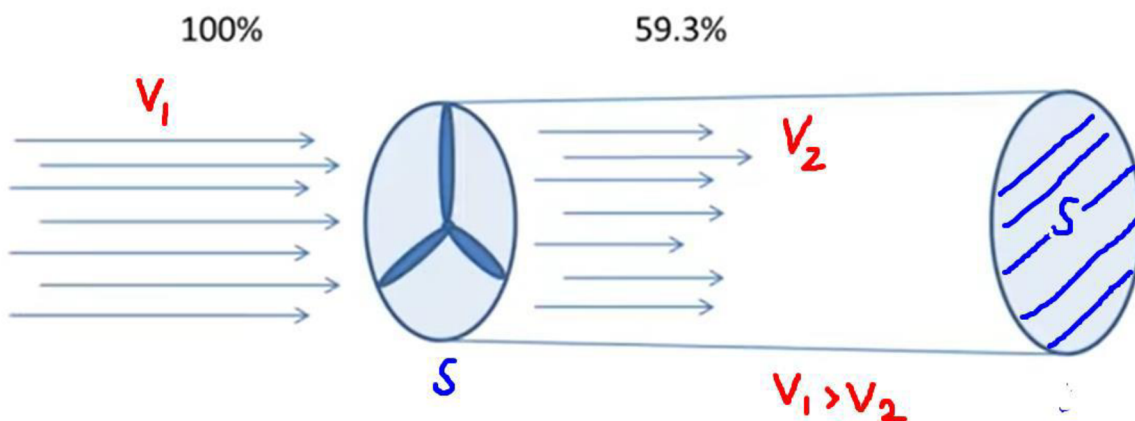
c_p – součinitel výkonnosti

S – plocha rotoru

P – výkon turbíny

V – rychlost proudění vzduchu

V roce 1919 německý fyzik Albert Betz přišel na pravidlo, které určuje maximální množství energie, kterou lze získat pomocí rotoru z větru za ideálních podmínek, a z toho určil součinitel výkonnosti c_p . Maximální dosažený součinitel výkonnosti neboli maximální dosažitelná účinnost rotoru v ideálním případě je rovna 0,593 tzn. že větrný rotor je schopen využívat maximálně jenom 59,3 % (viz Obr. 13) energie větru. [9]



Obrázek 14: proudění vzduchu přes rotor

Jak bylo dříve zmíněno ohledně definice výkonu, vše vychází z podstaty definice změny kinetické energie. Má to úzkou souvislost se zákonem o zachování energie a Bernoulliho principem. Tento princip se využívá tím, že při průchodu vzduchu lopatkami rotoru dochází k zpomalení proudu vzduchu a k následnému zvýšení jeho tlaku. Rozdíl mezi tlakem před rotorem a tlakem za ním pak vytváří sílu, která točí listy, resp. pohání rotor. Následující vzorce pro výpočet kinetické energie před a za rotorem:

Rovnice 2: kinetická energie před rotorem

$$E_1 = \frac{1}{2} \times m \times V_1^2$$

Rovnice 3: kinetická energie za rotorem

$$E_2 = \frac{1}{2} \times m \times V_2^2$$

Ke stanovení množství vzduchu protékajícího přes rotor je využito vztahu pro výpočet hmotnostního toku:

Rovnice 4: množství vzduchu protékajícího přes rotor

$$\dot{m} = \rho \times S \times V_{\text{průměr}} = \frac{\rho \times S \times (V_1 + V_2)}{2}$$

Přičemž celý vzorec bude vypadat následovně:

Rovnice 5: celý vzorec pro výpočet kinetické energie

$$\dot{E} = \frac{1}{2} \times \dot{m} \times (V_1^2 - V_2^2) = \frac{1}{4} \times \rho \times S \times (V_1 + V_2) \times (V_1^2 - V_2^2)$$

Po úpravě vychází:

Rovnice 6: upravený vzorec pro výpočet kinetické energie

$$\dot{E} = \frac{1}{4} \times \rho \times S \times V_1^3 \times \left(1 - \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^2 + \frac{V_2}{V_1} - \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^3 \right)$$

Albert Betz v dalším kroku derivoval tuto funkci podle $\frac{V_2}{V_1}$, protože derivace nám udává extrémy, tzn. že hledáme bod pro který platí, že se jeho derivace rovná nule. Derivací funkce je:

Rovnice 7: derivovaná funkce pro výpočet kinetické energie

$$\dot{E} = \left(1 - \frac{V_2}{V_1}\right) \times \left(1 - 3 \times \left(\frac{V_2}{V_1}\right)\right)$$

Obdržel teda dva extrémní body, tzn. že v bodě 1 funkce dosahuje jeho minima a v bodě $\frac{1}{3}$ funkce dosahuje jeho maxima.

Po dosažení maxima vychází:

Rovnice 8: derivovaná funkce pro výpočet kinetické energie v maximu

$$\dot{E} = \frac{1}{2} \times \rho \times S \times V_1^3 \times \frac{16}{27}$$

Z toho vyplývá, že teoreticky nejvyšší dosažená účinnost rotoru je $c_p = \frac{16}{27} = 0,593$ v ideálním (čistě teoretickém) případě. V praxi samozřejmě není možné dosahovat této hodnoty, protože ve skutečnosti existují ztráty. Horizontální větrné turbíny s vrtulí mají výkonnostní součinitel v rozmezí 0,35 až 0,45. [9]

Celkově lze říci, že výkon větrné turbíny závisí na několika faktorech a nejdůležitějším z nich je rychlost větru. Čím je rychlost větru vyšší, tím více energie může být v turbíně zachyceno a tím vyšší bude její výkon. Dalším faktorem je průměr rotoru, čím větší bude průměr rotoru, tím více vzduchu může být zachyceno a tím vyšší bude její výkon. Vliv tvaru lopatek, uchycení listů a celková konstrukce turbíny se zahrnuje do součinitele výkonu rotoru.

3 Rešerše létajících větrných elektráren

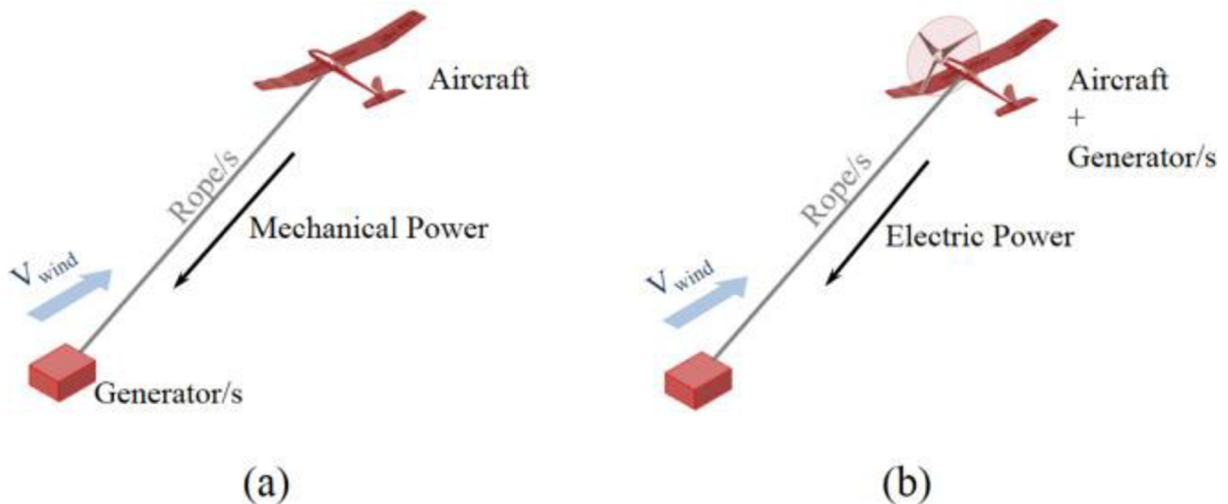
Mezi novými alternativními způsoby pro výrobu elektřiny z obnovitelných zdrojů se objevila nová řada zařízení pro přeměnu větrné energie pod názvem Airborne Wind Energy Systems (AWES), což lze volně překládat do češtiny jako energetické systémy využívající létající větrné elektrárny. Tato nová řada systémů využívá k zemi upoutaná létající zařízení, aby dosáhla větrů proudících ve vyšších nadmořských výškách. Toto koncepční řešení vzniklo při snaze využít silných větrů, které nejsou pro tradiční větrné turbíny dostupné. Klasické větrné turbíny jsou výškově omezeny, avšak ve vysokých nadmořských hladinách jsou povětrnostní podmínky pro vyrábění větrné energie příznivější. Létající větrné elektrárny, které mohou dosáhnout vyšších nadmořských hladin, tvoří mnohdy vhodnou alternativu tam, kde klasické větrné elektrárny nelze postavit.

Výzkum těchto leteckých systémů pro vyrábění alternativní elektrické energie z větru (AWES) začal v polovině sedmdesátých let a v posledním desetiletí se prudce posunul kupředu. Byla analyzována a testována řada systémů založených na radikálně odlišných koncepcích. Po celém světě bylo vyvinuto několik prototypů a rovněž jsou k dispozici výsledky z raných experimentů. Tato rešerše poskytuje přehled různých technologií, které byly navrženy pro využití energie z větru ve vysokých nadmořských výškách.

Klasifikace těchto systémů je navržena na základě jejich obecného uspořádání a konstrukce. Důraz je kladen na prototypy, které byly demonstrovány a testovány v reálných případech. Zohledněna jsou rovněž slibná řešení, která budou pravděpodobně realizována v blízké budoucnosti.

3.1 Klasifikace létajících větrných elektráren

Než dojde k rozřazení elektráren do kategorií, je třeba podotknout, že se v této rešerši termín AWES (Airborne Wind Energy Systems) používá pro označení celých elektromechanických strojů, které přeměňují kinetickou energii větru v energii elektrickou. AWES se obvykle skládá ze dvou hlavních systémů, a to z pozemní stanice a alespoň z jednoho létajícího stroje, který je mechanicky (v některých případech i elektricky) propojen lanem (ang. tethers). Dle umístění generátoru AWES lze rozdělit na systém Ground-Gen, u nichž přeměna mechanické energie na elektrickou probíhá na zemi, kde je na pozemním stanovišti umístěn generátor, a systém Fly-Gen, u nichž se tato přeměna provádí ve vzduchu, protože je generátor umístěn na létajícím stroji. [19].



Obrázek 15: schéma Airborne Wind Energy Systems (AWES), typ Ground-Gen vlevo a typ Fly-Gen vpravo [19]

V systému Ground-Gen AWES (tzv. GG-AWES) se elektrická energie vyrábí na zemi mechanickou prací vykonávanou tažnou silou, která se přenáší z letadla do pozemního stanoviště prostřednictvím jednoho nebo více lanových navijáku, jež vyvolávají pohyb elektrického generátoru. Dále je GG-AWES možné rozdělit na zařízení s pevnou pozemní stanicí, kde je pozemní stanice pevně uchycena k zemi, a zařízení s pohyblivou pozemní stanicí, kde má pozemní stanice podobu pohyblivého vozidla.

V systému Fly-Gen AWES (FG-AWES) se elektrická energie vyrábí na létajícím stroji a na zemi se přenáší pomocí speciálního lana, které nese elektrické kabely. Létající zařízení obvykle disponuje větrnou turbínou. FG-AWES vyrábí elektrickou energii nepřetržitě během provozu s výjimkou vzletových a přistávacích manévru, při nichž se energie zpravidla spotřebovává. Mezi FG-AWES lze nalézt stroje využívající boční vítr (crosswind) a stroje nevyužívající bočního větru (noncrosswind), u kterých je udržován určitý úhel náběhu a v podstatě orientace proti směru větru.

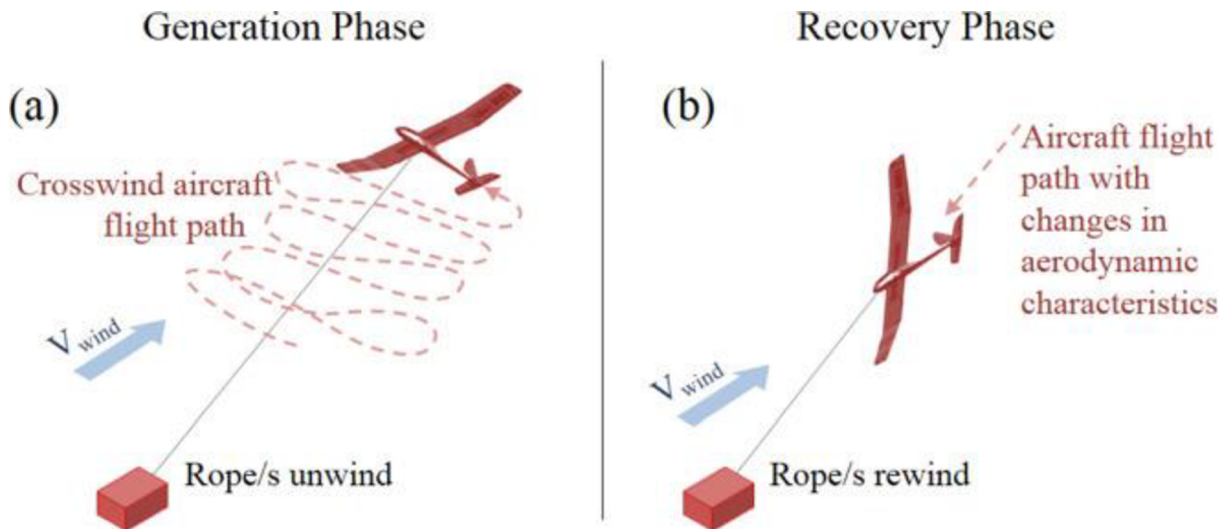
Důvodem pro různá rozdělení létajících větrných elektráren je jejich rozmanitost v konstrukci a technologii. Každý typ systému má své výhody a nevýhody a vhodný koncept může být odvislý od různých situací a potřeb.

3.1.1 Ground-Gen Airborne Wind Energy Systems

U pozemních generátorových systémů větrné energie (Ground-Generator Airborne Wind Energy Systems – GG-AWES) se elektrická energie vyrábí s využitím aerodynamických sil, které se přenášejí z letadla na zemi pomocí lan, jak již bylo dříve uvedeno. Nyní si projdeme, jakým způsobem k tomu dochází.

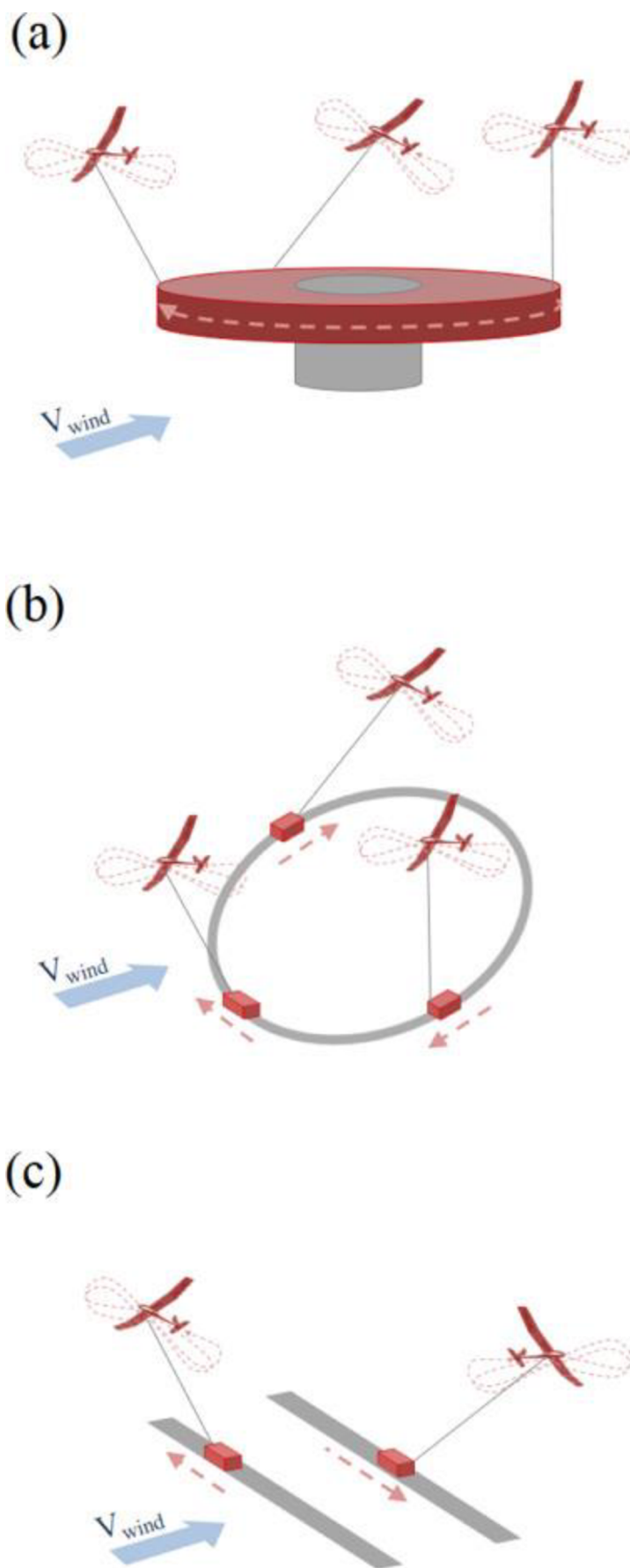
GG-AWES s pevným stanovištěm na zemi patří mezi nejpodrobněji zařízení zkoumaná soukromými společnostmi a akademickými vědci. Přeměny energie se dosahuje dvoufázovým cyklem. První režim letu se nazývá fáze generování, v níž se vyrábí elektrická energie a druhý režim letu se nazývá rekuperace, v němž se spotřebovává určité množství energie (viz Obrázek 16). Výroba spočívá v tom, že u těchto systémů jsou lana, na která působí tažné síly, navinuta na navijáky, které jsou zase připojeny k osám motorgenerátorů. Ve fázi generování je letadlo manévrováno tak, aby vytvářelo vztlakovou sílu a následně tažnou (odvíjecí) sílu na lana, která vyvolávají otáčení elektrických generátorů. Pro fázi generování je nejpoužívanějším způsobem letu let s bočním větrem (viz Obrázek 16, a) Ve srovnání s letem bez bočního větru (tam, kde je letadlo na statické úhlové poloze na obloze) vyvolává tento režim silnější dynamický

tlak na letadle, který zvyšuje tahovou sílu působící na lano. Ve druhé fázi (viz Obrázek 16, b) motory navíjejí lano a navracejí letadlo na zem. Aby byla bilance kladná, musí být čistá energie vyrobená ve fázi generování větší než energie vynaložená ve druhé fázi. To je zaručeno řídicím systémem, který pak upravuje aerodynamické vlastnosti letadla a/nebo řídí jeho dráhu letu tak, aby se maximalizovala energie vyrobená ve fázi generování a minimalizovala energie spotřebovaná ve druhé fázi [19].



Obrázek 16: schéma dvoufázové diskontinuální výroby energie GG-AWES – vlevo (a) fáze výroby, vpravo (b) fáze návratu se spotřebou energie [19]

Pohyblivé pozemní stanice GG-AWES jsou obecně složitější systémy. Existují různé koncepce pohyblivých pozemních stanic GG-AWES (viz Obrázek 17). Na rozdíl od generátoru u systémů s pevnými pozemními stanicemi zde navíjení a odvíjení lana nevytváří/nespotřebovává významnou energii, ale používá se pouze k řízení trajektorie letadla. Generování energie probíhá díky tahové síle lan, která vyvolává rotaci nebo lineární pohyb generátoru, který využívá spíše pozemní stanice k pohybu nežli mechanismus navíjení lana.



Obrázek 17: schéma různé koncepce pohyblivých pozemních stanic GG-AWES [19]

Na předchozím obrázku (viz Obrázek 17) jsou znázorněna schémata tří různých konceptů pohyblivé pozemní stanice GG-AWES, kde:

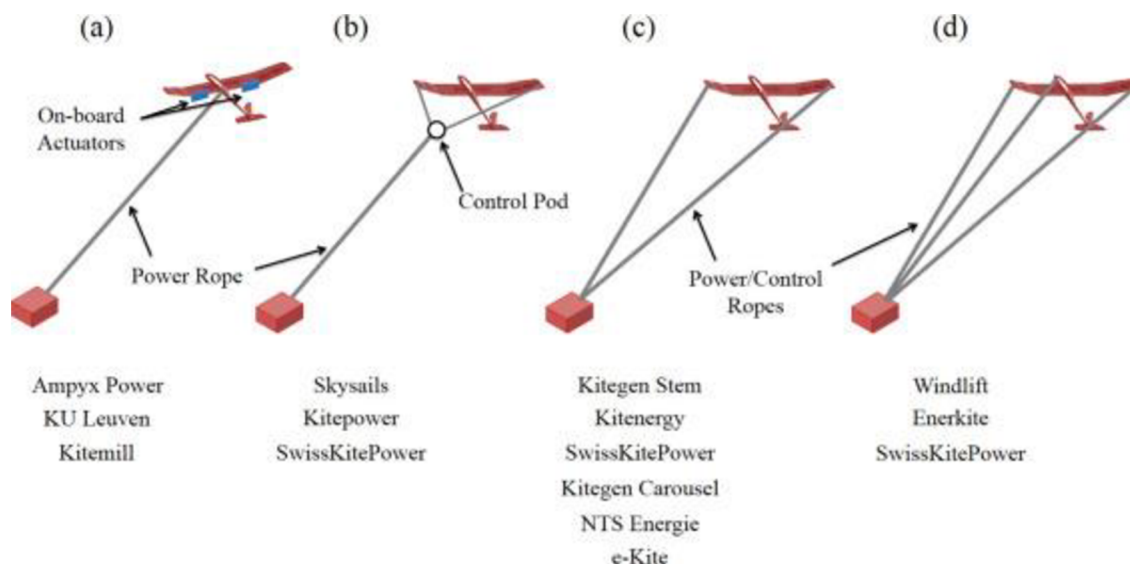
- Generátor svislé osy
- Kolejnice s uzavřenou smyčkou
- Kolejnice s otevřenou smyčkou

V zásadě však existují spíše dva druhy pohyblivých stanic GG-AWES:

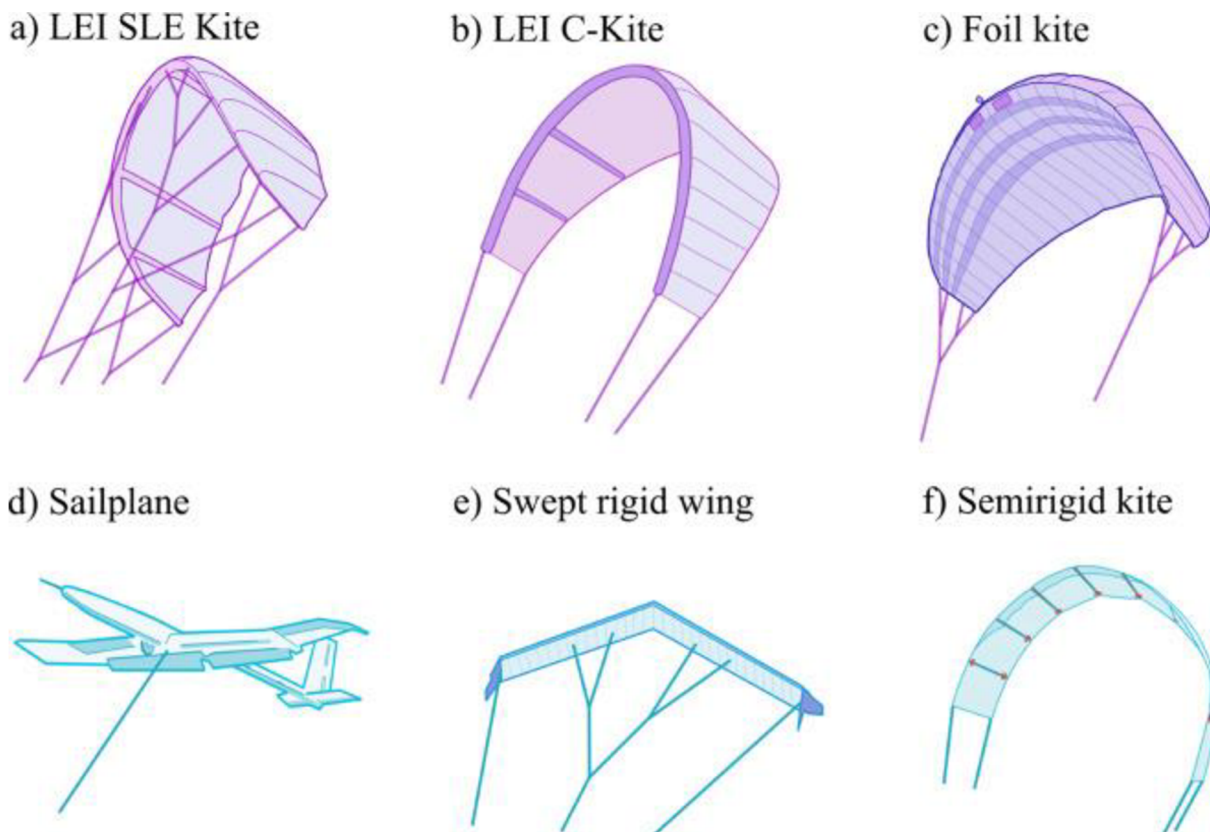
- generátor se svislou osou, kde jsou pozemní stanice upevněny na obvodu rotoru velkého elektrického generátoru se svislou osou. V tomto případě síly letadla nutí pozemní stanice otáčet se společně s rotorem, který následně přenáší točivý moment na generátor (a)
- kolejnicové generátory dle druhu pohybu kolem trasy rozeznáme kolejnice s uzavřenou smyčkou (b) nebo kolejnice s otevřenou smyčkou (c). Pozemní stanice jsou integrovány na vozidlech jezdíce po kolejnici a elektrická energie je generována tak, jak se pohybuje vozidlo.

3.1.1.1 Systémy řízení a koncepce Ground-Gen

U systémů Ground-Gen letadlo přenáší mechanickou práci na zem přeměnou aerodynamických sil větru díky tažné síle lan. Různé koncepce, které byly prototypem vyzkoušeny, jsou uvedeny na následujícím obrázku (viz Obrázek 18). Koncepce letadel systémů GG, které jsou v současné době ve vývoji, jsou uvedeny na obrázku dalším (viz Obrázek 19). Využívají aerodynamických vztlakových sil vytvářených větrem na jejich křídlech.



Obrázek 18: uspořádání řízení GG-AWES s bočním větrem (a) s palubními řídicími akčními členy (b) s létajícím řídicím modulem (c) řízení pomocí silových lan (d) s přidavným řídicím lanem [19]



Obrázek 19: různé typy letadel v systémech Ground-Gen (a) LEI SLE (Leading Edge Inflatable, Supported Leading Edge) Kite; (b) LEI C-kite; (c) Foil Kite, design od Skysails; (d) Glider, design od Ampyx Power; (e) Swept rigid wing, design od Enerkite; (f) Semi-rigid wing (poloztužená křídla), design od Kitegen.[19]

Letadlo je spojeno se zemí alespoň jedním silovým lanem, které přenáší vztlakovou sílu (a získaný výkon) do pozemní stanice. Trajektorii letu lze řídit pomocí palubních pohonů (viz Obrázek 18, a), nebo pomocí řídicího modulu (viz Obrázek 18, b), nebo regulací napětí stejných silových lan (viz Obrázek 18, c), nebo pomocí tenkých řídicích lan (viz Obrázek 18, d).

Za zmínku stojí dvě nové Ground-Gen koncepce. Jedna má padák nebo kluzákový padák, který je založen na aerodynamickém odporovém principu a druhá má rotační aerostat (letadlo je lehčí než vzduch), který využívá Magnusův efekt.

Nejvýznamnější koncepční typy letadel použité u systémů Ground-Gen jsou uvedeny níže:

- 1) Draky s nahušťovací náběžnou hranou (LEI – Leading Edge Inflatable) jsou typem letadel nafukovaných vzduchem nahusto na náběžné hraně. Využívají speciální tkaniny, které napomáhají tuhosti konstrukce při ohybu pod vlivem zatížení. Používají se dva druhy těchto draků u systému Ground-Gen a to:
 - a) Draky, jejich náběžná hrana je podepřena nejméně jedním speciálním vývazem (tzv. bridle anglicky), který se používá k zajištění správného rozložení sil způsobených vztlakem při vzletu, nebo při sestupu. Vývaz se obvykle skládá z několika lanek nebo táhel, které jsou připojeny k různým bodům nosného systému.
 - b) C-draky jsou dalším druhem větrného draku (neboli kite), který má charakteristický tvar připomínající písmeno C a je obecně ovládán čtyřmi hlavními otěžemi, přímo připevněnými ke krajním bodům hran draka. C-draky

jsou oblíbené zejména pro vodní sporty, jako jsou kitesurfing a kiteboarding, a v současné době se hledají uplatnění u systémů Ground-Gen.

- 2) Padákové kluzáky se vyznačují tím, že mají konstrukci sestávající z několika vrstev látky, které jsou napnuté na vnitřních vzpěrách. Využívají tzv. parafoil, což je textilní profil mající aerodynamickou buňkovou formu struktury. Většinou padákové kluzáky u systémů Ground-Gen mají dvě vrstvy, které jsou tvořeny buňkami vrchlíku. Buňky jsou na náběžné hraně otevřené tak, aby vzduch v průběhu letu nafouknul veškeré buňky a tím pádem dodal draku potřebnou tuhost.
- 3) Delta kite jsou typem draku, který má tvar připomínající řecké písmeno „delta“. Tento tvar umožňuje ohromný větrný rozsah. Delta kite má jednu vrstvu skládanou z textilního materiálu vyztuženého pevným rámem. Ve srovnání s draky LEI nebo padákovými kluzáky (Foil Kites) má tento druh draka lepší aerodynamiku a tím pádem má i vyšší účinnost získávání energie větru. Na druhou stranu musí jejich pevný rám odolávat mechanickému ohybovému namáhání, které v případě velkých aerodynamických sil vyžaduje použití silných a pevných nosníků, což má za následek jednak zvýšení hmotností letadla a jednak nákladů na výrobu.
- 4) Kluzáky či větroně lze také využít u systémů Ground-Gen. Některé plachťáky jsou navrženy tak, aby byly schopny být napojeny na GG-AWES pomocí lana, které vede ke generátoru. Stejně jako u delta draků jsou jejich křídla v průběhu upoutaného letu vystavena ohybovému momentu.
- 5) Plachťáky s pevnými křídly jsou letadla bez trupu a ocasních ploch. Stabilita je pravděpodobně dosažena díky systému vyvažovaček a úhlu šípu.
- 6) Tzv. polotuhá křídla zkoumá italská společnost Kitegen Research. Skládají se z několika krátkých tuhých modulů, které jsou k sobě navzájem přiklopeny. Jejich konstrukce je lehčí než tuhá křídla a vykazuje lepší aerodynamickou účinnost než textilní draky.
- 7) Speciální návrhy na draky: Kiteplanes [22] a Tensairity Kites [23] jsou projekty vyvinuté TU Delft (Vysoké Učení Technické v Nizozemsku) a EMPA (Výzkumné centrum pro synergetické konstrukce ve Švýcarsku), které se zaměřují na zvýšení aerodynamické účinnosti obloukových draků bez použití pevných nosníků.

Typ GG-AWES	Typ létajícího stroje	Společnost	Využitá síla
Pevné pozemní stanoviště	Draky s nafukovací náběžnou hranou	KiteGen Stem	Vztlak
		Windlift	Vztlak
		Kitenergy	Vztlak
		Swiss Kite Power 2	Vztlak
		KitePower	Vztlak
	Swiss Kite Power 1	Vztlak	
	Padákový Kluzák	Skysails Power	Vztlak

		EnerKite	Vztlak
	Delta Drak	EnerKite	Vztlak
	Šípové samokřídlo	Enerkite	Vztlak
	Kluzák	Ampyx	Vztlak
		e-Kite	Vztlak
		Kitemill	Vztlak
	Motorový kluzák	TwingTec	Vztlak
	Polovyztužené křídlo	KiteGen Stem	Vztlak
	Parašut	GuangdongTech	Odpor
	Aerostat	Altaeros	Vztlak
Pozemní stanice pohyblivé po koleji	Draky s nafukovací náběžnou hranou	KiteGen Rail Carousel	Vztlak
		Kitenergy	Vztlak
	Padákový Drak	NTS	Vztlak
Pozemní stanice pohyblivé axiálně	Draky s nafukovací náběžnou hranou	KiteGen Carousel	Vztlak

Tabulka 1: rozřazení Ground-Gen systémů létajících větrných elektráren

3.1.1.2 Společnosti vyvíjející systémy létajících větrných elektráren s pevnou pozemní stanicí

3.1.1.2.1 KiteGen Research

KiteGen Research (KGR) je italská společnost specializující se na vývoj a výrobu létajících draků. Jejimi zakladateli jsou Massimo Ippolito a Marco Lanfredi.

KiteGen Research získal několik ocenění za svou inovativní technologii, včetně ocenění European Patent Office Inventor Award v roce 2015. KiteGen Research provozuje vlastní testovací středisko v italské obci Serra Sant'Abbondio. Zde testuje své produkty za různých podmínek a vyhodnocuje jejich výkonnost. Společnost také spolupracuje s vysokými školami a výzkumnými institucemi na vývoji nových technologií a optimalizaci svých existujících produktů (viz Obrázek 20).



Obrázek 20: kite má céčkovitý tvar [19]

Technologie KGR je založena na draku typu C, na kterém je integrována palubní elektronika se senzorem a je řízen dvěma lany vedoucími k řídicí stanici na zemi. První prototyp, nazvaný KSU1 (zkratka pro Kite Steering Unit) [19], byl úspěšně předveden v roce 2006. Po několika letech testů se společnost zaměřila na vývoj nového generátoru s názvem "KiteGen Stem" o jmenovitém výkonu 3 MW [19]. Koncepte "Stem" byla poprvé patentována v roce 2008 a nyní je využívána jak společností, tak i vysokými školami.

3.1.1.2.2 KiteEnergy



Obrázek 21 Foil Kite od společnosti Kiteenergy

Další italská společnost, Kiteenergy, byla založena bývalým partnerem společnosti KiteGen a rovněž vyvíjí podobný koncept, ale tentokrát je to pro ovládání padákového draku (Foil Kite) pomocí dvou lan. Prototyp této společnosti disponuje jmenovitým výkonem 60 kW. Společnost Kiteenergy předložila také odlišný patent GG-AWES, který spočívá v systému založeném na jednom motorgenerátoru, který ovládá navíjení a odvíjení dvou (nebo více) lan, a dalším akčním členem, který zavádí diferenciální ovládání použitých lan. [19]

3.1.1.2.3 SkySails Power

V roce 2008 společnost představila svůj první prototyp létající větrné elektrárny, který se skládal z plošiny o rozměrech 120 m², připojené k lanu dlouhému 300 m. V roce 2011 byl dokončen první plně funkční systém létající větrné elektrárny s výkonem 100 kW. Tento systém byl umístěn na pobřeží Severního moře u města Bremerhaven.



Obrázek 22: SkySails nejnovější model SKS PN-14

V současné době jsou ve vývoji jsou dva produkty: mobilní AWES s výkonem od 250 kW do 1 MW a AWES na moři s výkonem od 1 do 3,5 MW. Systém SkySails AWES je založen na fóliovém draku ovládaném jedním lanem a řídicím modulem (viz Obrázek 18, b), který ovládá délky vývazu (bridles) draku pro jeho řízení a změnu úhlu náběhu [19]. Napájení řídicího modulu a komunikace s pozemní stanicí je zajištěna pomocí elektrických kabelů zabudovaných v laně. SkySails má také patentovaný vypouštěcí a zvedací systém určený pro balení draku do úložného prostoru. Je tvořen teleskopickým stožárem se speciálním zařízením na jeho vrcholu, které je schopno uchopit, udržet a uvolnit středový bod náběžné hrany draku. Když je systém vypnutý, stěžeň je s vypuštěným drakem uložena v úložném prostoru. Na začátku vypouštění se stěžeň vysune do svislé polohy a vynáší vypuštěného draka několik metrů nad zem (nebo nad hladinu moře). Poté se drak nafoukne, aby měl odpovídající tvar a tuhost pro fázi výroby energie. Při startu draka se využívá pouze přirozené vztlakové síly větru: systém na vrcholu stožáru uvolní náběžnou hranu draka, modul začne řídit let a naviják uvolní lano a drak dosáhne provozní výšky. Zatímco fáze výroby energie je podobná jako u generátoru KGR, SkySails má odlišnou fázi obnovy. Konkrétně SkySails používá během navíjení vysokorychlostní naviják, zatímco drak je udržován na okraji větrného okna. Poté se drak navíjí přímo proti větru, aniž by se měnil úhel náběhu draka. Ačkoli se to na první pohled může zdát absurdní, tento druh fáze zotavení se ukázal jako konkurenceschopný [19].

Celkově lze říci, že SkySails Power je jedním z předních hráčů v oblasti létajících větrných elektráren a aktivně pracuje na zdokonalování a rozšiřování této technologie.

3.1.1.2.4 TwingTec

Švýcarská společnost Twingtec vyvíjí GG-AWES o výkonu 100 kW. Poté, co vyzkoušela několik koncepcí, včetně měkkých a pevných křídel, narazila na několik problémů automatizace vzletu a přistání. Rozhodla se proto používat kluzáky se zabudovanými rotory s osou otáčení kolmou k rovině křídla. Rotory se používají při vzletu a přistání. Díky integraci s běžnými diesellovými generátory AWES bude dodávat nepřetržitou a spolehlivou elektrickou energii [19].

3.1.1.2.5 EnerKite

EnerKite je německá společnost zabývající se vývojem a výrobou systémů létajících větrných elektráren (AWES). Má tři produkty a z nichž EK200 je hlavním. Jeho pozemní stanice se umísťuje na nákladník prostřednictvím otočného kloubu, který umožňuje azimutální otáčení. Demonstrátor EnerKite používá především fóliový drak, ale zkoumá a testuje také delta drak a šípové samokřídlo (swept rigid wing). Letoun nemá palubní senzory a je řízen ze země pomocí třech lan podle schématu na Obrázek 18 (d). Společnost EnerKite nyní vyvíjí autonomní startovací a přistávací systém pro polotuhá křídla [19].

3.1.1.2.6 KU Leuven

KU Leuven (Katolická Univerzita v Belgii) provádí výzkumy v oblasti AWES od roku 2006. Začala aktivně pracovat v této oblasti od roku 2006 a postupem času přinesla významné teoretické příspěvky. V roce 2011 vyvinula zkušební stanici pro start upoutaného kluzáku s novým postupem. Tento postup spočívá v tom, že kluzák je držen na konci rotujícího ramene před startem. Když se rameno začne otáčet, kluzák se uvede do letové rychlosti a poté se uvolní úvaz, což kluzáku umožní nabrat výšku.

3.1.1.2.7 SwissKitePower

SwissKitePower byl společný výzkumný a vývojový projekt zahájený ve Švýcarsku v roce 2009. Zapojily se do něj čtyři laboratoře různých švýcarských univerzit: FHNW, EMPA (Švýcarské federální laboratoře pro vědu a technologii materiálů), ETH (Federální polytechnika v Curychu) a EPFL (École Polytechnique Fédérale de Lausanne). První prototypy, testované v letech 2009 až 2011, byly založeny na draku typu C, ovládaném jedním lanem a řídicím modulem. Počáteční systém fungoval podle schématu na Obrázek 18 (b), podobně jako u prototypů KitePower a SkySails. V roce 2012 vyvinula společnost SwissKitePower novou pozemní stanici se třemi navijáky, kterou lze použít k testování draků s 1, 2 nebo 3 lany [19]. Projekt skončil v roce 2013 a od té doby FHNW spolupracuje se společností TwingTec.

3.1.1.2.8 Ampyx Power

Ampyx Power je nizozemská společnost, jejímž cílem je vyvíjet létající systémy pro výrobu větrné energie. Je jednou z firem, jejíž létající systém je schopen automaticky vzlétat a přistávat. Během testovací kampaně v listopadu 2012 systém prokázal průměrný výkon 6 kW, se špičkami přes 15 kW. Po té společnost zahájila konstrukci svého prvního komerčního letounu AP-4 PowerPlane, který má rozpětí o 35 m a výkon ekvivalentní tradiční větrné turbíně, tj. o 2 MW. Společnost následně připravila nové kolo financování, které však nebylo realizováno. To mělo za následek nedostatek finančních prostředků. Dne 19. dubna 2012 společnost Ampyx požádala o pozastavení

plateb u haagského soudu. Vedení se už nepodařilo najít nové investory a 4. května byl vyhlášen konkurz [19].

3.1.1.3 Systémy létajících větrných elektráren s pohyblivou pozemní stanicí

Vedle systémů létajících větrných elektráren s pevnou pozemní stanicí byla navržena řada koncepcí AWES s pohyblivou pozemní stanicí, jejichž hlavní výhodou je schopnost vyrábět energii téměř nepřetržitě. Na systémech létajících větrných elektráren s pohyblivou pozemní stanicí však pracuje málo společností.

3.1.1.3.1 KiteGen Research

První architekturu pohyblivé pozemní stanice, která je založena na generátoru se svislou osou, navrhla již v roce 2004 [19]. Tato koncepce AWES vychází z architektury popsané na Obrázek 17 (a). Během provozu se síly vztlaku přenášejí na rotující rám, který vyvolává točivý moment kolem hlavní svislé osy. Točivý moment a rotace jsou přeměňovány na elektrickou energii pomocí elektrického generátoru. Na tento systém lze pohlížet jako na větrnou turbínu se svislou osou poháněnou silami, které vycházejí z upoutaných letadel. Neexistuje žádný vyvíjený prototyp, ale tento koncept byl simulován v počítači [19], který ukázal, že 100 draků o ploše 500 m² by mohlo generovat průměrný výkon 1000 MW při větru o rychlosti 12 m/s. Uvažovaný generátor by měl poloměr 1500 m, zabíral by území asi 50krát menší a stál by asi 30krát méně než farma větrných turbín se stejným jmenovitým výkonem.

3.1.1.3.2 NTS Energie

Alternativní systém založený na pozemních stanicích, které se pohybují po uzavřených kolejových okruzích, navrhuje KGR a německá společnost NTS Energie und Transportsysteme. Od září 2011 NTS testovala prototyp, kde jsou čtyřlankové draky řízeny vozidlem, které se pohybuje po 400 m dlouhé rovné železniční trati. Jsou schopni vyrobit až 1 kW na 1 m² plochy křídla a testovali draky o ploše až 40 m² [19]. Konečný produkt by měl mít uzavřenou železniční smyčku, po které se nezávisle pohybuje více vozidel.

3.1.1.3.3 Kitenergy

Další kolejnicová koncepce byla navržena Kitenergy a má svůj původ v myšlenkách publikovaných v roce 2004 v časopise Drachen Foundation [19]. Koncepce je založena na přímé lineární kolejnici upevněné na zemi pomocí otočného kloubu. Směr kolejnice je pak nastaven kolmo na hlavní směr větru. Pozemní stanice systému je namontována na kolovém vozidle, které se pod vlivem tažných sil draka pohybuje po přímé kolejnici sem a tam z jedné strany na druhou. Energie se získává z elektromagnetických rotačních generátorů na kolech vozidla nebo z lineárních elektromagnetických generátorů na kolejnici. Výroba energie není zcela plynulá, protože během inverze směru jízdy vozidla se výroba energie nejen sníží na nulu, ale může být i mírně záporná. Nicméně manévr inverze směru jízdy draka by teoreticky mohl být proveden bez potřeby spotřeby energie.

3.2 Systémy létajících větrných elektráren s palubním generátorem neboli Fly-Gen AWES

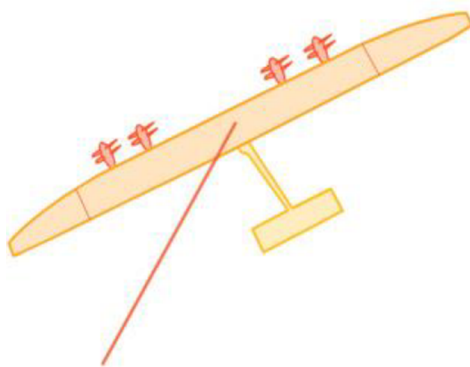
U systémů Fly-Gen AWES se elektrická energie vyrábí na palubě letadla během letu a přenáší se na zem pomocí speciálního lana, které je propojeno elektrickými kabely. Přeměna elektrické energie se v případě FG-AWES provádí pomocí jedné nebo více speciálně navržených větrných turbín. V této části je uvedena obecná klasifikace těchto systémů.

3.2.1 Aircraft Fly-Gen Systems

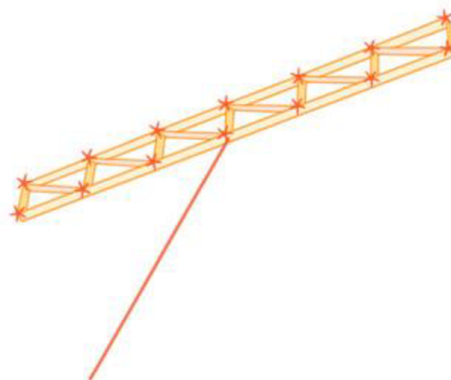
Vedle obecné klasifikace létajících větrných elektráren dle využití bočního větru, lze FG-AWES rozlišit také na základě jejich principů vznášení se, kterými jsou:

- vytváření vzlaku na nosné ploše: Vzlaku se dosahuje u speciálních kluzáků (viz Obrázek 22, a) nebo u příhradové konstrukce (viz Obrázek 22, b) při upoutaném letu.
- statický vztlak: používají se aerostaty a tím se dosahuje vzlaku (viz Obrázek 22, c)
- tah rotoru: používají se vrtulové turbíny, a to může odkazovat např. na VTOL (letadlo s vertikálním vzletem a přistáním) (viz Obrázek 22, d)

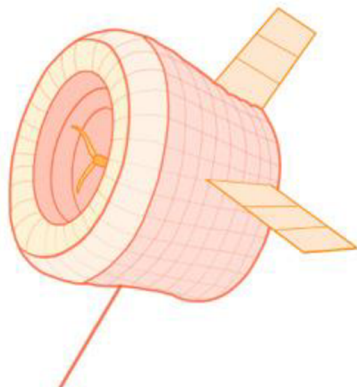
a) Plane with turbines



b) Multi-plane with turbines



c) Lifting balloon



d) Generating quadcopter



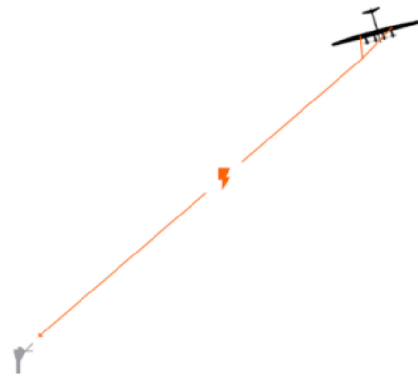
Obrázek 23 různé typy systému Fly-Gen

3.2.2 Projekt Makani

Objevují se různé nápady na alternativní typy větrných elektráren. Jednou z nich byl projekt zvaný Makani, který využíval jakési větrné draky či malé větroně (viz Obr. 14). Ty byly ukotveny k navijákům na zemi pomocí pevných lan (viz Obr. 15). Tento drak zároveň disponoval vrtulemi, které během letu vyrábějí energii, kterou skrze kabel po lanech posílal na zem do sítě. [16]



Obrázek 24: projekt Makani – malý větroň (vlevo)



Obrázek 25: schéma ukotvení projektu Makani (vpravo)

Projekt Makani byl nejdříve spuštěn v roce 2006, se snahou vytvořit novou technologii větrné energie s využitím létajících zařízení. Makani je start-up společnost, která se snaží vyvinout systém létajícího větrného zařízení, který by mohl být použit na získání elektrické energie v odlehlých oblastech. Projekt se postupně vyvíjel v několika fázích a během toho získal pozornost a finanční podporu od několika velkých investorů, včetně Googlu, který se stal hlavním investorem v roce 2013.

Projekt Makani byl velmi úspěšný v testovací fázi a dokázal i vyvinout několik různých dronů s různými parametry a schopnostmi. První dron byl testován v roce 2008 a v následujících letech se projekt postupně vyvíjel a zdokonaloval. V roce 2019 byl Makani schopen vyvinout obrovský větroň, který byl schopen vyrábět energii o výkonu 600 kW.

Nicméně v únoru 2020 Google oznámil, že ukončí podporu projektu Makani a společnost se bude snažit najít nové investory nebo partnery, kteří by mohli projekt financovat a pokračovat v jeho vývoji. Důvodem pro ukončení podpory byly především vysoké náklady na vývoj technologie a obtíže s komerčním využitím.

Podle oficiálního prohlášení společnosti Alphabet (dceřiná společnost Googlu) byl projekt Makani zrušen na základě rozhodnutí společnosti, aby věnovalo své úsilí na jiné technologie, které mají potenciál přinést vyšší dopad a přínosy pro společnost. Toto rozhodnutí bylo součástí širší strategie společnosti Alphabet, která se snaží soustředit své úsilí na klíčové projekty s vysokým potenciálem a přínosem pro udržitelnost a budoucnost energií. [19]

Dalším faktorem, který přispěl ke zrušení projektu Makani, byly technologické výzvy spojené s jeho provozem. Většina testů byla prováděna v relativně mírných podmínkách, ale výzvy s větrem a počasím vysokých nadmořských výšek byly velmi náročné a mnohdy představovaly nebezpečí pro provozovatele i samotné zařízení.

Celkově lze říci, že projekt Makani ukázal potenciál nových technologií v oblasti větrné energie, ale zároveň se potýkal s řadou výzev a omezení, která nakonec vedla k jeho zrušení.

3.2.3 Joby Energy

Společnost Joby Energy Inc. byla založena v roce 2008. [90] je americká společnost, která vyvíjí systémy létajících větrných elektráren s palubním generátorem neboli FG – AWES. Hlavní rozdíl mezi společnostmi Joby a Makani spočívá v tom, že upoutaný létající stroj je v případě společnosti Joby Energy příhradová konstrukce, založená na leteckých profilech. Turbíny jsou umístěny na prutech rámu (Obrázek 23, b). Způsob výroby energie a vzletové a přistávací manévry jsou podobné jako u konceptu Makani. Joby si pro svůj systém nechal patentovat také aerodynamické lano [19]. V letech 2009 a 2010 společnost Joby testovala různé prototypy v malém měřítku.



Obrázek 26: ilustrace příhradového kluzáku Joby Energy

3.2.4 Altaeros

Další americká společnost Altaeros Energies sestrojila nový typ létající větrné elektrárny, která má podobu vzducholodi. Disponuje turbínou o průměru přibližně 5 metrů, jejíž textilní obal je naplněn héliem (viz Obrázek 27). Je provozována ve výškách 300 až 600 metrů tzn. že má přístup k předvídatelným a stabilním proudům, které jsou mnohdy silnější než přízemní vítr.

Má řadu výhod, např. se nemusí řešit složité algoritmy pro provoz. Na druhou stranu ale zároveň vyrábí málo elektřiny, tj. přibližně 2,5 kW. Je technologicky primitivnější než ostatní typy větrných turbín, ale je mnohem levnější na provoz. Tato turbína by byla vhodným zdrojem elektřiny ve zničených oblastech, ve kterých je nedostatečný přístup k elektřině. Její transport je mnohem snazší.

Turbína se v případě problému automaticky ukotví na zem. Poničené kusy turbíny lze relativně jednoduše nahradit novými. Princip činnosti spočívá v tom, že vzducholod' je spojená se zemí lanem, pomocí něhož se provádí přenos elektřiny vyráběné turbínou za letu. Vše je řízeno autonomně počítačem na zemi. Pro řízení tohoto stroje existují i servomechanismy [17], ale ty jsou mimo rozsah diplomové práce.



Obrázek 27: létající turbína Altaeros

Projekt Altaeros byl zrušen v roce 2018. Bohužel nelze poskytnout přesný důvod pro zrušení projektu Altaeros, protože informace nejsou veřejně známy. Nicméně, zprávy o zrušení projektu Altaeros byly publikovány na různých webových stránkách, například na stránce GE Wind v roce 2019. Důvodem byla pravděpodobně neschopnost projektu dosáhnout komerční úspěšnosti a získat dostatečné investice pro pokračování. Nedostatek financování a technologické problémy tedy pravděpodobně přispěly ke zrušení projektu.

3.2.5 Sky Windpower

Společnost Sky Windpower je jednou z předních společností v oblasti vývoje a výroby FG – AWES. Společnost se zaměřuje na vývoj a výrobu AWES, které využívají principu dynamického plachtění a provozní výška je 300 metrů nad zemí.

Jedním z hlavních produktů společnosti Sky Windpower je model Flying Electric Generator (FEG) (viz Obrázek 23, d). FEG je létající větrná elektrárna, která generuje elektřinu pomocí rotujících listů umístěných na ramenou připojených k létajícímu tělesu. Větrná elektrárna se může provozovat ve výškách 300 až 600 metrů nad zemí a využívá silné větry v těchto výškách k pohonu (roztáčení) rotorů, které generují elektřinu. Elektrický proud je pak přenášen k zemi pomocí kabelu připevněného k létajícímu objektu.

Vzletové a přistávací manévry jsou podobné jako u Makani a Joby, ale provoz je odlišný. Jakmile dosáhne provozní výšky, nakloní se pod nastavitelným řízeným úhlem vůči větru a rotory přepnou režim autorotace. V této nakloněné poloze prochází rotorem ze spodní strany rotoru proudy větru rovnoběžně s osami rotoru.

Mezi nevýhody patří náročnost na řízení zařízení a potřeba vysoce kvalitních senzorů, které musí být schopny zprudka a přesně reagovat na změny větru a polohy zařízení.

Společnost Sky Windpower se snaží rozvíjet své technologie a produkty a hledá partnery pro spolupráci na vývoji a provozu létajících větrných elektráren. V budoucnu by mohla být tato technologie využívána jako alternativa k tradičním větrným elektrárnám a dalším obnovitelným zdrojům energie.

4 Koncepční návrh létající větrné elektrárny

Na koncepční návrh létající větrné elektrárny byl zvolen typ Fly-Gen létající větrné elektrárny. Zde je několik důvodů, proč tomu tak bylo:

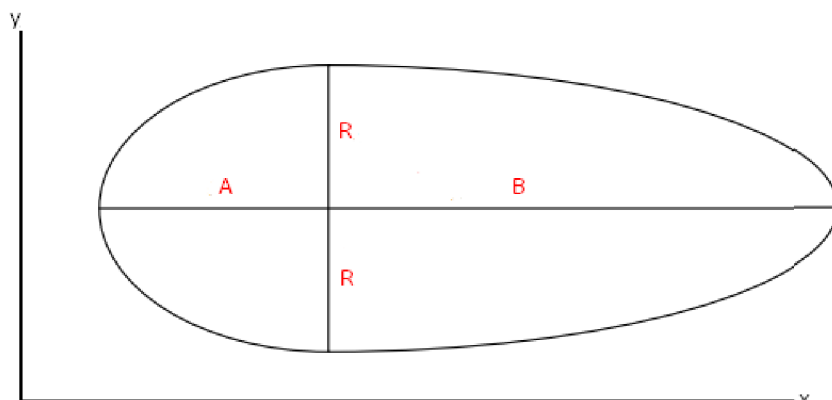
- 1) U všech systémů létajících větrných elektráren znamená zvýšení hmotnosti létajícího stroje zároveň snížení tahu (tažné síly) v lanech. Jelikož systémy Ground-Gen jsou ve fázi výroby elektřiny (např. s využitím bočního větru) závislé na tom tahu v lanech, vyšší hmotnost letadla nebo lan vede snížení účinnost výroby energie [19]. Na druhou stranu zvýšení hmotnosti létající stroje nebo hmotnosti lana u systémů Fly-Gen neovlivňuje na výrobu energie. Je to víceméně tím, že se v základní rovnici výroby výkonu u systémů Fly-Gen nic nemění, což potvrzují i experimentální údaje [19]. Tento fakt by neměl být zanedbáván při návrhu AWES.
- 2) Systémy využívající boční vítr vyžadují speciální vzletové a přistávací manévry, jak jsou již bylo zmíněno. Tyto manévry se ovládají obtížně a jejich řízení a stabilita jsou ještě ve fázi vývoje a žádají si důkladné vědecké zkoumání. Některé společnosti mají již patentovány přistávací systémy [19].

4.1 Aerostat jako létající větrná elektrárna

Slovem aerostat se označuje letadlo lehčí než vzduch, tj. např. balón, vzducholod' apod. Aerostat je pravým opakem aerodynamu, jenž je letadlo těžší než vzduch. Hlavní rozdíl spočívá na principu vytváření vztlaku. Aerodynam má nosnou plochu (ať už je pohyblivá nebo ne), pomocí níž je obdržén vztlak v souladu s principem Bernoulliho zákona při obtékání proudem vzduchu. Na druhou stranu aerostaty jsou založeny na principu Archimedova zákona, který tvrdí, že je těleso ponořené do tekutiny nadnášené aerostatickou vztlakovou silou. Tato aerostatická síla vzniká v důsledku rozdílu hustoty vzduchu v okolí aerostatu a hustoty plynu (médiu) uvnitř aerostatu, čili jde o rozdíl tlaků, který je způsoben tíhovou silou. Vzducholod' je letadlo alespoň částečně říditelné a lehčí než vzduch. Jsou obecně tři typy vzducholodí z hlediska konstrukčního řešení a to jsou:

- a) Ztužené vzducholodě, jež mají tuhou kostru, která drží její tvar.
- b) Poloztužené vzducholodě, jež disponují částečně zpevněnou kostrou trupu.
- c) Neztužené vzducholodě, jejichž tvar drží jen přetlakem nosného plynu.

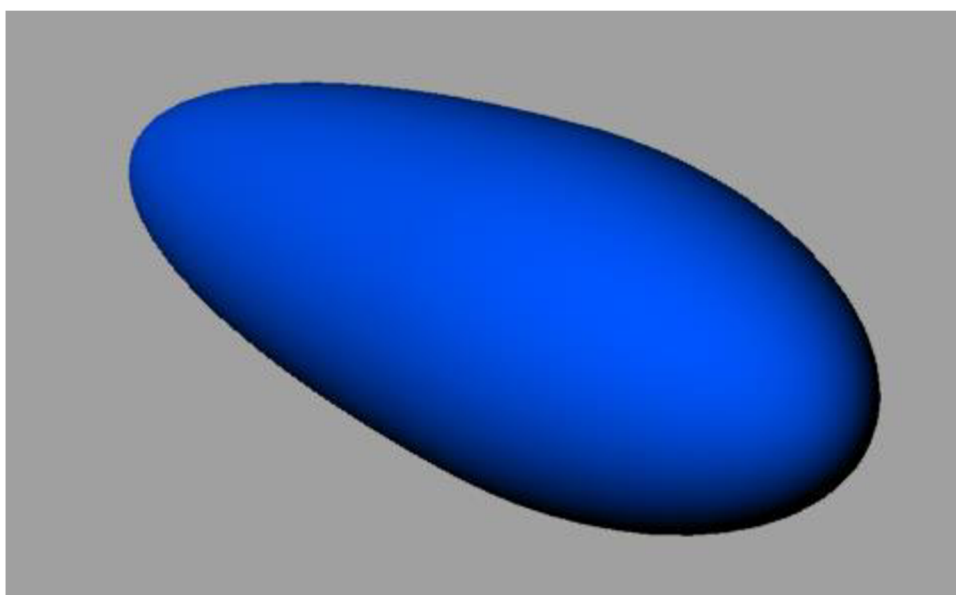
Pro koncepční návrh byla zvolena poloztužená vzducholod'. První prototypy Společnosti Altaeros byly typem neztužené vzducholodě. Následně společnost přecházela od neztuženého řešení k poloztuženému. Vzhledem k tomu, že není požadavek dosáhnout příliš vysokých nadmořských výšek, je vhodné navrhnout poloztuženou vzducholod'.



Obrázek 28: Geometrie aerostatu

A [m]	B [m]	R [m]	Objem [m ³]
6.52	13.04	5.93	350

Tabulka 2: rozměry aerostatu



Obrázek 29: model aerostatu vykreslený v Rhinocerosu

Aerostatická vztlaková síla je úměrná hmotnosti vytlačeného objemu vzduchu. Tato síla se ve výpočtu odkazuje na hrubý vztlak a lze vyjádřit takto:

Rovnice 9: aerostatická vztlaková síla

$$L_G = V_n \times \rho_A \times g$$

Kde

V_n – čistý objem vytlačeného vzduchu

g – gravitační zrychlení

ρ_A – hustota vzduchu

Čistá vztlaková síla je dosažena odečtením hmotnosti nosného plynu. Jako nosný plyn se používá vodík, hélium, svítiplyn, horký vzduch nebo určité směsi.

Rovnice 10: čistá vztlaková síla

$$L_N = (V_a \times (\rho_A - \rho_{He})) \times g$$

Kde

V_a – objem aerostatu

g – gravitační zrychlení

ρ_A – hustota vzduchu v určité výšce

ρ_{He} – hustota hélia

$$L_N = (350 \times (1,16 - 0,17)) \times 9,81 = 3377 \text{ N}$$

5 Vliv výšky na rychlosti větru

Tato kapitola bude věnována celému návrhu listů (vrtulového) rotoru s tím, že nebyly od zadavatele zadány žádné parametry, jako jsou např. vyšetřovaná rychlost větru, používané profily apod. Vstupní parametry byly zvoleny dle rešerší autora v dané oblasti. Některé uvedené poznatky jsou přenášeny z různých analýz a z jiných literatur.

Vyšetřovaný interval rychlost větru je zvolen na základě poznatků v bakalářské práci od Michaely Fuksové [22]. Lze níže vidět na tabulce četnost rychlostí větru v Brně.

Rychlost větru (m/s)	Směr větru								<i>n</i>
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	
1 – 2	10,7	15,1	14,7	9,5	12,8	10,2	11,3	15,6	16 865
3 – 5	11,5	14,0	15,6	12,0	9,8	9,7	9,8	17,7	20 718
6 – 10	10,7	14,9	9,7	16,5	8,7	4,9	12,9	21,7	10 855
11 – 15	5,0	9,2	2,6	17,9	14,5	2,6	20,0	28,2	548
16 – 20	3,8	7,7	0,0	23,1	23,1	7,7	17,3	17,3	26

Tabulka 3: četnost rychlostí větru v Brně [22]

Kde *n* odkazuje na výskyt rychlostí v daném intervalu.

Rychlost větru [m/s]	Pravděpodobnost [%]
1 - 2	34.40
3 - 5	42.27
6 – 10	22.14
11 – 15	1.11
16 - 20	0.05

Tabulka 4: vyšetřovaný interval

Na základě četnosti rychlostí větru v Brně byla složena pravděpodobnostní tabulka rychlosti větru. Pro další krok rozboru byly zvoleny minimální rychlost 1 m/s a maximální 10 m/s, protože výskyt rychlostního intervalu 11-20 m/s je tak malý, že ho lze zanedbat.

Vyšetřovaný interval rychlostí pochází z měřených rychlostí v Brně v Tuřanech ve výšce 10 m od země. (odpovídá 241 m v nadmořské výšce, 49° 9' 10,8" s.š. a 16° 41' 19,68" v.d.) Diplomová práce se zabývá návrhem létající elektrárny provozované ve výškách do 300 m nad terénem. Letadla by se obecně neměla dostat při běžném provozu v zastavěné oblasti pod výšku 300 m, proto je zvolena tato hodnota, která výrazně neohroží běžný letecký provoz.

Rychlost větru v dané nadmořské výšce je ovlivněna několika faktory, včetně stříhu větru, atmosférické stability a terénu. Rychlost větru se mění s výškou nad zemí a tato závislost je postřehnutá větrným profilem (ang. Wind profile). Obecně platí, že rychlost větru roste s rostoucími nadmořskými výškami v důsledku snížení třecích účinků. Existuje několik faktorů, které ovlivňují tuto závislost:

1. Vliv výšky tření: Blíže k zemi se vyskytuje větší tření mezi povrchem země a vzduchem. Toto tření brzdí proudění vzduchu a snižuje rychlost větru.
2. Vliv vertikálního směřování větru: Vlivem různých atmosférických podmínek a turbulentních jevů se větrné směry mohou lišit v různých výškách. Například v blízkosti zemského povrchu mohou být ovlivněny terénem a budovami, což může způsobit změnu směru větru. Výše nad zemí mohou vliv mít i velké hory nebo oceány.
3. Drsnost povrchu: Rychlost větru může ovlivňovat členitost (drsnost) terénu. Hladké povrchy, jako je voda nebo rovné travnaté plochy, kladou větru malý odpor, takže vítr může proudit volněji a vyšší rychlostí. Drsné povrchy, jako jsou lesy nebo hory, vytvářejí větší tření s větrem, což to může vítr zpomalovat a způsobovat jeho turbulence.
4. Vliv tlaku vzduchu: S růstem nadmořské výšky klesá atmosférický tlak. Tento pokles tlaku vzduchu může mít vliv na větrný profil, ačkoli tento vliv je obvykle menší, než vliv výše zmíněných faktorů.
5. Další faktory: Vedle výše zmíněných parametrů, místní teploty a tlakové gradienty mohou také ovlivňovat rychlost a směr větru. Např. v pobřežních oblastech mohou teplotní rozdíly mezi pevninou a mořem způsobovat mořský a pevninský vítr, což může ovlivňovat směr a rychlost větru.

Je nutné podotknout, že pakliže vítr narazí na kopec nebo horu, je donucen stoupat vzhůru a překonávat překážku. Při stoupání se vzduch ochlazuje a může vytvářet mraky nebo srážky. Na závětrné straně hory vzduch klesá a může být teplejší a sušší. Tímto procesem může vznikat tzv. fénová oblačnost a proudění může vést k výrazným změnám rychlosti a směru větru.

Celkově lze říct, že je vliv terénu na rychlost a směr větru je složitý a závisí na řadě faktorů. Meteorologové používají počítačové modely a údaje z pozorování, aby mohli předpovídat vliv terénu na vítr a v případě potřeby vydávat výstrahy a upozornění na nebezpečí způsobená počasím.

Jedním ze způsobů, jak odhadnout rychlost větru v různých výškách nad hladinou moře, je použití logaritmického profilu větru, který předpokládá, že se rychlost větru zvětšuje logaritmicky s rostoucími výškami. Vzorec pro logaritmický model větru je následující [21]:

Rovnice 11: logaritmický model větru

$$V(z) = V_{ref} \times \left(\frac{\left(\ln \frac{z}{z_0} \right)}{\left(\ln \frac{z_{ref}}{z_0} \right)} \right)$$

Kde:

$V(z)$ – rychlost větru v požadované výšce z
 z – zkoumaná (požadovaná) nadmořská výška
 V_{ref} – rychlost větru v referenční výšce z_{ref}
 z_{ref} – referenční výška, ve které je měřena V_{ref}
 z_0 – délka drsnosti povrchu

K použití tohoto vzorce je potřeba znát rychlost větru v referenční výšce a délku drsnosti povrchu pro daný terén. Délka drsnosti povrchu představuje výšku, ve které začíná mít terén významný vliv na rychlost větru, a liší se v závislosti na typu povrchu (např. hladina vody vs. drsný terén). Běžná hodnota z_0 nad otevřenou hladinou vody je 0,0002 metru, zatímco nad pevninou se pohybuje od 0,01 do 2 metrů v závislosti na typu terénu. Následující tabulka uvádí hodnoty tohoto parametru pro rozdílné situace v dané lokalitě.

Vysvětlení povrchu	z_0 [m]
velmi hladký led	0.00001
klidná voda	0.0002
rozrušená voda	0.0005
povrch sněhu	0.003
travní porost	0.008
hrubá pastvina	0.01
úhor	0.03
pole s plodinami	0.05
pole s malým počtem stromů	0.1
pole se stromy + pár budov	0.25
lesy	0.5
předměstí	1.5
centra měst s velkými budovami	3

Tabulka 5: drsnost povrchu podle typu terénu [23]

Tam, kde probíhá měření rychlostí větru v Tuřanech v Brně, je pár menších budov a stromů. Proto je z_0 zvolena 0.175 m. Výpočet rychlostí odpovídajících rychlostem $V(z)$ je uveden níže.

Rovnice 12: výpočet rychlosti

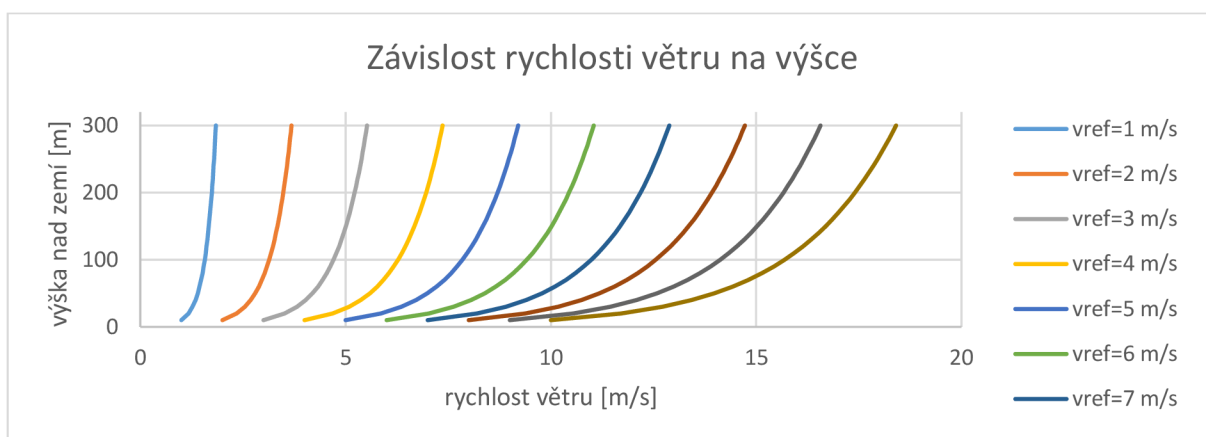
$$V(300)_{2\text{ m/s}} = 2 \times \left(\frac{\left(\ln \frac{300}{0,175} \right)}{\left(\ln \frac{10}{0,175} \right)} \right) = 3,681449 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Výška od země [m]	$V(z)_1$	$V(z)_2$	$V(z)_3$	$V(z)_4$	$V(z)_5$	$V(z)_6$	$V(z)_7$	$V(z)_8$	$V(z)_9$	$V(z)_{10}$
300	1.840	3.681	5.522	7.362	9.203	11.044	12.885	14.725	16.566	18.407
290	1.832	3.664	5.497	7.329	9.161	10.994	12.826	14.653	16.491	18.323
280	1.823	3.647	5.471	7.294	9.118	10.942	12.765	14.585	16.413	18.236
270	1.814	3.629	5.444	7.258	9.073	10.888	12.702	14.512	16.332	18.146
260	1.805	3.610	5.416	7.221	9.026	10.832	12.630	14.441	16.248	18.053
250	1.795	3.591	5.386	7.182	8.978	10.773	12.569	14.360	16.160	17.956
240	1.785	3.571	5.356	7.142	8.927	10.713	12.498	14.284	16.070	17.855
230	1.775	3.550	5.325	7.100	8.875	10.650	12.425	14.200	15.975	17.750
220	1.764	3.528	5.292	7.0562	8.820	10.584	12.348	14.112	15.876	17.640
210	1.752	3.505	5.257	7.0102	8.762	10.515	12.267	14.020	15.773	17.525
200	1.740	3.480	5.221	6.961	8.702	10.443	12.1835	13.924	15.664	17.405
190	1.727	3.455	5.183	6.911	8.639	10.366	12.094	13.822	15.550	17.278
180	1.714	3.428	5.143	6.857	8.572	10.286	12.001	13.715	15.430	17.144
170	1.700	3.400	5.100	6.801	8.501	10.201	11.902	13.602	15.302	17.003
160	1.685	3.370	5.056	6.741	8.426	10.112	11.797	13.482	15.168	16.853
150	1.669	3.338	5.008	6.677	8.346	10.016	11.685	13.355	15.024	16.693
140	1.652	3.304	4.957	6.609	8.261	9.914	11.566	13.218	14.871	16.523
130	1.634	3.268	4.902	6.536	8.170	9.804	11.438	13.072	14.706	16.340
120	1.614	3.228	4.842	6.456	8.071	9.685	11.299	12.913	14.528	16.142
110	1.592	3.185	4.778	6.370	7.963	9.556	11.1490	12.741	14.334	15.927
100	1.569	3.138	4.707	6.276	7.845	9.414	10.984	12.553	14.122	15.691
90	1.543	3.086	4.629	6.172	7.715	9.258	10.801	12.344	13.888	15.431
80	1.514	3.028	4.542	6.056	7.570	9.084	10.598	12.112	13.626	15.140
70	1.481	2.961	4.442	5.923	7.404	8.885	10.367	11.848	13.329	14.81
60	1.442	2.885	4.328	5.771	7.214	8.657	10.100	11.543	12.986	14.428
50	1.397	2.795	4.193	5.591	6.989	8.386	9.784	11.182	12.580	13.978

40	1.342	2.685	4.028	5.370	6.713	8.056	9.398	10.741	12.084	13.426
30	1.271	2.543	3.814	5.086	6.357	7.629	8.900	10.172	11.444	12.715
20	1.171	2.342	3.514	4.685	5.856	7.028	8.199	9.370	10.542	11.713
10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Tabulka 6: výsledné rychlosti $V_{z(x)}$ odpovídající patřičné výšce [m/s]

Vypočítané hodnoty jsou zaneseny do grafu níže. Je patrné, že je rychlost větru logaritmičticky (přirozený logaritmus) úměrná výšce (viz Graf 1).

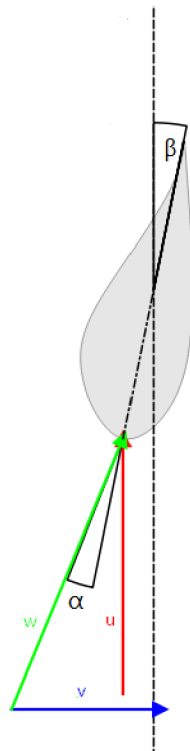


Graf 1: vliv výšky na rychlosti větru

6 Konstrukční návrh aerodynamického demonstrátoru

6.1 Aerodynamická analýza rotoru v režimu autorotace

Režim autorotace je zvláštní režim rotoru, kdy dochází k roztáčení listů rotoru vlivem rychlosti větru. Princip činnosti je založen na rychlostním trojúhelníku, který lze vidět (viz. Obrázek 30).



Obrázek 30: rychlostní trojúhelník

w – relativní rychlost

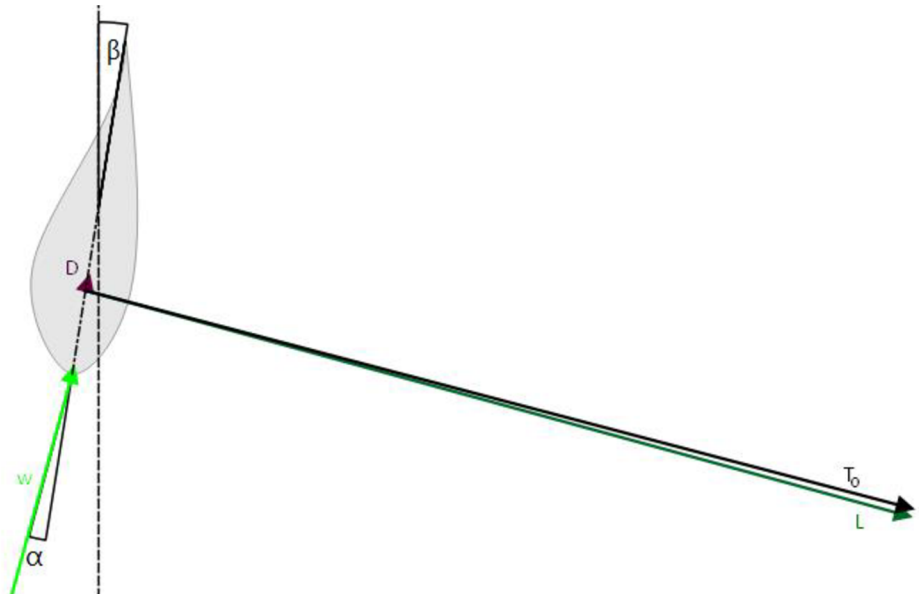
u – úhlová rychlost

v – rychlost větru

α – úhel náběhu

β – úhel zkroucení

Díky tvaru listu, lépe řečeno, zásluhou profilů listu je dána úhlová rychlost, která pak přispívá k vytváření relativní rychlosti. Jinými slovy relativní rychlost vzniká v důsledku vektorového přičtení rychlosti větru k rychlosti úhlové.



Obrázek 31: síly působící na listy rotoru

Jakmile proud vzduchu s relativní rychlostí narazí na listy, tak dává vzniknout vztlakové síle působící kolmo na jeho směr. Podobně vzniká i malá síla, tj. odporová síla, která má stejný směr se směrem vzduchu. Vztlaková síla otáčí listy kolem osy rotoru. Opět se vektorové přičtení síly odporové k síle vztlakové udává celková síla. (viz. Obrázek 31)

w – relativní rychlost

D – odporová síla

L – vztlaková síla

T_o – celková síla

Tip Speed Ratio (TSR) je významný parametr v analýze větrných elektráren a vyjadřuje poměr mezi rychlostí na konci listu vrtule a rychlostí proudícího větru. Optimální hodnota TSR závisí na konkrétních podmínkách, včetně typu větrné turbíny, rychlosti větru, účinnosti rotoru a obvykle se pohybuje v rozmezí 6 až 8. Obecně platí, že pro větší výkon se upřednostňuje nižší hodnoty TSR, zatímco pro vyšší účinnost se zaměřuje na vyšší hodnoty TSR. Vysoké hodnoty TSR, avšak mohou vést k nadměrnému namáhání vrtule a omezení výkonu, na druhou stranu nízké hodnoty TSR znamenají slabší využití větrné energie.

Celkově lze říci, že TSR je úzce spojen s listy vrtule, protože se vztahuje k rychlosti na konci listu. Při návrhu vrtulových rotorů se vybírá vhodný počet listů a je optimalizováno nastavení TSR pro dosažení nejlepších výsledků.

Pokud jde o počet listů rotoru, je třeba zaměřit se na liché číslo. Původní návrh měl dva listy, ale po dohodě s vedoucími práce bylo toto nastaveno na tři, neboť je to výhodnější z hlediska kmitání. K tomu, proč klasické horizontální větrné turbíny mají obvykle třílistový rotor místo dvoulistového, existuje několik důvodů, jako jsou např. stabilita a rovnoměrnost, nižší vibrace a hluk, větší moment setrvačnosti, účinnost apod.

Při psaní práce byla používána software QBlade, který slouží k analýze a návrhu profilů a listů větrných turbín. Tento software je vyvinutý v rámci evropského projektu s cílem poskytnout vývojářům a inženýrům nástroj pro studium aerodynamiky a výkonu větrných turbín. Software je postaven na panelové metodě, která umožňuje výpočet rozložení tlaku, vztlaku a odporu na povrchu profilu.

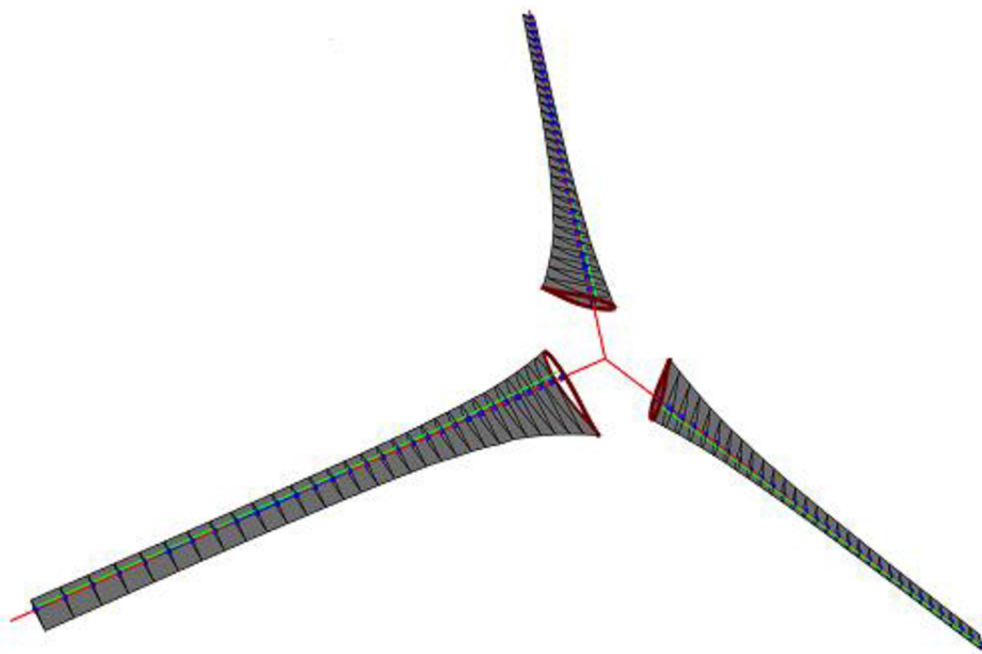
6.1.1 Rozhodnutí o profilu:

Jako první variantu listů byl použit profil NACA 63-415. Lze níže vidět základní geometrii a rozměry profilu a listů.

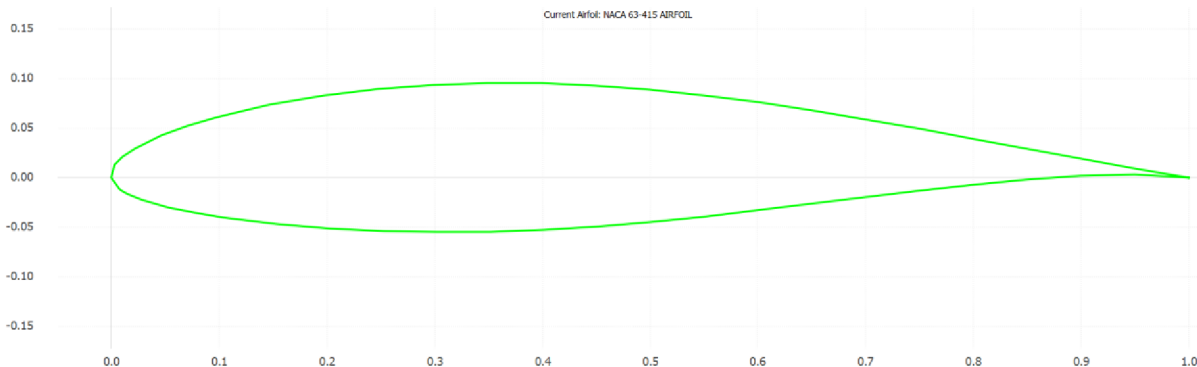
počet segmentů [-]	pozice [m]	Chord [m]	zkroucení [°]	profil
0	0	0.602	0	NACA 63-415
1	0.1	0.539	0	NACA 63-415
2	0.2	0.481	0	NACA 63-415
3	0.3	0.428	0	NACA 63-415
4	0.4	0.38	0	NACA 63-415
5	0.5	0.34	0	NACA 63-415
6	0.6	0.306	0	NACA 63-415
7	0.7	0.291	0	NACA 63-415
8	0.8	0.264	0	NACA 63-415
9	0.9	0.245	0	NACA 63-415
10	1	0.232	0	NACA 63-415
11	1.1	0.213	0	NACA 63-415
12	1.2	0.199	0	NACA 63-415
13	1.3	0.192	0	NACA 63-415
14	1.4	0.182	0	NACA 63-415
15	1.5	0.176	0	NACA 63-415
16	1.6	0.169	0	NACA 63-415
17	1.7	0.164	0	NACA 63-415
18	1.8	0.159	0	NACA 63-415

19	1.9	0.154	0	NACA 63-415
20	2	0.149	0	NACA 63-415
21	2.1	0.144	0	NACA 63-415
22	2.2	0.14	0	NACA 63-415
23	2.3	0.137	0	NACA 63-415
24	2.4	0.134	0	NACA 63-415
25	2.5	0.132	0	NACA 63-415
26	2.6	0.13	0	NACA 63-415
27	2.7	0.128	0	NACA 63-415
28	2.8	0.126	0	NACA 63-415
29	2.9	0.124	0	NACA 63-415
30	3	0.123	0	NACA 63-415

Tabulka 7: specifikace listů varianty NACA



Obrázek 32: model listů varianty NACA



Obrázek 33: znázornění profilu NACA 63-415

název profilu	tloušťka [%]	prohnutí [%]
NACA 63-415	15	2.21

Tabulka 8: vlastnosti profilu NACA 63-415

Maximální tloušťka se nachází v místě 34,4% tětivy. Maximální prohnutí se nachází v místě 50% tětivy.

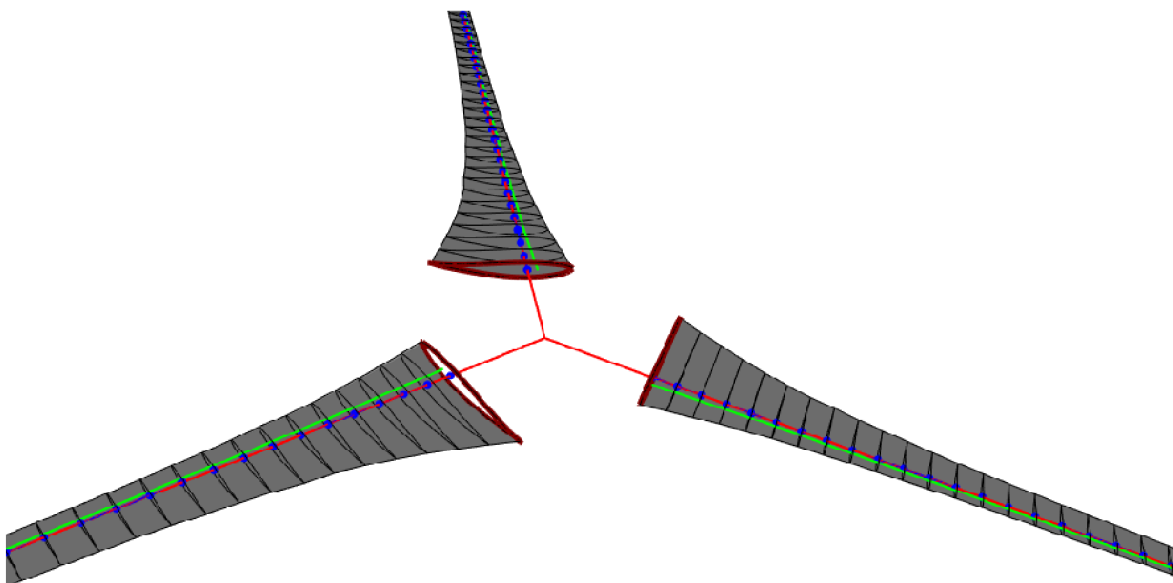
Jako druhou variantu u listů byl použit profil Eppler E-854. Tento profil se vyznačuje vyšším maximálním vztlakem při nižších úhlech náběhu. Vzhledem k tomu, že bude létající větrná elektrárna provozována při nízkých Machových a Reynoldsových číslech, Eppler série připadá v úvahu s tím, že tyto profily byly navrženy dle Epplerovy Metody. Ta určuje tvar profilu, u kterého by došlo k určitému rozložení tlaku, který by vykazoval požadované vlastnosti mezní vrstvy, a díky tomu vytváří vysoký vztlak při nižších Reynoldsových číslech.

Níže lze vidět tutéž geometrii listu a rozměry profilu a listů.

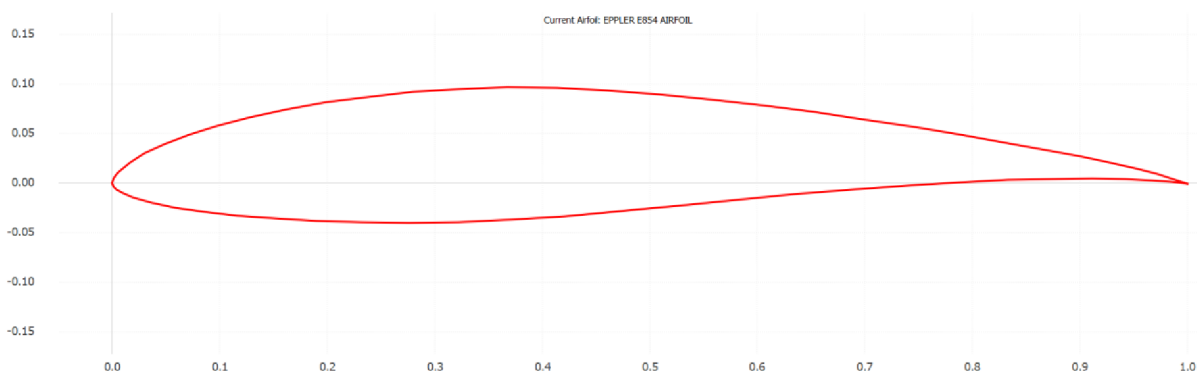
počet segmentů [-]	pozice [m]	tětiva [m]	zkroucení [°]	profil
0	0	0.602	0	EPPLER E854
1	0.1	0.539	0	EPPLER E854
2	0.2	0.481	0	EPPLER E854
3	0.3	0.428	0	EPPLER E854
4	0.4	0.38	0	EPPLER E854
5	0.5	0.34	0	EPPLER E854
6	0.6	0.306	0	EPPLER E854

7	0.7	0.291	0	EPPLER E854
8	0.8	0.264	0	EPPLER E854
9	0.9	0.245	0	EPPLER E854
10	1	0.232	0	EPPLER E854
11	1.1	0.213	0	EPPLER E854
12	1.2	0.199	0	EPPLER E854
13	1.3	0.192	0	EPPLER E854
14	1.4	0.182	0	EPPLER E854
15	1.5	0.176	0	EPPLER E854
16	1.6	0.169	0	EPPLER E854
17	1.7	0.164	0	EPPLER E854
18	1.8	0.159	0	EPPLER E854
19	1.9	0.154	0	EPPLER E854
20	2	0.149	0	EPPLER E854
21	2.1	0.144	0	EPPLER E854
22	2.2	0.14	0	EPPLER E854
23	2.3	0.137	0	EPPLER E854
24	2.4	0.134	0	EPPLER E854
25	2.5	0.132	0	EPPLER E854
26	2.6	0.13	0	EPPLER E854
27	2.7	0.128	0	EPPLER E854
28	2.8	0.126	0	EPPLER E854
29	2.9	0.124	0	EPPLER E854
30	3	0.123	0	EPPLER E854

Tabulka 9: specifikace listů varianty Eppler



Obrázek 34: model listů varianty Eppler



Obrázek 35: znázornění profilu Eppler E854

název profilu	tloušťka [%]	prohnutí [%]
Eppler E854	13.41	3.25

Tabulka 10: vlastnosti profilu E854

Maximální tloušťka se nachází v místě 32,3% tětiny. Maximální prohnutí se nachází v místě 50,9% tětiny.

Volba správného profilu je důležitým faktorem pro dosažení účinnosti rotoru. Tvar a profil listu mají zásadní vliv na součinitel výkonnosti rotoru, který lze vypočítat pomocí níže uvedené rovnice:

Rovnice 13: součinitel výkonnosti rotoru

$$c_p = c_T \times 0,5 \times \lambda \times (1 - a)^2$$

Kde:

c_T – součinitel axiální síly

λ – Tip Speed Ratio (poměr mezi rychlostí na konci listu vrtule a rychlostí proudícího větru)

a – součinitel axiální indukčnosti (poměr axiální rychlosti k rychlosti větru)

Součinitel axiální indukčnosti lze určit za pomoci iteračních metod. Součinitel axiální síly se vypočítá dle níže uvedeného vzorce:

Rovnice 14: součinitel axiální síly

$$c_T = \frac{F_T}{0,5 \times \rho \times V_{vitr}^2 \times S}$$

Kde:

F_T – síla axiální

ρ – hustota vzduchu při určené výšce

V_{vitr} – rychlost větru

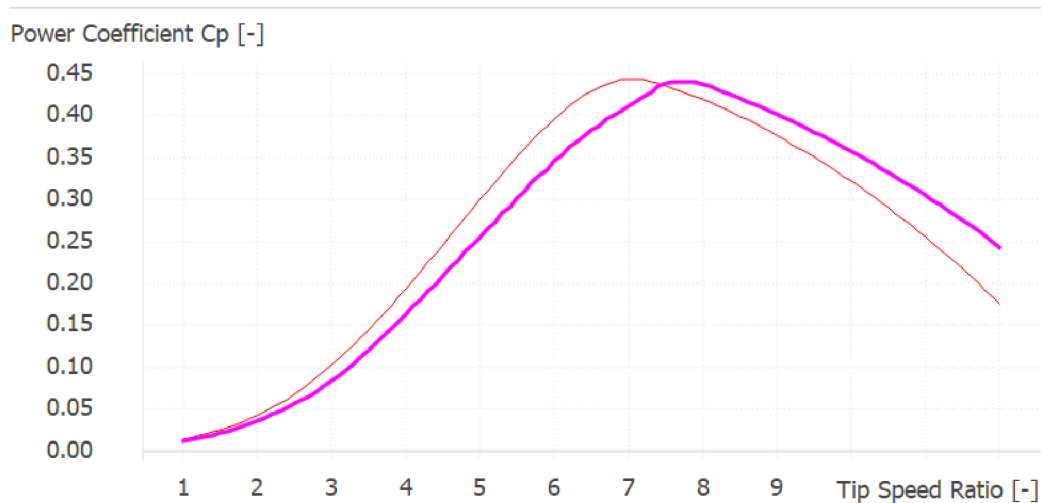
S – plocha rotoru

Iterační výpočet byl proveden v software QBlade pro níže uvedené parametry v tabulce:

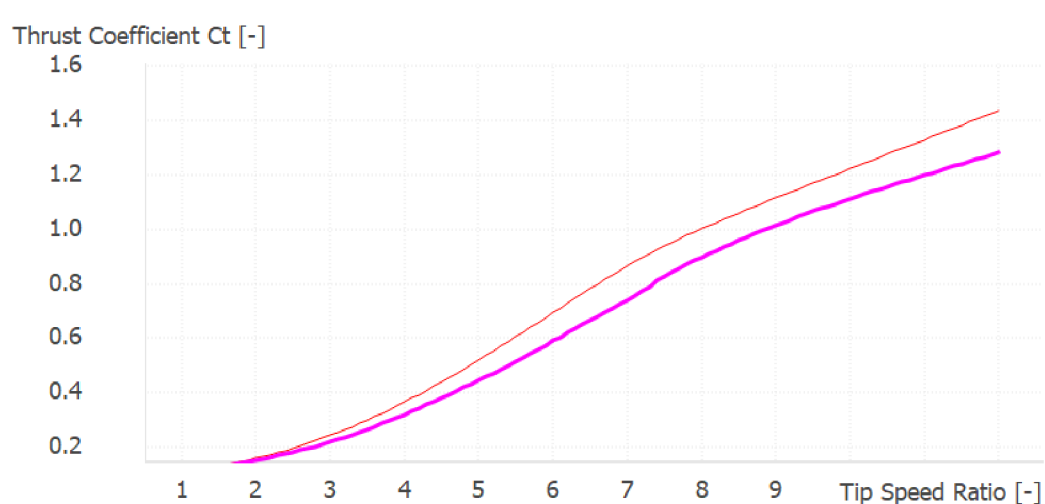
Rychlost větru [m/s]	Hustota [kg/m^3]	kinematická viskozita [m^2/s]	výška od země [m]	max. hodnota konvergence [-]	max. počet iterace [-]	relaxační faktor
3,6814	1,1626	0,0000143	300	1.00E-06	500	0.1

Tabulka 11: okrajové podmínky pro iterace

Blade Element Momentum (BEM) je metoda používaná při analýze a návrhu aerodynamiky rotorových listů větrných turbín. Lze BEM volně překládat jako metoda izolovaného elementu listu. Teorie izolovaného elementu listu tvrdí, že se každý element rotorového listu, který je vymezen segmenty listu, chová jako 2D profil listu, který vytváří aerodynamické síly (odporové a vztakové), které odpovídají změně hybnosti vzduchu, jenž protéká tímto elementem listu.



Graf 2: vliv TSR na součinitel výkonosti rotoru



Graf 3: závislost TSR na součiniteli axiální síly

Ve výše uvedených grafech fialová čára naznačuje profil NACA 63-415 a oranžová čára značí profil Eppler E854. V prvním grafu je znázorněna závislost součinitele výkonosti na TSR a v druhém je poukázán podléhající vliv na součinitel axiální síly.

Analýza byla provedena pro oba profily ve stejných podmínkách. Z grafu vyplývá, že je Eppler E854 hodnocen jako vhodnější volba z hlediska dosaženého výkonu, tudíž je zvolena varianta Eppler E854. Dosažené výsledky jsou v souladu s přenášenými poznatky s tím, že NACA 63-415 dosahuje za stejných podmínek většího TSR ve srovnání s Eppler E854, tudíž součinitel výkonosti vychází trochu menší u něj. Na druhou stranu tento profil může snášet zatížení lépe oproti profilu Eppler E854. Byla zmínka o rozmezí TSR (tj. 6 až 8) pro nejpříznivější účinnost, hodnoty TSR vycházející z analýzy odpovídají tomuto rozmezí.

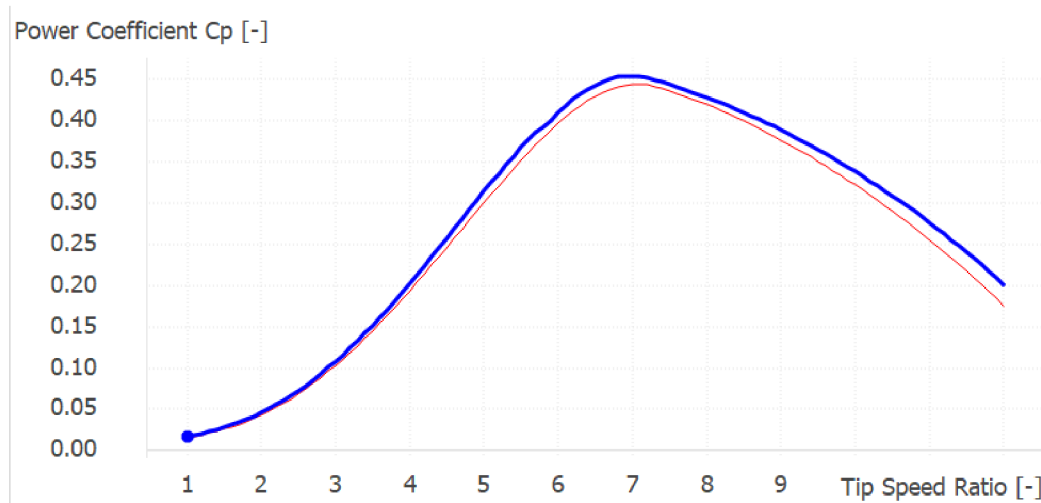
6.1.2 Zkroucení listu

Dále je těž přihlížen vliv zkroucení listu. U vybrané varianty je provedena úprava s tím, že u prvních deset řezů listu je nastaven zkrut profilu.

počet segmentů [-]	pozice [m]	těživa [m]	zkroucení [°]	profil
0	0	0.602	24.135	EPPLER E854
1	0.1	0.539	18.854	EPPLER E854
2	0.2	0.481	14.816	EPPLER E854
3	0.3	0.428	11.658	EPPLER E854
4	0.4	0.38	9.134	EPPLER E854
5	0.5	0.34	7.079	EPPLER E854
6	0.6	0.306	5.376	EPPLER E854
7	0.7	0.291	3.945	EPPLER E854
8	0.8	0.264	2.727	EPPLER E854
9	0.9	0.245	1.679	EPPLER E854
10	1	0.232	0.768	EPPLER E854
11	1.1	0.213	0	EPPLER E854
12	1.2	0.199	0	EPPLER E854
13	1.3	0.192	0	EPPLER E854
14	1.4	0.182	0	EPPLER E854
15	1.5	0.176	0	EPPLER E854
16	1.6	0.169	0	EPPLER E854
17	1.7	0.164	0	EPPLER E854
18	1.8	0.159	0	EPPLER E854
19	1.9	0.154	0	EPPLER E854
20	2	0.149	0	EPPLER E854
21	2.1	0.144	0	EPPLER E854
22	2.2	0.14	0	EPPLER E854
23	2.3	0.137	0	EPPLER E854
24	2.4	0.134	0	EPPLER E854

25	2.5	0.132	0	EPPLER E854
26	2.6	0.13	0	EPPLER E854
27	2.7	0.128	0	EPPLER E854
28	2.8	0.126	0	EPPLER E854
29	2.9	0.124	0	EPPLER E854
30	3	0.123	0	EPPLER E854

Tabulka 12: zkroucení listu Eppler E854



Graf 4: porovnání profilů ohledně zkroucení listu

Modrá čára značí variantu č. 2 po úpravě a fialová čára naznačuje původní verzi profilu. Je patrné, že lze zkroucením listu dosáhnout vyšších hodnoty součinitele výkonnosti. Důvodem, proč tomu tak bylo, je, že jsou upravené řezy listu zkroucené tak, aby měly nejlepší poměr součinitele vztlaku k součiniteli odporu (klouzavost).

6.1.3 Zhodnocení

Na základě poznatků proběhlého rozboru o problematice volby správného profilu listu vrtulového rotoru by byl, dle skromného názoru autora, použit profil Eppler E854 s tím, že celý list bude zkroucený.

6.2 Úvaha o výkonu

V jedné domácnosti v ČR se podle skupiny ČEZ spotřeba elektřiny pohybuje mezi 2 až 3 MWh ročně, tedy 5 až 8 kWh denně. [20] Proto je cílový výkon stanoven na denní spotřebu elektřiny pro jednu normální domácnost v ČR. Praktická část má za úkol poukázat na přednosti, případně i nedostatky zvoleného typu létající větrné elektrárny.

Předběžný výpočet výkonu je udělán tak, aby se zjistila délka listů s tím, že jsou rychlosti větru a výška letu známé.

V druhé kapitole byl učiněn poznatek o součiniteli výkonnosti vrtulových rotorů, což se pohybuje v rozmezí 0,35 až 0,45. Tomuto rozmezí odpovídá dosažený výsledek součinitele výkonnosti (tj. 0,41) z provedené analýzy v předchozím oddílu. Je třeba použít tento součinitel pro předběžný výpočet.

Maximální rychlost ve výšce H=300 m ve zvoleném intervalu rychlostí činí 18,407 m/s. Hustota ve výšce H=300 m činí 1,162 kg/m³.

Rovnice 15: předběžný výpočet výkonu

$$P = \frac{1}{2} \times \rho \times S \times V_{vitr}^3 \times c_p$$

$$8000 = \frac{1}{2} \times 1,162 \times \pi \times \left(\frac{D}{2}\right)^2 \times 18,407^3 \times 0,41$$

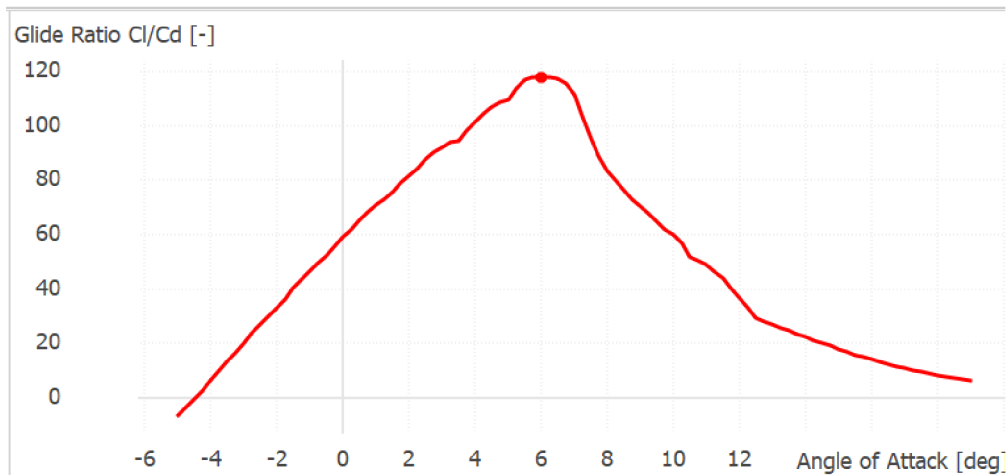
Po dosažení hodnot činí délka listu přibližně 1,31 m. Je třeba brát v úvahu, že rychlost větru není vždycky maximální a často nefouká tak silně vzhledem k Tabulka 6. Proto je zvolena vyšší hodnota délky listu, tj 1,5 m.

součinitel výkonnosti c _p	Délka listu [m]	Plocha [m ²]	Rychlost větru Vz [m/s]	Teoretický Výkon [kW]
0.41	1.5	7.068	1.840	0.010
			3.681	0.084
			5.522	0.283
			7.362	0.672
			9.203	1.313
			11.044	2.269
			12.885	3.604
			14.725	5.379
			16.566	7.659
			18.407	10.507

Tabulka 13: vypočtené výkony rotoru

6.3 Návrh listu

Níže lze vidět základní geometrii a rozměry profilu a listů. List je zkroucen tak, aby měl nejlepší součinitel vztlaku při nejnižším součiniteli odporu (klouzavost) a to odpovídá úhlu náběhu přibližně 6°.



Graf 5: klouzavost profilu v závislosti na úhlu náběhu

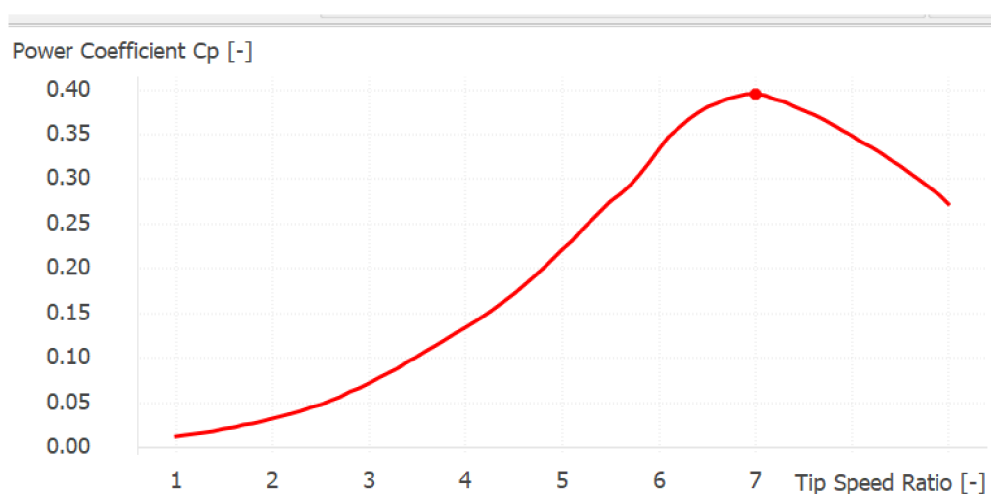
počet segmentů [-]	pozice [m]	tětiva [mm]	zkroucení [°]	profil
0	0	314	10.6	EPPLER E854
1	0.1	251	6.9	EPPLER E854
2	0.2	198	4.1	EPPLER E854
3	0.3	174	2.1	EPPLER E854
4	0.4	134	0.5	EPPLER E854
5	0.5	116	-0.6	EPPLER E854
6	0.6	100	-1.7	EPPLER E854
7	0.7	91	-2.5	EPPLER E854
8	0.8	84	-3.3	EPPLER E854
9	0.9	79	-3.9	EPPLER E854
10	1	74	-4.4	EPPLER E854
11	1.1	69	-4.9	EPPLER E854
12	1.2	66	-5.3	EPPLER E854
13	1.3	64	-5.6	EPPLER E854

14	1.4	62	-6	EPPLER E854
15	1.5	0.176	-6.3	EPPLER E854

Tabulka 14: geometrie a rozměry listu

Rychlost větru [m/s]	Hustota [kg/m^3]	kinematická viskozita [m^2/s]	výška od země [m]	max. hodnota konvergence [-]	max. počet iterace [-]	relaxační faktor
18.407	1,1626	0,0000143	300	1.00E-06	500	0.1

Tabulka 15: okrajové podmínky pro maximální rychlost větru



Graf 6: součinitel výkonosti v bodě TSR=7 odpovídá přibližně 0,39

Dále jsou níže v tabulce uvedeny výkony dle softvéru QBlade:

rychlost větru [m/s]	Výkony [W]	Výkony [kW]	Předběžně vypočtené výkony
1.84	9.99	0.009	0.0102
3.68	79.95	0.079	0.082
5.52	269.85	0.269	0.276
7.36	639.66	0.639	0.656
9.20	1249.34	1.249	1.281
11.04	2158.87	2.158	2.214
12.88	3428.21	3.428	3.516
14.72	5117.33	5.117	5.2485
16.56	7286.20	7.286	7.473
18.40	9994.79	9.994	10.251

Tabulka 16: porovnání výkonu QBlade s výkony vypočítanými, odchylka je malá, tj. %0.02.

6.4 Hmotnostní analýza

Hmotnost tkaniny	102	kg
Hmotnost generátoru	3,1	kg
Hmotnost lána (x6)	67,2	kg
Hmotnost náboje + vrtule	13,8	kg
Hmotnost lože	5	kg
Hmotnost kabelu	54,4	kg
Hmotnost lože	4	kg
Hmotnost VOP	14,44	kg
Hmotnost SOP	12,51	kg

Obrázek 36: hmotnosti jednotlivých komponentů

Těžiště se počítá pomocí uvedeného vzorce:

Rovnice 16: výpočet těžiště

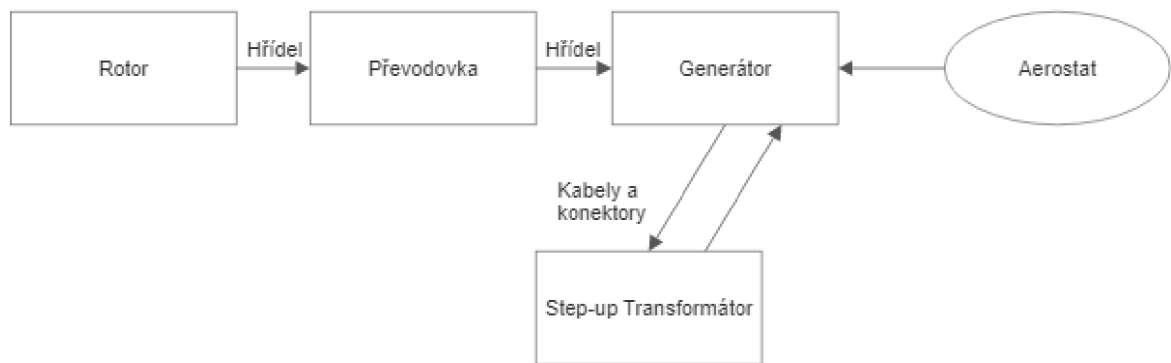
$$x_T = \frac{\sum_1^n m_n \times x_n}{\sum_1^n m_n}$$

S tím, že výslednice lan prochází těžištěm a vztažný bod je stanoven v místě, kde vzniká vztlak aerostatu (ang. Center of Buoyancy)

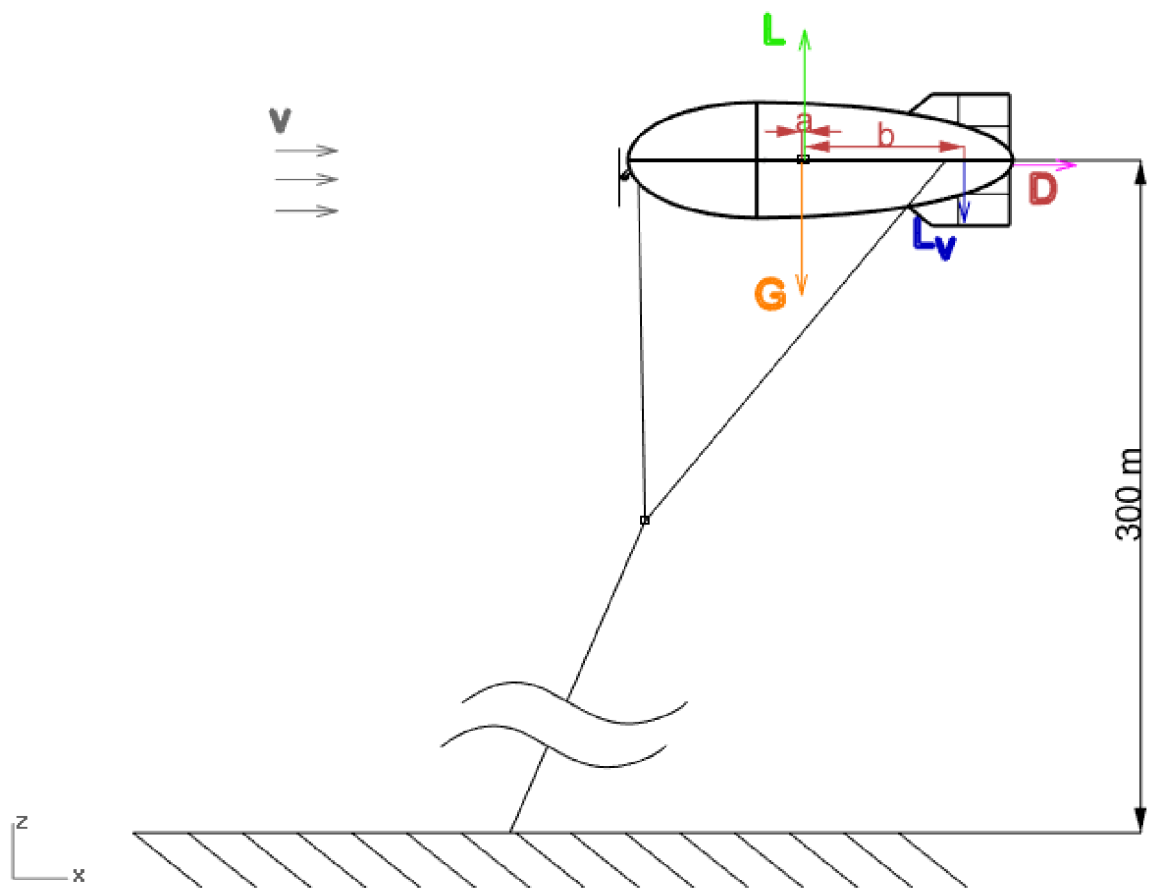
součást	vzdálenost k vztažnému bodě [-]
generátor + převodovka + část kabelu	(-) 8970,14
vrtule + náboj	(-) 9220,14
hmotnost tkaniny	0
lano	0
lože	(-) 8970,14
kabel	0
horizontální stabilizátor	(+) 8970,14
vertikální stabilizátor	(+) 7500

Tabulka 17: vzdálenosti jednotlivých komponentů k vztažnému bodě

Po dosažení hodnot do rovnice těžiště vychází $x_T = (-) 147,03$ a tj. bod „a“ (viz Obrázek 37)



Obrázek 37: blokové schéma létající větrné elektrárny aerostatu



Obrázek 38: síly působící na aerostat

Je třeba zapsat momentovou rovnováhu:

Rovnice 17: momentová rovnováha

$$M_o = L \times a - L_v \times b$$

Rovnice 18: přítlak horizontálního stabilizátoru

$$L_v = \frac{L \times a}{b}$$

Kde

$$a = 143.03 \text{ mm}$$

$$b = 8482.01 \text{ mm}$$

L_v – přítlak horizontálního stabilizátoru [N]

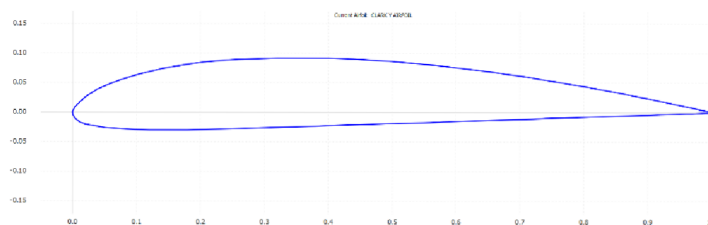
$$L = 3377 \text{ [N]}$$

$$L_v = 0,5 \times g \times v^2 \times S \times c_L$$

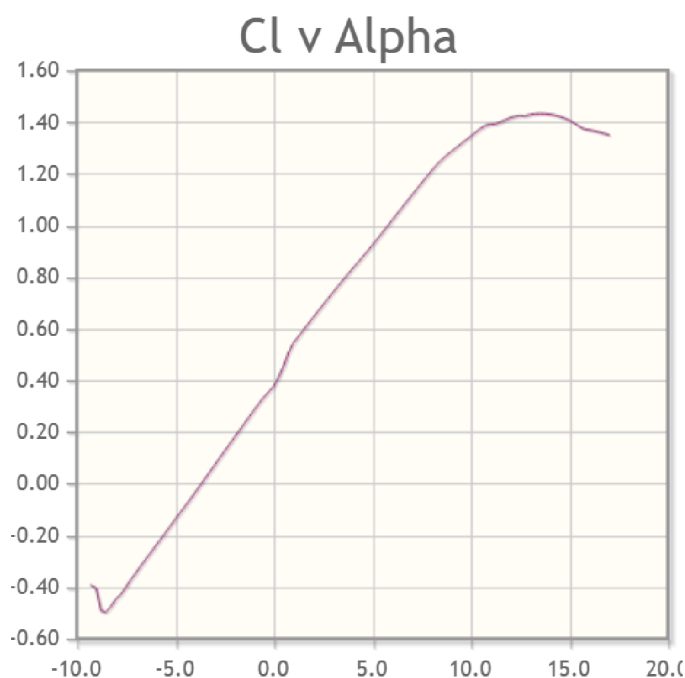
Ze známých hodnot je lze vypočítat součinitele vztlaku.

rychlost větru [m/s]	vypočtené součinitele vztlaku [-]
1,84	1,40
3,68	0,349
5,52	0,155
7,36	0,087
9,20	0,055
11,04	0,038
12,88	0,028
14,72	0,021
16,56	0,017
18,40	0,013

Na základě vypočtených hodnot součinitele vztlaku pro aplikaci na horizontální stabilizátor profil "clark y" byl zvolen. Maximální tloušťka se nachází v místě 28% tělvy. Maximální prohnutí se nachází v místě 42% tělvy.

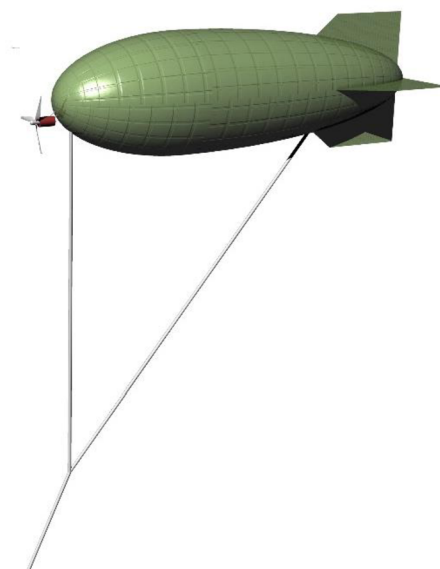


Obrázek 39: znázornění profilu Clark y



Graf 7: vztaková čára profilu clark y

Finální produkt lze vidět níže na obrázku.



Obrázek 40 Koncepční létající větrná elektrárna

6.5 Volba Generátoru a Převodovky

Jedním ze základních fyzikálních principů je, že energii nelze ani vytvářet, ani zničit nikdy, nýbrž lze ji pouze přeměnit z jedné formy energie na jinou. Úkolem generátoru je tudíž přeměnit mechanickou energii z otáčejících se listů rotoru v energii elektrickou pro použití v domácnosti. Tedy rotor dodává točivý moment, se kterým generátor umí pracovat. Elektromotory mají vyšší účinnost než spalovací motory. Protože tvoří uzavřený okruh, do kterého nevstupuje vzduch, totiž výkonnost není ovlivněna výškou.

Klasické nebo létající větrné elektrárny mohou disponovat synchronními nebo asynchronními generátory. Taktéž forma připojení k síti může být přímá či nepřímá. Přímé připojení k síti znamená, že generátor je připojen přímo k síti střídavého proudu. Nepřímé připojení k síti znamená, že proud z turbíny prochází řadou elektrických zařízení, která upravují proud tak, aby odpovídal síťovému proudu.



Graf 8: výkonová křivka rotoru

Podle výkonové křivky rotoru byl zvolen generátor MGM – RET 20. Jelikož hmotnost generátoru je zvolený koncept rozhodující, bylo potřebné zvolit lehký generátor.

Jeho specifikace lze vidět níže v tabulce:

MGM – RET 20
Max. 13kW a 7-10 kW trvalý výkon
Použitelný pro 63-400 V
Rychlost otáčení 2000 až 8000 ot/min

Tabulka 18 specifikace produktu generátoru MGM – RET 20 [24]

Na základě rozhodnutí o vybraném generátoru je kladen požadavek na použití převodovky, neboť maximální otáčky rotoru nestačí (tj. 820 ot/min). Jsou zvolena ozubená kola s přímým ozubením s převodovým poměrem 1:4.



Obrázek 41: generátor MGM-RET 20 [24]

6.6 Volba Lana

Byl zvolen produkt DuraTen+ od společnosti Teufelberger. Využívána jsou dvě lana, jejichž specifikace je níže uvedena:

Průměr [mm]	Hmotnost [g/m]	Únostnost [kN]	Materiál
7	35	21	PE-UHMW

Tabulka 19: DuraTen+ je vyráběn z polyethylenu

Polyethylen (PE-UHMW) má velmi vysokou molekulovou hmotnost a je relativně levný materiál s vynikajícími mechanickými vlastnostmi. Lana pro systémy létajících větrných elektráren se obvykle vyrábějí z polyethylenu. [19]

6.7 Volba Kabelu

Měď je vhodným materiálem pro vodiče v elektroenergetických aplikacích díky své vysoké elektrické vodivosti a odolnosti proti korozi. Vodiče z mědi umožňují efektivní přenos elektrické energie s minimálními ztrátami. Proto je zvolen měděný kabel. Průřez kabelu rozhoduje proudová zatížitelnost vodiče, která lze počítat takto:

Rovnice 19: proudová zatížitelnost vodiče

$$I = \frac{P}{V} = \frac{10000 \text{ W}}{400 \text{ V}} = 25 \text{ A}$$

Pro izolaci kabelů se používají různé materiály v závislosti na konkrétních požadavcích a předpisech. Polyvinylchlorid (PVC) je široce používaným materiálem pro izolaci kabelů. Je to cenově dostupný materiál s dobrou elektrickou izolací a odolností proti vlhkosti.

S tímto vědomím byl zvolen CYKY-J 3x2,5 mm (počet žil x průřez jádra) měděný kabel.

ZÁVĚR

Cílem diplomové práce byla aerodynamická analýza rotoru v režimu autorotace, pak představení létajících větrných elektráren z historické, technické a designerské stránky. Nakonec se jedná o koncepční a konstrukční návrh létající větrné elektrárny.

První a druhá kapitola se zabývá historií využití větrné energie a zejména charakteristikami větrné elektrárny s tím, že byly popsány jednotlivé typy větrných turbín. Dále je vysvětleno Betzovo pravidlo, které slouží jako podklad pro další kapitoly.

Rešeršní část této práce je věnována systémům létajících větrných elektráren. Tyto systémy jsou zohledněny z hlediska jejich vývoje, oblasti použití, principu činnosti a technologie. Dále jsou představeny různé typy létajících větrných elektráren, které tvoří nezbytnou část této diplomové práce pro její další stupeň.

Praktická část diplomové práce se týká koncepčního a konstrukčního návrhu vybraného typu létající větrné elektrárny. Je vysvětlen režim autorotace rotoru, který popisuje princip činnosti vrtulových větrných elektráren.

Bylo ověřeno, že létající větrné elektrárny oproti klasickým větrným elektrárnám mohou vyrábět více energie v závislosti na vlivu výšky větru. Mezi nedostatky létající větrné elektrárny patří obtížné ovládání a řízení stability. Zajímavá otázka, kterou by bylo potřeba řešit, je optimální výška letu pro létající větrné elektrárny. Sice se s rostoucí výškou dosáhne vyšších rychlostí větru, ale zároveň se zvýšením délky kabelu dochází ke větším ztrátám výkonu. V praktické části diplomové práce byl použit vývaz (bridles) tak, aby lana létající větrné elektrárny neměla významný vliv na těžiště. Nabízí se tedy další otázka, jestli by nebyl dobrý nápad řídit pomocí vývazu úhel náklonu letadla tak, aby se drželo určitého úhlu náběhu (např. při optimálním úhlu náběhu listu vrtule).

Dále praktická část poukazuje proveditelnost navrženého konceptu. Sice létající větrné elektrárny v brzké budoucnosti nenahradí klasické větrné elektrárny, ale se nabízejí alternativu ke klasickým větrným elektrárnám v některých oblastech.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

[1] DRACHMANN, Aage Gerhardt. Heron's Windmill. 1. Dansko: Centaurion, 1961, str.145. ISBN 978- 80-87542-30-9.

[2] Ahmad Y. al-Hassan; Donald R. Hill (1992). Islamic Technology: An Illustrated History. Cambridge University Press. str. 54. ISBN 978-0-521-42239-0.

[3] DOUBEK, Jan, Břetislav KOČ a Radim URBÁNEK. Co roztácel vítr: historie a současnost větrných mlýnů, mlýnků a čerpadel. Brno: Ivo Sperát, 2020. ISBN 978-80-87542-30-9.

[4] Větrné mlýny v Česku, " Větráky " dříve a dnes [online]. [cit. 2021-03-22]. Dostupné z: <http://vetrnemlyny.unas.cz/vm-index.htm>

[5] Skupina ČEZ, Vitr a jeho využití [online]. [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/obnovitelne-zdroje-energie/vetrne-elektrarnypodrobne/vitr-a-jeho-vyuziti/vykklad>

[6] Danish Wind Industry Association, The Wind Energy Pioneer - Poul la Cour [online]. [cit. 2021-03- 22]. Dostupné z: <http://xn--drmstre-64ad.dk/wpcontent/wind/miller/windpower%20web/en/pictures/lacour.htm>

[7] EWEA, Poul la Cour Prize [online]. [cit. 2021-03-24]. Dostupné z: <https://www.ewea.org/sustainability/poul-la-cour-prize/>

[8] Český hydrometeorologický ústav, Vitr [online]. [cit. 2021-04-14]. Dostupné z: <https://www.chmi.cz/aktualni-situace/aktualni-stav-pocasi/ceska-republika/stanice/profesionalnistanice/tabulky/vitr>

[9] Svaz podnikatelů pro využití energetických zdrojů, z.s., Větrné elektrárny [online]. [cit. 2021-03-24]. Dostupné z: <http://www.spvez.cz/pages/OZE/vitr.htm>

[10] MASTNÝ, Petr, Jiří DRÁPELA, Stanislav MIŠÁK, Jan MACHÁČEK, Michal PTÁČEK, Lukáš RADIL, Tomáš BARTOŠÍK a Tomáš PAVELKA. Obnovitelné zdroje elektrické energie. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 254 s. : il. ISBN 978-80-01-04937-2.

- [11] Větrná energie a její využití v České republice. Nazeleno [online]. [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: <https://www.nazeleno.cz/energie/vetrna-energie/vetrna-energie-a-jejivyuziti-v-ceske-republice.aspx>
- [12] Skupina ČEZ, Odporové větrné čerpadlo [online]. [cit. 2021-04-14]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/obnovitelne-zdroje-energie/vetrne-elektrarnypodrobne/odporove-vetrne-čerpadlo/vyklad>
- [13] Skupina ČEZ, Větrná elektrárna s horizontální osou [online]. [cit. 2021-04-14]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/obnovitelne-zdroje-energie/vetrne-elektrarnypodrobne/vetrna-elektrarna-s-horizontalni-osou/vyklad>
- [14] Skupina ČEZ, Vertikální Darrieova turbína [online]. [cit. 2021-04-16]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/obnovitelne-zdroje-energie/vetrne-elektrarnypodrobne/vertikalni-darrieova-turbina/vyklad>
- [15] VOBOŘIL David, Elektrína, Větrné elektrárny - princip, rozdělení, elektrárny v ČR [online]. [cit. 2021-04-16]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/typy-elektaren/vetrne-elektarny-princip-cinnostizakladni-rozdeleni>
- [16] Company X, Project Makani [online]. [cit. 2021-04-20]. Dostupné z: <https://x.company/projects/makani/>
- [17] Altaeros Energy, Taking human error out of the equation [online]. [cit. 2021-04-20]. Dostupné z: <https://www.altaeros.com/technology/>
- [18] Office of ENERGY EFFICIENCY & RENEWABLE ENERGY, Next-Generation Wind Technology [online]. [cit. 2021-04-20]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/eere/next-generation-wind-technology>
- [19] CHERUBINI, A., et al. Airborne Wind Energy Systems: A review of the technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 51: 1461-1476. QUASCHNING, Volker. Understanding renewable energy systems. Routledge, 2016. Dostupné i z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115007005#s0015>
- [20] Jaká je průměrná spotřeba elektřiny u rodinného domu?. Skupina ČEZ [online]. Praha [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/clanky/elektrina/jaka-je-prumerna-spotreba-elektřiny-u-rodinneho-domu-174046>

[21] THE SWISS WIND POWER DATA, ENCO Energie-Consulting AG. Wind Profile. The Swiss Wind Power Data Website [online]. Munzachstrasse 4 4410 Liestal Switzerland [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: <https://wind-data.ch/tools/profile.php?lng=en>

[22] FUKSOVÁ, Michaela. Větrné poměry Brna a okolí. Brno, 2012. Bakalářská práce. Masarykova Univerzita. Vedoucí práce Doc. RNDr. Petr Dobrovolný, CSc.

[23] DEPARTMENT OF EDUCATION OPEN TEXTBOOK PILOT PROJECT, California State University. Wind Profile Evolution. LibreTexts Geo Science [online]. 2022 [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: [https://geo.libretexts.org/Bookshelves/Meteorology_and_Climate_Science/Practical_Meteorology_\(Stull\)/18%3A_Atmospheric_Boundary_Layer/18.03%3A_Section_4-](https://geo.libretexts.org/Bookshelves/Meteorology_and_Climate_Science/Practical_Meteorology_(Stull)/18%3A_Atmospheric_Boundary_Layer/18.03%3A_Section_4-)

[24] MGM Compro [online]. [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: <https://www.mgm-compro.com/electric-motor/13-kw-electric-motor/>

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: první větrný mlýn tzv. Panemone v Sístánu (vlevo)	2
Obrázek 2: schéma větrného mlýnu Panemone (vpravo)	2
Obrázek 3: sloupový mlýn Starý Poddvorov (vlevo)	3
Obrázek 4: holandský mlýn Světlík v obci Horní Podluží (vpravo)	3
Obrázek 5: první automatická větrná turbína v Clevelandu	4
Obrázek 6: první větrná elektrárna v Evropě (vlevo)	5
Obrázek 7: Poul la Cour se studenty (vpravo)	5
Obrázek 8: vertikální Savoniova Turbína	7
Obrázek 9: vrtulová větrná turbína	8
Obrázek 10: ukázka větrné turbíny s americkým kolem	9
Obrázek 11: Darrierova turbína	9
Obrázek 12: Savoniova turbína (vlevo)	10
Obrázek 13: schéma turbíny (vpravo)	10
Obrázek 14: proudění vzduchu přes rotor	12
Obrázek 15: schéma Airborne Wind Energy Systems (AWES), typ Ground-Gen vlevo a typ Fly-Gen vpravo [19]	15
Obrázek 16: schéma dvoufázové diskontinuální výroby energie GG-AWES – vlevo (a) fáze výroby, vpravo (b) fáze návratu se spotřebou energie [19]	16
Obrázek 17: schéma různé koncepce pohyblivých pozemních stanic GG-AWES [19]	17
Obrázek 18: uspořádání řízení GG-AWES s bočním větrem (a) s palubními řídicími akčními členy (b) s létajícím řídicím modulem (c) řízení pomocí silových lan (d) s přídatným řídicím lanem [19]	18
Obrázek 19: různé typy letadel v systémech Ground-Gen (a) LEI SLE (Leading Edge Inflatable, Supported Leading Edge) Kite; (b) LEI C-kite; (c) Foil Kite, design od Skysails; (d) Glider, design od Ampyx Power; (e) Swept rigid wing, design od Enerkite; (f) Semi-rigid wing (poloztužená křídla), design od Kitegen.[19]	19
Obrázek 20: kite má céčkovitý tvar [19]	22
Obrázek 21 Foil Kite od společnosti Kitenergy	23
Obrázek 22: SkySails nejnovější model SKS PN-14	24
Obrázek 23 různé typy systému Fly-Gen	27
Obrázek 24: projekt Makani – malý větroň (vlevo)	28
Obrázek 25: schéma ukotvení projektu Makani (vpravo)	28
Obrázek 26: ilustrace příhradového kluzáku Joby Energy	29
Obrázek 27: létající turbína Altaeros	30
Obrázek 28: Geometrie aerostatu	33

Obrázek 29: model aerostatu vykreslený v Rhinocerosu	33
Obrázek 30: rychlostní trojúhelník	40
Obrázek 31: síly působící na listy rotoru	41
Obrázek 32: model listů varianty NACA.....	43
Obrázek 33: znázornění profilu NACA 63-415.....	44
Obrázek 34: model listů varianty Eppler	46
Obrázek 35: znázornění profilu Eppler E854	46
Obrázek 36: hmotnosti jednotlivých komponentů	54
Obrázek 37: blokové schéma létající větrné elektrárny aerostatu.....	55
Obrázek 38: síly působící na aerostat	55
Obrázek 39: znázornění profilu Clark y.....	56
Obrázek 40 Koncepční létající větrná elektrárna	57
Obrázek 41: generátor MGM-RET 20 [24]	58

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: rozřazení Ground-Gen systémů létajících větrných elektráren	21
Tabulka 2: rozměry aerostatu.....	33
Tabulka 3: četnost rychlostí větru v Brně [22].....	35
Tabulka 4: vyšetřovaný interval	35
Tabulka 5: drsnost povrchu podle typu terénu [23].....	37
Tabulka 6: výsledné rychlosti $V_{z(x)}$ odpovídající patřičné výšce [m/s]	39
Tabulka 7: specifikace listů varianty NACA	43
Tabulka 8: vlastnosti profilu NACA 63-415.....	44
Tabulka 9: specifikace listů varianty Eppler.....	45
Tabulka 10: vlastnosti profilu E854.....	46
Tabulka 11: okrajové podmínky pro iterace.....	47
Tabulka 12: zkroucení listu Eppler E854	50
Tabulka 13: vypočtené výkony rotoru.....	51
Tabulka 14: geometrie a rozměry listu	53
Tabulka 15: okrajové podmínky pro maximální rychlost větru	53
Tabulka 16: porovnání výkonu QBlade s výkony vypočítanými, odchylka je malá, tj. %0.02.	53
Tabulka 17: vzdálenosti jednotlivých komponentů k vztažnému bodě	54
Tabulka 18 specifikace produktu generátoru MGM – RET 20 [24].....	58
Tabulka 19: DuraTen+ je vyráběn z polyethylenu	59

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: vliv výšky na rychlosti větru.....	39
Graf 2: vliv TSR na součinitel výkonnosti rotoru	48
Graf 3: závislost TSR na součiniteli axiální síly.....	48
Graf 4: porovnání profilů ohledně zkroucení listu.....	50
Graf 5: klouzavost profilu v závislosti na úhlu náběhu	52
Graf 6: součinitel výkonnosti v bodě TSR=7 odpovídá přibližně 0,39	53
Graf 7: vztlková čára profilu clark y	57
Graf 8: výkonová křivka rotoru	58

SEZNAM ROVNIC

Rovnice 1: výkon větrné turbíny	11
Rovnice 2: kinetická energie před rotorem	12
Rovnice 3: kinetická energie za rotorem	12
Rovnice 4: množství vzduchu protékajícího přes rotor	12
Rovnice 5: celý vzorec pro výpočet kinetické energie	12
Rovnice 6: upravený vzorec pro výpočet kinetické energie	12
Rovnice 7: derivovaná funkce pro výpočet kinetické energie	13
Rovnice 8: derivovaná funkce pro výpočet kinetické energie v maximu	13
Rovnice 9: aerostatická vztlaková síla	33
Rovnice 10: čistá vztlaková síla	34
Rovnice 11: logaritmický model větru	36
Rovnice 12: výpočet rychlosti	37
Rovnice 13: součinitel výkonnosti rotoru	47
Rovnice 14: součinitel axiální síly	47
Rovnice 15: předběžný výpočet výkonu	51
Rovnice 16: výpočet těžiště	54
Rovnice 17: momentová rovnováha	55
Rovnice 18: přítlak horizontálního stabilizátoru	55
Rovnice 19: proudová zatížitelnost vodiče	59