



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY

WIND POWER PLANT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Petra Šponiarová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Kamil Řehák, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Studentka: **Petra Šponiarová**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Kamil Řehák, Ph.D.**
Akademický rok: 2019/20

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:

Větrné elektrárny

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Větrné elektrárny jsou v řadě zemí využívány pro výrobu elektrické energie. Vzhledem k jejich umístění významně ovlivňují nejen vizuální vzhled krajiny, ale svým hlukem mohou ovlivňovat obyvatelé v blízkém okolí.

Cíle bakalářské práce:

Rešerše dostupné literatury.

Vytvoření přehledu větrných elektráren.

Konstrukce větrných elektráren.

Provedení kritického zhodnocení výhod a nevýhod využívání větrných elektráren.

Návrh technického experimentu za účelem stanovení ovlivnění okolí větrných elektráren.

Seznam doporučené literatury:

SMETANA, C. Hluk a vibrace. Praha: Sdělovací technika, 1998, 250 s. ISBN 8090193625.

SMITH, D. J. Gear noise and vibration. 2nd edition. New York: Marcel Dekker, 2003, 297 s. ISBN 824741293.

BUDYNAS, R. G., NISBETT, J. K. Shigley's Mechanical Engineering Design. 10th Edition. McGraw-Hill, 2014. ISBN 978-0073398204.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Výroba elektrické energie z obnovitelných zdrojů je velmi aktuálním tématem. Do této oblasti patří také výroba elektrické energie pomocí větrných elektráren, kterými se zabývá tato bakalářská práce. Za účelem vytvoření přehledu typů větrných elektráren byla provedena rozsáhlá rešeršní studie. Z hlediska využívání větrných elektráren v obydlených územích je velmi diskutovaným tématem kromě vizuálního efektu i oblast vibrací a hluku, na kterou má zásadní vliv konstrukce větrné elektrárny. Pro stanovení ovlivnění člověka větrnými elektrárnami jsou prováděny technické experimenty, které se řídí jednotlivými normami a doporučeními. V rámci práce je za účelem posouzení hluku a vibrací větrné elektrárny navržen technický experiment, který využívá rozdílné přístupy z důvodu stanovení kritických komponent. Součástí návrhu je výběr vhodné měřicí techniky a volba místa pro její následné použití. Závěrem je využívání větrných elektráren kriticky posouzeno.

KLÍČOVÁ SLOVA

obnovitelné zdroje energie, větrná energie, větrná elektrárna, větrná turbína, převodovka, rotor, hluk, měření hluku

ABSTRACT

The electricity production from renewable sources is a very current topic. It also includes the electricity made by wind power plants, which the bachelor's thesis concentrates on. An extensive research study was conducted to provide an overview of wind turbine types. Concerning wind power plants, apart from their visual impact, noise and vibration connected to their operating is an often discussed issue. The construction of a wind turbine stands for the most important role in reducing such unwanted effects. Technical experiments following specific standards and recommendations are performed to assess the impact of wind turbines-emitted noise and vibration on humans. In order to assess noise and vibration of a wind turbine a technical experiment is proposed, which uses different approaches to determine the critical components. The selection of a suitable measuring equipment and the choice of location for its subsequent use are important parts of the design. At last, the use of wind power plants is critically reviewed.

KEYWORDS

renewable energy sources, wind energy, wind power plant, wind turbine, gearbox, rotor, noise, noise measurement

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠPONIAROVÁ, Petra. *Větrné elektrárny*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124444>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 55 s. Vedoucí práce Kamil Řehák.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracovala jsem ji samostatně pod vedením Ing. Kamila Řeháka, Ph.D. a s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 26. června 2020

.....

Petra Šponiarová

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu doktoru Kamilu Řehákovi za jeho vedení a potřebné rady při zpracovávání této práce. Dále bych chtěla poděkovat celé své rodině za neustálou podporu při studiu.

OBSAH

Úvod	11
1 Vítr zdrojem energie	12
1.1 Vítr	12
1.2 Energie a výkon větru	13
2 Přehled typů větrných elektráren	15
2.1 Rozdělení podle aerodynamického principu	15
2.1.1 Odporové turbíny	15
2.1.2 Vztlkové turbíny	15
2.2 Rozdělení podle orientace hřídele	17
2.2.1 Horizontální turbíny	17
2.2.2 Vertikální turbíny	17
2.3 Rozdělení podle výkonu	18
2.3.1 Malé větrné elektrárny	18
2.3.2 Střední a velké větrné elektrárny	18
2.4 Rozdělení podle způsobu využití získané energie	18
2.4.1 Větrné elektrárny bez připojení k rozvodné síti	18
2.4.2 Větrné elektrárny s připojením k rozvodné síti	18
2.5 Rozdělení podle umístění	19
2.5.1 Větrné elektrárny na pevnině	19
2.5.2 Větrné elektrárny na moři	19
2.6 Nekonenční větrné elektrárny	20
2.6.1 Létající větrné elektrárny	20
2.6.2 Větrná elektrárna bez lopatek	21
3 Konstrukce současných větrných elektráren	22
3.1 Rotor	22
3.1.1 Rotorový list	22
3.1.2 Rotorová hlava	23
3.1.3 Mechanismus natáčení listů	23
3.2 Gondola	23
3.2.1 Hlavní hřídel	24
3.2.2 Převodovka	24
3.2.3 Generátor	25
3.2.4 Brzda	26
3.2.5 Spojka	26
3.2.6 Rám gondoly	26
3.3 Stožár	26
3.4 Základy	27
3.4.1 Základy větrných elektráren na pevnině	27
3.4.2 Základy větrných elektráren na moři	28
4 Ovlivnění okolí	29
4.1 Ráz krajiny	29
4.2 Příroda	29
4.3 Stroboskopický efekt	30

4.4	Hluk.....	30
4.4.1	Hluk obecně	30
4.4.2	Hluk větrných elektráren.....	31
4.4.3	Hygienické limity.....	32
4.4.4	Účinky hluku na člověka.....	32
5	Návrh experimentu	33
5.1	Základní akustické veličiny a pojmy.....	33
5.1.1	Akustické vlnění	33
5.1.2	Akustický tlak	34
5.1.3	Akustický výkon	34
5.1.4	Akustická intenzita.....	34
5.1.5	Hladiny akustických veličin.....	34
5.2	Měřicí technika.....	36
5.2.1	Akcelerometry.....	36
5.2.2	Mikrofony	37
5.2.3	Intenzitní sondy	38
5.2.4	Akustické kamery	39
5.2.5	Analyzátory a vyhodnocení dat.....	40
5.3	Vhodná místa pro měření	40
5.3.1	Akcelerometr.....	40
5.3.2	Mikrofon	41
5.3.3	Intenzitní sonda	42
5.3.4	Akustická kamera.....	43
6	Využívání větrných elektráren	44
6.1	Výhody	44
6.2	Nevýhody	44
	Závěr	46
	Použité informační zdroje	48
	Seznam použitých zkratk a symbolů.....	55

ÚVOD

V dnešní době se celý svět potýká se změnami klimatu, ztrátou úrodné půdy, nedostatkem vody, požáry a dalšími nepříznivými podmínkami. Kvůli tomu se začíná stále více řešit trvale udržitelný rozvoj, což je snaha uspokojit naše potřeby bez omezení budoucích generací. K činnostem, které tomu napomáhají, patří také využívání obnovitelných zdrojů energie. Jejich hlavními výhodami jsou nevyčerpatelnost a šetrnost k životnímu prostředí. Obnovitelné zdroje energie zatím nehrají hlavní roli v dnešní energetice, ale je snaha tyto zdroje využívat ve větším rozsahu než v minulosti. Mezi obnovitelné zdroje energie řadíme energii slunečního záření, vody, biomasy, přílivu i energii větru.

Člověk se velmi brzo naučil využívat sílu větru pro čerpání vody či mletí obilí. Dnes tato zařízení „na větrný pohon“ můžeme obdivovat v muzeích či skanzenech. V současnosti větrná energie slouží převážně k výrobě energie elektrické.

Jako každý lidský vynález i větrné elektrárny mají vliv na jejich okolí. Mají své příznivce, kteří ovlivnění okolí větrnými elektrárnami přehlížejí, ale i odpůrce, kteří toto působení naopak zveličují. Nejvíce diskutovaným je hluk, tomu se při provozu větrné elektrárny nelze zcela vyhnout. Proto jsou stanoveny limity, které musí být dodržovány a podle kterých by obyvatelé nejbližších vesnic neměli být znevýhodněni.

Navzdory všem výhodám a nevýhodám se využívání větrných elektráren stále více rozmáhá. Nejvíce nainstalovaných větrných elektráren lze najít v Číně, přesto mezi průkopníky využívání energie větru patří Německo a Dánsko. Česká republika proti jiným státům světa ve stavbě a užívání větrných elektráren velmi zaostává, větrné elektrárny zde pokrývají méně než 1 % celkové spotřeby energie. To by se však mělo v příštích deseti letech změnit. Největším počtem větrných elektráren se v České republice pyšní Ústecký kraj. Naopak ve Zlínském kraji se nachází pouze jedna větrná elektrárna, protože jsou v tomto kraji špatné podmínky pro jejich výstavbu.

1 VÍTR ZDROJEM ENERGIE

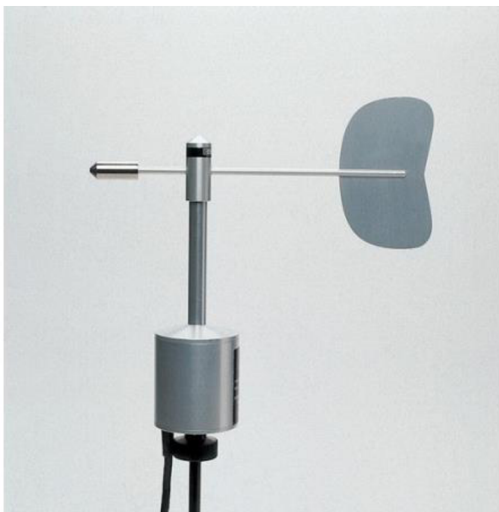
Větrné elektrárny využívají k výrobě elektrické energie kinetickou energii proudící masy větru, proto je tato kapitola věnována větru, jeho energii a výkonu. [1]

1.1 VÍTR

Vítr patří mezi obnovitelné zdroje energie, což znamená, že ho máme k dispozici nevyčerpatelně. Vzniku větru nelze zabránit, jelikož vzniká jako důsledek slunečního záření dopadajícího na zemský povrch. Přibližně 2 % energie ze slunečního záření se přemění na větrnou energii. [1] [2] [3]

Zemský povrch se vlivem slunečního záření ohřívá, kvůli rozmanitosti povrchu však nerovnoměrně. Vznikají tak tlakové rozdíly mezi různě zahřátými oblastmi vzduchu. Vzduch proudí z míst vyššího tlaku vzduchu, kde je nižší teplota, do míst nižšího tlaku vzduchu, kde je teplota vyšší. Za vítr se zpravidla považuje pouze horizontální složka tohoto proudění vzduchu. Čím větší jsou tlakové rozdíly vzduchu, tím větší je i síla větru. Vítr je ovlivněn nejen tlakovými rozdíly, ale také pohybem Země a strukturou zemského povrchu. Rychlost větru obecně směrem k zemskému povrchu klesá. [1] [2] [3]

Vítr se vyjadřuje jako vektor pomocí směru a velikosti rychlosti. Měří se na pozemních meteorologických stanicích staničními přístroji, mezi které patří anemometry, anemografy a větrné směrovky. K měření směru větru se využívají větrné směrovky (obr. 1), k měření velikosti rychlosti pak anemometry, kterých existuje několik typů. Nejvíce využívaný je miskový anemometr (obr. 2). Anemograf slouží k měření směru i velikosti rychlosti větru a naměřené údaje ještě trvale zaznamenává. [4] [5] [6] [7]

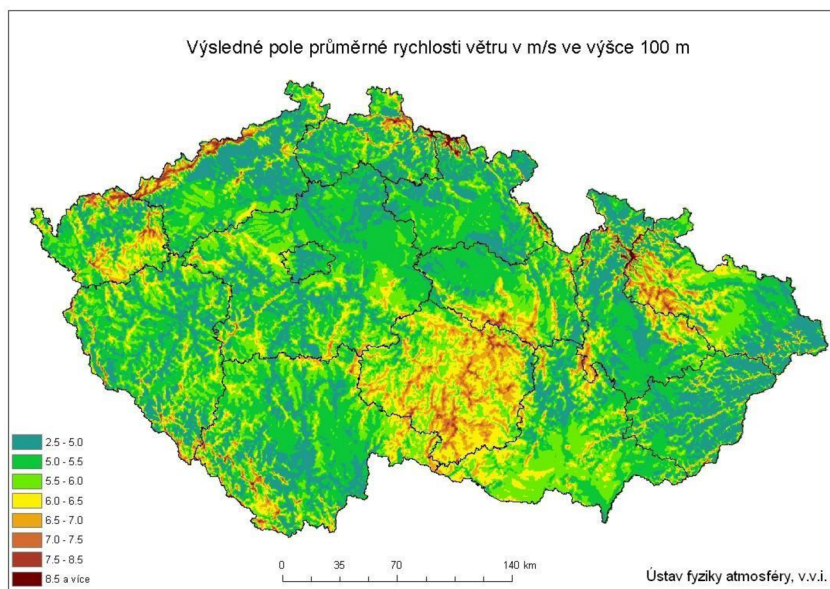


Obr. 1 Větrná směrovka [6]



Obr. 2 Miskový anemometr [7]

Čidla již zmíněných staničních přístrojů bývají umístěna ve výšce 10 m nad zemí, větru v této výšce se říká přízemní. K měření větru ve větší výšce nad zemí se využívají meteorologické stožáry, balónové sondy nebo akustické radary pracující na základě Dopplerova efektu. Měřené rychlosti větru v dané výšce se průměrují a zobrazují se pomocí větrných map (obr. 3). [4] [8]



Obr. 3 Větrná mapa ČR [8]

Údaje o směru a rychlosti větru jsou velmi významné při hledání vhodných lokalit pro větrné elektrárny. Pro efektivní využití větrné elektrárny je vhodné ji postavit na místo s průměrnou rychlostí větru vyšší než 6 m/s, takových míst se v České republice nachází velmi málo. Místa s průměrnou rychlostí nad 7 m/s se pak vyskytují pouze na horských hřebenech. Aby se větrný potenciál dané lokality využíval naplno, lze postavit na dané místo několik větrných elektráren. Těmto skupinám větrných elektráren se říká větrné farmy či parky. [9]

1.2 ENERGIE A VÝKON VĚTRU

Větrná turbína získává svoji energii tím, že sníží rychlost vzdušného proudění. Tím dojde k částečné přeměně kinetické energie větru na kinetickou energii rotoru elektrárny. [10]

Energie pohybující se hmoty vzduchu se dá vyjádřit jako

$$E_K = \frac{1}{2} m u^2 = \frac{1}{2} \rho V u^2, \quad (1)$$

kde m je hmotnost vzduchu, u je rychlost větru, ρ je hustota vzduchu, V je objem vzduchu. [1] [10]

Pokud by bylo možné stoprocentně využít kinetickou energii větru, výkon větru protékajícího jednotkovou plochou by byl roven

$$P = \frac{1}{2} \rho u^3, \quad (2)$$

kde ρ je hustota vzduchu a u je rychlost větru. [1] [10]

Výkon větru se však nedá využít stoprocentně, proto pro výkon větrné elektrárny platí vztah

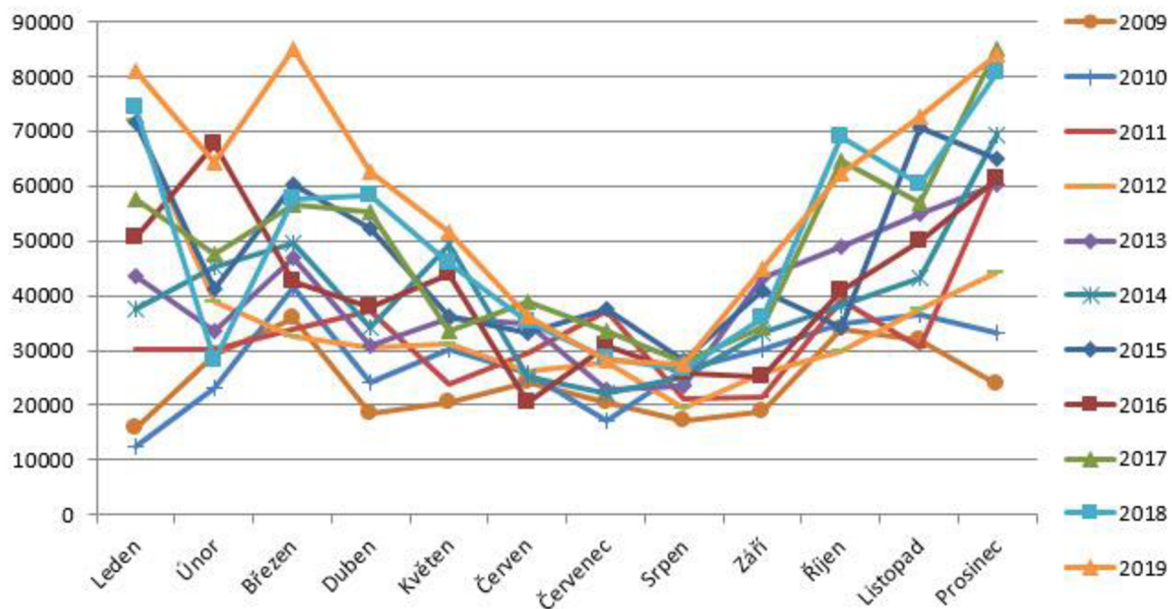
$$P = \frac{1}{2} c_p S \rho u^3, \quad (3)$$

kde c_p je součinitel výkonu, S je plocha opisovaná rotorem, ρ je hustota vzduchu a u je rychlost větru. [10]

Podle Betzova pravidla využití větrné energie dosahuje maximálně 59 % veškeré kinetické energie proudícího vzduchu skrz rotor. Naše současné větrné elektrárny dosahují účinnosti od 75 do 80 % Betzova limitu při jmenovitých otáčkách, proto se hodnoty součinitele výkonu reálně pohybují do 0,5. [10] [11]

Za předpokladu, že bude větrná elektrárna vyrábět nepřetržitě na plný výkon, vyprodukuje teoretické množství elektrické energie. Skutečná výroba elektrické energie se však od teoretické liší kvůli odstávkám elektrárny, poruchám, opotřebení lopatek, námraze, ztrátám při vedení a transformaci elektrické energie. Poměr mezi skutečným a teoretickým množstvím vyrobené energie za dané období popisuje tzv. kapacitní faktor. Na našem území se kapacitní faktor nových větrných elektráren pohybuje mezi 20 a 25 %. Ve větrnějších oblastech může dosahovat ke 30 %. [10]

Přibližně dvě třetiny energie větru je nám k dispozici v zimním období, což výrazně ovlivňuje výrobu elektrické energie větrnými elektrárnami v jednotlivých měsících během roku, jak lze vidět na obr. 4. Větrná energie se tak dobře doplňuje s využíváním energie vodní, která je v zimě naopak k dispozici minimálně. [2] [12]



Obr. 4 Výroba elektrické energie větrnými elektrárnami v MWh v jednotlivých měsících a letech [12]

2 PŘEHLED TYPŮ VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN

Existuje celá řada větrných elektráren, které se liší např. umístěním, výkonem nebo konstrukcí. V této kapitole byl vytvořen přehled, kde byly větrné elektrárny rozděleny podle různých kritérií.

2.1 ROZDĚLENÍ PODLE AERODYNAMICKÉHO PRINCIPU

2.1.1 ODPOROVÉ TURBÍNY

Listy odporové turbíny mají takový tvar, aby při různých směrech pohybu kladly různý aerodynamický odpor. Většinou se jedná o válcovitý, nebo miskovitý tvar. Polokoule nastavená proti větru svou dutou částí klade větší odpor než polokoule, která míří proti větru svou částí vypouklou. Díky rozdílným odporům vzniká moment, který rotor uvádí do pohybu. Na odporovém principu pracuje také miskový anemometr. [1]

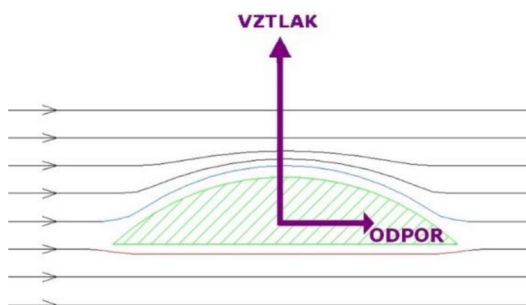
Jednoduchá konstrukce, nezávislost na směru větru a přímý přenos kroutícího momentu na hřídel patří mezi výhody odporových turbín. Mezi hlavní nevýhody odporových turbín lze zařadit menší účinnost, kvůli které jsou využívány méně než turbíny vztlakové. Mezi odporové turbíny patří např. Savoniova turbína (obr. 5). [13] [14] [15] [16]



Obr. 5 Savoniova turbína [16]

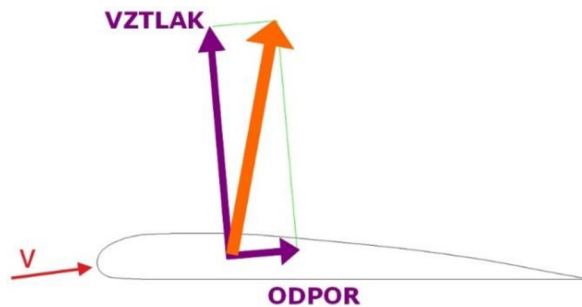
2.1.2 VZTLAKOVÉ TURBÍNY

Lopatky rotoru pracujícího na principu vztlaku mají tvar jako křídla letadel. Tento tvar způsobí při obtékání vzduchem vznik vztlakové a odporové síly (obr. 6). U vypouklé části lopatky vzduch proudí rychleji, to znamená, že je zde nižší tlak. Nad profilem tedy vzniká podtlak, pod profilem pak přetlak. Výslednicí těchto tlakových polí je vztlaková síla, která turbínu roztáčí. Na profilu, který je umístěn v proudu vzduchu, pak vzniká síla odporová, ta je poměrově vůči síle vztlakové menší. [17]



Obr. 6 Vztlaková a odporová síla [17]

Skutečný aerodynamický profil listu každý výrobce přísně tají, jelikož výrazně ovlivňuje výkonnost a hlučnost větrné elektrárny. Přibližný tvar lopatky je zobrazen na obr. 7. Odporová síla směřuje vždy ve směru nabíhajícího proudu vzduchu, vztlaková síla je na ni vždy kolmá. Velikosti těchto sil se mění podle úhlu, pod kterým vítr nabíhá na list. Maxima vztlakové síly lze tedy dosáhnout pouze pod jedním určitým úhlem, který je pro každý profil jiný. [17]



Obr. 7 Aerodynamický profil listu rotoru [17]

Velkou výhodou vztlakových turbín je, že se natáčením listů dá velmi snadno měnit velikost vztlakové a odporové síly, a tím i regulovat jejich výkon. Listy pracující na vztlakovém principu jsou však náročnější na výrobu. [14] [15]

Základní princip funkce vztlakových větrných turbín popsal jako první Francouz Darrieus. Darrierova turbína je vyobrazena na obr. 8. [1] [18]



Obr. 8 Darrieova turbína [18]

2.2 ROZDĚLENÍ PODLE ORIENTACE HŘÍDELE

2.2.1 HORIZONTÁLNÍ TURBÍNY

Horizontální turbíny (obr. 9) mají vodorovnou osu otáčení a pracují pouze na vztlakovém principu. Tyto větrné elektrárny jsou v dnešní době nejrozšířenější, jelikož mají vyšší účinnost než turbíny vertikální. Jejich rotor musí vždy směřovat proti větru. K tomu se u elektráren menších rozměrů využívají směrové lopatky, u větších větrných elektráren větrný senzor a servomotor. Otáčky horizontální turbíny se dají relativně lehce regulovat natočením listů nebo pootočením rotoru. [1] [11] [19]



Obr. 9 Horizontální turbína [19]

Vrtule mají nejčastěji tři listy. Třílistá vrtule je nejvýhodnější vzhledem k menšímu namáhání od gyroskopických momentů, k lepšímu vyvážení a menšímu namáhání celého rotoru od dynamických sil vlivem rozdílné rychlosti větru na ploše rotoru. Čtvrtá lopatka už není ekonomicky výhodná, jelikož nezlepší vlastnosti rotoru natolik, aby se vyplatila její výroba. Přibližně 95 % vrtulí dnes existujících větrných elektráren má tři listy. [1] [3] [10] [17]

2.2.2 VERTIKÁLNÍ TURBÍNY

Vertikální turbíny mají svislou osu otáčení a mohou pracovat na odporovém i vztlakovém principu. Mezi vertikální turbíny patří výše uvedená Savoniova i Darrieova turbína. Savoniova však pracuje na odporovém principu, zatímco Darrieova na vztlakovém. [3] [5]

Hlavní výhodou větrné elektrárny s vertikální osou otáčení je to, že ji není třeba natáčet proti větru. To se hodí na místech, kde se proudění větru často mění. Díky svislé ose otáčení je možno umístit generátor a převodové ústrojí na zem, čímž se docílí lepší přístupnosti při údržbě a opravách. Umístění generátoru a převodového ústrojí na zemi také sníží náklady při stavbě. Proti větrným elektrárnám s horizontální osou otáčení zabírají méně prostoru. Lze je tedy umístit blíže k sobě, aniž by se aerodynamicky ovlivňovaly. Náklady na výrobu jejich lopatek jsou menší. [3] [5]

V praxi se však tyto větrné elektrárny příliš neuplatňují, jelikož jsou více dynamicky namáhány. Tímto zvýšeným dynamickým namáháním ložisek a hřídele je zkrácena jejich životnost. Dalšími nevýhodami jsou malá výška rotoru nad terénem, kde vítr nedosahuje tak velké rychlosti, a jejich obtížné aerodynamické regulování. Hlavní nevýhodou je však jejich malá teoretická i praktická účinnost. [1] [3] [5]

2.3 ROZDĚLENÍ PODLE VÝKONU

2.3.1 MALÉ VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY

K malým větrným elektrárnám lze řadit turbíny s nominálním výkonem do 60 kW a průměrem vrtule do 16 m. Nejvýznamnější v této kategorii jsou však elektrárny s výkonem do 10 kW, jelikož převládají v nabídkách výrobců. [20]

Větrné elektrárny s výkonem přibližně od 300 W do 5 kW fungují nejčastěji jako zdroj pro nabíjení akumulátorů. Elektřina uložená v akumulátoru se později může využít v nízkonapěťových spotřebičích. Pokud se k elektrárně zapojí měnič napětí, je možno energii z elektrárny používat k napájení spotřebičů s napětím 220 V. Elektrárny s výkonem vyšším než 3 kW se dají využít jako zdroj pro akumulární kamna nebo k ohřevu vody. [21]

2.3.2 STŘEDNÍ A VELKÉ VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY

Do kategorie středních větrných elektráren spadají elektrárny s průměrem rotoru 16 až 45 m a výkonem od 60 do 750 kW. Jejich použití je však značně omezeno. Nejčastěji se využívají jako doplňkový zdroj energie v odlehlých lokalitách. [9] [20]

Velké větrné elektrárny jsou opatřeny rotorem s průměrem větším než 45 m a dosahují výkonu nad 750 kW. V současnosti slouží převážně velké větrné elektrárny jako zdroj energie do velkých elektrických sítí. Největší a nejvýkonnější větrné elektrárny jsou umístěny zejména na moři. [9] [20]

2.4 ROZDĚLENÍ PODLE ZPŮSOBU VYUŽITÍ ZÍSKANÉ ENERGIE

2.4.1 VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY BEZ PŘIPOJENÍ K ROZVODNÉ SÍTI

K rozvodné síti nejsou připojeny zejména malé větrné elektrárny. Jsou vhodné pro tzv. ostrovní provoz. To znamená, že vyrobená elektřina je využita přímo v místě instalace elektrárny bez připojení k veřejné síti. Tyto elektrárny pracují samostatně na odlehlých místech, v zemích, kde není rozvodná síť tak rozvinuta, nebo se využívají jako tzv. domácí větrné elektrárny. [1]

2.4.2 VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY S PŘIPOJENÍM K ROZVODNÉ SÍTI

Tyto větrné elektrárny jsou nejrozšířenější. K rozvodné síti jsou připojeny zejména velké větrné elektrárny, které se využívají v oblastech s velkým potenciálem větru. Vyrobená elektřina pak slouží výhradně pro komerční užití. [3]

K rozvodné síti však může být připojena i malá větrná elektrárna. Pokud dostatečně fouká vítr, uživatel využívá vyrobenou energii v domácnosti nebo dílně. V době, kdy větrná elektrárna energii nevyrábí, uživatel odebírá elektřinu ze sítě. Nastane-li situace, kdy větrná elektrárna vyrábí více elektřiny, než je majitel schopen upotřebit, dodává ji do sítě. Dodavatelé elektrické energie pak uživatel zaplatí energii, kterou ze sítě odebral, minus energie, kterou do sítě dodal pomocí větrné elektrárny. [21]

Je také možné, aby malá větrná elektrárna byla zcela připojena k rozvodné síti. Majitel této malé větrné elektrárny všechnu vyrobenou energii odvede do sítě a dostane za ni zapláceno. Podle platné legislativy je provozovatel sítě povinen elektřinu z větrných elektráren odkoupit. [21]

2.5 ROZDĚLENÍ PODLE UMÍSTĚNÍ

2.5.1 VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY NA PEVNINĚ

Při výběru místa ke stavbě větrné elektrárny se musí toto potenciální stanoviště pečlivě zhodnotit, aby se stavba větrné elektrárny ekonomicky vyplatila. Množství dostupné větrné energie je na pevnině velmi ovlivněno profilem terénu a jeho pokrytím vegetací. Vhodná místa pro stavbu větrných elektráren jsou především přímořské oblasti, kde vanou pravidelné silné větry po většinu roku. Ve vnitrozemských státech je pak nutné vytípnout oblasti s dostatečnou roční průměrnou rychlostí větru. [22]

V hustě osídlené Evropě už téměř došlo k vyčerpání těch nejvhodnějších lokalit pro umístění větrných elektráren. Navíc je nutno větrné elektrárny umístěné na pevnině výkonově omezovat, aby byly dodrženy hygienické limity pro hluk a další ekologická hlediska. Snaha o větší a vyšší stroje se tak stává kontraproduktivní. Není možno zcela využívat větrného potenciálu lokality a technických hranic konkrétní techniky. Dalším problémem při instalaci větrných elektráren na pevnině je doprava jejich rozměrných komponentů na místo stavby. Také z tohoto hlediska se větrné elektrárny umístěné na moři stávají pro investory více atraktivní. [9] [23]

2.5.2 VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY NA MOŘI

V řadě regionů neexistuje mnoho vhodných lokalit k umístění větrných elektráren, nebo už došlo téměř k jejich vyčerpání, proto se ke stavbě větrných elektráren začaly využívat i vodní plochy, zejména moře. Vítr nad vodní hladinou má ustálenou a vyšší rychlost, proto větrné elektrárny na mořských lokalitách dosahují vyšší účinnosti od 45 do 60 %. Výstavba větrných elektráren na moři není tolik ovlivněna omezením hluku a začleněním do krajiny, je tedy umožněno stavět rozsáhlé větrné parky o velkém počtu větrných elektráren. Navíc je při stavbě větrných elektráren na moři snazší doprava velmi rozměrných komponentů. [9] [23]

Nevýhodou větrných elektráren na moři jsou vyšší investiční náklady a dražší údržba. K pravidelnému provoznímu servisu je třeba specializovaných montérů s plavidly pro dopravu dílů. Při konstrukci větrné elektrárny umístěné na moři je také nutno dbát na to, aby veškeré elektrické instalace byly zabezpečeny před kontaktem s vodou. Také je potřeba počítat se zvýšenou protikorozní ochranou ocelových dílců. [11] [23] [24]

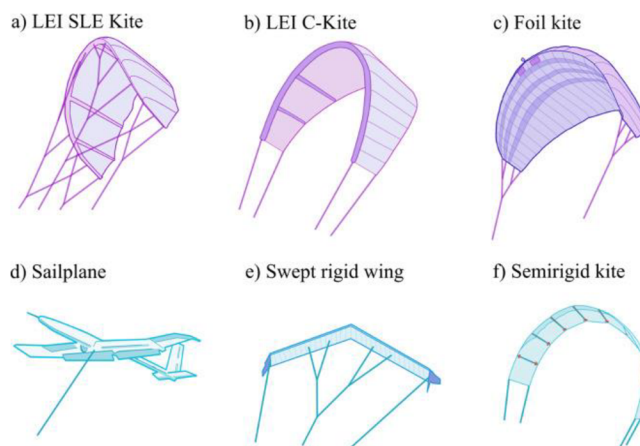
Nejčastěji se větrné elektrárny umísťují do mělčích částí moře, kde je hloubka 20–50 m a je možno vybudovat pevné základy. V současné době jsou však na vzestupu plovoucí větrné elektrárny. Tyto elektrárny mohou dosahovat účinnosti až 65 %. Instalace plovoucí větrné elektrárny je možná ve vodách s hloubkou i několika set metrů. Díky tomu se významně rozšířilo území, které lze využít ke stavbě větrných elektráren. Velkou nevýhodou těchto elektráren je však zatím jejich velmi drahá konstrukce. Postupem času, kdy budou vyčerpány oblasti na pevnině a v mělčích částech moří, lze očekávat velký zájem o tyto technologie. [9] [24]

2.6 NEKONVENČNÍ VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY

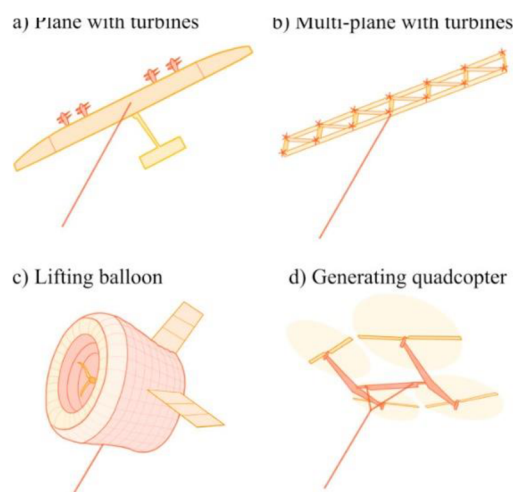
2.6.1 LÉTAJÍCÍ VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY

Létající větrné elektrárny se skládají ze dvou hlavních částí, pozemní a létající. Tyto dvě části jsou spojeny lany, které z létající části transportují mechanickou, nebo elektrickou energii do části pozemní. Záleží na konkrétním modelu elektrárny. U systémů „Ground-Gen“ se mechanická energie přeměňuje na elektrickou na zemi, u systémů „Fly-Gen“ dochází k přeměně v létající části elektrárny. Pozemní stanice pak může být pohyblivá, nebo pevně upevněná k zemi. [25]

Létající části těchto elektráren mohou mít několik variant. U systémů „Ground-Gen“ jde nejčastěji o jakési draky nebo kluzáky (obr. 10). U systémů „Fly-Gen“ (obr. 11) se může jednat o letadlo, nafukovací balón či kvadrokoptéru. Na těchto létajících částech je vždy umístěna jedna nebo více turbín, které zachycují energii větru. [25]



Obr. 10 Různé typy letounů u systémů Ground-Gen [25]

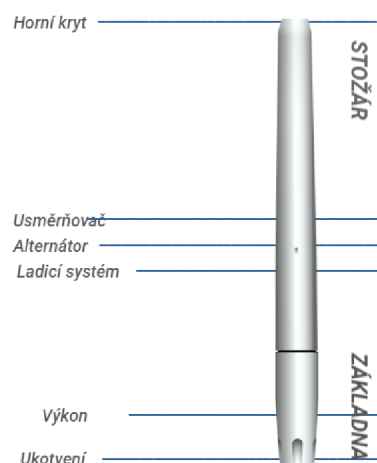


Obr. 11 Různé typy letounů u systémů Fly-Gen [25]

Létající větrné elektrárny umožňují využívat stále vanoucí vítr ve velkých výškách. V těchto výškách vítr dosahuje několikanásobných hodnot výkonu než na pevnině. Představují tak důležitou rozvíjející se technologii. Odvětví letecké větrné energie by mohlo být budoucností ve využívání energie větru. [9] [25]

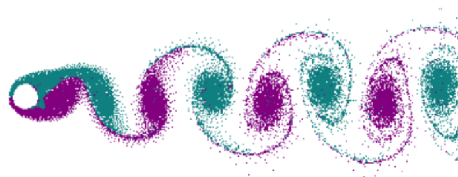
2.6.2 VĚTRNÁ ELEKTRÁRNA BEZ LOPATEK

Bezlistá větrná elektrárna je tvořena základnou a stožárem (obr. 12). Základna je pevně připevněna k zemi. Se stožárem válcovitého tvaru je svisle spojena pružnou tyčí. Stožár působením větru kmitá, a generuje tím elektřinu pomocí alternátorového systému. [26]



Obr. 12 Bezlistá větrná elektrárna [26]

Válec se rozkmitá díky víření, které za ním vzniká. Tento jev se nazývá Kármánova vírová stezka (obr. 13). Při určité rychlosti vítr nekonturuje tělo válce, v některých bodech se linie toku odtrhne a vytvoří vír. Když je vír vytvořen na jedné straně, na druhé straně se zvýší rychlost větru. To vyvolá tlakový rozdíl, a válec je tak tlačěn směrem od vytvořeného víru. Víry se tvoří střídavě z obou stran, to má za následek harmonicky se měnící boční zatížení na válec, kvůli kterému válec kmitá. Tomuto kmitání je ve stavebnictví, letectví a architektuře naopak snaha se vyhnout. [27]

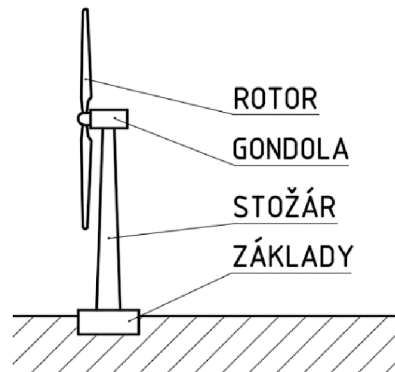


Obr. 13 Kármánova vírová stezka [27]

Aby k rozkmitání větrné elektrárny docházelo při různých rychlostech větru, je v ní zabudován tzv. ladicí systém. Tento ladicí systém umožňuje měnit tuhost systému větrné elektrárny tak, aby se dostával do rezonance při různých rychlostech větru. Tyto malé větrné elektrárny potřebují pouze třetinu pracovní plochy konvenčních větrných elektráren. Jejich výhodou je jednoduchá konstrukce bez převodových částí, ozubených kol, ložisek a brzd. Měly by tak být ekonomicky výhodnější a jednodušší na údržbu. Zatím se však nacházejí ve fázi certifikace a industrializace výrobních procesů. Otevírají se tím však další možnosti, jakým způsobem přeměňovat větrnou energii. [26] [28]

3 KONSTRUKCE SOUČASNÝCH VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN

Tato kapitola popisuje konstrukci větrných elektráren, které v současnosti převládají. Mají horizontální osu otáčení a tři lopatky pracující na vztlakovém principu. Stavbu těchto větrných elektráren lze rozdělit na čtyři základní části: rotor, gondolu, stožár a základy (obr. 14). [10]



Obr. 14 Ilustrační obrázek částí větrné elektrárny

3.1 ROTOR

Rotující část jakéhokoliv točivého stroje se nazývá rotor. Obecně jde o velmi namáhanou část, která musí být dobře vyvážená. Rotor větrné elektrárny zahrnuje rotorové listy, mechanismus jejich natáčení a rotorovou hlavu. [5] [29]

V dnešní době může být průměr rotoru i 160 metrů. Větší rotory se začaly stavět kvůli zvýšení výkonu větrné elektrárny. Při zvětšení průměru rotoru o několik metrů se zvětší plocha rotoru o stovky až tisíce metrů čtverečných, díky tomu je možné využít větší množství energie větru. [30]

3.1.1 ROTOROVÝ LIST

Rotorové listy zachycují energii větru a převádějí ji na rotační kinetickou energii. Dosahují délky až 85 m a mají tvar podobný křídům letadel. Jejich konec je zaoblený, do špičky, nebo má tvar tzv. wingletu jako letadla. Na konci listu totiž dochází k vyrovnání tlaků, kvůli kterému se tvoří vír. Tento indukovaný vír zvyšuje odpor celého listu a tvoří velkou složku hluku od rotoru. Díky optimalizování konce listu se tak okrajový vír, indukovaný odpor i hluk rotoru zmenší. [5] [31]

Listy rotoru se vyrábí metodou laminování do negativní formy. Laminování je postup, kdy se tkanina prosycuje pojivem. Jako tkanina se používá zejména skelná tkanina, jako pojivo pryskyřice smíchaná s tvrdidlem. Po vytvrzení pojiv vzniká kompozitní díl, který kombinuje vlastnosti obou materiálů. Je nutné používat jen nezbytné množství pryskyřice, větší množství způsobuje zhoršení mechanických vlastností dílu. Tímto způsobem se vyrobí dvě poloskořepiny, které se následně vyztuží nosníkem a slepí dohromady. [17] [31]

Rotorové listy patří mezi nejvíce namáhané součásti celé větrné elektrárny. U vyrobených listů se tedy zkoumá jejich vlastní frekvence, pevnost a tvarová shodnost kvůli vyvážení celého rotoru. Pokud je větrná elektrárna umístěna v oblastech, kde na listech rotoru často vzniká námraza, lze do listů umístit systém vyhřívání. Toto řešení je však velmi energeticky náročné, proto je nutné zvážit, zda je ekonomicky výhodné. [17]

3.1.2 ROTOROVÁ HLAVA

Rotorová hlava spojuje rotorové listy s hlavní hřídelí. Umožňuje tak přenos kinetické energie listů dále na hřídel. Je vyrobena z litiny vysoké kvality a má půlkulovitý, nebo kuželovitý tvar, aby kladla co nejmenší odpor vůči vzduchu. Rotorové listy jsou k rotorové hlavě upevněny pevnostními šrouby. Tyto šrouby jsou zalaminovány přímo do stěny listu. [5] [17]

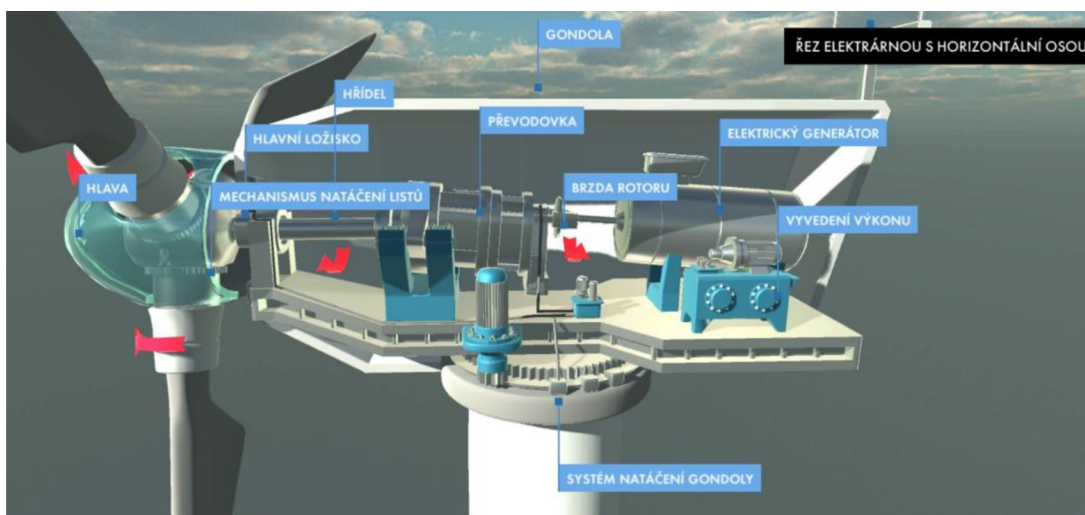
3.1.3 MECHANISMUS NATÁČENÍ LISTŮ

Pomocí mechanismu natáčení listů se reguluje výkon dodávaný vrtulí. Výkon je nutno regulovat, jelikož zvyšování rychlosti větru vede i ke zvyšování výkonu, které by mohlo způsobit poškození generátoru. Pokud je výkon vyšší než nominální výkon generátoru, listy se natočí tak, aby došlo ke zmenšení hnacích aerodynamických sil. Při nízké rychlosti větru se naopak natočí tak, aby se hnací síly zvětšily, a tím se zvětšil i výkon. Díky možnosti nastavení úhlu náběhu větru na lopatky je zajištěno jednodušší rozbíhání, zastavování rotoru a menší zatížení listů při vyšších rychlostech větru. Při vysoké rychlosti větru, kdy už by mohlo dojít k poškození větrné elektrárny, se rotor zabrzdí a listy se natočí nejužším profilem vůči větru. [5] [20]

U starších větrných elektráren nebo u větrných elektráren s výkonem do 1000 kW se však systém natáčení listů nemusí nacházet. Listy mají konstantně nastavený úhel náběhu vzduchu, jde tak o jednodušší konstrukci s nenáročnou údržbou. Rotor bez mechanismu natáčení listů se však musí startovat pomocí elektrického motoru a při vysokých rychlostech větru jeho výkon klesá. [5] [20]

3.2 GONDOLA

V gondole (strojovně) jsou ukryty všechny součásti (kromě rotoru), které jsou umístěny na stožáru. Mezi základní části gondoly (obr. 15) patří hlavní hřídel, převodovka, generátor, brzda, spojka a rám gondoly. [5] [32]



Obr. 15 Řez gondolou [32]

Všechny tyto komponenty jsou ukryty ve vnějším sklolaminátovém krytu, který má čtvercový, obdélníkový, nebo méně často kruhový průřez. U větrné elektrárny bez převodovky je tento kryt gondoly značně menší a má převážně kruhový průřez. [31]

Gondola je na stožáru uložena otočně, aby bylo umožněno natočení rotoru proti větru. Gondola a rotorové listy se natáčí podle impulzů pro natáčení, které vychází z údajů o síle a směru větru. Tyto informace sbírá systém pro měření, který je upevněn na zadní části krytu gondoly. [31]

3.2.1 HLAVNÍ HŘÍDEL

Hlavní hřídel slouží pro přenos kinetické energie do převodovky. Jeho součástí je tedy i příruba, která zajišťuje spojení s rotorovou hlavou pomocí šroubů. [33]

3.2.2 PŘEVODOVKA

Rotor větrné elektrárny se kvůli své velikosti otáčí relativně pomalu. Převod této nízké rychlosti rotoru na vyšší rotační rychlost generátoru zajišťuje převodovka. U větrných elektráren s výkonem nad 500 kW se pracovní otáčky rotoru pohybují v rozmezí 40 a 80 otáček za minutu. Převodkový poměr se pak pohybuje od 1:70 do 1:200 podle pracovních otáček generátoru. [20] [33]

U větrných elektráren s výkonem v řádech megawattů je nejčastěji využívána několikastupňová planetová převodovka, případně se využívá několikastupňová kombinovaná převodovka, která má první stupně planetové a poslední jeden nebo dva stupně koaxální. Jednou z převodovek, kterou vyrábí firma Bosch-Rexroth do větrných elektráren o výkonu 2 MW, je převodovka Regulus GPV (Obr.16). [33]



Obr.16 Převodovka Regulus GPV [76]

Převodovky s několika převodovými poměry umožňují měnit rychlost otáčení rotoru, zatímco rychlost generátoru zůstává stejná. Každý převodový poměr je určen pro určitý rozsah rychlosti větru. Poměry se volí tak, aby byl koeficient výkonu co největší, a tím i produkce elektrické energie. [34]

SLEDOVÁNÍ STAVU PŘEVODOVKY

Převodovky větrných elektráren pracují v náročných podmínkách. Jsou vystavovány krátkodobému proměnlivému zatěžování při rozběhu, zastavování či poryvech větru, což je špatné zejména pro ložiska. Jedná se tak o nejvíce poruchovou součást celé větrné elektrárny, proto je již při návrhu kladen důraz na vysoký bezpečnostní koeficient. Údržba, výměna nebo výpadek výroby energie při poškození převodovky patří mezi největší výdaje při provozu větrných elektráren. [35] [36]

Pro včasné detekování závad či jejich předcházení existuje několik způsobů monitorování. Nejčastější metodou monitorování stavu je analýza vibrací. Tato analýza je založena na detekci neobvyklé odezvy vibrací, které mohou znamenat strukturální změny, jako je např. nevyváženost, opotřebenění a poškození ozubených kol, poškození ložiska. K zachycení vibrační odezvy se používají piezoelektrické akcelerometry. [35] [36] [37]

Dále se u převodovek mohou monitorovat akustické emise. Jedná se o metodu monitorování s vyšší citlivostí, jelikož snímače akustických emisí jsou mnohdy schopné detekovat závadu dříve. Snímače akustických emisí detekují změny hluku. Hlukové změny se projeví dříve než vibrační změny, které se vyskytují až při vážnějším poškození. [35] [36]

Dalším způsobem sledování stavu převodovky je analýza oleje a mazání. Sleduje se zejména čistota oleje, jeho viskozita a teplota. Podle stavu oleje lze určit, zda je nutné olej vyměnit, nebo jestli došlo k nějakému poškození převodovky. [35] [36]

VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY BEZ PŘEVODOVKY

Existují i větrné elektrárny bez převodovky. Bezpřevodkovkové větrné elektrárny jsou jednodušší svou konstrukcí a díky tomu i jednodušší na údržbu. K výrobě elektrické energie využívají nízkorychlostní multipólové generátory, které jsou však velmi rozměrné. Místo je ale ušetřeno díky chybějící převodkovkové skříni a spojovacím prvkům. Gondola má tedy o něco menší rozměry. Kvůli absenci převodovky se také snižují hlukové emise. [20]

Přímo na rotoru větrné elektrárny je umístěn prstenec cívek (pólů), druhý prstenec je statorový. Jednotlivé dvojice pólů se pak spínají podle velikosti vyvozeného krouťícího momentu. Platí tedy, že čím je vyšší rychlost větru, tím je zapnut větší počet pólových dvojic. Vyrobenou elektrickou energii nelze dodávat hned do rozvodné sítě. Musí být nejdříve upravena výkonovou elektronikou, při této úpravě však vznikají ztráty. [33]

3.2.3 GENERÁTOR

Generátor je součást, která přeměňuje mechanickou energii rotoru na elektrickou. Ve větrných elektrárnách se nejčastěji používají asynchronní, nebo synchronní generátory trojfázového střídavého proudu. Použitý generátor je jistěn proti zkratu, přetížení a poklesu napětí či přepětí. Generátory velkých výkonů mohou být opatřeny ještě odporovými teploměry pro měření teploty vinutí a ložisek. [1]

SYNCHRONNÍ GENERÁTOR

Synchronní generátor (alternátor) vyrábí elektrickou energii ve formě střídavého napětí a proudu. Je složen z rotoru a třífázového statoru o stejném počtu pólů. Elektromagnety jsou uloženy v rotoru. Otáčivá rychlost synchronního generátoru daná kmitočtem sítě a počtem pólů je konstantní. [1]

ASYNCHRONNÍ GENERÁTOR

Asynchronní stroje se převážně využívají jako poháněcí motory. Lze je však také používat jako generátory elektrické energie. Asynchronní generátor může při spouštění větrné elektrárny fungovat jako motor. [1]

Otáčivá rychlost asynchronního generátoru je téměř konstantní. Pokud je zatížení nulové, shoduje se s otáčivou rychlostí synchronního generátoru se stejným počtem pólů. Při zvýšení výkonu dodávaného do sítě se otáčivá rychlost také nepatrně zvyšuje. [1]

Ve většině větrných elektráren lze najít asynchronní motor s kotvou nakrátko pracující v generátorickém chodu. Asynchronní motor je jednodušší, spolehlivější a levnější, velice jednoduše se rozbíhá a připojuje na síť. Jeho výkon je snadno regulován, hlavní nevýhodou je však malé rozpětí otáček. [1]

3.2.4 BRZDA

Při velkých rychlostech větru (v průměru kolem 25 m/s) by mohlo dojít k poškození větrné elektrárny, proto jsou opatřeny mechanickou brzdou, která v krizových situacích zastaví točící se rotor. Brzda je disková a spouští se pružinou při poklesu hydraulického tlaku. Je umístěna na výstupním hřídeli z převodovky. Stojící větrná elektrárna by měla odolat rychlosti větru až 60 m/s. Ve většině větrných elektrárnách lze také najít aerodynamickou brzdu, která rotor nezastaví úplně, ale zabraňuje přetížení rotoru při nárůstu jeho otáček. [1] [10]

3.2.5 SPOJKA

Spojka spojuje dva sousední hřídele mezi převodovkou a generátorem. Jejím úkolem je kompenzovat rázové špičky při náhlých poryvech větru. [33]

3.2.6 RÁM GONDOLY

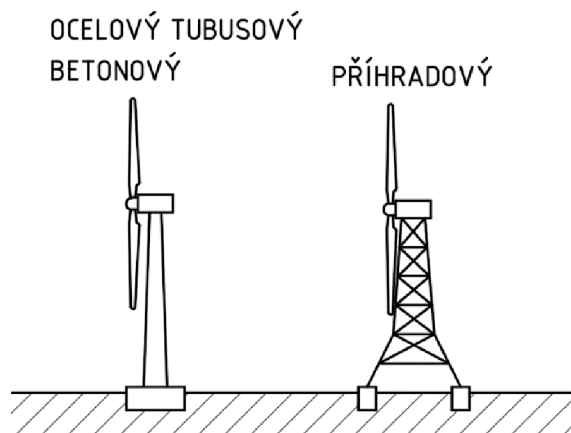
Nosný rám gondoly je podélné těleso, které nese všechny komponenty gondoly. Je vyroben z ocelových plátů, které jsou k sobě svařeny. Plochy, na které dosedají další komponenty, jsou obrobena na horizontální frézce. [33]

3.3 STOŽÁR

Stožár drží rotor, gondolu a všechny jejich součásti v požadované výšce nad zemí. Umožňuje přístup k údržbě a případné opravě součástí. Uvnitř stožáru se nachází plošiny mezipater, žebříky, lišty pro vedení kabeláže, případně konstrukce pro výtah. [31]

Výška stožáru se obvykle pohybuje od 40 do 110 metrů. Výška tubusu má význam ze dvou důvodů. Jedním je nárůst průměrné rychlosti větru s výškou, druhým pak, aby spodní část rotoru nebyla zasahována negativními vlivy zemského povrchu. [10]

Existují tři typy stožárů: ocelový tubusový, příhradový a betonový (obr. 17). V Evropě se nejčastěji instaluje ocelový tubusový stožár, který je kvůli lepší přepravě rozdělen na segmenty dlouhé cca 20 metrů. Příhradový typ stožáru se využívá především v Číně a Indii. Skládá se z jednotlivých nosníků a vzpěr o malé hmotnosti a příznivé délce pro přepravu. Je výhodnější zejména při velkých délkách stožáru. Jedná se však o velmi členitou stavbu, proto je často kritizován v otázce ovlivnění krajinného rázu. Betonový stožár se pak jako ocelový skládá z dílců, má velmi dlouhou životnost, nízké nároky na opravy, vysokou odolnost proti korozi a lepší tlumicí schopnosti než ocelový stožár. [20] [38]



Obr. 17 Ilustrační obrázek typů stožárů

3.4 ZÁKLADY

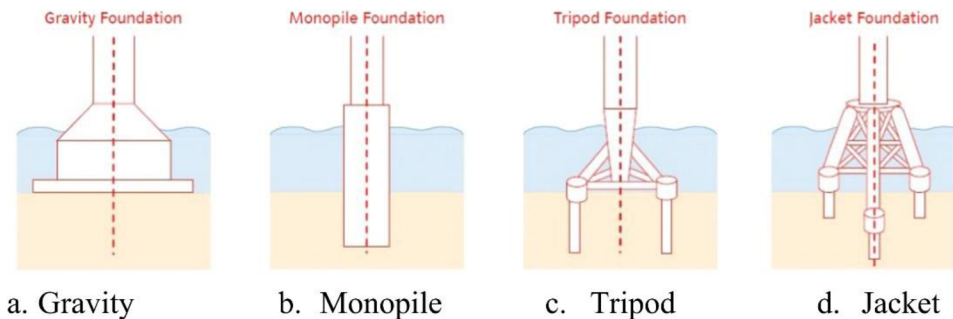
Základy zajišťují větrné elektrárně stabilitu. Výrazně se liší podle toho, jestli je větrná elektrárna umístěna na pevnině, nebo na moři.

3.4.1 ZÁKLADY VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN NA PEVNINĚ

Větrná elektrárna je velmi vysoká stavba, na kterou navíc působí další síly, proto je náchylná na vychýlení. V případě stavby větrné elektrárny na pevnině je před zahájením nutný geologický průzkum podloží. Pokud zemina není vhodná ke stavbě větrné elektrárny, musí se podloží upravit. Na stabilní základovou spáru se vytvoří základová deska z betonu o čtvercovém půdorysu. Na tu se umístí základový ocelový kruh, neboli fundament, který se zajistí distančními šrouby. Následuje tzv. armování, které obnáší umístění ocelových výztuží. Spolu s ocelovou výztuží se umístí i trubky pro vývod kabeláže. Celé bednění se následně vylije betonem. Po přibližně pěti týdnech, kdy beton dostatečně vyzraje, se provede penetrační a plastický nátěr. Plastický nátěr se provádí pouze mezi fundamentem a betonovým základem, aby nedošlo pronikání vlhkosti mezi tyto dvě plochy. Poté se již může nainstalovat kabeláž a celý základ zavést zeminou. [31] [39]

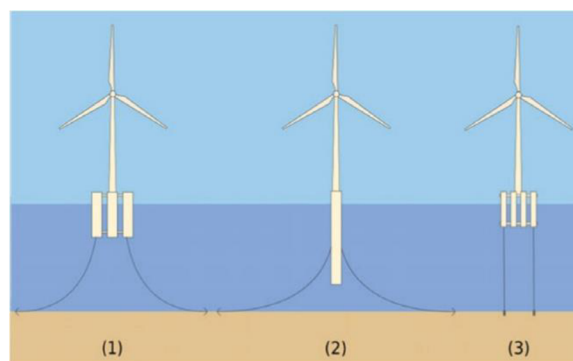
3.4.2 ZÁKLADY VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN NA MOŘI

U stavby větrné elektrárny na moři existuje hned několik druhů základů (obr. 18). Nejvyužívanějším způsobem je tzv. systém „monopile“. [23] [40]



Obr. 18 Pevné základy větrných elektráren na moři [40]

Současným trendem jsou však plovoucí větrné elektrárny. Existují tři typy plovoucích struktur, které již byly někde využity (obr. 19). Všechny tyto struktury jsou ke dnu připevněny kotvicími lany. [40]



Obr. 19 Koncepty plovoucích větrných elektráren [40]

4 OVLIVNĚNÍ OKOLÍ

Jako každá stavba vytvořená člověkem i větrné elektrárny ovlivňují své okolí. Vzhledem mění krajinný ráz, kdy na sebe upoutávají pozornost člověka. Jejich vliv na prostředí se zvyšuje, jsou-li v chodu, nejen vznikajícím stroboskopickým efektem, ale i hlukem. Navíc zasahují do přirozeného prostředí ptáků, netopýrů či jiné zvěře.

4.1 RÁZ KRAJINY

Větrné elektrárny vzhledem k jejich podstatě nelze nijak ukrýt. Pro dosažení správné funkce musí být umístěny na dostatečně větrné místo, které je většinou situováno na vyvýšené otevřené pozici. Důležitý faktor při výrobě elektrické energie hraje výška a velký rozměr rotoru. Automaticky se tak větrná elektrárna stává významnou součástí krajinného rázu. [10]

Ochranu krajinného rázu popisuje zákon č. 114/1992 Sb. o ochraně přírody a krajiny. Podle tohoto zákona o umístění staveb do krajinného rázu musí být zachovány významné krajinné prvky, chráněná území a okolí kulturních památek. K povolení stavby, která naruší krajinný ráz nebo sníží jeho hodnotu, musí být vydán souhlas orgánem ochrany přírody. [41]

Dosud neexistuje žádná výzkumná studie, která by potvrdovala, že větrné elektrárny ničí krajinný ráz, jelikož ovlivnění krajinného rázu má subjektivní charakter. To, že větrné elektrárny mění krajinný ráz, lze považovat za fakt. Krajina se ale mění lidskou činností už po staletí. [10]

Existují však místa, která se ukázala být z hlediska krajinného rázu vhodnější pro umístění větrné elektrárny. Pokud jsou větrné elektrárny umístěny do otevřené krajiny velkého měřítka, nepůsobí tak dominantním dojmem, jako kdyby byly umístěny v uzavřené krajině měřítka malého. Nevhodné je umístění blízko silnice, jelikož ta podtrhuje jejich viditelnost a samotná elektrárna přitahuje pozornost řidiče. Větrné elektrárny se tak nejčastěji umísťují do krajiny ovlivněných průmyslem, do plochých zemědělských krajín, členitých hornatých krajín nebo do kulturních krajín s malou rozptýlenou zástavbou. Tyto typy krajín se ukázaly být nejvhodnějšími. Vhodnost, či nevhodnost stavby větrné elektrárny v dané lokalitě mohou ovlivnit také kraje a obce během plánování výstavby. [41] [42]

4.2 PŘÍRODA

Z hlediska působení na přírodu mají větrné elektrárny dominantní vliv na ptáky a netopýry, protože svým rotorem zasahují do jejich prostředí. V České republice byla zpracována pouze jedna studie, která však nepotvrdila, že by větrné elektrárny byly pro ptáky velkou hrozbou. Rotor je pro ptáky viditelnou překážkou, které se dokážou vyhnout. Větší nebezpečí hrozí ptákům v noci nebo mlze. Následky střetu však nemusí být fatální, jelikož se kolem lopatek tvoří vzduchové polštáře, po kterých se pták smýkne. [20] [43]

Podle zahraničních statistik počet kolizí ptáků s větrnou elektrárnou na kilometrovém pásu se dá srovnat s počtem střetů s automobily na frekventované silnici o délce 1 km. Tento počet je výrazně menší než počet ptáků zabitých elektrickým vedením. Daleko větší hrozbou pro ptáky a další zvířata je změna klimatu, kterou však využívání větrných elektráren napomáhá zmírňovat. Lze tedy říci, že větrné elektrárny nevytvářejí pro ptáky a netopýry velké riziko, pokud jsou správně umístěny. Nesmí se však stavět blízko velkých kolonií netopýrů a ptáků nebo v jejich tahovém koridoru. Počet střetů by se tak výrazně zvýšil. [20] [43]

Další obavou ochránců přírody je rušení a plašení zvěře větrnými elektrárnami. Ústav pro výzkum divoče žijících zvířat na Veterinární univerzitě v Hannoveru sledoval území s desítkami větrných elektráren tři roky a došel k závěru, že počet zvěře v dané oblasti zůstal stejný. Zvířata si po nějaké době na zařízení zvyknou a vnímají ho jako součást daného prostředí. Větrná elektrárna také nijak výrazně neovlivňuje využití přilehlé půdy k zemědělské činnosti. [43]

4.3 STROBOSKOPICKÝ EFEKT

Stroboskopický jev nastává při osvětlení rotujících předmětů. Listy rotoru zastíňují slunce, dochází tak k rychlému střídání světla a stínu. To může v pozorovateli vyvolávat pocit, že pozorovaný předmět je v klidu nebo se otáčí pomaleji či opačně. Tento jev v některých lidech vyvolává obtěžující či stresující dojem, proto je snaha ho eliminovat na minimum. [10] [44]

Oblast ovlivněná stroboskopickým efektem je dána astronomickým chodem slunce po obloze. Při západu a východu slunce, kdy je slunce níže nad obzorem, je oblast ovlivněná stroboskopickým efektem větší. Když se slunce nachází nejvýš, oblast leží pouze v bezprostřední blízkosti elektrárny. Tomuto problému se věnují zejména v severských zemích, kde je většinu času slunce nízko nad obzorem. Stroboskopický jev může být vnímatelný až do vzdálenosti 3 km v závislosti na šířce rotorových listů. [10] [43]

Při projektování větrné elektrárny na daném místě se počítá nejvyšší možná doba výskytu stroboskopického jevu. Skutečná doba, kdy hraje roli i oblačnost, se pak pohybuje kolem 6 hodin ročně. V programu elektrárny je pak možné nastavit vypnutí elektrárny na dobu, kdy by hrozilo vrhání stínů na obydlí. [43]

Dříve docházelo také k tzv. diskoefektu. Ten vznikl odražením paprsku Slunce od lesklých listů rotoru. Tento jev byl eliminován matným nátěrem současných větrných elektráren. [10]

4.4 HLUK

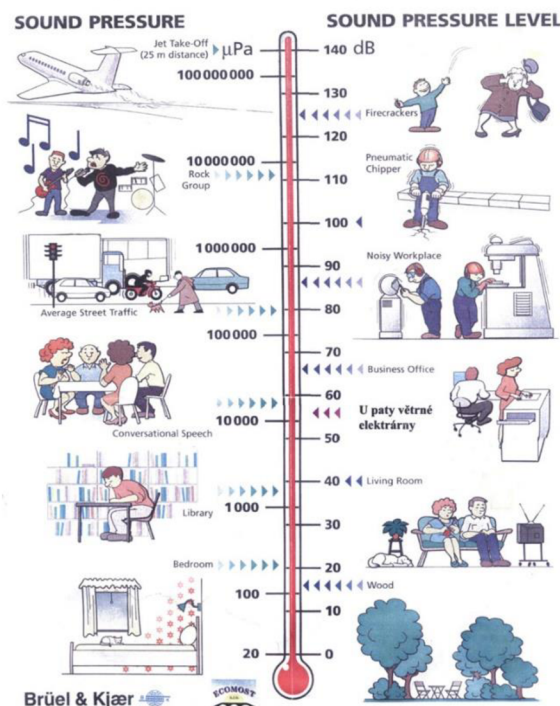
4.4.1 HLUK OBECNĚ

Hlukem je označován nechtěný zvuk, který člověka ruší, obtěžuje, nebo dokonce způsobuje škodlivé účinky. Každý člověk má určitou hranici tolerance hluku. Za hluk se může považovat i běžný hovor nebo hudební projev, velmi záleží na vztahu osoby k vnímanému zvuku. Zvuk je tedy obecnější pojem než hluk. [45] [46]

Hluk je průvodním jevem chvění. To vede u technických zařízení k namáhání a možnému poruše. Boj proti hluku se tedy vede jak kvůli zdravotním rizikům pro člověka, tak kvůli možnému poruše zařízení, tím i zvýšeným nákladům. S postupným zaváděním stále většího množství techniky do našeho běžného života hlučnost v životním prostředí roste. Pravděpodobně až v 90 % jsou příčinou hluku stroje a technologická a dopravní zařízení. [45] [47]

4.4.2 HLUK VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN

Hluk je považován za formu znečištění. Ovlivňuje okolí elektrárny ve vzdálenosti několika set metrů. Hladina hluku u paty běžné větrné elektrárny se v současnosti pohybuje přibližně v rozmezí 50 a 60 dB, to odpovídá pouličnímu hluku či skupinovému rozhovoru. S větší vzdáleností od větrné elektrárny hladina hluku klesá, ve vzdálenosti cca 400 až 500 metrů by již měly být splněny hygienické limity popsané níže. Srovnání s jinými zdroji hluku lze vidět na obr. 20. [5] [43] [48] [49]



Obr. 20 Srovnání hladin hluku [49]

MECHANICKÝ HLUK

Mechanický hluk pochází ze stroje. Vzniká funkcí převodovky, generátoru, natáčením listů a stroje. Přenáší se přímou cestou do okolí nebo dále konstrukcí, ze které se šíří opět do okolí. Mechanický hluk dnešních větrných elektráren je poloviční proti větrným elektrárnám z 80. let 20. století. Povedlo se ho snížit lepším designem převodovky, snížením vibrační součástí v gondole či materiály pohlcujícími zvuk umístěnými do gondoly. U dnešních větrných elektráren tedy převažuje aerodynamický hluk. [10] [50] [51]

AERODYNAMICKÝ HLUK

Příčinou aerodynamického hluku je pohyb tekutiny, v tomto případě vzduchu, při kterém dochází k prudké změně tlaku této tekutiny např. při proudění kolem pevných překážek. Tento rozruch pak vede ke vzniku akustických vln s jistým frekvenčním spektrem. U větrných elektráren aerodynamický hluk vzniká při obtékání rotoru (zejména listů) a stožáru. Nejdominantnějším zdrojem aerodynamického hluku by měly být konce lopatek, kde dochází k vyrovnávání tlaků, a tím vzniku vírů. [50] [52]

Hladina aerodynamického hluku emitovaného větrnou elektrárnou během dne kolísá, hlavní roli hraje směr a rychlost větru. Dále je také ovlivněna:

- výškou a velikostí rotoru větrné elektrárny,
- konstrukcí větrné elektrárny,
- tvarem a zakončením rotorových listů,
- způsobem regulace otáček větrné elektrárny. [53]

4.4.3 HYGIENICKÉ LIMITY

Pro hluk a vibrace jsou v České republice stanoveny hygienické limity. Udává je Nařízení vlády č. 272/2011 Sb. o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací. Z tohoto nařízení pro větrné elektrárny vyplývá, že v místě budovy postavené od nich nejbližší nesmí tzv. ekvivalentní hladina akustického tlaku přesahovat 50 dB přes den (od 6 do 22 hodin) a 40 dB v noci. Pro výrobce větrných elektráren je zásadní ten přísnější noční limit, protože není možné uvádět větrnou elektrárnu mimo provoz na delší dobu. Hygienické limity však neudávají bezpečný práh, ale mez přijatelného rizika. To znamená, že i pod hygienickým limitem existuje určité zdravotní riziko. Naopak jejich překročení automaticky neznamená poškození zdraví. [46] [54]

K porušování hygienických limitů dochází velmi zřídka, jelikož už při projektování větrné elektrárny se počítá s těmito limity. Před výstavbou se provede tzv. akustická studie, při které se vyjde z hladiny akustického výkonu a hladin ve spektru daných výrobcem. Tato studie obsahuje také srovnání hluku větrné elektrárny s hlukem pozadí. Pokud jsou však nějaké pochybnosti, že dané limity mohou být porušovány, uskuteční se tzv. hygienické měření. Při zjištění překročení daného limitu, v ovládacím programu větrné elektrárny se na daný čas, kdy hrozí toto překročení, sníží výkon nastavením rotorových listů, případně se větrná elektrárna vypne. [10] [43]

4.4.4 ÚČINKY HLUKU NA ČLOVĚKA

Člověk je schopen vnímat zvuk pomocí sluchu. Sluchovým orgánem je ucho a jeho funkce spočívá v přeměně mechanických kmitů tekutiny vnitřního ucha na nervové vzruchy. Hluk však nemusí být škodlivý jenom pro sluchový orgán. [46]

Účinky hluku popisuje tzv. Lehmannovo schéma. Toto schéma udává možná nebezpečí podle hladiny hluku L_A :

- od 30 dB – nebezpečí pro nervový systém a psychiku,
- od 60 až 65 dB – nebezpečí pro vegetativní systém (jeden z řídicích systémů organismu, neovladatelný vůlí),
- od 90 dB – nebezpečí pro sluchový orgán,
- od 120 dB – nebezpečí poškození buněk a tkání sluchového orgánu. [46] [55] [56]

5 NÁVRH EXPERIMENTU

Pro zhodnocení hluku a vibrací větrné elektrárny je nutné provést experiment. Tato kapitola popisuje návrh tohoto experimentu. V úvodu kapitoly jsou sepsány základní akustické veličiny a pojmy, které je vhodné zmínit. Poté je již popsána vhodná měřicí technika a místa pro její využití.

5.1 ZÁKLADNÍ AKUSTICKÉ VELIČINY A POJMY

5.1.1 AKUSTICKÉ VLNĚNÍ

Předpokladem pro šíření vlnění je prostředí složené z hmotnostních částic, které se vyznačuje stlačitelností nebo pružností. Příčinou vzniku vlnění jsou vnější či vnitřní dynamické síly, které uvedou částice pružného prostředí do mechanického kmitání. Tímto pohybem částic vzniká akustická energie, ta se šíří dále vlněním po vlnoplochách. Vlnoplocha je tedy myšlená plocha, do které dorazí rozruch ve stejném čase a fázi. Směry, kterými se vlnoplochy šíří, se nazývají paprsky. Jsou kolmé na vlnoplochy. Pokud se neuplatní jiné vlivy, šíří se přímočaře do všech směrů z místa rozruchu. [45] [47] [52]

Vlnění dělíme na podélné a příčné. Při podélném částice kmitají ve směru šíření vlny, při příčném kmitají kolmo na směr šíření vlnění. U tekutin (plynů a kapalin) se vyskytuje pouze vlnění podélné, které se ve frekvenčním rozsahu slyšitelnosti označuje pojmem zvuk. V tuhých látkách se může vyskytovat podélné i příčné vlnění nazývané jako vibrace. [52]

Přímočaré šíření je v realitě ovlivňováno odrazy od překážek, ohybem v prostředí s měnícími se vlastnostmi nebo lomem při přechodu z jednoho prostředí do druhého s jinými vlastnostmi. Prostor, ve kterém nedochází k těmto dalším vlivům, simuluje bezdozvuková komora. [47]

Bezdozvuková komora (obr. 21) je tedy významná akustická laboratoř pro přesná měření, jelikož se v ní nenachází žádné přídavné rušivé prvky. Stěny bezdozvukové komory jsou opatřeny dlouhými jehly z vysoce pohltivého materiálu. Díky svému tvaru, použitému materiálu a velké ploše má výsledné akustické pole pouze přímé složky akustických veličin bez odrazů. Akustické vlnění se zde tedy šíří jako ve volném zvukovém poli. V případě větrných elektráren by se dala využít pouze velká bezdozvuková komora, konkrétně pro měření akustických emisí dílčích komponent nacházejících se v gondole. [52] [57]



Obr. 21 Bezdozvuková komora [57]

5.1.2 AKUSTICKÝ TLAK

Při kmitání částic dochází k jejich zředování a zhušťování, které odpovídá zvýšení nebo snížení tlaku v tekutinách. Celkový tlak daného prostředí tedy kolísá okolo původního statického tlaku nebo barometrického tlaku vzduchu. Akustický tlak je odchylka celkového tlaku od statického tlaku při vlnění v daném prostředí, jedná se tedy o skalární veličinu. Je to nejčastěji měřená akustická veličina. [46] [52]

5.1.3 AKUSTICKÝ VÝKON

Akustický výkon popisuje množství akustické energie, která projde myšlenou prostorovou plochou za jednotku času.

Je popsán vztahem

$$W = p \cdot v \cdot S = I \cdot S [W], \quad (4)$$

kde p je akustický tlak, v je rychlost kmitání částic, S je sledovaná plocha a I je akustická intenzita. [47] [52]

Akustický výkon je výhodnější pro definici hluku než akustický tlak, jelikož akustický tlak závisí na vnějších faktorech (např. vzdálenost od zdroje, orientace příjemce). [52]

5.1.4 AKUSTICKÁ INTENZITA

Akustická intenzita označuje tok akustické energie v daném směru a smyslu plochou, která je na tento směr kolmá, vztažený na jednotku plochy. Jedná se tedy o vektorovou veličinu, jejíž směrovost určuje směr šíření akustického vlnění. Kolmo ke směru akustického vlnění se akustická intenzita rovná nule. [47] [52]

Pro ustálený stav platí vztah

$$I = \frac{W}{S} \left[\frac{W}{m^2} \right], \quad (5)$$

kde W je akustický výkon a S sledovaná plocha. [47]

Akustická intenzita se využívá zejména pro identifikaci zdrojů hluku nebo nejvýraznějších zářičů povrchů stroje. Používá se také pro určení akustického výkonu jednotlivých strojů. [52]

5.1.5 HLADINY AKUSTICKÝCH VELIČIN

Lidské ucho vnímá jako základní akustickou veličinu akustický tlak. Nejnižší akustický tlak, který je lidské ucho schopno vnímat, se nazývá práh slyšitelnosti a jeho hodnota je při frekvenci 1000 Hz kolem 20 μ Pa. Nejvyšší akustický tlak, při kterém člověk začíná pociťovat bolest, se nazývá práh bolesti a jeho hodnota je přibližně 100 Pa. Jde tedy o velké rozmezí hodnot. Navíc lidské ucho nereaguje na zvukový podnět lineárně, ale logaritmicky, proto bylo zavedeno praktičtější vyjádření v logaritmické stupnici. [47] [52]

Logaritmická vyjádření akustických veličin se obecně nazývají hladiny akustických veličin a jsou definovány obecným vztahem

$$L = \log \frac{A}{A_0}, \quad (6)$$

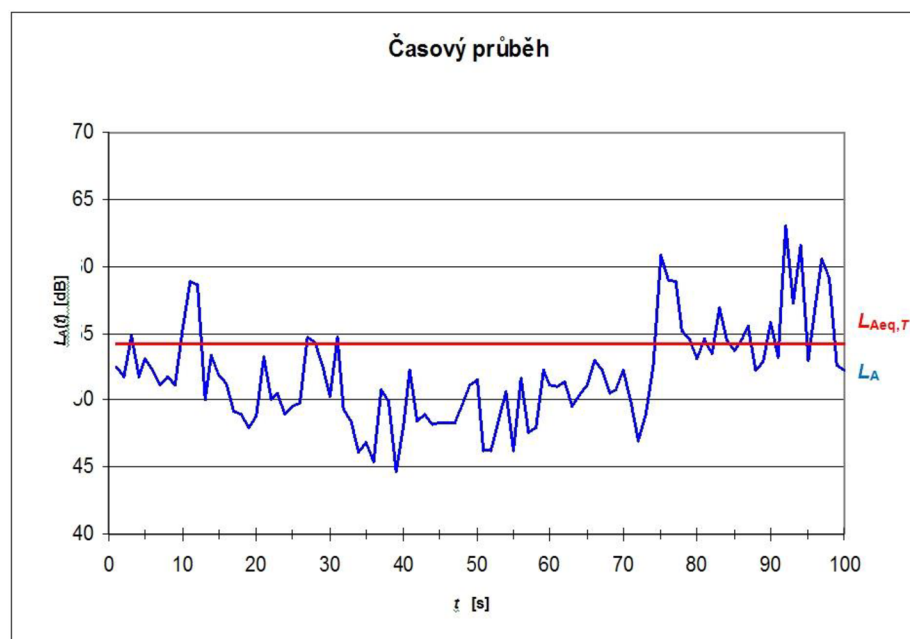
kde A je hodnota porovnávané veličiny a A_0 je hodnota referenční. Jednotkou hladiny je bel, ale vzhledem k velké šířce této veličiny se používá desetkrát menší jednotka zvaná decibel [dB]. [52]

Hladina akustického tlaku je definována vztahem

$$L_p = 20 \cdot \log \frac{p}{p_0} \text{ [dB]}, \quad (7)$$

kde p je akustický tlak v daném bodě akustického prostoru a p_0 referenční hodnota, která je rovna $2 \cdot 10^5$ Pa. [46] [52]

V hygienických limitech je stanovena tzv. **ekvivalentní hladina akustického tlaku** $L_{Aeq,T}$ [dB]. Ta je vždy vztažena k době trvání akustického signálu T [s] a vyjadřuje tzv. energetický průměr. Proměnný akustický signál $L_A(t)$ je tedy energeticky ekvivalentní k ustálené hodnotě $L_{Aeq,T}$ (obr. 22). [46]



Obr. 22 Časový průběh akustického signálu a jeho ekvivalentní hladina [46]

Hladina akustického výkonu je definována vzorcem

$$L_W = 10 \cdot \log \frac{W}{W_0} \text{ [dB]}, \quad (8)$$

kde W je hodnocený akustický výkon ve watttech a W_0 referenční hodnota, která se rovná 10^{-12} W. [52]

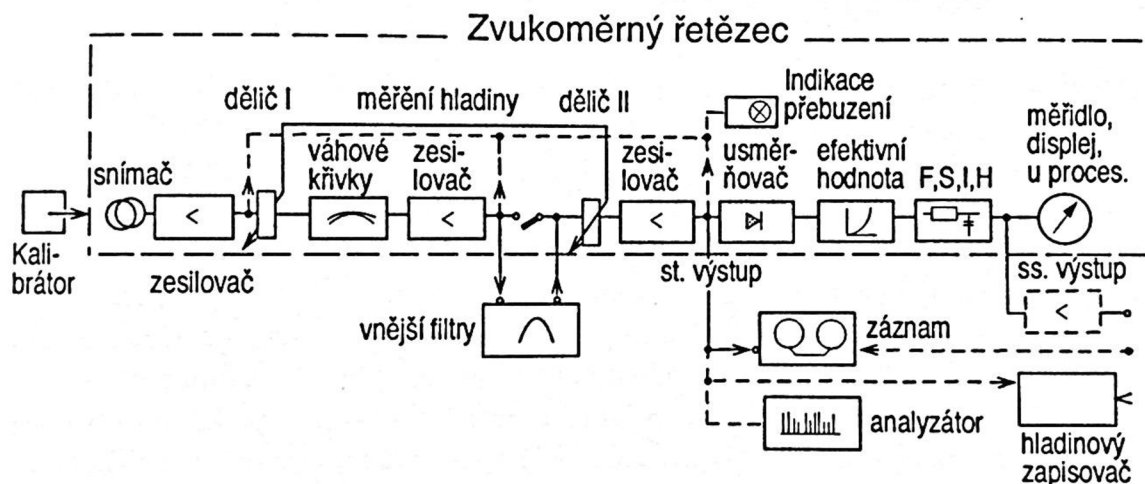
Hladina akustické intenzity je popsána vztahem

$$L_I = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0} [dB], \quad (9)$$

kde I je měřená akustická intenzita a I_0 referenční hodnota o hodnotě 10^{-12} W/m^2 . [52]

5.2 MĚŘICÍ TECHNIKA

Mezi základní měřicí pomůcky a přístroje v akustice, který je často opomíjen, patří metr. Nejdůležitější jsou však v technice měřící hluk a vibrace snímače. Mezi snímače patří akcelerometry a mikrofony. Dále se v měřicím řetězci (obr. 23) pouze upravují nepřesnosti, měřenou veličinu již není důvod zkreslovat. Před každým měřením je však nutné měřicí řetězec nejprve zkalibrovat, protože snímače mění své vlastnosti v závislosti na vnějších podmínkách. [47]



Obr.23 Zvukoměrný řetězec [47]

Podle charakteristik vyšetřovaného hluku a dostupné techniky se volí náležitá měřicí technika. Jelikož měřená veličina má veliký rozsah, je nutné vhodně zkombinovat dynamický rozsah měřidla a citlivost mikrofonu. [58]

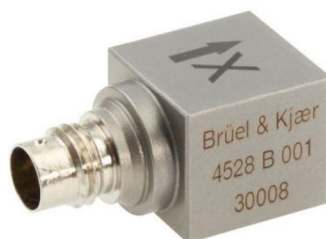
V následující části je popsána měřicí technika hluku a vibrací, kterou disponuje Ústav automobilového a dopravního inženýrství Fakulty strojního inženýrství a která bude využita při měření hluku a vibrací větrných elektráren. Vybavení je vyrobeno dánskou společností Brüel & Kjær, ta patří mezi největší výrobce a obchodníky s akustickou měřicí technikou.

5.2.1 AKCELEROMETRY

Akcelerometry snímají zrychlení vibrací. Umístí se přímo na objekt, který vibruje, což umožní přetvořit energii chvění na elektrický signál. Tento elektrický signál je přímo úměrný okamžitému zrychlení objektu. [47] [59]

Při měření je nutné nastavení měřicího systému na co nejširší kmitočtový rozsah, jelikož při zúžení tohoto kmitočtového rozsahu nastává systematická chyba měření. Snímaný kmitočtový rozsah vibrací je také ovlivněn způsobem připevnění akcelerometru. Akcelerometr může být upevněn např. speciálním šroubem, včelím voskem, permanentním magnetem nebo ruční sondou. Nejvýhodnější metodou je spojení pomocí šroubového spoje, naopak připevnění pomocí ruční sondy je velmi nevhodné. Dnes se nejčastěji využívají piezokeramické akcelerometry se smykově nebo tlakově namáhanými elementy. [47] [59]

Akcelerometry mohou měřit zrychlení v jedné, dvou nebo třech rovinách. Dnes jsou nejvíce využívány tříosé akcelerometry. K výhodám tříosého snímače patří jeho rychlé upevnění a nižší cena proti třem jednoosým snímačům. Příkladem tříosého akcelerometru je typ 4528-B-001 od společnosti Brüel & Kjær (obr. 24). Tento typ akcelerometru je díky širokému frekvenčnímu rozsahu, malé hmotnosti i velikosti velmi univerzální. [59] [60] [61]

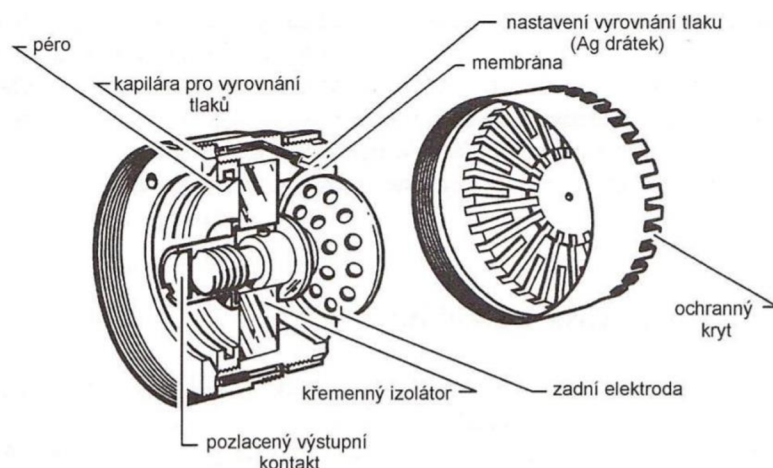


Obr. 24 Tříosý akcelerometr typu 4528-B-001 [60]

5.2.2 MIKROFONY

Mikrofon je akusticko-mechanicko-elektrický měnič, který mění zaznamenané kmitání plynného prostředí na elektrický signál. Používá se tedy k měření akustického tlaku. [47] [62]

Existuje několik typů mikrofonů, nejčastěji se však využívají mikrofony kondenzátorové. Kondenzátorové mikrofony jsou lehké, malé, stále svou citlivostí a poměrně lehce lze s nimi dosáhnout rovné kmitočtové charakteristiky v celém slyšitelném rozsahu kmitočtů. Konstrukce mikrofonů Brüel & Kjær je zobrazena na obr. 25. Fungují na principu, kdy se ultralehká membrána poddává kmitání vnějšího prostředí, tak mění svou vzdálenost proti pevné perforované elektrodě, tím i kapacitu mezi membránou a pevnou elektrodou. [47]



Obr. 25 Konstrukce měřicích mikrofonů Brüel & Kjær [47]

K provedení měření je nutné vědět, v jakém akustickém poli se bude měření realizovat, jelikož prostředí ovlivňuje šíření akustické energie. Podle typu akustického pole se zvolí náležitý typ mikrofону. Existují však také mikrofóny, které je možné využít ve všech typech akustických polí. Jedním z mikrofónů, které jsou vhodné pro přesná měření ve volném poli, je $\frac{1}{2}$ palcový mikrofón typu 4189 od společnosti Brüel & Kjær (obr. 26). Tento předpolarizovaný mikrofón je velmi univerzální. [62] [63]



Obr. 26 Kondenzátorový mikrofón typu 4189 [63]

5.2.3 INTENZITNÍ SONDY

Intenzitní sonda (obr. 27) je dvoukanálová sonda, která umožňuje měření akustické intenzity. Toto měření je založeno na použití dvou mikrofónů (obr. 28). Funkce intenzitní sondy tedy spočívá v měření akustického tlaku ve dvou blízkých bodech o určité vzdálenosti. To umožňuje měřit tlakový gradient, ze kterého se posléze vyhodnotí akustická intenzita ve směru os obou mikrofónů. Mikrofóny jsou nejčastěji otočeny čely k sobě, mezi kterými je umístěna distanční vložka (obr. 28), ta vymezuje vzdálenost mezi nimi. Její délka se pohybuje od 6 do 50 mm. Větší distanční vložky se využívají pro nižší frekvenční rozsah a naopak. Sondu intenzity je možné využít i k výpočtu akustického výkonu, akustickému mapování, hodnocení kvality akustického pole, měření pro výpočet akustické pohltivosti a vzduchové neprůzvučnosti. [52] [64]

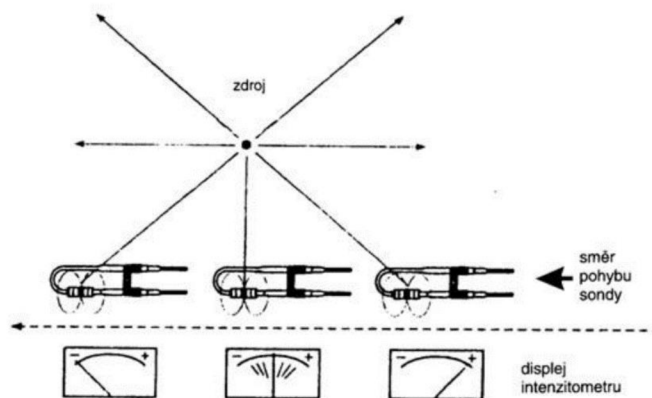


Obr. 27 Intenzitní sonda typu 3599



Obr. 28 Mikrofóny typu 4197 a distanční vložka

Pomocí natočení lze sondu také použít k lokalizaci zdroje hluku (obr. 29). Pokud akustický signál dopadá nejdříve na první mikrofon, je akustická intenzita kladná. Když akustický signál dopadá nejprve na druhý mikrofon, změřená akustická intenzita je záporná. Pokud je sonda natočena kolmo ke zdroji zvuku, akustický signál dopadá na oba mikrofony zároveň, výsledkem tedy bude minimální hodnota akustické intenzity. [64]



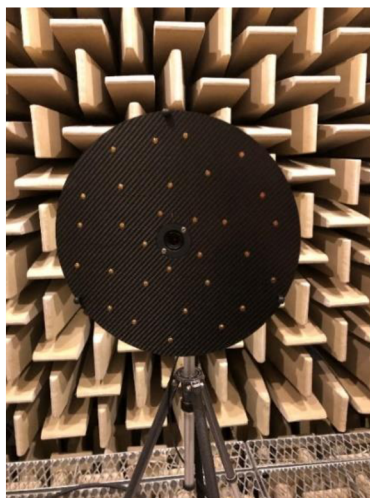
Obr. 29 Lokalizace zdroje hluku [47]

Kalibrace intenzitní sondy se provádí speciálními komůrkami, které se na sondu nasadí. Dosáhne se tak kalibrace obou mikrofonních vložek současně stejným akustickým signálem. [47]

5.2.4 AKUSTICKÉ KAMERY

Akustická kamera (obr. 30) se skládá z videokamery a několika mikrofonů, které jsou uspořádány do kruhu, hvězdy, čtverce nebo sféry. Součástí je také převodník, který převede signál z jednotlivých mikrofonů podle potřeb softwarového vybavení. [65] [66]

Akustická kamera se využívá k bližšímu určení zdrojů hluku. Videokamera v reálném čase zaznamenává měřenou součást pomocí obrazu, na kterém jsou barvami vyznačeny různé úrovně hluku. Tento výstup se nazývá akustická mapa. Velkou výhodou akustické kamery je také její schopnost analyzovat pohybující se zdroje hluku a vytvořit časový záznam u velice rychlých dějů. [66] [67]



Obr. 30 Akustická kamera Brüel & Kjær typu WA-1764-W-001

5.2.5 ANALYZÁTORY A VYHODNOCENÍ DAT

Do měřicího řetězce je také jako zvláštní prvek připojen analyzátor (obr. 31). V dnešní době se využívají zejména digitální analyzátor, které pracují s rychlou Fourierovou analýzou v reálném čase a jsou schopny pracovat současně v celém kmitočtovém pásmu. V mnoha případech je pak nutno měřit několik signálů zároveň, proto jsou dnešní analyzátor opatřeny až několika vstupy. Při použití výše uvedené akustické kamery je potřeba analyzátor se 30 vstupy. [47]



Obr. 31 Analyzátor Brüel & Kjær typu 3050-A-060 se šesti vstupy

Naměřená data se následně přenesou pomocí SD karty do výpočetní techniky. Tam je příslušným softwarem prováděna analýza. Ústav automobilního a dopravního inženýrství využívá konkrétně prostředí Pulse Connect. K výsledkům měření je také přidružen parametr nejistoty měření. V průběhu měření může být měřená veličina ovlivněna použitým měřidlem, operátorem, metodou měření, prostředím apod. Signál při měření zvuku a vibrací je dynamický a jeho měření je specifické, nikdy se tak nedá opakovat za úplně stejných podmínek. [68]

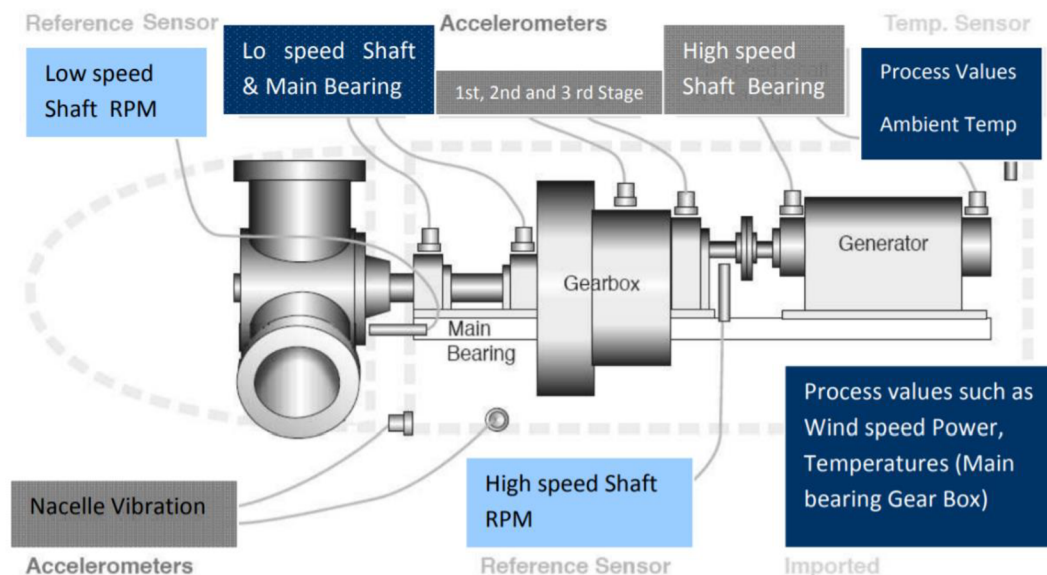
5.3 VHODNÁ MÍSTA PRO MĚŘENÍ

V této části je popsáno, kde konkrétně bude využita výše uvedená technika. Pro zjednodušení případu je uvažována osamocená větrná elektrárna zasazená do rovinaté krajiny bez porostu.

5.3.1 AKCELEROMETR

Akcelerometr bude využit pro měření vibrací jednotlivých součástí v gondole, zejména převodového ústrojí. Bohužel není možné provádět měření přímo na ozubených kolech či hřídelích. Je však snaha měření provádět co nejbližší těmto součástem, proto se měření provádí na ložiskových domcích.

První měření bude provedeno na ložiskových domcích převodového ústrojí. Další měření na domku hlavního ložiska, které slouží pro uložení hlavního hřídele, a na ložiskovém domku generátoru. Na těchto i dalších součástech se ovšem akcelerometry a další sensory již často nachází (obr. 32). Slouží k monitorování stavu jednotlivých součástí, aby při případných poruchách došlo k jejich včasnému zjištění. [69]

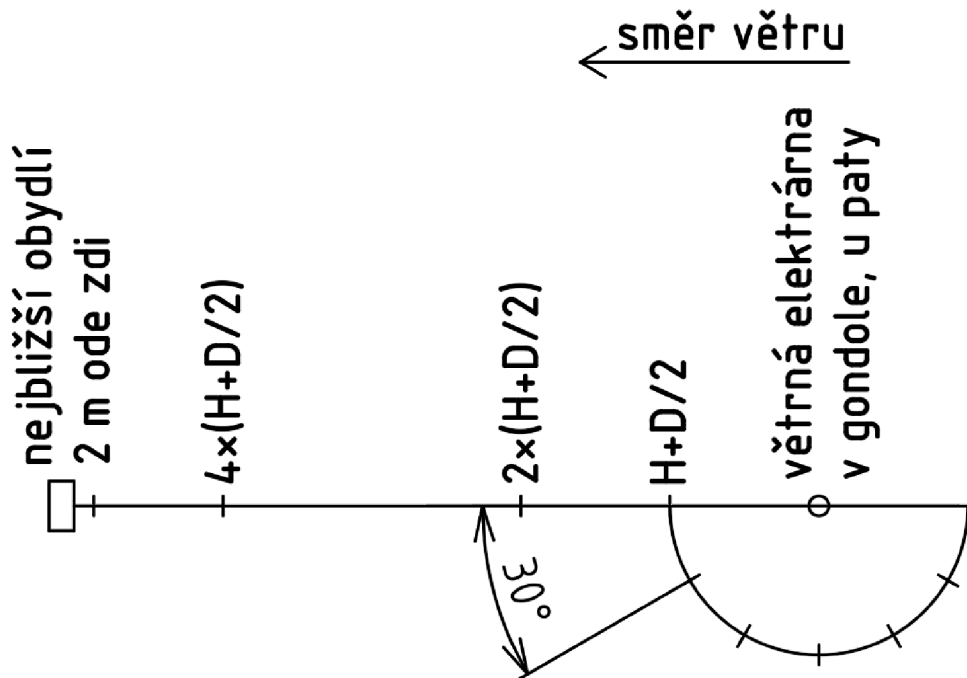


Obr. 32 Možné umístění sensorů v gondole [69]

5.3.2 MIKROFON

Pro měření akustického tlaku pomocí mikrofону bylo vybráno 12 míst. Všechna tato místa jsou vyznačena z ptáčí perspektivy na obr. 33. První místo pro měření se nachází v gondole větrné elektrárny, druhé hned u paty. Další měření se provádí po směru větru, který v ideálním případě směřuje i k nejbližšímu obydlí. Vzdálenost bodů pro měření se odvíjí od velikosti větrné elektrárny, což je inspirováno normou ČSN EN 61400-11 ed. 3 (333160), která popisuje metodiku měření hluku větrných elektráren. První místo se nachází ve vzdálenosti $H+D/2$, kde H představuje výšku stožáru větrné elektrárny a D průměr rotoru. Další místa jsou ve dvojnásobné a čtyřnásobné vzdálenosti. Vhodné místo pro měření akustického tlaku je také v blízkosti nejbližšího obydlí, jelikož pro toto místo se vztahují dané hygienické limity. Je však dobré měřit ve vzdálenosti 2 metrů od zdi, aby nedocházelo k ovlivnění měření odraženými vlnami. [70]

Dalších pět míst pro měření se nachází na půlkruhu o poloměru $H+D/2$. Toto měření by mělo demonstrovat, zda je okolí větrné elektrárny ovlivňováno hlukem rovnoměrně, či o jaký akustický zdroj se jedná. Podle již provedených experimentů se totiž větrná elektrárna nechová jako monopólový zdroj hluk, nýbrž jako zdroj dipólový. [51] [71]



Obr. 33 Schéma míst pro měření hladin akustického tlaku

5.3.3 INTENZITNÍ SONDA

Pro doplnění celého experimentu bude použita také intenzitní sonda. Aplikování samotné intenzitní sondy by nám však nedalo dostatečný přehled o ovlivnění okolí větrné elektrárny.

Při prvním měření bude využito směrovosti akustické intenzity. Měření bude provedeno ze závětrné strany ve vzdálenosti $2 \cdot (H+D/2)$. V tomto místě se intenzitní sonda nasměruje tak, aby osa procházející mikrofony vedla přímo na střed vrtule. Následně se intenzitní sonda otočí o 90° . Totéž bude provedeno i na protilehlou stranu. Toto měření odhalí, zda je větrná elektrárna jediným zdrojem hluku v okolí.

Dalším možným využitím intenzitní sondy je akustické mapování v gondole. Samotné měření zahrnuje sestavení sítě měřených bodů. Rozteč těchto bodů se volí podle velikosti dané součásti či daných součástí. V tomto případě je rozteč bodů zvolena na 20 cm. V každém bodu bude provedeno měření akustické intenzity. Posléze se v rovině dané měřicí sítě sestaví akustická mapa, kde budou zobrazeny hladiny akustické intenzity, tudíž bude možné určit největší zdroj hluku v gondole. [67]

5.3.4 AKUSTICKÁ KAMERA

Při použití akustické kamery je nutné, aby byla v zorném poli celá větrná elektrárna, nebo alespoň její rotor. Měření bude provedeno ze závětrné strany jako v případě mikrofону. Vzdálenosti od větrné elektrárny budou však pouze dvě. První měření bude provedeno ve vzdálenosti $2 \cdot (H+D/2)$ a druhé ve vzdálenosti $4 \cdot (H+D/2)$.

Výstupem bude akustická mapa se zvýrazněnými hladinami akustického tlaku. Toto měření nám potvrdí, či vyvrátí, zda jsou konce rotorových listů opravdu nejdominantnějších zdrojem aerodynamického hluku. Při měření na vzdálenějším místě se případně můžou zobrazit další zdroje hluku. Předpokladem je však osamocená větrná elektrárna, tudíž další zdroje hluku nejsou očekávané.

6 VYUŽÍVÁNÍ VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN

V závěru je nutné podotknout, že využívání větrných elektráren má své výhody a nevýhody, kterým je věnována tato poslední kapitola.

6.1 VÝHODY

Větrné elektrárny využívají větrnou energii, která patří mezi obnovitelné zdroje energie. Vítr je tedy nevyčerpatelný a bezplatný. Jedná se o nejlevnější obnovitelný zdroj z hlediska výrobních nákladů. [10] [72]

Mají minimální negativní vliv na životní prostředí. Neprodukují žádné odpady, ani tuhé či plynné emise. Není nutno ukládat žádné použité palivo nebo popel. Neznečišťují vodu, jelikož není potřeba k jejich provozu. [20]

Větrné turbíny jsou dostupné v několika variantách podle výkonu, proto je můžou využívat i zemědělci a další soukromníci, kteří mají pozemky s větrným potenciálem, aniž by byl tento pozemek znevýhodněn v dalším využívání. [5]

Ačkoliv vítr není stálý a nelze ho využívat jako jediný zdroj pro výrobu elektrické energie, lze jej dostatečně dopředu předpovídat, aby nedocházelo k nestabilitě energetických sítí. Dobře se vykrývá např. s vodními elektrárnami. [72]

Každá větrná elektrárna je po rozebrání přibližně z 80 % recyklovatelná. Tyto druhotné suroviny se dají prodat. Výnosy z nich tak snižují náklady na odstranění celé stavby. [73]

Pokud nedojde k zásadní závadě na nějaké součásti, jsou náklady na údržbu větrné elektrárny minimální. Nejnákladnější je tedy samotná výstavba spolu s vyvedením výkonu do rozvodné sítě. V dnešní době je však stavba větrné elektrárny ve většině vyspělých zemí legislativně podporována dotacemi. [10]

6.2 NEVÝHODY

Hlavní nevýhodou větrné energie je její nestálost. Množství vyrobené elektrické energie závisí na větrných podmínkách. Lokalit vhodných pro výstavbu větrných elektráren, aby byla zaručena jejich vytiženost, je omezený počet. Často jsou tyto vhodné lokality daleko od lidského obydlí, proto je nutná instalace dlouhého a nákladného vedení. [5]

Výroba větrné energie je v porovnání s tradičními formami získávání energie celkem drahá. Postupem času, kdy se emise skleníkových plynů začaly připočítávat k těmto tradičním formám získávání energie, se ceny energie z různých zdrojů začaly vyrovnávat. [5]

Hlučnost větrných elektráren patří také mezi jejich nevýhody. Postupem času se mechanický hluk podařilo snížit na minimum, aerodynamický hluk však už snížit nelze. Jediným řešením je větrné elektrárny výkonnostně omezovat nebo je stavět dostatečně daleko od obydlí.

Vzhledem k pořizovací ceně větrných elektráren je jejich životnost celkem malá. Průměrná životnost větrné elektrárny se pohybuje od 20 do 25 let. V současnosti se tedy většina větrných elektráren ve světě nachází přibližně v půlce své životnosti a není jasné, jak to s nimi bude dál. Zda se tyto elektrárny nahradí novými, nebo se úplně zruší. [74]

Rušení a rozebírání větrných elektráren je nákladné. Navíc se k rušení větrných elektráren na moři připisují další komplikace. Technických zařízení, která se využívají k rozebírání i stavbě větrných elektráren, je omezený počet a jsou vytížena již na několik let dopředu. [75]

Po rozebrání jsou sice větrné elektrárny z části recyklovatelné, problémem se však stávají rotorové listy. Ty jsou vyrobeny tak, aby odolávaly velkému náporu větru. Zatím neexistuje žádná technologie, která by umožňovala listy větrné elektrárny bezproblémově zlikvidovat, nebo je využít na něco užitečného. [75]

ZÁVĚR

Existuje celá řada různých typů větrných elektráren. Dají se využívat jak pro domácí použití, tak pro výrobu elektrické energie do rozvodné sítě. Objevují se i nové, neobvyklé typy větrných elektráren, které by mohly být budoucností ve větrné energetice. V současnosti se však nejvíce využívají větrné elektrárny s horizontální osou otáčení pracující na vztlakovém principu, u kterých se dá relativně lehce regulovat výkon a dosahují vyšší účinnosti. V budoucnosti lze očekávat rozvoj větrných elektráren zejména na moři, jelikož zde dosahují vyšší účinnosti. Navíc vhodná místa pro stavbu větrných elektráren na pevnině dochází.

Ve většině současných větrných elektrárnách lze stále najít převodové ústrojí. Jedná se však o nejvíce poruchovou součást, proto se stav převodovky pečlivě sleduje, aby se poruchám předcházelo, nebo došlo k jejich včasnému zjištění. Převodovka také patří mezi největší zdroje mechanického hluku. Stále více se tak začínají využívat větrné elektrárny bez převodovky, které jsou méně hlučné, jednodušší svou konstrukcí, a tím i méně poruchové.

Při chodu větrné elektrárny vzniká hluk mechanického a aerodynamického původu. Mechanický hluk se postupným vývojem součástí větrných elektráren povedlo snížit, proto u dnešních větrných elektráren dominuje hluk aerodynamický. Pro ochranu člověka před hlukem jsou dány hygienické limity. Tyto limity jsou porušovány jen zřídka, jelikož již při projektování větrné elektrárny se s těmito limity počítá. Nepředstavují však absolutní práh ochrany zdraví, protože hranici poškození, či nepoškození lidského organismu nelze zcela přesně určit.

S hlukem velmi úzce souvisí i vibrace. Pro zhodnocení hluku a vibrací větrných elektráren bude nutné provést experiment, při kterém se uskuteční hned několik měření. Prvním z nich bude měření vibrací součástí v gondole pomocí akcelerometru. Tímto měřením se získají informace o zrychlení povrchu na několika součástech gondoly, díky čemuž bude možné detekovat nejvíce kritické komponenty. Akcelerometry jsou již v gondole často umístěny. Slouží pro dlouhodobé monitorování, zásluhou kterého jsme schopni predikovat nutnost výměny některých komponent, např. ložisek. V gondole se také změří hladina akustického tlaku pomocí mikrofону a blíže se určí největší zdroj hluku pomocí akustického mapování intenzitní sondou. Intenzitní sonda bude použita ještě v jedné vzdálenosti od větrné elektrárny. Toto měření určí, odkud se hluk šíří, tudíž ukáže i další případné zdroje hluku kromě větrné elektrárny. Mikrofon bude využit na více místech, která se nachází v určitých vzdálenostech od větrné elektrárny směrem k nejbližšímu obydlí, jak říká norma popisující metodiku měření hluku větrných elektráren. Pomocí tohoto měření bude možné určit, jak se hladina akustického tlaku zmenšuje se vzdáleností od větrné elektrárny. Dále je pro měření mikrofónem vybráno místo 2 m ode zdi nejbližší budovy. Zde bude posouzeno, zda jsou dodržovány hygienické limity. Pomocí mikrofónu a několika dalších měřicích míst umístěných na půlkruhu kolem větrné elektrárny bude dále možné zjistit, zda je okolí větrné elektrárny ovlivněno hlukem rovnoměrně či o jaký akustický zdroj se jedná. Při experimentu je vhodné použít i akustickou kameru, která detekuje hlavní zdroj hluku na dané frekvenci v tzv. holografické rovině. V případě nastavení holografické roviny tak, aby procházela stožárem kolmo k zemi, je možné zjistit kritickou část větrné elektrárny pro danou frekvenci.

Využívání větrných elektráren má řadu výhod i nevýhod. Mezi největší výhody patří samozřejmě to, že využívají obnovitelný zdroj energie, který je nevyčerpatelný a bezplatný. Mají tak proti neobnovitelným zdrojům energie minimální negativní vliv na životní prostředí. Naopak mezi jejich hlavní nevýhody patří zejména nestálost větru v průběhu roku, proto se na větrné elektrárny nelze spoléhat jako na jediný prostředek pro výrobu elektrické energie. Velkou nevýhodou, která se vyskytla při rušení větrných elektráren a představuje problém pro životní prostředí, je recyklace rotorových listů. Pokud se však najde způsob, jak rotorové listy zrecyklovat a následně užitečně využít, mohlo by tak vzniknout vedlejší průmyslové odvětví a zaniknout jeden z největších problémů při rozebírání větrných elektráren.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] RYCHETNÍK, Václav, Jiří PAVELKA a Josef JANOUŠEK. *Větrné motory a elektrárny*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1997, 199 s. ISBN 80-01-01563-7.
- [2] Obecně o větru. *WEB Větrná energie s.r.o.* [online]. Brno: W.E.B Větrná energie s.r.o., 2018 [cit. 2020-02-08]. Dostupné z: https://www.vetrna-energie.cz/energie-zivlu/vetrna-energie_9
- [3] BERANOVSKÝ, Jiří a Jan TRUXA. *Alternativní energie pro váš dům*. 2., aktualiz. vyd. EkoWATT: ERA, 2004, xiii, 125 s. : il. (některé barev.). ISBN 80-86517-89-6.
- [4] ŠEFTER, Jakov. *Využití energie větru*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1991. ISBN 80-03-00616-3.
- [5] JAIN, Pramod. *Wind energy engineering*. 1st ed. New York: McGraw-Hill, 2011. ISBN 978-0-07-171477-8.
- [6] Větrná směrovka. In: *Ekotechnika: Přístroje pro environmentální diagnostiku* [online]. Karlík u Prahy: Ekotechnika s.r.o. [cit. 2020-03-06]. Dostupné z: <https://ekotechnika.cz/vyrobek/vetrna-smerovka>
- [7] KÜHN, Stefan. Miskový anemometr. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2020-03-06]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Anemometr#/media/Soubor:Anemometer.jpg>
- [8] Větrná mapa. *Česká společnost pro větrnou energii* [online]. Praha: Česká společnost pro větrnou energii, 2013 [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: <https://csve.cz/clanky/vetrna-mapa/601>
- [9] WAGNER, Vladimír. Větrné elektrárny včera, dnes a zítra. *OSEL (Objective Source E-Learning)* [online]. Telč: Osel,s.r.o., 2002 [cit. 2020-02-19]. ISSN 1214-6307. Dostupné z: <http://www.osel.cz/9535-vetrne-elektrarny-vcera-dnes-a-zitra.html>
- [10] BENDA, Vítězslav, Helena DOLEŽALOVÁ, Peter DUŠIČKA et al. *Obnovitelné zdroje energie*. 1. vydání. Praha: Profi Press, 2012, 208 stran : ilustrace (převážně barevné), mapy. ISBN 978-80-86726-48-9.
- [11] Větrné elektrárny - princip, rozdělení, elektrárny v ČR. *OEnergetice.cz* [online]. Třebíč: OM Solutions, 2015 [cit. 2020-02-12]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/vetrne-elektrarny-princip-cinnosti-zakladni-rozdeleni>
- [12] Statistika. *Česká společnost pro větrnou energii* [online]. Praha: Česká společnost pro větrnou energii, 2013 [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: <https://csve.cz/cz/clanky/statistika/281>

- [13] Větrná energetika. *Obnovitelné zdroje elektrické energie* [online]. První. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, s. 35-58 [cit. 2020-02-26]. ISBN 978-80-01-04937-2.
- [14] NELSON, Vaughn. *Wind energy: renewable energy and the environment* [online]. 2nd series. Boca Raton: CRC Press, 2009 [cit. 2020-03-02]. ISBN 978-1-4200-7568-7. Dostupné z: <https://epdf.pub/wind-energy-renewable-energy-and-the-environment36443.html>
- [15] Větrná elektrárna - účinnost, jak funguje. *Frieco* [online]. Mladá Boleslav: Green Season, 2020 [cit. 2020-02-13]. Dostupné z: <https://www.frieco.org/blog/vetrna-elektrarna-ucinnost-jak-funguje/>
- [16] Savoniova větrná turbína. In: *DřevoStavby* [online]. Praha: PRO VOBIS, 2020 [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: https://www.drevostavby.cz/images/stories/stavba_techicka_zarizeni/savonius_balaton_trioro.jpg
- [17] Rotor. *Česká společnost pro větrnou energii* [online]. Praha: Česká společnost pro větrnou energii, 2013 [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: <https://csve.cz/cz/detail-kategorie/rotor/84>
- [18] H-Darrieus Rotor. In: *BWE: Bundesverband WindEnergie* [online]. Berlin: Bundesgeschäftsstelle, 2018 [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: https://www.windenergie.de/fileadmin/_processed_/c/1/csm_vertikalachser-darrieus-rotor-immuensterland-michael-schelter_f3571e25ef.jpg
- [19] EOLIENNE-DE-FACE. In: *Seableue* [online]. YERRES: Arielle Cassim, 2011 [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <https://www.seableue.fr/wp-content/uploads/2011/04/EOLIENNE-DE-FACE.jpg>
- [20] ŠTEKL, Josef. Větrná energie a její možnosti v ČR. *Obnovitelné zdroje energie a možnosti jejich uplatnění v ČR* [online]. Druhé. Praha: ČEZ, 2007, s. 79-110 [cit. 2020-02-26]. Dostupné z: https://www.cez.cz/eede/content/file/vzdelavani/obnovitelne_zdoje_energie_a_moznosti_jejich_vyuziti_pro_cr.pdf
- [21] Malé větrné elektrárny. *Změnaklimatu.cz* [online]. Klimatická koalice [cit. 2020-02-19]. Dostupné z: <https://www.zmenaklimatu.cz/cz/zapoj-se/159-male-vetrne-elektrarny>
- [22] Větrné elektrárny. *Svaz podnikatelů pro využití energetických zdrojů, z.s.* [online]. Praha: Svaz podnikatelů pro využití energetických zdrojů, z.s. [cit. 2020-02-20]. Dostupné z: <http://www.spvez.cz/pages/OZE/vitr.htm>
- [23] Větrné elektrárny VIII. – Mořské (offshore) větrné elektrárny. In: *Tzbinfo* [online]. Praha: Topinfo, c2001-2020 [cit. 2020-02-13]. Dostupné z: <https://oze.tzbinfo.cz/vetrna-energie/15249-vetrne-elektrarny-viii-morske-offshore-vetrne-elektrarny>

- [24] FROESE, Michelle a Greg LUPION. World's first floating wind farm delivers promising results. *Windpower Engineering & Development* [online]. WTW Media, LLC, 2020 [cit. 2020-02-29]. Dostupné z: <https://www.windpowerengineering.com/worlds-first-floating-wind-farm-delivers-promising-results/>
- [25] CHERUBINI, Antonello, Andrea PAPINI, Rocco VERTECHY a Marco FONTANA. Airborne Wind Energy Systems: A review of the technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2015, **51**, 1461-1476 [cit. 2020-03-07]. DOI: 10.1016/j.rser.2015.07.053. ISSN 13640321. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032115007005>
- [26] How it works: FIRST WIND TURBINE WITHOUT BLADES NOR GEARS. *Vortex bladeless* [online]. Madrid: Vortex Bladeless, 2012 [cit. 2020-03-07]. Dostupné z: <https://vortexbladeless.com/technology-design/>
- [27] Kármán vortex street. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2020-03-07]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/K%C3%A1rm%C3%A1n_vortex_street
- [28] Vortex Bladeless biography & current stage. *Vortex bladeless* [online]. Madrid: Vortex Bladeless, 2012 [cit. 2020-03-07]. Dostupné z: <https://vortexbladeless.com/story-vortex-bladeless-tech-startup/>
- [29] Rotor. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2020-03-05]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Rotor>
- [30] Velikost větrné elektrárny a její vývoj. *Česká společnost pro větrnou energii* [online]. Praha: Česká společnost pro větrnou energii, 2013 [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: <https://www.csve.cz/cz/clanky/velikost-vetrne-elektrarny-a-jeji-vyvoj/110>
- [31] KOČ, Břetislav. Větrné elektrárny VII. – Jak se staví větrná elektrárna. In: *Tzbinfo* [online]. Praha: Topinfo s.r.o., c2001-2020 [cit. 2020-02-20]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/vetrna-energie/14893-jak-se-stavi-vetrna-elektrarna>
- [32] Obnovitelné zdroje energie 3D: aplikace. *Svět energie: Vzdělávací portál ČEZ* [online]. Praha: ČEZ, 2016 [cit. 2020-02-29]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/aplikace/obnovitelne-zdroje-energie-3d>
- [33] Gondola. *Česká společnost pro větrnou energii* [online]. Praha: Česká společnost pro větrnou energii, 2013 [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: <https://csve.cz/cz/detail-kategorie/gondola/85>
- [34] KHAKPOUR NEJADKHAKI, Hamid, Swanil CHAUDHARI a John HALL. A design methodology for selecting ratios for a variable ratio gearbox used in a wind turbine with active blades. *Renewable Energy* [online]. 2018, **118**, 1041-1051 [cit. 2020-05-02]. DOI: 10.1016/j.renene.2017.10.072. ISSN 09601481. Dostupné z:

<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960148117310340>

- [35] JANTARA, Valter a Mayorkinos PAPAELIAS. Wind turbine gearboxes: Failures, surface treatments and condition monitoring. *Non-Destructive Testing and Condition Monitoring Techniques for Renewable Energy Industrial Assets* [online]. Elsevier, 2020, , 69-90 [cit. 2020-05-13]. DOI: 10.1016/B978-0-08-101094-5.00005-8. ISBN 9780081010945. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780081010945000058>
- [36] SALAMEH, Jack, Sebastien CAUET, Erik ETIEN, Anas SAKOUT a Laurent RAMBAULT. Gearbox condition monitoring in wind turbines: A review. *Mechanical Systems and Signal Processing* [online]. 2018, **111**, 251-264 [cit. 2020-05-13]. DOI: 10.1016/j.ymsp.2018.03.052. ISSN 08883270. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0888327018301791>
- [37] SMITH, J. *Gear Noise and Vibration*. 2nd ed. 2003. ISBN 9780203912478.
- [38] Stožár. *Česká společnost pro větrnou energii* [online]. Praha: Česká společnost pro větrnou energii, 2013 [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: <https://csve.cz/cz/detail-kategorie/stozar/86>
- [39] Betonový základ. *Česká společnost pro větrnou energii* [online]. Praha: Česká společnost pro větrnou energii, 2013 [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: <https://csve.cz/clanky/betonovy-zaklad/305>
- [40] WU, Xiaoni, Yu HU, Ye LI et al. Foundations of offshore wind turbines: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2019, **104**, 379-393 [cit. 2020-03-07]. DOI: 10.1016/j.rser.2019.01.012. ISSN 13640321. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032119300127>
- [41] ŽALLMANNOVÁ, Eva. *Větrné elektrárny a krajina*. První. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2006. ISBN 80-737-5003-1.
- [42] SEQUENS, Edvard. *Větrné elektrárny a životní prostředí*. České Budějovice: Calla - Sdružení pro záchranu prostředí, 2009. ISBN 978-80-87267-04-2.
- [43] SEQUENS, Edvard a Petr HOLUB. *Větrné elektrárny: mýty a fakta* [online]. 2. aktualizované vydání. České Budějovice: Sdružení Calla a Hnutí DUHA, 2004 [cit. 2020-02-26]. ISBN 80-868-3409-3. Dostupné z: https://hnutiduha.cz/sites/default/files/publikace/typo3/vitr_2006.pdf
- [44] FUKSA, Antonín. Míhání a stroboskopický jev – 1. část. *Světlo* [online]. Praha: FCC PUBLIC, s. r. o., c2014-2020, **2018**(1), 24 [cit. 2020-02-24]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/clanek/mihani-a-stroboskopicky-jev-1-cast--2782>
- [45] NĚMEC, Jaroslav, Jiří RANSDORF a Milan ŠNĚDRLE. *Hluk a jeho snižování v technické praxi*. 1. vyd. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1970. Řada

strojírenské literatury.

- [46] Kurs 2 - Hluk v komunálním prostředí. *Krajská hygienická stanice Královéhradeckého kraje se sídlem v Hradci Králové* [online]. Hradec Králové: Krajská hygienická stanice Královéhradeckého kraje se sídlem v Hradci Králové, 2016 [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: <http://www.khshk.cz/e-learning/kurs2a/index.html>
- [47] SMETANA, Ctirad. *Hluk a vibrace: měření a hodnocení*. 1. vyd. Praha: Sdělovací technika, 1998, 188 s. : il., čb. fot., tabulky, grafy. ISBN 80-901936-2-5.
- [48] Závěrečná zpráva projektu VaV/320/08/03: Výzkum vhodnosti lokalit v ČR z hlediska zásob větrné energie a zpracování metodiky pro posuzovací a schvalovací řízení při zavádění větrných elektráren. *Ústav fyziky atmosféry AV ČR, v. v. i.* [online]. Praha: Ústav fyziky atmosféry AV ČR, v. v. i., 2011 [cit. 2020-06-06]. Dostupné z: <http://www.ufa.cas.cz/web-old/vetrna-energie/doc/vav/zprava.pdf>
- [49] Jak hlučné jsou větrné elektrárny?. *WEB Větrná energie s.r.o.* [online]. Brno: W.E.B Větrná energie s.r.o., 2020 [cit. 2020-06-06]. Dostupné z: https://www.vetrna-energie.cz/faq-10-castych-otazek/jak-hlucne-jsou-vetrne-elektrarny-_1
- [50] DESHMUKH, Shubham, Sourodeep BHATTACHARYA, Anuj JAIN a Akshoy PAUL. Wind turbine noise and its mitigation techniques: A review. *Energy Procedia* [online]. 2019, **160**, 633-640 [cit. 2020-05-22]. DOI: 10.1016/j.egypro.2019.02.215. ISSN 18766102. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1876610219313074>
- [51] ZHU, Wei. *Modelling Of Noise From Wind Turbines* [online]. Kongens Lyngby, 2004 [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: http://www.mek.dtu.dk/-/media/Institutter/Mekanik/Sektioner/FVM/uddannelse/eksamensprojekt/mastertheses%20fm/wei_jun_zhu_mek_fm_ep_2004_01.ashx?la=da. Mechanical Department, DTU. Vedoucí práce Jens Nørkær Sørensen, Wen Zhong Shen.
- [52] MIŠUN, Vojtěch. *Vibrace a hluk*. Vyd. 2. / v Akademickém nakladatelství CERM 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005, 177 s. : il. ISBN 80-214-3060-5.
- [53] TŮMOVÁ, Olga a Eva VEJVODOVÁ. Vyšetřování hluku z větrných elektráren. *ELEKTRO: časopis pro elektrotechniku* [online]. Praha: FCC Public, c2014-2020, (082009) [cit. 2020-04-07]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/vysetrovani-hluku-z-vetrnych-elektraren--10869>
- [54] ČESKÁ REPUBLIKA. *Nářízení vlády o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací*. In: . Praha: Vláda ČR, 2011, ročník 2011, číslo 272. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2011-272>
- [55] Nepříznivé účinky hluku na člověka. *Ministerstvo zdravotnictví České republiky* [online]. Praha: Ministerstvo zdravotnictví České republiky, 2010 [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: <http://www.mzcr.cz/hlukovemapy/obsah/nepriznive-ucinky-hluku-na>

cloveka_3417_30.html

- [56] BERNÁŠKOVÁ, K. a J. POLÁCH. VIII. Vegetativní nervový systém a jeho poruchy, krátkodobý a dlouhodobý stres. *Obecná patologická fyziologie* [online]. Praha: 3.LF UK, 2015 [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: <http://patfyz.cz/viii/>
- [57] Bezodrazová (bezdozvuková) komora. In: *Talpa-rpf* [online]. Ostrava: TALPA – RPF, 2020 [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: <https://www.talparpf.cz/rezani-vodou/stavby-bezdozvukovych-komor/>
- [58] Zvuk a dynamický rozsah. *Ekosoftware* [online]. Liberec: dpoint.cz, 2020 [cit. 2020-04-10]. Dostupné z: <https://www.ekosoftware.cz/zvuk-a-dynamicky-rozsah>
- [59] Jak funguje a k čemu slouží akcelerometr?. *TME: Electronic Components* [online]. Ostrava: TME Česká republika, 2020 [cit. 2020-04-08]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/cz/pages/news/22568/jak-funguje-a-k-cemu-slouzi-akcelerometr>
- [60] TRIAX ACCELEROMETER 10 MV/G W TEDS. *Brüel & Kjaer: an HBK company* [online]. Nærum: Brüel & Kjaer, 2020 [cit. 2020-04-08]. Dostupné z: <https://www.bksv.com/en/products/transducers/vibration/Vibration-transducers/accelerometers/4528-B>
- [61] Měření vibrací ve třech osách. *Ekosoftware* [online]. Liberec: dpoint.cz, 2020 [cit. 2020-04-10]. Dostupné z: <https://www.ekosoftware.cz/mereni-vibraci-ve-trech-osach>
- [62] Volba mikrofonu s ohledem na typ pole. *Ekosoftware* [online]. Liberec: dpoint.cz, 2020 [cit. 2020-04-10]. Dostupné z: <https://www.ekosoftware.cz/volba-mikrofonu-s-ohledem-na-typ-pole>
- [63] ½-INCH FREE-FIELD MICROPHONE, 6.3 HZ TO 20 KHZ, PREPOLARIZED. *Brüel & Kjaer: an HBK company* [online]. Nærum: Brüel & Kjaer, 2020 [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <https://www.bksv.com/en/products/transducers/acoustic/microphones/microphone-cartridges/4189>
- [64] Použití sondy intenzity. *Ekosoftware* [online]. Liberec: dpoint.cz, 2020 [cit. 2020-04-10]. Dostupné z: <https://www.ekosoftware.cz/pouziti-sondy-intenzity>
- [65] Akustická kamera. *EKOLA group* [online]. Praha: EKOLA group, 2020 [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: <http://www.ekolagroup.cz/cs/akusticka-kamera/>
- [66] KDYŽ SE MALUJE ZVUK. *VÝZKUM VÝVOJ AUTOMOTIVE* [online]. Boomerang Communication, 2019 [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: <https://www.vvautomotive.cz/jak-se-maluje-zvuk/>
- [67] Identifikace zdrojů hluku. *Ústav automobilního a dopravního inženýrství* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, c2001-2020 [cit. 2020-04-11]. Dostupné z:

<http://www.uadi.fme.vutbr.cz/vyzkum-vibrace-a-hluk-identifikace-zdroju-hluku>

- [68] Nejistoty měření. *Ekosoftware* [online]. Liberec: dpoint.cz, 2020 [cit. 2020-04-10]. Dostupné z: <https://www.ekosoftware.cz/nejistoty-mereni>
- [69] SAEED, Asif. *Online Condition Monitoring System for Wind Turbine* [online]. Kalmar, 2008 [cit. 2020-06-09]. Dostupné z: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:830541/FULLTEXT01.pdf>. Thesis in partial fulfillment for the degree of Master of Science in Electrical Engineering. University of Kalmar. Vedoucí práce Prof. Wlodek Kulesza.
- [70] ČSN EN 61400-11 ED. 3 (333160). *Větrné elektrárny - Část 11: Metodika měření hluku*. 2013.
- [71] CORKE, Thomas a Eric MATLIS. *Wind Turbine Acoustics* [online]. Notre Dame, Indiana [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: https://www3.nd.edu/~tcorke/w.windturbinecourse/Acoustics_Presentation.pdf. University of Notre Dame.
- [72] Jaký mají větrné elektrárny skutečně přínos?. *Česká společnost pro větrnou energii* [online]. Praha: Česká společnost pro větrnou energii, 2013 [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: <https://csve.cz/clanky/jaky-maji-vetrne-elektrarny-skutecne-prinos-1524>
- [73] Likvidace dosloužilých větrných elektráren. *Česká společnost pro větrnou energii* [online]. Praha: Česká společnost pro větrnou energii, 2013 [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: <https://csve.cz/clanky/likvidace-doslouzilych-vetrnych-elektraren/492>
- [74] Z větrných elektráren minulosti se může stát velký problém budoucnosti. A nebo taky nemusí. *Ekolist.cz* [online]. Praha: BEZK, 2007 [cit. 2020-04-06]. ISSN 1802-9019. Dostupné z: <https://ekolist.cz/cz/zpravodajstvi/zpravy/z-vetrnych-elektraren-minulosti-se-muze-stat-velky-problem-budoucnosti-a-nebo-taky-nemusi>
- [75] VONDRA, Tomáš. Recyklace větrných elektráren: nevyřešený problém, nebo průmysl budoucnosti?. *Obnovitelně.cz* [online]. Brno: Obnovitelně.cz, 2017 [cit. 2020-04-06]. Dostupné z: <https://www.obnovitelne.cz/cz/clanek/672/recyklace-vetrnych-elektraren-nevyreseny-problem-nebo-prumysl-budoucnosti/>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

A		Hodnota porovnávané akustické veličiny
A_0		Referenční hodnota
c_p	[-]	Součinitel výkonu
D	[m]	Průměr rotoru větrné elektrárny
E_K	[J]	Kinetická energie
H	[m]	Výška stožáru větrné elektrárny
I	[W/m ²]	Akustická intenzita
I_0	[W/m ²]	Referenční hodnota akustické intenzity
L	[dB]	Hladina akustických veličin
L_A	[dB]	Akustický signál
$L_{Aeq,T}$	[dB]	Ekvivalentní hladina akustického tlaku
L_I	[dB]	Hladina akustické intenzity
L_p	[dB]	Hladina akustického tlaku
L_W	[dB]	Hladina akustického výkonu
m	[kg]	Hmotnost vzduchu
P	[W]	Výkon větru protékajícího jednotkovou plochou
p	[Pa]	Akustický tlak
p_0	[Pa]	Referenční hodnota akustického tlaku
S	[m ²]	Plocha opisovaná rotorem
S	[m ²]	Sledovaná plocha
u	[m/s]	Rychlost větru
V	[m ³]	Objem vzduchu
v	[m/s]	Rychlost kmitání částic
W	[W]	Akustický výkon
W_0	[W]	Referenční hodnota akustického výkonu
ρ	[kg/m ³]	Hustota vzduchu