VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV
ENERGY INSTITUTE

KONSTRUKCE A STAVBA VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY
CONSTRUCTION AND BUILDING OF A WIND TURBINE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE Šimon Pavlík
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Ing. Jiří Škorpík, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2021

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Energetický ústav
Student:	**Šimon Pavlík**
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	**Ing. Jiří Škorpík, Ph.D.**
Akademický rok:	2020/21

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 bakalářské práce:

Konstrukce a stavba větrné elektrárny

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Větrné elektrárny využívají energie větru, jsou budovány v krajině s omezenou infrastrukturou a tomu musí být přizpůsobena i jejich konstrukce.

Cíle bakalářské práce:

1. Principy větrné elektrárny.
2. Konstrukce velkých větrných elektráren. Výhody, nevýhody a problémy velkých konstrukcí.
3. Stavba větrné elektrárny včetně logistického hlediska.
4. Multirotorové větrné elektrárny, jejich výhody/nevýhody.

Seznam doporučené literatury:

HAU, Erich, Wind Turbines – fundamentals, technologies, Applications, Economics, 2006. 2. vydání. Springer Berlin Heidelberg New York, ISBN – 10-3-540-24240-6.

ŠKORPÍK, Jiří. Využití energie větru, Transformační technologie, 2006-10, [last updated 2020-09-10]. Brno: Jiří Škorpík, [on-line] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. Dostupné z https://www.transformacni-technologie.cz/04.html.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D. ředitel ústavu	doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D. děkan fakulty

ABSTRAKT

Cieľom tejto bakalárskej práce je vypracovanie rešerše, ktorá sa zaoberá konštrukciou a stavbou veľkých veterných elektrární. V prvej kapitole bakalárskej práce je zhrnutá teória potenciálnej energie vetra a základné princípy fungovania veternej elektrárne. Druhá kapitola sa venuje rozboru a popisu funkcie jednotlivých častí elektrárne a ich rôznymi prevedeniami v závislosti od požiadaviek. Tretia kapitola popisuje problematiku v preprave a stavbe veternej elektrárne, zahŕňa základné stavebné a logistické mechanizmy. Posledná časť je venovaná konceptu multi-rotorovej elektrárne, ktorá môže predstavovať budúcnosť veternej energetiky.

Kľúčové slová

veterná elektráreň, konštrukcia, preprava, stavba

ABSTRACT

The aim of the bachelor thesis is to write a background research which deals with construction and building process of big wind turbines. The theory of potential wind energy and fundamental principal of the wind power are introduced in the first chapter of this bachelor thesis. The second chapter deals with the description of each part of wind turbine and the differences in their construction depending on individual needs. Third chapter presents problems and solutions of transportation and construction of wind turbines. Fundamental building and logistic mechanisms are also included. The last part of this bachelor thesis is focused on multi-rotor wind turbines which can represent the future in the wind power industry.

Key words

wind turbine, construction, transport, building

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

PAVLÍK, Šimon. *Konstrukce a stavba větrné elektrárny* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132147. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Jiří Škorpík.

PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že som bakalársku prácu na tému Konstrukce a stavba vetrné elektrárny vypracoval samostatne s použitím odbornej literatúry a prameňov, uvedených v zozname, ktorý tvorí prílohu tejto práce.

---------- ----------

Dátum Šimon Pavlík

POĎAKOVANIE

Ďakujem týmto Ing. Jiřímu Škorpíkovi, Ph.D. za cenné pripomienky a rady, ktoré mi poskytol pri vypracovaní záverečnej práce. Poďakovanie tiež patrí mojej rodine, ktorá ma vždy podporovala v štúdiu.

OBSAH

ÚVOD 11
1 Princíp fungovania veternej elektrárne 12
1.1 Energia vetru 12
1.2 Využitie prúdenia vzduchu 13
1.2.1 Výkon vetra 13
1.3 Výber lokality pre stavbu veternej elektrárne 14
1.4 Merania rýchlosti vetra 14
1.5 Vplyv výšky a morfológie krajiny na energetický výnos veternej elektrárne 15
1.6 Ročné obdobia a ich vplyv na energetický výnos 16
2 Konštrukcie veľkých veterných elektrární 17
2.1 Gondola 17
2.2 Rotorová časť 18
2.2.1 Regulácia výkonu 19
2.3 Prevodová časť veternej elektrárne 20
2.4 Generátory a spôsob dodávanie do siete 20
2.4.1 Synchrónny generátor striedavého prúdu 20
2.4.2 Asynchrónne generátory striedavého prúdu 21
2.5 Brzdný mechanizmus 21
2.6 Stožiar veternej elektrárne 22
2.7 Základy 23
3 Preprava a inštalácia veternej elektrárne 24
3.1 Infraštruktúra a logistika 24
3.2 Prepravné a stavebné mechanizmy VtE 24
3.2.1 Teleskopické prívesy 24
3.2.2 Príves s uchytením pre lopatky 25
3.2.3 Vežový príves 25
3.2.4 Budúcnosť v preprave konštrukcií VtE 26
3.2.5 Žeriavová technika 26
3.3 Postup stavby veternej elektrárne 27
4 Multi-rotorové veterné elektrárne 29
ZÁVER 31
ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV 32
ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK 35
ZOZNAM OBRÁZKOV 36
ZOZNAM TABULIEK 37
ZOZNAM PRÍLOH 38

ÚVOD

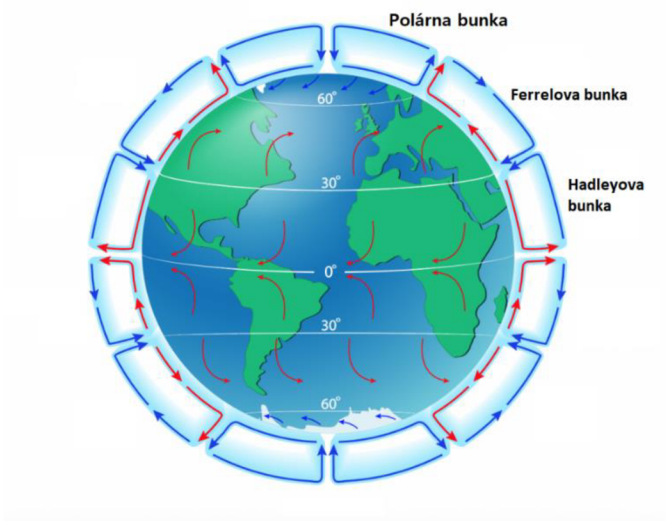
Na našej planéte každoročne stúpa priemerná ročná teplota. Je to jav, ktorý nazývame globálne otepľovanie a je spôsobený ľudským zásahom do prírody. Medzi hlavné príčiny globálneho otepľovania patrí spaľovanie fosílnych palív, odlesňovanie a zvýšený chov dobytku. Spaľovanie ropy, uhlia a plynov so zámerom tvorby elektrickej a mechanickej energie produkuje veľké množstvo škodlivých emisií vo forme CO_2, ktoré nepriaznivo vplývajú na zmenu klímy a životné prostredie. Je veľmi dôležité, aby prišlo k zastaveniu a odvráteniu škôd spôsobených globálnym otepľovaním. Dôraz sa kladie na obnoviteľné zdroje energie, ktoré vyrábajú elektrickú energiu bez tvorby škodlivých emisií. Tieto zdroje majú tvoriť až tretinu energie vyprodukovanej v Európskej Únii do roku 2030.

Bakalárska práca je zameraná na obnoviteľný zdroj veternej energie. Je to zdroj, ktorý nič nestojí a je možné ho transformovať na iný typ energie. Vietor ako zdroj energie sa vo svete využíva už niekoľko tisíc rokovo, od zavlažovania pomocou veterného kolesa, lodí poháňaných plachtou až po veterné elektrárne v 21. storočí. Dnešné veterné elektrárne veľkých rozmerov fungujú na fyzikálno-technickom princípe, ktorý sa vyznačuje vysokým indexom účinnosti a efektivitou výroby elektrickej energie. Veterná energia je dnes jedným z najrýchlejšie rastúcich zdrojov elektrickej energie. Tento trend možno spojiť s jej viacerými výhodami, napríklad sa jedná o trvalo udržateľnú a zelenú energiu, ktorá je vďaka technologickému pokroku konkurencie schopný zdroj energie. Napriek všetkým týmto výhodám sa veterná energetika stretáva s problémom stále sa zväčšujúcich konštrukcií veterných turbín. Veľké veterné elektrárne dosahujú vysoký výkon, ale ich transport a inštalácia sú komplikované. Cieľom bakalárske práce je vysvetliť základné princípy fungovania veternej elektrárne, popis konštrukcie veternej elektrárne, možnosti transportu a stavby veternej elektrárne. Ako aj popis multi-rotorovej veternej elektrárne, ktorá predstavuje perspektívnu budúcnosť veternej energetiky.

1 Princíp fungovania veternej elektrárne

1.1 Energia vetru

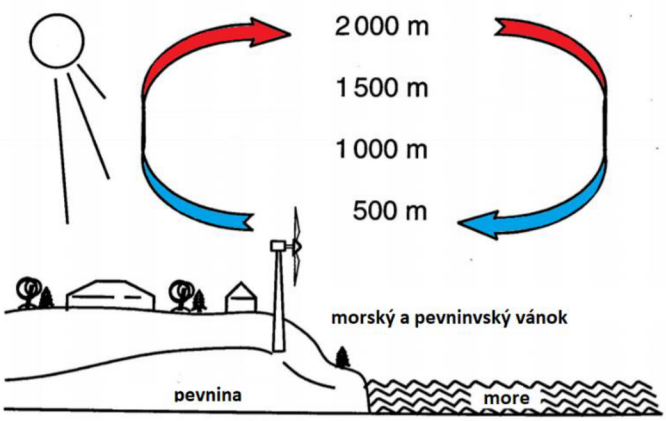
Energiou vetra je myslená merná kinetická energia prúdiaceho vzduchu a je podmienená slnečným žiarením. Jedná sa o prenos tepla medzi pólmi a rovníkom, ktorý je spôsobený nerovnomerným dopadom slnečnej energie na zem. Tento proces je znázornený modelom všeobecnej cirkulácie atmosféry, v ktorom vznikajú cirkulačné bunky (obr. 1.1). Energiu vetra určujú tlakové a teplotné pomery v danej oblasti. Vietor primárne vzniká medzi dvoma miestami z rozdielnym tlakom vzduchu, kde sú vzduchové častice uvádzané do pohybu silou pôsobiacou v smere tlakového spádu takzvanou silou tlakového gradientu. [1; 2; 3]



Obr. 1.1 Všeobecná cirkulácia atmosféry na zemi [4].

V prímorských oblastiach je možné pozorovať prúdenie vzduchu v dôsledku morského a pevninského vánku. Morský vánok je chladný a prúdi smerom na pevninu, následne sa ohreje a stúpa ako pevninský vánok do atmosféry. V noci sa tento smer prúdenia zvyčajne mení, pretože sa pevnina ochladzuje rýchlejšie ako morská plocha. [5; 3]

Približne 2 % energie slnečného žiarenia na svete sa premení na pohyb vzduchu, to je približne 3 TW využiteľného výkonu energie vetra. Tento objem energie predstavuje niekoľko násobnú primárnu spotrebu energie ľudstva, ale využiteľná je len časť z nej. [2]



Obr. 1.2 Pevninský a morský vánok [5].

1.2 Využitie prúdenia vzduchu

Energetický potenciál prúdenia vzduchu nie je stály ale kolísavý. Pri výpočte má zásadný význam rýchlosť vetra, pretože výkon rastie s jeho treťou mocninou. Pričom táto rýchlosť je určovaná vo výške osy rotoru a do úvahy sa musí brať hustota vzduchu, ktorá sa mení s narastajúcou nadmorskou výškou. [5]

1.2.1 Výkon vetra

Kinetická energia prúdiaceho vzduchu je

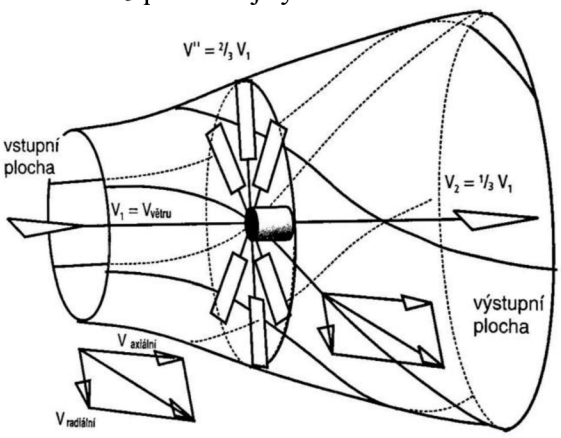
$$e_k = \frac{1}{2} \cdot c^2 \; [J \cdot kg^{-1}], \tag{1.}$$

Teoretický výkon vetru P_t [W] je popísaný rovnicou,

$$P_t = e_k \cdot \dot{m} = e_k \cdot c \cdot A \cdot \rho = \frac{1}{2} \cdot A \cdot \rho \cdot c^3 \; [W], \tag{2.}$$

kde $\dot{m}$ $[kg \cdot s^{-1}]$ je hmotnostný prietok, c $[m \cdot s^{-1}]$ je rýchlosť prúdenia, A $[m^2]$ plocha rotoru a ρ $[kg \cdot m^{-3}]$ je hustota vzduchu.

V prípade teoretického výkonu P_t [W] sa predpokladá, že vietor bol celkovo zabrzdený. Do úvahy musíme zobrať, že nie je možné zabrzdiť celé prúdenie vzduchu a tým pádom sa nedá využiť ani celá jeho potenciálna energia. Veterné elektrárne využívajú len časť tejto energie, ktorá je reprezentovaná Betzovým výkonnostným koeficientom o hodnote 59,3 % potenciálnej energia. Tento koeficient predstavuje pomer rýchlostí vetru pred a za lopatkami konvertoru, ktorý spomalí prúd vzduchu a odoberie mu maximum energie. Optimum sa dosiahne, ak rýchlosť vzduchu za lopatkami má $^1/_3$ pôvodnej rýchlosti.



Obr. 1.3 Pomer prúdenia vzduchu pred a za rotorom turbíny [5].

Potom skutočný výkon rotoru veternej elektrárne bude

$$P_i = P_t \cdot c_p = c_p \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot c^3 \; [W], \tag{3.}$$

kde c_p [-] predstavuje výkonnostný koeficient, ktorý je definovaný ako pomer skutočného výkonu k teoretickému, je udávaný pre lopatkové stroje, kde zohľadňuje straty a reálny prietok vzduchu. Dnešné moderné veterné elektrárne dosahujú za ideálnych veterných podmienok

výkonnostný koeficient necelých 50 %.Výkon, ktorý môže produkovať veterná turbína, udáva výkonová krivka, ktorá je základnou súčasťou každej veternej elektrárne. [3; 5]

1.3 Výber lokality pre stavbu veternej elektrárne

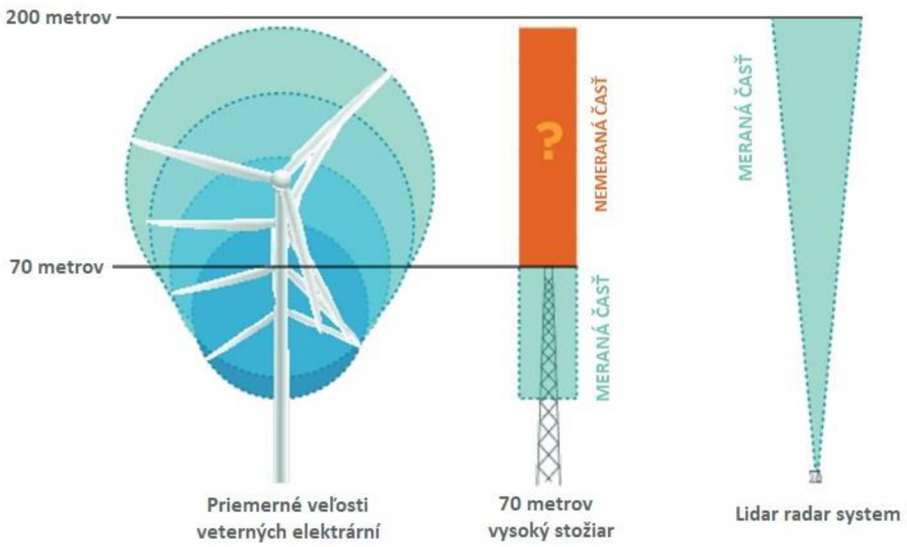
Pre čo najefektívnejší výkon veternej elektrárne je potrebný výber a posúdenie vhodnej lokality. Z toho dôvodu sa ešte pred stavbou vykonáva expertíza výnosu energie pre danú lokalitu. Pre plánovanie energetického zisku je jeden z najpodstatnejších faktorov priemerná ročná rýchlosť vetra v tejto lokalite. K jej zisteniu nám slúžia zónové mapy vetra.

V meteorologických staniciach sa rýchlosť vetra meria približne v 10 m nad povrchom zeme. Namerané hodnoty strednej rýchlosti vetru na veľkej rozlohe sú vykreslené na mapách a znázornené pomocou isotach. Ďalšia dôležitá hodnota prúdenia pre danú lokalitu je stredná doba bezvetria popisujúca energetický výnos v závislosti na kolísaní rýchlosti vetru. Za ideálnych podmienok sa vo vytypovanej lokalite robí presné meranie rýchlosti vetra po dobu niekoľkých mesiacov, ideálne po dobu jedného roku. [5; 6]

1.4 Merania rýchlosti vetra

Pre posúdenie stanoviska sú dôležité dlhodobé merania meteorologických údajov: teploty, vlhkosti vzduchu, tlaku vzduchu, smeru a rýchlosti vetra, a následné vytvorenie funkcií týchto údajov v závislosti na časte a výške nad povrchom. [5]

Tieto merania sa robia pomocou meracích stožiarov, na ktorých sú inštalované anemometre alebo modernou technológiou žiarenia UV radarov umiestených na zemi. Lidar radar od spoločnosti Mitsubishi funguje na princípe vysielanie laserového lúču a pomocou odrazeného svetla meria rýchlosť vetra. Oproti konvenčným meteorologickým meracím prístrojom, ktoré sú pripevnené na stožiari a sú limitované výškou, v ktorej sa meranie robí, a zároveň merajú rýchlosť vetra iba v jednom bode, má Lidar radar výhodu. Výhodou laseru je možnosť merať presnú rýchlosť vetru vo viacerých výškach, čo je dôležité pri efektívnom projektovaní veternej elektrárne. [7]



Obr. 1.4 Porovnanie rozsahu merania konvenčnej metódy na stožiari a systému Lidar radar [8].

1.5 Vplyv výšky a morfológie krajiny na energetický výnos veternej elektrárne

Zem a jej štruktúra má veľký vplyv na rýchlosť prúdenia vzduchu nad jej povrchom, ktorý vyvoláva deformácie prúdenia. Princípom deformácie je obtekanie a pretekanie ortografických prekážok. Malá drsnosť terénu dokáže ovplyvňovať prúdenie vzduchu do výšky 300 m nad povrchom, pri vyššom zdrsnení až do výšky 600 m. Tento rozsah sa nazýva hrúbka medznej vrstvy. Nad touto vrstvou je vietor nezávislý od drsnosti povrchu zeme. Deformáciou prúdenia dochádza k znižovaniu, ale zriedkavo aj k zvyšovaniu rýchlosti prúdenia. Ako príklad deformácie, pri ktorej narastá rýchlosť prúdenia vzduchu, môžeme uviesť horu alebo horský hrebeň, kde nárast rýchlosti prúdenia môže byť až o 80 % v ideálnom prípade (obr. 1.5).

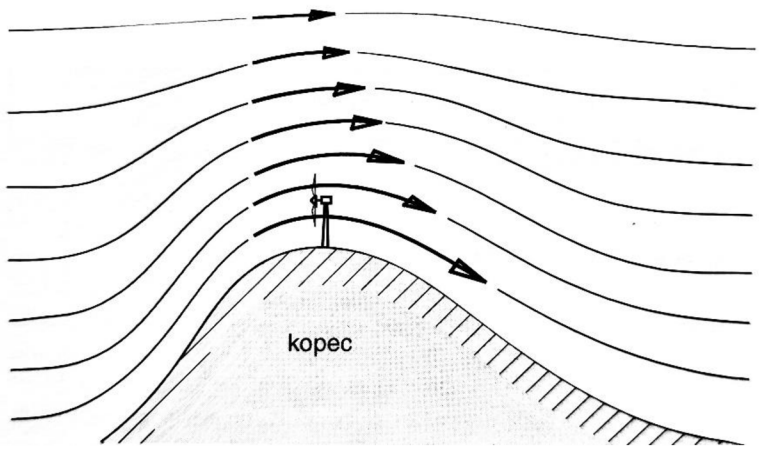
V medznej vrstve je závislosť rýchlosti prúdenia vzduchu funkciou výšky a drsnosti povrchu. Ak poznáme rýchlosť vetru v určitej výške (napríklad 10 m) je možné odhadnúť rýchlosť pre iné výšky pomocou vzorca:

$$v_2 = v_1 \cdot \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^a \; [m \cdot s^{-1}], \qquad (4.)$$

kde v_2 $[m \cdot s^{-1}]$ je hľadaná rýchlosť vetra vo výške h_2 a h_1 [m] je referenčná výška, v ktorej bola nameraná rýchlosť vetra v_1 $[m \cdot s^{-1}]$. Exponent a [-] je závislý na typu povrchu krajiny a je určený podľa tabuľky (tab. 1.1), ktorá ho rozdeľuje do štyroch tried drsnosti povrchu. Obzvlášť dôležité pre presnosť výpočtu je, aby prúdenie vzduchu malo nízky turbulentný charakter. [5]

Tab. 1.1 Triedy drsnosti podľa charakteru krajiny.

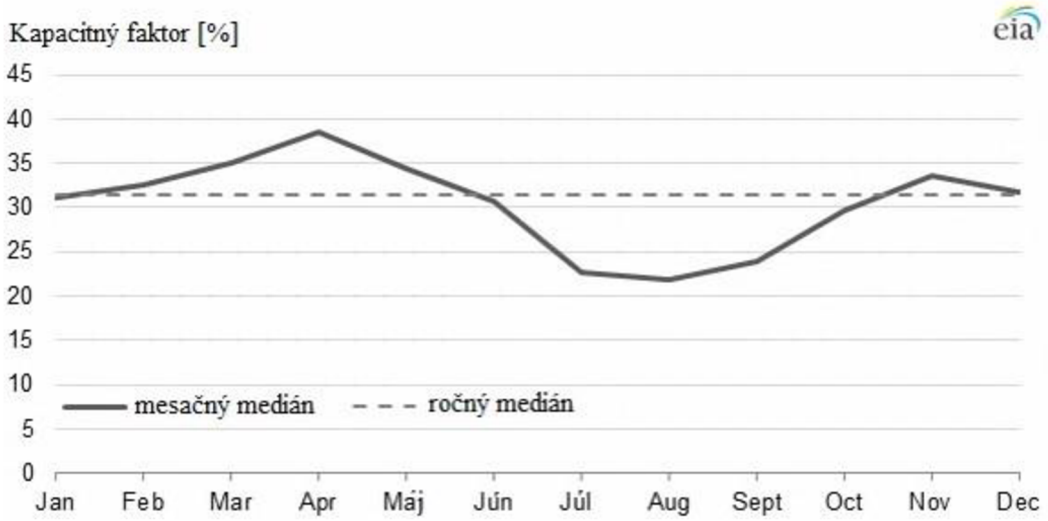
Trieda drsnosti	*Charakter krajiny*	*Dĺžka nerovnosti*	*Exponent* a
0	Otvorená krajina bez akýchkoľvek prekážok s vetrom smerujúcim k pobrežiu	0,001 m	0,12
1	Otvorená krajina s ojedinelými voľne stojacimi kríkmi a stromami	0,01 m	0,15
2	Poľnohospodársky kraj s rozptýlenými budovami a kríkmi	0,05 m	0,18
3	Uzatvorená krajina s porastom stromov a s veľkým množstvom kríkov a susediacimi budovami	0,3 m	0,24



Obr. 1.5 Deformačné zrýchlenie na povrchom horského vrcholu alebo hrebeňa [5].

1.6 Ročné obdobia a ich vplyv na energetický výnos.

Na energetický výnos v našich podmienkach má vplyv aj zmena energetického obsahu vetra v priebehu ročných období a jej kolísavý charakter. Množstvo elektrickej energie, ktorú vyrába elektráreň v porovnaní s jej potenciálnym maximom definuje kapacitný faktor. Pomocou kapacitného faktoru možno dobre znázorniť zmenu výnosu elektrickej energie veternej elektrárne v priebehu roka. [9]



Obr. 1.6 Kapacitný faktor v priebehu roka [9].

Vplyv energetického obsahu vetra počas roka možno ukázať aj na príklade: pokiaľ je priemerná ročná rýchlosť vetra 6 $m \cdot s^{-1}$, reprezentovaná rýchlosťou 5 $m \cdot s^{-1}$ v lete a 7 $m \cdot s^{-1}$ v zime, tento rozdiel vyzerá ako zanedbateľná odchýlka. Ak danú situáciu prenesiem do výkonu VtE, tak energia získaná v zime by bola viac než dvojnásobná ako v lete. [2]

2 Konštrukcie veľkých veterných elektrární

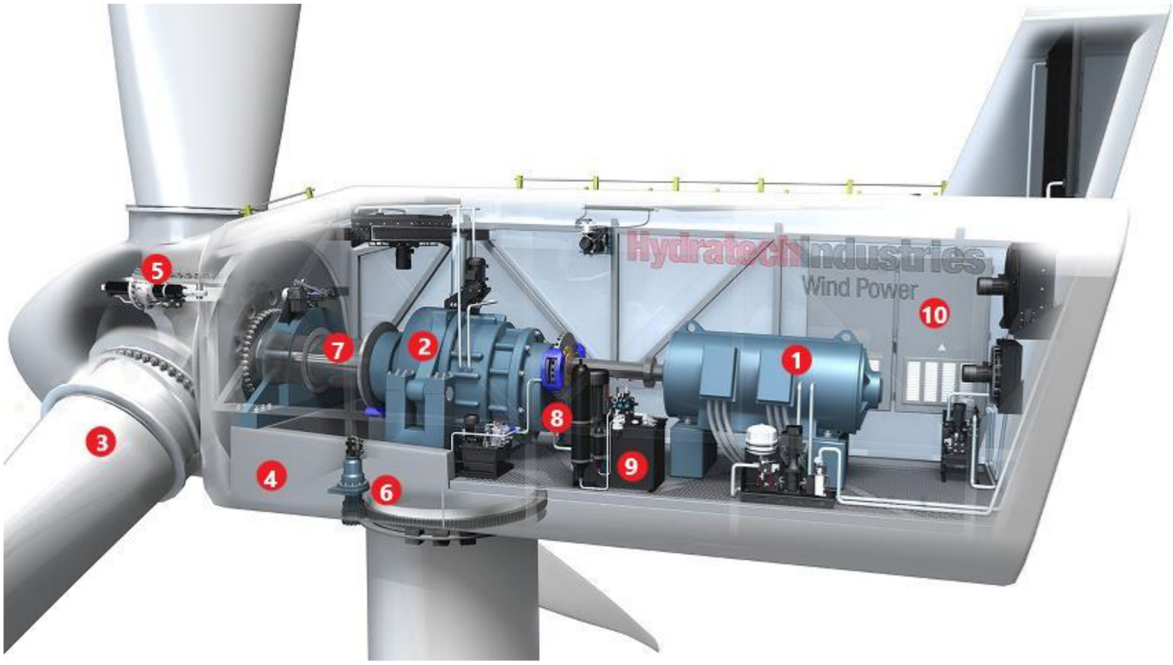
Veľké veterné elektrárne spadajú do kategórie s výkonom stoviek kW až jednotiek MW a sú využívané pre napájanie miest, dedín a najčastejšie dodávajú energiu do elektrickej siete. Časti konštrukcie veternej elektrárne ako výška veže, kontrolné systémy, počet lopatiek a ich tvar by mali byť optimalizované tak, aby vedeli využiť čo najväčšie množstvo veternej energie v danej lokalite. Konštrukciu elektrární je možno rozdeliť do troch základných častí, a to:

- rotorová časť (listy rotora, náboj),
- generátor (ovládacie systémy, prevodovka),
- podporná konštrukcia (základy, stožiar, mechanizmus natáčania rotora).

2.1 Gondola

Gondola je technická miestnosť umiestnená na vrchole stožiara v ktorej sa nachádzajú hlavné časti VtE, hnacie ústrojenstvo a riadiace systémy. Gondola je prístupná pre servisné účely a je možno sa do nej dostať schodiskom alebo výťahom. Externe viditeľnú časť gondoly tvorí kryt, ktorý chráni jej vnútorné komponenty a slúži aj ako zvuková izolácia.

Gondola je vybavená systémom natáčania. Tento mechanizmus používajú všetky veľké veterné turbíny a slúži k natočeniu horizontálnej osy gondoly optimálnym smerom k prúdeniu vetra. Natočenie turbíny nie je dôležité len z pohľadu využitia plného potenciálu vetra, ale aj preto, aby sa redukovalo únavové zaťaženie na čepele rotora, ktorému by boli vystavené pri zlom natočení. Jedná sa o mechanizmus, kde gondola je umiestnená na klznom ložisku, využívajúc elektromotory a prevodovky k správnemu natočeniu. Tento systém je riadený podľa aktuálnych dát, ktoré sú niekoľkokrát za sekundu vyhodnocované na základe smeru vetra. [10; 3; 11]

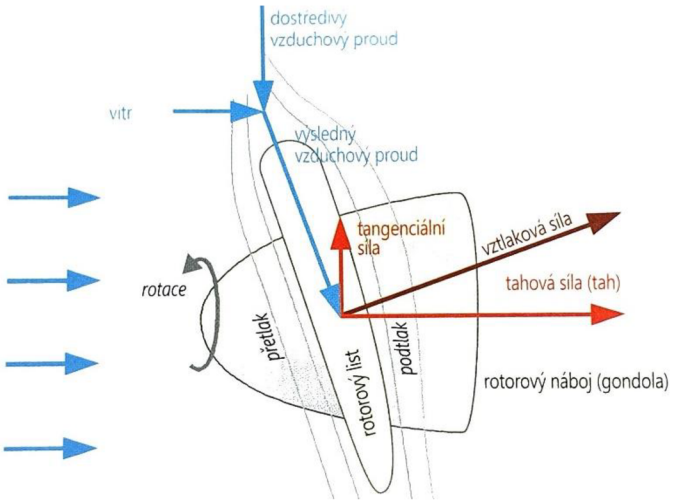


Obr. 2.1 Gondola veternej elektrárne [12].

1 - generátor
2 - prevodovka
3 - listy rotora
4 - kryt gondoly
5 - systém natáčania lopatiek
6 - systém natáčania gondole
7 - hriadeľ rotora
8 - mechanická brzda
9 - hydraulický systém
10 - chladiaci systém

2.2 Rotorová časť

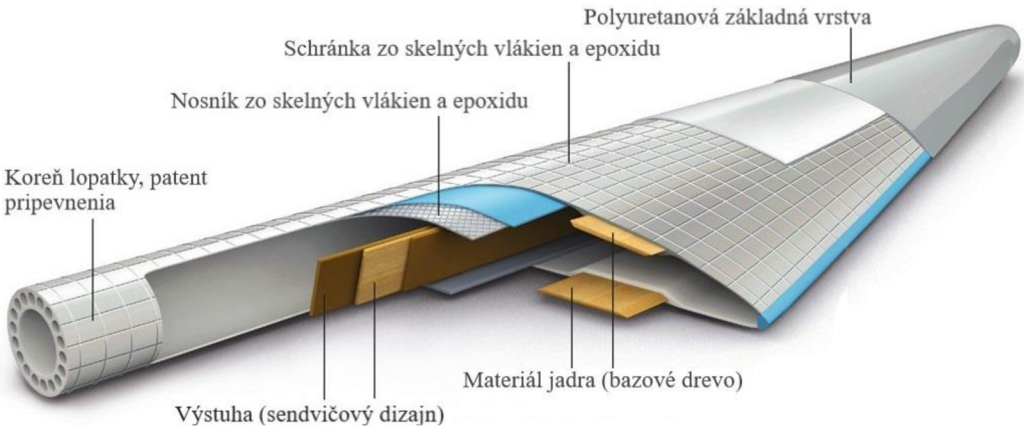
Listy veternej turbíny pracujú na vztlakovom princípe a sú navrhnuté podobne ako krídla lietadla. Na listy rotora pôsobí prúd vzduch zložený z dvoch zložiek. Prvou zložkou je vietor, ktorý prúdi z prednej strany na list. Druhou zložkou je dostredivý prúd vzduchu spôsobený rotáciou listou. Výsledný prúd prúdi pozdĺž listu a vplyvom tvaru lopatky vzniká na spodnej strane pretlak a na vrchnej strane podtlak. Tento rozdiel tlakov vytvára vztlakovú silu pôsobiacu na lopatku. Vztlaková sila sa rozkladá na silu ťahovú, ktorá pôsobí v smere osy rotora a na silu tangenciálnu, ktorá je menšia a spôsobuje otáčanie rotora. Ťahová sila vytvára ohybový moment na liste a nie je možné ju využiť. [3]



Obr. 2.2 Grafické znázornenie prúdov a síl pôsobiacich na list rotora [5].

S narastajúcim dopytom vyššieho výkonu veterných elektrární narastajú aj rozmery rotorov veterných turbín, a to pri výkone 5 MW až na 115 m v priemere. [3] Väčšina rotorov turbín pozostáva z troch listov posunutých voči sebe o 120 °. Listy sú pripevnené na náboj mechanizmom, ktorým sa reguluje natočenie lopatiek tak, aby koeficient c_p bol, čo najväčší pre danú rýchlosť vetra.

Samostatné listy rotora plnia dôležitú funkciu, ktorou je zachytávanie energie vetra. Veľkosť listu rotora hrá veľkú rolu, pretože ak predĺžime dĺžku listu dvojnásobne, zvýšime tým štvornásobne množstvo zachytenej energie. [13] Zväčšovanie rozmerov v tomto pomere ale prináša aj nevýhody v podobe hmotnosti, ktorá narastie osemnásobne. Z tohto dôvodu je väčšina listov rotora vyrábaných z polyestru alebo epoxidu vystuženého sklenými vláknami, prípadne uhlíkovými vláknami alebo para-armidovým vlákanom (kevlarom). Tieto kompozitné materiálny poskytujú veľmi dobré mechanické vlastnosti a zároveň sú ľahké. [14]



Obr. 2.3 Konštrukcia lopatky veternej turbíny [15].

Listy lopatiek a ich nábežná hrana prúdenia sú vystavované veľkému chemickému a mechanickému namáhaniu v podobe dažďa, snehu, ľadu a prachový častíc vo vzduchu. Toto namáhanie zapríčiňuje abrazívne poškodenie lopatiek a zníženie aerodynamickej účinnosti. Lopatky sú vizuálne kontrolované pri servisných prehliadkach a zvyčajne po 20 rokoch opravované. [16]

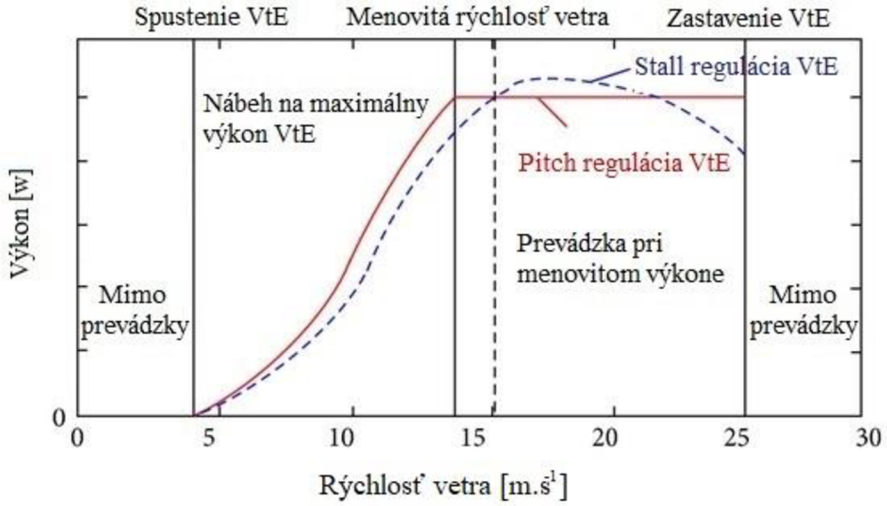
2.2.1 Regulácia výkonu

Aby zvyšovaním rýchlosti prúdenia, ktoré vedie k zvyšovaniu výkonu, nedošlo k poškodeniu generátora alebo iných častí VtE, je potrebná regulácia otáčok rotora. Jedná sa o tri typy regulácií:

- Regulácia „stall“
  Tento spôsob regulácie sa väčšinou využíva pre VtE pod 1000 kW. Konštrukčne najjednoduchšia metóda regulácie s konštantne nastavenými listami. [17; 18]

- Regulácia „pitch“
  Jedná sa o aktívny regulačný systém, ktorý na základe vstupných dát generátoru priebežne reguluje natočenie listov zväčšovaním uhlu tak, aby maximalizoval výkon VtE pri každej rýchlosti vetra. Systém regulácie umožňuje jednoduchý štart zmenou uhlu nábehu prúdenia a pri extrémnych rýchlostiach vetra zmena natočenia redukuje zaťaženie lopatiek. Medzi nevýhody možno radiť zložitejšiu konštrukciu náboja a s tým spojenú vyššiu cenu a servisné náklady. [17; 18]

- Aktívna regulácia „stall“
  Princíp fungovania je podobný ako pri regulácií „pitch“, hlavnou zmenu tvorí opačný smer uhlu nastavenia lopatky. Týmto nastavením lopatky je turbína regulovaná odtrhnutím prúdu. Výhodou je presnejšia regulácia a nižšie znečistenie na nábežných hranách lopatky. Regulácia „active stall“ je využívaná pri VtE nad 1 MW. [17; 18]



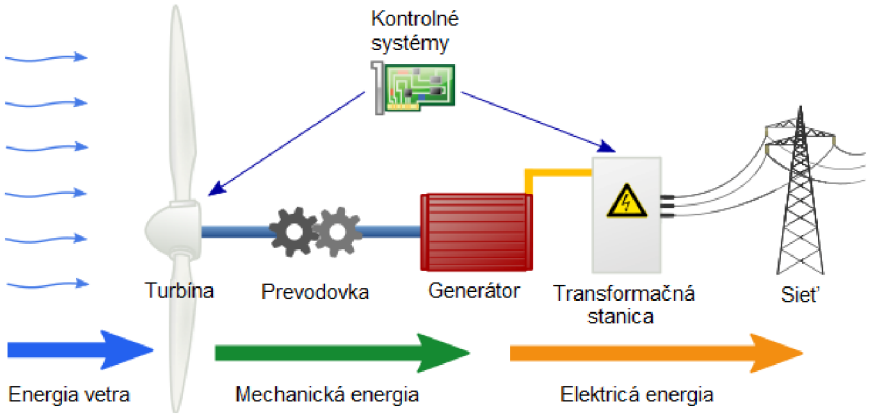
Obr. 2.4 Charakteristické výkonové krivky pri regulácii výkonu "pitch" a "stall", podľa [19].

2.3 Prevodová časť veternej elektrárne

V dnešnej dobe väčšina vetrených elektrární používa konvenčnú metódu generátora spojeného s prevodovkou, kde je mechanická energia prenášaná pomocou hriadeľa uloženého vo valivom ložisku na prevodovku, odtiaľ na generátor. Pri veterných elektrárňach nad 500 kW sa otáčky rotoru pohybujú okolo 5 - 20 min^{-1}. Otáčky vstupujú do viacstupňovej planétovej prevodovky alebo kombinovanej niekoľko stupňovej prevodovky, kde sa z nízkych otáčok a veľkého momentu transformujú konštantným pomerom 1:70 až 1:200 na vysoké otáčky s nízkym krútiacim momentom pre dosiahnutie vysokej účinnosti. [20]

Na trhu existujú aj prevodovky s premenlivým prevodovým pomerom a synchrónnym generátorom. Prevodovka funguje na základe hydrostatického prevodu na druhom stupni planétovej prevodovky, ktorý dokáže plynule regulovať prevodový pomer podľa sily vetru a rýchlosti otáčok rotoru. Prenos výkonu z prevodovky na generátor sa vždy uskutočňuje pomocou kompozitnej spojky. [21]

Ďalší používaný typ hnaného ústrojenstva je priamy pohon, funguje bez prevodového mechanizmu s nízkootáčkovým generátorom a veľkým počtom pólových párov. [3]



Obr. 2.5 Schematické zobrazenie transformácie energie [22].

2.4 Generátory a spôsob dodávanie do siete.

Generátory veterných elektrární transformujú mechanickú energiu na elektrickú a môžeme ich rozdeliť na dva základné typy.

2.4.1 Synchrónny generátor striedavého prúdu

Veterné elektrárne využívajúce viac pólové synchrónne generátory, používajú konštrukciu rotora s elektromagnetmi, ktoré sú napájané jednosmerným prúdom zo siete takzvané - electrically excited synchronous generator (EESG). Alebo rotory s permanentnými magnetmi - permanent magnet synchronous generator (PMSG). Frekventovanejšia technológia PMSG funguje na princípe rotora poháňaného turbínou, ktorý sa otáča v statore a generuje trojfázový elektrický prúd. Variabilita rýchlosti vetra neumožňuje PMSG vyrábať prúd s presnou frekvenciou. Z tohto dôvodu sú PMSG pripojené k AC-DC-AC transformátoru, kde je striedavý prúd s premenlivou frekvenciou a veľkosťou usmernený na pevný jednosmerný prúd a následne transformovaný na striedavý prúd s periódou 50 Hz. Technológia PMSG sa používaná aj pri turbínach s priamym pohonom, ktorá odbúrava chyby spôsobené prevodovkou. Ich nevýhodou je nutnosť vysokého počtu pólov, ktorými sa zvyšuje ich hmotnosť a rozmery. Tento typ generátoru používa 2,3 MW VtE Enerco E82 s výstupným napätím 690 V. [23] [24]

2.4.2 Asynchrónne generátory striedavého prúdu

Väčšina veterných elektrární na svete využíva trojfázový asynchrónny generátor, ktorý sa tiež nazýva indukčný generátor. Jeho výhodami sú spoľahlivosť, cena a schopnosť absorbovať kolísanie otáčok rotora. Asynchrónny generátor sa od synchrónneho odlišuje rotorovou časťou, ktorá je tvorená klietkovým rotorom pripojeným priamo do trojfázovej siete. Asynchrónny generátor pracuje s otáčkami vyššími ako sú menovité, takzvanými nadsynchrónnymi. Z tohto dôvodu musí byť generátor spojený s rotorom cez prevodovku. Jeho nevýhodou oproti PMSG je nutnosť pripojenia k sieti z dôvodu magnetizácie statora pri štarte. Ekvivalentom pripojenia k sieti môže byť batéria alebo malý naftový generátor. Tento typ generátora je používaný u 3 MW VtE Vestas V90, jeho výstupné napätie je 1000 V o frekvencií 50 Hz. [25; 24]

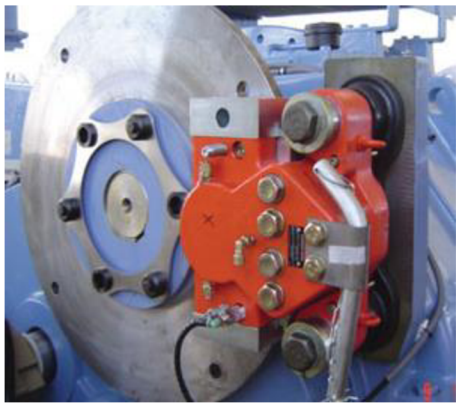
Spôsob dodávania do siete sa realizuje transformáciou napätia v transformačnej stanici, ktorá je súčasťou VtE alebo je v jej blízkosti. Výstupné napätie generátoru o veľkosti 600-1000 V sa transformuje na vysoké napätie približne 22 kV, ktoré sa dodáva do prenosovej sústavy. Transformáciou na vysoké napätie je možné eliminovať prenosové straty.

2.5 Brzdný mechanizmus

Súčasťou každej veternej elektrárne musí byť brzdný systém, ktorý dokáže zastaviť turbínu v prípade poruchy alebo zlých poveternostných podmienok. Vo väčšine prípadov sa jedná o systém, ktorý pozostáva z dvoch nezávislých brzdných mechanizmov a to:

- Aerodynamická brzda
  Brzda, ktorá spočíva v otáčaní listov rotora o 90 ° tak, aby lopatky kládli čo najmenší odpor vetru. Opačný vztlak pôsobiaci na list rotoru sa v dnešnej dobe používa ako primárny brzdný systém. Výhodou tohto systému je plynulé zastavenie rotácie behom pár otáčok, jemný spôsob brzdenia bez zvýšeného namáhania na stožiar a ďalšie súčiastky. [26]

- Mechanický brzdný systém
  Mechanická brzda je využívaná ako záložný brzdný mechanizmus a na brzdenie pri parkovaní. Systém pozostáva z kotúčovej brzdy umiestenej na hriadeli rotora alebo vysokorýchlostnej hriadeli za prevodovkou, prípadne ich kombináciou. Nevýhodou systému je pôsobenie vysokej teploty na komponenty a zvýšenie rizika poškodenia prevodovky. [26; 27]



Obr. 2.6 Mechanická brzda veternej turbíny [28].

2.6 Stožiar veternej elektrárne

Z rastúcimi požiadavkami na výkon veterných elektrární rastú aj ich rozmery a výška. Stožiare vysoké 140 až 200 metrov umožňujú získať rotoru viac energie pri vyššej stabilite a rýchlosti vetra v danej výške, obzvlášť pri veľkej drsnosti povrchu viď kapitola (1.4). Rastúce rozmery znamenajú vyššie zriaďovacie náklady na výrobu a montáž, preto je optimálna výška stožiara funkciou:

- ceny stožiara na jeden meter,
  (Príklad – výkon elektrárne: 1,5 MW; výška: 100 m; cena: 10 m – 36 000 USD v prepočte 790 00 Kč),
- zmeny rýchlosti prúdenia vo výške, v závislosti na drsnosti terénu,
- cena KWh dodávanej do siete.

Stožiar v prevádzke musí odolať účinkom meniaceho sa prúdenia a to v rôznych smeroch, vlhkosti, zmene teplôt, chemickému a mechanickému znečisteniu, ktoré zapríčiňujú abrazívne opotrebenie a korózne namáhanie. [27] Pre konštrukciu stožiarov sa prevažne používajú: konštrukcie segmentov z oceľových dutých kužeľov, priehradové konštrukcie alebo betónové konštrukcie. [3; 29]

Väčšina veľkých veterných elektrární je zmontovaná z oceľových dutých kužeľov s priemerom zväčšujúcim sa k základni pre zvýšenie pevnosti a šetrenie materiálu. Segmenty sú spojené z oboch strán pomocou vnútornej príruby a skrutkovým spojom. Vo vnútornej časti stožiara sa nachádza servisný rebrík, schodisko, v tých najväčších aj výťah . Estetická stránka a nerušivý vzhľad je veľkou výhodou týchto konštrukcií. Na trhu možno nájsť aj betónové segmenty kónického tvaru, ktoré tvoria stožiar samostatne, alebo sú použité v kombinácií s oceľovými segmentami. Nevýhodou betónových konštrukcií je obmedzená možnosť recyklácie.

Spoločnosť Thyssenkrupp a TetraFlex ® uvádza v Číne nové hybridné riešenie stožiara, ktorý pozostáva z priehradovej konštrukcie v spodnej časti a prechádza do konštrukcie z oceľových kužeľových segmentov. Tento typ stožiara by mal ponúkať výšku 150 metrov, a tým pádom zvýšenie produkcie energie až o 20 % ročne, ďalej ľahkú a veľmi stabilnú konštrukciu, uľahčenie prepravy a montáže a 100% možnosť recyklácie. [30; 31]

Obr. 2.7 Typy stožiarov veterných elektrární [32].

a) oceľový stožiar b) hybridný stožiar c)betónový stožiar d) stožiar TetraFlex

2.7 Základy

Konvenčné základy pozemných veterných turbín možno rozdeliť na dva typy:

- Gravitačné základy: jedná sa o betónovú dosku vystuženú železnou armatúrou štvorcového, šesťuholníkového alebo kruhového tvaru, ktorá zabraňuje posunutiu alebo prevráteniu veternej elektrárne. Súčasťou základov je oceľový fundament zapracovaný priamo do dosky, slúži na prepojenie základov a stožiara. Veľký dôraz sa kladie na únosnosť pôdy, ktorá musí byť posúdená geológom. Pre príklad elektrárne dosahujúcej výšku 105 m sú štvorcové základy o rozmere 15,9×15,9×2 m s celkovou hmotnosťou až 1144 ton. [33; 34]

Obr. 2.8 Základné zobrazenie gravitačného základu [35].

- Pilierové základy: podstatou týchto základov sú zavŕtané piliere do zeme tak, aby pôsobili ako stabilná podpora pre konštrukciu VtE. Využívajú sa prevažne v lokalitách, kde nie je splnená povrchová únosnosť pôdy. [34; 36]

Obr. 2.9 Základné zobrazenie pilierového základu [35].

Základy morských veterných turbín predstavujú komplexný problém závisiaci na faktoroch ako geologické podložie, veľkosť turbíny, hĺbka vody, poveternostné a morské podmienky. V súčasnosti sú najfrekventovanejšie monopilóty a konzolové konštrukcie. [37]

3 Preprava a inštalácia veternej elektrárne

Stavba VtE predstavuje oveľa viac práce, ako je samotné zostavenie a uvedenie do chodu. Realizácia celého projektu VtE v seba zahŕňa ďalšie špecifiká, ako výber vhodného stanoviska, legislatívne a povoľovacie procesy stavby, logistika a transport jednotlivých dielov.

3.1 Infraštruktúra a logistika

Rozvoj odvetvia veternej energetiky sa dostáva do problémov súvisiacich s dopravou a logistikou, ktorým čelia ich vývojári a výrobcovia. Preprava komponentov zo závodu, kde boli vyrobené na miesto projektu VtE je hlavnou výzvou veterného priemyslu. Vo veľa prípadoch sa jedná o manipuláciu s citlivými a veľmi drahými súčiastkami veľkých rozmerov, dosahujúcich až 80 metrov.

VtE sú väčšinou stavané vo veterných lokalitách a to mimo zastavenej oblasti. Preto podobne ako prieskum energetickej výnosnosti vetra v danej lokalite, je dôležitý prieskum možnosti prístupu prepravnej a stavebnej techniky k miestu stavby. [31] K hlavným problémom nákladnej dopravy patrí preprava nadrozmerných dielov, ktoré nespĺňajú rozmerové a hmotnostné požiadavky limitované štátmi a ich regulačným systémom. Preprava po železničnej trati je limitovaná rozmerovými možnosťami a vzdialenosťou od miesta montáže. Lodná doprava predstavuje ideálny spôsob prepravy veľkých komponentov, a však aj tá je obmedzená väčšinou neexistujúcim prístupom na konečné miesto dodania. Napriek všetkým týmto obmedzeniam, sú práve tieto druhy transportu a ich kombinácia využívané pri logistickom riešení prepravy konštrukcie VtE. [38]

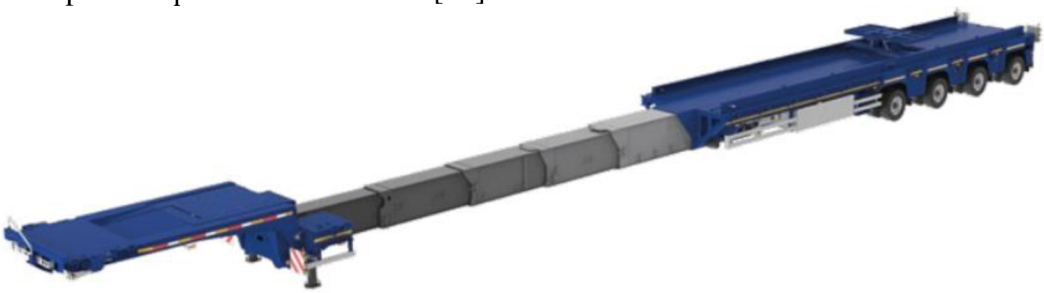
Logistické spoločnosti zameriavajúce sa na prepravu nadrozmerných nákladov majú možnosť použiť softwarovú simuláciu v programe AutoTURN. Programové rozhranie umožňuje 2D a 3D simuláciu zákrut a komplikovaných manévrov (príloha č.1). Simuláciu možno vykonať pre rôzne typy vozidiel uložených v knižnici a aj s možnosťou návrhu vlastných vozidiel. [39]

3.2 Prepravné a stavebné mechanizmy VtE

3.2.1 Teleskopické prívesy

Využívajú sa na prepravu lopatiek a segmentov stožiarov. Ich veľkou výhodou je modulárnosť pri manipulovaní s rôznymi druhmi bremien. Základnými konštrukčnými prvkami sú: husí krk, výsuvný nosník, mechanizmus riadenia a chvostová plošina.

Husí krk je spojovacím bodom prívesu a ťahaču s možnosťou hydraulického nastavenia výšky prívesu. Výsuvný nosník slúži k predĺženiu nakladacej plochy na požadované rozmery. Vzhľadom na jeho dĺžku je vyrobený z pevnej ocele s minimálnou medzou klzu 460 MPa. Dôležitým prvkom obsiahnutým v mechanizme riadenia je nezávislé natáčanie zadných náprav, ktoré pomáha pri manipulácií v zákrutách. [40]



Obr. 3.1 Teleskopický príves SPZ-GP Ventum [41].

+

3.2.2 Príves s uchytením pre lopatky

Charakteristickým znakom tohoto prívesu je systému pripojenie lopatky špeciálnym adaptérom k zdvihovému mechanizmu, ktorý je súčasťou prívesu. Príves s mechanizmom zdvihu BladeMAX od spoločnosti Faymoville Group predstavil systém, ktorý dokáže vztýčiť lopatku o hmotnosti 650 ton pod uhol 84 ° ,s možnosťou natáčania v ose lopatky o 360 ° a vertikálnou osou natočenia 20° do boku. Stabilitu prívesu zabezpečuje novo patentovaný, kinematický systém náklonu, ktorý zároveň zhromažďuje dáta zo senzorov a vyhodnocuje nebezpečné situácie. Tieto atribúty a variabilita prívesu umožňujú prepravu lopatiek veterných turbín dlhých 80 metrov v rôznom prostredí, ako mestské ulice až po horské a zalesnené cesty. [42]

Obr. 3.2 Príves so zdvihovým mechanizmom od spoločnosti Faymoville [42].

3.2.3 Vežový príves

Jedná sa o príves vyvinutý špeciálne na prevoz vežových segmentov dosahujúcich dĺžku až 40 metrov. Príves sa skladá z dvoch samostatných viac-nápravových častí, pričom každý z nich je vybavený hydraulickým adaptérom na uchytenie segmentu. Adaptéry je možné použiť pre rôzne vežové konštrukcie a priemery, v niektorých prípadoch aj na prepravu gondoly. Príves vykazuje veľmi dobrú manévrovateľnosť a to vďaka hydraulickým adaptérom, ktoré dokážu natočiť bremeno voči návesu o 80°, čo umožňuje prekonať veľmi ostré zákruty, zdvihnutím do výšky 1,5 metra je možné prekonať kruhový objazd alebo nárazovú bariéru. Pomocou zdvíhacích adaptérov je tiež možné nakladať alebo vykladať vežové články bez použitia žeriavov, a tým výrazne šetriť náklady spojené s prepravou. Celková 11 nápravová zostava od spoločnosti Nooteboom s názvom Mega Windmill Transporter váži 35 ton a jej nosnosť je 100 ton, čo predstavuje dobrý pomer užitočného zaťaženia [43].

Obr. 3.3 Vežový príves Mega Windmill Transporter [43].

3.2.4 Budúcnosť v preprave konštrukcií VtE.

Trend do budúcnosti predpovedá, že so zvyšujúcimi výkonmi budú rásť aj rozmery VtE, ktoré sú už teraz neúmerné k cestnej infraštruktúre a ich preprava je často zložitá a veľmi nákladná. Aby limitujúcim faktorom budúcnosti nebola preprava komponentov, sa spoločnosť Eros zamerala na vývoj technológie transportu, ktorý umožňuje logistické riešenia v lokalitách s malou alebo žiadnou infraštruktúrou. Riešenie by mohla poskytnúť letecká preprava vo forme vzducholode Aeroscraft s tuhou konštrukciou a variabilným vztlakom. Jej užitočné zaťaženie predstavuje 66 ton a umožňuje vertikálne nakladanie a vykladanie bez opätovného zaťaženia. To zabezpečuje systéme COSH „kontrola statickej hmotnosti“, ktorý funguje na obrátenom princípe ako ponorka. Pri vzlete je hélium uvoľnené z tankera, uloženého vo vzducholodi, do vzduchového obalu a pri pristávaní je hélium opätovne stlačené do tankera a následne je do obalu načerpaný vzduch. [44]

Obr. 3.4 Koncept transportéru Aeroscraft od spločnosti Eros [44].

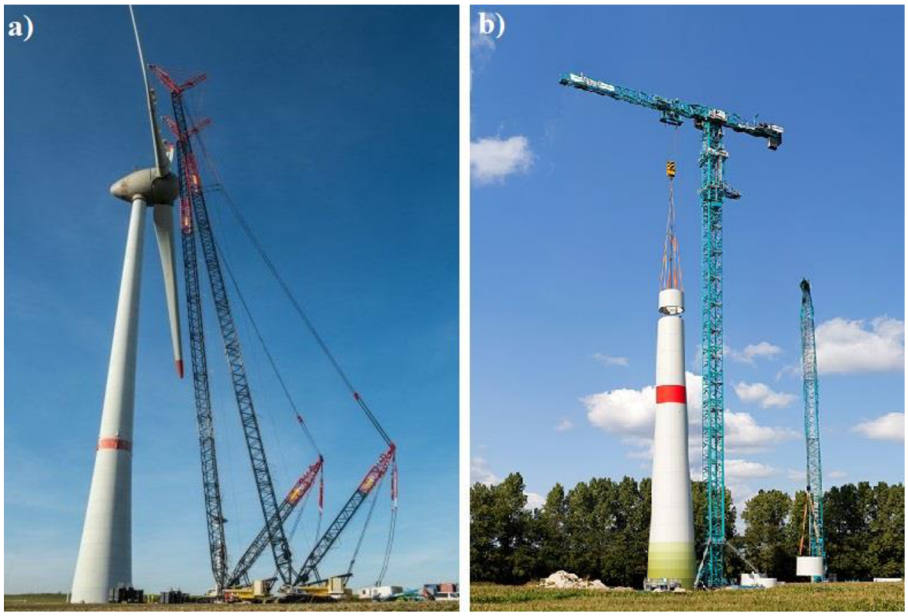
3.2.5 Žeriavová technika

Stavbu veternej elektrárne by nebolo možné uskutočniť bez žeriavovej techniky, ktorá zabezpečuje možnosť inštalácie dielov vo výške. Na trhu je dostupných niekoľko typov žeriavovej techniky. Rozdeliť ju možno podľa konštrukčných prvkov, ako spôsob mobility (pomocou kolies, pásovej techniky alebo stacionárne vežové konštrukcie), typu výložníku (teleskopický, priehradový) a typom protizávažia (bez, s protizávažím).

Spoločnosť Liebherr poskytuje žeriav 1000-ECB 125 Litronic vyvinutý špeciálne pre montáž VtE. Medzi jeho osobité výhody patrí jeho konštrukcia, ktorú je možno prepraviť pomocou nákladnej prepravy bez zvláštnych povolení priamo na miesto stavby a montáž je realizovateľná na malej ploche. Žeriav je ukotvený priamo k základom VtE a jedným kotviacim ramenom k stožiaru turbíny. Pri tejto konfigurácií zdvihne bremeno o hmotnosti 125 ton a vďaka systému MICROMOVE je umožnené jemné polohovanie dielov. [45] Jedná sa o žeriav určený na montáž novej generácie VtE s výškou rotorovej časti až 140 metrov, viď tabuľka technických parametrov (Tab. 3.1). Za nevýhody vežového žeriavu možno považovať nedostačujúcu ponuku výrobcov vo svete, malé množstvo operátorov techniky a nedostatočné záznamy o rýchlosti inštalácie žeriavu a rýchlosti práce. [39]

Tab. 3.1 Tabuľka technických parametrov žeriavu Liebherr 1000-ECB 125 Litronic

Technické parametre	
Maximálna zdvihová kapacita	125,0 t
Rádius pri maximálne zdvihovej kapacite	9 m
Maximálny rádius	36,5 t
Maximálna zdvihová kapacita pri max. rádiuse	19,35 m
Maximálny výška háku	195,0 m



Obr. 3.5 Žeriavová technika [46; 47].
a) CC 3800 cranes b) Liebherr1000-ECB 125 Litronic

3.3 Postup stavby veternej elektrárne

Stavba veternej elektrárne je oproti iným typom elektrární pomerne jednoduchá a rýchlo realizovateľná. Pred samotnou inštaláciou veternej elektrárne musí byť splnených niekoľko krokov. Tieto kroky predstavujú legislatívne procesy, ktoré možno zúžiť na: zaobstaranie vhodného pozemku, vypracovanie projektu, financovanie, získanie posudku vplyvu na životné prostredie, vybavenie stavebného riadenia, získanie stanoviska obcí, krajov a iné. Tieto povinnosti, ktoré musia byť splnené pred výstavbou VtE trvajú priemerne 3-4 roky v závislosti na štátnej legislatíve a lokalite stavby.

Po legislatívnych procesoch začína fyzická realizácia a stavba VtE, ktorá je rozdelená do týchto krokov:

I. Výstavba cesty
Konečné miesto stavby VtE sa častokrát nachádza na miestach vzdialených niekoľko stovák metrov alebo kilometrov od verejných ciest. Práve preto je nutné vybudovanie prístupovej cesty pre prepravnú a stavebnú techniku.

II. Stavba základov
V tomto kroku je vykonaný geologický rozbor pôdy, vyhĺbenie zeme v tvare základov, vytvorenie železnej armatúry a vykoná sa príprava na zavedenie elektrických rozvodov. Následne sú v niekoľkých fázach odliate základy, v ktorých je zapracovaný fundament na pripevnenie stožiara VtE. Betónový základ zreje 5 týždňov, následne je natrený asfaltovým penetračným náterom, ktorý slúži ako ochrana proti vlhkosti.

III. Vytvorenie elektrickej infraštruktúry
Takzvaná kabeláž. Jedná sa o uloženie elektrických káblov do zeme, ktoré slúžia na prenos elektrickej energie z VtE do rozvodne a odtiaľ do elektrickej siete.

IV. Transport a príprava stavebnej techniky
V tomto kroku je dopravená žeriavna technika a niektoré komponenty VtE. Stavba žeriavu môže trvať niekedy až 3 a viac dní, v závislosti na jeho type a poveternostných podmienkach. Pri väčšine stavieb sú potrebné dva žeriavy a ich kooperácia.

V. Inštalácia

Prvou podmienkou, ktorá musí byť splnená k tomu, aby bolo možné začať stavbu VtE je rýchlosť vetra, neprekračujúca povolené maximum, zvyčajne do 10 m/s, udávaná legislatívou bezpečnosti práce a typom žeriavu. Pokiaľ je táto podmienka splnená, môže sa pristúpiť k samotnej stavbe stožiaru.

Vežové segmenty sú po jednom zdvihnuté pomocou dvoch žeriavov z prívesu a postupne umiestňované na miesto. Presné umiestnenie a zmontovanie segmentov vykonávajú výškový pracovníci, ktorý sa nachádzajú v pohyblivom koši vo vnútri stožiara. Týmto istým spôsobom je na vrchol stožiara umiestnená gondola, manipulácia s ňou musí byť obzvlášť jemná, pretože sa v nej nachádza celé hnacie ústrojenstvo.

Ako posledná je namontovaná rotorová časť. Tá sa montuje buď ako celok zmontovaný mimo VtE, alebo u tých najväčších VtE jednotlivo po listoch. Čas potrebný na inštaláciu VtE je približne 5 – 10 dní.

VI. Oživenie a testovanie

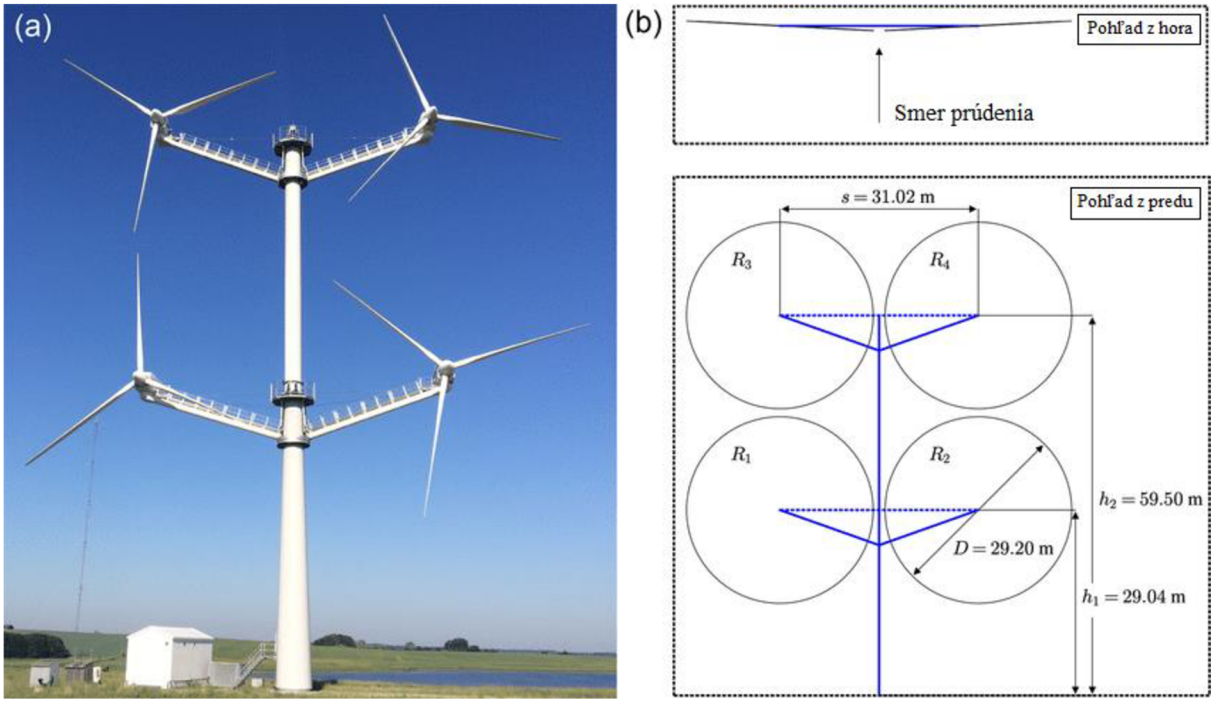
Jedná sa o mechanické zostavenie všetkých dielov VtE. Dokončenie elektroinštalácie, hydraulických systémov natáčania, regulačných a monitorovacích systémov. Následne je VtE pripojená k sieti a začne jej skúšobné obdobie, kde sa monitoruje jej vplyv na pripojenie do siete a nastavenie mechanických častí. [48; 49]

4 Multi-rotorové veterné elektrárne

Požiadavky na stále zvyšovanie výkonu jedno-rotorových VtE sú spojené so zväčšovaním ich rozmerov a následne s vyššími nákladmi na výrobu. Ich veľké konštrukcie tiež predstavujú problémy pri preprave aj montáži (kapitola 3).

Riešením týchto problémov by mohli byť multi-rotorové elektrárne. Tento typ veternej elektrárne pozostáva z jedného stožiara na ktorom je pripevnené väčšie množstvo veterných turbín s menšími listami rotora, s cieľom pokryť tú istú plochu ako VtE s jedným rotorom. Práve menšie rozmery listov rotora, generátoru a iných dielov umožňujú postaviť niekoľko megawattovú elektráreň s nižšími výrobnými nákladmi, a to až o 15 % pri porovnaní s konvenčnou veternou elektrárňou. Menšie komponenty majú lepšiu mobilitu a ich preprava je jednoduchšia. Väčší počet dielov by umožnil sériovú výrobu, z ktorej by plynula ich vyššia spoľahlivosť a kvalita. Konceptom multi-rotorovej elektrárne vznikajú nové atraktívne lokality, kde pre veľké VtE je obmedzujúcim faktorom infraštruktúra. [50] [51]

Multi-rotorové veterné elektrárne sa nenachádzajú na komerčnom trhu, ani nie sú v praxi používané. Spoločnosť Vestas začiatkom roka 2016 nainštalovala koncept multi-rotorovej elektrárne na Dánskej technickej univerzite ako projekt výskumu a vývoja. Hlavnou úlohou projektu bolo zistiť, či je možné zvýšenie výkonu VtE iným spôsobom ako predlžovaním lopatiek. Elektráreň s označením 4R-V29 pozostávala zo 4 turbín V29-225 KW s aktívnou reguláciou a priemerom jedného rotora 29 metrov. Celkový výkon VtE tým pádom predstavoval 900 kW. Testovanie VtE trvalo dva a pol roka a v roku 2019 bola elektráreň demontovaná.



Obr. 3.6 Multi-rotorová veterná elektráreň vestas 4R-V29[51].
a) Veterná elektráreň Vestas 4R-V29 b) základné rozmery veternej elektrárne.

Vypozorované zistenia pri testovaní a ich porovnanie oproti konvenčnej VtE boli následné:

- 1,5 % zvýšený energetický zisk z dôvodu interakcie susedných rotorov,
- výkonnostná krivka multi-rotorovej VtE vykazovala vyššie výkonnostné hodnoty do dosiahnutia menovitého výkonu, čo v praxi znamená, že sa rýchlejšie dostala na menovitý výkon ako konvenčná turbína,
- zvýšenie zaťaženia listov rotorov,
- porovnateľná produkcia hluku,
- prúdenie za VtE malo tendenciu sa rýchlejšie zotaviť, to znamená že pri stavbe veterných fariem by bolo možné zmenšiť ich rozostupy.

Multi-rotorové veterné turbíny majú veľa výhod ale aj nevýhod v podobe technický neistôt konštrukčne zložitého stožiara, snímačov a riadiacich prvkov. [52]

ZÁVER

Cieľom bakalárskej práce bolo zhrnúť a vysvetliť konštrukciu a stavbu veternej elektrárne, a to aj z pohľadu transportu jednotlivých dielov konštrukcie.

Úvod bakalárskej práce je venovaný obnoviteľným zdrojom energie a ich dôležitosti v energetike. Dôraz bol kladený na obnoviteľný zdroj veternej energie a jeho využitie na pohon veternej elektrárne.

Na začiatku bakalárskej práce boli definované a popísané základné fyzikálne princípy fungovania veternej elektrárne. Na to aby bolo možné využiť čo najväčší potenciál energie prúdenia, bol definovaný výber vhodného stanoviska a jeho metódy merania. Ďalšia časť sa venovala rešerši konštrukcií veľkých veterných elektrární, ktoré dosahujú výkonu niekoľko MW. Boli popísané ich základné časti a ich rôzne typy prevedenia, ktoré sú ponúkané na trhu. Každý výrobca veternej elektrárne ponúka svoje konštrukčné riešenie, ktoré sa odlišujú viac alebo menej od konkurencie. Medzi hlavné odlišnosti môžeme radiť typ hnaného ústrojenstva. Príkladom môžem byť veterná elektráren Enercon E82 so synchrónnym motorom a jeho priamym spojení s rotorom (bez prevodovky) a elektráreň Vestas V90 s asynchrónnym motorom a viac stupňovou prevodovkou.

Transport dielov a ich logistika predstavuje jeden z najväčších problémov veternej energetiky. Riešenie tohto problému sa uberá dvoma smermi.

Prvým riešením je vývoj a inovácia prepravných mechanizmov, ktoré sú viac modulárne a tým umožňujú efektívnejšiu prepravu na miesta, kde by to pred niekoľkými rokmi ešte nebolo možné. Jedným z týchto mechanizmov je špeciálny lopatkový príves, ktorý dokáže prepraviť lopatky až 80 metrov dlhé v mestských častiach ale aj na horských cestách. V budúcnosti môžu technologické inovácie ponúknuť riešenie problémov v preprave vďaka hybridným vzducholodiam Aeros od spoločností AerosCraft a LCA60T od spoločnosti Flying Whales. Ich spoločným cieľom je ponúknuť nové a atraktívne lokality pre stavbu veterných elektrární.

Druhým riešením problémov veľkých konštrukcií je zmena konvenčne používanej konštrukcie alebo jej častí. Týmto riešením sa zaoberá posledná kapitola predstavujúca projekt výskumu a vývoja multi-rotorovej veternej elektrárne od spoločnosti Vestas, ktorá by v blízkej budúcnosti mohla nahradiť konvenčné veterné elektrárne s jedným rotorom. Výskum ukázal že multi-rotorová veterná elektráreň dokázala vyrobiť porovnateľné množstvo energie ako konvenčné veterné elektrárne a to pri nižších výrobných nákladoch. Jej menšia konštrukcia a vyšší počet vyrábaných kusov by umožňoval sériovú výrobu, ako aj efektívnejší transport a inštaláciu. Všetky výhody, ktoré koncept ukázal sú atraktívne, ale ešte je aj veľa technických neistôt v podobe konštrukcie a riadenia, ktoré musia byť bližšie preskúmané. Ďalším príkladom riešenia logistických problémov zmenou časti konštrukcie sú delené lopatky. Delené lopatky od spoločnosti Enercon sú využívané pri veternej elektrárni Enercon E-115, skladajú sa z dvoch častí, toto riešenie neuľahčilo len prepravu ale aj samotnú výrobou, ktorá mohla byť automatizovaná.

Otázkou zostáva, či existuje horná hranica výkonu a veľkosti veterných turbín, alebo sú tieto parametre závislé len na technologickom pokroku doby.

ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

[1] LEPIL, Oldřich. *Fyzika aktuálně: příručka nejen pro učitele*. Praha: Prometheus, 2009. ISBN 978-80-7196-381-3.

[2] ŠEFTER, Jakov Iosifovič. *Využití energie větru*. 1. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1991. ISBN 80-03-00616-3.

[3] QUASCHNING, Volker. *Obnovitelné zdroje energií*. Praha: Grada, 2010. Stavitel. ISBN 978-80-247-3250-3.

[4] Global atmospheric circulation *[online]. In:* . [cit. 2021-05-11]. Dostupné z: https://www.internetgeography.net/topics/what-is-global-atmospheric-circulation/

[5] CROME, Horst. *Technika využití energie větru.* 1. ul. 26. dubna 208, 725 27 Ostrava-Plesová: HEL Ostrava, 2002. ISBN 80-86167-19-4.

[6] *HALLENGA, Uwe. Malá větrná elektrárna: stavební návod s konstrukčními výkresy. 2., přeprac.* a rozš. vyd. Ostrava: HEL, 2006. ISBN 80-861-6727-5.

[7] *Měřicí technika. Http://www.proelektrotechniky.cz/ [online*]. Říčany u Prahy [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: http://www.proelektrotechniky.cz/merici-technika/8.php

[8] Comparing remote sensing *to met towers [online].* In: . [cit. 2021-05-11]. Dostupné z: https://www.windpowerengineering.com/comparing-remote-sensing-to-met-towers/

[9] *U.S. Energy Information Administration: Wind generation seasonal patterns vary across the United States [online]. [cit. 2021-05-07]. Dostupné z:* https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=20112

[10] *Danish wind industry association: The Wind Turbine Yaw Mechanism [online].* [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: http://xn--drmstrre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/en/tour/wtrb/yaw.htm

[11] *ŠKORPÍK, Jiří. Využití energie větru: Transformační technologie [online].* Brno [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: https://www.transformacni-technologie.cz/04.html

[12] *Parts of Gondola [online]. In*: . [cit. 2021-05-11]. Dostupné z: https://webshop.hydratech-industries.com/admin/public/getimage.ashx?Crop=0&Image=/Files/Images/hydratech/spareparts/siemens-mkIII-2-3mw/Nacelle-generic.jpg&Format=jpg&Width=852&Height=477&Quality=75

[13] Commercialisation of Advanced *Composite Material Technology: Carbon-Glass Hybrid in PowderEpoxy for Large* (60-100m) Wind Turbine Blades: Lighter wind blades for cheaper energy [online]. [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: https://cordis.europa.eu/article/id/423153-lighter-wind-blades-for-cheaper-energy

[14] *Pitch Controller Design of Wind Turbine Based* on Nonlinear PI/PD Control [online]. [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: https://www.hindawi.com/journals/sv/2018/7859510/

[15] *Leading Edge Erosion: A BIG Problem For* Wind Turbine Operators [online]. [cit. 2021-04-25]. Dostupné z: https://weatherguardwind.com/leading-edge-erosion/

[16] *Vetrná energie:* Z čeho se skládá [online]. [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: http://vetrna-energie.cz/energie-zivlu/vetrna-energie_9/z-ceho-se-sklada_26

[17] *MOTLÍK, Jan. Obnovitelné zdroje* energie a možnosti jejich uplatnění v České republice. Praha: ČEZ, 2007. ISBN 978-80-239-8823-9.

[18] *Pitch and Stall regulation [online].* In: . [cit. 2021-05-11]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Power-curves-of-fixed-pitch-and-variable-pitch-wind-turbines_fig2_266681666

[19] *Převodovka větrné elektrárny [online]. [cit.* 2021-05-15]. Dostupné z: https://csve.cz/cz/clanky/prevodovka-vetrne-elektrarny/327

[20] *Key developments in wind turbine* gearbox technologies [online]. [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: https://www.moventas.com/key-developments-in-wind-turbine-gearbox-technologies/

[21] Energetická schéma veternej *turbíny [online]. In: . [cit.* 2021-05-11]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wind_turbine_schematic.svg

[22] *Types of Wind Turbine Generators* and their Functions [online]. [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: https://mag.solarfeeds.com/types-of-wind-turbine-generators-and-their-functions/

[23] Wind turbine models [online]. BAUER, Lucas a Silvio *MATYSIK. [cit. 2021-04-25]. Dostupné z: https://en.wind-turbine-models.*com/

[24] *Danish wind industry association: Generators* [online]. [cit. 2021-05-07]. Dostupné z: http://xn--drmstrre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/*windpower%*20web/en/tour/wtrb/electric.htm

[25] Danish wind industry association: *Braking systems [online]. [cit. 2021-05-07]. Dostupné z*: http://xn--drmstrre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/en/tour/wtrb/safety.htm

[26] *Tribotechnika: Tribologické aspekty veterných elektrární* [online]. [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: http://www.tribotechnika.sk/2-2008/Tribologicke_%20aspekty_%20veternych_elektrarni.html

[27] Caliper brake solutions for wind turbines *[online].* In: . [cit. 2021-05-11]. Dostupné z: https://www.twiflex.com/newsroom/2016/02/is-caliper-brake-solutions-for-wind-turbines

[28] *LEVANDOWSKI, CHRIS. Evaluating Tall Wind Turbine Towers in the Field* [online]. [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: https://lib.dr.iastate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1116&context=undergradresearch_symposium

[29] *Tetraflex wind turbine towers:* Innovations [online]. [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: https://www.thyssenkrupp-steel.com/en/innovations/developments/tetraflex-wind-turbine-towers/

[30] *SøRENSEN, John D., Jens N. SøRENSEN, ed.* Wind Energy Systems: Optimising Design and Construction for Safe and Reliable Operation. Woodhead Publishing, 2011. ISBN 978-1-84569-580-4. Dostupné také z: https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt009LQLD1/wind-energy-systems-optimising/tubular-towers

[31] *Types of towers* [online]. In: . [cit. 2021-05-11]. Dostupné z: http://www.steelwindtower.com/wind-turbine-tower/

[32] *ČSVE Vetrná elektrárna: Betonový základ* [online]. [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: https://csve.cz/clanky/betonovy-zaklad/305

[33] *NORVELL, Chad A. Structural* Design Issues of "Hexapod" Foundations for Wind Turbine Towers. Portland, 2016. Dostupné také z: https://pdxscholar.library.pdx.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1029&context=cengin_gradprojects. Portland State University.

[34] *Understand building construction: PILE* FOUNDATIONS [online]. [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: http://www.understandconstruction.com/pile-foundations.html

[35] *MITEV,* Frederik a Daniel NEPUSTIL. Veterné elektrárne [online]. [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: https://www.asb.sk/stavebnictvo/technicke-zariadenia-budov/energie/veterne-elektrarne-uz-nie-su-len-na-zelenych-lukach

[36] *Wind Systems: Large Wind* Turbine Blade Transportation Solution: The Aeroscraft [online]. [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: https://www.windsystemsmag.com/large-wind-turbine-blade-transportation-solution-the-aeroscraft/

[37] *Windfarmbop: Wind farms construction [online]. [cit.* 2021-04-21]. Dostupné z: https://www.windfarmbop.com/category/cranes-and-special-transport/

[38] *ANSTER: Wind turbine blade /* windmill tower trailer buying guide [online]. [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: https://www.anstertrailer.com/buy-wind-turbine-blade-windmill-tower-trailer/

[39] GOLDHOFER: FLATBED SEMI-TRAILERS. Dostupné také *z: https://www.goldhofer.com/fileadmin/*downloads/prospekte/SPZ_EN-A4.pdf

[40] *FAYMONVILLE: Bladelifter:* the BladeMAX 650 [online]. [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: https://www.faymonville.com/technology/bladelifter-the-blademax/

[41] *NOOTEBOOM: MEGA Windmill Transporter [online]. [cit. 2021-04-21].* Dostupné z: https://www.nooteboom.com/trailers/mega-windmill-transporter/

[42] *Windpower Aeroscraft [online]. [cit. 2021-04-21]. Dostupné z*: https://www.windpowerengineering.com/have-you-heard-of-the-aeroscraft/

[43] *LIEBHERR: Tower Crane Solutions. Dostupné také z: https://*www.liebherr.com/external/products/products-assets/251190/liebherr-tower-cranes-for-use-on-wind-turbines.pdf

[44] *WIND TURBINE CRANE [online]. In: . [cit.* 2021-05-12]. Dostupné z: https://www.tvh.com/en-xe/about-tvh/market-news/perfectly-lassoed-cc-3800-crawler-cranes-remove-rotor-blades-from-enercon-e-126-wind-turbine-using-tandem-lifts

[45] *Liebherr-1000-ec-b-125-litronic [online]. [cit. 2021-05-12]. Dostupné z:* https://www.liebherr.com/en/gbr/latest-news/news-press-releases/detail/first-trial-liebherr-1000-ec-b-125-litronic-flat-top-crane-erects-wind-turbine.html

[46] *Větrné elektrárny VII.: Jak se staví větrná elektrárna [online*]. KOČ, Břetislav. [cit. 2021-04-25]. Dostupné z: https://oze.tzb-info.cz/vetrna-energie/14893-jak-se-stavi-vetrna-elektrarna

[47] *LOERIESFONTEIN WIND FARM: Construction process [online]. [cit.* 2021-04-25]. Dostupné z: https://loeriesfonteinwind.co.za/construction-operations/construction-process/

[48] *BASTANKHAH, Majid a Mahdi ABKAR. Physics of Fluids: Multirotor* wind turbine wakes. 2019. Dostupné také z: https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.5097285. Aarhus University Denmark and Durham University United Kingdom.

[49] *4R-V29 wind turbine [online]. In: . [cit.* 2021-04-25]. Dostupné z: ttps://www.researchgate.net/figure/a-The-4R-V29-wind-turbine-located-at-the-Riso-Campus-b-Sketch-of-the-4R-V29-wind_fig1_333220474

[50] *WINDPOWER Monthly: Measurable power gains found in multi-rotor Vestas concept* [online]. WESTON, David. [cit. 2021-04-25]. Dostupné z: https://www.windpowermonthly.com/article/1521072/measurable-power-gains-found-multi-rotor-vestas-concept

[51] *Wind turbine footing [online]. In: . [cit.* 2021-05-11]. Dostupné z: https://www.golder.com/insights/getting-your-wind-farm-on-the-right-footing/

[52] *Anatomy of Typical Wind Turbine Blade [online]. In: .* [cit. 2021-05-12]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Anatomy-of-Typical-Wind-Turbine-Blade-Nolet-2011-A-typical-wind-turbine-blade-cross_fig1_338430512

ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK

Symbol	**Veličina**	**Jednotka**
a	Exponent drsnosti zemského povrchu	[-]
A	Plocha rotoru	[m^2]
c	Rýchlosť prúdenia	[$m \cdot s^{-1}$]
c_p	Betzový výkonnostný koeficient	[-]
e_k	Kinetická energia prúdiaceho vzduchu	[$J \cdot kg^{-1}$]
h_1	Referenčná výška	[m]
h_2	Výška počítanej rýchlosti	[m]
$\dot{m}$	Hmotnostný prietok	[$kg \cdot s^{-1}$]
P_i	Skutočný výkon	[W]
P_t	Teoretický výkon turbíny	[W]
v_1	Nameraná rýchlosť prúdenia	[$m \cdot s^{-1}$]
v_2	Vypočítaná rýchlosť prúdenia	[$m \cdot s^{-1}$]
ρ	Hustota vzduchu	[$kg \cdot m^{-3}$]

Skrata	**Celý názov**
VtE	Veterná elektráreň
EESG	Synchrónny generátor s elektromagnetmi
PMSG	Synchrónny generátor s permanentnými magnetmi
AC	Striedavý prúd
DC	Jednosmerný prúd

ZOZNAM OBRÁZKOV

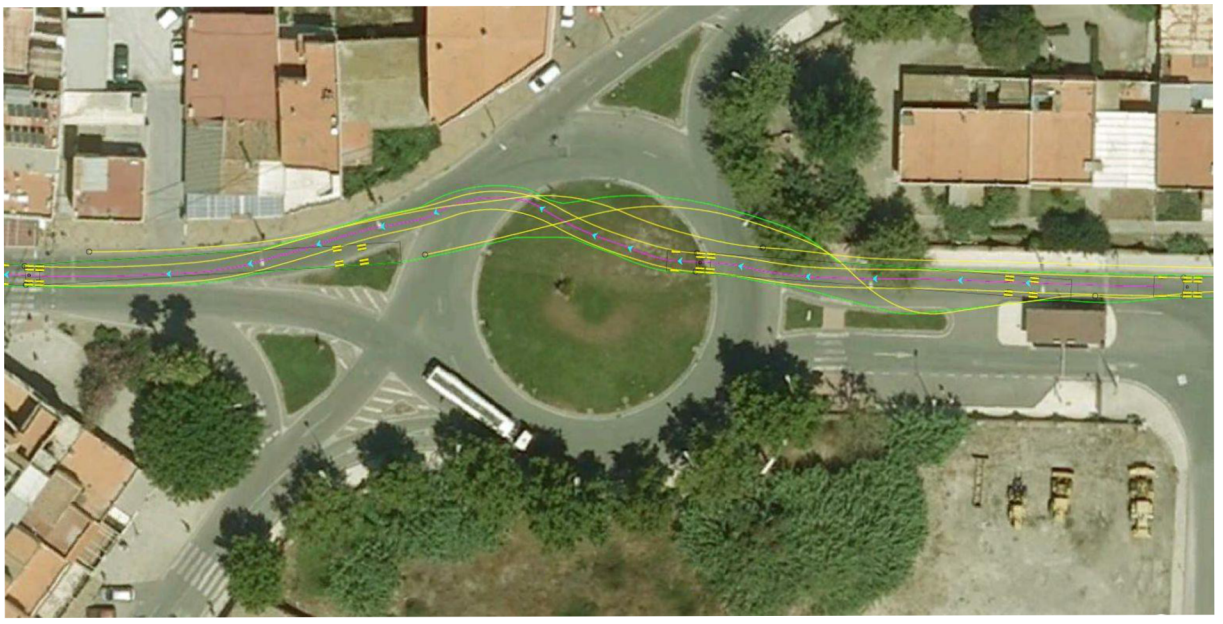
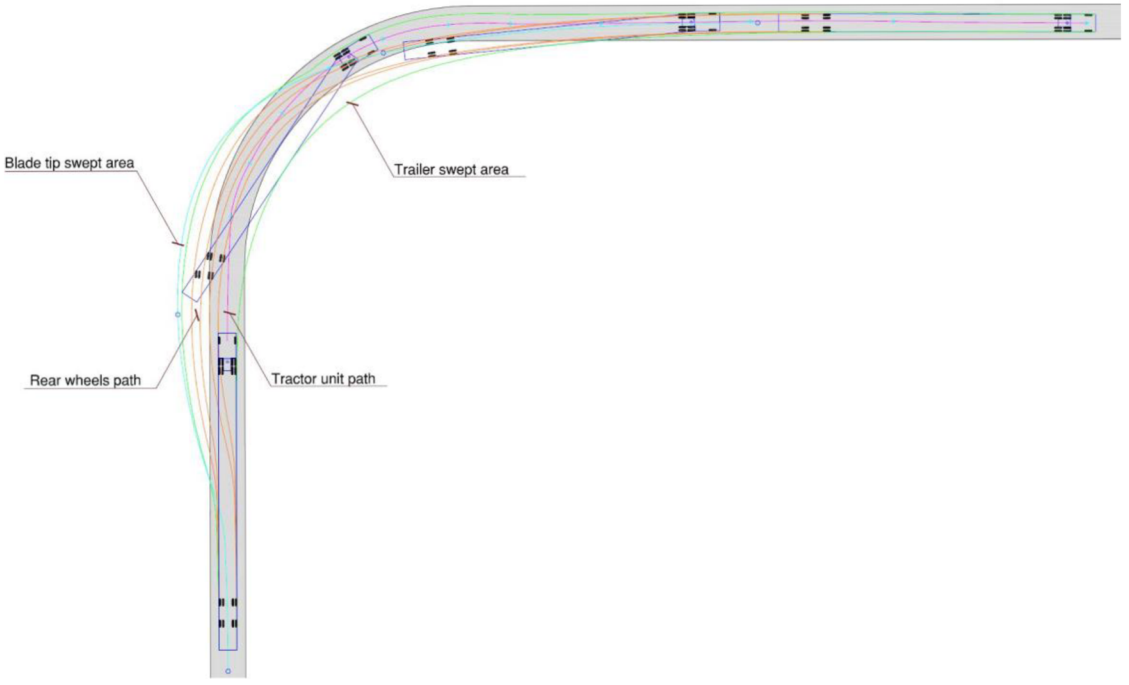
Obr. 1.1 Všeobecná cirkulácia atmosféry na zemi [4].
Obr. 1.2 Pevninský a morský vánok [5].
Obr. 1.3 Pomer prúdenia vzduchu pred a za rotorom turbíny [5].
Obr. 1.4 Porovnanie rozsahu merania konvenčnej metódy na stožiari a systému Lidar radar [8].
Obr. 1.5 Deformačné zrýchlenie na povrchom horského vrcholu alebo hrebeňa [5].
Obr. 1.6 Kapacitný faktor v priebehu roka [9].
Obr. 2.1 Gondola veternej elektrárne [12].
Obr. 2.2 Grafické znázornenie prúdov a síl pôsobiacich na list rotora [5].
Obr. 2.3 Konštrukcia lopatky veternej turbíny [15].
Obr. 2.4 Charakteristické výkonové krivky pri regulácii výkonu "pitch" a "stall", podľa [19].
Obr. 2.5 Schematické zobrazenie transformácie energie [22].
Obr. 2.6 Mechanická brzda veternej turbíny [28].
Obr. 2.7 Typy stožiarov veterných elektrární [32].
Obr. 2.8 Základné zobrazenie gravitačného základu [35].
Obr. 2.9 Základné zobrazenie pilierového základu [35].
Obr. 3.1 Teleskopický príves SPZ-GP Ventum [41].
Obr. 3.2 Príves so zdvihovým mechanizmom od spoločnosti Faymoville [42].
Obr. 3.3 Vežový príves Mega Windmill Transporter [43].
Obr. 3.4 Koncept transportéru Aeroscraft od spločnosti Eros [44].
Obr. 3.5 Žeriavová technika [46; 47]. a) CC 3800 cranes b) Liebherr1000-ECB 125 Litronic
Obr. 3.6 Multi-rotorová veterná elektráreň vestas 4R-V29[51].

ZOZNAM TABULIEK

Tab. 1.1 Triedy drsnosti podľa charakteru krajiny.
Tab. 3.1 Tabuľka technických parametrov žeriavu Liebherr 1000-ECB 125 Litronic

ZOZNAM PRÍLOH

Príloha 1: Ukážka programu AutoTURN

PRÍLOHA 1

Ukážka program AutoTURN [39]