



**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

**PROBLEMATIKA HLUKU VĚTRNÝCH  
ELEKTRÁREN**

NOISE OF WIND TURBINE

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Štěpán Honzíček**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Michal Janoušek, Ph.D.**

**BRNO 2019**

# Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství  
Student: **Štěpán Honzíček**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Michal Janoušek, Ph.D.**  
Akademický rok: 2018/19

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:

## **Problematika hluku větrných elektráren**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Popište zdroje hluku větrných elektráren a zhodnoťte jejich dopad na lidské zdraví.

### **Cíle bakalářské práce:**

Popište zdroje hluku větrných elektráren.

Popište metodiku měření hluku větrných elektráren.

Rozeberte frekvenční složení dílčích složek hluku.

Zhodnoťte dopad hluku větrných elektráren na lidské zdraví.

### **Seznam doporučené literatury:**

EDITED BY DICK BOWDLER & GEOFF LEVENTHALL. Wind turbine noise. Brentwood, Essex: Multi-Science Pub, 2011. ISBN 9781907132308.

DTI. The Measurement of Low Frequency Noise at Three UK Wind Farms. London: Department of Trade and Industry UK, 2006.

ROGERS, A., MANVELL, J., WRIGHT, S. Wind Turbine Acoustic Noise. Amherst: Renewable Energy Research Laboratory, University of Massachusetts, 2006.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

---

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

---

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

## ABSTRAKT

Bakalářská práce shrnuje současný stav větrné energetiky v České republice i ve světě. Popisuje stavbu dnešní moderní větrné elektrárny s horizontální osou a konkrétně se zabývá problematikou hluku větrných elektráren z hlediska mechanických i aerodynamických příčin. Názorně zobrazuje způsob měření a následnou analýzu hluku. Závěrečná část se věnuje možným dopadům hluku na zdraví člověka.

## KLÍČOVÁ SLOVA

větrná elektrárna, obnovitelné zdroje energie, hluk, měření hluku, aerodynamický hluk, dopad hluku na zdraví

## ABSTRACT

Bachelor's thesis summarizes nowadays wind energy condition in the Czech Republic and in the world. It describes current construction of modern horizontal axis wind turbine and specifically deals with wind turbine noise sources - mechanical and aerodynamic. It typifies measurement method and follow up analysis. Concluding part narrates possibility noise effects on human health.

## KEYWORDS

wind turbine, renewable energy, noise, noise measurement, aerodynamic noise sources, noise and health

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

HONZÍČEK, Š. Problematika hluku větrných elektráren. Brno, 2019. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 60 s. Vedoucí bakalářské práce Michal Janoušek.



## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Michala Janouška Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 24. května 2019

.....

Štěpán Honzíček

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval panu doktoru Michalu Janouškovi za jeho vedení, vstřícnost a věnovaný čas při zpracování této práce. Za poskytnutou odbornou a velmi ochotnou pomoc děkuji také panu inženýru Aleši Jiráskovi z NRL pro komunální hluk. V neposlední řadě chci vyjádřit velké poděkování mým rodičům a sourozencům, kteří mě každodenně projevují svoji podporu a lásku.

## OBSAH

Úvod .....	10
1 Vítr jako zdroj energie .....	11
1.1 Vítr .....	11
1.2 Měření větru .....	13
1.3 Energie a výkon větru .....	15
1.4 Obnovitelné zdroje energie .....	16
1.4.1 OZE ve světě .....	18
1.4.2 OZE v České republice .....	18
1.4.3 Větrná energie .....	19
1.5 Větrné elektrárny ve světě .....	19
1.6 Větrné elektrárny v České republice .....	20
2 Stavba větrné elektrárny .....	22
2.1 Historie větrných mlýnů .....	22
2.2 Větrné turbíny .....	23
2.3 Konstrukce dnešní větrné elektrárny s horizontální osou .....	24
2.3.1 Betonový základ .....	24
2.3.2 Stožár .....	25
2.3.3 Gondola .....	26
2.3.4 Rotor .....	29
3 Hluk při provozu větrné elektrárny .....	30
3.1 Definice hluku .....	30
3.2 Akustika .....	30
3.2.1 Základní veličiny v akustice .....	31
3.2.2 Charakter zvuku .....	32
3.2.3 Spektrum zvuku .....	32
3.2.4 Barva zvuku – rozdělení zvuku dle frekvence .....	33
3.3 Zvuk a lidský sluch .....	34
3.4 Zdroj hluku .....	35
3.5 Šíření hluku .....	35
3.5.1 Šíření a absorpce hluku ve vzduchu .....	36
3.5.2 Šíření hluku větrných elektráren .....	36
3.6 Příčina hluku větrných elektráren .....	36
3.7 Měření a analýza hluku větrných elektráren .....	40
3.7.1 Měření v terénu .....	40
3.7.2 Analýza měření .....	41



---

3.7.3	Hlukové limity.....	42
3.7.4	Tónová složka hluku.....	43
3.7.5	Infrazvuk a nízkofrekvenční hluk.....	43
4	Hluk a zdraví člověka.....	46
4.1	Subjektivní vjem zvuku – lidský sluch.....	46
4.2	Sluchové ústrojí.....	46
4.3	Vliv vibrací a hluku na člověka.....	47
4.4	Možné zdravotní potíže způsobené hlukem.....	47
4.4.1	Specifické sluchové účinky.....	48
4.4.2	Nespecifické mimosluchové účinky.....	48
4.5	Vliv hluku větrných elektráren na lidské zdraví.....	48
	Závěr.....	49
	Seznam použitých zkratk a symbolů.....	59

## ÚVOD

Společnost třetího tisíciletí v mnoha vyspělých částech světa začala přemýšlet o způsobu svého života a jeho možných negativních dopadech na budoucnost člověka na planetě Zemi. Aby nezůstalo jen u myšlenek, je potřeba realizovat činy vedoucí k trendu tzv. udržitelného rozvoje.

Pod tuto oblast spadá i otázka budoucího směřování energetiky, zajištění stability a dostatečného rok od roku rostoucího množství energie s minimálními negativními důsledky na okolí.

Současné pokusy o nezávislost na fosilních palivech a s tím související snaha o získávání „čistší“ energie s sebou sice přináší řadu problémů pro vědu a průmysl, zároveň ale i nové technologické příležitosti. V posledních letech je kladen důraz především na energii vyrobenou z obnovitelných zdrojů. Ačkoli některé principy uváděné do praxe jsou staré i stovky let, jako např. větrné mlýny či vodní kola, je nutné posoudit nejen energetickou účinnost a ekonomický zisk, ale také vliv na člověka a místo kde žije, tedy komplexně řečeno na životní prostředí.

Větrná energetika, jako jedna z oblastí obnovitelných zdrojů, má v Evropě své základy již pevně zakořeněny. Ve své historii poznala nejen období velkého rozmachu, ale i značný útlum. Momentálně zaznamenává spíše kulminaci po značném rozvoji v posledních desetiletích.

Tato práce uvádí širší přehled o dění v současné větrné energetice. V hlavní části pojednává o problematice hluku při provozu větrných turbín, neboť hluk je známý svým rušivým projevem, který je nežádoucí. To může v dlouhodobém horizontu vést k negativním dopadům na lidské zdraví. V následujících textech je blíže specifikováno, jaké příčiny vedou ke vzniku hluku větrných elektráren, jak se projevují a jakým způsobem je může vnímat okolí. Uveden je i popis měření tohoto hluku, který je doplněn o názornou analýzu. Závěr je věnován nastínění možných důsledků hluku na zdraví člověka.

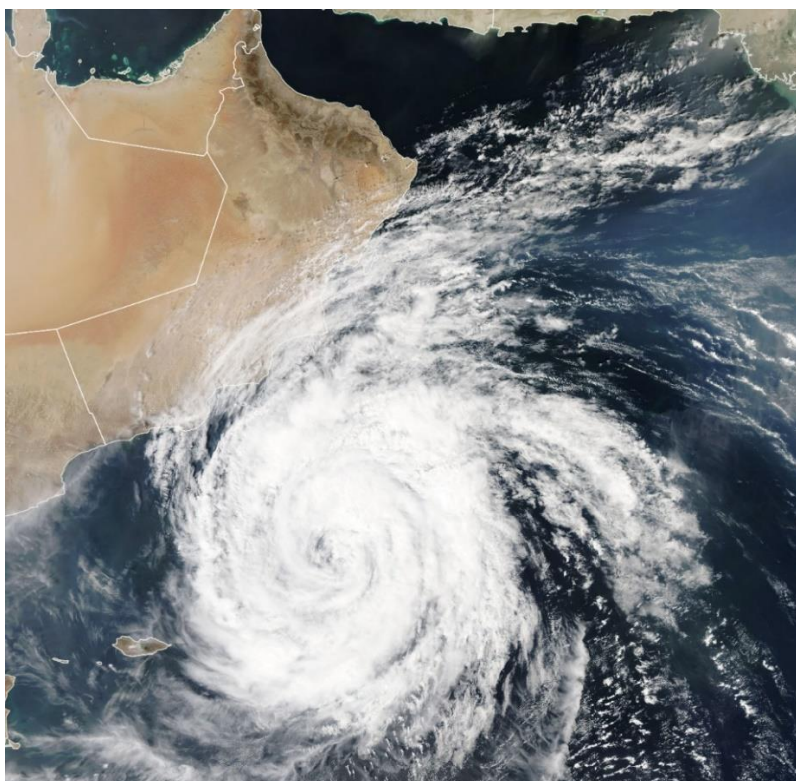
# 1 VÍTR JAKO ZDROJ ENERGIE

## 1.1 VÍTR

**Vítr** je označován jako proudění či pohyb částic vzduchu. Jeho vznik je zapříčiněn především nestejnorodostí tlaku vzduchu v atmosféře [1]. Tlak vzduchu, jinak nazýván atmosférický tlak, je tíha vzduchového sloupce na uvažovanou hladinu měření v atmosféře. S výškou tlak atmosféry klesá. Dále má na jeho velikost vliv teplota, vlhkost vzduchu i zeměpisná šířka [2]. Snahou je rozdíl tlaků vyrovnávat, kdy tzv. síla tlakového (barického) gradientu uvádí do pohybu částice vzduchu z místa vysokého tlaku k nízkému, neboli ve směru tlakového spádu. Důsledkem jsou náhlé změny rychlosti i směru větru. Sílu tlakového gradientu  $G_n$  získáme derivací [1]

$$G_n = -\frac{dp}{dn}, \quad (1)$$

kde  $p$  označuje tlak a  $n$  délku kolmice k izobaře v určeném bodě. Směr gradientu je dán záporným znaménkem, tj. od vyššího k nižšímu. Je však nutné počítat i s působením jiných sil, které začnou ovlivňovat vzdušné částice ihned po vyvolání pohybu od tlakového gradientu. Jsou jimi: Coriolisova síla, odstředivá síla a síla tření [1].

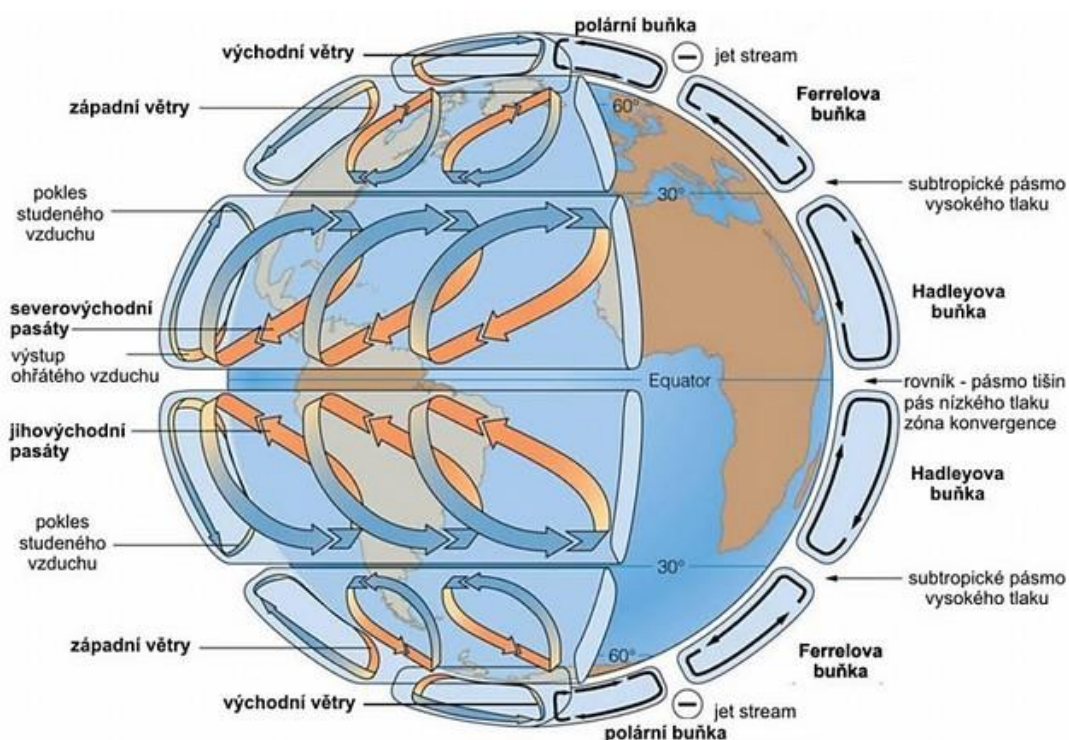


Obr. 1 Cyklóna Luban v Arabském moři zachycená Spektroradiometrem (MODIS) satelitu Aqau NASA dne 11. října 2018 [3]

S tím souvisejí četné frontální pochody, putující cyklóny a anticyklóny (viz Obr. 1) [1]. Tlak vzduchu se nejčastěji uvádí v hPa. Referenční atmosférický tlak dosahuje na hladině moře hodnoty 1013,25 hPa [2].

Příčina rozdílu tlaků v atmosféře má svůj počátek v různorodém příjmu sluneční energie [4]. Zemský povrch v různých zeměpisných šířkách obdrží odlišné množství záření, následně vznikají územní vzdušné proudy, které obstarávají výměnu vzduchových hmot v oblastech s rozdílnými teplotami. Tento jev je nazýván **všeobecnou cirkulací atmosféry** (viz Obr. 2) [1].

Obecně se na Zemi vyskytují dvě pásma vysokého tlaku vzduchu – mezi 30. a 40. rovnoběžkou severní i jižní polokoule, a pásmo nízkého tlaku vzduchu – v blízkosti rovníku, tzv. oblast rovníkových tišin [1]. Tyto pásma oddělují tři rotující prstence vzduchu, které se stáčíjí vlivem zemské rotace východním nebo západním směrem [5].



Obr. 2 Všeobecná cirkulace atmosféry Země [6]

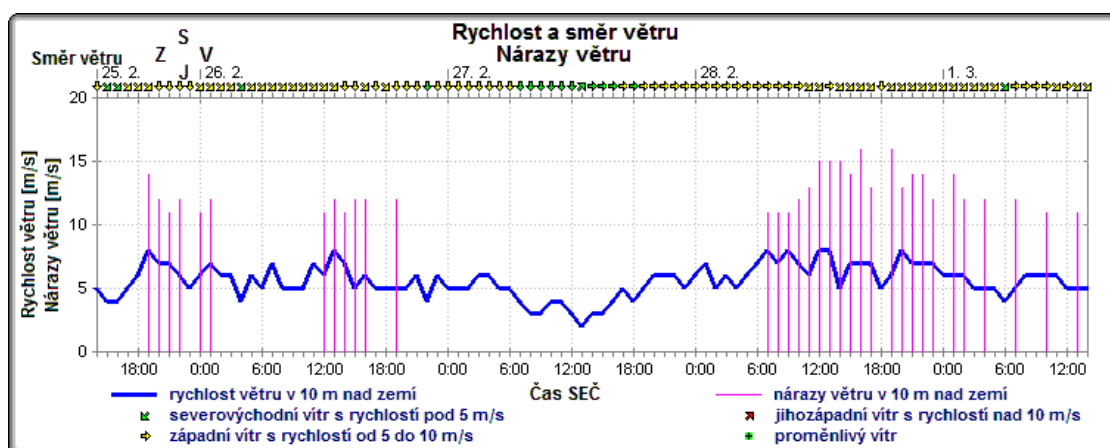
Pro oblasti střední a západní Evropy, které se nacházejí v mírném klimatickém pásmu je typický vítr vanoucí od západu (Z) a jeho sousedních směrů, jihozápadního (JZ) a severozápadního (SZ) [1].

## 1.2 MĚŘENÍ VĚTRU

Vítr je vektor, tedy výsledek měření se skládá ze směru a velikosti rychlosti. Měření je prováděno na pozemních meteorologických stanicích měřicími přístroji – anemografem a větrnými směrovkami. **Anemograf** je přístroj, obvykle umístěný 10 m nad zemí, pro měření rychlosti a směru tzv. přzemního větru. Skládá se z anemometru a zařízení na dlouhodobé zapisování výsledků (viz Obr. 3) [1].

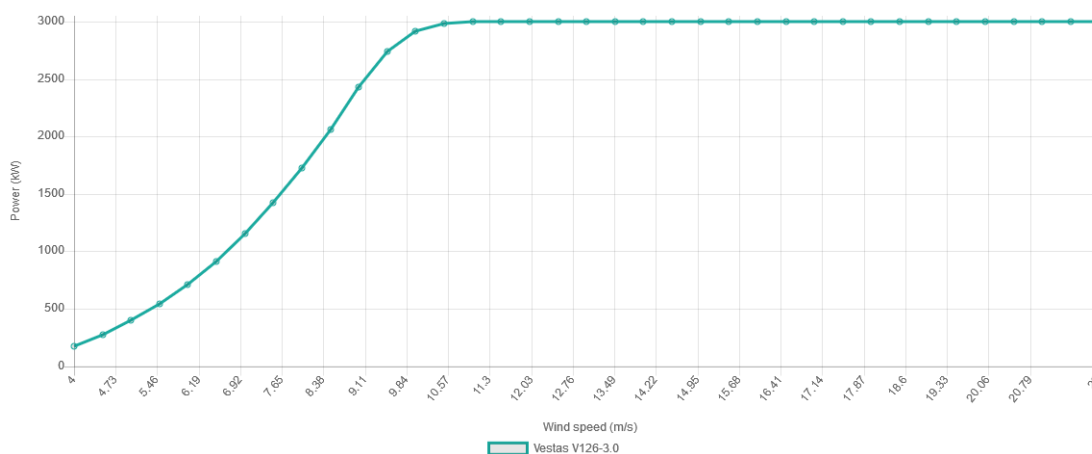
Funkce nejznámějšího anemometru - miskového jsou [7]:

- mechanická – roztáčením otočného miskového čidla je měřena rychlost větru dle otáček za jednotku času;
- aerodynamická – dynamický tlak od proudícího vzduchu je porovnáván s tlakem statickým;
- zchlazovací – větrem je chlazen drát (čidlo), který má vyšší teplotu než je teplota okolního vzduchu.



Obr. 3 Záznam posledních 96 hodin anemografu z přelomu února a března 2019 z meteorologické stanice ČHMÚ ve Svatouchu na Vysočině [8]

Moderní typ větrné elektrárny obsahuje anemograf s řídicí elektronikou umístěný na krytu gondoly. Z vyhodnocených údajů je následně řízen správný chod větrné turbíny (Obr. 4) [9].



Obr. 4 Výkonnostní křivka (závislost výkonu na rychlosti větru) větrné turbíny dánské společnosti Vestas s nominálním výkonem 3 MW [10]

Směrem větru je myšleno místo, odkud vítr vane. Výsledkem měření je průměr údajů za tzv. vzorkovací dobu, kterou tvoří určitý časový interval. To jest činěno z důvodu značné kolísavosti proudění vzduchu. Intenzitu větru lze vyhodnotit dle **Beaufortovy stupnice** [1]

Tabulka 1 Beaufortova stupnice [1]

Beaufortův stupeň	Označení a rozpoznávací znaky	Rychlost přízemního větru	
		[m.s <sup>-1</sup> ]	[km.h <sup>-1</sup> ]
0	Bezvětří (kouř stoupá kolmo)	0,0 až 0,2	<1
1	Vánek (směr větru je poznatelný podle pohybu kouře, vítr však nepohybuje větrnou směrovkou)	0,3 až 1,5	1 až 5
2	Slabý vítr (vítr je cítit na tváři, listy stromů šelestí, větrná směrovka se začíná pohybovat)	1,6 až 3,3	6 až 11
3	Mírný vítr (listy a větvičky stromů jsou v trvalém pohybu, vítr napíná praporky)	3,4 až 5,4	12 až 19
4	Dostí čerstvý vítr (vítr zdvihá prach a kousky papíru, pohybuje slabšími větvemi)	5,5 až 7,9	20 až 28
5	Čerstvý vítr (listnaté keře se začínají hýbat, na stojatých vodách se tvoří menší vlny se zpěněnými hřebeny)	8,0 až 10,7	29 až 38
6	Silný vítr (vítr pohybuje silnějšími větvemi, telegrafní dráty sviští, použití deštníku je nesnadné)	10,8 až 13,8	39 až 49
7	Prudký vítr (vítr pohybuje celými stromy, chůze proti větru je obtížná)	13,9 až 17,1	50 až 61
8	Bouřlivý vítr (vítr ulamuje větve, chůze proti větru není možná)	17,2 až 20,7	62 až 74
9	Vichřice (vítr působí menší škody na stavbách – strhává komíny, tašky a břidlice ze střech)	20,8 až 24,4	75 až 88
10	Silná vichřice (na pevnině se vyskytuje zřídka; vyvrací stromy, působí škody na obydlích)	24,5 až 28,4	89 až 102
11	Mohutná vichřice (vyskytuje se velmi zřídka; působí rozsáhlá zpuštění)	28,5 až 32,6	103 až 117
12	Orkán (ničivé účinky)	32,7 a více	118 a více

### 1.3 ENERGIE A VÝKON VĚTRU

Každá substance (látka), která se pohybuje, souvisí s kinetickou energií [11]. **Kinetická energie** částice hmotnosti  $m$  a rychlosti pohybu  $v$  - výrazně nižší než rychlost světla (300 000 000 m/s), je určena dle vztahu [12]

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

Z této jednoduché rovnice vyplývá závislost kinetické energie na druhé mocnině rychlosti. Tedy, je-li rychlost zvýšena dvojnásobně, energie vzroste čtyřnásobně [12]. Tím i skutečně malé (lehké) předměty se při vysoké rychlosti mohou stát nebezpečnými [11]. Jednotkou energie odvozenou ze soustavy SI je joule  $J$ , kde [12]

$$1 J = 1 \frac{kg \cdot m^2}{s^2} = 1 N \cdot m . \quad (3)$$

Energetický tok za jednotku času neboli výkon se definuje v jednotkách wattů, kdy [12]

$$1 W = 1 \frac{J}{s} . \quad (4)$$

V praxi je však běžně užívána jednotka **kilowatthodina** a platí [12]

$$1 kWh = 1 W \cdot 3600 s = 3,6 MJ . \quad (5)$$

Hmotnost vzduchu lze zjistit ze vztahu [5]

$$m = \rho \cdot V = \rho \cdot A \cdot s , \quad (6)$$

kde:

- $\rho$ ... hustota vzduchu
- $V$ ... objem
- $A$ ... plocha, kterou vítr prochází
- $s$ ... dráha pohybujícího se vzduchu.

Vyjádřit **výkon** protékající plochou lze rovnicí [5]

$$P_v = \frac{E_k}{A \cdot t} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \frac{A \cdot s}{A \cdot t} \cdot v^2 , \quad (7)$$

po úpravě

$$v = \frac{s}{t} \quad (8)$$

je vyjádřen výkon

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 . \quad (9)$$

Jednotkou je watt protékající plochou metru čtverečného [5]

$$1 \frac{W}{m^2} = 1 \frac{J}{m^2 \cdot s} = 1 \frac{kg \cdot m^2}{m^2 \cdot s^3} = 1 \frac{kg}{s^3}. \quad (10)$$

Hustota je vypočitatelná z barometrického tlaku  $p_b$  a termodynamické teploty vzduchu  $T$  [5]

$$\rho = \frac{p_b}{r \cdot T}, \quad (11)$$

$r$  je plynová konstanta, pro vzduch s hodnotou [5]

$$r = 287 \frac{J}{kg \cdot K}. \quad (12)$$

Barometrický tlak je závislý na nadmořské výšce  $h$ , s jejíž vyšší hodnotou stoupá, to je znázorněno ve vztahu [5]

$$p_b = p_{bo} \cdot (1 - 0,118358 \cdot 10^{-3} h + 0,5291 \cdot 10^{-8} h^2). \quad (13)$$

Hodnota **energie větru**  $E_v$  se stanovuje za určité časové období, a to z důvodu měnící se rychlosti a výkonu větru v čase vztahem [5]

$$E_v = \int_{t_0}^t p_v \cdot dt. \quad (14)$$

Z jednotlivých naměřených údajů lze vyjádřit celkovou energii proteklou jednotkovou plochou součtem  $i$ -tých hodnot s časovým intervalem  $\Delta t$  mezi jednotlivými měřeními [5]

$$E_v = \sum_0^i E_i = \frac{1}{2} \sum_0^i \rho_i \cdot v_i^3 \cdot \Delta t. \quad (15)$$

## 1.4 OBNOVITELNÉ ZDROJE ENERGIE

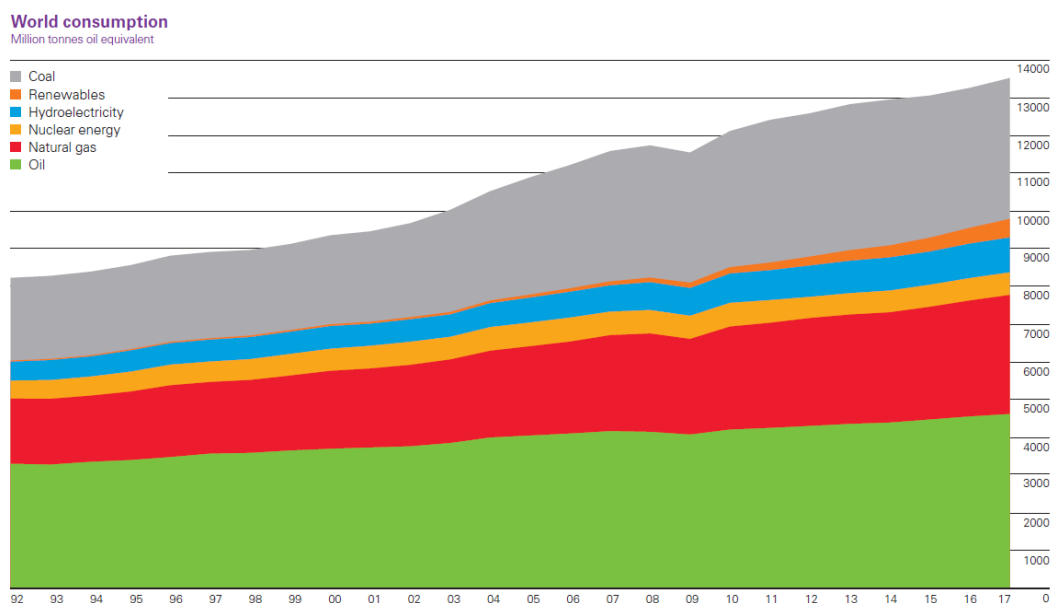
Fosilní paliva poskytla řešení k získání a jednoduché skladovatelnosti energetických zdrojů. Dnes se na spotřebě celkové energie (doprava, průmysl, služby, bydlení) podílejí více než 80 % (viz Obr. 5) [13]. Avšak závislost světa na těchto zdrojích energie přinesla své neblahé důsledky. Dle vědců je zpracování a přeměna fosilních paliv na tepelnou a hnací energii pravděpodobně jednou z velkých příčin rychlého nárůstu průměrných teplot a změn klimatu na počátku 21. století [11].

Snaha o omezení těchto nepříznivých vlivů a s tím i snížení emisí skleníkových plynů do atmosféry, jakožto jejím narušovatelem, dala možnost k opětovnému zájmu o využívání základních přírodních zákonů. Tyto alternativní zdroje začaly být označovány termínem **obnovitelné zdroje energie** (dále jen **OZE**) a jsou schopny se nejméně částečně, častěji však úplně obnovovat. Hlavním zásobitelem OZE je Slunce, jeho jaderné přeměny a působení ve vesmíru [14].



Někdy jsou OZE pojmenovávány jako nefosilní přírodní zdroje - jsou jimi [14]:

- sluneční záření,
- voda,
- vítr,
- půda,
- biomasa a další.



Obr. 5 Vývoj podílu jednotlivých paliv (Coal – uhlí, Renewables – obnovitelné zdroje, Hydroelectricity – vodní energie, Nuclear energy – jaderná energie, Natural gas – zemní plyn, Oil – ropa) na celosvětové spotřebě energie (World consumption) v jednotkách ropného ekvivalentu (Million tonnes oil equivalent) [13]

Představu ekologicky čisté energie pro pokrytí většiny současné spotřeby OZE naplňují, avšak využití v praktickém měřítku je značně limitováno, především [14]:

- nestejným územním rozložením zdrojů,
- proměnlivou intenzitou v průběhu denních i ročních období,
- investičními náklady.

Výroba elektrické energie z OZE je značně omezena i geografickými podmínkami, např. vhodné oblasti pro výrobu energie z fotovoltaiky jsou již obsazené. Důležitou roli hrají klimatické podmínky – větrné dny nebo jarní tání sněhu ovlivňuje možný výkon zařízení na výrobu energie [14]. Tedy rozhodnutí, jaký zdroj má být na konkrétním místě využit, by měl vycházet z předem uvažovaných ekonomických a bezpečnostních hledisek s ohledem na životní prostředí a jeho udržitelnost [15].

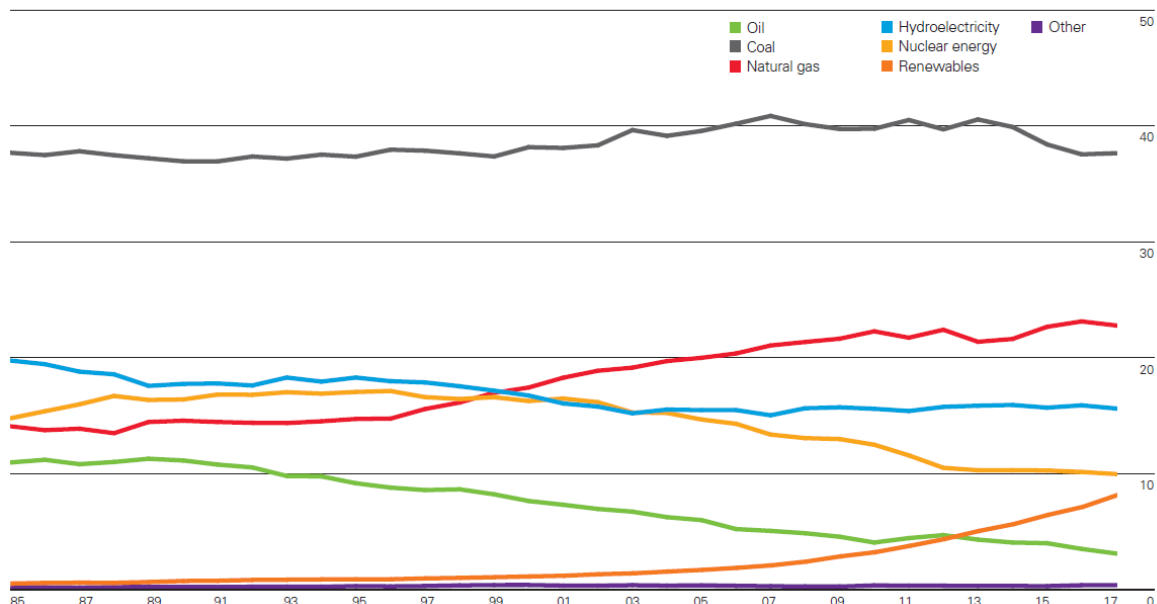
Ukazateli vhodnosti jsou [15]:

- instalovaný výkon zařízení  $P_i$ ,
- špičkový výkon  $P_p$ ,
- průměrný roční výkon  $P_{cr}$ ,
- součinitel využití  $K$ .

### 1.4.1 OZE VE SVĚTĚ

Celková výroba elektrické energie roste v posledních několika letech průměrně o 1 – 3 %, podílejí se na tom především ekonomiky rozvojových zemí a Čína. Vedoucí pozici spotřebitele nejen OZE převzala Asie [13].

Share of global electricity generation by fuel  
Percentage



Obr. 6 Procentní podíl jednotlivých paliv (Oil – ropa, Coal – uhlí, Natural gas – zemní plyn, Hydroelectricity – vodní energie, Nuclear energy – jaderná energie, Renewables – obnovitelné zdroje, Other – ostatní) na celosvětové produkci elektriny (Share of global electricity generation by fuel) [13]

Růst zaznamenávají i OZE (viz Obr. 6), celosvětově v roce 2017 stoupl jejich podíl ze 7,4 % na 8,4 %, konkrétně v Evropě z 16,5 % na 18,3 %. Byl to nejvyšší nárůst za předchozích 10 let, bez podílu vodní energie činil 69 mtoe (*milion tonnes of oil equivalent*), o 25 mtoe v Číně. Větrná energie v tom přispívala více než polovinou. Naopak velký pokles zaznamenala vodní energie, jejíž desetiletý průměrný roční růst o 2,9 % se v roce 2017 zastavil na pouhých 0,9 %. Přesto je tento zdroj dominantní, zahrnuje téměř 70 % OZE [13].

### 1.4.2 OZE V ČESKÉ REPUBLICE

V roce 2018 vyráběla Česká republika přibližně 10 % energie z obnovitelných zdrojů. Dle expertních odhadů je dosažitelným cílem do roku 2050 produkovat 30 % energie z obnovitelných zdrojů, a to podílem 15 % sluneční energie a dalších 15 % pomocí vody, větru a biomasy [14]. Ročně se v ČR vyrobí až 9600 GWh elektrické energie z obnovitelných zdrojů energie [16].

### 1.4.3 VĚTRNÁ ENERGIE

Při výrobě energie, v současnosti především elektrické, pomocí větru nejsou produkovány žádné škodlivé emise. Roční průměrná hodnota rychlosti větru by na území větrné elektrárny měla přesahovat 5 m/s [15]. Nejdůležitějším činitelem je rychlost větru, na kterém se odráží využitelný výkon. Ve spodní oblasti atmosféry vlivem turbulentní výměny závislé zejména na teplotě vzduchu roste rychlost vzduchu s výškou, proto platí [1]

$$\frac{v^*}{v_0^*} = \left(\frac{h}{h_0}\right)^n \quad (16)$$

- $v^*$  ...průměrná rychlost větru ve výšce  $h$
- $v_0^*$  ...průměrná rychlost větru v referenční výšce  $h_0$
- $n$ ...drsnost povrchu (viz Tabulka 2) [15].

Výška nad terénem se odvozuje od domnělé nulové rychlosti větru (zanedbatelné rychlosti), u zemědělských a lesních porostů se výrazně liší od nulové hladiny země [5].

Tabulka 2 Typ povrchů a jejich drsnosti [15]

Typ povrchu	$n$
a – hladký povrch (vodní hladina, písek)	0,14
b – louka s nízkým travnatým porostem, oranice	0,16
c - vysoká tráva, nízké obilné porosty	0,18
d – porosty vysokých kulturních plodin	0,21
e – lesy	0,28
f – vesnice a malá města	0,48

Pro umístění větrných motorů jsou významné i krátkodobé kolísání větru způsobené překážkami. Časté změny rychlosti větru mají negativní vliv na namáhání částí rotoru, komplikují také kvalitu dodávané energie v energetické soustavě [5].

## 1.5 VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY VE SVĚTĚ

Značný rozvoj výroby elektrické energie z větru probíhá od 90. let minulého století až doposud. V roce 1996 dosahoval celkový výkon větrných turbín 6,1 GW a na počátku roku 2017 dosahoval již 486,7 GW. Kdy např. v roce 2016 bylo instalováno 54,8 GW [14]. V čele tohoto exponenciálního nárůstu zpočátku stály některé státy Evropské unie – Dánsko, Německo, Španělsko, postupně se však do popředí dostávají Čína a USA [11].

Nakolik je instalovaný výkon větrných elektráren v průběhu roku využit ukazuje tzv. kapacitní faktor (využití výkonu). Tento koeficient je z velké části závislý na geografických a klimatických podmínkách a pohybuje se od 15 do 50 %. Nejlépe jsou na tom turbíny v blízkosti mořských pobřeží nebo vystavené přímo nad mořskou hladinou.

Vysokým koeficientem využití výkonu se v současné době mohou chlubit především obrovské větrné farmy s desítkami až stovkami větrných turbín instalovaných právě na těchto výhodných místech. Stavějí se zde stále větší turbíny s výkonem i kolem 8 MW a výškou až 200 m. Faktory posuzování vhodnosti využití jednotlivých míst jsou [14]:

- klimatologický (teoretický) potenciál větrné energie,
- technický potenciál větrné energie
- a realizovatelný větrný potenciál.

Klimatologický potenciál sleduje dostatečnou rychlost větru ve výšce, kde se obvykle nachází osa turbíny. Technický potenciál vyhodnocuje výrobu elektřiny s ohledem na nominální výkon, celkovou roční výrobu a stav současných technologií, které vhodně využijí klimatický potenciál. Realizovatelný větrný potenciál koriguje technický potenciál o vliv kapacity distribučních sítí, postoje veřejnosti, územních a stavebních povolení či výsledků řízení **EIA** (vliv na životní prostředí) a dalších [14].

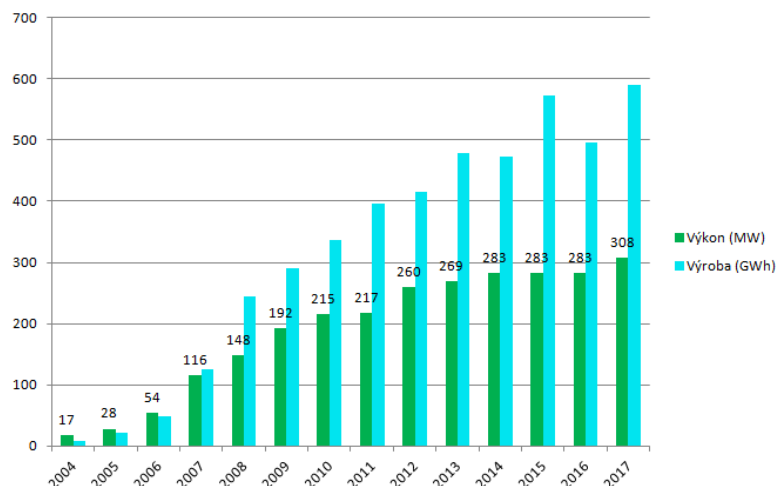
Problémem budoucnosti vývoje větrné energie nejen v Evropě je nestabilita. Větrné dny mohou na území větrných farem náhle vytvořit jednu velkou elektrárnu. Ihned se dostává otázka dopravy elektřiny z tohoto území na místa, kde by bylo možné ji využít. Dojde zde k vydatnému nadbytku energie – výkon překračuje potřeby a pokles cen elektrické energie významně rozkolísá jejich trh [14]. Často nastává i opačný efekt – období bezvětrných dní, kdy podíl energie vyrobené z větru musí být pokryta konvenčními elektrárnami. K těmto problémům již dochází např. v severním Německu a obecně na severu Evropy [17].

## 1.6 VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY V ČESKÉ REPUBLICE

Vývoj sítě větrných elektráren silně ovlivňuje sousední Německo, kde od roku 2011 funguje významná podpora pro výrobu ze zdrojů obnovitelné energie (*Energiewende*) pro připojení k síti a s ní i zaručené výkupní ceny, tzv. *feed-in tariffs* [18]. Společně s razantním odklonem od jaderné energetiky nastartoval ve Spolkové republice Německo velmi prudký rozvoj větrné energie, především na jejím severním pobřeží [19]. Vítr se stal primárním nízkoe emisním zdrojem, zajišťuje přibližně 19 % produkce elektřiny v Německu [14].

Velký krok kupředu zaznamenala výroba elektrické energie v ČR především po roce 2000. Souhrnný výkon větrných turbín v naší zemi činil v roce 2017 přes 300 MW (viz Obr. 7). Dle roční zprávy o provozu elektrizační soustavy (ES) z roku 2017 bylo vyprodukováno brutto 591 GWh elektrické energie z větrných elektráren, to činí necelé 1 % podílu z produkce elektřiny [16]. Z toho vyplývá přibližně 20 % koeficient využití zdrojů [14].

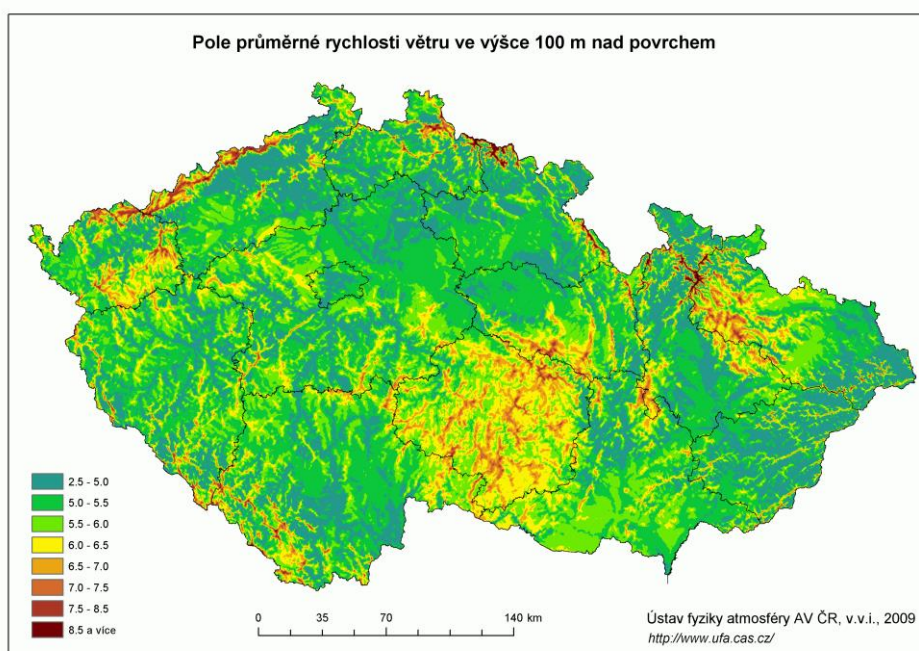
Nejvyšší výkon elektráren se nachází v Ústeckém kraji. Na hřebenech Krušných hor jsou větrné turbíny v součtu 87 MW. Největší větrná elektrárna v ČR - Kryštofovy Hamry, kterou lze se svými 21 turbínami ve výšce 78 m nad zemí nazvat větrnou farmou, leží v okrese Chomutov mezi Klášteřem nad Ohří a hranicemi se Spolkovou republikou Německo. S výkonem 42 MW zásobuje ročně elektrickým proudem na 30 tisíc domácností. Další větrné elektrárny se nacházejí na větrných místech Lužických a Jizerských hor v Libereckém kraji, v Hrubém i Nízkém Jeseníku v Olomouckém kraji a dále také v kraji Karlovarském, kam také zasahuje pohoří Krušných hor [20].



Obr. 7 Instalovaný výkon a množství vyrobené elektrické energie větrných elektráren v ČR dle ČSVE k 31.12.2017 [21]

Poslední větrný park byl postaven během letní sezóny roku 2017 ve Václavících u Hrádku nad Nisou v Libereckém kraji na tzv. Kamenném vrchu. Výstavba stála 1,1 miliardy českých korun a návratnost se odhaduje na 15 let. Tato druhá největší větrná elektrárna se 13 turbínami a výkonem přes 26 MW zajišťuje od podzimu 2017 elektrinu pro 15 tisíc domácností a ušetří tak přibližně 35 tisíc tun hnědého uhlí ročně [22].

Další ambice pro stavbu větrných zdrojů jsou, ale velmi omezené, což je zmíněno i ve studii Ústavu fyziky atmosféry AV ČR. Kapacita by byla především na pohraničních hřebenech hor, které jsou ale z velké části územím chráněným (viz Obr. 8). Dalším omezením je i fakt, že Německo je významným producentem větrné energie, a tedy když jsou vhodné větrné podmínky v České republice, tak i u našeho západního souseda [23].



Obr. 8 Výpočtový model rychlostního pole větru v ČR ve výšce 100 m Ústavu fyziky atmosféry AV ČR [23]

## 2 STAVBA VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY

### 2.1 HISTORIE VĚTRNÝCH MLÝNŮ

Vítr jako zdroj energie pro práci je znám od pradávna, především jako horizontální větrná kola. Dle historických pramenů se první větrná kola, konstrukce ze dřeva či bambusu, stavěla na území Perské říše a v Číně. Větrné mlýny údajně budovaly i v Egyptě, a to již ve 2. tisíciletí př. Kr. Později stály kola i na řeckém pobřeží, kde byla dle sezónního směru větru přestavitelná o 180°. Od 9. století po Kr. jsou známé už i v západní Evropě. Větrné mlýny se využívaly k čerpání vody, mletí obilí, drcení rud, písku nebo i kakaových bodů a tabákových listů. Postupem času se kamenné stavby kruhového půdorysu s cimbuřím staly častěji používanější. Původně se na území Evropy mlýny otáčely celé proti směru větru – tzv. německý typ, později byly vyvinuty mlýny pouze s otáčivou střechou – tzv. holandský typ (viz Obr. 9) [24].



*Obr. 9 Větrný mlýn holandského typu z roku 1865 v obci Rudice na Blanensku*

Největší rozkvět nastal na přelomu letopočtů 18. a 19. století, než nastal rozmach parního stroje s rozvojem výkonných spalovacích motorů [5].

První automatickou větrnou turbínu s generátorem elektrického proudu sestrojil americký inženýr a vynálezce Charles F. Brush na konci 80. let 19. století. Při otáčkách  $500 \text{ min}^{-1}$  činil výkon rovných 12 kW [25].

Postupná elektrifikace vedla k vyšším nárokům na energii, avšak pro větrné motory byly tehdejší ceny uhlí velkou konkurencí [5]. Po první světové válce byla tedy odsunuta energie větrných turbín do oblasti příležitostných experimentů [26]. Až zvýšení cen paliv a současně větší zájem o stav životního prostředí vrátil ve druhé polovině minulého století větrnou energii opět do oblasti zájmu, především jako zdroj elektrické energie [5].

## 2.2 VĚTRNÉ TURBÍNY

Každá větrná turbína pracuje na principu přeměny kinetické energie proudící masy větru na mechanickou energii otáčejícího se rotoru turbíny pomocí aerodynamických sil obvykle skrze listy rotoru. V dnešní době už se téměř vždy následně stává pomocí generátoru zdrojem elektrické energie [9], [27].

Základním rozdělením členíme větrné turbíny na 2 skupiny dle principu aerodynamiky větru [5]:

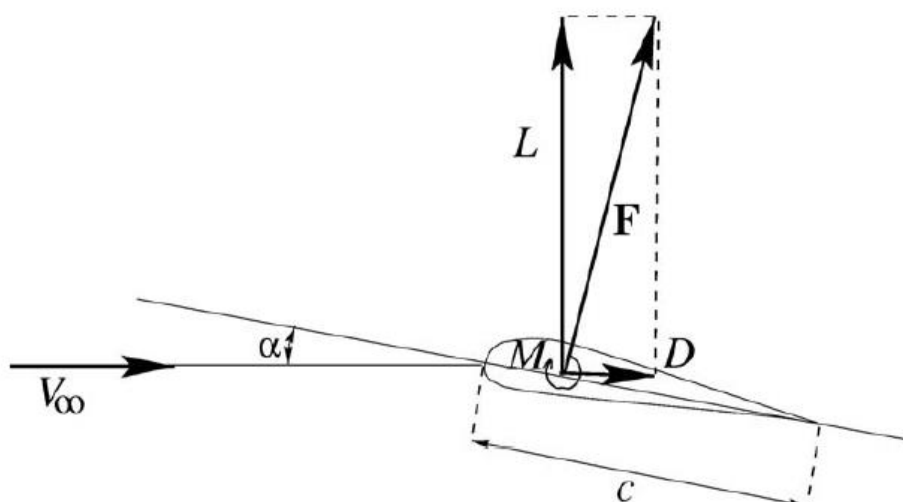
- odporové (*drag turbine*),
- vztlakové (*lift turbine*).

**Odporová turbína** vytváří aerodynamický odpor proudící mase větru nastavením plochy listu proti jeho směru. Síla na této ploše má za následek roztočení hřídele rotoru. Účinnost není příliš velká, pohybuje se kolem 15 %. Na tomto principu pracuje Savoniova turbína [9], [27].

**Vztlaková turbína** se opírá především o speciální aerodynamický tvar listu rotoru, který je velice podobný křídlu letadla. Profil listu je natačen do směru proudění relativní rychlosti větru  $\vec{w}$ , která je rozdílem vektoru skutečného proudění  $\vec{v}$  (směr větru) a vektoru obvodové rychlosti rotující lopatky  $\vec{u}$ . Rychlost lopatky však od náboje rotoru lineárně roste, proto se mění tzv. úhel náběhu  $\alpha$  mezi směry vektorů relativní a lopatkové rychlosti [28], [29].

Pokud je list správně nastaven vůči proudění, vytváří se na vrchní (sací) straně podtlak a na spodní (tlakové) straně přetlak oproti atmosférickému tlaku, a to jako implikace nesymetrického obtékání. To lze dokázat odvozením z Bernoulliho rovnice. V důsledku toho začne kolmo na směr proudění působit **aerodynamický vztlak** ( $L$  dle Obr. 10). Na povrchu ve směru proudění vzniká účinkem třecích napětí v tzv. mezní vrstvě i aerodynamický třecí odpor ( $D$  dle Obr. 10). Zásluhou výslednice těchto sil působící na profil listu se začne rotor otáčet [9], [27], [30], [31].

Dle Betzova pravidla může být **maximální teoretická účinnost** větrné turbíny 0,593 [32]. Reálně se dnes vztlakové turbíny vyznačují účinností od 40 do 50 % [9].



Obr. 10 Aerodynamický profil listu rotoru se silovými účinky od obtékajícího proudu [29]

Dále je možné větrné elektrárny klasifikovat podle osy otáčení na [9]:

- horizontální,
- vertikální.

**Horizontální turbína** musí být pro svoji funkčnost natočena proti směru větru. Je vhodné je stavět v místech s vyšší a stabilnější rychlostí větru. Zpravidla jsou účinnější, ale více nákladné. Na tomto principu pracují vrtulové motory [9], [27].

**Vertikální turbína** dosahuje menších rozměrů a nezávisí na směru větru. Generátor mají obvykle umístěný na zemi. Řadí se spíše mezi elektrárny nižších výkonů a jsou využívány pro vedlejší účely. Patří mezi ně Savoniova turbína a Darrieova turbína [9].

Často jsou větrné elektrárny řazeny i na základě nainstalovaného výkonu [33].

## 2.3 KONSTRUKCE DNEŠNÍ VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY S HORIZONTÁLNÍ OSOU

**Stavba větrné elektrárny** je velice nákladná a proto je nutné předem posoudit veškeré aspekty a dopady příprav, výroby, samotné stavby, fungování, provozu, životnosti a následné likvidace. Součástí příprav je i vypracování odborné **hlukové studie**. Aby se stal záměr úspěchem, je důležité zhodnotit hlediska nejen po stránce ekonomické, ale i lidské [34], [35]. Životnost se obvykle odhaduje minimálně na 20 let [22].

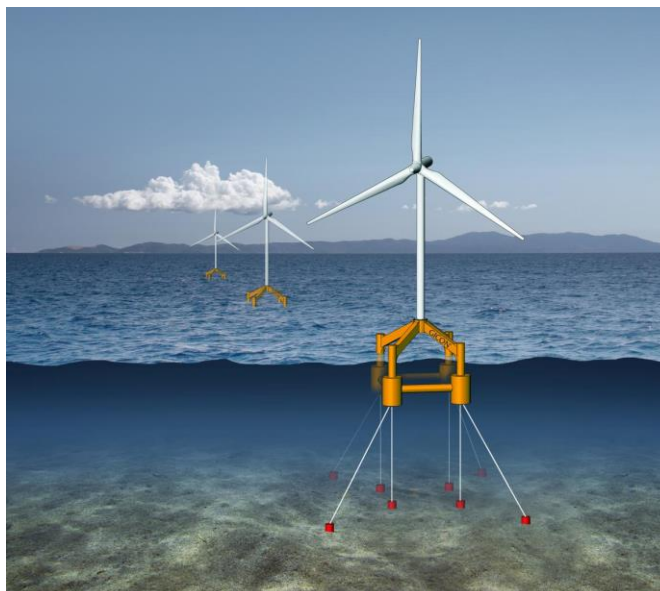
### 2.3.1 BETONOVÝ ZÁKLAD

Málo viditelné, ale přesto velmi důležité je vybudovat před samotnou stavbou stožáru pevný betonový základ. Základy se rozlišují dle místa stavby na [36]:

- onshore – na pevnině,
- offshore – v moři.



Nedávnou novinkou jsou tzv. plovoucí větrné elektrárny - *floating wind turbines* (viz Obr. 11), které nemají základy z betonu, nýbrž stožár je uchycen pomocí těžkých a mohutných řetězů k mořskému dnu. Kotvy vážící i více než 100 tun jsou užitečné především v hlubších vodách [37], [38].



Obr. 11 Floating wind turbines (plovoucí větrné elektrárny) [39]

Zavedenou praxí před samotným stavěním na pevnině je pečlivý geologický průzkum, kde se zjišťuje kvalita podloží, obsah spodních částí zeminy a její vliv na změnu podmínek, např. přítomnost vody [40]. Tvorba stavebního plánu obvykle trvá 4 – 8 týdnů, v případě komplikací ve struktuře podloží (různorodost půdy, nízká pevnost, skalnatá struktura) se může protáhnout i déle [41]. Pokud je nutné zpevnit podloží, je vyhrabána zemina pod základem, promíchána s cementem a následně je ztuhněna zpět na místo. Tím je vytvořena stabilní základová spára [40].

Před samotným vylitím základu se betonuje slabá deska čtvercového, kruhového nebo šestiúhelníkového tvaru, která zaručí vodorovný a pevný podklad. Na vyzrálou základovou desku se položí základový ocelový fundament kruhového obvodu, který je zajištěn distančními šrouby do vodorovné polohy s tolerancí 2 mm, dále se v něm nacházejí otvory pro vedení strukturované kabeláže a pro vyztužení (armování). Okolo základu se postaví bednění, uvnitř se usadí trubky pro kabeláž, celý obvod se vyztuží několika desítkami tun železa a uzemní. Následně je bednění vylito dostatečně ztuhněným betonem. Na zrání betonu je vyčleněno 4-5 týdnů [40].

### 2.3.2 STOŽÁR

Stožár tvoří nosnou konstrukci větrné turbíny. Jeho výška se pohybuje nejčastěji od 40 do 120 m. Samotná věž je obvykle realizovaná jako svařenec ocelových tubusů. Stavba příhradové ocelové konstrukce je spíše výjimečná [42].

Ocelový tubus, jehož realizace je v Evropě nejčastější, tvoří několik segmentů dlouhých od 10 do maximálně 35 m. Základním materiálem je normalizačně žíhaná uhlíková ocel třídy 11.

Polotovarem je plech tloušťky 12 – 45 mm, který je vypálen kyslíko-acetylenovým plamenem. Poté je vykroužen do prstence obvodu až 5 m pomocí tří- nebo čtyřválcové skružovací stolice (viz Obr. 12). Podélný spoj je svařen metodami MAG (*Metal Active Gas*) a svařováním pod tavidlem. Jednotlivé prstence jsou k sobě připojeny přesně pomocí šroubů nacházejících se na ocelových přírubách, které jsou navařeny uvnitř čel segmentů. Vnitřní vady materiálu a svary jsou přísně kontrolovány nedestruktivními zkouškami - ultrazvukem či magnetickou rezonancí. Uvnitř tubusů se ještě připevňují úchyty pro instalaci žebříků, kabelových roštů a dalšího vybavení. Před samotnou expedicí tubusu z výrobní haly jsou části stožáru očištěny tryskáním a pečlivě nastříkány barvou tloušťky přibližně 240  $\mu\text{m}$  [43].



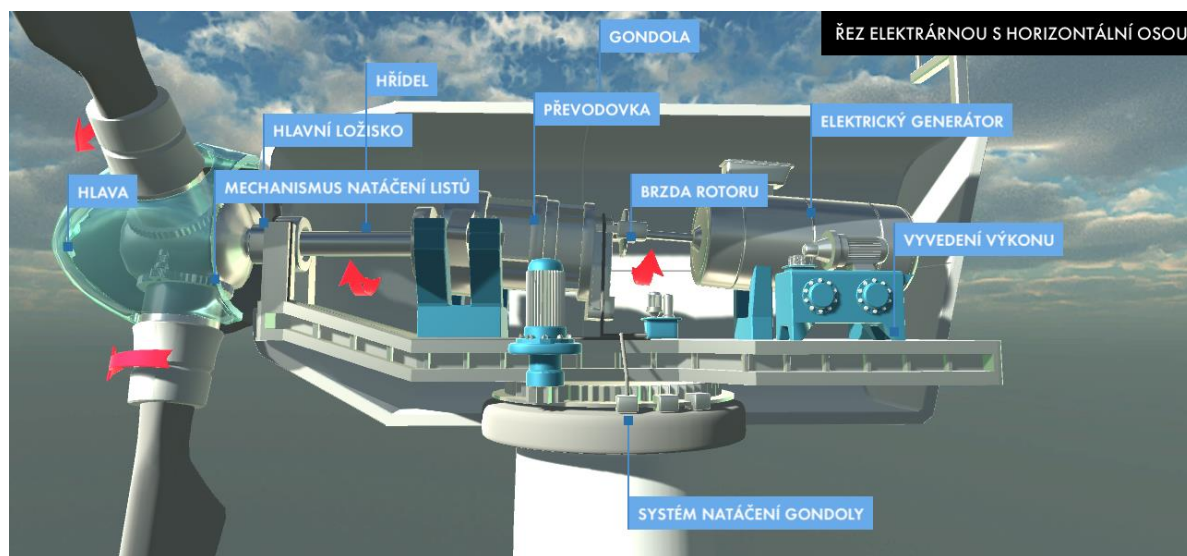
Obr. 12 Skružování ocelového prstence tubusu větrné elektrárny [43]

Komplikací se často stává transport částí tubusů. Převoz velkých rozměrů a nadměrné hmotnosti je zpravidla realizován umístěním na návěs tahače. Trasa musí být plánována s opravdovým detailem. Neboť elektrárny nejsou obvykle umístěny v blízkosti velkých sídel a s odpovídajícími dopravními komunikacemi. Spíše v horském kopcovitém terénu, kde silnice jsou špatně průjezdné pro nadrozměrné náklady. Cestu komplikuje i malá nosnost mostů, výška podjezdů, průjezd mezi domy v obcích, stromořadí či kruhové objezdy [44]. Z celkových nákladů zaujímá věž přibližně 20 % [45].

### 2.3.3 GONDOLA

Gondolou je označováno srdce moderní větrné elektrárny. Posazená je na vršku věže a obsahuje samotné nitro se strojovnou elektrárny. Pod laminátovým krytem gondoly se postupně nacházejí (viz Obr. 13) [9], [46]:

- mohutný ocelový nosný rám pro nesení celé strojovny,
- hřídel uložený v hlavním ložisku,
- převodovka a spojka,
- brzda rotoru,
- elektrický generátor,
- vyvedení výkonu,
- systém natáčení celé gondoly.



Obr. 13 Vnitřní část gondoly posazená na vrcholu stožáru s popisem jednotlivých částí strojovny [9]

Na vrchu gondoly jsou také naistalována čidla snímající údaje o síle a směru větru. Následně jsou řídicí elektronikou zpracovány a dle výsledků je spouštěn či zastaven rotor. Díky tomu je optimalizováno natočení turbíny - *yaw control* či správný úhel listů rotoru - *pitch control* [9], [28].

Celá strojovna leží na nosném rámu posazeném na velkém kuličkovém ložisku, které se otáčí spolu s rotorem dle směru větru pomocí elektromotorů s planetovou převodovkou [47]. Hlavní hřídel přenáší točivý moment do elektrárny propojením rotoru s vnitřním ústrojím gondoly. Provedení je v celku s přírubou pro uchycení hlavy rotoru [48].

## PŘEVODOVKA

Převodová ústrojí elektráren nejsou jednotvárná, záleží na typu konstrukce celé elektrárny. Funkcí převodovky je transponování nízkých otáček hřídele z rotoru na vysoké otáčky jdoucí dále do elektrického generátoru. Obecně řečeno, je tedy zařízením multiplikačním. Převodovka, která je jednou z velmi namáhaných součástí strojovny, musí odolávat kolísavému zatížení, a krátkodobě i vysokým hodnotám. Dále je nutné počítat s možným rozmezím teplot. Důležitým faktorem je **hlučnost** celého ústrojí [49], [50].

Pracovní otáčky rotorů se pohybují od 5 do 20 ot/min u vysoko a od 40 do 80 ot/min u nízkovýkonových elektráren. Převodová ústrojí o hmotnosti i několika tun transformují otáčky rotoru v poměrech na hřídel nesoucí generátor s velmi různorodými poměry, od 1:12 až po 1:200 dle velikosti [49]. Účinnost převodu ozubenými koly je velmi vysoká, 96 % a více. Ztráty energie se projevují formou tepla a **vznikem hluku**. Jsou způsobeny třením ozubených kol [45].

Typická převodovka pro turbínu s výkonem 2 MW je složena z planetového převodu, na níž navazuje paralelní fáze dvoustupňového převodu. Čistota, ideální viskozita mazacího oleje pro vytvoření mezní vrstvy v místech kontaktu povrchů a správné dimenzování ložisek tvoří nejdůležitější činitele převodovky pro vysokou účinnost, nízké emise hluku a dobrou spolehlivost [50].

Z převodovky je mechanický otáčivý pohyb, přibližně 1500 ot/min, veden hřídelem do generátoru, kde je přeměněn na elektrickou energii. Obvykle se tak děje pomocí asynchronního typu generátoru s účinností vyšší než 90 % [45].

### BEZPŘEVODOVÝ POHON GENERÁTORU

Negativní důsledky ztrát energie lze eliminovat použitím mnohápólového synchronního generátoru (Obr. 14). Tzv. **Direct drive** systém neboli technologie přímého pohonu pracuje bez převodového ústrojí, kdy náboj rotoru turbíny je přímo propojen s prstencovým synchronním generátorem [51].

Prstencový generátor s více póly je schopen vyrábět střídavý elektrický proud při jmenovitých otáčkách rotoru. Počet otáček generátoru je eliminován počtem pólů. Pól se skládá z jádra a vinutí (cívky). Počet pólů  $N$  pro frekvenci  $f$  50 Hz střídavého proudu, běžného v evropské elektrické síti, je určen úpravou ze vztahu [52]

$$C_{O_{genmtor}} = 100 \cdot \frac{f}{N} [min^{-1}], \quad (17)$$

kde výrazem  $C_{O_{genmtor}}$  je myšlený počet otáček rotoru generátoru. S přibývajícím počtem pólů klesá rychlost generátoru. Tedy generátoru s 250 póly stačí k fungování pouhých 20 ot/min [52].



Obr. 14 Prstencový multipólový generátor [53]

Systém Direct Drive obsahuje méně rotujících součástí, které se především otáčejí výrazně nižší provozní rychlostí než u turbíny s převodovkou. Vše se v konečném důsledku projeví na [52], [52], [53]:

- nižším mechanickém namáhání a následném opotřebení,
- snížených ztrátách třením a vyšší účinnosti,
- méně časté údržbě a jejich nižších nákladů,
- vyšší životnosti,
- pravděpodobnějším návratu počáteční investice.

## GENERÁTOR

Do rotoru generátoru je přiváděna mechanická energie od rotujícího hřídele a následně převáděna na energii elektrickou principem elektromagnetické indukce. Základní rozdělení generátorů je dle synchronizace otáček rotoru a magnetického pole statoru [54].

### 2.3.4 ROTOR

Tvar, upořádání i počet listů rotoru si prošel značným vývojem, který nemusí být ihned viditelný. Postupně se však dospělo k variantě rotoru se třemi listy. Při čtyřlístém provedení již nevzroste výnos natolik, aby převýšil náklady na čtvrtý list rotoru. A rotor s dvoulistým provedením by se musel otáčet o 22,5 % rychleji než by dosáhl stejného výkonu jako s listem navíc. Vyšší rychlost listů však generuje značný **hluk** a namáhání od odstředivých sil. Listy jsou uloženy v náboji rotoru, kde se nachází systém pro natáčení - *pitch control* [55], [56].

I výroba prošla svojí historií, dříve byly listy vyřezávány především ze dřeva, menší dokonce i z jednoho kusu. Avšak s nárůstem rozměrů začalo být dřevo nevyhovující pro svoji váhu. V dnešní době se konstrukce podobá stavbě křídla letadla a jejímu aerodynamickému tvaru. Velké nároky jsou kladeny na pevnost, houževnatost a odolnost proti namáhání. Lopatka zaznamená více únavových cyklů za pouhý rok než křídlo letadla po dobu své životnosti, proto je nutné ji před instalací pečlivě otestovat (viz Obr. 15) [57].

Materiálem pro výrobu skořepiny listu může být lehká slitina (Al, Mg), častěji se však používají kompozity – laminovaný kompozit ze dřeva, plast vyztužený skleněnými vlákny (FRPs), sklolaminát a také uhlíková vlákna [57].



Obr. 15 Pro zajištění dlouholeté spolehlivosti je list rotoru podroben přísné statické a dynamické zkoušce [58]

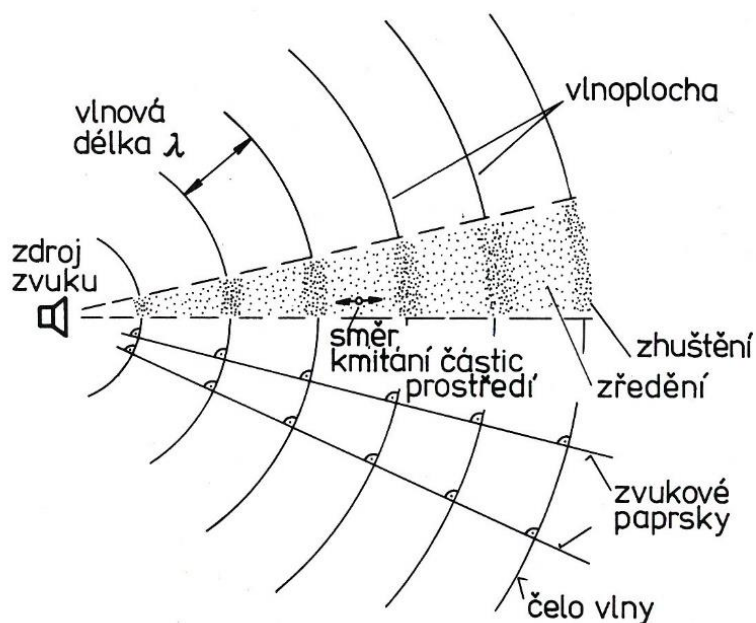
## 3 HLUK PŘI PROVOZU VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY

### 3.1 DEFINICE HLUKU

„Jako **hluk** se označují zvuky, které jsou pro člověka **nežádoucí**, neboť mu způsobují obtíže svými nepříjemnými, rušivými nebo škodlivými účinky, a mají pro něho zdravotní, psychické, společenské i hospodářské důsledky. Za hluk se považuje i běžný hovor, hudební projev apod., což velmi závisí na vztahu osoby k vnímanému zvuku.“ [59]

### 3.2 AKUSTIKA

Jedním z oborů vědního spektra je **akustika**, která se zajímá o zvuk, jeho vznik, šíření v prostoru i čase a vztah k lidskému organismu [60]. Zvuk je definován jako **mechanické vlnění** pružného prostředí určité frekvence. Mechanická energie kmitajících částic se pohybuje rychlostí zvuku od bodového zdroje ve směru zvukového paprsku kolmému k vlnoplochám (viz Obr. 16) [61].



Obr. 16 Šíření zvukové vlny [62]

Podle směru šíření kmitání částic je děleno vlnění na [63]:

- podélné – longitudinální,
- příčné – transverzální.

Zvuk se povětšinou šíří prostředím v podélných vlnách. Výjimkou jsou pevné látky, kde podélné vlny postupují v kombinaci s příčnými vlnami [63].

### 3.2.1 ZÁKLADNÍ VELIČINY V AKUSTICE

**Vlnová délka  $\lambda$  [m]** je vzdálenost jednoho kmitu, lze ji určit podílem rychlosti zvuku  $c$  a frekvence (kmitočtu) vlnění  $f$  [61]

$$\lambda = \frac{c}{f} . \quad (18)$$

Stanovení **rychlosti šíření zvukové vlny  $c$  [m/s]** je odlišné pro prostředí, ve kterém se šíří. V tekutinách platí [61]

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}} , \quad (19)$$

kde  $K$  [Pa] je modul objemové pružnosti kapaliny a  $\rho$  hustota prostředí.

Rychlost šíření zvuku ve vzduchu závisí pouze na teplotě a platí vztah [61]

$$c = 331,6 \cdot \sqrt{1 + \frac{t}{273,1}} . \quad (20)$$

Ve vzduchu o teplotě 20 °C se zvuk šíří rychlostí přibližně 343 m/s, ve vodě bývá i čtyřikrát vyšší, až 1500 m/s, a to z důvodu horší stlačitelnosti vody [63]. Šíření akustického vlnění v pevných látkách je velmi rozmanité a je v něm zahrnuto více faktorů. Aby však vzniklo vlnění v materiálu, musí jeho délka dosahovat nejméně poloviny příslušné vlny [61].

Mezi další akustické veličiny důležité především pro bližší hodnocení zvuku patří:

- akustický tlak,
- akustický výkon,
- akustická intenzita.

Důsledkem zhušťování a zředování kmitajících částic v prostředí se mění tlak. Tato odchylka od barometrického tlaku je dobře popsatelná harmonickou funkcí a nazývá se **akustický tlak**. Lidský sluch je schopen registrovat akustický tlak velkého rozsahu – od 20  $\mu$ Pa do 100 Pa. Hodnoty tlaku jsou však ovlivněny vzdáleností, orientací příjemce od zdroje a teplotním gradientem prostředí [61].

V pružném prostředí se skrze mechanické vlny přenáší mechanická energie. Množství této energie procházející plochou  $S$  za jednotku času popisuje **akustický výkon** [61]

$$P = p \cdot v \cdot S \quad [W] . \quad (21)$$

Směr a množství toku akustické energie v daném místě zobrazuje **akustická intenzita**. Hodnotu tohoto vektoru lze určit průměrem součinu okamžitého akustického tlaku  $p$  a okamžité rychlosti  $v$  za daný časový interval [61]

$$I = p(t) \cdot v(t) \quad [W/m^2] . \quad (22)$$

### HLADINY AKUSTICKÝCH VELIČIN

Mezi akustickými veličinami popisující výkon (akustický tlak, intenzita zvuku, dále i akustická rychlost a akustický výkon) existuje logaritmická závislost, neboť jednotlivé hodnoty se obvykle mění až o několik řádů. Proto byly mezi nimi ustanoveny tzv. **hladiny**, jejichž jednotkou je decibel [dB]. Decibelové stupnice jsou běžně používané v praxi, nutností však je stanovení referenční hodnoty [64].

Jednotlivými definovanými hladinami jsou [64]:

- hladina akustického výkonu  $L_W$  – vlastnost zdroje zvuku (je konstantní)

$$L_W = 10 \cdot \log \frac{W}{W_0} \quad [dB], \quad (23)$$

- hladina akustického tlaku  $L_p$  – účinek, popisuje akustický děj ve sledovaném místě

$$L_p = 20 \cdot \log \frac{p}{p_0} \quad [dB], \quad (24)$$

- hladina intenzity zvuku  $L_I$  – děj pouze v určitém místě

$$L_I = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0} \quad [dB]. \quad (25)$$

Spodní index „0“ u příslušných veličin označuje referenční hodnotu, jejíž stanovení je nutností.

Jestliže má hluk více zdrojů, tak pro skutečnou hladinu akustického tlaku platí [62]:

$$L_c = 10 \cdot \log \left( \sum_{i=1}^n (10^{L_i/10}) \right) \quad [dB]. \quad (26)$$

Výsledná hladina akustického tlaku dvou zdrojů v místě, kde mají stejnou hodnotu akustického tlaku, je o 3 dB vyšší než základní hladina [62].

### 3.2.2 CHARAKTER ZVUKU

Rozlišujeme zvuk [64], [65]

- ustálený – dlouhodobě se měnící v max. rozsahu 5 dB akustického tlaku,
- proměnlivý – kolísavý ve vyšším rozsahu než 5 dB,
- přerušovaný – náhlá změna akustického tlaku.

### 3.2.3 SPEKTRUM ZVUKU

Akustický signál se obvykle skládá hned z několika frekvenčních složek různých amplitud i fází. Pro určení charakteru zvuku se tedy používá zobrazení frekvenčního spektra. Tak je



možné znázornit rozložení amplitud jednotlivých frekvencí (dle frekvenčního kroku) v akustickém signále. Základními spektry jsou [61]:

- diskrétní (čárová),
- spojitá,
- pásmová,
- vícenásobná a další.

V praxi se používají především **třetinooktávová** (popř. oktávová) pásmová spektra. Oktáva je vymezena poměrem krajních frekvencí [61]

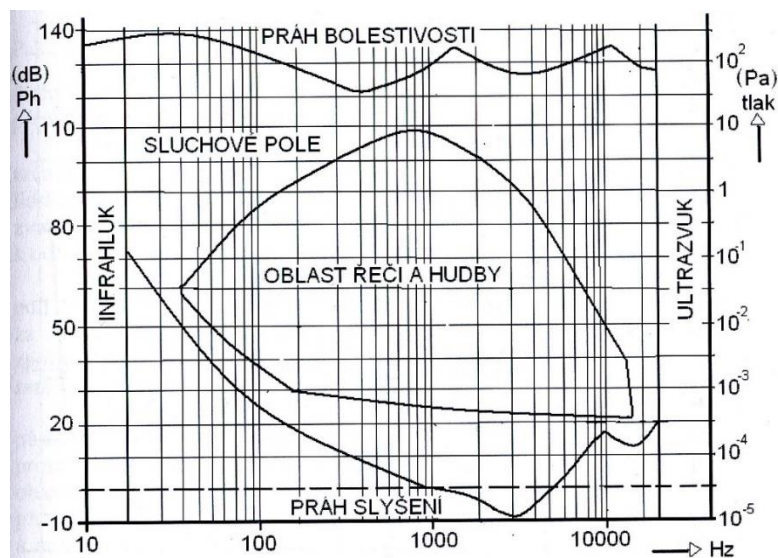
$$\frac{f_2}{f_1} = 2 . \quad (27)$$

Ze vztahu je patrné, že ve vyšších frekvencích jsou však oktávová pásma nevhodná pro svoji šíři. Zde je vhodné využívat úzkopásmová spektra [61].

### 3.2.4 BARVA ZVUKU – ROZDĚLENÍ ZVUKU DLE FREKVENCE

Zvuk lze rozdělit podle frekvence na několik oblastí [60], [66].

- Infrazvuk: 0,1 – 16 (20) Hz.
- Nízkofrekvenční zvuk: 20 – 160 (200) Hz.
- Zvuk středních frekvencí.
- Vysokofrekvenční zvuk: od 8 kHz.
- Ultrazvuk: 20 kHz – 20 MHz a více.



Obr. 17 Sluchové pole [66]

Obr. 17 znázorňuje, že lidský sluch je schopný zaznamenat zvuk ve frekvenčním pásmu od 20 Hz až do 20 000 Hz (20 kHz).

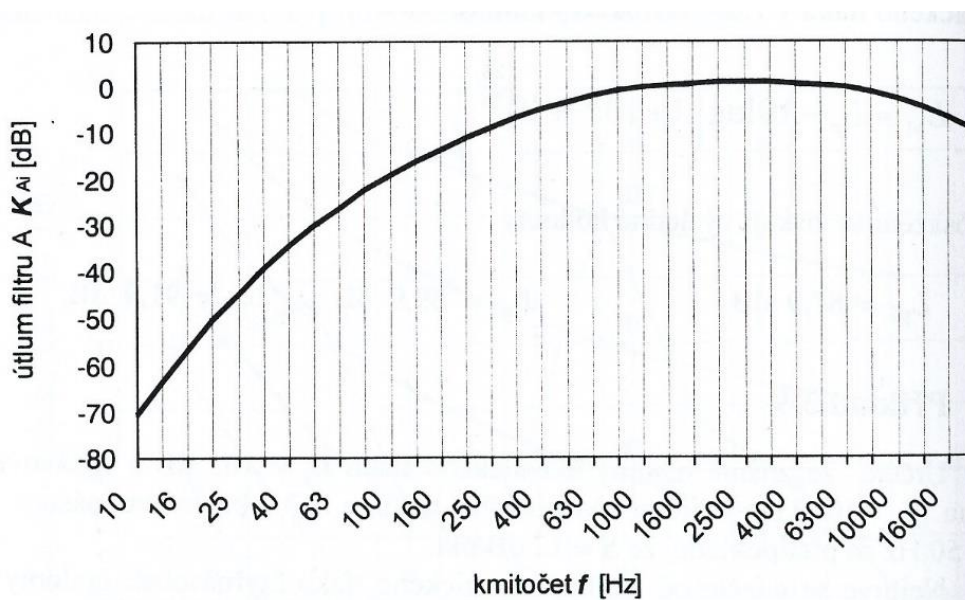
Ultrazvuk, jehož frekvence se pohybují na 20 kHz, se nachází nad slyšitelnou oblastí sluchu. Aplikace těchto vysokých kmitočtů se využívá především v lékařství nebo v nedestruktivních zkouškách materiálu. [66]

Infrazvuk je mechanické vlnění spadající pod slyšitelné pásmo. Hranice se u každého jedince obvykle liší, pohybuje se od 16 do 25 Hz. Přítomnost infrazvuku je v přírodě úplně běžná, např. šum lesa, otřesy země, uvolněná lavina sněhu, protékající voda apod. [66]

### 3.3 ZVUK A LIDSKÝ SLUCH

Zdravý a nepoškozený **lidský sluch** je až neuvěřitelně citlivý, dokáže zaznamenat zvukový signál již při změně akustického tlaku o 20  $\mu\text{Pa}$ . To vyvolá vychýlení membrány sluchového orgánu o hodnotu menší než je průměr atomu (0,1 - 0,5 nm). Avšak sluch je schopen unést tlak i téměř o 6 řádů vyšší. Právě z důvodu velkého rozsahu akustických tlaků byla zavedena příslušná hladina akustického tlaku  $L_p$ , která musí být vztahována k určitému kmitočtu. Referenční akustický tlak  $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$  Pa odpovídá 0 dB. Každému desetinásobnému zvýšení akustického tlaku odpovídá zvýšení hladiny o 20 dB [64], [67].

Člověk jako jedinec vnímá zvuk subjektivně, tedy nedá se říci, že by zvuk o určitých parametrech zaznamenali dva lidé úplně stejně. Každý lidský sluch rozdílně vnímá odlišné frekvence. Proto tedy, aby frekvenční charakter odpovídal alespoň přibližně citlivosti lidského ucha, se akustický signál koriguje ve zvukoměru tzv. **váhovým filtrem A** (viz Obr. 18). Hladina akustického tlaku se poté označuje jako  $L_{pA}$ , kde spodní index A znázorňuje, že hladina je frekvenčně vážená filtrem A [68].



Obr. 18 Váhový filtr A [64]

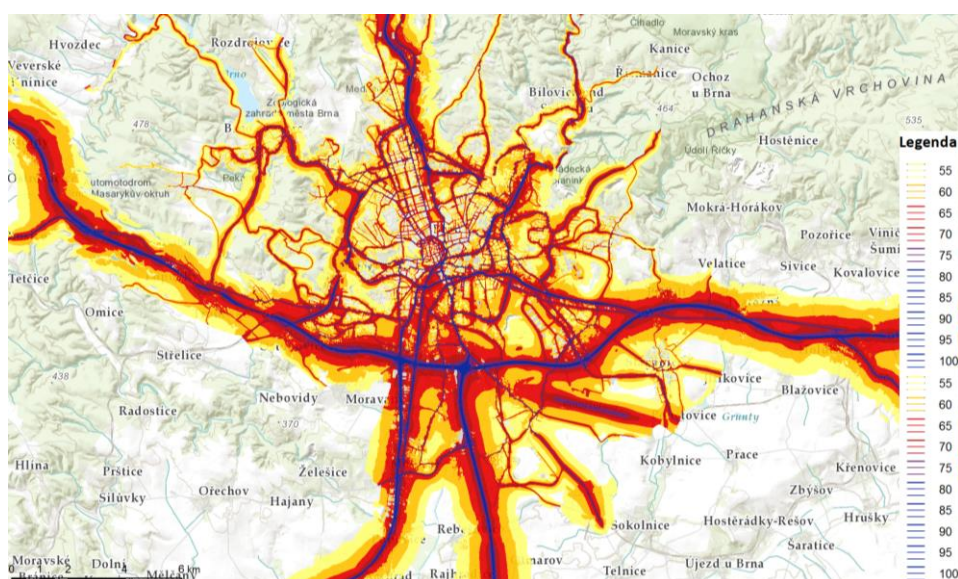
### 3.4 ZDROJ HLUKU

Jak už bylo na počátku kapitoly řečeno, zvuk, který na člověka nepůsobí příjemně a uspokojivě, se nazývá hluk. Zdrojem hluku je akustická energie šířící se od místa vzniku do okolí. Příčinou může být chvění povrchu tělesa, které se pomocí akustických vln přenáší do vzdušného prostředí. Další podstatnou příčinou je nestacionární proudění plynu či kapaliny. To se obvykle děje v místech změn rychlosti proudění nebo objemu, často ale kombinací obou. Příkladem může být chod elektromotoru nebo spalovacího motoru [59].

Dle Státního zdravotního ústavu (SZÚ) zatěžuje naše prostředí hlukem z 60 % mimopracovní prostředí, a to především vlivem dopravy, která má zvláště ve městech (viz Obr. 19) svůj velký podíl (75 – 85 %) [69].

Mezi **hlavní zdroje hluku** tedy patří hluk [69]

- dopravy – především automobilové, dále kolejové a letecké;
- pracovního prostředí – mechanizace, stroje, vzduchotechnika, generátory;
- související s bydlením – provoz domů, činnost obyvatel;
- související s trávením volného času – kultura, sport.



Obr. 19 Hluková mapa města Brna - rok 2017 [70]

### 3.5 ŠÍŘENÍ HLUKU

Zvuková vlna se šíří od místa vzniku vzduchem jako médiem, které ho obklopuje, může se však dále šířit i prostřednictvím prvků spojených s tímto objektem a uvolnit se do okolí v místě vzdáleném od zdroje [59].

Konstrukce může šíření hluku značně ovlivnit. Snahou je zvukovou vlnu dobře přenášet a cestou ji podstatně ztlumit, aby se k místu uvolnění dostala s nejmenší intenzitou. Svým podílem k tomu může podstatně přispět i použitý materiál a jeho schopnost tlumit chvění [59].

### 3.5.1 ŠÍŘENÍ A ABSORPCE HLUKU VE VZDUCHU

Intenzitu a šíření hluku výrazně ovlivňuje atmosféra, která část zvuku absorbuje. Tato absorpce bývá lepší při vyšších teplotách, naopak negativně ji ovlivňuje vyšší relativní vlhkost vzduchu. Akustická vlna však často narazí do prostředí nebo překážek jiné hustoty, kde je částečně pohlcena a přemění se na jiný druh energie a částečně se odráží. Jednou z vlastností šíření zvuku je i ohyb za překážkou, tzv. difrakce. Za hranou se sice vytváří částečný akustický stín, přesto vlna postupuje dál [61].

### 3.5.2 ŠÍŘENÍ HLUKU VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN

Provozní hluk větrné elektrárny je přenášen do okolí skrze konstrukci nebo proudícím médiem, tedy vzduchem. Proto lze tyto cesty rozdělit na [71]:

- **přímé** – od zdroje přímo do okolí,
- **nepřímé** – od zdroje přes konstrukční a doprovodné prvky (součásti úchytů, kryty, plášť gondoly apod.) do okolí.

## 3.6 PŘÍČINA HLUKU VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN

Tím, že se výroba energie prostřednictvím větrných elektráren řadí mezi obnovitelné zdroje, předpokládá se, že má i minimální, ideálně žádné jiné negativní dopady na stav životního prostředí. Přesto však je nutné posuzovat jisté faktory, které s provozem větrné turbíny souvisejí. Mimo zřetelný hluk jsou jimi také jisté vlivy na [72]:

- krajinný ráz,
- faunu, flóru, ekosystémy,
- povrchové a podzemní vody.

Pokud je větrná elektrárna v činnosti, emituje do okolí **hluk**. Pro správné pochopení příčin tohoto jevu, je nutné rozdělit hluk do dvou kategorií [29]:

- mechanický hluk,
- aerodynamický hluk.

**Mechanický hluk** způsobují [73]:

- převodové ústrojí,
- generátor (s ventilátorem),
- systém natáčení gondoly a listů rotoru,
- brzda.

Pokud je součástí turbíny převodovka, tak její chod je dominantní původce mechanického hluku. Příčinami jsou postupný záběr boků zubů, deformace v důsledku nepřesností v ozubení a také v uložení převodů. To vše lze částečně eliminovat nahrazením ozubených kol s přímými zuby za kola se šikmými zuby (Obr. 20). Plynulejší záběr a tím výrazně

**méně hlučný chod** je zajištěn vyšším průměrným počtem párů zubů, které jsou současně v záběru. To určuje tzv. součinitel záběru  $\varepsilon_\gamma$ , u ozubení s šikmými zuby obvykle s hodnotou  $\varepsilon_\gamma > 2$ . Ještě méně hlučný chod je typický pro planetový převod. Zde je však nutno zajistit vyvážení vnějšího prstence ke skříni převodovky, a to konkrétně pružným uchycením. Jinak by hrozilo šíření hluku skrze skříň a tím i možný nárůst jeho intenzity [56], [74].



Obr. 20 Převodovka větrné elektrárny s planetovým a dvoustupňovým čelním převodem ozubenými koly se šikmým ozubením [75]

Kryt generátoru mimo ochranu před pronikáním vlhkosti zajišťuje také odhlučnění, to může být dále posíleno chlazením generátoru kapalinou [56].

Postupné úpravy a zvyšující se kvalita jednotlivých mechanických částí stroje větrné elektrárny vedou k stále lepšímu útlumu hluku. V dnešní době už není mechanický hluk nijak výrazný, jeho hladiny jsou pod úrovní aerodynamického hluku, a proto se téměř zanedbává [35].

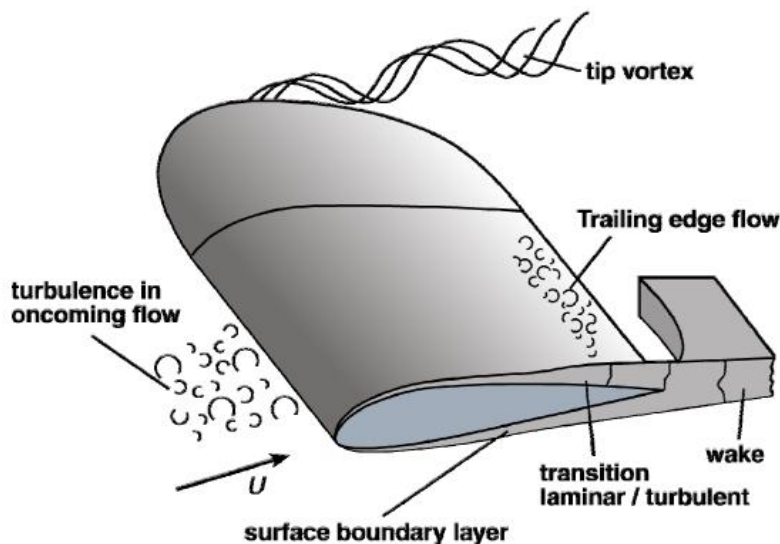
**Aerodynamický hluk** je vydáván otáčejícími se listy rotoru, změnou rychlosti větru, turbulencemi a obtékáním povrchů listů [71].

Při obtékání listu se na povrchu z důvodu viskozity (tření) vytváří tenká vrstva nazývaná jako **mezní vrstva** (*surface boundary layer* – viz Obr. 21). Na povrchu listu proudění ulpívá, rychlost je zde nulová, zatímco na hraně mezní vrstvy je stejná jako rychlost nenarušeného toku. Struktura mezní vrstvy je závislá na hodnotě Reynoldsova čísla  $Re$ , které na odtokové hraně dosahuje hodnot několika milionů. Dle tohoto čísla je možné určit laminární nebo turbulentní charakter. Jednotlivé vrstvy jsou v laminární mezní vrstvě organizovány, zatímco v turbulentní mezní vrstvě tvoří chaotické uspořádání velké množství vírů [30], [76].

A nyní bude uveden bližší rozbor potenciálních akustických zdrojů hluku [76], [77].

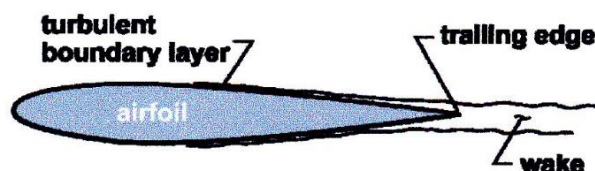
- *Inflow turbulence noise* (přítoková turbulence): je vzájemné působení povrchu listu rotoru s víry proudění na přítokové hraně (*turbulence in oncoming flow* – viz Obr. 21). Turbulence jsou způsobené atmosférickou mezní vrstvou či vlněním od dalších turbín, které jsou v blízkosti. Hluk je závislý na atmosférických podmínkách a není ještě vyřešeno, jak moc se podílí na celkové hladině hluku.

- *Tip noise* (hluk špičky listu): je vzájemné působení turbulentního proudění s hranou na špičce lopatky. Přejít proud z oblasti přetlakové na spodní straně do podtlakové na vrchní straně je příčinou indukovaného odporu, jehož důsledkem vznikají na špičce listu rozběhové víry (*tip vortex* – viz Obr. 21). Hluk je ovlivněn silou vírů a štíhlostí listu. Má vysokofrekvenční charakter a může podstatně přispět k hlučnosti.



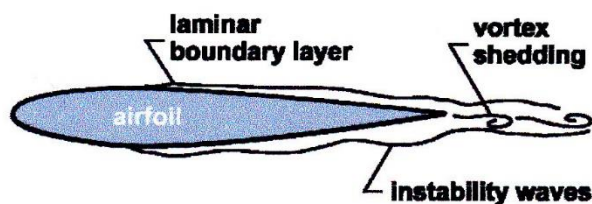
Obr. 21 Proudění podél listu rotoru větrné turbíny [76]

- *Turbulent boundary layer trailing edge noise* (hluk turbulentní mezní vrstvy na odtokové hraně): představuje vzájemné působení turbulentní mezní vrstvy s odtokovou hranou (*trailing edge flow* – viz Obr. 22). Vzniká širokopásmový hluk nižších frekvencí. U moderních turbín je významný.



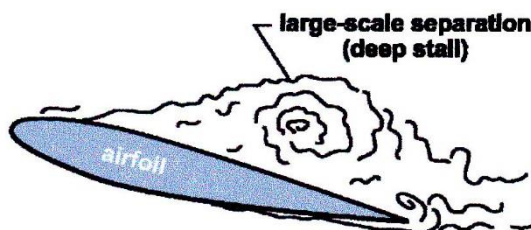
Obr. 22 Turbulent boundary layer trailing edge noise (hluk turbulentní mezní vrstvy na odtokové hraně) [76]

- *Laminar boundary layer vortex shedding noise* (hluk laminární mezní vrstvy při šíření víru): pokud je Reynoldsovo číslo nižší, může se i na odtokové hraně vyskytovat laminární mezní vrstva. Při přítomnosti protisměrného hluku ze zadní strany vzniká nestabilita mezní vrstvy, či přechod od laminární na turbulentní (*transition laminar/turbulent* – viz Obr. 23). Dochází tak ke zpětné vazbě a emitaci tónového hluku vyšších frekvencí (hvízdání). Týká se to především malých větrných turbín.



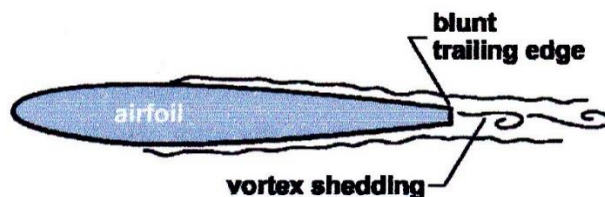
Obr. 23 Laminar boundary layer vortex shedding noise (hluk laminární mezní vrstvy při šíření víru) [76]

- *Separation stall noise* (hluk odtržené mezní vrstvy – Obr. 24): pokud se zvyšuje úhel náběhu, na podtlakové straně se odtrhne mezní vrstva a vytváří se velký vír. Hluk je nízkých frekvencí a významný při velkém úhlu záběru.



Obr. 24 Separation stall noise (hluk odtržené mezní vrstvy) [76]

- *Blunt trailing edge noise* (hluk tupé odtokové hrany – Obr. 25): nastává při špatné konstrukci listu, kdy tloušťka odtokové hrany dosahuje nadkritické hodnoty. Víř uvolněný z odtokové hrany způsobuje tónový hluk středních a vyšších kmitočtů.



Obr. 25 Blunt trailing edge noise (hluk tupé odtokové hrany) [76]

Proudící vzduch je tedy ve vzájemném působení s povrchem pohybujícího se rotoru [73]. Vyšší hladiny hluku na špičce listu způsobuje i fakt, že je zde rychlost dramaticky vyšší než rychlost otáčení v blízkosti náboje. Proto se limit rychlosti obecně pohybuje na špičce listu mezi 65 – 70 m/s [56], [57].

Snahou všech techniků pohybujících se okolo výstavby nových větrných elektráren je co nejvíce eliminovat provozní hluk a jeho dopady na okolí. Klíčem jsou dokonalejší technická řešení, jejichž zásluhami bylo možné již hluk z počátků nové éry větrných turbín let 80. a 90. výrazně zredukovat.

## 3.7 MĚŘENÍ A ANALÝZA HLUKU VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN

### 3.7.1 MĚŘENÍ V TERÉNU

Měření hladiny hluku je prováděno pomocí zvukoměru. Toto elektrické zařízení vnímá zvuk podobně jako lidský sluchový aparát. Provedení zvukoměrů se liší především dle daného výrobce. Základní obsah však mají všechny stejný – mikrofon (snímač akustického tlaku), zařízení pro zpracování signálu (zesilovač, vstupní a váhové filtry, A/D převodník, detektor hodnot apod.) a indikační zařízení [78].

Metodika měření hluku větrných elektráren pro Českou republiku je sepsána v **platné normě ČSN EN 61400-11, ed. 3**. Mezinárodně platí IEC 61400-11. Ke každému měření je však nutné přistupovat individuálně, tedy nelze se vždy řídit dle normy, ale je nutné normu srovnávat s již nabytými technickými zkušenostmi.

V první řadě jsou rozmístěny snímače (mikrofony), které jsou uchyceny na středu dřevěné odrazové desky a propojeny kabelem se zvukoměrem. Rozmístění probíhá obvykle na závětrné straně, tj. na straně, kde vítr od větrné turbíny odchází, a to obvykle ve třech nebo čtyřech vzdálenostech (viz Obr. 26). První referenční místo (1) se nachází od stožáru ve vzdálenosti, která odpovídá výšce, kde se vyskytuje osa rotoru nad zemí plus poloměr rotoru. Další zvukoměry jsou obvykle dvojnásobně a trojnásobně dále. Snímač může být také umístěn o 60° na západ a o 60° na východ od referenčního místa 1. Obvykle bývá ještě jeden na návětrné straně. Ideální situace nastává, pokud je vítr otočen k nejbližší zástavbě a měření se provádí tímto směrem. Poté je optimální měřit hluk i v blízkém chráněném vnitřním prostoru, tj. obydlí domě.



*Obr. 26 Rozmístění snímačů akustického tlaku na závětrné straně větrné elektrárny (autor fotografie: Aleš Jirásk z NRL pro komunální hluk)*



Měření hladiny akustického tlaku může probíhat podle nové normy ed. 3 v 10 sekundových intervalech (dle staré v minutových). Tím se však navyšuje počet datových dvojic na šestinásobek a počet hodnocených intervalů rychlosti větru po 0,5 m/s (dle staré normy po 1 m/s).

Konkrétní měření se skládá z 2 (3) stavů:

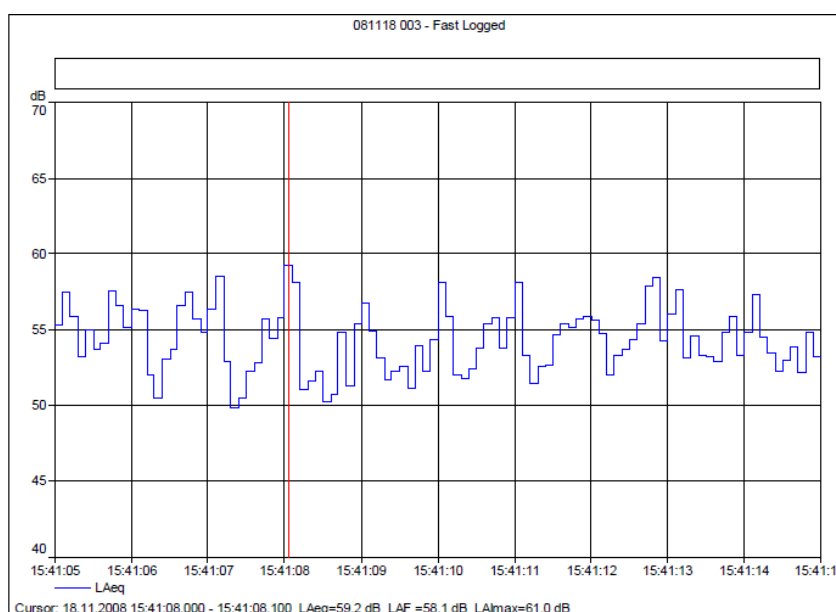
- 1. stav - měření hluku pozadí (turbína nepracuje),
- 2. stav - měření hluku za provozu turbíny,
- 3. stav - měření hluku za provozu všech turbín (pokud je v oblasti více turbín).

Jeden stav probíhá minimálně 30 min, obvykle však 1 hod. V patě tubusu, kde se nachází řídicí systém elektrárny, jsou zároveň s měřením zaznamenávána ručně data o rychlosti větru na gondole elektrárny. Hodnoty rychlosti větru bývají poměrně variabilní, a to přibližně od 4,5 do 12,5 m/s.

Nezbytné je, aby terénní měření probíhalo za vhodných meteorologických podmínek. Nevhodné počasí pro měření je inverzní a deštivé. Ideálním časem je podzim, období zimy bez sněhu a jaro, kdy nejsou olistěny stromy a obecně není měření příliš narušováno okolními přírodními vlivy (např. zpívajícími ptáky).

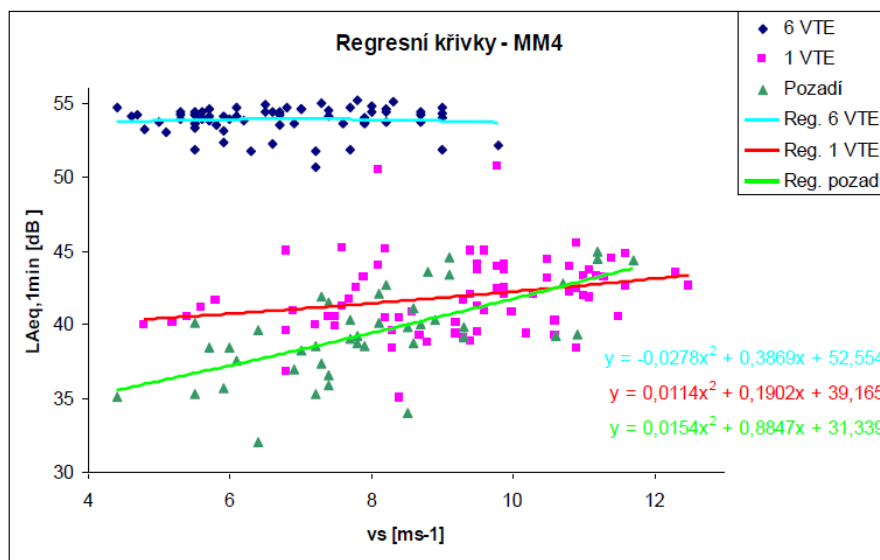
### 3.7.2 ANALÝZA MĚŘENÍ

Během měření jsou zaznamenávány veškeré vnější akustické události, např. zpěv ptáků, zvuky dopravy (silniční provoz, traktory, průlet letadla), lesů nebo vodních toků. To vše by výrazně ovlivnilo následné vyhodnocení, proto je třeba během analýzy narušené intervaly odstranit. To je možné pomocí sledování hladiny akustického tlaku v čase (viz Obr. 27), nebo v případných nejasnostech přehráním zvukového záznamu.



Obr. 27 Časový záznam akustického tlaku ve vzdálenosti 120 m od větrné elektrárny [79]

Data jsou přenesena do výpočetní techniky (PC) ze zvukoměru pomocí SD karty a následná analýza je prováděna příslušným statistickým softwarem (např. QCExpert). Pro předložení výsledků závislosti hladiny hluku na rychlosti větru v oblasti gondoly je výhodné využít regresní závislost polynomu 2. stupně (viz Obr. 28) [80].



Obr. 28 Závislost ekvivalentní hladiny akustického tlaku na rychlosti větru vyjádřené pomocí regresních křivek (zelená - bez provozu turbín, červená - 1 turbína v provozu, modrá - 6 turbín v provozu) [80]

### 3.7.3 HLUKOVÉ LIMITY

Určujícím ukazatelem hlukové zátěže je hodnota ekvivalentní hladiny akustického tlaku  $L_{Aeq,T}$ . Tato hladina slouží k hodnocení proměnlivého akustického signálu, je vážená filtrem A a vztažena k určitému sledovanému časovému úseku (viz Obr. 29). Dochází tedy k nahrazení neustálené hodnoty hladiny akustického tlaku hodnotou ustálenou. Nedostatkem však je skutečnost, že nijak nejsou popsány hlukové extrémy (MAX, MIN), které mohou být důležitým aspektem hlukové zátěže [64].



Obr. 29 Ekvivalentní hladina akustického tlaku [66]

Limity hluku jsou obvykle rozděleny na denní a noční dobu. Ačkoliv se limity v jednotlivých státech liší, jsou obvykle odvozeny s ohledem na doporučení Světové zdravotnické organizace (WHO) [77]. V České republice aktuálně platí limity dle zákona č. 272/2011 Sb., o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací [65].

Pro posuzování hluku větrných elektráren jsou podstatné především noční limity, které jsou stanoveny pro nejhluchnější noční hodinu. V ČR platí [81]:

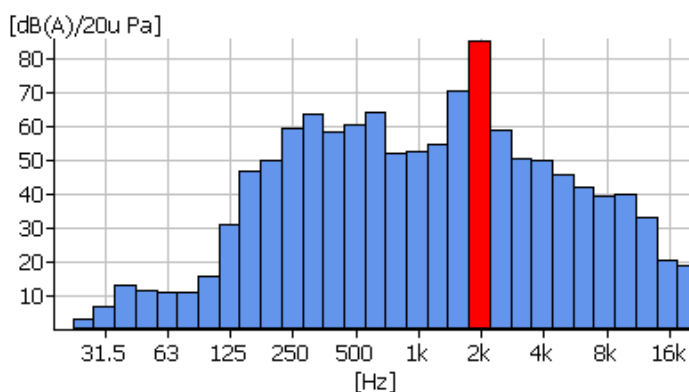
- $L_{Aeq,1h} = 40 \text{ dB}$  v chráněném venkovním prostoru staveb,
- $L_{Aeq,1h} = 30 \text{ dB}$  v chráněném vnitřním prostoru staveb.

### 3.7.4 TÓNOVÁ SLOŽKA HLUKU

V případě posuzování hluku je nutné rozlišovat hluk

- tónový,
- netónový.

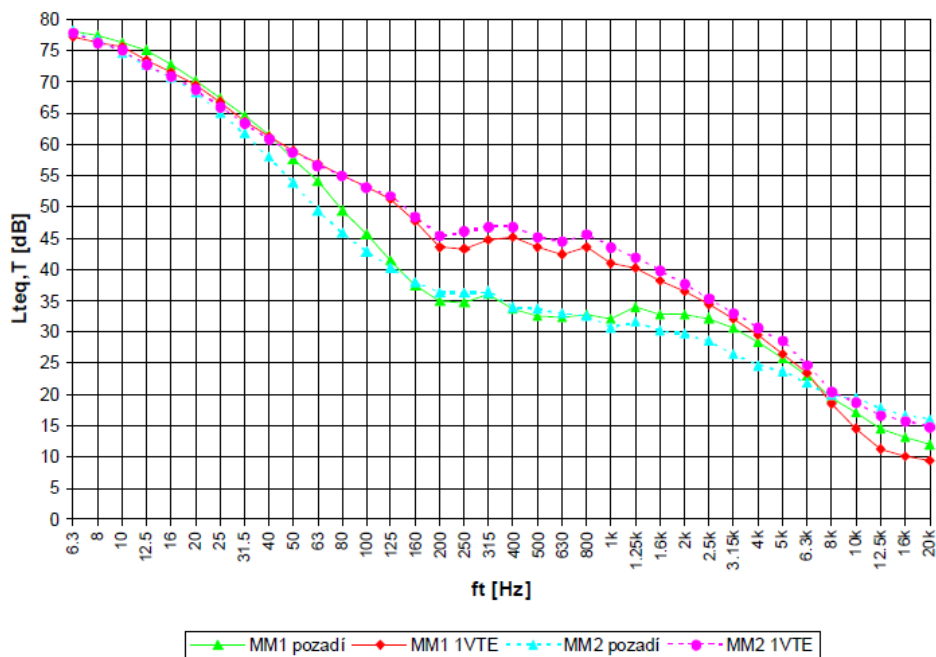
Hlukem s tónovou složkou (viz Obr. 30) je míněn hluk, „v jehož kmitočtovém spektru je hladina akustického tlaku v třetinooktávovém pásmu, případně i ve dvou bezprostředně sousedících třetinooktávových pásmech, o více než 5 dB vyšší než hladiny akustického tlaku v obou sousedních třetinooktávových pásmech.“ [65]



Obr. 30 Třetinooktávové spektrum hluku s tónovou složkou (vyznačenou červeně) [82]

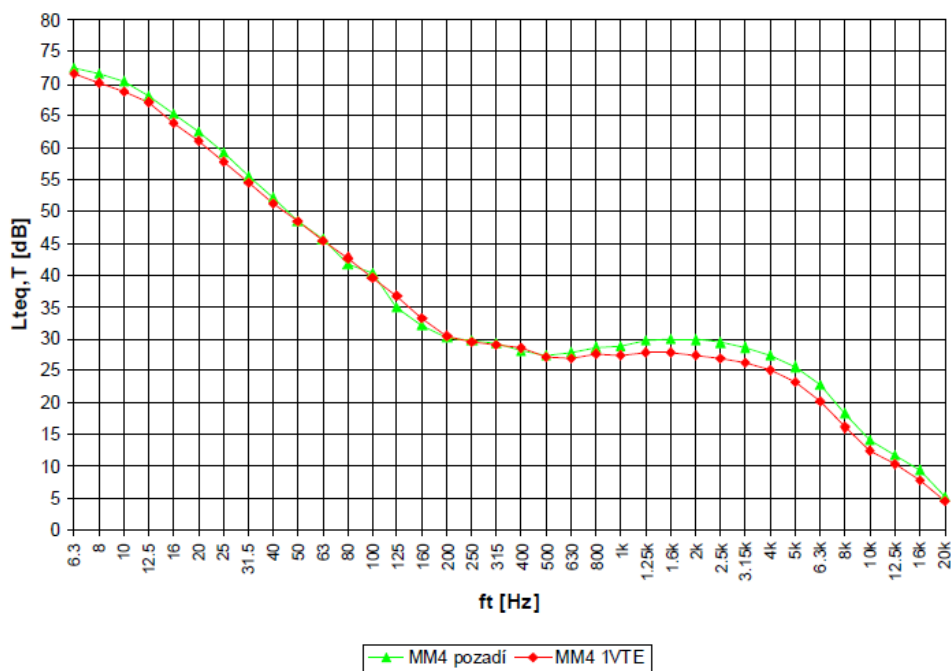
### 3.7.5 INFRAZVUK A NÍZKOFREKVENČNÍ HLUK

Hranici mezi infrazvukem a nízkofrekvenčním zvukem nelze přesně číselně stanovit, pohybuje se však okolo 20 Hz. Infrazvuk se považuje za neslyšitelný, avšak při vysokých hladinách může být částečně vnímatelný. [77]



Obr. 31 Třetinooktávové spektrum větrné elektrárny s výkonem 2 MW ve vzdálenosti 119 m [79]

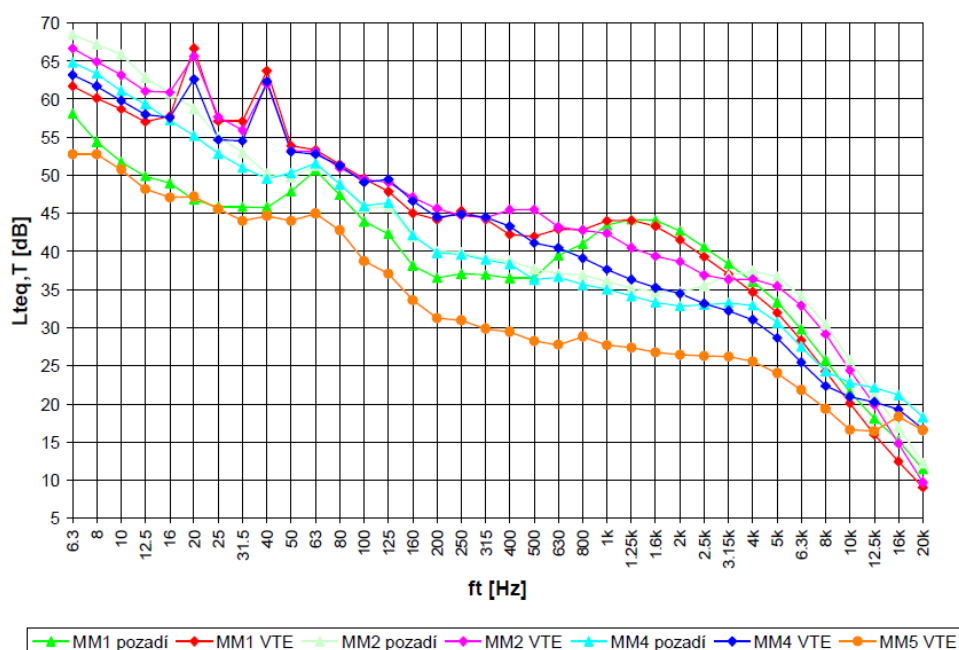
Jeden z příkladů měření hluku moderní větrné elektrárny s výkonem 2 MW na Obr. 31 dokládá, že ve vzdálenosti 119 m na závětrné i návětrné straně se hluk turbíny při provozu neliší od hluku pozadí do 50 Hz, tedy převládá přirozený hluk prostředí. Rozdíly jsou zřejmě spíše až v oblasti středních kmitočtů (80 – 2000 Hz). Vyšší hladiny hluku jsou patrné v oblastech nízkých frekvencí. Spektrum není váženo filtrem A.



Obr. 32 Třetinooktávové spektrum větrné elektrárny s výkonem 2 MW ve vzdálenosti 1150 m [79]

Z dalšího záznamu na Obr. 32 je konkrétně vidět, že ve vzdálenosti větší než 1 km na závětrné straně elektrárny se hluk při provozu turbíny téměř neliší od hluku pozadí.

Při posuzování infrazvuku a nízkofrekvenčního hluku je třeba poukázat na to, že se hluk velmi liší podle toho, zda obsahuje tónovou složku nebo nikoliv. Standardním stavem provozu větrné elektrárny je hluk bez tónové složky. Tento hluk poté všeobecně není rušivý, neboť lidský sluch jej neodliší od běžných zvuků v přírodě (šum lesa, vítr, tekoucí voda). Pokud však provoz tónovou složku obsahuje (viz Obr. 33), znamená to, že chod větrné elektrárny není v pořádku (obvykle to lze přiřadit mechanické poruše). Zde se může stát pro člověka blízký chod a hluk větrné turbíny nepříjemným a rušivým. V tomto případě by tedy posouzení hluku ekvivalentní hladinou akustického tlaku  $L_{Aeq,T}$  bylo nesprávné.



Obr. 33 Třetinooktávové spektrum větrné elektrárny s tónovým nízkofrekvenčním hlukem při provozu (16-25 Hz a 31,5 - 50 Hz) [79]

## 4 HLUK A ZDRAVÍ ČLOVĚKA

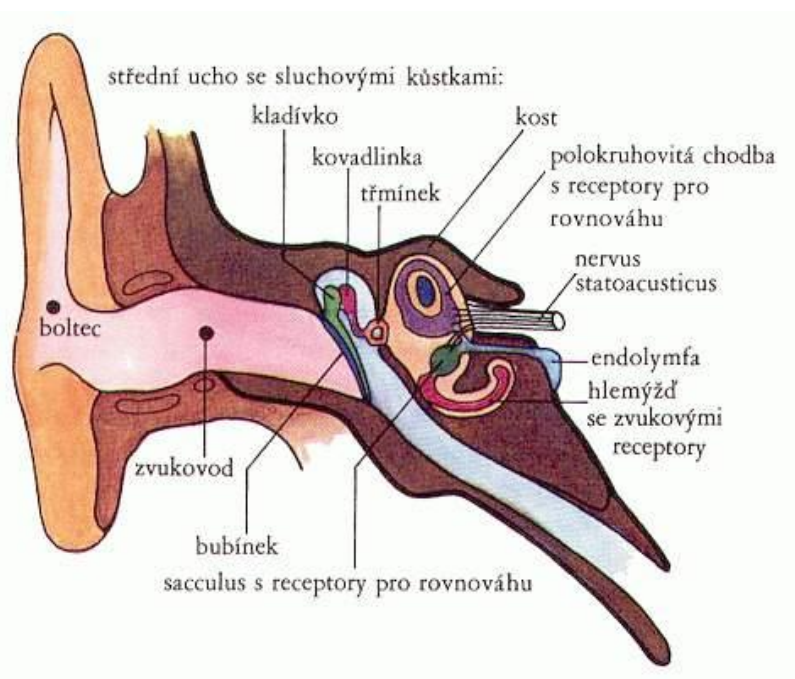
### 4.1 SUBJEKTIVNÍ VJEM ZVUKU – LIDSKÝ SLUCH

Fyzikální akustika umožňuje měřit a hodnotit zvukovou energii objektivně. Je však nutné rozlišovat i jiný podstatný náhled, a to jak je zvuk analyzován lidským sluchovým aparátem. **Fyziologická akustika** vyhodnocuje zvuk skrze subjektivní dojmy člověka, mezi které patří výška tónu, hlasitost a barva zvuku. Tyto vlastnosti jsou však závislé na fyzikálních veličinách – frekvenci, amplitudě, dynamice, časovém průběhu a dalších [60], [62].

Lidské ucho reaguje na akustický tlak a je citlivé především na frekvenci zvukových vln. Extrémy frekvence vnímatelného zvuku se u každého člověka liší. Obvykle je však spodní hranice slyšitelnosti 20 Hz a horní 20 kHz. Horní hranice postupem života značně klesá [66].

### 4.2 SLUCHOVÉ ÚSTROJÍ

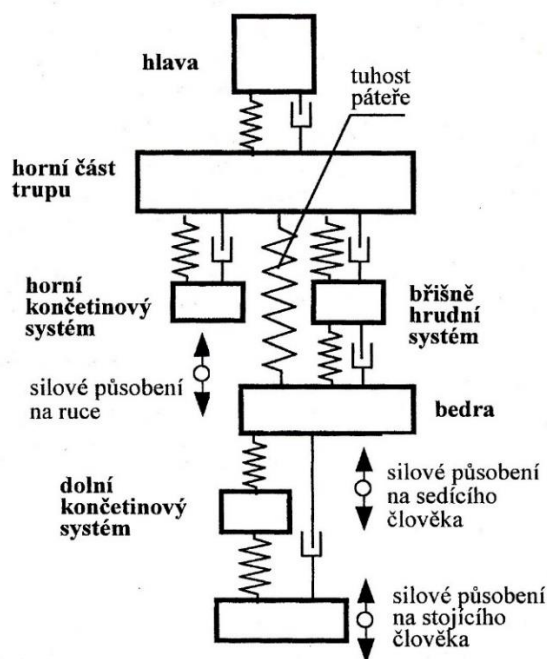
Zvukové vlny jsou z vnějšího prostředí zachyceny boltcem a poté procházejí zvukovodem do vnitřního ústrojí ucha zobrazeného na Obr. 34. Boltcec jako rezonátor výrazně navyšuje intenzitu zvuku v rozmezí frekvencí 3 – 4 kHz. Zvuková vlna se tedy dostává do střední části ucha, rozkmitá bubínek a dále pokračuje přes kůstky středního ucha (kladívko, kovádlínka, třmínek), kde se amplituda kmitů zmenšuje. Cílem se stává membrána *basialis* v oblasti vnitřního ucha, na které leží Cortiho ústrojí s jemnými vláčky sluchového nervu. To vše se nachází v dutině hlemýždě. Informace poté proudí skrze vláčka do centrálního nervové soustavy k vyhodnocení. Tak je přenesena asi tisícinu akustické energie, kterou na počátku obdrží ušní bubínek [66].



Obr. 34 Stavba lidského sluchového ústrojí [83]

### 4.3 VLIV VIBRACÍ A HLUKU NA ČLOVĚKA

Lidský organismus nemá přímý smyslový orgán pro vnímání mechanického kmitání. Přesto zasahuje kmitání různé orgány, záleží však na frekvenci a amplitudě. Celé lidské tělo je mechanickou soustavou s více stupni volnosti (viz Obr. 35), kdy působením vibrací na tělo dochází k jeho dynamickému namáhání [61].



Obr. 35 Mechanický model lidského těla [61]

Škodlivě na člověka působí i hluk jako doprovodný prvek vibrací. Hluk je nežádoucí, neboť je člověku nepříjemný. Sluchový aparát se hluku dokáže poměrně rychle přizpůsobit a vnímat jej s nižší intenzitou. Dlouhodobý pobyt v prostředí s hladinou akustického tlaku přesahující 85 dB se považuje pro sluch jako **škodlivé** [66]. Jak již bylo řečeno, zvuk je pro člověka slyšitelný v určitém frekvenčním pásmu (20 Hz – 20 kHz). Neznamená to však, že organismus nižší nebo vyšší frekvence (nezaznamenané sluchovým ústrojím) nevnímá. Vlastní frekvence jednotlivých částí lidského těla dosahují nízkých hodnot. Současné výzkumy se tedy zabývají otázkou, zda by mohlo dojít k poškození funkce organismu vlivem rezonancí nízkých frekvencí [84].

### 4.4 MOŽNÉ ZDRAVOTNÍ POTÍŽE ZPŮSOBENÉ HLUKEM

Sluchový proces je pro člověka nesmírně důležitý. Je přímo nezbytný pro komunikaci a život ve společnosti, a to z hlediska analyzování akustického signálu. A protože **lidský organismus** není schopen eliminovat hluk, ten se může stát škodlivým pro lidské zdraví. Mohou se dostavit následky jako poškození sluchu, narušení spánku, kardiovaskulární poruchy, psychofyziologická onemocnění ve formě psychiatrických příznaků a další [85].

Hluk je jeden z nejčastějších okolních faktorů, který vedle tlaku v zaměstnání a současného životního stylu, vede ke snižování kvality a kvantity spánku. A právě dlouhodobá porucha

spánku vede na negativní zdravotní účinky – kardiovaskulární problémy, poruchy imunitního systému nebo dále změny nálad a paměti [86], [87].

Obecně lze **účinky hluku** na člověka členit na [88]:

- specifické sluchové,
- nespecifické mimosluchové.

#### 4.4.1 SPECIFICKÉ SLUCHOVÉ ÚČINKY

V prvním případě, zcela zřetelném, může hluk poškodit přímo sluch člověka. A to při krátkodobém vystavení vysokým hladinám hluku (více než 130 dB) nebo dlouhodobému výskytu při hladinách nad 85 dB (není však úplně vyloučeno, že i při nižších). V důsledku vystavování se dlouhodobě akustické energii může být mechanicky poškozeno ústrojí vnitřního ucha (dochází ke změnám v hlemýždi - Cortiho orgán, bazilární membrána). Děje se tak bezbolestně přímo v průběhu působení hluku a tento proces je obecně označován jako **sluchové trauma**. Případná prudká změna akustického tlaku poškodí obvykle oblast středního ucha (bubínek, kůstky), což bývá velmi bolestivé [60].

Během života jedince zcela přirozeně ubývá buněčné populace sluchového smyslu, dochází k **atrofii sluchových buněk**. Především se tak děje v místech dutiny hlemýžďe, kde se vyhodnocují vysoké frekvence. Proto se postupem let snižuje horní hranice slyšitelných frekvencí [89].

#### 4.4.2 NESPECIFICKÉ MIMOSLUCHOVÉ ÚČINKY

Nespecifické účinky se projevují v celém rozsahu hlukové zátěže. Ovlivňují nepříznivě nervové funkce, motoriku i koordinaci, a rovněž emocionální rovnováhu. Na psychologickou stránku člověka má dopad především **obtěžování hlukem**. Existuje určitá hranice tolerance k rušivému zvuku, která výrazně souvisí s osobností jedince [60], [88].

### 4.5 VLIV HLUKU VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN NA LIDSKÉ ZDRAVÍ

Dle zprávy WHO (Světové zdravotnické organizace) hluk emitovaný při provozu větrných turbín **nemá nepříznivé účinky** na lidské zdraví, pokud se pohybuje pod doporučenými limity. WHO doporučuje průměrné denní expozice hluku větrných turbín pro člověka pod 45 dB [90]. Limity platí pro dlouhodobý pohyb v oblasti a předpokládá se, že krátkodobé překročení nemá za následek poškození organismu [72].

Při posuzování zdravotních rizik a jejich závažnosti je nutné postupovat **individuálně**, neboť konkrétní případy závisí vždy na místních podmínkách (vzdálenost od obydlí, počet turbín apod.). Dále je potřebné si uvědomit, že vliv obtěžování hlukem v blízkosti větrné elektrárny není zapříčiněn pouze provozem tohoto energetického zařízení. Působí zde i faktory týkající se příjemce hluku (tolerance, psychický stav, celkový postoj k provozu větrné elektrárny), v neposlední řadě také faktory lokality a prostředí (tvar terénu, vzdálenost obydlí, hluk pozadí atd.) [91].



## ZÁVĚR

Zkušenosti nasbírané během vývoje větrných elektráren jsou už tak významné, že se podařilo provozní hluk výrazně eliminovat. Lze tedy vyjádřit fakt, že hluk větrných turbín je v současnosti nízký. Větrná elektrárna může obtěžovat především v případě, kdy se při provozu vyskytuje tónová složka hluku, což je zjištělné z třetinooktávového spektra. Byl tedy nastaven systém posuzování větrných elektráren tak, že součástí povolovacího řízení je hluková studie, která teoreticky ověří, zda jsou v lokalitě dodrženy limity hluku. Následně se podle výsledků hlukové studie zpravidla provede praktické ověření měřením. Neměla by tedy nastat situace, že je postavena větrná elektrárna, která bude překračovat limity hluku a někoho obtěžovat.

Z měření je patrné, že hladiny akustického tlaku dosahují vyšších hodnot v oblasti nízkých frekvencí, které jsou způsobeny především hlukem pozadí. Vlnová délka nízkofrekvenčního zvuku dosahuje velkých rozměrů, proto je pro něj snazší proniknout překážkami (např. zdmi domu). Jelikož vyšší frekvence hluku jsou překážkami více tlumeny, může nízkofrekvenční hluk na citlivé ucho působit zdánlivě vyšší intenzitou uvnitř objektu, který se nachází v blízkosti zdroje mechanického vlnění.

Činnost větrných elektráren může negativně ovlivňovat jedince především z hlediska obtěžování hlukem a rušení spánku. Hygienický limit nepředstavuje absolutní práh ochrany zdraví, neboť nelze určit přesnou hranici poškození a nepoškození lidského organismu. Pokud však jsou limity dodržovány, není přímo dokázáno, že hluk způsobuje nějaké negativní zdravotní účinky.

Sluch patří k jednomu z nejcitlivějších smyslů lidského organismu. Přesto lze sluchový vjem jen těžko objektivně hodnotit. Pro život člověka má však takový význam, že je nutné jej chránit před poškozením.

U moderních větrných elektráren je již mechanický hluk strojovny nepodstatný, vyšší hladiny akustického tlaku se vyskytují jen v případě poruchy. Momentální snahou výrobců je především snížení aerodynamické složky hluku, která může za určitých okolností působit rušivým dojmem. Lze však říci, že hluk větrných elektráren je v absolutním měřítku problémem malého rozsahu.

Současná měření dokazují, že větrné elektrárny vyhovují přísným hlukovým limitům. Obtěžování hlukem je ryze subjektivní záležitostí výrazně závislou na toleranci a aktuálním psychickém rozpoložení jedince. Negativní dopady provozního hluku větrných elektráren na člověka přesto nelze plně vyloučit, neboť současné závěry mohou být v budoucnosti zpochybněny novými poznatky.

## POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] ŠEFTER, Jakov Iosifovič. *Využití energie větru*. 1. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1991. ISBN 80-03-00616-3.
- [2] KRÁLOVÁ, Magda. Tlak vzduchu. *Eduportál Techmania Science Center* [online]. Plzeň: Techmania Science Center o.p.s., b.r. [cit. 2019-02-19]. Dostupné z: <https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/meteorologie/tlak-vzduchu>
- [3] DAUPHIN, Lauren. Cyclones Luban and Titli. In: *NASA Earth Observatory* [online]. Washington D.C.: NASA Earth Observatory, 2018 [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <https://earthobservatory.nasa.gov/images/92877/cyclones-luban-and-titli>
- [4] CENEK, Miroslav. *Obnovitelné zdroje energie*. 2. upr. a dopl. vyd. Praha: FCC Public, 2001. ISBN 80-901-9858-9.
- [5] RYCHETNÍK, Václav, Jiří PAVELKA a Josef JANOUŠEK. *Větrné motory a elektrárny*. První. Praha: České vysoké učení technické, 1997. ISBN 80-010-1563-7.
- [6] RUDA, Aleš, ed. Všeobecná cirkulace atmosféry. In: *Klimatologie a hydrogeografie pro učitele* [online]. Brno: Pedagogická fakulta Masarykovy univerzity, 2014 [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: [https://is.muni.cz/do/rect/el/estud/pdf/ps14/fyz\\_geogr/web/pages/04-cirkulace.html](https://is.muni.cz/do/rect/el/estud/pdf/ps14/fyz_geogr/web/pages/04-cirkulace.html)
- [7] ŠEJNOHA, František. *Větrné elektrárny a využití energie větru* [online]. Olomouc, 2012 [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: databáze vysokoškolských kvalifikačních prací THESES. Diplomová práce. Univerzita Palackého v Olomouci, Pedagogická fakulta, Katedra technické a informační výchovy. Vedoucí práce Martin Havelka.
- [8] Průběh některých meteorologických veličin za posledních 96 hodin. In: *Český hydrometeorologický ústav* [online]. Praha: ČHMÚ, 2019 [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <http://portal.chmi.cz/aktualni-situace/aktualni-stav-pocasi/ceska-republika/stanice/profesionalni-stanice/prehled-stanic/svratouch>
- [9] Obnovitelné zdroje energie 3D (pc aplikace). *Svět energie: Vzdělávací portál ČEZ* [online]. Praha: ČEZ, a.s., 2019 [cit. 2019-04-03]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/aplikace/obnovitelne-zdroje-energie-3d>
- [10] Compare power curves of wind turbines. *Wind turbine models* [online]. wind-turbine-models.com, c2011-2019 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://en.wind-turbine-models.com/powercurves>
- [11] SMIL, Vaclav. *Energie: průvodce pro začátečníky*. 1. Praha: Kniha Zlin, 2018. Tema (Kniha Zlin). ISBN 978-80-7473-634-6.

- [12] Práce a kinetická energie. HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. *Fyzika. 2., přeprac. vyd.* Brno: VUTIUM, 2013, s. 144-170. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-4123-1.
- [13] *BP Statistical Review of World Energy* [online]. 67th edition. London: BP, 2018 [cit. 2019-03-28]. Dostupné z: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>
- [14] BERAN, Hynek, ed., Vladimír WAGNER, ed. a Václav PAČES, ed. *Česká energetika na křižovatce*. První. V Praze: Management Press, 2018. ISBN 978-80-7261-560-5.
- [15] MASTNÝ, Petr, Jiří DRÁPELA, Stanislav MIŠÁK, Jan MACHÁČEK, Michal PTÁČEK, Lukáš RADIL, Tomáš BARTOŠÍK a Tomáš PAVELKA. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 254 s. : il. ISBN 978-80-01-04937-2.
- [16] *Roční zpráva o provozu ES v ČR* [online]. Praha: Oddělení statistiky a sledování kvality ERÚ, 2018, **2017**(1) [cit. 2019-02-01]. Dostupné z: <https://www.eru.cz/zpravy-o-provozu-elektrizacni-soustavy>
- [17] AMELANG, Sören a Benjamin WEHRMANN. German onshore wind power - output, business and perspectives. *Clean energy wire: Journalism for the energy transition* [online]. Berlin: CLEW, 2019 [cit. 2019-03-27]. Dostupné z: <https://www.cleanenergywire.org/factsheets/german-onshore-wind-power-output-business-and-perspectives>
- [18] *Energiewende in Deutschland: Definition, Ziele und Geschichte* [online]. Freiburg: Öko-Institut e.V., - [cit. 2019-03-07]. Dostupné z: <http://www.energiewende.de>
- [19] NIGRIN, Tomáš, Martin LANDA a Tereza SVOBODOVÁ. *Německo bez jádra?: SRN na cestě k odklonu od jaderné energie* [online]. 1. Praha: Univerzita Karlova v Praze, nakladatelství Karolinum, 2015 [cit. 2019-03-05]. ISBN 978-80-246-3222-3. Dostupné z: <https://books.google.cz/books>
- [20] Větrné elektrárny v ČR. *Česká společnost pro větrnou energii* [online]. Praha: ČSVE, 2017 [cit. 2019-02-03]. Dostupné z: <http://www.csve.cz/clanky/aktualni-instalace-vte-cr/120>
- [21] Funkční větrné elektrárny v ČR - instalovaný výkon v jednotlivých letech v MW. In: *Česká společnost pro větrnou energii* [online]. Praha: ČSVE, 2018 [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <http://csve.cz/clanky/grafy/280>
- [22] Třináct věží za 1,1 miliardy. *IRozhlas: Ekonomika* [online]. Praha: ČTK, 2017 [cit. 2019-02-03]. Dostupné z: [https://www.irozhlas.cz/ekonomika/vetrna-elektrarna-park-miliarda-korun-testovaci-provoz-hradek-nad-nisou\\_1711161716\\_mis](https://www.irozhlas.cz/ekonomika/vetrna-elektrarna-park-miliarda-korun-testovaci-provoz-hradek-nad-nisou_1711161716_mis)

- [23] HANSLIAN, David, Jiří HOŠEK a Josef ŠTEKL. *Odhad realizovatelného potenciálu větrné energie na území ČR* [online]. 1. Praha: Ústav fyziky atmosféry AV ČR, 2008 [cit. 2019-02-03]. ISBN Jiný identifikátor. Dostupné z: <http://www.ufa.cas.cz/struktura-ustavu/oddeleni-meteorologie/projekty-egp/vetrna-energie/projekty-qsy/realizovatelnypotencial.html>
- [24] DOUBEK, Jan. Poznáváme historii větrných mlýnů a čerpadel. *Povětrník.cz* [online]. Býkovice, b.r. [cit. 2019-02-04]. Dostupné z: <http://www.povetrnik.cz/poznavame-historii-vetrnych-mlynu-a-cerpadel>
- [25] KOČ, Břetislav. Z historie větrných elektáren. *Elektro* [online]. 2005, **2005**(12), - [cit. 2019-03-04]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/z-historie-vetrnych-elektaren--13364>
- [26] Windmill. *Encyclopedia Britannica* [online]. London: Encyclopedia Britannica, Inc., 1999 [cit. 2019-03-05]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/technology/windmill>
- [27] KOTRNETZOVÁ, Daniela. *Větrná elektrárna* [online]. Brno, 2018, 55 s. [cit. 2019-04-16]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/109233>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Jiří Pospíšil.
- [28] Wind Turbine Design. In: *YouTube* [online]. Learn Engineering, 2013 [cit. 2019-04-29]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=p5k2LhKBSgQ&t=191s>
- [29] HANSEN, Martin O. L. *Aerodynamics of wind turbines*. 2nd ed. London: Earthscan, 2008, x, 181 s. : il. ISBN 978-1-84407-438-9.
- [30] ŠOB, František. *Hydromechanika*. 1. Brno: CERM, 2002. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-2037-5.
- [31] Aerodynamika: Metodické video nejen pro piloty LAA ČR. In: *Letecká amatérská asociace ČR* [online]. Praha: LAA ČR, 2013 [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: <https://www.skolenipilotu.cz/dvd-aerodynamika/>
- [32] HOUDEK, Vít. *Dynamika dodávky elektrické energie z obnovitelných zdrojů* [online]. Ostrava, 2011 [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: <https://dspace.vsb.cz/handle/10084/87169>. Diplomová práce. VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Katedra elektroenergetiky. Vedoucí práce Tadeusz Sikora.
- [33] ŠTEKL, Josef. Větrné elektrárny a její možnosti v ČR. MOTLÍK, Jan, Libor ŠAMÁNEK, Josef ŠTEKL et al. *Obnovitelné zdroje energie a možnosti jejich uplatnění v ČR* [online]. Praha: ČEZ, a.s., 2007, s. 79-112 [cit. 2019-04-15].

- [34] MOTLÍK, Jan, Libor ŠAMÁNEK, Josef ŠTEKL et al. *Obnovitelné zdroje energie a možnosti jejich uplatnění v ČR* [online]. Praha: ČEZ, a.s., 2007 [cit. 2019-04-05]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/vyzkum-a-vzdelavani/pro-studenty/materialy-ke-studiu/tiskoviny/19.html>
- [35] KOČ, Břetislav. Větrné elektrárny, kulturní krajina, památková péče a lidé. *TZB-info: stavebnictví, úspory energií, technická zařízení budov* [online]. Praha: TZB-info, 2017 [cit. 2019-04-09]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/vetrna-energie/16201-vetrne-elektrarny-kulturni-krajina-pamatkova-pece-a-lide>
- [36] CHROMEČEK, Tomáš. *Aerodynamický návrh větrné turbíny pro zvolenou lokalitu* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2014 [cit. 2019-04-22]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/xmlui/handle/11012/23651>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Jiří Škorpík.
- [37] GIBBENS, Sarah. Watch the World's First Floating Wind Farm Ride the Waves. In: *National Geographic* [online]. Washington, D.C.: National Geographic Society, 2017 [cit. 2019-04-22]. Dostupné z: <https://news.nationalgeographic.com/2017/10/wind-farm-renewable-energy-scotland-video-spd/>
- [38] LUPION, Greg, Michelle FROESE, ed. World's first floating wind farm delivers promising results. *Windpower Engineering and Development* [online]. Cleveland: Windpower Engineering and Development, 2018 [cit. 2019-04-22]. Dostupné z: <https://www.windpowerengineering.com/business-news-projects/worlds-first-floating-wind-farm-delivers-promising-results/>
- [39] AMELANG, Sören, Kerstine APPUNN a Ruby RUSSELL. In the media: Floating wind turbines, RWE restructuring plans. In: *Clean energy wire: Journalism for the energy transition* [online]. Berlin: CLEW, 2015 [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://www.cleanenergywire.org/news/media-floating-wind-turbines-rwe-restructuring-plans>
- [40] Betonový základ. *Česká společnost pro větrnou energii* [online]. Praha: ČSVE, 2013 [cit. 2019-02-04]. Dostupné z: <http://www.csve.cz/clanky/betonovy-zaklad/305>
- [41] On shore wind turbine foundations. *Peikko Group: Faster and more efficient with concrete* [online]. Lahti (Finland): Peikko Group Corporation, 2019 [cit. 2019-04-07]. Dostupné z: <https://www.peikko.com/products/wind-turbine-foundation-system/overview/>
- [42] Stožár. *Česká společnost pro větrnou energii* [online]. Praha: ČSVE, 2013 [cit. 2019-02-23]. Dostupné z: <http://www.csve.cz/cz/detail-kategorie/stozar/86>
- [43] Ocelový tubusový stožár. *Česká společnost pro větrnou energii* [online]. Praha: ČSVE, 2013 [cit. 2019-02-04]. Dostupné z: <http://www.csve.cz/cz/clanky/ocelovy-tubusovy-stozar/229>

- [44] KOČ, Břetislav. Větrné elektrárny VII. – Jak se staví větrná elektrárna. *TZB-info: stavebnictví, úspory energií, technická zařízení budov* [online]. Praha: TZB-info, 2016 [cit. 2019-04-07]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/vetrna-energie/14893-jak-se-stavi-vetrna-elektrarna>
- [45] Z čeho se skládá. *W.E.B Větrná energie* [online]. Brno: W.E.B Větrná energie spol. s r.o., 2018 [cit. 2019-02-16]. Dostupné z: [https://www.vetrna-energie.cz/energie-zivlu/vetrna-energie\\_9/z-ceho-se-sklada\\_26](https://www.vetrna-energie.cz/energie-zivlu/vetrna-energie_9/z-ceho-se-sklada_26)
- [46] Větrná elektrárna Janov. *Virtuální prohlídka* [online]. Praha: ČEZ, b.r. [cit. 2019-02-16]. Dostupné z: <http://virtualniprohlidky.cez.cz/cez-janov/>
- [47] Systém natáčení strojovny. *Česká společnost pro větrnou energii* [online]. Praha: ČSVE, 2013 [cit. 2019-02-06]. Dostupné z: <https://www.csve.cz/cz/clanky/system-nataceni-strojovny/330>
- [48] Hlavní hřídel větrné elektrárny. *Česká společnost pro větrnou energii* [online]. Praha: ČSVE, 2013 [cit. 2019-02-06]. Dostupné z: <http://csve.cz/cz/clanky/hlavni-hridel-vetrne-elektrarny/325>
- [49] Převodovka větrné elektrárny. *Česká společnost pro větrnou energii* [online]. Praha: ČSVE, 2013 [cit. 2019-02-11]. Dostupné z: <http://www.csve.cz/cz/clanky/prevodovka-vetrne-elektrarny/327>
- [50] UKONSAARI, Jan. VATTENFALL, R&D AND NIKLAS BENNSTEDT, AUTOINVENT. *Wind turbine gearboxes: maintenance effect on present and future gearboxes fo wind turbines* [online]. Stockholm: ENERGIFORSK, 2016, 50 s. [cit. 2019-04-14]. ISBN 978-91-7673-279-3. Dostupné z: <http://www.energiforsk.se/program/vindforsk/rapporter/wind-turbine-gearboxes-2016-279/>
- [51] HÁLA, Jiří. *Simulace přímého pohonu větrné turbíny s výkonem 660kW* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009 [cit. 2019-04-27]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/18317>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce Čestmír Ondrůšek.
- [52] *2010 1st International Nuclear & Renewable Energy Conference (INREC)* [online]. Amman, Jordan: IEEE, 2010 [cit. 2019-04-27]. ISBN 9781424452132. Dostupné z: <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.lib.vutbr.cz/document/5462549/metrics#metrics>
- [53] WEC components - Constant innovation. *Enercon: energy for the world* [online]. Aurich (Germany): ENERCON GmbH, 2016 [cit. 2019-04-27]. Dostupné z: <https://www.enercon.de/en/technology/wec-components/>

- [54] HAMMER, Miloš. *Elektrotechnika a elektronika: přednášky*. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-3334-5.
- [55] Why Do Wind Turbines Have Three Blades?. In: *YouTube* [online]. Irsko: Real Engineering, 2016 [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=RNPIRfxUTQ4>
- [56] BURTON, Tony, David SHARPE, Nick JENKINS a Ervin BOSSANYI. *Wind energy handbook* [online]. Chichester: Wiley, 2001, xxiv, 617 s. : il. [cit. 2019-04-28]. ISBN 978-0-471-48997-9. Dostupné z: <https://epdf.tips/queue/wind-energy-handbook99423.html>
- [57] NELSON, Vaughn. *Wind energy: renewable energy and the environment* [online]. Boca Raton: CRC Press ; Taylor & Francis, 2009, xix, 304 s. : il., čb. fot. [cit. 2019-04-28]. ISBN 978-1-4200-7568-7. Dostupné z: <https://epdf.tips/queue/wind-energy-renewable-energy-and-the-environment36443.html>
- [58] Full scale testing: Tests of strength and endurance. *LM Wind Power* [online]. Lunderskov (Denmark): LM Wind Power, b.r. [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://www.lmwindpower.com/en/products-and-services/we-know-blades/innovation-is-the-root-of-the-future/testing/full-scale-testing>
- [59] NĚMEC, Jaroslav, Jiří RANSDORF a Milan ŠNĚDRLE. *Hluk a jeho snižování v technické praxi*. 1. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1970, 340 s. Řada strojírenské literatury.
- [60] DORKOVÁ, Lenka. *Působení zvuku na zdraví*. Praha, 2008. Diplomová práce. Univerzita Karlova v Praze, 3. lékařská fakulta, Klinika pracovního a cestovního lékařství. Vedoucí práce Evžen Hrnčíř.
- [61] 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.
- [62] SMETANA, Ctirad. *Hluk a vibrace: měření a hodnocení*. 1. Praha: Sdělovací technika, 1998. ISBN 80-901-9362-5.
- [63] Vlny - II. HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. *Fyzika*. 2., přeprac. vyd. Brno: VUTIUM, 2013, s. 464-492. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-4123-1.
- [64] NOVÝ, Richard. *Hluk a chvění*. Vyd. 3. V Praze: České vysoké učení technické, 2009, 400 s. ISBN 978-80-01-04347-9.
- [65] *Narizení vlády č. 272/2011 Sb.: Narizení vlády o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací*. In: . Praha: Vláda ČR, 2011, ročník 2011, číslo 272. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2011-272>

- [66] BERAN, Vlastimil. *Chvění a hluk*. 1. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2010, 204 s. ISBN 978-80-7043-916-6.
- [67] PHILLIP, Michael a Judy DONG. Diameter of an atom. *The Physics Factbook: encyclopedia of scientific essays* [online]. The Physics Factbook, 1998 [cit. 2019-04-13]. Dostupné z: <https://hypertextbook.com/facts/1996/MichaelPhillip.shtml>
- [68] HÁJKOVÁ, Lenka. *Akustika malých ventilátorů* [online]. Brno, 2016 [cit. 2019-05-06]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/105610>. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technických zařízení budov. Vedoucí práce Jiří Hirš.
- [69] Zdroje hluku a jeho měření. *Státní zdravotní ústav* [online]. Praha: SZÚ, 2007 [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <http://www.szu.cz/tema/zivotni-prostredi/zdroje-hluku-a-jeho-mereni>
- [70] Hluková mapa - Brno. In: *Hlukové mapy 2017* [online]. Praha: Ministerstvo zdravotnictví ČR, Odbor ochrany veřejného zdraví, 2017 [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: [https://geoportal.mzcr.cz/server/rest/directories/arcgisoutput/SHM\\_2012/SHMPrinting\\_GPServer/\\_ags\\_a42934bef4124217b38df7c978e2bd0c.png](https://geoportal.mzcr.cz/server/rest/directories/arcgisoutput/SHM_2012/SHMPrinting_GPServer/_ags_a42934bef4124217b38df7c978e2bd0c.png)
- [71] TŮMOVÁ, Olga a Eva VEJVODOVÁ. Vyšetřování hluku větrných elektráren. *Elektro* [online]. 2009, **2009**(8) [cit. 2019-05-03]. ISSN 1210-0889. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/vysetrovani-hluku-z-vetrnych-elektren--10869>
- [72] SIKORA, Pavel. *Posouzení vlivů větrných elektráren různých výkonů na životní prostředí* [online]. Ostrava, 2013 [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <https://dspace.vsb.cz/handle/10084/97928>. Diplomová práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Hornicko-geologická fakulta, Institut environmentálního inženýrství. Vedoucí práce Vladimír Lapčík.
- [73] Větrné elektrárny a životní prostředí. MOTLÍK, Jan, Libor ŠAMÁNEK, Josef ŠTEKL et al. *Obnovitelné zdroje energie a možnosti jejich uplatnění v ČR* [online]. Praha: ČEZ, a.s., 2007, s. 107-112 [cit. 2019-04-07].
- [74] SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS, Miloš VLK, ed. *Konstruování strojních součástí*. 1. V Brně: VUTIUM, 2010. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [75] Gearbox Repair. In: *H&N Wind: power systems by Timken* [online]. Pasco (Washington): H&N Wind, c2002-2017 [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: <https://hnwindservices.com/gearbox-repair.html>



- [76] OERLEMANS, S. *Wind turbine noise: primary noise sources* [online]. Amsterdam: Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium, National Aerospace Laboratory NLR, 2011 [cit. 2019-05-12]. NLR-TP-2011-066. Dostupné z: <https://reports.nlr.nl/xmlui/handle/10921/117>
- [77] JIRÁSKA, Aleš. Hluk větrných elektráren. CETKOVSKÝ, Stanislav, Bohumil FRANTÁL, Josef ŠTEKL et al. *Větrná energie v České republice: hodnocení prostorových vztahů, environmentálních aspektů a socioekonomických souvislostí* [online]. 1. Brno: Ústav geoniky AV ČR, v.v.i., 2010, s. 99-115 [cit. 2019-04-08]. Studia geographica. ISBN 978-80-86407-84-5.
- [78] Zvukoměr. *Ekosoftware* [online]. Liberec: Ekosoftware s.r.o., 2016 [cit. 2019-05-06]. Dostupné z: <https://www.ekosoftware.cz/zvukomer>
- [79] JIRÁSKA, Aleš. *Hluk větrných elektráren* [online]. Ústí nad Orlicí: NRL pro komunální hluk, 2009, 25 s. [cit. 2019-05-14]. Dostupné z: <http://hluk.nrl.cz/Home/Novinka?id=121>
- [80] ZAJÍCOVÁ, Vendula. *Studium hluku větrných elektráren* [online]. Ostrava, 2014 [cit. 2019-05-14]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/103238>. Diplomová práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Hornicko-geologická fakulta, Institut environmentálního inženýrství. Vedoucí práce Tomáš Bouchal.
- [81] PEŠTA, Jan a Viktor ZWIENER. Hlukové limity a měření hluk – stav po 1. lednu 2019. *Atelier DEK: Specializované služby ve stavebnictví* [online]. Praha: DEKPROJEKT, 2019 [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: <https://atelier-dek.cz/hlukov%C3%A9-limity-m%C4%9B%C5%99en%C3%AD-hluk-%E2%80%93-stav-po-1-lednu-2019-894>
- [82] Tónová složka hluku. In: *Ekosoftware* [online]. Liberec: Ekosoftware, 2016 [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://www.ekosoftware.cz/tonova-slozka-hluku>
- [83] Soustava smyslová. In: *Biologie: E-learning jako vzdělávací nástroj školy 3. tisíciletí* [online]. Ostrava: EDUCAnet Ostrava, 2010 [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: [http://ostrava.educanet.cz/www/biologie/index77677767.html?option=com\\_content&view=article&id=48&Itemid=48](http://ostrava.educanet.cz/www/biologie/index77677767.html?option=com_content&view=article&id=48&Itemid=48)
- [84] BOLIN, Karl, Gösta BLUHM, Gabriella ERIKSSON a Mats e NILSSON. Infrasound and low frequency noise from wind turbines: exposure and health effects. *Environmental Research Letters* [online]. 2011, **6**(3), 035103 [cit. 2019-05-17]. DOI: 10.1088/1748-9326/6/3/035103. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/ezproxy.lib.vutbr.cz/article/10.1088/1748-9326/6/3/035103>
- [85] BABISCH, Wolfgang. Noise and health. *Environmental health perspectives* [online]. 2005, **113**(1), 14-15 [cit. 2019-05-15]. ISSN 0091-6765. Dostupné z: <http://search.proquest.com/docview/67341410/>

- [86] ZAHARNA, Mia a Christian GUILLEMINAULT. Sleep, noise and health: Review. *Noise and Health* [online]. Medknow Publications, 2010, **12**(47), 64-69 [cit. 2019-05-15]. DOI: 10.4103/1463-1741.63205. ISSN 1463-1741. Dostupné z: <http://www.noiseandhealth.org/article.asp?issn=1463-1741;year=2010;volume=12;issue=47;spage=64;epage=69;aualast=Zaharna;type=0>
- [87] ZWYRTEK, Roman. *Větrné elektrárny a jejich vliv na životní prostředí a člověka* [online]. Ostrava, 2015 [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <https://dspace.vsb.cz/handle/10084/108090>. Diplomová práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Hornicko-geologická fakulta, Institut environmentálního inženýrství. Vedoucí práce Vladimír Lapčík.
- [88] Nepříznivé účinky hluku na člověka. *Ministerstvo zdravotnictví České republiky* [online]. Praha: MZCR, 2010 [cit. 2019-05-14]. Dostupné z: [http://www.mzcr.cz/hlukovemapy/obsah/nepriznive-ucinky-hluku-na-cloveka\\_3417\\_30.html](http://www.mzcr.cz/hlukovemapy/obsah/nepriznive-ucinky-hluku-na-cloveka_3417_30.html)
- [89] BLANAŘ, Vít. *Podíl audiologické sestry na vyšetřování a na hodnocení hendikepů nemocných s nedoslýchavostí podmíněnou hlukem* [online]. Pardubice, 2017 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://dk.upce.cz/handle/10195/67885>. Disertační práce. Univerzita Pardubice, Fakulta zdravotnických studií. Vedoucí práce Jan Mejzlík, Arnošt Pellant.
- [90] *Environmental Noise Guidelines for the European Region* [online]. Copenhagen (Denmark): World Health Organization, 2018 [cit. 2019-05-15]. ISBN 978-92-890-5356-3. Dostupné z: <http://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/noise/publications/2018/environmental-noise-guidelines-for-the-european-region-2018>
- [91] *Zdravotní rizika při provozu větrných elektráren* [online]. Praha: SZÚ, 2007 [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <http://www.szu.cz/tema/zivotni-prostredi/zdravotni-rizika-pri-provozu-vetrnych-elektren>

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

$A$	[m <sup>2</sup> ]	Plocha procházejícího větru
$AV$	ČR	Akademie věd České republiky
$c$	[m·s <sup>-1</sup> ]	Rychlost zvuku
$C_{ogenmtor}$	[min <sup>-1</sup> ]	Myšlený počet otáček rotoru generátoru
ČHMÚ		Český hydrometeorologický ústav
ČR		Česká republika
ČSVE		Česká společnost pro větrnou energii
$EIA$		<i>Environmental Impact Assessment</i> (Vliv na životní prostředí)
$E_K$	[J]	Kinetická energie
$ES$		Elektrizační soustava
$E_v$	[J]	Energie větru
$f$	[Hz]	Frekvence
$f_1$	[Hz]	Spodní hodnota frekvence intervalu oktávy
$f_2$	[Hz]	Vrchní hodnota frekvence intervalu oktávy
$G_n$	[Pa]	Síla tlakového gradientu
$h$	[m]	Nadmořská výška
$h_o$	[m]	Referenční výška
$I$	[W·m <sup>-2</sup> ]	Akustická intenzita
$I_o$	[W·m <sup>-2</sup> ]	Referenční hodnota intenzity zvuku
$K$	[%]	Součinitel využití
$K$	[Pa]	Modul objemové pružnosti kapaliny
$L_{Aeq,T}$	[dB]	Ekvivalentní hladina akustického tlaku vážená filtrem A
$L_c$	[dB]	Skutečná hladina akustického tlaku
$L_I$	[dB]	Hladina akustické intenzity
$L_p$	[dB]	Hladina akustického tlaku
$L_{pA}$	[dB]	Hladina akustického tlaku frekvenčně vážená filtrem A
$L_W$	[dB]	Hladina akustického výkonu
$m$	[kg]	hmotnost částice
$mtoe$		<i>milion tonnes of oil equivalent</i> (Ropný ekvivalent)
$N$	[-]	Počet pólů generátoru
$n$	[-]	Drsnost povrchu
$n$	[m]	Délka kolmice k izobarické ploše

<i>NRL</i>		Národní referenční laboratoř
<i>OZE</i>		Obnovitelné zdroje energie
<i>P</i>	[W]	Akustický výkon
<i>p</i>	[Pa]	Tlak
<i>p</i>	[Pa]	Sledovaný akustický tlak
<i>p<sub>b</sub></i>	[Pa]	Barometrický tlak
<i>p<sub>bo</sub></i>	[Pa]	Referenční barometrický tlak
<i>P<sub>cr</sub></i>	[W]	Průměrný roční výkon zařízení
<i>P<sub>i</sub></i>	[W]	Instalovaný výkon zařízení
<i>p<sub>o</sub></i>	[Pa]	Referenční akustický tlak
<i>P<sub>p</sub></i>	[W]	Špičkový výkon zařízení
<i>P<sub>v</sub></i>	[W]	Výkon větru
<i>p<sub>v</sub></i>	[W]	Výkon větru
<i>r</i>	[J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	Plynová konstanta
<i>Re</i>	[-]	Reynoldsovo číslo
<i>s</i>	[m]	Dráha pohybujícího se vzduchu
<i>SZÚ</i>		Státní zdravotní ústav
<i>T</i>	[K]	Termodynamická teplota
<i>t</i>	[°C]	Okolní teplota
<i>t</i>	[s]	Čas
<i>V</i>	[m <sup>3</sup> ]	Objem
<i>v</i>	[m·s <sup>-1</sup> ]	Rychlost částice
<i>v<sup>*</sup></i>	[m·s <sup>-1</sup> ]	Průměrná rychlost větru ve výšce <i>h</i>
<i>v<sub>o</sub><sup>*</sup></i>	[m·s <sup>-1</sup> ]	Průměrná rychlost větru v referenční výšce <i>h<sub>o</sub></i>
<i>W</i>	[W]	Sledovaný akustický výkon
<i>WHO</i>		<i>World Health Organization</i> (Světová zdravotnická organizace)
<i>W<sub>o</sub></i>	[W]	Referenční akustický výkon
<i>α</i>	[°]	Úhel náběhu
<i>Δt</i>	[s]	Časový interval
<i>ε<sub>γ</sub></i>	[-]	Součinitel záběru
<i>λ</i>	[m]	Vlnová délka
<i>ρ</i>	[kg·m <sup>-3</sup> ]	Hustota prostředí