



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

**DIAGNOSTIKA SYSTÉMŮ ULOŽENÍ
ROTUJÍCÍCH ČÁSTÍ V GONDOLE VĚTRNÉ
ELEKTRÁRNY**

DIAGNOSTICS OF ROTATING PARTS MOUNTING SYSTEMS IN A WIND TURBINE NACELLE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jakub Krontorád

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Pavel Mazal, CSc.

BRNO 2022

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Jakub Krontorád**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Pavel Mazal, CSc.**
Akademický rok: 2021/22

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:

Diagnostika systémů uložení rotujících částí v gondole větrné elektrárny

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Efektivní výroba elektrické energie pomocí větrných elektráren závisí na spolehlivosti funkce turbínového systému, zejména klíčových částí uložení rotoru. Významní světoví výrobci ložisek vyvinuli několik základních systémů uložení, které se významně liší ve svých parametrech. S rostoucím stářím elektráren a snahou jejich provozovatelů o prodloužení jejich využitelnosti narůstá i význam odhadu zbývající životnosti a tedy odpovídající diagnostiky stavu konstrukce.

Typ práce: rešeršně syntetická

Cíle bakalářské práce:

Hlavním cílem je zpracování kritické analýzy historického vývoje systémů používaných pro uložení hřídelí v gondolách větrných elektráren. Součástí studie bude i přehled možností diagnostických systémů používaných v této oblasti.

Dílní cíle bakalářské práce:

- systematický přehled dostupných informací o možnostech uložení rotujících částí v gondolách větrných elektráren,
- kritické zhodnocení výhod a nevýhod nejčastěji používaných systémů uložení,
- charakterizovat současné trendy v oblasti řízení a diagnostiky funkce zařízení větrných elektráren.

Požadované výstupy: průvodní zpráva.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 – 20 stran textu bez obrázků).

Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

<http://www.ustavkonstruovani.cz/texty/bakalarske-studium-ukoncení/>

Seznam doporučené literatury:

BURTON, T.L. et al.: Wind Energy Handbook. 3rd ed., John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 2021, 1008 p., ISBN: 978-1-119-45109-9.

KREIDL, M., ŠMÍD, R.: Technická diagnostika. 1. vydání, BEN - technická literatura, Praha 2006, 408 s, ISBN 978-80-7300-158-6.

SHIGLEY, J.E., MISCHKE, Ch.R., BUDYNAS, R.G.: Konstruování strojních součástí. Překlad 7. vydání, VUTIUM, Brno 2010, 1186 s, ISBN: 978-80-214-2629-0.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá problematikou provozu a diagnostiky větrných elektráren. Podává přehled větrné energetiky na území České republiky a shromažďuje relevantní informace z celosvětových prací a studií k tématu diagnostiky a údržby hlavních mechanických součástí gondoly větrné elektrárny. Podává návrh ke zlepšení provozních podmínek větrné energetiky a údržby větrných elektráren, který povede ke snížení poruchovosti jejich hlavních mechanických systémů pomocí monitorování technického stavu rotujících součástí, za kombinace měření akustické emise a vysokofrekvenčních vibrací. Součástí praktické části práce je analýza signálu akustické emise z nejmenované 2000kW větrné elektrárny, pro dokázání citlivosti této metody a pro seznámení čtenáře s jejími principy.

KLÍČOVÁ SLOVA

Větrná elektrárna, diagnostika, ložisko, akustická emise, údržba podmíněná technickým stavem komponenty

ABSTRACT

The core aspect of thesis is management of work and diagnostics of wind turbines. It contains an overview of wind energy in Czech Republic and collects a relevant information from international papers and studies regarding the topic of diagnostics and maintenance of main mechanical components located in nacelle of wind turbine. It contains a recommendation for improvement of working conditions of wind turbines and their maintenance, which would lead to decrease of failure rates of the wind turbines main mechanical systems due to the utilization of acoustic emission and high frequency vibrations monitoring. Experimental part of the thesis contains analysis of acoustic emission signal from anonymous wind turbine with maximum energy output of 2000kW in Czech Republic to illustrate the sensitivity of acoustic emission and introduce its principles.

KEYWORDS

Wind turbine, diagnostics, bearing, acoustic emission, condition-based maintenance

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KRONTORÁD, Jakub. *Diagnostika systémů uložení rotujících částí v gondole větrné elektrárny*. Brno, 2018, 99 s. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Mazal Pavel, CSc.

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu práce panu doc. Ing. Pavlu Mazalovi, CSc. za věcné připomínky a vstřícnost při konzultování bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Františku Vlašicovi, Ph.D. za zprostředkování záznamů akustické emise a jejich poskytnutí pro účely této bakalářské práce.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením doc. Ing. Pavla Mazala, CSc. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

.....

Podpis autora

OBSAH

ABSTRAKT	5
KLÍČOVÁ SLOVA	5
ABSTRACT	5
KEYWORDS	5
BIBLIOGRAFICKÁ CITACE	7
PODĚKOVÁNÍ	9
PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE	9
OBSAH11	
1 ÚVOD	15
1.1 Motivace bakalářské práce	16
2 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	17
2.1 Analýza problému	17
2.2 Cíl práce	17
3 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	18
3.1 Princip získání energie z větru	18
3.2 Historie využívání větrné energie	19
3.3 Historické mlýny na území ČR	21
3.4 Rozdělení	22
3.5 Druhy vertikálních větrných elektráren	23
3.5.1 Darrierova turbína	23
3.5.2 Savoniova turbína	24
3.6 Horizontální větrné elektrárny	25
3.7 Význam větrné energetiky ve světě a v České republice, statistika výroby energie.	26
3.7.1 Přehled významných větrných elektráren na území České republiky	27
3.8 Problémy související s provozem větrné elektrárny	28
3.9 Výroba elektrické energie v gondole větrné turbíny	29
	11

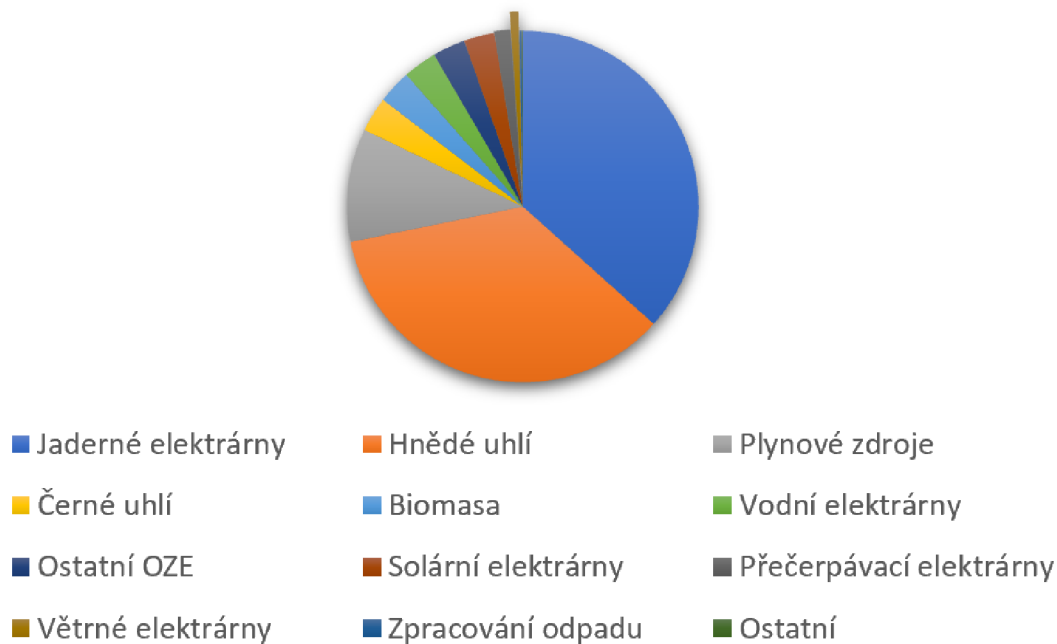
3.10	Popis horizontální vztlakové větrné elektrárny	30
3.11	Systémy uložení rotujících částí v gondole větrné elektrárny	31
3.11.1	Uložení s převodovkou	31
3.11.2	Přímý chod	31
3.11.3	Typy využívaných ložisek	32
3.11.4	Historie uložení hřídelí větrných elektráren	33
3.12	Statistika poruch větrných elektráren	33
3.12.1	graf poměrů odstávek turbíny kvůli poruchám v různých systémech turbíny	Chyba! Záložka není definována.
3.12.2	graf porovnávající poměrné doby výpadků z provozu z důvodu poruchy dle rozdílných systémů větrné elektrárny	Chyba! Záložka není definována.
3.13	Přehled možných poruch hlavních ložisek a převodovky + jejich příčiny a stručné vysvětlení mechanismů hlavních poruch	35
3.13.1	Porucha převodovky:	35
3.13.2	Generátor:	36
3.13.3	Přehled poruch lopatek:	37
3.13.4	Mechanismy poškození jednotlivých částí turbíny a vhodné metody pro detekci vad	38
3.14	Základní defektoskopické metody – nedestruktivní diagnóza	42
3.14.1	Metoda vizuální	42
3.14.2	Metoda kapilární	42
3.14.3	Magnetické metody	42
3.14.4	Elektromagnetická defektoskopie vířivými proudy	42
3.14.5	Ultrazvukové metody	42
3.14.6	Akustické emise	43
3.14.7	Defektoskopie prozařováním	43
3.14.8	Infračervená defektoskopie	43
3.15	Údržba větrných elektráren	43
3.15.1	Údržba po uplynutí časového intervalu	44
3.15.2	Údržba podmíněná technickým stavem komponenty (CBM)	45
3.16	Příklad detekce vad pomocí monitorování vysokofrekvenčních vibrací	46
4	ZÁVĚR	51
5	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.
6	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	58
6.1	Příklady použitých fyzikálních veličin	58
7	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	59

8	SEZNAM TABULEK	61
9	SEZNAM PŘÍLOH	62

1 ÚVOD

Ceny elektřiny a zemního plynu v posledních měsících prudce stouply, Bohemia Energy vypověděla před zimou 2021 smlouvu všem svým klientům a skoro desetina republiky byla odkázána na dodavatele poslední instance, kteří požadují obrovské zálohy, pro spoustu rodin mimo jejich finanční možnosti. Proč se tak stalo, není pro tuto bakalářskou práci významné, jak předejít něčemu takovému v budoucnu je ale relevantní otázka.

Podíl zdrojů na výrobě elektřiny ČR



Graf 1: Podíl zdrojů na výrobě elektřiny ČR Dle [1]

V roce 2020 byl podíl plynových zdrojů na výrobě elektřiny asi 14 %, což není úplně zanedbatelné číslo. Naše republika je závislá na dodávce plynu ze zahraničí. Abychom předešli podobným situacím v budoucnu, bylo by vhodné, abychom zvýšili naši energetickou soběstačnost a spoléhali se méně na dodávání zdrojů ze zahraničí. [2]

Postavení další jaderné elektrárny je lukrativní řešení, které se jistě dříve nebo později uskuteční. Pořizovací výdaje jsou ale obrovské a státní pokladna po nouzových stavech covidové doby musí šetřit.

Česká republika získává majoritní podíl energie spalováním hnědého uhlí, což je levné, zároveň ale i neekologické a poškozuje to kvalitu vzduchu, který dýcháme. Emisní povolenky ale výrobu elektřiny z uhlí zásadně znevýhodní. Spalováním uhlí navíc vypouštíme do atmosféry více uhlíku. Pálením dřeva a sázením stromů cirkuluje v naší atmosféře určité, dané množství uhlíku. Tím, že spalujeme uhlí, ale množství cirkulujícího uhlíku zvyšujeme, a jen zřídka je množství uhlíku, cirkulujícího v našem ekosystému, opravdu snižováno.

Zastavit všechny spalovací elektrárny a získávat elektřinu jen z nově postavených elektráren na obnovitelné zdroje není zrovna finančně efektivní. Také není úplně reálné, aby Česko získávalo většinu nebo snad všechnu elektrickou energii z těchto zdrojů. Je ale na místě, aby se významnost těchto zdrojů zvyšovala, byť jen pomalu, na úkor uhlí nebo plynu. Snad pak dokážeme oddálit toxikaci ovzduší, oteplování způsobené skleníkovým efektem a vymírání živočišných druhů.

S příchodem „energetické a plynové“ krize se rapidně zvýšila poptávka po možnostech výroby vlastní „zelené“ elektrické energie a do jisté míry i zájem veřejnosti o solární panely, větrné elektrárny a vodní elektrárny které jsou již v provozu. V této bakalářské práci se budu zabývat právě větrnými elektrárnami a diagnostikou jejich rotujících mechanických součástí.

1.1 Motivace bakalářské práce

Motivací bakalářské práce je umožnit výhodnější a pro investory bezpečnější provoz větrné elektrárny. Jeden z hlavních problémů tohoto odvětví větrné energetiky je poruchovost mechanických součástí větrné elektrárny, které jsou velice drahé, na zakázku vyráběné zboží s dlouhými dodávacími lhůtami a náhlá porucha některé součásti může větrnou elektrárnu vyřadit na dlouhou dobu z provozu. Investoři tak musí koupit nový nákladný díl, ztrácí peníze z důvodu neschopnosti elektrárny produkovat energii a jsou vystaveni riziku pokut kvůli neplnění závazků spojených s dodávkou energie.

Pokud by byla úroveň provozu a údržby větrných elektráren zlepšena, mohla by se Česká republika blíže přiblížit, v poměru energie získané z obnovitelných zdrojů, třeba Německu, Dánsku nebo Rakousku, které jsou v ohledu provozu větrných elektráren před námi.

2 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

2.1 Analýza problému

Značná část větrných elektráren na území České republiky se přibližuje ke konci své předpokládané životnosti a výměna mechanických částí větrné turbíny je časově náročná a velice nákladná. Proto se v této bakalářské práci soustředím na rešerši existujících diagnostických metod součástí větrných elektráren, které by průběžně monitorovaly technický stav součástí a předpovídaly možné selhání. Díky tomu by rizikové díly mohly bezpečně sloužit ještě několik let před vyřazením z provozu, aniž by ohrozily ostatní součásti mechanismu. Například zadřené ložisko může napáchat vážné škody na převodovce. Výsledkem úsilí by mělo být doporučení pro měření dat a kontrolu provozuschopnosti elektráren, za použití vhodných diagnostických metod v reálném čase na vybrané díly větrné elektrárny.

2.2 Cíl práce

Shromáždit relevantní informace k problematice větrných elektráren a možnostem diagnostiky jejich provozu. Navrhnout vhodnou metodu diagnostiky technického stavu hlavních komponent větrné elektrárny.

3 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

3.1 Princip získání energie z větru

Vítr vzniká v důsledku vyrovnávání rozdílných tlaků vzduchu. Tlak vzduchu je z velké části ovlivněn teplotou vzduchu, a ta je na různých místech často rozdílná. To, jakou má vzduch na určitém místě teplotu, závisí na atmosféře nad daným místem a na povrchu, na který dopadá sluneční záření a také na rotaci Země. [3]

S navýšením teploty molekul vzduchu se zvýší rychlost, se kterou se při kmitání pohybují kolem svých rovnovážných poloh. To zapříčiní snížení hustoty vzduchu a jeho stoupání. V místě, kde vzduch stoupá, vznikne podtlak. Do míst s nižším tlakem jsou pak z míst s vyšším tlakem přesunovány molekuly vzduchu, čemuž říkáme vítr. Čím vyšší je tlakový rozdíl na dvou místech, tím rychleji mezi nimi fouká vítr. [4]

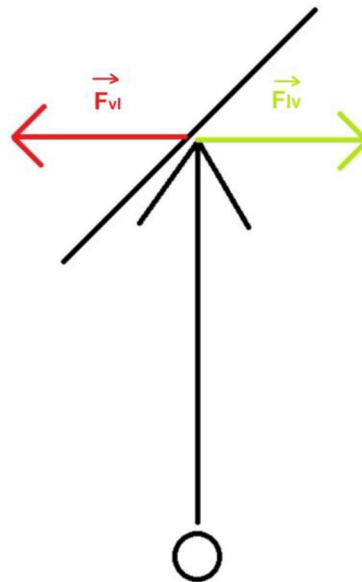
Nejstarší principy získávání energie z větru byly založeny na vztyčení překážky vůči proudícímu větru. Například plachta lodi funguje tak, že na plochu plachty S fouká vítr a při tom působí na plachtu tlakem P . Tlak na plachtu vzniká kvůli molekulám vzduchu narážejícím do překážky, která neuhýbá, tím překážce předávají část své kinetické energie.

$$\Delta E_K = \frac{1}{2} m(v_v^2 - v_p^2)$$

Síla F , kterou je loďka popoháněna je rovna součinu plochy a tlaku.

$$F = P * S$$

Přeměna kinetické energie větru na rotační mechanický pohyb byla prováděna pomocí odporových mechanismů. Natočené lopatky kladou odpor větru a odebírají jeho kinetickou energii. Část energie se přenáší do stojanu a část do otáčení rotoru mlýnu. Tak vzniká rotační pohyb na hřídeli, který pak může být dále využit k práci.



Obrázek 1: Schéma sil pro odporové větrné elektrárny

Na obrázku je vidět vánoční ozdoba s rotorem, který otáčí kapličkou a využívá k tomu proudění teplého vzduchu, ohřátého svíčkami. Stoupající molekula vzduchu s $E_k > 0$ narazí do lopatky skloněné pod úhlem, která působením síly F_{lv} změní směr pohybu molekuly. Podle 3. Newtonova zákona působí molekula na lopatku stejně velkou silou opačného směru F_{vl} a zajišťuje otáčení rotoru. Pokud přejdeme z mikroskopického pojetí problému do makroskopického, nahradíme sílu jedné molekuly tlakem molekul stoupajícího vzduchu působícím na plochu lopatky.

3.2 Historie využívání větrné energie

První zmínky o využívání větrné energie se datují do období kolem roku 5 000 před naším letopočtem, do doby starověkého Egypta. Energie větru byla tehdy využívána pro pohánění jednoduchých plavidel po řece Nil. Kolem roku 200 před naším letopočtem byla objevena další průkopová zařízení pro využití větru, jednoduchá vodní čerpadla v císařské Číně a první větrné mlýny na zpracování obilí v Persii a na Blízkém Východě.

Poprvé přináší technologii mlýnů do Evropy v 8. století Arabové. První zmínka o větrném mlýnu v Evropě je z Anglie roku 833. Ke konci 11. století začínají být mlýny rozšiřovány a hojně využívány Evropany. Roku 1253 je využití větrného mlýnu zmíněno ve Francii, v Německu roku 1274, v Nizozemsku roku 1277 a v Čechách v roce 1332. [5], [6], [7]

Na území dnešního Nizozemí jsou za využití větrných čerpadel odvodňovány mokřady, a tím je rozšířena obytná a úrodná půda. Po zdokonalení mlýnu v 17. století je možné odčerpávat podstatně více vody a za využití vodních čerpadel jsou vysoušeny významnější poldry, ohraničené úseky vody. Nejstarší z velkých poldrů je Beemster, zhotoven roku 1612, čítající rozlohu 72 km² a zařazený do seznamu světového kulturního dědictví UNESCO. Mlýny se s postupem času zdokonalovaly, zvětšovaly a jejich využívání se rozšiřovalo, čímž se dostaly do povědomí lidí. Příkladem je zmínka ve španělském románu Miguela de Cervanta: Důmyslný rytíř Don Quijote de La Mancha z roku 1605.

Při průmyslové revoluci v 19. století začala být větrná energie mlýnů nahrazována parní a elektrickou energií. V Americe se ale na přelomu 18. a 19. století rozšířilo využití větrné energie pro čerpání vody na rozsáhlých farmách a pro výrobu elektrické energie. Klasický design větrného mlýnu byl výrazně zdokonalen na mnoho lopatkový mlýn. [7]



Obrázek 2: Vodní pumpa [8]

O první větrné elektrárně hovoříme v letech 1887-88 v souvislosti s Charlesem F. Bruschem (USA) a v roce 1891 s profesorem Poulem la Coure (Nizozemí), kteří nezávisle na sobě sestrojili větrné elektrárny. Bruschova s mnoho lopatkovou hlavou byla dramaticky větší a měla vyšší výkon 12 kW, ta Courova měla typický design a na základě experimentů a bádání vytvořil Paul la Coure design s redukováným počtem listů, který účinněji převáděl větrnou energii na elektrickou. [9]

Další vývoj větrných elektráren probíhal nejvíce v Nizozemí, kde se řada la Courových následníků snažila větrné elektrárny zdokonalit. Velký skok pak nastává ve 40. letech 20. století, kdy je roku 1941 ve Vermontu (USA) sestrojena větrná elektrárna s výkonem 1MW. Elektrárny v té době běžně dosahovaly 50-70 kW.

Jako poměrně drahá metoda výroby energie se ale opravdu rozšířila až v 70. letech 20. století, za ropné krize.

Napomohl tomu i významný pokrok v materiálové metalurgii, využití nových lehkých a zároveň pevných materiálů, mezi něž patří kompozity, keramické materiály, a hlavně velký nárůst výroby a zpracování oceli. [10]

V 80. a 90. letech se pak začínají větrné elektrárny rozšiřovat exponenciální rychlostí a roku 1996 je překročen celosvětový výkon 6 GW, což je skoro ekvivalentní 3 jaderným elektrárnám Temelín. Roku 2017 se pak celosvětový výkon větrných elektráren dostane na 486,7 GW, ekvivalent 224 Temelínů.

Problémem samozřejmě zůstávají proměnné povětrnostní podmínky, které efektivní výkon značně snižují a způsobují nestálou dodávku energie. Také hluk může být problémem, je ale možné elektrárny umístit na neobydlená místa, dokonce i na moře. Ekonomičnost výroby energie tímto způsobem se pořád nemůže konvenčním metodám vyrovnat, tlak na ochranu životního prostředí ale začíná hrát významnou roli v energetickém hospodářství. Proto je výroba elektrické energie z obnovitelných zdrojů více než aktuální téma. [10]

3.3 Historické mlýny na území ČR



Obrázek 3: Kateřina Macháňová, Partutovice, mlýn německého typu [11]

Mlýny německého typu se byly schopné natáčet proti větru. Poprvé je tento typ mlýnu zmíněn roku 1253 v Německu.



Obrázek 4: Komárek Jiří, 2014, Přemyslovice, mlyn holandského typu [12]

Mlýny Holandského typu jsou charakteristické tím, že se proti větru natačí jen střecha.

3.4 Rozdělení

Větrné elektrárny dělíme na odporové a vztakové.

Odporové mají starší koncepci a dnes jsou jen málo průmyslově využívány. Kvůli rozdílnému odporu, který kladou jednotlivé lopatky proudícímu vzduchu, dojde k otáčení rotoru a výrobě elektrické energie. Rozdílný odpor je zde dosažen buď tvarem nebo natočením lopatek. Zásadní skupinou jsou ale větrné elektrárny vztakové, které fungují na podobném principu jako křídla letadla. [13]

Při proudění vzduchu kolem speciálně vytvarované lopatky vznikne na jedné straně lopatky oblast s nižším tlakem. Lopatka je pak do této oblasti vtahována, a to způsobuje pohyb rotoru. Proti pohybu působí odporová síla vzduchu a jejich součet udává otáčky rotoru. [14]

Dále jsou větrné elektrárny děleny dle směru otáčení na horizontální a vertikální

Vertikální (VAWT – vertical axis wind turbine) jsou nezávislé na směru proudícího větru a jejich využití je praktické v místech s častými změnami směru proudění větru. Také je možné uložit generátor a převodovku přímo na zem a snížit celkovou velikost turbíny. Kvůli vyšší ceně a nižší účinnosti využití větrné energie ale nejsou tak běžné využívány, jako horizontální. [13]

Horizontální (HAWT – horizontal axis wind turbine) mají podmíněnou funkci natočením proti větru, proto je k ustavení do správné pozice u menších turbín využívána směrová lopatka a u větších servopohon a větrný senzor. Kvůli vyšší účinnosti využití větrné energie je horizontální větrná elektrárna nejvíce využívaná větrná elektrárna pro výrobu elektrické energie. [13]

Větrné elektrárny mohou být pevninské nebo mořské, při čemž mořské dosahují vyšších otáček kvůli vyšší průměrné rychlosti větru a také u nich není potřeba řešit hluk. Mořské ale oproti pevninským vyžadují vyšší náklady na realizaci a údržbu.

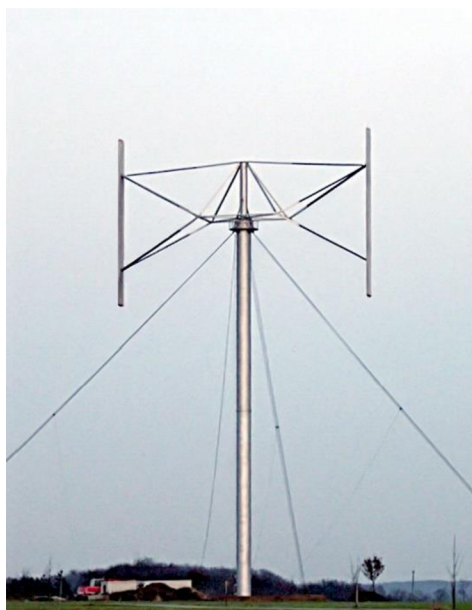
V porovnání s mořskými elektrárnami jde ty pevninské snáze postavit, udržovat v chodu a relativně jednoduše napojit na energetickou síť. Nevýhodami ale je, že pevninské překážky zpomalují proudění větru, elektrárny také zabírají značný prostor a jejich přítomnost negativně ovlivňují krajinu akusticky, i vizuálně.

Dále mohou být elektrárny s jednou, dvěma nebo třemi lopatkami, přičemž je nejvíce využívána varianta s třemi lopatkami, kvůli nejlepší stabilitě a odolnosti rotoru. [13]

3.5 Druhy vertikálních větrných elektráren

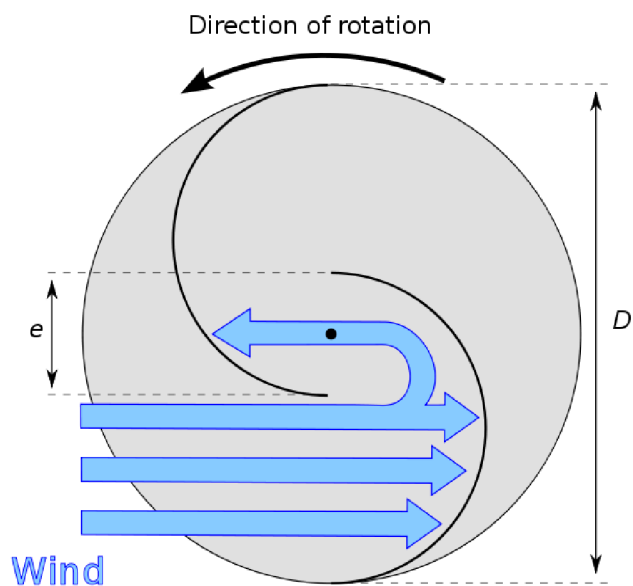
3.5.1 Darrierova turbína

Vynalezl ji roku 1931 inženýr Georges Jean Marie Darrieus a funguje na principu vztlaku přítomném na aerodynamicky tvarovaných listech uchycených na vertikální ose. Turbína je schopna dosáhnout vysokých otáček a kvůli tomu musí být lopatky z odolného materiálu. Účinnost přeměny energie větru na energii elektrickou je s 35 % účinností. Hlavními výhodami je snadná údržba a nezávislost na směru proudění větru. Nevýhodou jsou řádově vyšší napětí v pulzujícím zátěžném cyklu a tím způsobené únavové opotřebení. V porovnání s horizontálními turbínami mají Darrierovy turbíny nižší životnost. [15]



Obrázek 5: Stahlkocher, 2007, Darrierova turbína [16]

3.5.2 Savoniova turbína



Obrázek 6: Ugo14, 2008, Savoniova turbína [17]

Savoniovu turbínu vynalezl roku 1922 Sigurd J. Savonius. V důsledku rozdílné geometrie lopatky ve směru proudění větru vzniká vyšší tlak, který rozpohybuje rotor, a to způsobuje vznik elektrické energie. Účinnost přeměny kinetické energie větru dosahuje jen kolem 20 %. Konstrukce lopatek ale neumožňuje vyšší obvodovou rychlost, než je rychlost větru, tím pádem dosahuje nižších otáček a je spíše vhodná pro čerpání vody nebo mletí obilí. [18]



Obrázek 7: Savoniova turbína [19]

3.6 Horizontální větrné elektrárny



Obrázek 8: Horizontální větrná elektrárna [20]

Základní princip horizontální větrné elektrárny je otáčení kolem horizontální osy. Více podrobností na téma horizontálních větrných elektráren je v předešlé kapitole Rozdělení nebo přímo v kapitole Popis horizontální vztlakové větrné elektrárny, což je typ elektrárny, kterým se tato práce zabývá.

3.7 Význam větrné energetiky ve světě a v České republice, statistika výroby energie.

Na celém světě je k roku 2020 podíl výroby energie z větru 6,15 %, výkonu 744GW. Z toho 0,3 % pochází z elektráren na moři, jejichž hlavním průkopníkem je Velká Británie, Německo, Dánsko a Nizozemí. Stát s nejvyšším podílem výroby větrné energie je k roku 2020 Dánsko s 57,66 %.[21][22]

Dle stránky „oenergetice.cz“ má Česká republika a Slovensko podíl energie vyrobený větrnými elektrárnami nižší než 1 %, zatímco sousední země mají tento podíl značně vyšší: Polsko 9,6 %, Německo 22,9 %, Rakousko 12,7 %. Dalo by se tedy konstatovat, že pro Českou republiku není větrná energetika hojně zastoupeným zdrojem. Kvůli důvodům, které byly zmíněny v úvodu, je vhodné zajímat se o tento zdroj a snažit se přispět k jeho rozšíření. (Data z 1.1.2021 – 1.1.2022) [1]

Dle energetického regulačního úřadu (ERU) České republiky byl maximální instalovaný výkon větrných elektráren v roce 2020: 339 MW a celkové množství vyrobené energie větrnými elektrárnami činilo 690 GWh [23]. Kvůli odstávkám elektráren a kvůli kolísání síly větru fungovala v průměru každá větrná elektrárna jen na 23 % svého maximálního výkonu. Činí to podíl 0,8 % z vyrobené elektrické energie na území České republiky.

Jedním z důvodů, proč se pokrokové země jako USA, Čína, Německo Velká Británie a další zaměřují na větrnou energetiku a energii z obnovitelných zdrojů obecně, je absence nákladů spojených s pořizováním paliva pro elektrárny. Větrná elektrárna sice, co se týče, výkonu nemůže konkurovat uhelné elektrárně o stejných pořizovacích nákladech, za 30 let provozu ale cena uhlí a také cena za filtrování uhelných částic ze vzduchu výrazně změni poměr celková cena/celkový výkon, oproti větru, který fouká bez poplatně. Jedná se ale o investici, která začne být výhodná až po dlouhé době a která vyžaduje infrastrukturu například v podobě přečerpávajících elektráren a setrvačníků, pro kompenzování výkyvů ve výkonu.

3.7.1 Přehled významných větrných elektráren na území České republiky

Lokalita	Kraj	Výrobce	Typ elektráren	Rotor	Výška náboje	Výkon (kW)	Počet	Celkový výkon	Instalace
Jindřichovice II	Karlovarský	Vestas	V110	110	125	2200	7	15400	2019
Ostružná	Olomoucký	Vestas	V 39-500	39	40	500	6	3000	1994
Vítkov (Lysý Vrch u Albrechtic)	Liberecký	Tacke	TW 500	37	40	500	5+0,6	3100	2004
Břežany	Jihomoravský	Vestas	V52	52	74	850	5	4250	2005
Kryštofovy Hamry - Přísečnice	Ústecký	Enercon	E- 82	82	85	2000	21	42000	2007
Horní Loděnice - Lipina	Olomoucký	Vestas	V90	90	105	2000	9	18000	2009
Andělka	Liberecký	Repower	MM92	92	80	2050	6	12300	2012
Horní Paseky	Karlovarský	Vestas	V90	90	105	2000	5	10000	2012
Červený kopec - Rejchartice	Moravskoslezský	Siemens	SWT-2,3-101	101	80	2300	6	1380	2012
Václavice	Liberecký	Senvion (Repower)	MM100, 92	85	100, 92	2000, 2050	13	26100	2017
Jindřichovice II	Karlovarský	Vestas	V110	110	125	2200	7	15400	2019

Tabulka 1: Výběr hlavních farem větrných elektráren v ČR [24]

Kraj	Výkon
Zlínský	0,225 MW
Jihomoravský	8,25 MW
Karlovarský	69 MW
Liberecký	50 MW
Moravskoslezský	28,2 MW
Olomoucký	45,2 MW

Kraj	Výkon
Pardubický	19,2 MW
Středočeský	6,0 MW
Ústecký	86,8 MW
Vysočina	11,8 MW
Plzeňský	5,3 MW
Královéhradecký	10 MW

Tabulka 2: Instalovaný větrný výkon v ČR dle krajů [24]

Prezentován je pouze výňatek z tabulky, který obsahuje nejdůležitější farmy, celá tabulka z roku 2019 se nachází v přílohách jako příloha 1. Z tabulky číslo 2 je patrné, že mezi kraje s nejvyšším zastoupením větrné energetiky patří: Ústecký kraj, Karlovarský kraj, Olomoucký kraj a Moravskoslezský kraj. Celkový instalovaný výkon v každém kraji může být ovlivněn povětrnostními podmínkami v daném kraji. Vhodný je ustálený vítr o střední síle, pomalý vítr má nižší výkon, při moc rychlém větru je nutné elektrárnu zastavit, aby nedošlo k poruše.

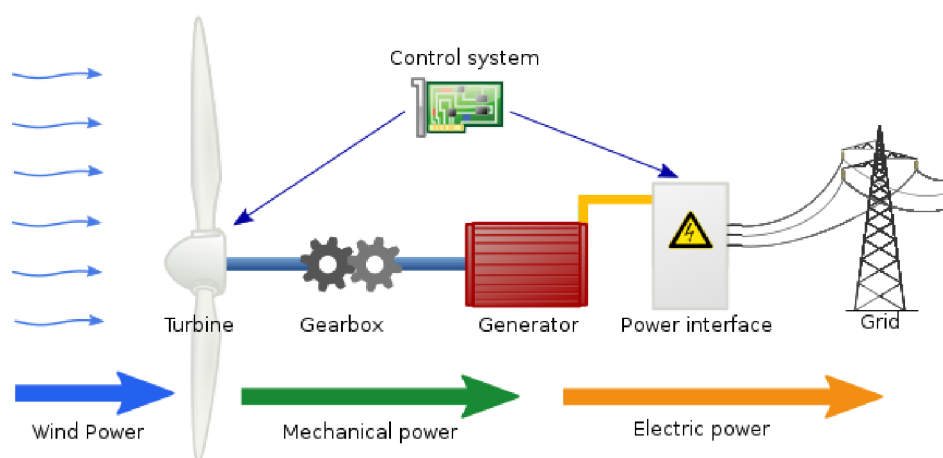
3.8 Problémy související s provozem větrné elektrárny



Obrázek 9: Farma větrných elektráren [25]

Jeden z největších problémů provozu větrné elektrárny je její kolísavý výkon, který je podmíněn povětrnostními podmínkami a odstávkami z chodu. Při instalaci elektráren na jednom pozemku musí být elektrárny dostatečně vzdálené, aby si nestínili, což ještě navyšuje cenu investice. Kvůli hluku a estetickému znečištění krajiny je snahou umisťovat elektrárny dál od lidských obydlí, to je ale protichůdné vůči požadavku na co nejnižší nutné náklady pro vedení elektrické energie. V poslední řadě budování a provoz elektrárny ohrožují faunu, konkrétně ptáky a netopýry. [26] [27]

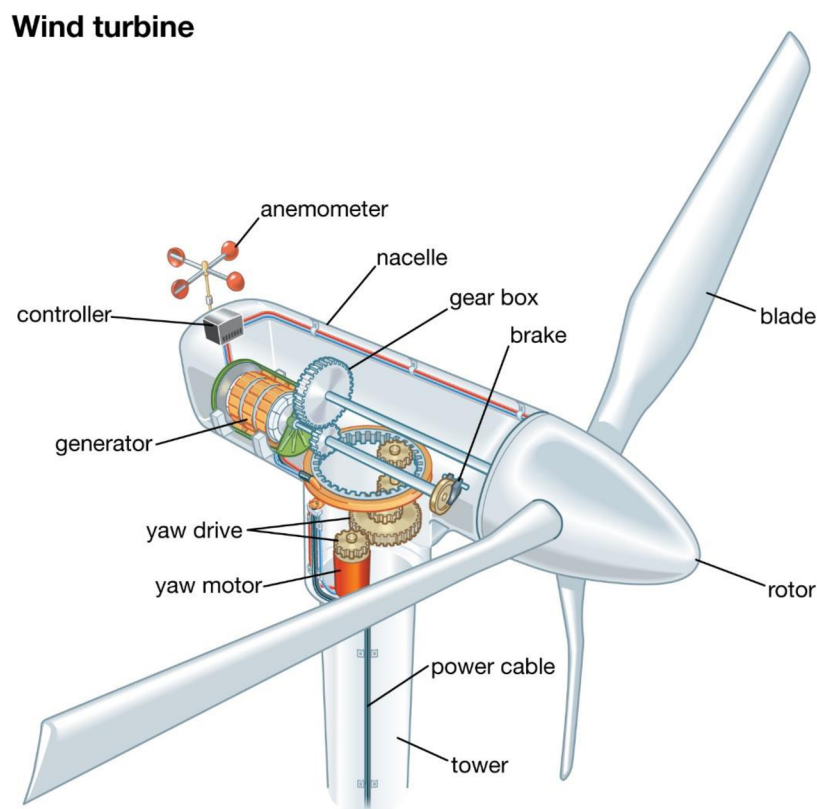
3.9 Výroba elektrické energie v gondole větrné turbíny



Obrázek 10: Schéma funkce větrné elektrárny [28]

Vítr, díky dříve zmíněnému principu podtlaku lopatek, roztáčí celý rotor, který je z nízkých otáček 30-60 otáček za minutu převeden pomocí převodovky na 1000-1800 otáček za minutu na vysokorychlostní hřídeli. K tomuto hřídeli je připevněn generátor, na kterém je rotorem indukovan střídavý proud, pomocí měniče je upraven a následně veden do sítě, kde je odebírán. [29]

3.10 Popis horizontální vztlakové větrné elektrárny



Obrázek 11: Popis vztlakové horizontální větrné elektrárny [27]

Kde Yaw drive a motor tvoří systém pro natočení větrné elektrárny proti směru větru, controller je řídicí jednotka, anemometer je zařízení pro měření rychlosti větru a nacelle je gondola.

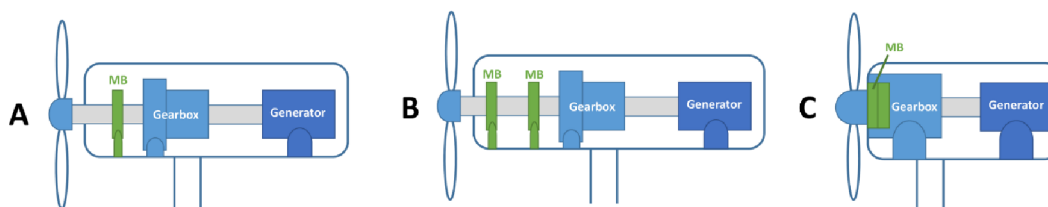
Větrná elektrárna se skládá z rotoru se třemi lopatkami, který zajišťuje pohyb nízkorychlostní hřídele. V gondole je uložena brzda, která v případě přetížení může elektrárnu zastavit, vysoko rychlostní (1000-1800 otáček/min) a nízkorychlostní (30-60 otáček/min) hřídel. Dále jsou v ní ložiska pro uložení hlavní hřídele, převodovka, která zajišťuje převod otáček, spojka a generátor, který pomocí soustavy stacionárních a rotujících elektromagnetů konvertuje krouticí moment vysokorychlostní hřídele na elektrickou energii. Ve věži se nachází servomotor pro natočení turbíny a kabel pro přepravu vyprodukované energie. Pohyb rotoru je řízen programovatelnou jednotkou, která umožňuje pohyb od rychlosti větru 13 km/h až do rychlosti 90 km/h, kdy je pohyb regulován natočením turbíny, aby nedošlo k poškození větrné elektrárny. Samotná věž je obvykle dutá, vyrobená z oceli nebo betonu a několik desítek metrů vysoká. Se zvyšující se výškou vzrůstá i rychlost větru. [14]

3.11 Systémy uložení rotujících částí v gondole větrné elektrárny

Větrná elektrárna může využívat buď převodovku pro zvýšení otáček, což je z historického hlediska obvyklé řešení, nebo může využívat takzvaný přímý chod. Převodovka představuje levnější variantu, nicméně kvůli její časté poruchovosti a ušlým ziskům při odstávkách, může být výhodnější přímý chod. Při provozu přímého chodu musí být soustava hlavní hřídele a generátoru dimenzována na zásadně vyšší moment. Celkové náklady jsou vyšší, hnací systém je ale kvůli absenci převodovky spolehlivější, což zásadně snižuje míru odstávek větrné elektrárny. [30]

3.11.1 Uložení s převodovkou

Pro uložení hlavní hřídele jsou využívány systémy uložení s jedním (A) nebo s dvěma (B) ložisky. V systému se dvěma ložisky (B) se nachází druhé ložisko před generátorem a pohlcuje ostatní zatížení, aby na převodovku působil jen krouticí moment. Při použití dvou ložisek ale vznikají vyšší nákupní náklady, a navíc je systém velice náchylný na případnou nepřesnost uložení, například z důvodů průhybu hřídele. Možné je i uložení hlavního ložiska přímo do převodovky (C). Díky tomu vznikne kompaktní design, který nevyžaduje hlavní hřídel. To redukuje hmotnost celé gondoly. Z důvodu nepřesností v uložení převodovky se zbytkem gondoly je tento design náchylný na únavové opotřebení. Převodovka je více namáhána a zatížení je hůř distribuováno. [30]



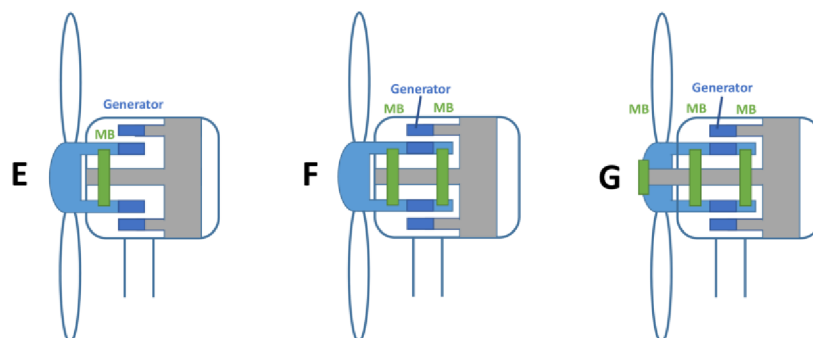
Obrázek 12 Schéma používaných uložení hlavní hřídele s převodovkou [30]

3.11.2 Přímý chod

Konstrukce rotoru je napojena přímo na generátor pomocí ložisek, které mimo přenášení zatížení na gondolu zaručují i symetrické uložení rotoru vůči statoru. Za zmínku stojí fakt, že toto řešení je finančně náročnější třeba kvůli nutnosti dimenzování generátoru a části hnacího ústrojí na vyšší momenty oproti převodovce, která snižuje moment a zvyšuje otáčky. Generátor poté generuje střídavý elektrický proud o nižší frekvenci, který musí být převeden měničem, než je možné ho zúžitkovat, což přináší další kapitální náklady oproti uložení s převodovkou.

Další nevýhodou je že při poruše některé z hlavních součástí gondoly musí být sundána celá gondola. Obrovské plus ale spočívá v tom, že nejproblematictější součást hnacího ústrojí, tedy převodovka, není v řešení přímého chodu obsažena. Zatím není jasné, jestli je přímý chod lepší než chod s převodovkou nebo naopak. Společnosti Siemens Gamesa a GE obě nabízejí mořské větrné elektrárny jen s přímým chodem, Vestas zato dávají přednost řešením s převodovkami s nižšími převody. [30]

Obě řešení mají své výhody a nevýhody, které jsou více nebo méně podstatné podle podmínek provozu a velikosti elektrárny. Dle mého porozumění vědecké práce je přímý chod spíše využíván u velkých elektráren se špatným přístupem, pracujících v moři.



Obrázek 13: Schéma využívaných uložení hlavní hřídele bez převodovky [30]

Pro uložení jsou využívány uložení s 1 (E), 2 (F) a 3 (G) ložisky.

3.11.3 Typy využívaných ložisek

Soudečková ložiska snesou vysoká radiální zatížení a mají samo-naklápěcí funkci. Kombinace dvou soudečkových ložisek umožňuje pohlcení i axiálního zatížení.

Kuželíková ložiska, která pohltní axiální i radiální zatížení, jsou často využívána ve dvojicích. Kvůli geometrii mají vždy i axiální složku síly.

Válečková ložiska mají velice nízké tření a snesou vysokou radiální zátěž, nelze na ně ale působit axiálně.

Toroidní ložiska mají zvýšenou radiální únosnost a částečnou schopnost naklopit se.

Minimálně jedno ložisko musí být axiálně zajištěné, pokud jsou ale zajištěny dvě, tak při tepelné roztažnosti vzniká přídavné napětí a deformace. Proto je nutné mít jedno ložisko axiálně zajištěné a druhé volné. Ložiska jsou také radiálně předepnutá, aby více elementů vstoupilo do záběru a předešlo se skluzu. [30]

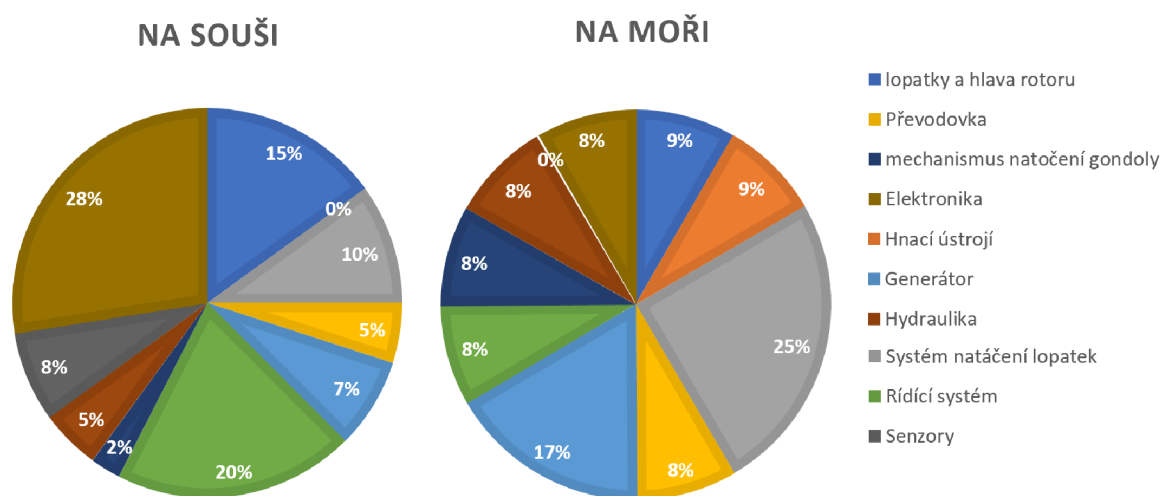
3.11.4 Historie uložení hřídelí větrných elektráren

V historii nejvíce používanými ložisky u rotoru byly dvouřadá soudečková a u generátoru soudečková, válečková nebo dvouřadá kuželíková. Dvouřadá soudečková ložiska jsou stále u strany rotoru využívána, u generátoru se pak vyskytuje válečkové. Existuje ale i možnost dvou kuželíkových ložisek, jedno u rotoru a jedno u generátoru, nebo možnost dvouřadého kuželíkového u rotoru a válečkového u generátoru. Nově se v sestavách jednoho ložiska začalo využívat dvouřadá kuželíkové nebo třířadá válečkové. Nakonec SKF roku 2019 doporučuje pro sestavu dvou hlavních ložisek volné toroidní ložisko a axiálně vázané dvouřadá soudečkové. Pro případ, kdy hlavní ložisko je součástí převodovky, je využíváno dvojitého kuželíkového nebo trojitého válečkového ložiska.

Pro novější systémy s přímým chodem jsou využívána ložiska toroidní, válečková a kuželíková v jedné nebo dvou řadách v každém bodě uložení. [30]

3.12 Statistika poruch větrných elektráren

Grafy jsou vytvořeny z dat z osmnácti veřejných databází monitorujících 18 000 turbín v průměrném intervalu 5 let.

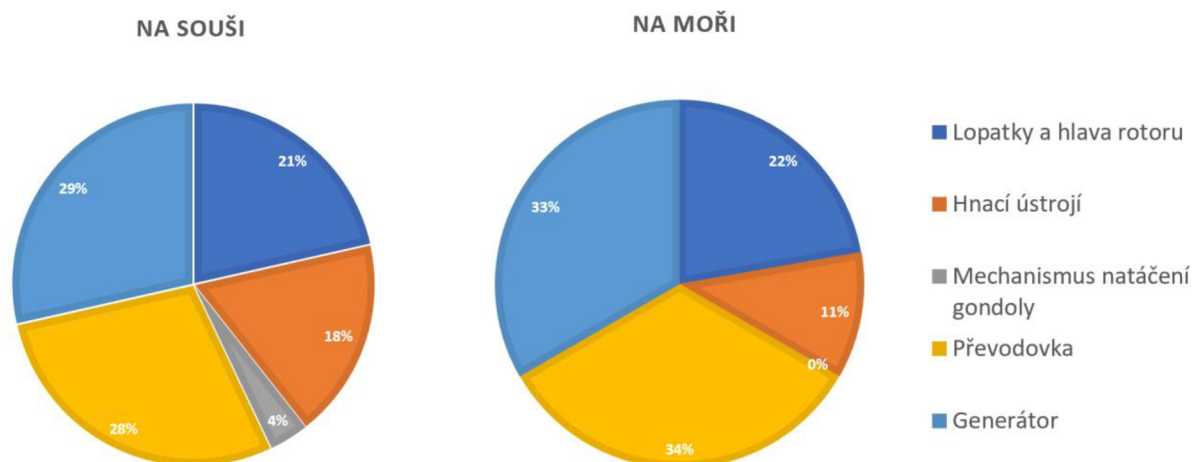


Graf 2: Graf poměrů četnosti odstávek turbíny kvůli poruchám v různých systémech turbíny dle: [31]

Z grafů je patrné, že hodnoty poměrných odstávek elektráren na souši se u některých systémů výrazně liší, oproti těm na moři. Jedním z důvodů jsou rozdílné provozní podmínky jako rychlost větru, vlhkost vzduchu a chemická agresivita prostředí. Dalším důvodem je nižší počet provedených měření elektráren na moři 3,67 % z celé databáze, díky čemuž jsou data zatížena vyšší odchylkou. Nejvýraznější problém je, že jedna ze čtyř databází, mapující poruchy elektráren na moři, obsahovala sérii zmetkových součástí, která byla ve všech elektrárnách té firmy vyměněna. Kvůli tomu jsou poruchy převodovky hnacího ústrojí a

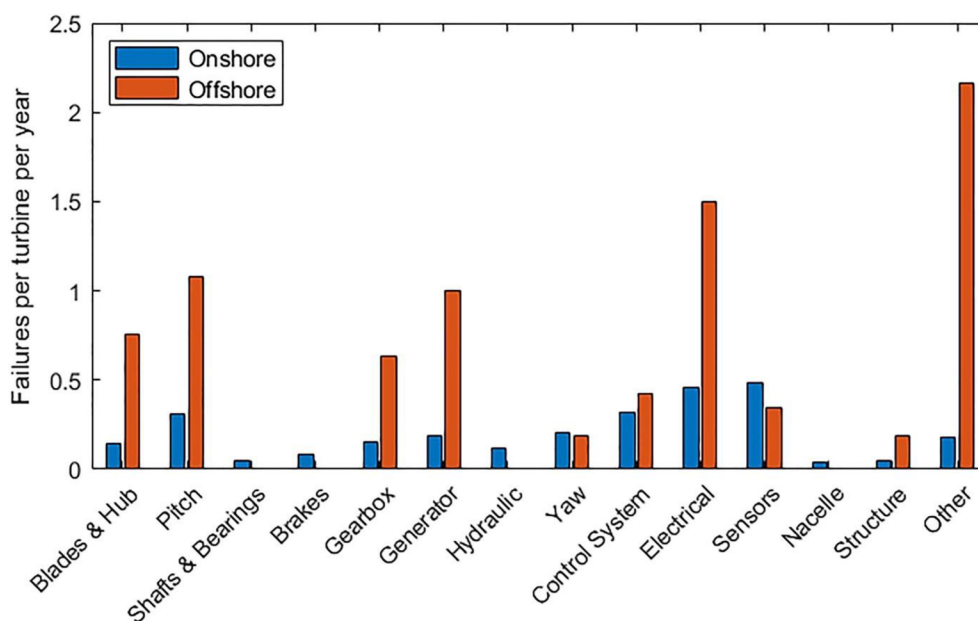
generátoru v podstatně vyšším zastoupení v grafu „na moři“, který je proto zavádějící. Zásadními jsou pro tuto práci grafy pozemních elektráren.

I přes ovlivněný graf je ale možné si udělat základní představu ohledně zastoupení poruch při provozu. Pro potřeby této práce se zaměříme hlavně na rotor, převodovku a hnací ústrojí.



Graf 3: Graf porovnávací poměrné doby výpadků z provozu z důvodu poruchy dle rozdílných systémů větrné elektrárny dle: [31]

Na těchto grafech je patrné, že i když poruchy v elektronice, senzorech a softwaru elektrárny jsou časté, co se týče času potřebného na jejich opravu, nejsou tolik významné. Kvůli výměně mechanických částí musí být elektrárna nejen odstavena na velice dlouho, také jsou tyto součásti značně drahé, a proto je na místě monitorovat jejich technický stav a naplánovat dle získaných dat údržbu, kontrolu nebo odstavení součástí.



Graf 4: Graf průměrného počtu poruch ročně dle systémů [31]

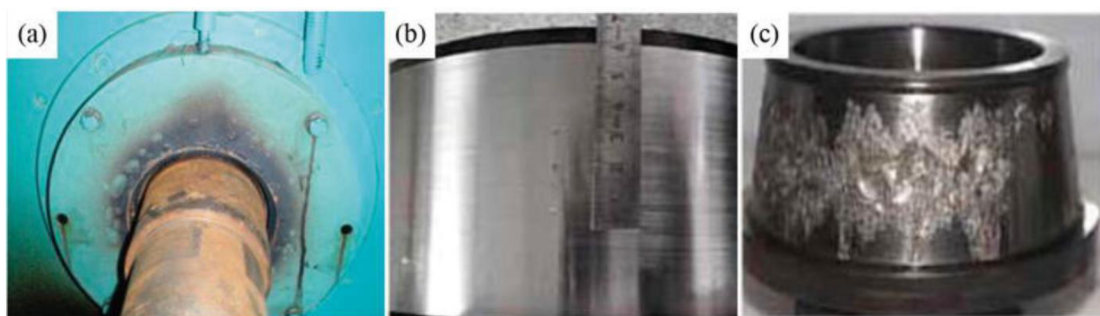
V tomto grafu vidíme průměrné množství ročních poruch systémů elektráren. Grafy s procentuálním zastoupením jsou užitečné pro vytvoření představy, bez kvantifikace ale nepodávají úplnou informaci o výskytu poruch.

Z důvodu rozdílnosti struktury jednotlivých databází je například kolonka „other“ (další) poměrně vysoká, ne každá databáze totiž rozlišovala poruchy do tolika tříd, a hlavně u elektráren na moři, které zkoumaly jen 4 databáze z 18, to hraje podstatnou roli. [31]

3.13 Přehled možných poruch hlavních ložisek a převodovky, jejich příčiny a stručné vysvětlení mechanismů hlavních poruch

Při vzniku vady se začnou mechanické součásti zahřívat, produkovat vyšší hluk, začnou kmitat a značně se sníží vyráběný elektrický výkon a účinnost získávání energie z větru. V takovémto stavu větrná elektrárna operuje, dokud nedojde k rozsáhlému poškození, které znemožní chod elektrárny.

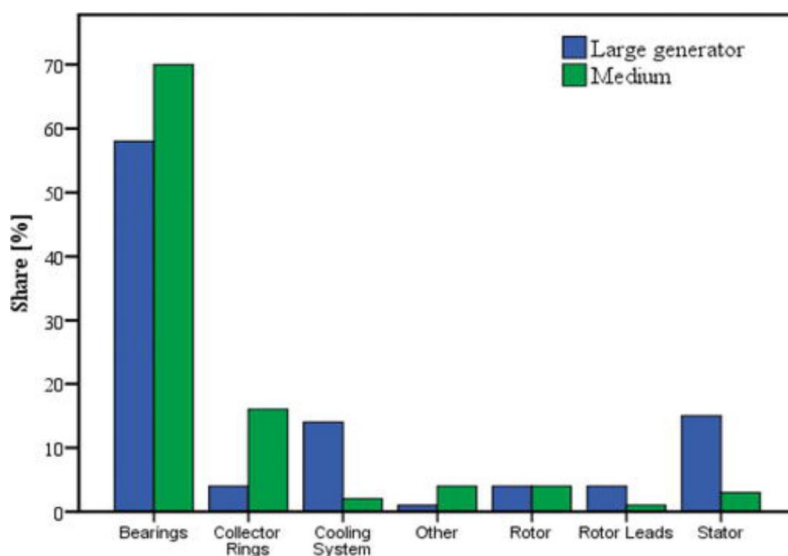
3.13.1 Porucha převodovky:



Obrázek 14: Poruchy převodovky [32]

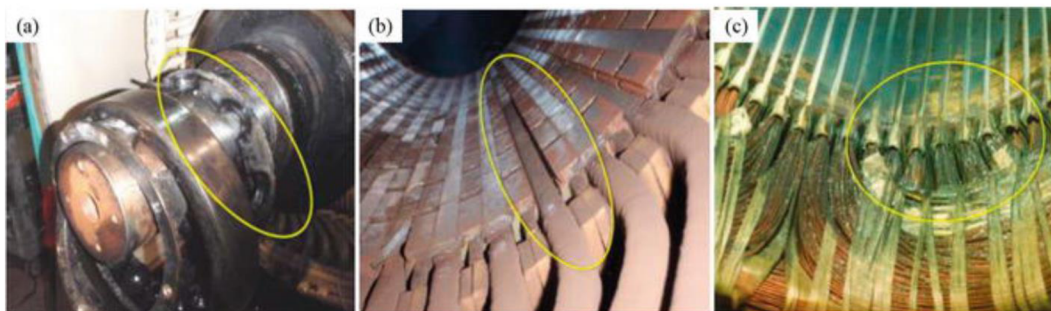
Mezi nejčastější poruchy převodovky patří poruchy ložisek, poruchy ozubených kol, poruchy spojené s opotřebením dosedacích povrchů, trhliny, poruchy z důvodu nedostatečného mazání a další. Na obrázku (a) je porucha převodovky a na obrázcích (b) a (c) poruchy ložisek.

3.13.2 Poruchy generátoru



Graf 5: Poměrné zastoupení poruch součástí v generátoru [32]

Na grafu 5 je patrné, že nejvýznamnější možnou poruchou je porucha ložiska.

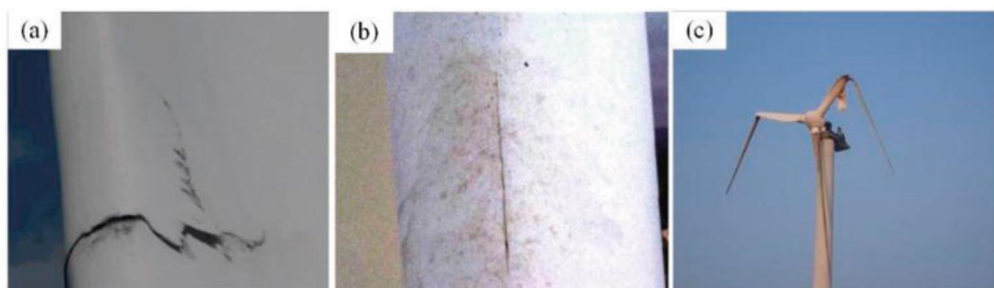


Obrázek 15: Poruchy generátoru [32]

Na obrázku 15 jsou vyobrazeny poruchy (a) ložiska, (b) magnetu, (c) kontaminace vodičích drátů.

Pro tuto práci významné jsou hlavně poruchy ložisek u generátoru

3.13.3 Přehled poruch lopatek:



Obrázek 16: Poruchy lopatek [32]

Povrchová trhlinka hrany lopatky (a), postupující únavové opotřebení lopatky (b), lom lopatky (c)

Kvůli vysoké odstředivé síle při zvýšených otáčkách jsou lopatky rotoru náchylné na únavové poškození nebo dokonce i na poškození z důvodu mezního stavu pevnosti, a proto je zapotřebí otáčky monitorovat a regulovat při příliš silném větru, buď natočením elektrárny nebo dokonce brzdou.

3.13.4 Mechanismy poškození jednotlivých částí větrné elektrárny a vhodné metody pro detekci vad

Objects	Function	Failure mode	Cause	Detection method
Blades	Capture wind	Fracture, edge crack, stuck, motor failure, pitch bearing failure	Fatigue loads higher than anticipated, extreme loads, environment influences, imbalance	Excessive vibration sensed by rotor bearing accelerometer in hub; high stresses recorded by operating instrumentation
Main shaft	Transmit large torque	Fracture	Fatigue loads underestimated; operation of WTG at off-design conditions; material properties below specs	Low-speed sensor; bearing vibration sensor
Yaw system	Enable the nacelle to rotate on the tower	Increased bearing friction	Cracked roller; galled surface; lack of lubrication	Yaw error signal
High-speed shaft	Stop and hold the shaft during shutdown and operation	Low or higher brake torque	Environment effect	Tachometer
Gearbox	Transmit torque with speed increase	Internal gear tooth failure	Fatigue loads underestimated; exceeding design load; improper material; loss of lubricating oil	Vibration sensor
Hub assembly	Transmit torque from blades	Structure failure; bolt failure	Excessing design loads; excessive preload; stress corrosion	Rotor bearing accelerometer; periodic inspection for loose or missing bolts
Oil seals	Retain oil in main bearing housing; exclude foreign matter	Cut or wear in lip	Installation damage; wear	Low oil switch

Tabulka 3: Možné příčiny poškození součástí větrné elektrárny [32]

Tabulka 3 podává přehled nejobvyklejších příčin poškození a možností jejich detekce

Mechanical components	shaft	fatigue	[47]
	gear	contact fatigue, bending fatigue	[48–50]
	bearing	rolling contact fatigue, white etching crack, skidding	[51–54]

Tabulka 4: Hlavní módy poškození mechanických částí hnacího ústrojí a převodovky větrné elektrárny [33]

Pro tuto práci jsou podstatné mezní stavy mechanických komponent.

Mezní stav únavového lomu hřídele je způsoben cyklickým namáháním hřídele na tah/tlak nebo v tomto případě ohyb



Obrázek 17: Mezní stav únavového lomu hřídele [34]

Ozubená kola – únava v dotyku (contact fatigue)

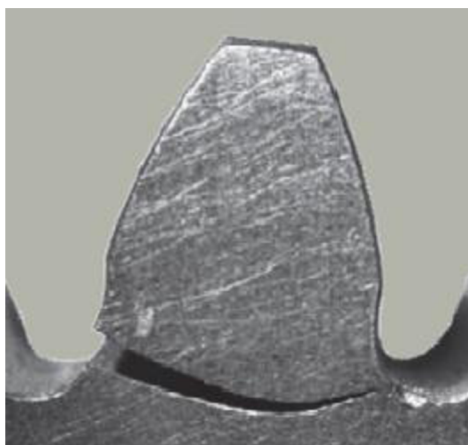


Obrázek 18: Opotřebená ozubená kola způsobená kontaktní únavou [35]

Únavové opotřebení u ozubených kol v dotyku vzniká v důsledku působení vysokých tlaků při interakci dvou ozubených kol. Síly jsou přenášeny přes malé nekonformní plochy a kvůli tomu vznikají tlaky v jednotkách GPa. Opakované působení těchto tlaků vytváří trhliny pod povrchem a způsobuje porušení materiálu. [36]

Ozubená kola – únava na ohyb (bending fatigue)

Lom na patě zubu ozubeného kola způsobený vyčerpáním únavového života namáháním na ohyb.



Obrázek 19: Lom v patě zubu ozubeného kola [37]

Při provozu dvou ozubených kol jsou také namáhány paty zubu na ohyb. V důsledku opakovaného namáhání je na patě zubu kumulováno poškození, které při dosažení určité hodnoty vede k únavovému lomu. [36]

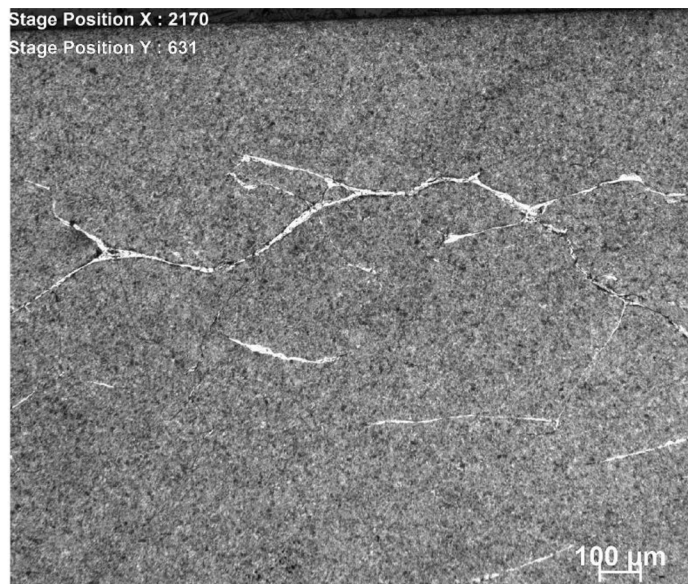
Ložiska

Pitting je způsoben vznikem podpovrchových únavových trhlin při opakovaném namáhání nekonformních (velice malých) povrchů vysokými tlaky. Trhliny vznikají v místě nejvyššího smykového napětí pod povrchem, kde se šíří a spojují. Při propojení trhlin částice vypadne a vznikne důlek (pit). U běžných ložisek se jedná o nejzastoupenější poruchový mechanismus. [36]



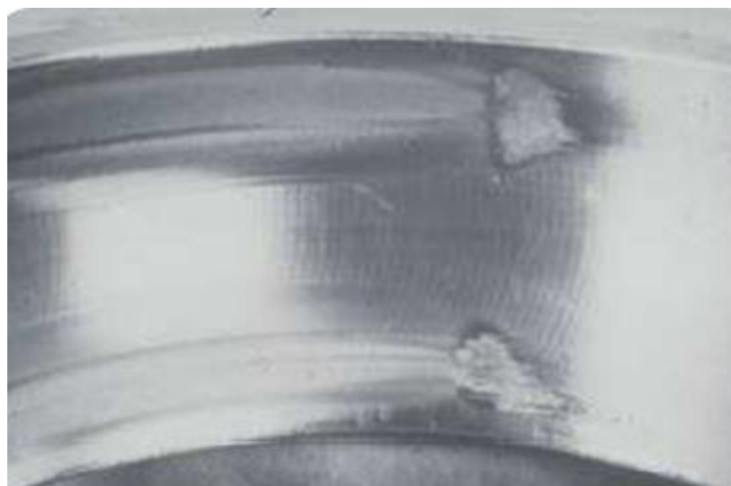
Obrázek 20: Mezní stav únavového opotřebení vnějšího kroužku ložiska [38]

Opotřebení s bílými prasklinami (white etching cracks) je součástí dotykového únavového opotřebení v ložisku. Působením vysokého tlaku dochází k plastické deformaci ve struktuře materiálu. Vyskytuje se hlavně u rozměrnějších ložisek při dlouhodobějším působení vyššího tlaku, než na který bylo ložisko dimenzováno. Velké ložisko má totiž více poruch krystalické mřížky a více vměstků, které zvyšují špičkový tlak v kritických bodech.



Obrázek 21: Opotřebení s bílými trhlinami [39]

Skidding je adhezivní opotřebení kroužku ložiska způsobené skluzem valivých elementů v ložisku. Vzniká při působení nedostatečného tlaku na valivé elementy, které nejsou nuceny k rotaci, ale pohybují se pomocí rotace a kluzu. Projevuje se otěrem a nadměrným hlukem při provozu. Lze tomu předejít působením vyšší zátěže nebo snížením průtoku maziva. [40]



Obrázek 22: Adhezivní opotřebení ložiska [41]

3.14 Základní defektoskopické metody – nedestruktivní diagnostika [42]

3.14.1 Metoda vizuální

Diagnostiku lze provést okem nebo detektory citlivými na světlo, které bylo odraženo ze zkoumaného předmětu. Tato metoda je dobrá jen pro odhalování povrchových defektů, při vyhodnocování vady lidským okem může lehce dojít k chybě.

3.14.2 Metoda kapilární

Povrch kontrolovaného předmětu je pokryt normálním nebo fluorescenčním barvivem, viditelným jen pod UV světlem. Barva díky kapilárnímu působení zateče do necelistvostí v povrchu tělesa a při rozsvícení UV lampy se narušený povrch zvýrazní. Odhalí jen povrchové vady.

3.14.3 Magnetické metody

Feromagnetická součást je zmagnetizována a posypána feromagnetickými částicemi. Ty se poté shlukují u defektů a označují jejich polohu. Defekty lze také objevit pomocí elektrického senzoru magnetického pole. Metoda je citlivá jen na poruchy v povrchové a podpovrchové vrstvě.

3.14.4 Elektromagnetická defektoskopie vířivými proudy

Pomocí magnetického toku budící cívky jsou v kontrolovaném objektu vybudeny vířivé proudy. Jejich hustota se mění při průchodu defektem materiálu.

Funkce je podmíněna vodivostí materiálu. Metoda je vůči necelistvostem citlivá, vyžaduje ale zkušenosti obsluhy a je vyžadován dobrý přístup k objektu ze všech stran.

3.14.5 Ultrazvukové metody

„Vysokofrekvenční akustické pulzy ze sondy prostupují objektem a odrážejí se zpět na strukturální rozhraní.“ (ISBN 80-7300-158-6 str 24)

Jasná přednost metody je ve schopnosti najít defekt uvnitř zkoumaného předmětu s vysokou citlivostí. Je potřeba velice zkušeného pracovníka pro nastavení zařízení a vyhodnocení výsledků. Důležitá je i orientace trhliny k signálu.

3.14.6 Akustické emise

Pokud při chodu součástí dojde k vytváření a rozšiřování trhliny, piezoelektrické senzory zachytí elastické vlny, což předpoví vznikající vadu dříve, než dojde k meznímu stavu a nevratnému poškození. Signál zachycený senzory ale musí být průběžně zpracováván.

3.14.7 Defektoskopie prozařováním

Do testovaného objektu jsou vyzařovány rentgenové vlny nebo Gamma záření a necelistvosti v objemu objektu mohou ovlivnit, jak je materiál schopný záření absorbovat. Při výskytu poruchy struktury naměříme na výstupu rozdílnou hodnotu záření než u „zdravé“ součásti.

Tato metoda není limitována vlastnostmi kovů a je použitelná pro většinu materiálů, dokonce i kompozity. Metoda může být škodlivá a v delším vystavení člověka i zdraví nebezpečná. Natočení trhliny vůči signálu ovlivňuje naměřené výstupní hodnoty, a je proto vyžadováno značných zkušeností pro vyhodnocení vady.

3.14.8 Infračervená defektoskopie

Změna ve struktuře a vnějších rozměrech tělesa způsobí tepelný výkyv, který je zachycen na povrchu tělesa pyrometrem nebo termokamerou.

Tato metoda je účinná pro většinu materiálů i kompozitů, je velice citlivá a může monitorovat i větší plochy. Zkoumaná součást ale nesmí být příliš tenká a k vyhodnocení vad je potřeba zkušený pracovník.

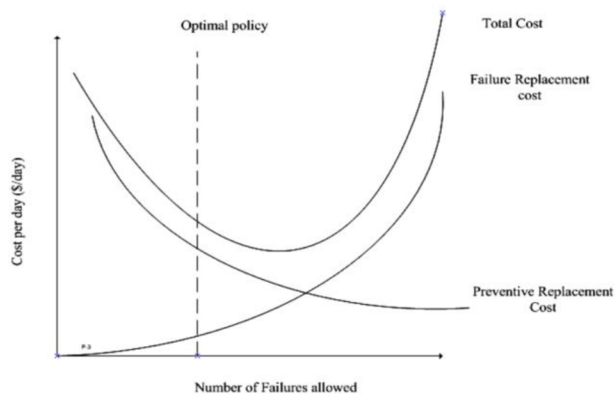
3.15 Údržba větrných elektráren

Standardem pro monitorování technického stavu velkých větrných elektráren 4000 kW a více, pokud nějaké vůbec mají, je diagnostika pomocí snímání vysokofrekvenčních vibrací. V České republice se ale vyskytují jen malé a střední větrné elektrárny a z většiny nepoužívají žádnou diagnostickou metodu pro monitorování technického stavu.

Vibrodiagnostika je založena na snímání vibrací a rázů které indikují špatný chod rotační součásti. Vibrující součásti vytváří mechanické vlny, které je možno zachytit senzory umístěnými na povrchu součásti. Pro zvýraznění vysokofrekvenčních složek vibrací vyhodnocujeme efektivní hodnotu zrychlení. Velikost vibrací závisí na dalších diagnostických veličinách, jako například otáček, kroutícího momentu, teploty, provozního tlaku atd. [42]

3.15.1 Údržba po uplynutí časového intervalu

Obvyklý model údržby chodu elektrárny je buď nahrazení celého systému po vypršení životnosti jedné z jeho součástí, anebo sledováním životnosti každé součásti a nahrazení přímo té součásti při vypršení její odhadované životnosti. [43]



Graf 6: Náklady spojené s plánovanou údržbou [43]

Na grafu 6 je patrné, že příliš konzervativní provoz s nízkou šancí na poruchu může být srovnatelně nákladný jako nezodpovědný provoz po vyčerpání odhadované únavové životnosti součásti a výhodné je řešení někde mezi. Je potřeba ale mít na paměti, že čas odstávky z důvodu náhlé poruchy bude vyšší, než čas odstávky z důvodu plánované výměny.

Pokud se provozovatel bude striktně řídit odhadovanou únavovou životností součásti, nebude schopný využít jejího plného potenciálu a v některých případech stejně riskuje poruchou.

Stanovená životnost komponenty úzce souvisí s procentuální šancí, že se komponenta za správných provozních podmínek opravdu nepoškodí. Při statistickém vyhodnocení měření životnosti výrobcem například 99 % ložisek vydrželo pracovat při definované zátěži 7 000 hodin, 60 % ložisek se dostalo přes interval 20 000 hodin.

Pokud se ale komponenta porouchá, náklady na její nahrazení a nahrazení dalších škod jsou mnohonásobně vyšší. Navíc je elektrárna při takovéto poruše neschopná provozu mnohem delší dobu než při plánované výměně.

3.15.2 Údržba podmíněná technickým stavem komponenty (CBM)

Východiskem by mohla být údržba podmíněna technickým stavem komponenty (Condition based maintenance). Náhrada mechanických součástí větrných elektráren a jejich údržba jsou nákladné a provozovatelé se pokouší snížit náklady spojené s provozem na minimum pomocí metod monitorování technického stavu. Ty umožňují předpovědět selhání komponenty vyhodnocením průběžně měřených dat, a tak dají provozovateli šanci spravit nebo odstavit součást dříve, než vznikne porucha. [44]

Vývoj kontinuálně monitorujících systémů v tomto oboru odstartoval požadavek pojišťovny Allianz na monitorování vybraných součástí pro snížení počtu poruch. Hlavní význam byl v regulaci chodu elektrárny při příliš silném větru, kdy se elektrárna musí zastavit, aby se předešlo poruše.

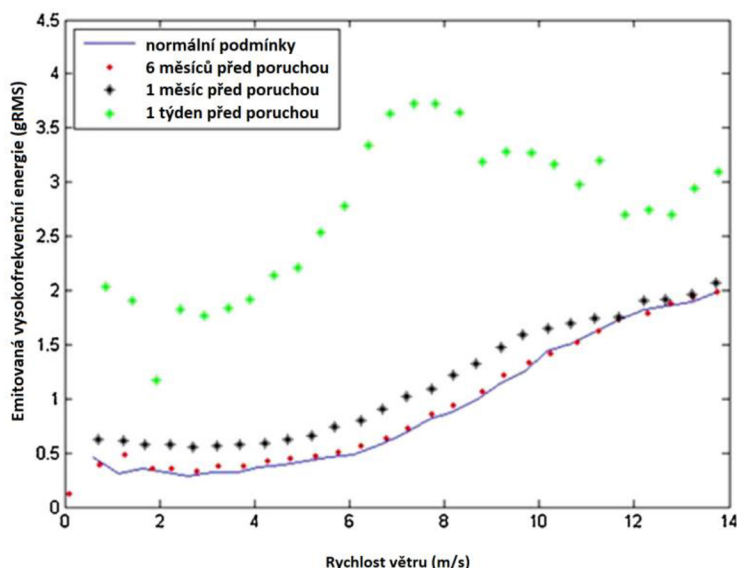
Měřicí místo	Monitorovaný prvek	Požadováno
Akcelerometr hlavního ložiska	Hlavní ložisko rotoru	Ano
Akcelerometr ložisek a planetárních převodů převodovky	Převodovka	Ano
Akcelerometr ložisek a středních převodů převodovky	Převodovka	Ano
Akcelerometr ložisek a vysokorychlostních převodů převodovky	Převodovka	Ano
Akcelerometr vnitřního ložiska generátoru	Generátor	Ano
Akcelerometr vnějšího ložiska generátoru	Generátor	Ano
Akcelerometr vychýlení gondoly	Měření náklonu gondoly od kolmice	Ne, ale doporučeno. (Požadováno pro certifikovaný systémem Allianz)
Otáčkoměr	Měření otáček rotoru	Ano
Otáčkoměr	Měření otáček turbíny	Ano
	Elektrické veličiny výkonu	Ano. Získávají ze SCADA nebo řídicího systému.
	Směr natočení gondoly	Ano. Získávají ze SCADA nebo řídicího systému.
	Rychlost větru	Ano. Získávají ze SCADA nebo řídicího systému.

Tabulka 5: Požadavek na měření veličin pro snížení poruchovosti pojištěných větrných elektráren [45]

Scada (Supervisory control and data acquisition) – systém pro ovládání parametrů větrné elektrárny a sbírání provozních dat. Sbírá data o průměru, minimu, maximu a derivaci výkonu (P), zdánlivého výkonu (Q), úhlu natočení lopatek (β), úhlové rychlosti (ω), rychlosti větru (u) a teploty okolí (T). [46]

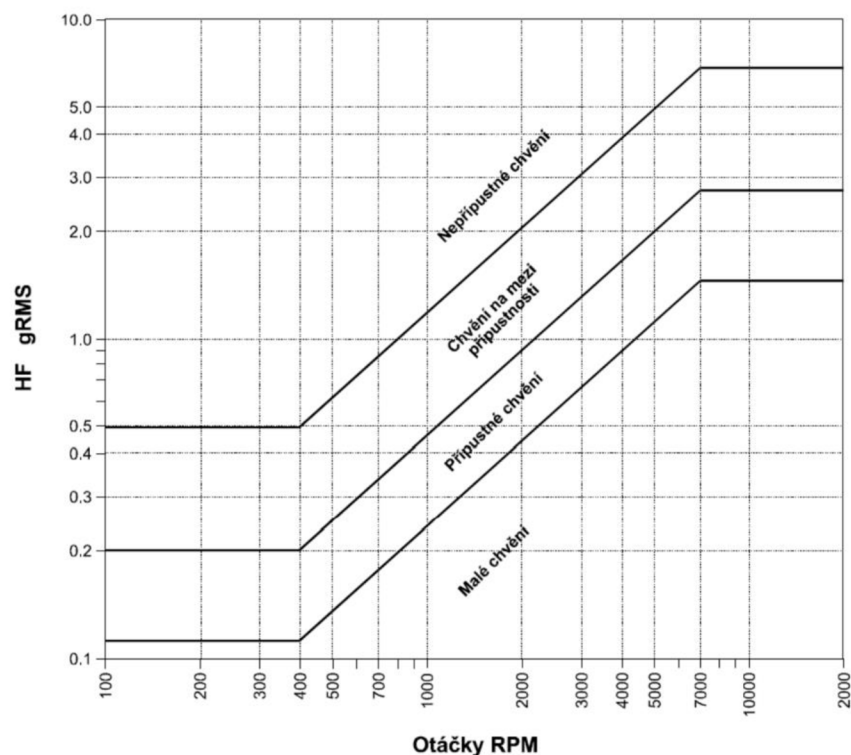
Od doby stanovení těchto požadavků byly aplikovány další měřicí systémy, které jsou schopny předpovědět poruchu. Vhodné základní diagnostické metody, použitelné pro monitorování stavu komponent, jsou detekce vibrací, jejíž důležitou podtřídou je akustická emise a infračervená defektoskopie, která umožňuje měřit lokální změnu teploty ve struktuře součásti, způsobenou poškozením na mikroskopickém měřítku. Tyto metody jsou účinné hlavně díky jejich možnosti diagnostikovat i při chodu zařízení. Při zastavení větrné elektrárny a generální kontrole může být použita třeba ultrazvuková metoda pro citlivou detekci podpovrchových a vnitřních poškození součástí.

3.16 Příklad detekce vad pomocí monitorování vysokofrekvenčních vibrací



Graf 7: Záznam vysokofrekvenčních vibrací dle: [44]

Na grafu číslo 7 vidíme závislost *emitované vysokofrekvenční energie* v násobcích g ($m \cdot s^{-2}$) (gRMS) na rychlosti větru (m/s), získanou pomocí průběžné vibrodiagnostické analýzy pro čtyři různé stavy systému. Měsíc před poruchou je viditelná mírná odchylka od standardního průběhu a jeden týden před poruchou je viditelná násobná odchylka od normálního provozního stavu jako jasný indikátor rozvíjení únavového poškození hlavního ložiska.



Graf 8: Závislost otáček na přípustných vysokofrekvenčních vibracích [47]

Na grafu číslo 8 je viditelná závislost otáček (1/min) na emitované vysokofrekvenční energii v jednotkách (gRMS) použitelná pro vyhodnocení stavu ložiska. Při nedostatečném mazání nebo vzniku nečistot v mazivu narůstá energie vibrací ve vyšších frekvencích. [47]

3.17 Měření akustické emise na větrné elektrárně

V rámci praktické části bakalářské práce uvádím příklad měření akustické emise na konkrétní větrné elektrárně o výkonu 2000 kW. Pro účely bakalářské práce mi byla panem doktorem Vlašicem poskytnuta data z dvou snímačů akustické emise na soudečkovém (1.) a toroidním (2.) ložisku hlavní hřídele větrné elektrárny v době 4. 3.-10. 4. a provozní parametry větrné elektrárny v uvedeném období. Senzory byly nainstalovány po dohodě s provozovatelem, který s měřením a zpracováním dat souhlasil, nepřál si ale, aby byla elektrárna konkrétně zmíněna.

Pro monitorování provozu byl použit kompaktní dvoukanálový analyzátor akustické emise „DAKEL-ZEDO-22“, který je určen pro detekci spojitě i nespojitě akustické emise. Systém nepotřebuje trvalé připojení k řídicímu počítači.

Může být využit například k detekci a lokalizaci vzniku a rozvoje vad materiálů, za podmínek mechanické, tepelné nebo korozní stimulace, monitorování eroze, koroze, rázů, netěsností a technologických procesů.

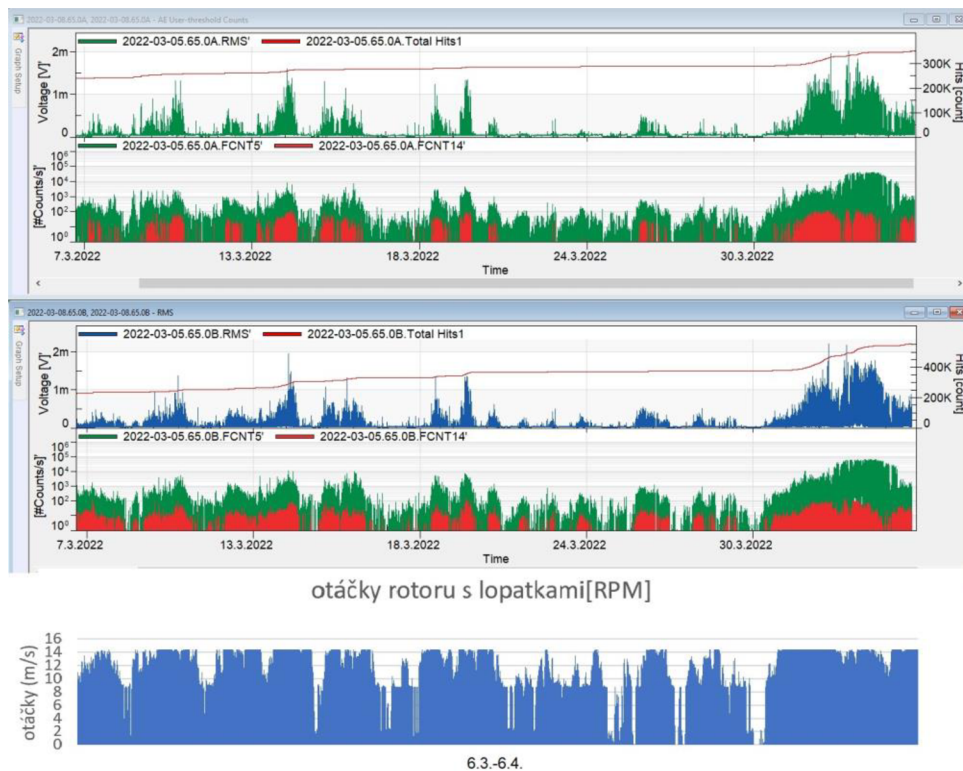
Piezelektrické senzory byly nainstalovány na ložisko obr 23 a snímají průběh akustické emise při funkci větrné elektrárny. Abych byl schopen vyhodnotit vadu, musel bych analyzovat data z delšího období a porovnávat pak klasický očekávaný průběh s průběhem indikujícím vadu, pro ukázkou principu vyhodnocení technického stavu ložiska bude ale i krátké období dostatečné.



Obrázek 23: Senzory akustické emise zapojené na hlavním ložisku

Mezi měřenými provozními podmínkami je teplota okolí [$^{\circ}\text{C}$]; úhel natočení větru [$^{\circ}$]; rychlost větru [m/s]; rychlost otáčení rotoru generátoru [$1/\text{min}$]; výkon [kW] a rychlost otáčení hlavice s lopatkami [$1/\text{min}$].

Hodnoty jsou měřeny v intervalech po deseti minutách a průměrovány na jednu hodnotu. Dle grafu 9 akustická emise reaguje i na malé výkyvy v provozních podmínkách a dá se tedy předpokládat, že pokud by došlo ke generování silného signálu, jako předzvěst poruchy, senzory akustické emise by ho zachytily. Důležité je pak porovnání s provozními podmínkami, jelikož intenzita signálu souvisí i se zatížením elektrárny.



Graf 9: Záznam signálu akustické emise z obou hlavních ložisek v kontextu výkonu elektrárny

Počet milivoltů udává intenzitu zachyceného signálu, červená křivka definuje součet všech naměřených countů (přestupů) a „counts/s“ udává počet přestupů přes nastavenou hladinu intenzity. „FCNT5“ a „FCNT14“ jsou hladiny signálu kde FCNT14 > FCNT5. Hladin je dohromady 16. Počet přestupů definuje, kolik signálů za sekundu bylo dostatečně silných, aby je zachytil snímač nastavený na pátou, respektive čtrnáctou hladinu. Logicky vysokou intenzitu signálu zachytí oba snímače, nízkou intenzitu zachytí jen snímač s nižší hladinou.

Data z dvou hladin tedy vypovídají nejen o četnosti ale také o intenzitě naměřeného signálu. Za povšimnutí stojí, že vysoká hladina RMS (root mean square), zde efektivní hodnota výkonu $P_{ef} = U_{ef} * I_{ef} = \frac{U_{max}}{\sqrt{2}} * \frac{I_{max}}{\sqrt{2}}$ [48] na prvním a třetím řádku, kopíruje hladinu čtrnáct – červená na druhém a čtvrtém řádku a obě jsou také závislé na otáčkách větrné elektrárny. Je důležité zdůraznit, že otáčky jsou z bezpečnostních důvodů regulovány na maximum 14,4 za minutu, proto se otáčky nikdy nedostaly na vyšší hodnotu, i když by to povětrnostní podmínky umožnily.

Díky monitorování elektrárny při bezporuchové funkci je možné následně určit rozmezí, ve kterém se má intenzita signálu za daných podmínek pohybovat. Při vzniku dlouhodobé systematicky rostoucí odchylky od běžného chodu lze předpokládat vznikající poruchu v ložisku.

Na grafech je také vidět, že akustická emise zaznamenala v některých částech zvýšenou intenzitu signálu a zvýšený počet překmitů, nejedná se ale s nejvyšší pravděpodobností o poruchu, nýbrž o signál způsobený provozními podmínkami jako například vysoké otáčky, změna směru proudění větru a další. Vysoká citlivost metody může způsobovat výkyvy, a proto je v některých případech vhodné společně s akustickou emisí využívat i další diagnostickou metodu, například monitorování vibrací anebo infračervenou defektoskopii. Jsme pak schopni vyloučit plané poplachy senzorů. Pokud by začala vznikat porucha, detekovaný signál by byl řádově vyšší i při nižších provozních podmínkách.

Představené záznamy akustické emise odpovídají výsledkům výzkumu metody akustické emise na strojní konstrukce s rotujícími prvky, realizovaných v předešlých letech na Ústavu konstruování FSI VUT v Brně, z příručky „Netradiční aplikace metody akustické emise“. Naměřená data jsou v souladu s dříve uskutečněnými měřeními axiálních i radiálních ložisek a automobilových převodovek, provedenými v Ústavu konstruování v letech 2010-2016. [49]

4 ZÁVĚR

V bakalářské práci jsem stručně shrnul princip získávání energie větru, krátce se zmínil o historii využití větrné energie a rozdělil a popsal větrné elektrárny. Provedl jsem základní analýzu větrné energetiky a poruchovosti součástí větrných elektráren a uvedl nejvýznamnější statistiky. Zaměřil jsem se na vztlakové horizontální větrné elektrárny, které jsem popsal, uvedl jejich klady a zápory a naznačil jsem, jak funguje jejich chod a výroba energie. Vypsal jsem možná uložení rotujících částí větrné elektrárny, včetně chodu s převodovkou, přímého chodu a možných konfigurací a typů využívaných ložisek.

Významnou součástí práce je přehled nejčastějších mechanických poruch hlavních komponent a přehled diagnostických metod, včetně určení těch vhodných. Stěžejní část práce je vymezení možností údržby hlavních součástí větrné elektrárny a doporučení údržby podmíněné technickým stavem komponenty. Využití diagnostických metod pro monitorování technického stavu větrné elektrárny se ukázalo jako lukrativní nástroj pro zlepšení provozu větrných elektráren a snížení jejich poruchovosti, který je zatím výrazněji využíván pouze v zahraničí.

Demonstrace využití diagnostických systémů je uvedena na případu metody vysokofrekvenčních vibrací, která jasně předpověděla selhání hlavního ložiska, v důsledku vyčerpání únavové životnosti ložiska.

Praktickou částí bakalářské práce je názorná ukázka využití akustické emise, zpracování provozních dat větrné elektrárny a jejich začlenění do kontextu s naměřenými hodnotami. Z výsledků vyplývá, že metoda je efektivní pro kontinuální diagnostiku a intenzita signálu je úměrná otáčkám větrné elektrárny. Došel jsem k závěru, že pokud by začalo docházet k výrazné kumulaci únavového poškození, která by vedla k poruše, metoda by to jistě zachytila s předstihem v rozmezí nejméně týdnu.

Po dalším studiu a zkoumání by bylo možné tuto metodu využít, nejlépe v kombinaci s měřením vysokofrekvenčních vibrací, k bezpečnému provozu hlavních ložisek i po uplynutí jejich předpovězené únavové životnosti. To by mohlo dramaticky zlepšit ekonomičnost provozu větrné elektrárny z dlouhodobého hlediska. Hlavním důvodem je rozdílná doba únavové životnosti konkrétního ložiska od statisticky odhadované a také kolísavost chodu větrné elektrárny, která je podmíněna silou větru, a proto se jen těžko odhaduje kolik cyklů elektrárna za 25 let udělá.

5 REFERENCE

- [1] Energostat. In: *Oenergetice.cz* [online]. Třebíč: OM Solutions s.r.o., 2015 [cit. 2022-02-20]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/energostat>
- [2] Více než třetina elektřiny vyrobené v Česku pochází i v létě stále z uhlí. In: *Oenergetice.cz* [online]. Třebíč: OM Solutions s.r.o., 2015 [cit. 2022-02-20]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/energetika-v-cr/vice-nez-tretina-elektriny-vyrobene-v-cesku-pochazi-i-v-lete-stale-z-uhli>
- [3] How Do Wind Turbines Work?. In: *Energy office of energy efficiency & reliable energy* [online]. Washington, DC 20585: U.S. department of energy, 2014 [cit. 2022-02-08]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/eere/wind/how-do-wind-turbines-work>
- [4] Why does wind blow?. In: *Scijinks* [online]. Boulder Colorado: NASA Space Place team, 2002 [cit. 2022-04-18]. Dostupné z: <https://scijinks.gov/wind>
- [5] DOUBEK, Jan. Historie větrných mlýnů ve světě. In: *Povětrník.cz* [online]. Býkovice, 2016 [cit. 2021-12-21]. Dostupné z: <http://www.povetrnik.cz/poznavame-historii-vetrnych-mlynu-a-cerpadel>
- [6] History of wind power. In: *Eia* [online]. Washington, DC 20585: U.S. Energy Information Administration, 1995 [cit. 2021-08-11]. Dostupné z: <https://www.eia.gov/energyexplained/wind/history-of-wind-power.php>
- [7] MÁRTIL DE LA PLAZA, Ignacio. History of Windpower: From its Origins to World War II. In: *OpenMindBBVA* [online]. Vizcaya: BBVA Group, 2012 [cit. 2021-11-08]. Dostupné z: <https://www.bbvaopenmind.com/en/technology/innovation/history-of-windpower-from-origins-to-world-war-ii>
- [8] FRANKSHE, Ben. Windpump. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2021-11-08]. Dostupné z: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Windpump.jpg>
- [9] KOČ, Břetislav. Větrné elektrárny I. – Historie do roku 1975. In: *Tzvinfo* [online]. Praha: Topinfo s.r.o., 1999 [cit. 2021-11-08]. ISSN 1801-4399. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/vetrna-energie/13452-vetrne-elektrarny-i-historie-do-roku-1975>

- [10] WAGNER, Vladimír. Větrné elektrárny včera, dnes a zítra (díl 1.). In: *Oenergetice.cz* [online]. Třebíč: OM Solutions s.r.o., 2015 [cit. 2021-11-08]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/vetrne-elektrarny/vetrne-elektrarny-vcera-dnes-zitra-dil-1>
- [11] Větrné a vodní mlýny. In: *Informační centrum hranice* [online]. Hranice: Město Hranice, 2015 [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: <https://infocentrum-hranice.cz/vetrne-a-vodni-mlyny/>
- [12] KOMÁREK, Jiří. Větrný mlýn, Přemyslovice, okres Prostějov. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2022-05-02]. Dostupné z: [https://cs.m.wikipedia.org/wiki/Soubor:V%C4%Btrn%C3%BD_ml%C3%BDn,_P%C5%99emyslovice,_okres_Prost%C4%Bjov_\(02\).jpg](https://cs.m.wikipedia.org/wiki/Soubor:V%C4%Btrn%C3%BD_ml%C3%BDn,_P%C5%99emyslovice,_okres_Prost%C4%Bjov_(02).jpg)
- [13] Větrné elektrárny - princip, rozdělení, elektrárny v ČR. In: *Oenergetice.cz* [online]. Třebíč: OM Solutions s.r.o., 2015 [cit. 2021-11-29]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/typy-elektaren/vetrne-elektrarny-princip-cinnosti-zakladni-rozdeleni>
- [14] How a Wind Turbine Works. In: *Energy.gov* [online]. Washington, DC 20585: Energy Efficiency & Renewable Energy, 2014 [cit. 2021-11-29]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/eere/wind/how-do-wind-turbines-work>
- [15] VERTIKÁLNÍ DARRIEOVA TURBÍNA. In: *Svět energie* [online]. Praha: ČEZ, a. s. [cit. 2021-12-21]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/obnovitelne-zdroje-energie/vetrne-elektrarny-podrobne/vertikalni-darrieova-turbina/vyklad>
- [16] STAHLKOCHER. Darrieus rotor. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2022-05-02]. Dostupné z: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:H-Darrieus-Rotor.jpg>
- [17] DU CALVADOS, Hugues. Savonius rotor. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2022-05-02]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Savonius-rotor_en.svg
- [18] Vertikální Savoniova turbína. In: *Svět energie* [online]. Praga: ČEZ, a. s. [cit. 2022-12-21]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/obnovitelne-zdroje-energie/vetrne-elektrarny-podrobne/vertikalni-savoniova-turbina/vyklad>

- [19] Savonius rotor. In: *Pixabay* [online]. Ulm: Canva, 2010 [cit. 2021-12-21]. Dostupné z: <https://pixabay.com/cs/photos/savonius-rotor-3084781>
- [20] KOČ, Břetislav. Malá větrná elektrárna AVEE Hranice 11 kW na lokalitě u Bystřice pod Hostýnem. In: *Tzbinfo* [online]. Praha: Topinfo s.r.o., 1999 [cit. 2022-12-30]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/vetrna-energie/14174-vetrne-elektrarny-v-male-vetrne-elektrarny-v-cr>
- [21] Offshore Wind Outlook 2019. In: *IEA* [online]. Paris: IEA, 2018, s. 15-17 [cit. 2022-05-02]. Dostupné z: <https://www.iea.org/reports/offshore-wind-outlook-2019>
- [22] Statistical Review of World Energy. In: *Bp* [online]. BP p.l.c., 1996 [cit. 2022-02-20]. Dostupné z: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>
- [23] Roční zprava provoz ES 2020. In: *Energetický regulační úřad* [online]. Jihlava: IT systems a.s., 2007, s. 25 [cit. 2022-02-20]. Dostupné z: https://www.eru.cz/sites/default/files/import_files/Rocni_zprava_provoz_ES_2020.pdf
- [24] Aktuální instalace. In: *Česká společnost pro větrnou energii* [online]. Praha: Česká společnost pro větrnou energii, 2021 [cit. 2022-02-20]. Dostupné z: <https://www.csve.cz/clanky/aktualni-instalace-vte-cr/120>
- [25] WINCHELL, Joshua. Větrné elektrárny z blízka. In: *Pixnio* [online]. [cit. 2022-05-03]. Dostupné z: <https://pixnio.com/cs/tapety-na-plochu/zblizka-vetrne-turbiny-vitr-elektrina>
- [26] Advantages and challenges of wind energy. In: *Energy office of energy efficiency & reliable energy* [online]. Washington, DC 20585: U.S. department of energy, 2014 [cit. 2022-02-20]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/eere/wind/advantages-and-challenges-wind-energy>
- [27] BADUREK, C.A. Wind turbine. In: *Encyclopædia Britannica* [online]. Encyclopædia Britannica, 2012 [cit. 2021-11-29]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/technology/wind-turbine>
- [28] Wind turbine schematic. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2022-02-20]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wind_turbine_schematic.svg

- [29] How Does a Wind Turbine Work?. In: *Energy office of energy efficiency & reliable energy* [online]. Washington, DC 20585: U.S. department of energy, 2014 [cit. 2022-02-20]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/maps/how-does-wind-turbine-work>
- [30] HART, Edward, Benjamin CLARKE, Gary NICHOLAS et al. A review of wind turbine main bearings: design, operation, modelling, damage mechanisms and fault detection. *Wind Energy Science* [online]. 2020, **5**(1), 105-124 [cit. 2022-05-05]. ISSN 2366-7451. Dostupné z: doi:10.5194/wes-5-105-2020
- [31] DAO, Cuong, Behzad KAZEMTABRIZI a Christopher CRABTREE. Wind turbine reliability data review and impacts on levelised cost of energy. *Wind Energy* [online]. 2019, **22**(12), 1848-1871 [cit. 2022-03-06]. ISSN 1095-4244. Dostupné z: doi:10.1002/we.2404
- [32] ZHU, Caichao a Yao LI, Kenneth OKEDU, ed. *Stability Control and Reliable Performance of Wind Turbines: In Stability Control and Reliable Performance of Wind Turbines* [online]. London: IntechOpen, 2018 [cit. 2022-03-27]. ISBN 978-1-83881-662-9. Dostupné z: <https://www.intechopen.com/chapters/59756>
- [33] JIANG, Zhiyu, Weifei HU, Wenbin DONG, Zhen GAO a Zhengru REN. Structural Reliability Analysis of Wind Turbines: A Review. *Energies* [online]. 2017, **10**(12), 9 [cit. 2022-03-13]. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en10122099
- [34] *Mezní stav únavového lomu*. Brno, 2021. Dostupné také z: https://moodle.vut.cz/pluginfile.php/180677/mod_resource/content/7/5%20KS%20%202021.pdf
- [35] AFFONSO, Luiz Otávio Amaral. *Machinery Failure Analysis Handbook*. Houston: Gulf Publishing Company, 2006, s. 215-227. ISBN 9781933762081.
- [36] SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS, Miloš VLK, ed. *Konstruování strojních součástí*. 1. vyd. Přeložil Martin HARTL. V Brně: VUTIUM, 2010. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [37] Tooth flank fracture: basic principles and calculation model for a sub surface initiated fatigue failure mode of case hardened gears. In: *International Gear Conference* [online]. Lyon Villeurbanne: Woodhead Publishing, 2014 [cit. 2022-03-13]. Dostupné z: <https://www.geartechnology.com/articles/22175-tooth-flank-fracture-basic-principles-and-calculation-model-for-a-sub-surface-initiated-fatigue-failure-mode-of-case-hardened-gears>

- [38] Bearing defects and damage. In: *Zkl* [online]. 2018 [cit. 2022-03-13]. Dostupné z: <https://www.zkl.cz/en/produkty/obecne-informace-pro-konstruktery/11-vady-a-poskozeni-lozisek>
- [39] White etching crack network. In: *Evolution.SKF* [online]. Gothenburg: AB SKF, 2022 [cit. 2022-03-13]. Dostupné z: <https://evolution.skf.com/white-etching-cracks-a-consequence-not-a-root-cause-of-bearing-failure/>
- [40] Bearing Skidding. In: *Integrated reliability solutions* [online]. Cardiff: Nimbler digital, 2022 [cit. 2022-03-13]. Dostupné z: <https://www.lubrication.com.au/case-studies/bearing-skidding/>
- [41] Smearing caused when insufficiently loaded rolling elements slide (skid). In: *SKF* [online]. Gothenburg: AB SKF, 2022 [cit. 2022-03-13]. Dostupné z: https://www.skf.com/binaries/pub12/Images/0901d1968064c148-Bearing-failures---14219_2-EN_tcm_12-297619.pdf. Str 24.
- [42] KREIDL, Marcel a Radislav ŠMÍD. *Technická diagnostika: senzory, metody, analýza signálu*. Praha: BEN - technická literatura, 2006. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-7300-158-6.
- [43] AMAYRI, Abeer, Zhigang TIAN a Tongdan JIN. Condition based maintenance of wind turbine systems considering different turbine types. In: *2011 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering* [online]. Xi'an: IEEE, 2011, s. 20-22 [cit. 2022-03-20]. ISBN 978-1-4577-1229-6. Dostupné z: doi:10.1109/ICQR2MSE.2011.5976683
- [44] IGBA, Joel, Kazem ALEMZADEH, Christopher DURUGBO a Egill Thor EIRIKSSON. Through-life engineering services of wind turbines. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* [online]. 2017, **17**, 60-70 [cit. 2022-03-13]. ISSN 17555817. Dostupné z: doi:10.1016/j.cirpj.2016.08.003
- [45] Požadavky na měřená místa. In: *Aura* [online]. Milevsko: AURA a.s., 2012 [cit. 2022-04-03]. Dostupné z: <http://www.auranet.cz/fotky/diagnostikaVE.pdf>
- [46] GONZALEZ, E, J TAUTZ-WEINERT, J J MELERO a S J WATSON. Statistical Evaluation of SCADA data for Wind Turbine Condition Monitoring and Farm Assessment. *Journal of Physics: Conference Series* [online]. 2018, **1037**, 2 [cit. 2022-03-10]. ISSN 1742-6588. Dostupné z: doi:10.1088/1742-6596/1037/3/032038

- [47] ŽIVOTSKÝ, Petr. *CHYBOVÉ FREKVENCE LOŽISEK*. Brno, 2008. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, fakulta strojního inženýrství, ústav automatizace a informatiky. Vedoucí práce Daniel Zuth. Str 47.
- [48] Efektivní hodnota. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2022-05-06]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Efektivn%C3%AD_hodnota
- [49] MAZAL, Pavel. *Netradiční aplikace metody akustické emise*. Vyd. 1. V Brně: Vysoké učení technické, 2012. ISBN 978-80-214-4629-8.

6 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

6.1 Příklady použitých fyzikálních veličin

E_K	kinetická energie
m	hmotnost
v_v, v_p	rychlost molekuly vzduchu před nárazem a po nárazu do přepážky
F	síla
F_{lv}	síla kterou lopatka působí na molekulu vzduchu
F_{vl}	síla kterou molekula vzduchu působí na lopatku
P	tlak
S	plocha
$(HF) gRMS$	emitovaná vysokofrekvenční energie v násobcích tíhového zrychlení g
n	otáčky
P_{ef}	efektivní výkon
I_{ef}	efektivní proud
U_{ef}	efektivní napětí
I_{max}	maximální proud
U_{max}	maximální napětí
$(\$/day)$	náklady na provoz vztažené na den
RMS	Efektivní hodnota (root mean square)

7 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obrázek 1: Schéma sil pro odporové větrné elektrárny	19
Obrázek 2: Ben Franske, 2008, Iowa, vodní pumpa	20
Obrázek 3: Kateřina Macháňová, Partutovice, mlýn německého typu	21
Obrázek 4: Komárek Jiří, 2014, Přemyslovice, mlýn holandského typu	22
Obrázek 5: Stahlkocher, 2007, Darrierova turbína	24
Obrázek 6: Ugo14, 2008, Savoniova turbína	24
Obrázek 7: Savoniova turbína.....	25
Obrázek 8: Horizontální větrná elektrárna.....	25
Obrázek 9: Farma větrných elektráren	28
Obrázek 10: Schéma funkce větrné elektrárny	29
Obrázek 11: Popis vztahové horizontální větrné elektrárny	30
Obrázek 12 Schéma používaných uložení hlavní hřídele s převodovkou	31
Obrázek 13: Schéma využívaných uložení hlavní hřídele bez převodovky.....	32
Obrázek 14: Poruchy převodovky	35
Obrázek 15: Poruchy generátoru.....	36
Obrázek 16: Poruchy lopatek.....	37
Obrázek 17: Mezní stav únavového lomu hřídele	39
Obrázek 18: Opatřebená ozubená kola způsobená kontaktní únavou.....	39
Obrázek 19: Lom v patě zubu ozubeného kola	40
Obrázek 20: Mezní stav únavového opotřebení vnějšího kroužku ložiska.....	40
Obrázek 21: Opatřebení s bílými trhlinami	41
Obrázek 22: Adhezivní opotřebení ložiska.....	41
Obrázek 23: Senzory akustické emise zapojené na hlavním ložisku	48
Graf 1: Podíl zdrojů na výrobě elektřiny ČR	15
Graf 2: Graf poměrů odstávek turbíny kvůli poruchám v různých systémech turbíny.....	33
Graf 3: Graf porovnávající poměrné doby výpadků z provozu z důvodu poruchy dle rozdílných systémů větrné elektrárny	34

Graf 4: Graf průměrného počtu poruch ročně dle systémů	34
Graf 5: Poměrné zastoupení poruch součástí v generátoru	36
Graf 6: Záznam vysokofrekvenčních vibrací	46
Graf 7: Závislost otáček na přípustných vysokofrekvenčních vibracích	47
Graf 8: Záznam akustické emise na hlavních ložiskách v kontextu výkonu a otáček	49

8 SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Výběr hlavních farem větrných elektráren v ČR.....	27
Tabulka 2: Instalovaný větrný výkon v ČR dle krajů	28
Tabulka 3: Možné příčiny poškození součástí, mechanismi poškození a detekce vady.....	38
Tabulka 4: Hlavní módy poškození mechanických částí hnacího ústrojí a převodovky větrné elektrárny	38
Tabulka 5: Požadavek na měření veličin pro snížení poruchovosti pojištěných větrných elektráren.....	45

9 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: Aktuální instalace větrných elektráren