

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

## STUDIUM A OVĚŘOVÁNÍ VLASTNOSTÍ SBĚRACÍHO ÚSTROJÍ GENERÁTORŮ PRO VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY

: STUDY AND VERIFICATION OF PROPERTIES PICK – UP GENERATORS FOR WIND POWER

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jaroslav Glogar

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. František Veselka, CSc.

BRNO 2018



# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

**Student:** Bc. Jaroslav Glogar

**ID:** 164272

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2017/18

## NÁZEV TÉMATU:

### Studium a ověřování vlastností sběracího ústrojí generátorů pro větrné elektrárny

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se s konstrukčním provedením větrné elektrárny a používaných generátorů.
2. Analyzujte kluzný kontakt v kroužkové soupravě.
3. Navrhněte možnou inovaci sběracího ústrojí pro větrné elektrárny situované na moři.
4. Proveďte alespoň dílčí praktické ověření vlastností měřením a vyhodnoťte získané výsledky.
5. Zpracujte návrhy doporučení k eliminaci případných nedostatků.

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] CHMELÍK, Karel a František VESELKA. Kluzný kontakt v elektrických strojích. Ostrava: Key Publishing, 2007. ISBN 978-80-87071-59-5.
- [2] RYCHETNÍK, Václav, Jiří PAVELKA a Josef JANOUŠEK. Větrné motory a elektrárny. Praha: České vysoké učení technické, 1997. ISBN 80-01-01563-7.
- [3] CETKOVSKÝ, Stanislav, Bohumil FRANTÁL a Josef ŠTEKL. Větrná energie v České republice: hodnocení prostorových vztahů, environmentálních aspektů a socioekonomických souvislostí. Brno: Ústav geoniky Akademie věd ČR, 2010. Studia geographica. ISBN 978-80-86407-84-5

**Termín zadání:** 5.2.2018

**Termín odevzdání:** 21.5.2018

**Vedoucí práce:** doc. Ing. František Veselka, CSc.

**Konzultant:**

**doc. Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.**  
*předseda oborové rady*

#### UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce se zabývá problematikou sběracího ústrojí generátorů větrných elektráren. První část pojednává o větrných elektrárnách, jejich konstrukci, generátorech a přibližuje výhody a nevýhody jejich umístění na souši a na moři. Druhá část popisuje jednotlivé komponenty sběracího ústrojí. Hlavní část se pak zabývá problematikou kluzného kontaktu u generátorů větrných elektráren na moři.

## **Abstract**

This master thesis deals with study of properties pick-up generators for wind power. First part of thesis studies wind turbines, its structure, generators and describes advantages and disadvantages of ashore and offshore location. The next part presents description of parts of sliding contact. The main part assesses the impact of sea environment on sliding contact in generators at offshore wind turbines.

## **Klíčová slova**

Kluzný kontakt, větrná elektrárna, větrná elektrárna na moři, kartáč, kroužek.

## **Keywords**

Sliding contact, wind turbine, offshore wind turbine, brush, ring.

## **Bibliografická citace**

GLOGAR, J. *Studium a ověřování vlastností sběracího ústrojí generátorů pro větrné elektrárny*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 58 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. František Veselka, CSc..

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Studium a ověřování vlastností sběracího ústrojí generátorů pro větrné elektrárny jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne .....

Podpis autora .....

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Františku Veselkovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

Děkuji také firmě CEBES a.s. za poskytnutí svých produktů ke zkouškám pro účely této práce a souhlas s využitím některých dílčích podkladových materiálů.

V Brně dne .....

Podpis autora .....

## OBSAH

<b>1 ÚVOD</b> .....	<b>12</b>
<b>2 VĚTRNÁ ELEKTRÁRNA</b> .....	<b>13</b>
<b>2.1 KONSTRUKCE</b> .....	<b>13</b>
2.1.1 VĚTRNÉ MOTORY ODPOROVÉ.....	13
2.1.2 VĚTRNÉ MOTORY VZTLAKOVÉ.....	14
<b>2.2 POUŽÍVANÉ GENERÁTORY</b> .....	<b>15</b>
2.2.1 VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY MALÉHO VÝKONU.....	15
2.2.2 VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY STŘEDNÍHO VÝKONU.....	16
2.2.3 VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY VELKÉHO VÝKONU.....	16
<b>2.3 UMÍSTĚNÍ</b> .....	<b>22</b>
2.3.1 UMÍSTĚNÍ NA PEVNINĚ (ČR).....	22
2.3.2 UMÍSTĚNÍ NA MOŘI.....	23
<b>3 KLUZNÝ KONTAKT</b> .....	<b>24</b>
<b>3.1 KARTÁČE</b> .....	<b>24</b>
3.1.1 KONSTRUKCE KARTÁČE.....	24
3.1.2 POŽADAVKY NA KARTÁČE.....	25
3.1.3 MATERIÁLY KARTÁČŮ.....	25
3.1.4 OPOTŘEBENÍ KARTÁČŮ.....	26
<b>3.2 DRŽÁKY KARTÁČŮ</b> .....	<b>27</b>
<b>3.3 SBĚRACÍ KROUŽKY</b> .....	<b>28</b>
<b>3.4 PATINA</b> .....	<b>29</b>
<b>3.5 DIAGNOSTIKA A ÚDRŽBA KLUZNÉHO KONTAKTU</b> .....	<b>29</b>
<b>3.6 ANALÝZA KROUŽKOVÉ SOUSTAVY V ZÁVISLOSTI NA OVALITĚ HŘÍDELE</b> .....	<b>30</b>
<b>4 KLUZNÝ KONTAKT V MOŘSKÉM PROSTŘEDÍ</b> .....	<b>36</b>
<b>4.1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY</b> .....	<b>36</b>
<b>4.2 ELEKTROLÝZA V KLUZNÉM KONTAKTU</b> .....	<b>36</b>
<b>4.3 VLIV CIZÍCH ČÁSTIC NA VELIKOST PŘÍTLAČNÉ SÍLY</b> .....	<b>36</b>
4.3.1 POPIS SVINOVACÍ PRUŽINY POUŽITÉ U MĚŘENÉHO VZORKU.....	36
4.3.2 MĚŘENÍ PŘÍTLAČNÝCH SIL.....	38
<b>4.4 MODELOVÁNÍ KLUZNÉHO KONTAKTU</b> .....	<b>44</b>
<b>4.5 ZKOUŠKA SOLNOU MLHOU</b> .....	<b>48</b>
4.5.1 POPIS ZKOUŠKY SBĚRACÍHO ÚSTROJÍ.....	48
4.5.2 VÝSLEDKY.....	49
<b>4.6 INOVOVANÉ PROVEDENÍ KLUZNÉHO KONTAKTU</b> .....	<b>51</b>
4.6.1 INOVOVANÉ KARTÁČE.....	51
4.6.2 INOVOVANÉ DRŽÁKY KARTÁČŮ.....	52
4.6.3 NOVÁ KONCEPCE SBĚRACÍHO ÚSTROJÍ.....	53
<b>5 ZÁVĚR</b> .....	<b>55</b>
<b>6 LITERATURA</b> .....	<b>57</b>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 2.1: Savoniův rotor [11]</i> .....	13
<i>Obr. 2.2: Popis strojovny větrné elektrárny [12]</i> .....	14
<i>Obr. 2.3: Blokové schéma systému větrné elektrárny v kaskádní zapojení [7]</i> .....	16
<i>Obr. 2.4: Poškozené ložisko [17]</i> .....	18
<i>Obr. 2.5: Nesymetrie magnetického obvodu způsobená odlišnou hodnotou impedance jednoho fázového vinutí [17]</i> .....	19
<i>Obr. 2.6: Kráter vytvořený ložiskovými proudy [17]</i> .....	20
<i>Obr. 2.7: Typický valchovitý povrch [17]</i> .....	20
<i>Obr. 2.8: Napětí na kapacitách mezi vinutím a kostrou statoru [17]</i> .....	21
<i>Obr. 2.9: Průměrná rychlost větru v ČR ve výšce 10 m [13]</i> .....	22
<i>Obr. 3.1: Typy kartáčů [14]</i> .....	24
<i>Obr. 3.2: Dvojité držák kartáče [15]</i> .....	27
<i>Obr. 3.3: Varianty segmentového (inovovaného) provedení krabičky držáků kartáčů [2]</i> .....	28
<i>Obr. 3.4: Popis měření ovality hřídele</i> .....	30
<i>Obr. 3.5: Popis hřídele – pohled 1</i> .....	31
<i>Obr. 3.6: Popis hřídele – pohled 2</i> .....	31
<i>Obr. 3.7: Vybrané rozměry měřené hřídele</i> .....	31
<i>Obr. 3.8: Naměřené odchylky – část 1</i> .....	33
<i>Obr. 3.9: Naměřené odchylky – část 2</i> .....	33
<i>Obr. 3.10: Naměřené odchylky – část 3</i> .....	34
<i>Obr. 4.1: Charakteristika svinovací pružiny [19]</i> .....	37
<i>Obr. 4.2: Působíště síly svinovací pružiny a možné úpravy hlavy kartáče [2]</i> .....	37
<i>Obr. 4.3: Svinovací pružina - odizolování pružiny od kartáče a silikonová příložka pro tlumení vibrací [2]</i> .....	38
<i>Obr. 4.4: Možnost zajištění dostatečné přitlačné síly při malém roztažení pružiny [19]</i> .....	38
<i>Obr. 4.5: Znázornění měřícího pracoviště pro měření přitlačných sil</i> .....	39
<i>Obr. 4.6: Detail sběracího ústrojí</i> .....	40
<i>Obr. 4.7: Znázornění kontaktu svinovacích pružin o izolaci přívodních lanek</i> .....	43
<i>Obr. 4.8: Povrch kartáčů po provedení měření přitlačných sil</i> .....	44
<i>Obr. 4.9: Script pro model třecího uzlu (Matlab Simulink)</i> .....	46
<i>Obr. 4.10: Schéma pro vytvoření diferenciální rovnice (Matlab Simulink)</i> .....	46
<i>Obr. 4.11: Teoretický průběh "nadskočení" kartáče</i> .....	47



<i>Obr. 4.12: Závislost poměru maximální a ustálené hodnoty výchylky kartáče na hmotnosti kartáče podle modelu .....</i>	47
<i>Obr. 4.13: Zkušební komora pro zkoušku korozní odolnosti [18] .....</i>	49
<i>Obr. 4.14: Znázornění stavu původního sběracího ústojí po ukončení korozní zkoušky – pohled shora [18] .....</i>	49
<i>Obr. 4.15: Znázornění stavu původního sběracího ústojí po ukončení korozní zkoušky – pohled zespodu [18] .....</i>	50
<i>Obr. 4.16: Držák kartáče po ukončení korozní zkoušky [18] .....</i>	50
<i>Obr. 4.17: Detail vnějšího povrchu kroužku po ukončení korozní zkoušky [18] .....</i>	50
<i>Obr. 4.18: Boční pohled na inovovaný kartáč v provedení „sT“ s vrstvou aplikovaného teflonu do vlastního tělesa kartáče [2] .....</i>	51
<i>Obr. 4.19: Inovované držáky kartáčů [18] .....</i>	52
<i>Obr. 4.20: Detail inovovaného držáku kartáče [18] .....</i>	52
<i>Obr. 4.21: Inovované držáky kartáčů po ukončení korozní zkoušky [18] .....</i>	53
<i>Obr. 4.22: Nová koncepce sběracího ústrojí [2] .....</i>	54

## SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 3.1: Naměřené hodnoty při měření ovality hřídele .....</i>	<i>32</i>
<i>Tab. 4.1: Naměřené hodnoty velikosti přitlačné síly – bez přítomnosti prachu.....</i>	<i>40</i>
<i>Tab. 4.2: Naměřené hodnoty velikosti přitlačné síly – Dronco 40 lamel.....</i>	<i>41</i>
<i>Tab. 4.3: Naměřené hodnoty velikosti přitlačné síly – Tysolit 60 lamel.....</i>	<i>41</i>
<i>Tab. 4.4: Naměřené hodnoty velikosti přitlačné síly – SIA (I).....</i>	<i>41</i>
<i>Tab. 4.5: Naměřené hodnoty velikosti přitlačné síly – VSM.....</i>	<i>41</i>
<i>Tab. 4.6: Naměřené hodnoty velikosti přitlačné síly - bez nasypaného prachu.....</i>	<i>42</i>
<i>Tab. 4.7: Naměřené hodnoty velikosti přitlačné síly – nedefinovaný hrubší prach.....</i>	<i>42</i>
<i>Tab. 4.8: Naměřené hodnoty velikosti přitlačné síly - SIA (II) .....</i>	<i>42</i>

## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

F	(N)	přítlačná síla sběracího ústrojí
$F_N$	(N)	pracovní síla pružiny
$f_R$	(Hz)	frekvence proudu protékajícího rotorovým vinutím
$f_s$	(Hz)	frekvence sítě
g	( $m \cdot s^{-2}$ )	gravitační zrychlení
l	(mm)	délka roztažení pružiny
$l_p$	(mm)	pracovní délka pružiny
$l_r$	(mm)	rozběhová část pružiny
m	(kg)	hmotnost
$M_E$	(Nm)	moment stroje
$n_R$	( $min^{-1}$ )	otáčky rotoru
$N_p$	(-)	počet pólů stroje
$P_R$	(W)	činný výkon přiváděný do rotoru
$P_S$	(W)	činný výkon přiváděný do statoru
x	(mm)	vzdálenost v ose hřídele od okraje hřídele
$x_{max}$	(mm)	maximální výchylka kartáče
$x_{ust}$	(mm)	ustálená výchylka kartáče
$\Delta h$	( $\mu m$ )	odchylka od referenční hodnoty
$\omega$	( $rad^{-1}$ )	úhlová rychlost

# 1 ÚVOD

Vzhledem k tomu, že v hustě osídlené Evropě se snižují prostorové možnosti, vhodné ke stavbě větrné elektrárny, existuje zde problém s dopravou a instalací rozměrově i hmotnostně velkých dílů této elektrárny, začíná se v přímořských zemích stále více prosazovat trend stavby elektráren na moři (tzv. offshore elektráren). Užívání těchto elektráren má svá specifika, mezi něž patří také vliv mořského prostředí, které působí na jejich elektrické části, tedy i kluzný kontakt jejich generátorů.

V této diplomové práci jsou shrnuty informace ohledně problematiky kluzného kontaktu u větrných elektráren na moři včetně dílčích praktických ověření. Je zde také uveden návrh řešení problematiky kluzného kontaktu v mořském prostředí. Práce je rozdělena na tři základní části. První se věnuje základnímu seznámení se s větrnou elektrárnou a to nejen s její konstrukcí, ale i jejím umístěním. Druhá část se pak zabývá problematikou kluzného kontaktu obecně. Hlavní část práce je pak věnována specifickým podmínkám provozu kluzného kontaktu u větrných elektráren na moři. V závěru této kapitoly jsou uvedeny možnosti pro částečnou eliminaci vlivu tohoto prostředí na kluzný kontakt.

## 2 VĚTRNÁ ELEKTRÁRNA

Vítr jako energetický zdroj je využíván již několik století (první zmínka o větrném motoru s vodorovnou osou je ze 3. století před Kristem z Egypta). V Evropě jsou používány větrné mlýny od 13. Století, přičemž velký rozmach byl zaznamenán především v Holandsku. Původně byla tato energie využívána hlavně pro mletí obilí, čerpání vody a zpracování dřeva. V USA došlo k rychlému rozvoji začátkem 19. století, kdy bylo postaveno přes 6 miliónů mnoholopatkových větrných motorů především pro čerpání vody. První realizace větrné elektrárny byla provedena ve stejné době. Pak ovšem ve využívání větrné energie následoval útlum.

V poslední době byl však zaznamenán velký zájem o využití větru k výrobě elektrické energie, který souvisí se snahou o snížení emisí škodlivých plynů vznikající při používání fosilních paliv jako energetického zdroje.

Jednou z hlavních nevýhod využívání větrné energie je působení větrných elektráren na elektrizační soustavu. Nepravidelnost, nahodilost a špatná predikovatelnost směru a síly větru vede k tomu, že dodávky do sítě jsou nepravidelné. Navíc v našich podmínkách mohou tyto elektrárny pracovat cca 10 – 20 % v průběhu celého roku. To způsobuje nejen problémy s regulací v elektrizační soustavě, ale i ekonomické ztráty.

### 2.1 Konstrukce

Základní dělení větrných elektráren je nejčastěji prováděno podle typu větrného motoru. Podle toho se pak odvíjí i jejich konstrukce. Větrný motor je zařízení, které slouží k přeměně kinetické energie větru na energii mechanickou. Rozeznáváme dva základní typy (podle aerodynamického principu funkce větrného motoru):

- 1) větrné motory odporové,
- 2) větrné motory vztlakové.

#### 2.1.1 Větrné motory odporové



Jedná se o nejstarší typ. Základní podstatou je aerodynamický odpor, který vytváří plocha nastavená proti větru. Tím dochází k vytváření síly působící na tuto plochu a ta se přeměňuje na rotační pohyb. Účinnost tohoto typu motoru je v rozmezí 15 – 23 %. Mezi typické představitele tohoto typu patří např. Savoniův rotor.

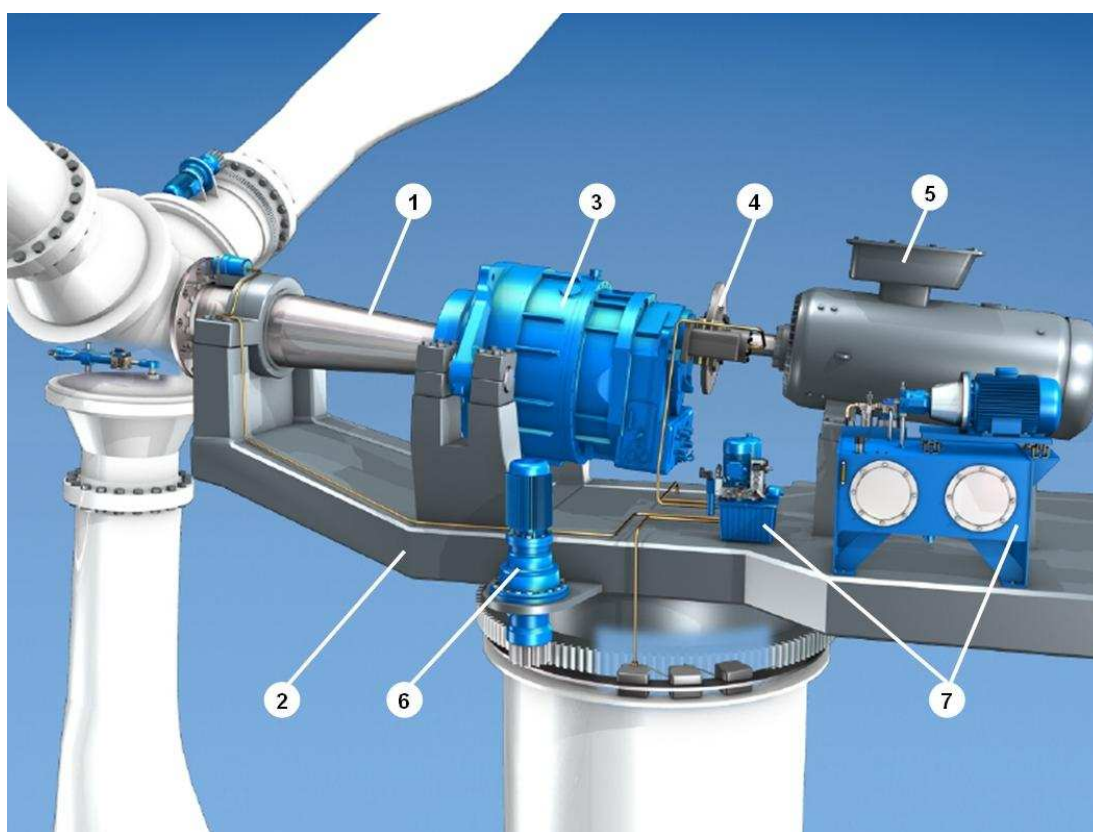
Jejich výhodou jsou jednoduchá konstrukce, nezávislost na směru větru, přímý přenos kroutícího momentu na hřídel stroje a využitelnost větru již od rychlosti  $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Hlavními nevýhodami jsou pak nízké otáčky, velký moment a malé využití energie větru.

Obr. 2.1: Savoniův rotor [11]

## 2.1.2 Větrné motory vztlakové

Jedná se o dnes nejpoužívanější typ. Nejčastěji jsou to motory s vodorovnou osou otáčení, které jsou konstruovány obvykle jako dvoulisté nebo třílisté, ovšem existují i provedení s jedním nebo čtyřmi listy. Kromě těchto motorů se ale používají i motory s vertikální osou otáčení (např. Darrieus, v provedení s dvěma, třemi nebo čtyřmi listy).

Výhodou těchto typů motorů je vysoká využitelnost energie větru, u rychloběžných axiálních motorů se udává až přes 40 %. Obvodová rychlost (na koncích lopatek) může být až desetinasobek rychlosti větru. Další výhodou je pak relativně nízká hmotnost. Hlavní nevýhodou je pak minimální rychlost větru potřebná k rozběhu. Ta se pohybuje kolem  $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Rychlost větru pro vypnutí elektrárny se pohybuje kolem  $25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Jmenovitého výkonu se dosahuje při rychlostech cca  $13 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Tento typ je velmi vhodný pro výrobu elektrické energie.



Obr. 2.2: Popis strojovny větrné elektrárny [12]

- Legenda:
- 1 – hlavní hřídel VE,
  - 2 – nosný rám strojovny,
  - 3 – převodovka VE,
  - 4 – spojení převodovky a generátoru,
  - 5 – generátor VE,
  - 6 – systém natačení strojovny,
  - 7 – hydraulické systémy VE.

### 2.1.2.1 Regulace výkonu velkých větrných elektráren

Pro regulaci výkonu se používají tyto způsoby regulace:

- regulace STALL,
- regulace PITCH,
- regulace ACTIVE STALL,
- kombinovaná regulace PITCH-STALL.

Regulace STALL využívá proměnného tvaru lopatek. Při nárůstu rychlosti větru dojde k elastické změně konce lopatky, tím ke snížení vztlaku a k poklesu momentu. Lopatka je tedy pevně spojena s rotorem. Tento způsob regulace je sice z hlediska provozu spolehlivější, ovšem výkon rotoru při vyšších rychlostech větru klesá (a tím tedy i jeho účinnost). Navíc takový rotor nemá schopnost samostatného rozběhu.

Naproti tomu u způsobu regulace PITCH nejsou lopatky pevně kotveny k rotoru, ale podle vstupního signálu se natačejí tak, aby rotor vytvářel ideální výkon na hřídeli. Jeho dalšími výhodami jsou jednoduchý start, snižování zatížení listů rotoru, nižší hmotnost listů a také to, že nejsou potřeba silné brzdy pro rychlé zastavení rotoru. Jeho nevýhodou je menší provozní spolehlivost a pomalá rychlost regulace (což se projeví při velkých výkyvech větru). Proto se v současnosti začíná využívat kombinovaný systém regulace PITCH-STALL.

ACTIVE-STALL využívá pro rozběh a provoz při nízkých rychlostech větru stejný způsob regulace jako PITCH. Ovšem u vysokých rychlostech větru, kdy je potřeba snižovat výkon, se natočí lopatky opačným směrem. Úhel natočení v tomto případě není tak velký jako v případě PITCH, to znamená, že se dosahuje vyšší rychlosti regulace.

## 2.2 Používané generátory

Z hlediska používaných generátorů je vhodné větrné elektrárny rozdělit podle výkonu, přičemž stanovení těchto výkonových hladin je velmi subjektivní, ovšem podobné členění je možné najít ve většině publikací v rámci EU:

- 1) mikroelektrárny (do 1 kVA),
- 2) malé větrné elektrárny (cca 1 – 30 kVA),
- 3) střední větrné elektrárny (30 – 300 kVA),
- 4) velké větrné elektrárny (nad 300 kVA).

### 2.2.1 Větrné elektrárny malého výkonu

Využití těchto elektráren je orientováno nejen k vlastní spotřebě (osvětlení, vytápění objektů, ohřevu vody), ale v menší míře u větších výkonů i pro dodávku do veřejné rozvodné sítě. V tom případě je potom nutné zvolit generátor se systémem řízení tak, aby bylo možné regulovat otáčky. Výška stožáru činí cca do 10 m.

Pro tyto elektrárny je možné použít asynchronní nebo synchronní generátor, v současnosti již i reluktanční generátory. Kvůli lepší využitelnosti větru se mezi generátor a síť vkládá frekvenční měnič, díky kterému dojde nejprve k usměrnění napětí, která se pak upravuje na požadovanou frekvenci. S ohledem na provozní spolehlivost je využíván především asynchronní generátor.

## 2.2.2 Větrné elektrárny středního výkonu

Hlavní oblasti využití elektráren tohoto výkonu již je dodávka elektrické energie do vnější energetické soustavy, obvykle do soustavy vysokého napětí. Generátor je umístěn v gondole na tubusu vysokém cca 30 - 50 m.

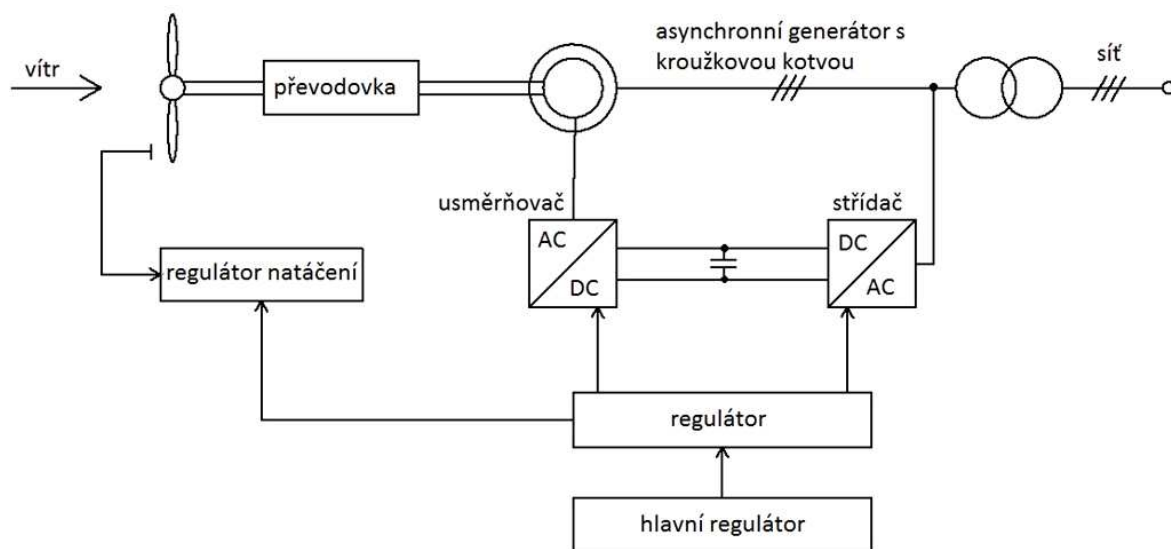
Nejčastěji se zde používají asynchronní generátory, především kvůli jednoduché konstrukci a tedy i vyšší provozní spolehlivosti. Nevýhodou těchto generátorů je ovšem nutnost odebrání jalové energie pro vytvoření točivého magnetického pole. Dříve se upřednostňoval generátor s kotvou nakrátko, nyní se ovšem začíná více prosazovat typ s kroužkovým rotorem.

V poslední době se začínají čím dál častěji prosazovat synchronní generátory s permanentními magnety. Jejich výhodou je schopnost udržet magnetické pole bez externího zdroje buzení. Často jsou tyto generátory řízené a připojené k síti přes frekvenční měniče.

## 2.2.3 Větrné elektrárny velkého výkonu

Pro výstavbu elektráren těchto výkonů nejsou u nás (v ČR) sice příliš dobré podmínky, přesto je zde možné vhodné lokality nalézt. Hlavním rozdílem těchto elektráren proti elektrárnám menších výkonů je využití větrných motorů s natáčivými vrtulovými listy. Dalším rozdílem je umístění transformátoru, který bývá umístěn přímo v gondole (kromě transformace napětí je jeho funkcí i vyvažování hmotnosti turbíny, generátoru a polovodičové techniky).

Jako generátory pro větrné elektrárny o velkých výkonech (obvykle nad 850 kW) jsou v současnosti využívány asynchronní stroje s kroužkovým rotorem. Celý systém se pak v kaskádním zapojení skládá ještě z frekvenčního měniče a rekuperační jednotky. V tomto zapojení je stator generátoru připojen přímo do elektrizační soustavy, zatímco rotorové vinutí je přes kroužky napájeno z frekvenčního měniče. Toto zapojení se nazývá dvojitě napájený asynchronní generátor.



Obr. 2.3: Blokové schéma systému větrné elektrárny v kaskádním zapojení [7]

Dále je možné použití systému řízení se synchronním generátorem s cizím buzením nebo systém s asynchronním generátorem s kotvou nakrátko. Oba systémy jsou připojené k distribuční soustavě přímo. V případě použití asynchronních generátorů se obvykle jedná o 4-pólové nebo 6-pólové generátory.



### 2.2.3.1 Generátory větrných elektráren VESTAS

Ačkoli se v nedávné době stala největším výrobcem větrných elektráren čínská firma GOLDWIND, je tomu tak především proto, že má velký úspěch na domácím trhu. Ve zbytku světa stále dominuje dánská firma Vestas. Následující kapitola se tedy bude více zabývat generátory používané právě touto firmou.

Firma Vestas používá ve svých větrných elektrárnách dvojité napájený čtyřpólový asynchronní stroj, jehož blokové schéma je uvedeno na obrázku 2.3 (kaskádní zapojení). Statorové vinutí je připojeno přímo k síti, rotorové vinutí je připojeno k měniči frekvence. Měnič napájí rotor proudem o frekvenci, danou rozdílem frekvence odpovídající synchronní rychlosti a aktuální mechanické rychlosti generátoru.

Při vhodném řízení měniče je možné dosáhnout (do jisté míry) jakýchkoliv hodnot činného a jalového výkonu. Rotor je přitom nutné napájet nejen správnou skluzovou frekvencí, ale také proudem o správném fázovém posuvu.

Hlavní výhodou tohoto řešení je relativně nízký maximální výkon (cca 30 % celkového výkonu) přenášený přes měnič frekvence, což ve výsledku znamená nižší náklady na měnič a nižší ztráty. Nízký maximální výkon je dán tím, že poměr rotorové a statorové frekvence je poměrně nízký.

Takové zapojení je vhodné provozovat pouze při podsynchronních rychlostech. Je to z toho důvodu, že elektrický proud potom protéká frekvenčním měničem pouze v jednom směru. V případě provozu v podsynchronních i nadsynchronních rychlostech by pak bylo nutné použít složitější variantu frekvenčního měniče tak, aby proud mohl protékat frekvenčním měničem i opačným směrem.

Činné výkony dvojité napájeného asynchronního generátoru:

$$P_S \cong 2 \cdot \pi \cdot f_S \cdot M_E \quad (2.1) [22]$$

$$P_R \cong (\omega - \omega_S) \cdot M_E = -\omega_R \cdot M_E = -2 \cdot \pi \cdot f_R \cdot M_E \quad (2.2) [22]$$

$M_E$  ... moment stroje (pře počítaný na moment odpovídající dvojpólovému stroji).

Rovnice neuvažuje ztráty a rychlé změny mg. pole.

Frekvence proudu protékajícího statorovým vinutím:

$$f_S = \frac{n_R \cdot N_p}{120} \pm f_R \quad (2.3) [22]$$

Znaménko před hodnotou rotorové frekvence  $f_R$  závisí na směru magnetických polí u rotoru a statoru (pro stejný směr magnetických polí platí znaménko +, pro opačné -). Stejný směr budou mít tehdy, pokud se rotor bude otáčet otáčkami menšími, než jsou synchronní.

Na rozdíl od asynchronního generátoru má toto řešení tyto nesporné výhody, neboť umožňuje:

- 1) činnost při různých otáčkách s konstantní amplitudou a frekvencí napětí,
- 2) optimalizaci množství generované energie při různých rychlostech větru na nominální výstupní výkon,
- 3) možnost eliminace rychlých změn momentu rotoru a výstupního výkonu,
- 4) výrobu elektrické energie při nižších rychlostech větru,
- 5) řízení účinníku.

Dvojitě napájený asynchronní stroj má podobné výhody jako synchronní generátor. Na rozdíl od něj má ale nižší nároky na měnič frekvence (již zmíněných 30 % jmenovitého výkonu).

Nevýhodou asynchronního generátoru je, že vyžaduje některé obvody navíc. Nevýhodou tohoto řešení je také klesající účinnost při rychlostech pod jmenovitou hodnotu.

### 2.2.3.2 Ložiskové proudy

U generátorů napájených z frekvenčního měniče, jak je tomu také u generátorů větrných elektráren Vestas, jsou velkým problémem mj. ložiskové proudy. Jelikož jedním z řešení je použití uzemněného kartáče připojeného k hřídeli, což souvisí s tématem diplomové práce, bude se následující kapitola tímto jevem zabývat podrobněji.

Ložiskovými proudy rozumíme proudy, které z nějakých důvodů procházejí hřídelí rotoru a zároveň ložiskem (ložisky) asynchronních strojů. Problémy s ložiskovými proudy ovšem již byly diagnostikovány u stejnosměrných strojů a také u velkých střídavých strojů. Vznikají nesymetriemi elektrického, nebo magnetického obvodu točivého stroje. Jako příklad je možné uvést excentricitu vzduchové mezery.

Problémy s elektricky poškozenými ložisky jsou známy už dlouho. Dříve se ovšem jednalo spíše o výrobní tolerance, nebo o použití magnetických materiálů s horšími vlastnostmi. Tyto problémy jsou však již dnešními výrobními technologiemi překonány. V současné době se v souvislosti s ložiskovými proudy jeví jako největší problém pulzně šířková modulace (PWM) používaná u frekvenčních měničů pohánějících asynchronní motory.

Elektrické opotřebení ložisek je trojího typu (případně kombinací uvedených):

#### 1) Čistě elektrické opotřebení

Jedná se o opotřebení vzniklé trvalým průchodem proudu ložiskem. Dochází k tomu díky trvalému styku kroužků a valivých ložisek, kdy stykovými místy jsou jednotlivé malé plošky. Může k tomu docházet i při velkém mechanickém zatížení.

#### 2) Elektroerozivní opotřebení

To je způsobováno výboji – jak jiskrovými, tak obloukovými. Jiskřením dochází také ke znehodnocování maziva a tím k narušení mazacích vlastností.

#### 3) Elektrolytické opotřebení

Opotřebení vznikající elektrochemickými ději v ložisku.



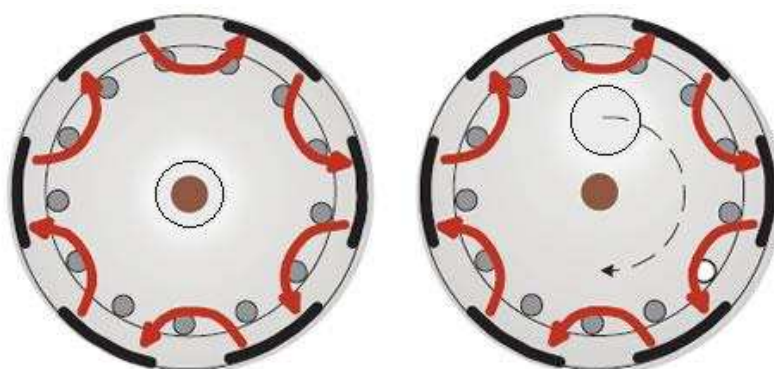
Obr. 2.4: Poškozené ložisko [17]

Na obrázku výše můžeme pozorovat charakteristické znaky ložiska poškozeného ložiskovými proudy. Nejprve je možné si všimnout na vnější části ložiska vzorku připomínající zip. Dalším znakem je matnost kuliček.

Problematika ložiskových proudů je spojována především s velkými stroji se dvěma nebo čtyřmi póly. Mimo jiné z důvodu větší magnetické nesymetrie ve vzduchové mezeře, kdy i ložiskové proudy budou větší než by tomu bylo u menších a vícepólových strojů. Problémy s ložiskovými proudy se ovšem s postupným rozšířením frekvenčních měničů dostaly i do kategorie menších strojů.

Degradující veličinou pro ložiska je procházející proud. Důležitou veličinou je však také hřídelové napětí. Je to z toho důvodu, že proudy mohou ložiskem protékat, až toto napětí překročí určitou hodnotu.

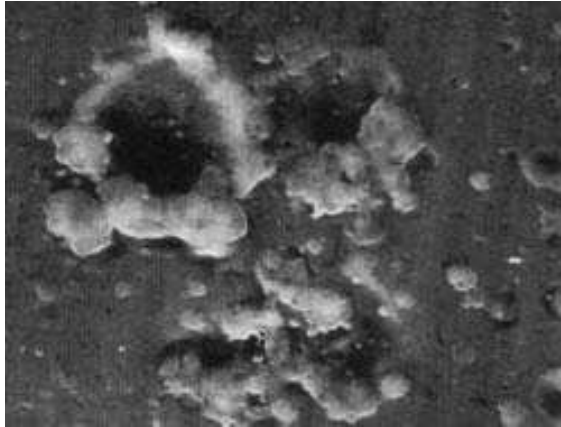
Na obrázku 2.5 je zjednodušený asynchronní stroj v příčném řezu. Při napájení vinutí sinusovým proudem se osa magnetického pole nachází stále v ose rotoru, tedy hřídelové napětí se neindukuje a ložiskový proud se nevytváří. V pravé části obrázku 2.5 však jedna z fázových impedancí má jinou hodnotu než ostatní, fázové proudy a tedy i magnetické pole není symetrické. Osa magnetického pole se pak již nenachází v ose stroje. Tím dojde ke vzniku indukovaného napětí na hřídeli a tedy ke vzniku potenciálu mezi hřídelí a kostrou stroje. Pokud je toto napětí dostatečně velké, dojde vyrovnání tohoto potenciálu přes ložiska a tedy ke vzniku ložiskových proudů. Průrazné napětí se pro olejový film může pohybovat od 2 V až do 30 V (závisí na typu ložiska a na použitém mazivu).



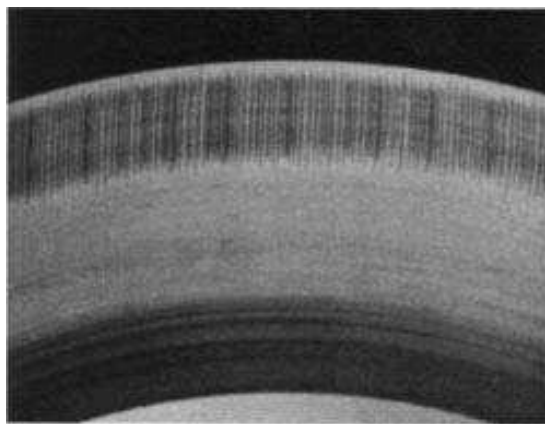
Obr. 2.5: Nesymetrie magnetického obvodu způsobená odlišnou hodnotou impedance jednoho fázového vinutí [17]

Při průchodu proudů ložiskem dochází k výbojům mezi vnitřní a vnější ložiskovou dráhou a pouzdrem ložiska, tyto výboje znamenají vznik tepla, následné roztavení malých bodů v povrchu ložiskové dráhy a zapříčiní vznik kráterů v dráze.

Na povrchu kráterů materiál znovu ztvrdne, pod ním ale materiál zůstane měkčí než původní materiál. Velikost těchto kráterů je cca 5 – 8  $\mu\text{m}$  (tato hodnota platí pro stroje s frekvenčními měniči). Díky těmto kráterům pak vznikají vibrace, a vzniká typický valchovitý vzorek, viz obrázek 2.7.



Obr. 2.6: Kráter vytvořený ložiskovými proudy [17]



Obr. 2.7: Typický valchovitý povrch [17]

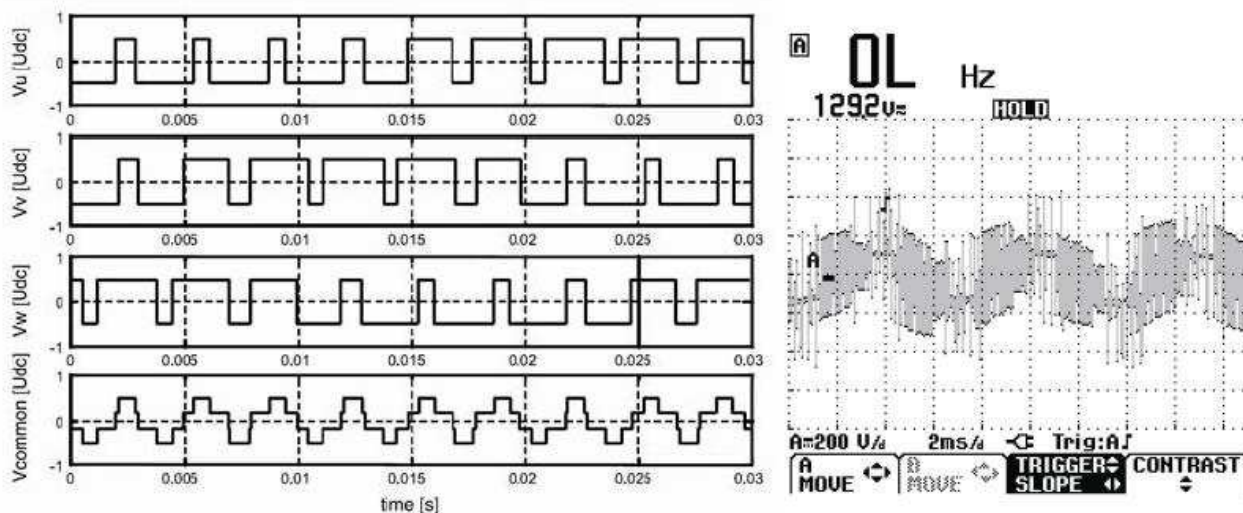
Kromě toho dochází také k matnění ložiskových kuliček. Při tavení vlivem výbojů dochází také k tomu, že zbytky kovu zůstávají v mazivu ložiska, a mazivo rovněž degraduje vlivem výbojů (dochází k tvrdnutí a tmavnutí), čímž se zhoršují jeho mazací vlastnosti.

U strojů s frekvenčními měniči rozeznáváme tři hlavní typy ložiskových proudů:

#### 1) Vysokofrekvenční cirkulující proudy

Existují díky kapacitám mezi vinutím a kostrou stroje. Při napájení z frekvenčního měniče se fázové napětí mění mezi dvěma hodnotami – mezi 0 V a napětím na mezistupni měniče. Pak tedy vzniká i nenulové napětí na kapacitách vinutí proti kostře statoru. To můžeme pozorovat na obrázku 2.8. Součet napětí všech fází není nulový (na rozdíl od napájení zcela symetrickým střídavým napětím). Tento součet napětí (na obrázku označené jako  $V_{\text{common}}$ ) způsobí vznik proudu v kostře motoru. Jím vytvořené vysokofrekvenční magnetické pole ve vzduchové mezeře pak způsobí indukci napětí v ose rotoru. Při dostatečně velkém napětí pak může dojít k průrazu v ložisku a vzniku ložiskového proudu.

Na obrázku 2.8 je zobrazen naměřený průběh napětí mezi nulovým bodem vinutí a kostrou motoru.



Obr. 2.8: Napětí na kapacitách mezi vinutím a kostrou statoru [17]

Nejčastěji se tento typ ložiskových proudů nachází u strojů středního a velkého výkonu (nad 100 kW), tedy často i u generátorů větrných elektráren.

Dále je třeba si uvědomit, že můžeme obdržet i tzv. bludné proudy. To znamená, že smyčka ložiskového proudu se nebude uzavírat přes ložiska generátoru, ale přes ložiska připojené zátěže, v případě větrných elektráren v převodovce.

## 2) Proudů zemněnou hřídelí

Tento typ proudu je způsoben potenciálem, který vznikne mezi vinutím elektrického stroje a jeho kostrou. Toto napětí je zapříčiněno nenulovou impedancí stíněných kabelů z frekvenčního měniče k poháněnému stroji. V ideálním případě by se vzniklý proud vrátil zpět do frekvenčního měniče po napájecím kabelu. Ovšem může se stát, že zemnicí smyčka (v případě, že hřídel je uzemněna) bude vykazovat menší impedanci než impedance stínění napájecího kabelu. V tom případě může dojít k průrazu ložiska a vzniku ložiskových proudů. Je důležité si uvědomit, že tato impedance může být zanedbatelná při 50 Hz, ovšem při napětí o frekvencích přes 1 MHz může nabývat značných hodnot.

## 3) Kapacitvní výboje

Tento typ ložiskových proudů se vyskytuje u strojů malého výkonu (pod 30 kW). Proto je tento druh ložiskových proudů uveden v této práci pouze pro úplnost.

Pro zamezení ložiskových proudů je možno využítí následujících konstrukčních úprav strojů:

- odstranění nesymetrií – nejen elektrického, ale i magnetického obvodu,
- izolace ložisek,
- použití keramických nebo hybridních ložisek,
- použití uzemněného kartáče připojeného na hřídel v podobě inovovaného kluzného kontaktu.

Pro správnou funkci uzemněného kartáče je nutné, aby kartáč měl s hřídelí dokonalý styk. Jak již bylo uvedeno dříve, průrazné napětí olejového filmu v ložiscích generátoru může být již 2 V ([16] uvádí dokonce napěťovou hladinu pod 0,9 V). Ovšem na přechodu kartáč-hřídel dochází také k úbytku napětí, v závislosti na provozních podmínkách pak nemusí být zaručeno, že tento úbytek napětí bude menší než je průrazné napětí ložisek a ložiskový proud bude procházet přes

kluzný kontakt. Tento úbytek napětí podle [1] se u elektrografitového kartáče zvyšuje úměrně s velikostí proudu. Proto je možné očekávat, že ložiskové proudy vyšších hodnot by nemusel uzemněný kartáč eliminovat. Především v přechodných stavech a ve stavu, kdy je porušena mazací vrstvička v ložisku, by mohl proud procházet pouze ložiskem.

## 2.3 Umístění

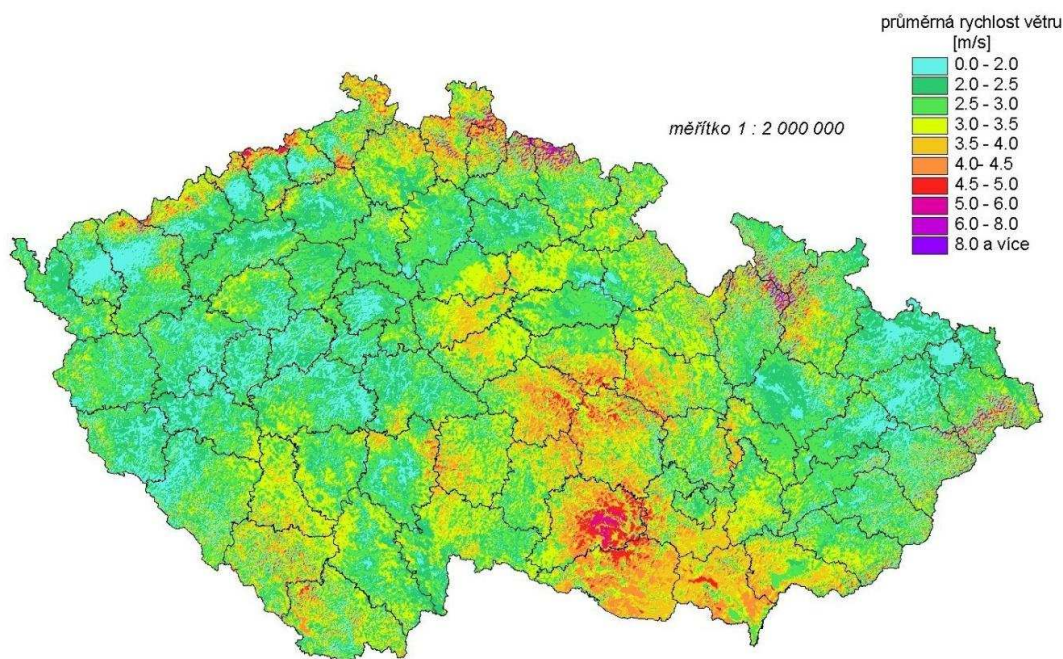
Umístění větrných elektráren je možné realizovat následujícím způsobem:

- 1) umístění na moři,
- 2) umístění na pevnině.

Původně byly všechny větrné elektrárny umístěny na pevnině. Ovšem instalace větrných elektráren nejvyšších výkonů je vzhledem k velikosti a rozměrům jednotlivých dílců na hranici možností současné techniky. Nové stroje se výkonově pohybují kolem 3 MW, průměr rotoru dosahuje 130 m a výška stožáru až 140 m. Nastávají problémy s transportem a se zvedáním těchto dílců do potřebné výšky. Důležitým aspektem je také snižující se potenciál vhodných lokalit pro výstavbu, především v Evropě, která je hustě osídlená. Nesmíme zapomenout také na hluk, který je způsoben velkou obvodovou rychlostí listů. Na pevnině tedy není možné zvyšovat výkon větrných elektráren vyššími otáčkami, ale pouze větším momentem. To ovšem znamená zvětšení hmotnosti stroje.

### 2.3.1 Umístění na pevnině (ČR)

Při uvažování instalace větrné elektrárny v České republice je nejdůležitější stanovit pro konkrétní umístění jeho větrný potenciál.



Obr. 2.9: Průměrná rychlost větru v ČR ve výšce 10 m [13]

Referenční větrný potenciál se určuje z naměřených hodnot ve výšce 10 m (případně 30 – 40 m) nad zemským povrchem, v horní hranici přízemní vrstvy atmosféry. Tím se potlačí vliv drsnosti povrchu.

Roční rychlost větru na území České republiky ve výšce 10 m:

- $4,1 - 4,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ : 6 – 7 %,
- $4,6 - 5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ : 2 – 3 %,
- $5,1 - 6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ : 1 – 1,5 %,
- nad  $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ : 0,5 %.

Zde je nutno podotknout, že místa s největším větrným potenciálem se bohužel nachází v chráněných oblastech, kde ochota úřadů k povolení výstavbě větrných elektráren není vysoká. Značná prostorová proměnlivost této rychlosti vzniká v důsledku následujících faktorů:

- 1) úbytek rychlosti v mezní vrstvě atmosféry v poledníkovém směru od severu k jihu,
- 2) deformace vlivem velkých geografických objektů (např. Alpy, Karpaty),
- 3) deformace vlivem středních a menších geografických objektů (česká pohoří, jednotlivé kopce),
- 4) vliv malých překážek (budovy, vysoké stromy), vliv drsnosti povrchu,
- 5) svahové proudění.

Zvyšování rychlosti větru v závislosti na nadmořské výšce vykazuje značný rozptyl. Například na jihovýchodní a jižní Moravě je příznivá souhra výše uvedených faktorů, a tedy i v malé nadmořské výšce (nižší než 600 – 700 m) existují vhodná místa pro výstavbu.

Pro objektivní posouzení míry produktivity se používá tzv. kapacitní faktor. Je to poměr skutečně vyrobené elektrické energie a objemu elektrické energie, kterou by generátor vyrobil při nominálním výkonu za období jednoho roku. Hodnota tohoto ukazatele se pohybuje přibližně mezi 0,10 a 0,35 (údaj z roku 2005, kdy průměr byl 0,26). Přitom největšího poměru bývá dosahováno při velkých průměrech rotoru, tedy velkém výkonu.

### 2.3.2 Umístění na moři

Větrné elektrárny umístěné na mořských mělčinách se začaly objevovat na přelomu 80. a 90. let minulého století v Dánsku. Nyní mají nejvíce tzv. „offshore“ instalací ve Spojeném království, Německu a Dánsku, dohromady přes 85 % všech těchto instalací.

Umístění na moři má své výhody i nevýhody. Hlavní výhodou tohoto umístění jsou lepší větrné podmínky (vyšší rychlost, stálost) a možnost instalace elektráren vyšších výkonů (to souvisí s jednodušším transportem a menším omezením z hlediska hluku a začlenění do krajiny). Na druhou stranu je doprava dílů a montáž dražší z důvodu nutnosti použití speciálních zařízení (především lodí) a také kvalifikovaných pracovníků. Navíc jsou elektrárny propojeny s pevninou dlouhými kabely, což znamená další výdaje na materiál a montáž. Z ekonomického hlediska je tedy zapotřebí větší kapitál, ale dá se očekávat vyšší výnos.

Z našeho pohledu je velmi důležitá otázka působení mořského prostředí na elektrické instalace – generátoru, kabelových spojů, transformátorů, rozveden, servomotorů i řídicí elektroniky. Hlavními problémy jsou vlhkost a vysoký obsah soli ve vzduchu. Musí být zaručeno, že použité materiály nebudou ztrácet své mechanické a elektrické vlastnosti. Všechna elektrická zařízení musí být v těchto podmínkách zcela hermetizována. Kromě toho musí být samozřejmě více chráněny proti korozi také ocelové dílce, které jsou v bezprostředním styku se slanou mořskou vodou.

## 3 KLUZNÝ KONTAKT

U řady točivých strojů je nezbytné elektrické spojení vnějšího obvodu s vinutím na rotoru. Toto spojení je realizováno pomocí kluzného kontaktu. Aktivní část tohoto kontaktu (tedy částí, které po sobě kloužou) se skládá ze dvou základních elementů – kartáče a kroužku / komutátoru. U větrných elektráren se ovšem stroje s komutátorem nevyužívají, proto se budu v práci dále zabývat již jen kluzným kontaktem kartáč – kroužek.

Kartáč pro zajištění své hlavní funkce potřebuje další komponenty. Společně s těmito komponenty se pak tento celek nazývá sběrací ústrojí. Pro nás budou nejdůležitějšími částmi sběracího ústrojí kartáče a držáky kartáčů. Další komponenty jsou pak svěrky pro upevnění držáků, roubíky (případně nosiče držáků), brejle (tj. nosiče roubíků) a spojovací pásy.

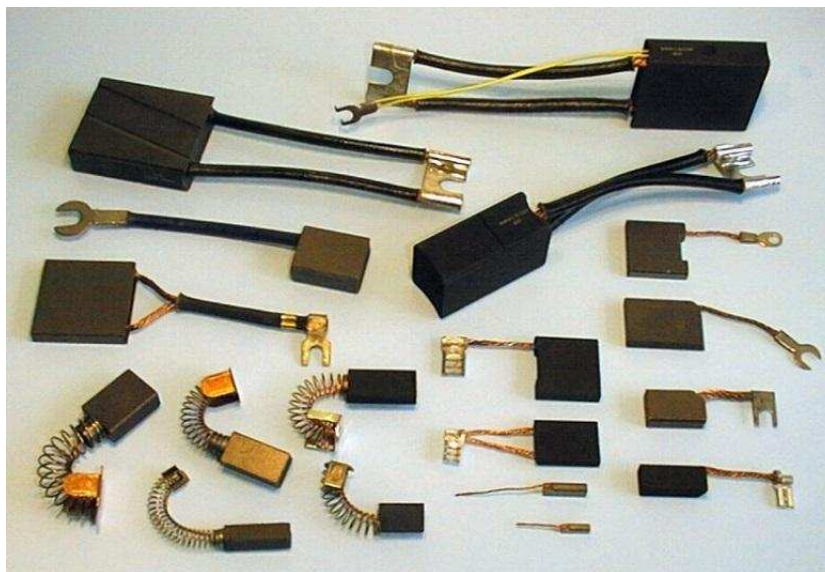
### 3.1 Kartáče

Existuje velká řada jakostí kartáčů. Je to dáno tím, že kartáče se vyrábějí už od začátku minulého století, jejich vývoj – stejně jako vývoj nových strojů – pokračuje, objevují se nové kvality a provedení, a také díky velkému počtu výrobců dosahuje počet různých jakostí kartáčů tak rozmanitého počtu.

#### 3.1.1 Konstrukce kartáče

Existuje řada provedení kartáčů, které se liší rozměry, tvarem, počtem částí (případně vrstev), ze kterých se skládá, dále úpravou hlavy kartáče, přívodními lankami (počtem, připojením, délkou), tvarem kabelového oka a přídatnými elementy. Ukázky různých provedení jsou zobrazeny na obrázku níže. Podle provozních podmínek se výrobci kartáčů snaží najít nejvhodnější řešení.

Protože označení kartáč není jednoznačné (může totiž označovat nejen pouze uhlíkový materiál, ale i jeho celkovou konstrukci), norma ČSN 350820 přesně specifikuje pojem kartáč. Je to vodivá část, která slouží k zajištění elektrického spojení mezi pohyblivou a nepohyblivou částí elektrických strojů. Část, která je v bezprostředním styku s rotující částí stroje, se pak označuje jako materiál kartáče. Přídatné části kartáče – např. lanka a kabelová oka – se pak nazývají armaturou kartáče.



Obr. 3.1: Typy kartáčů [14]



### 3.1.2 Požadavky na kartáče

Od kartáčů jsou vyžadovány tyto vlastnosti:

- 1) velká životnost (a zároveň co nejmenší opotřebení kroužku),
- 2) dobrá komutační schopnost,
- 3) malý kontaktní a vnitřní odpor (tedy malé ztráty),
- 4) velká zatížitelnost (jak elektrickou, tak tepelnou),
- 5) mechanická pevnost,
- 6) malá citlivost na atmosférické vlivy,
- 7) leštící schopnost (pro odstranění nežádoucích vrstev kroužku a pro odstranění přečnávající izolace).

Ideální teplota kartáče se pohybuje těsně pod 100 °C (obvykle kolem 95 °C). Při teplotách nižších než 60 °C může dojít k „chřestění“ a následně k jejich rychlejšímu opotřebení. Při teplotách nad 110 °C není u klasického kluzného kontaktu zaručena potřebná vlhkost k vytvoření filmu na kroužku (jedná se o zbytky kartáče na kroužku), tedy přirozená mazací schopnost se ztrácí.

Vzhledem k tomu, že se kartáč kroužku nedotýká celou plochou, ale pouze v určitých kontaktních bodech (což je způsobeno přirozenou vlastností materiálu, který nemůže být nikdy dokonale hladký), protéká proud pouze těmito body. Tím se tyto body zahřívají, odpařují se a následně vznikají nové kontaktní body. Vzhledem k této skutečnosti přibližně platí, že nezávisle na velikosti kontaktní plochy, musí vzniknout minimálně 40 W elektrických ztrát pro zajištění dobré práce klasického kluzného kontaktu. Dále je nutné si uvědomit, že kroužek je kruhového tvaru a tedy k největšímu přechodu proudu dochází ve středové části kartáče. Okrajové části kartáče také vedou proud (díky prachu a volným částicím uhlíkového a kovového materiálu, případně pomocí volných elektrických nábojů, díky kterým může docházet k jiskření).

Při instalaci sběracího ústrojí je nutné nastavit správný tlak, kterým je přitlačován kartáč na kroužek. Ten se pohybuje od 13 kPa (pro kroužky turbogenerátorů s drážkou) do 75 kPa (pro trakční generátory s dieslovým motorem). Je potřeba si přitom uvědomit, že ve skutečnosti přitlačná síla klesá s délkou vysunutí kartáče. Například u držáku typu R osazený kartáčem CG310 tato síla klesá nejprve jen mírně, v určitém bodu ale začne prudce klesat (vyskytují se ovšem lokální extrémy). U držáků kartáčů s pružinou může tato síla klesat lineárně (bez lokálních extrémů). V případě výměny kartáčů je nutno při určitém podílu kartáče zabrušovat, křížově nařezat, případně naškrábat (kvůli rychlému přizpůsobení třecí plochy). Všechny kartáče ve stroji musí být stejného typu, tedy i kvality (pokud se nejedná o stroj se smíšeným osazením). Kartáče je nutno zabíhat s co největším proudem.

### 3.1.3 Materiály kartáčů

Kartáče jsou vyráběny ze směsi grafitu. Existuje 6 základních skupin materiálů:

- 1) elektrografit (Amorfní uhlík + grafit, vypalovaný za teploty 2500 °C),
- 2) přírodní grafit (čistý přírodní grafit + pojivo),
- 3) kartáče ze speciálních materiálů (např. grafit s pryskyřičným pojivem, dále pak bakelitový uhlografit, grafit impregnovaný kovem),
- 4) kovografit (kovy + grafit),
- 5) uhlografit (amorfní uhlík + grafit),
- 6) inovované kartáče.

Důvod použití uhlíku jako základní suroviny pro výrobu kartáčů spočívá v tom, že se netaví. Až při překročení 3500 °C sublimuje. Při hoření oblouků tedy nedochází k tvorbě tavných kapek, jak je to možné pozorovat u kovových kontaktů.

Elektrografit má součinitel tření  $\mu = 0,1 - 0,25$ . Jsou vhodné pro velké obvodové rychlosti (50 – 60 m·s<sup>-1</sup>), při použití zvláštních jakostí až 80 m·s<sup>-1</sup>. Vykazuje relativně dobrou elektrickou vodivost – 15 až 100 μΩm, tedy relativně nízké ztráty, a přitom dobrou komutaci proudu na komutátorových strojích. Je možné je vyrobit zároveň relativně pevné i pružné, čímž se stává ideální volbou pro trakční motory. Proudová zatížitelnost se pohybuje mezi 12 a 16 A·cm<sup>-2</sup> (v závislosti na použití a chlazení). Ve zvláštních případech umožňují špičkové zatížení až 60 A·cm<sup>-2</sup>. Je tedy vhodný pro všechny druhy elektrických strojů. Tvoří tedy nejpoužívanější skupinu kartáčů. Podle podílu výchozích surovin je pak možno vyrobit kartáče nejružnějších vlastností.

Přírodní grafit se vyznačuje odolností proti otěru při vynikajících kluzných vlastnostech. Použití je tedy vhodné pro vysoké obvodové rychlosti, případně pro čistící využití. Mají však špatnou komutační vlastnost. Proudově snese zatížení 10 A·cm<sup>-2</sup>, krátkodobě až 20 A·cm<sup>-2</sup>. Obecně jsou používány pro stroje s menším výkonem a velkou obvodovou rychlostí (do 40 m·s<sup>-1</sup>), pro svařovací agregáty a pro turboalternátory s velkou obvodovou rychlostí (do 70 m·s<sup>-1</sup>).

Grafit s pryskyřičným pojivem má relativně velký odpor – 100 – 300 μΩm a zároveň velký poměr příčného odporu k podélnému. Jeho důležitou vlastností je schopnost tlumit zkratové proudy mezi lamelami (vhodné např. pro třífázové komutátorové stroje). Nevýhodou tohoto materiálu je menší zatížitelnost a především přetížitelnost oproti elektrografitům, proudové zatížení by nemělo přesáhnout 12 A·cm<sup>-2</sup>.

Kovografit se vyznačuje, díky kovovým práškům, nejčastěji mědi, vysokou vodivostí (0,1 – 10 μΩm). Kromě mědi se do materiálu může přidat ještě olovo, pryskyřice nebo stříbro (bez mědi). Nevýhodou je nižší dovolená obvodová rychlost, řádově do 30 m·s<sup>-1</sup>. Zatížit se však může trvale až 25 A·cm<sup>-2</sup>. Jsou tedy vhodné pro použití ve strojích, kde je vyžadováno velké zatížení kartáčů (např. galvanizační dynamo). Také jsou vhodné pro stroje s nižším napětím (pod 80 V).

Uhlografit vykazuje jistý kompromis mezi vlastnostmi uhlíku a elektrografitu. Nejčastější použití nachází v univerzálních strojích s prohloubenou izolací lamel. Přípustná obvodová rychlost dosahuje 25 m·s<sup>-1</sup>, proudové zatížení asi 8 A·cm<sup>-2</sup>, vhodné jsou tedy pro malé stroje s malým zatížením a malou obvodovou rychlostí (např. univerzální motorky)

Dále se tyto materiály díky pórovitosti mohou impregnovat mědí, parafínem, karbonem, umělou pryskyřicí.

Méně zatížené kartáče je vhodné impregnovat minerálním olejem, pryskyřicí, díky čemuž lze příznivě ovlivnit jejich chování v určitých podmínkách při provozu.

Pro sběrací kroužky alternátorů jsou vhodné tvrdší druhy kartáčů takové velikosti, aby hustota proudu byla 8 – 12 A·cm<sup>-2</sup>.

Výběr příslušného typu kartáče se odvíjí od aplikace.

### 3.1.4 Opotřebení kartáčů

Vzhledem k tření mezi kartáčem a kroužkem se obě tyto komponenty opotřebovávají. Protože materiál kroužku je mechanicky mnohem odolnější, dochází k mnohonásobně většímu opotřebení kartáče. Musíme tedy uvažovat především tento prvek. U velké části točivých strojů je to jediný

opotřebující se element v krátkém časovém rozmezí. Proto také běžná údržba elektrického stroje spočívá kromě udržování čistoty stroje a jeho blízkého okolí jen v kontrole a případné výměně těchto prvků. Další úkony (např. mazání ložisek, výměna mazacího oleje, kontrola dalších částí) se provádějí pouze výjimečně. Vzhledem k tomu je pro úsporu práce důležité znát možné příčiny opotřebení, a tím nalézt možné řešení ke zmenšení velikosti opotřebení.

Opotřebení je dvojího typu – přirozené a mimořádné (předčasné). Přirozené opotřebení je podmíněno funkcí kartáče, tedy zprostředkováním přenosu proudu mezi pohybujícím se povrchem kroužku a kartáčem. Projeví se snížením výšky kartáče za přiměřenou dobu. Mimořádné opotřebení je způsobeno destrukčními vlivy, jakými mohou být např. špatný mechanický stav rotující části stroje, vibrace, působení elektrického oblouku, nebo okolní atmosféra. Je však nutné si uvědomit, že kvalita kartáče není dána jen mírou opotřebení, ale i správnou funkcí. Navíc opotřebováváním kartáče vzniká uhlíková část patiny, mající příznivé účinky pro kluzný kontakt.

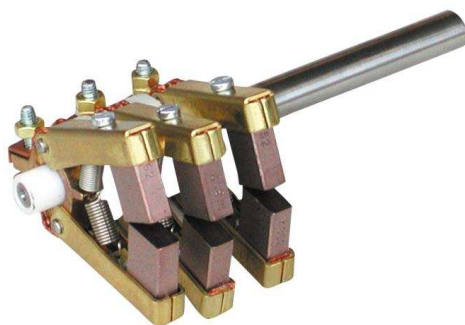
Obvykle se míra opotřebení hodnotí rozdílem výšky kartáče před a po opotřebení, jedná se o tzv. lineární otěr. Opotřebení se může vztahovat na jednotku doby trvání (ta je nejužívanější, obvykle se určuje v počtu milimetrů za stanovený počet hodin), jednotku třecí dráhy, případně na jednotku otáček. V ČR je dle norem nařízeno udávat střední hodnotu všech současně měřených kartáčů, ani jeden z kartáčů však nesmí přesáhnout tuto hodnotu o více než 30 %. Podle [2] se však v praxi ukazuje, že splnění tohoto požadavku je nemožné.

Na opotřebení kartáčů má vliv mnoho skutečností. Od vlivu proudového zatížení, přes materiál, vliv patiny, okolní atmosféry, teploty kartáčů, přítlačné síly, vlivu polaritu kartáčů, pulzací proudu, umístění kartáčů na komutátoru až po mechanické vlivy.

Jedním z nejvíce rozhodujících vlivů na opotřebení je proudové zatížení kartáče. Při větším zatížení kartáčů je vyšší i jeho opotřebení. Se zvyšujícím se proudovým zatížením se také zlepšují vlastnosti patiny. Zmenšuje se velikost tření, snižují vibrace, hluk, atd. Při posuzování vlivu okolní atmosféry je důležitá velikost absolutní vlhkosti vzduchu. Je ovšem nutno zdůraznit, že rozhodující je přítomnost vlhkosti v kluzné ploše, nikoli v okolí stroje. V některých provozech (např. v hutích, nebo trakci) jsou mnohem závažnější nečistoty v chladícím vzduchu, především při spolupůsobení s oleji.

Obecně se dá říct, že při vyšší přítlačné síle nastává větší opotřebení kartáče. Ovšem je potřeba si uvědomit, že při příliš malém tlaku dochází ke zvýšení jiskření, což má nepříznivý vliv na opotřebení kartáčů. U polaritu kartáčů není zcela jednoznačné, jak velký vliv na opotřebení má. Většina autorů se však shoduje v tom, že anodický kartáč se opotřebovuje rychleji.

### 3.2 Držáky kartáčů



Obr. 3.2: Dvojitý držák kartáče [15]

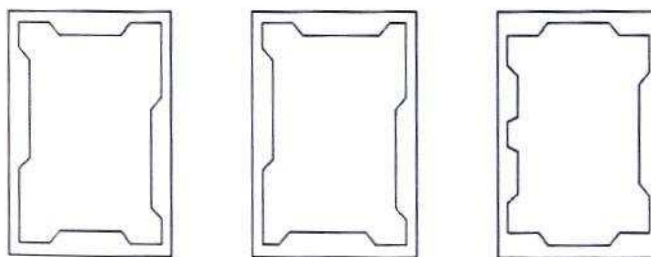
Funkcí držáků kartáčů je především zajištění upevnění a vedení kartáče, vytvoření potřebné (a konstantní) přítlačné síly kartáče na kroužek a vytvoření určité vůle kartáče kvůli nerovnostem a pro tlumení vibrací. Existuje více typů těchto držáků. Na obrázku 3.2 je zobrazen dvojitý držák kartáče.

Na kartáč, umístěný v krabici držáku kartáče, působí nejen přítlačná síla (nejčastěji ve směru kolmém na hlavu kartáče), ale i síla od tření. Kvůli těmto silám se

doporučuje pro zvýšení stability kartáče mít krabičku radiálního držáku co nejvyšší, s minimální vůlí mezi krabičkou držáku a kartáčem (doporučuje se 0,1 mm), co největší šířkou kartáče a malou výškou kartáče (to souvisí s malou hmotou kartáče). U posledního doporučení je nutné najít určitý kompromis, protože při vyšším kartáči není nutná tak častá údržba. Někdy se z tohoto důvodu zešikmuje hlava kartáče, případně celý kartáč, čímž dochází k jeho vyšší stabilizaci. Existují také tzv. reakční kartáče, kdy je celý kartáč nakloněn proti směru třecí síly (tyto kartáče mají vždy plochou hlavu).

Hlavními částmi držáku kartáče jsou krabička, pružina, pouzdro svěrky, přítlačný palec, tlumící pružina a napínače pružiny.

Dnešní vnitřní část krabičky držáku již obvykle nejsou obdélníkového tvaru, ale využívá se segmentového provedení vnitřní plochy, kdy je kartáč veden nikoliv celou plochou, ale jen určitými segmenty. To pak přispívá k lepšímu vedení kartáče, chlazení, také k lepšímu odvodu prachu.



Obr. 3.3: *Varianty segmentového (inovovaného) provedení krabičky držáků kartáčů [2]*

Velmi důležitou funkcí držáku kartáče je vytvoření předepsané síly na kartáč. K tomu slouží pružina, přítlačný palec, tlumící pružina a převodové páky (u moderních přítlačných zařízení již jen pružina). Přítlačná síla by se neměla měnit s velikostí opotřebení kartáče, ani s časem, měla by mít konstantní působíště a působit radiálním směrem.

Kvůli složitým podmínkám, ve kterých kartáčové držáky pracují, je nutné provést určité povrchové úpravy tak, aby nedošlo ke snížení životnosti vlivem korozivních vlivů. Používá se např. kadmiování, nebo chromování. Protože je však obtížné vytvořit dokonalou vrstvičku, měly by se držáky vyrábět z barevných kovů nebo nerezové oceli.

### 3.3 Sběrací kroužky

U větších strojů se sběrací kroužky nasazují na ocelové pouzdro, které se následně vkládá na hřídel. Mezi hřídel a pouzdro se přitom vkládá izolace, přičemž jako izolační materiál se používá buď tvrzený papír, nebo tvrzená tkanina. Používají se řady rozměrů kroužků (průměry 31,5; 50; 63; 80; 100; 125; 160; 200; 250; a dále, šířky 10, 16, 25, 32 mm). Dovolena hodnota opotřebení průměrných kroužků je dána průměrem – pro 50 mm jsou to maximálně 3 mm, pro 500 mm to je pak maximálně 7 mm.

Jako materiál pro sběrací kroužky jsou obvykle používány slitiny mědi. Obvykle je do slitiny přidáván zinek (nesmí být více než 5 %). Nejčastěji se používají různé druhy bronzů, např. cínový bronz CuSn 5 – 95 % Cu, 5 % Sn; nebo cíno-zinkový bronz – 88 % Cu, 8 % Sn, 4 % Zn nebo cíno-fosforový bronz – 89,5 % Cu, 10 % Sn, 0,5 % P. Pokud je uvažováno umístění kroužků v prostředí, kde by mohlo docházet k velkému opotřebení, jsou používány slitiny mědi s niklem. Z této skupiny se nejvíce používá slitina složená z 96 % Cu a 4 % Ni. V rámci zaměření

této práce je důležité použití tzv. Monelových slitin, které se využívají při použití na mořích s vysokou korozivní atmosférou – skládá se z 30 % Cu, 67 % Ni, 1,4 % Fe a 1 % Mn. Velmi často se dnes pro kroužky strojů s velkou obvodovou rychlostí používá také ocel, téměř výlučně u turboalternátorů. Obvykle se jedná o uhlíkaté oceli.

Kromě materiálu je velmi důležitá struktura slitiny, která je dána způsobem lití a následným tuhnutím. Obecně by kroužky měly mít mnohem větší tvrdost než kartáče.

U velkých strojů je z důvodů přenášení proudů velkých hodnot často větší počet paralelně pracujících kartáčů. Pro lepší rovnoměrnost rozdělení proudu a také pro zlepšení kontaktu jsou využívány spirálové drážky v kroužcích (především pro kroužky s vyššími obvodovými rychlostmi). Touto úpravou se docílí snížení úbytku napětí mezi kartáčem a kroužkem. Dojde ovšem ke zvýšení tření.

Při nadměrném opotřebení se kluzná plocha kroužku opracovává. Používají se dva způsoby – soustružení a broušení. Přitom není cílem dokonale hladký povrch, protože jen díky určité drsnosti je možné docílit vytvoření (a udržení) uhlíkové složky patiny.

### 3.4 Patina

Patina je velmi důležitým aspektem pro správný chod kluzného kontaktu. Jedná se o povrchovou vrstvičku, která se vytváří na kroužcích. Vzhled aktivního povrchu kroužku je určen právě patinou. Je složena ze dvou složek – z vrstvičky oxidů kovů a z jemného nánosu uhlíku, který ulpívá na povrchu kroužku. S ohledem na tématické zaměření této práce je vhodné zmínit, že vrstvička oxidů se tvoří již při stavu, kdy stroj není zapnut. Tento jev se zvýrazní při vyšší vlhkosti a při vyšší teplotě.

Díky mazací vlastnosti patiny je možné dosáhnout klidné práce kartáčů, menších ztrát třením a menšího opotřebení. K vytvoření patiny je potřeba dostatečné proudové zatížení, pokud je příliš malé, dochází k rozrušování již vzniklé vrstvy. Tvorba patiny je však složitý dynamický proces daný mnoha činiteli, přičemž charakter filmu (patiny) se nepřetržitě mění, což je dáno i nepatrnými změnami provozních podmínek.

### 3.5 Diagnostika a údržba kluzného kontaktu

Jelikož je kluzný kontakt jedním z nejméně poruchových částí elektrických točivých strojů s tímto prvkem, je jeho údržba a diagnostika velmi důležitá.

Existuje velké množství vlivů a prvků, které působí negativně na činnost kluzného kontaktu. Je třeba vyhodnotit mechanický stav kroužků, mechanický stav kartáčů a jeho opotřebení, stav sběracího ústrojí, oteplení prvků kluzného kontaktu, způsob zatěžování, prostředí v okolí stroje, izolaci a spoje vinutí, vibrace a další.

Je potřeba se rovněž zaměřit na to, aby poruchový prostoj byl co nejmenší, vyhodnotit pravděpodobnost výskytu větších poruch a diagnostikovat počínající, případně již vzniklou poruchu a nalézt řešení, jak zabránit dalším poruchám podobného typu.

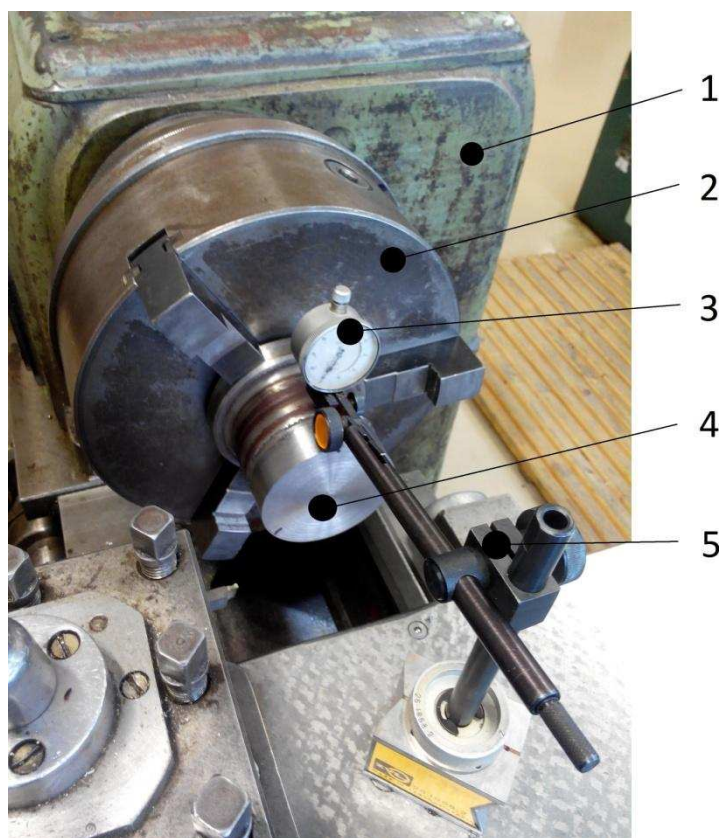
### 3.6 Analýza kroužkové soustavy v závislosti na ovalitě hřídele

Mezi základní parametry kroužkové soustavy nepatří pouze parametry částí, které se podílejí přímo na vedení proudu ze statické části do rotující (kroužky a kartáče). Patří k nim také parametry hřídele, na kterou jsou kroužky nasazovány. Jedním z parametrů kroužkové soustavy je také ovalita hřídele. Měření bylo provedeno 26. 10. 2017 v dílně ÚVEE.

#### Popis měření:

Měřená hřídel byla upnuta do sklíčidla soustruhu, jak je zobrazeno na obrázku 3.4. Nebyla měřena přímo absolutní vzdálenost (např. mezi osou a povrchem hřídele), ale relativní vzdálenost, kde jako referenční hodnota byla brána ta, která byla změřena první – tedy v bodě měření nejbliž ke konci hřídele s větším poloměrem (první hodnota zleva podle obr. 4.1) při pootočení 0° (pro každou část zvlášť). Hodnoty v tabulkách (respektive v grafech) tedy udávají odchylku mezi tímto bodem a bodem změřeným.

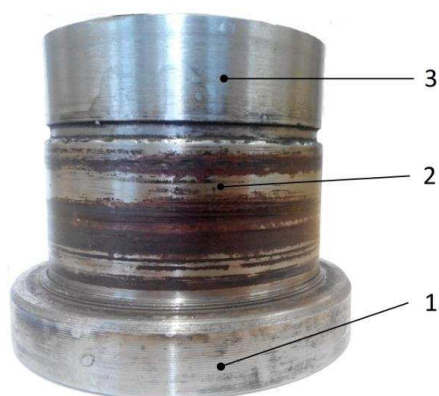
Měřicím přístrojem byl číselníkový úchylkoměr VMF (s přesností 0,01 mm) na stojánku ZVL (s označením 25 1858.2). Měření se neprovádělo až úplně ke krajům částí hřídele, poněvadž zde se provádí zkosení hran a hodnoty v těchto částech by nebyly směrodatné.



Obr. 3.4: Popis měření ovality hřídele

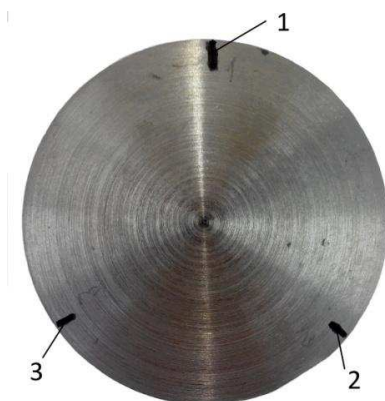
- Legenda:
- 1 – vřeteník soustruhu,
  - 2 – sklíčidlo soustruhu,
  - 3 – číselníkový úchylkoměr,
  - 4 – měřená hřídel,
  - 5 – stojánek na úchylkoměr.

**Popis hřídele:**



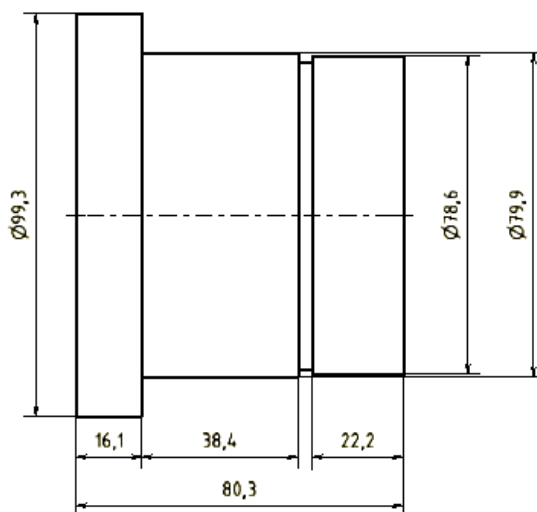
Obr. 3.5: *Popis hřídele – pohled 1*

Legenda: 1 – část 1 (rotorová),  
 2 – část 2 (ložisková),  
 3 – část 3 (kroužková).



Obr. 3.6: *Popis hřídele – pohled 2*

Legenda: 1 – pootočení 0°,  
 2 – pootočení 120°,  
 3 – pootočení 240°.



Obr. 3.7: *Vybrané rozměry měřené hřídele*

**Naměřené hodnoty:**

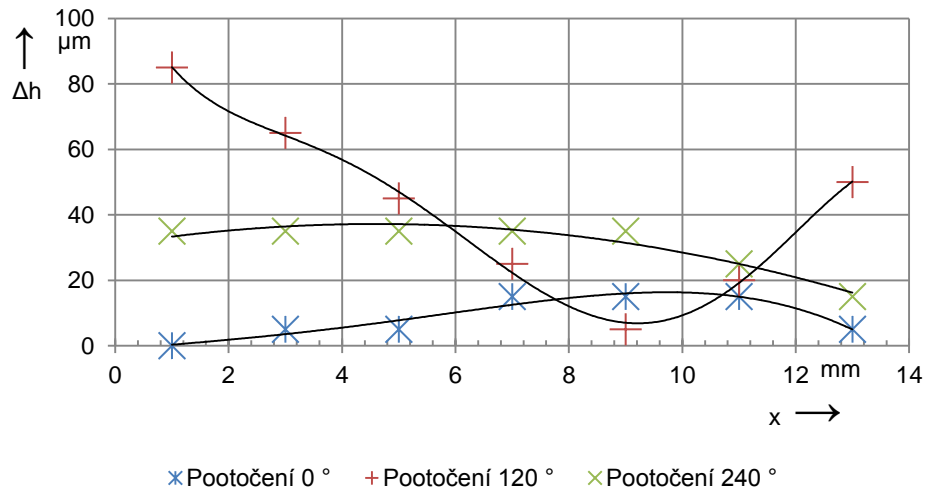
			Pootočení		
			0 °	120 °	240 °
	Bod měření	Posun v ose hřídele	Odchylka od referenční hodnoty		
		x	Δh		
	(-)	(mm)	(um)		
<b>Část 1</b>	1	1	0	85	35
	2	3	5	65	35
	3	5	5	45	35
	4	7	15	25	35
	5	9	15	5	35
	6	11	15	20	25
	7	13	5	50	15
<b>Část 2 (ložisková)</b>	1	1	0	760	920
	2	4	0	760	920
	3	7	0	770	930
	4	10	0	765	935
	5	13	5	775	935
	6	16	5	775	940
	7	19	5	775	945
	8	22	5	780	945
	9	25	15	775	945
	10	28	20	775	950
	11	31	25	775	955
<b>Drážka</b>					
<b>Část 3</b>	1	1	0	800	1000
	2	3	25	795	985
	3	5	25	795	1000
	4	7	25	795	1000
	5	9	25	795	1005
	6	11	25	795	1010
	7	13	25	785	1010
	8	15	25	795	1010
	9	17	35	785	1005
	10	19	135	700	935
	11	21	155	680	875

Tab. 3.1: Naměřené hodnoty při měření ovality hřídele

Pozn. Referenční hodnota je vždy první v pořadí při pootočení 0° (pro každou část zvlášť).

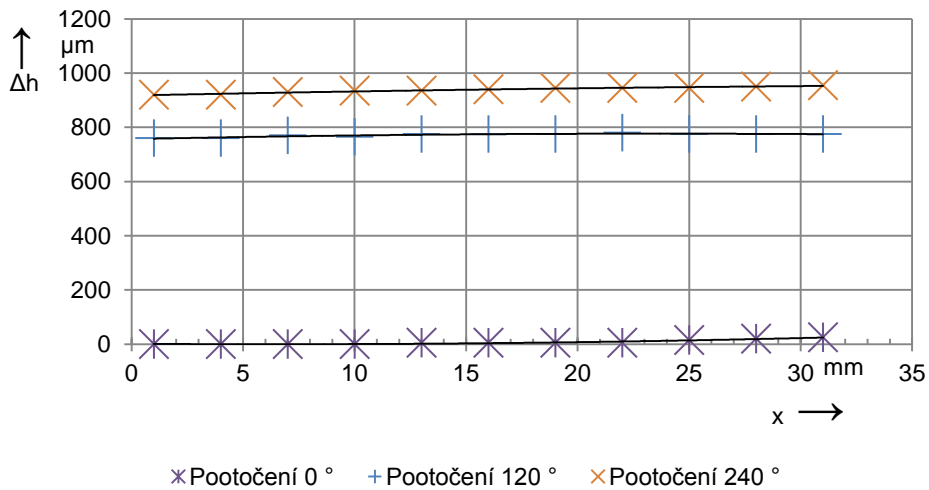


**Grafické vyjádření:**



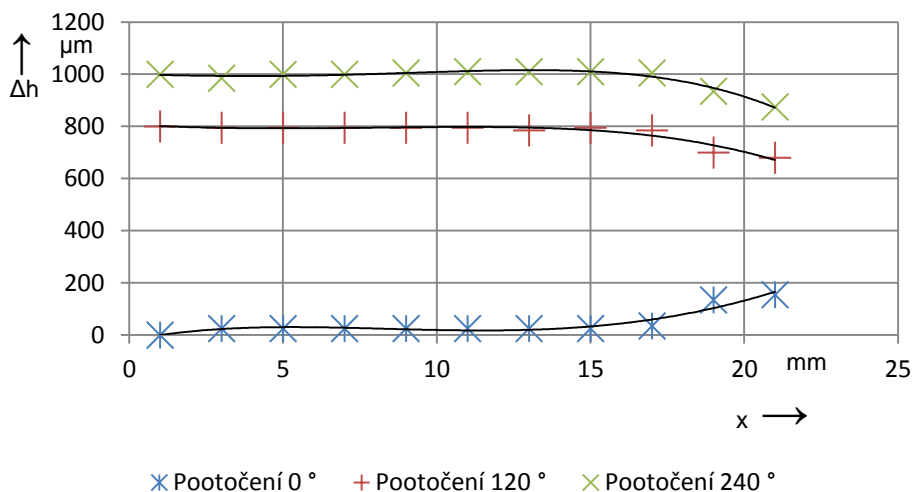
Obr. 3.8: Naměřené odchytky – část 1

Legenda:  $\Delta h$  – odchylka,  
 x – místo měření v ose hřídele.



Obr. 3.9: Naměřené odchytky – část 2

Legenda:  $\Delta h$  – odchylka,  
 x – místo měření v ose hřídele.



Obr. 3.10: Naměřené odchytky – část 3

Legenda:  $\Delta h$  – odchytky,  
 x – místo měření v ose hřídele.

### Zhodnocení:

Účelem měření bylo analyzovat možné degradační vlivy, vznikající v důsledku neokrouhlosti hřídele. Nejednalo se o hřídel určenou k dalšímu použití, ale o hřídel již použitou. Při zaměření se na část 1 – rotorovou část hřídele – lze konstatovat, že odchytky od referenčního bodu se pohybují v rozmezí 140  $\mu\text{m}$  (dle grafu se může zdát, že se jedná pouze o 80  $\mu\text{m}$ , to je však dáno tím, že osa y udává odchytku, která nemůže být záporná). U pootočení 0° a 240° se nejedná o nijak výrazné odchytky, u pootočení 120° ovšem můžeme pozorovat, že povrch této části hřídele není rovnoběžný se středovou osou, ale téměř lineárně klesá o již dříve zmíněných 140  $\mu\text{m}$ .

Na částech 2 (ložisková část) a 3 (části pro potenciální použití kroužků) jsou výsledky analogické. Pokud bude za referenční hodnotu brána hodnota při pootočení 0°, pak se odchytky u pootočení 120° pohybují okolo 0,8 mm, respektive 1,0 mm při pootočení 240°. U části 3 jsou odchytky větší řádově o desítky mikrometrů. U části 3 si lze také všimnout nárůstu odchylek u všech tří pootočení, což znamená zvětšení poloměru o 0,15 mm dle měření.

Výše popsána neokrouhlost způsobovala u motoru s touto hřídelí vibrace. Vliv této neokrouhlosti závisí na obvodové rychlosti kroužku – čím vyšší rychlost, tím větší je její vliv. Tyto vibrace by se mohly projevit na kluzném kontaktu (kroužek – kartáč) následujícími důsledky:

- rychlým opotřebením především hran kartáčů,
- vytvářením nepatrných trhlinek, které by postupně mohly vyústit v rozpádávání kartáčů,
- ulamováním kartáčů, vypadáváním přívodních lanek,
- v případě, že by neokrouhlost byla dostatečná pro nadsakování kartáčů, tak:
  - vznikem oblouku v určitém místě (při určitém pootočení) kroužku,
  - zvýšením přechodového odporu, čímž by docházelo ke zvýšení teploty, což by vedlo k rychlejšímu opotřebením kartáče,
  - většími ztrátami,
  - nerovnoměrným rozložením patiny,
- hlukem kartáčů (především při malém proudovém zatížení).

Tyto vlivy lze částečně eliminovat použitím tlumících elementů. Může jím být např. silikonkaučuková příložka na hlavě kartáče, nebo to mohou být tlumící elementy umístěné v držáku kartáče.

## 4 KLUZNÝ KONTAKT V MOŘSKÉM PROSTŘEDÍ

### 4.1 Úvod do problematiky

Mořské prostředí se na činnost kluzného kontaktu může negativně projevovat více způsoby. Může to být elektrolyza tenké vodní vrstvy mezi kartáčem a kroužkem, vznikající rez, případně částice soli na kontaktu kartáč-kroužek, vzniklé odpařením kapek slané vody dopadnuté na povrch kroužku.

### 4.2 Elektrolyza v kluzném kontaktu

Vlivem vlhkosti v atmosféře se vždy na jakémkoliv předmětu utváří tenká vodní vrstva. Je vytvářena kondenzací vodních par obsažených ve vzduchu. To platí i pro kartáč a kroužek. V náročných podmínkách u kluzného kontaktu generátorů větrných elektráren situovaných na moři, kde je vlhkost vzduchu velmi vysoká, je pravděpodobnost výskytu této tenké vodní vrstvy vyšší. Pokud tedy v kluzném kontaktu nedochází k přímému dotyku, je proud veden právě přes tuto vrstvu. To následně vede k elektrolyze vody v této vrstvě.

Přitom je důležité, který element kluzného kontaktu je anoda a který katoda. Pokud je anodou kartáč a katodou kroužek, tak se na kartáč uvolňuje kyslík, čímž dochází kvůli reakci s uhlíkem oxid uhličitý, čímž dochází ke změně struktury povrchu. Na kroužku se uvolňuje vodík.

Naopak pokud je anodou kroužek a katodou kartáč, pak se na kroužku vytváří vrstva složená z oxidů mědi, čímž dochází k vytvoření filmů různých barev. Na kartáč se pak usazuje měď z kroužků, která pak narušuje vrstvu patiny na kroužku, což vede ke zhoršení činnosti kluzného kontaktu.

Tenká vodní vrstva se ovšem mění v závislosti na provozních podmínkách. Vlivem vysoké teploty kroužku se zkondenzovaná voda může rychle odpařit, čímž dochází k většímu opotřebením kartáčů, zároveň se však vodní vrstvička neustále obnovuje v závislosti na vlhkosti vzduchu, teplotě a dalším parametrům vnějších podmínek v gondole větrné elektrárny.

### 4.3 Vliv cizích částic na velikost přitlačné síly

Cizími částicemi se v tomto případě rozumí prach, a to především takový, který vzniká působením mořského prostředí – tedy částice rzi.

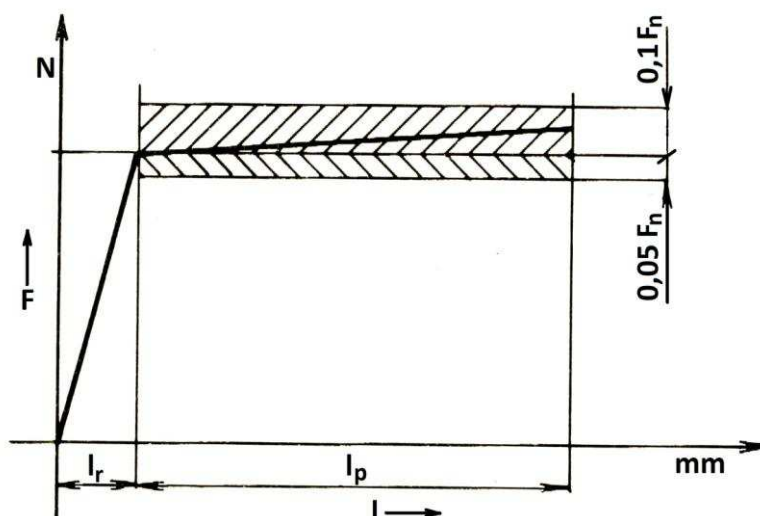
#### 4.3.1 Popis svinovací pružiny použité u měřeného vzorku

K vytvoření přitlačné síly je potřeba přitlačné zařízení, které se u moderních konstrukcí skládá pouze z pružiny. Na tuto pružinu jsou kladeny následující požadavky:

- 1) konstantní velikost přitlačné síly (neměnná s časem ani s opotřebením kartáče),
- 2) optimální a konstantní působiště přitlačné síly,
- 3) nemožnost vzniku přídatných momentů od přitlačné síly, které kartáč vychylují z radiálního směru,
- 4) odolnost vůči dynamickým stavům.

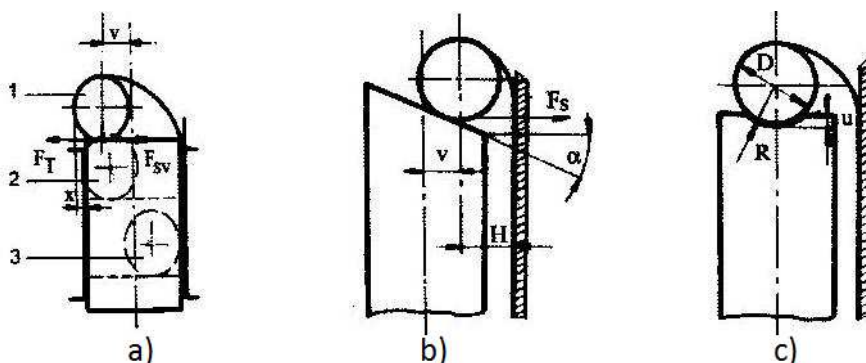
Pro generátory větrných elektráren je nejčastěji využíváno svinovacích pružin z chromniklové oceli. Jedná se o tenký pásek nerezavějící oceli předepjat tak, že se bez působení cizích sil svine do kotouče určitého průměru. Jeho hlavní výhodou je konstantní síla při různé délce roztažení pružiny a to i pro velmi vysoké kartáče. Změna síly v závislosti na délce roztažení je znázorněna

na charakteristice této pružiny,  $l_r$  je rozběhová část (je dlouhá asi 5 mm),  $l_p$  je pracovní délka pružiny,  $F_N$  je pracovní síla pružiny.



Obr. 4.1: Charakteristika svinovací pružiny [19]

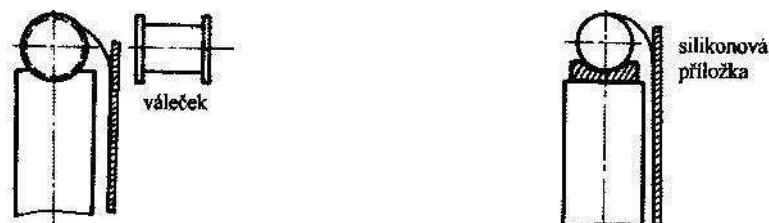
Možným problémem svinovací pružiny je (zvláště při nepřesně určených rozměrech) změna přítlačného místa v závislosti na opotřebení kartáče a tedy jeho snižující se výškou. To znázorňuje obrázek 4.2 a). Správným návrhem pružiny a úpravou hlavy kartáče je možné tuto skutečnost částečně eliminovat. Možné úpravy hlavy kartáče jsou zobrazeny na obrázcích 4.2 b) a c).



Obr. 4.2: Působíště síly svinovací pružiny a možné úpravy hlavy kartáče [2]

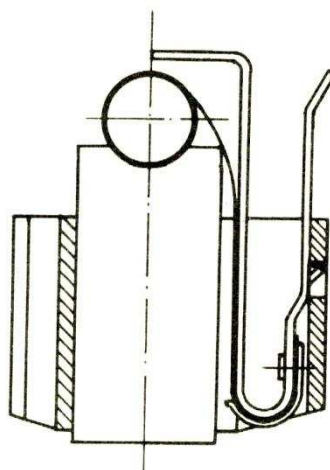
U držáků kartáčů se svinovací pružinou dochází obvykle k přímému styku pružiny s kartáčem, což je příčinou provozních poruch. Dochází k tepelnému narušení pružiny v místě styku s kartáčem, a to nejen při vysokých teplotách kartáče, ale i v případě, že pružina tvoří proudovodnou cestu. To se může stát např. při narušení spoje mezi kartáčem a lankem nebo při přerušení lanka. Následkem tepelného narušení pružiny pak je její horší svinování.

Dalším aspektem jsou vibrace, kdy někdy může dojít k lámání pružiny ve svinuté části. Proto se (zejména pro pro kluzný kontakt pracující v obtížných podmínkách) provádí další úpravy, např. použití teflonového válečku pro odizolování pružiny od kartáče nebo silikonová příložka pro tlumení vibrací.



Obr. 4.3: Svinovací pružina - odizolování pružiny od kartáče a silikonová příložka pro tlumení vibrací [2]

Dříve byl problém s použitím této pružiny v aplikacích, kde je používán kartáč o velké hmotnosti. Kvůli velké setrvačnosti soustavy s takto těžkým kartáčem nebyla pak pružina schopna zajistit dynamické vlastnosti soustavy. Problém to byl především při velkém opotřebení kartáče a tedy malé délce roztažení pružiny. Jak je zřejmé z charakteristiky pružiny, je potřeba nejprve rozvinout pružinu do určité délky, aby pružina vytvářela potřebnou přitlačnou sílu. Jedním z řešení je např. upevnění pružiny, jak to je zobrazené na obrázku níže, kdy i při malé výšce roztažení pružina vytváří dostatečně velkou sílu.



Obr. 4.4: Možnost zajištění dostatečné přitlačné síly při malém roztažení pružiny [19]

### 4.3.2 Měření přitlačných sil

V offshore větrných elektrárnách pracuje kluzný kontakt ve vlhkém prostředí, nasyceném solemi. Vlivem tohoto prostředí vzniká rez, která se pak ve formě volných částic (prachu) dostává do sběracího ústrojí generátoru. Problém nastává v případě, pokud se dostane mezi kartáč a vnitřní stěnu držáku kartáče. Pokud se tak stane, ovlivní to dynamiku sběracího ústrojí, tedy i sílu, kterou působí kartáč na kroužek. Z tohoto důvodu byl tento vliv prachu zkoumán pomocí měření popsaného níže, a to na sběracím ústrojí určeném pro generátory větrných elektrárn. Měření bylo prováděno na ÚVEE.

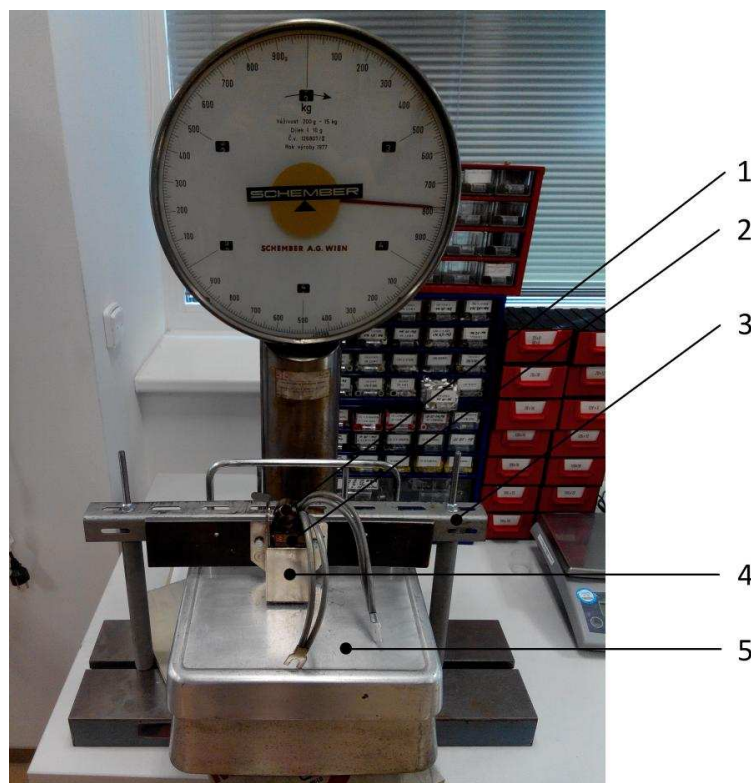
#### Popis měření:

Měření bylo prováděno pomocí analogové váhy SCHEMBER (váživost 200 g – 15 kg, rozlišení 10 g, v.č. 126807/II, rok výroby 1977), na kterou silově působilo zkoušené sběrací ústrojí. Nejprve byla změřena síla bez přítomnosti prachu. Následovalo měření, kdy bylo určité množství prachu nasypáno shora, následně kartáče vytaženy nahoru, odkud byly vzápětí spuštěny zpět dolů. Byla také změřena hmotnost prachu, který sběracím ústrojím propadl. Toto měření bylo provedeno celkem pro pět druhů prachu s označením Dronco 40 lamel., Tysolit 60 lamel., SIA, VSM a jedno bez označení (jednalo se o významně hrubší prach než u předešlých). Kvůli

průběžným výsledkům bylo po odměření prvních čtyřech uvedených přistoupeno k opětovnému měření přítlačné síly bez přítomnosti prachu. Nakonec bylo ještě provedeno kontrolní měření pro prach s označením SIA.

Naměřená hodnota nebyla dána pouze silou, kterou působila svinovací pružina sběracího ústrojí, ale také tíhovou silou kartáčů. Výška povrchu váhy byla 5 mm nad spodním okrajem držáku kartáče, aby to odpovídalo umístění držáku nad kroužkem.

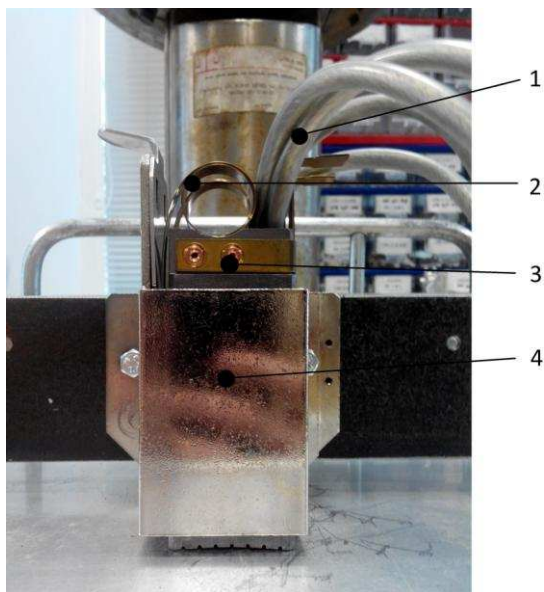
Hmotnost použitého prachu byla měřena digitální váhou EXCELL SI-132 (rozlišovací schopnost 0,01 g).



Obr. 4.5: Znárodnění měřícího pracoviště pro měření přítlačných sil

Legenda:

- 1 – Svinovací pružina
- 2 – Kartáč
- 3 – Stojan k uchycení držáku kartáče
- 4 – Držák kartáče
- 5 – Váha



Obr. 4.6: Detail sběracího ústrojí

Legenda:

- 1 – Přívodní lanka včetně izolace
- 2 – Svinovací pružina
- 3 – Kartáč
- 4 – Držák kartáče

Přepočtení naměřené hodnoty hmotnosti na velikost přitlačné síly bylo provedeno podle následujícího vztahu (příklad výpočtu je uveden pro první řádek tabulky 4.1):

$$F = m \cdot g = 3,61 \cdot 9,81 = 35,41 \text{ N} \quad (4.1)$$

Naměřené hodnoty:

Bez přítomnosti prachu		
Číslo měření	m	F
(-)	(kg)	(N)
1	3,61	35,41
2	3,55	34,83
3	3,46	33,94
4	3,47	33,99
5	3,51	34,43
6	3,57	35,02
7	3,53	34,63
8	3,39	33,26
9	3,67	35,95
10	3,65	35,81
11	3,38	33,16
12	3,50	34,34
Průměrná hodnota	3,52	34,56

Tab. 4.1: Naměřené hodnoty velikosti přitlačné síly – bez přítomnosti prachu



<b>Dronco 40 lamel.</b>			<b>Hmotnost prachu</b>	
Číslo měření	m	F	Použito celkem	Propadnuto skrz
(-)	(kg)	(N)	(g)	(g)
1	3,64	35,71		
2	3,53	34,63		
3	3,76	36,89		
Průměrná hodnota	3,58	35,13		

Tab. 4.2: Naměřené hodnoty velikosti přitlačné síly – Dronco 40 lamel.

<b>Tysolit 60 lamel.</b>			<b>Hmotnost prachu</b>	
Číslo měření	m	F	Použito celkem	Propadnuto skrz
(-)	(kg)	(N)	(g)	(g)
1	3,86	37,87		
2	3,58	35,12		
3	3,99	39,14		
Průměrná hodnota	3,71	36,35		

Tab. 4.3: Naměřené hodnoty velikosti přitlačné síly – Tysolit 60 lamel.

<b>SIA</b>			<b>Hmotnost prachu</b>	
Číslo měření	m	F	Použito celkem	Propadnuto skrz
(-)	(kg)	(N)	(g)	(g)
1	3,91	38,36		
2	3,81	37,38		
3	3,89	38,16		
Průměrná hodnota	3,82	37,48		

Tab. 4.4: Naměřené hodnoty velikosti přitlačné síly – SIA (I)

<b>VSM</b>			<b>Hmotnost prachu</b>	
Číslo měření	m	F	Použito celkem	Propadnuto skrz
(-)	(kg)	(N)	(g)	(g)
1	3,67	36,00		
2	3,96	38,85		
3	3,84	37,67		
Průměrná hodnota	3,84	37,70		

Tab. 4.5: Naměřené hodnoty velikosti přitlačné síly – VSM

<b>Měření bez nasypání prachu (pouze se zbytkem prachu po očištění kartáče a držáku kartáče)</b>		
Číslo měření	m	F
(-)	(kg)	(N)
1	4,04	39,63
2	3,85	37,77
3	3,94	38,65
4	3,86	37,87
5	3,87	37,96
6	3,99	39,14
7	3,92	38,46
8	3,93	38,55
9	3,88	38,06
10	3,97	38,95
Průměrná hodnota	3,93	38,50

Tab. 4.6: Naměřené hodnoty velikosti přitlačné síly - bez nasypání prachu

<b>Nedefinovaný hrubší prach</b>			<b>Hmotnost prachu</b>	
Číslo měření	m	F	Použito celkem	Propadnuto skrz
(-)	(kg)	(N)	(g)	(g)
1	1,86	18,25		
2	2,67	26,19		
3	2,39	23,45		
4	2,69	26,39		
5	2,48	24,33		
Průměrná hodnota	2,42	23,72	5,43	4,52

Tab. 4.7: Naměřené hodnoty velikosti přitlačné síly – nedefinovaný hrubší prach

<b>SIA (2. měření - kontrolní)</b>			<b>Hmotnost prachu</b>	
Číslo měření	m	F	Použito celkem	Propadnuto skrz
(-)	(kg)	(N)	(g)	(g)
1	3,74	36,69		
2	3,64	35,71		
3	3,85	37,77		
4	3,62	35,51		
5	3,84	37,67		
Průměrná hodnota	3,74	36,67	1,72	0,6

Tab. 4.8: Naměřené hodnoty velikosti přitlačné síly - SIA (II)

### Zhodnocení:

První měření přitlačných sil bylo provedeno pro případ, kdy byly kartáče nové, tedy bez přítomnosti jakéhokoli prachu. Pro tuto variantu bylo provedeno 12 měření. Průměrná hodnota přitlačné síly činila 34,56 N, přičemž dílčí hodnoty se pohybovaly od 33,16 N do 35,95 N. Dále byla změřena hodnota přitlačné síly pro případ existence prachových částic – pro prach s označením Dronco byla zjištěna průměrná hodnota přitlačné síly 35,13 N, pro prach s označením Tysolit 36,35 N, pro prach s označením SIA 37,48 N a pro prach s označením

VSM 37,70 N. Zde je nutno poznamenat, že naměřené hodnoty přítlačných sil vykazovaly značný rozptyl. Prachy VSM a SIA byly jemnější než první dva uvedené.

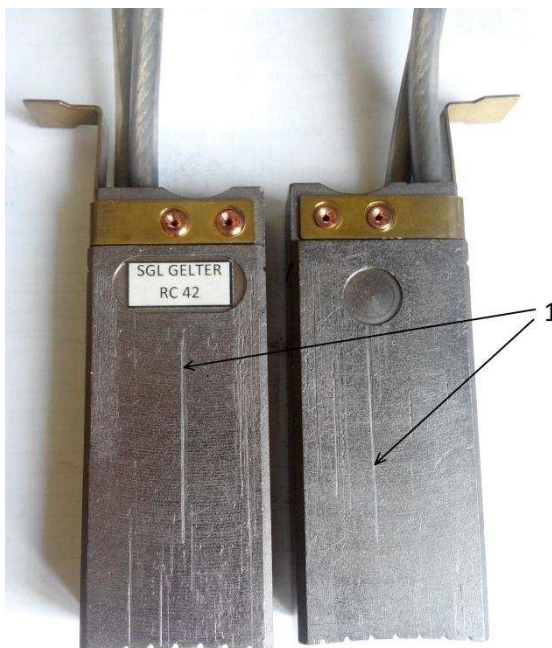
Podle původního předpokladu měl prach způsobit pokles přítlačné síly. Předpoklad se ovšem nenaplnil, přítlačná síla byla v některých případech dokonce vyšší po implantaci prachu. Při bližším zkoumání bylo zjištěno, že v případě, kdy bylo sběrací ústrojí čisté, se svinovací pružiny zadrhávají o izolaci přívodních lanek. Při dalších měřeních se však výše uvedené prachy složené z jemných částic na izolaci přívodních lanek zachytávaly, a to způsobilo, že pružina následně mohla po povrchu těchto izolací lépe klouzat, čímž došlo ke zvýšení přítlačné síly. Z tohoto důvodu byla provedena další série měření bez přítomnosti prachu. Klouzání svinovacích pružin o izolaci přívodních lanek dokumentuje obrázek 4.7.



Obr. 4.7: Znáznornění kontaktu svinovacích pružin o izolaci přívodních lanek

Toto měření potvrdilo výše popsané zjištění. Na izolaci přívodních lanek zůstaly zbytky prachu, tudíž pružiny mohly po izolacích lépe klouzat a výsledná přítlačná síla byla vyšší. Průměrná hodnota dosáhla 38,50 N, tudíž síla byla vyšší než při nasypání jakéhokoliv prachu. Je ovšem potřeba zdůraznit, že na rozdíl od měření působí ve skutečnosti na kartáče vibrace od kroužků generátoru, díky kterým se zadrhávání pružin o lanka nemusí projevovat v takové míře.

Další zkoušeným prachem byl nespecifikovaný prach složený z hrubších částic, dle poměru objemu a hmotnosti se jednalo o prach z těžkého materiálu. Zde již výsledky vykazovaly značný pokles přítlačné síly. Průměr naměřené síly byl 23,72 N, což představuje pokles o 38,4 % oproti předchozímu měření (druhému měření bez nasypání prachu). První naměřená hodnota byla dokonce pouze 18,25 N. To bylo způsobeno tím, že jeden z kartáčů se v držáku zadrhl a tedy vůbec silově nepůsobil na váhu. Pokles přítlačných sil byl způsoben částicemi, které se dostaly mezi kartáč a držák kartáče. Tyto částice zhoršovaly hladký chod kartáče v držáku a tím snižovaly přítlačnou sílu. Působení těchto částic bylo možné pozorovat i na povrchu kartáčů po jejich vyjmutí, jak dokazuje obrázek 4.8.



Obr. 4.8: Povrch kartáčů po provedení měření přitlačných sil

Legenda: 1 – rýhy způsobené prachovými částicemi.

Nakonec bylo ještě provedeno kontrolní měření pro jemný prach SIA. Výsledný průměr byl 36,67 N, tedy o 0,81 N nižší než při prvním měření. To mohlo být způsobeno jak chybou měření, kdy naměřené síly vykazovaly velký rozptyl, tak nedokonalým očištěním od hrubého prachu.

Z výsledků měření je tedy zřejmé, že přitlačná síla je značně závislá na velikosti a tvaru cizích částic.

Jak již bylo zmíněno v předchozích odstavcích, tření svinovacích pružin o izolaci přívodních lanek nepovažují z hlediska přitlačných sil za zásadní nedostatek z důvodu vibrací, díky kterým pokles síly nebude tak markantní. Dalším důvodem je ztvrdnutí izolace vlivem stárnutí a podmínkám při provozu, díky čemuž bude pružina po izolaci lépe klouzat ve srovnání se stavem, kdy je izolace nová.

Ačkoli vnitřní část krabičky držáku je segmentového provedení, pro zmenšení vlivu cizích částic (v mořském prostředí to budou nejčastěji částice rzi) na přitlačnou sílu navrhuji zvětšit vůli mezi částí, která vede kartáč a zbytkem vnitřní plochy držáku kartáče.

#### 4.4 Modelování kluzného kontaktu

Jak již bylo dříve uvedeno, větrné elektrárny na moři pracují v prostředí s vysokou vlhkostí. Tento vlhký vzduch je nasycený solí. Proto v praxi může nastat situace, že vodní pára z kondenzuje na kroužku generátoru (případně z kondenzuje na jiné části generátoru a vzniklá kapka vody následně „ukápně“ na kroužek), voda se na horkém povrchu kroužku rychle odpaří a vznikne částice soli.

Je určitá pravděpodobnost, že při „njetí“ kartáče na tuto částici kartáč nadskočí. To způsobuje následné vedení proudu z kartáče na kroužek prostřednictvím oblouku, čímž dochází k degradaci kartáče. Samozřejmě je zde i možnost, že kartáč tuto částici vytlačí mimo svou pracovní dráhu (například do spirálové drážky v povrchu kroužku, pokud je kroužek takto upraven), případně

kartáč po nadskočení na částici tuto částici okamžitě rozdrť. To by pak vedlo k rozrušování patiny, zvýšení tření a všem s tím souvisejícím jevům. Výsledkem je degradace kartáče.

Nicméně modelová situace počítá s variantou, kdy nadskočí a dosedne na tuto částici. Model je vytvořen pomocí diferenciální rovnice:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{k}{m} \cdot \frac{dx}{dt} + \frac{c}{m} \cdot x - \frac{F(t)}{m} = 0 \quad (4.2)$$

kde

m – hmotnost,

k – tlumení,

c – tuhost,

F(t) – budící síla – je definována vlastní geometrií kroužku a částice. Obvykle je zjišťována měřením, v našem případě je ovšem počítána z následujících vztahů:

$$F = m \cdot a \quad (4.3)$$

$$a = \frac{dv}{dt} \cong \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (4.4)$$

$$v = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{60} \quad (4.5)$$

Základní parametry dynamické soustavy byly určeny a voleny následovně:

m = 0,01 g; zvolená hodnota; byla tak určena z důvodu známých hodnot tuhosti a konstanty tlumení pouze pro menší stroje než jsou generátory větrných elektráren,

k = 0,05 kg·s<sup>-1</sup>; zjištěno měřením,

c = 0,99 N·m<sup>-1</sup>; zjištěno měřením,

d = 160 mm; podle katalogu firmy CEBES (ta vyrábí kroužky pro generátory větrných elektráren v řadě průměrů od 160 do 650 mm). Nejmenší hodnota byla zvolena proto, že i výše zvolené hodnoty jsou brány pro třecí uzel menších strojů,

n = 1500 min<sup>-1</sup>; VE Vestas používají dvojitě napájený čtyřpólový asynchronní stroj (ovšem ten pracuje v podsynchronních rychlostech, tedy reálné otáčky by byly menší než uvažovaných 1500 min<sup>-1</sup>).

Příklad výpočtu síly F:

$$v = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{60} = \frac{\pi \cdot 0,16 \cdot 1500}{60} = 12,57 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (4.6)$$

$$a = \frac{dv}{dt} \cong \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{12,57}{0,001} = 12570 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \quad (4.7)$$

kde Δt = 0,001 s

$$F = m \cdot a = 0,01 \cdot 12570 = 125,70 \text{ N} \quad (4.8)$$

$\Delta t$  představuje odhad doby, za kterou kartáč „najede“ na částici soli.

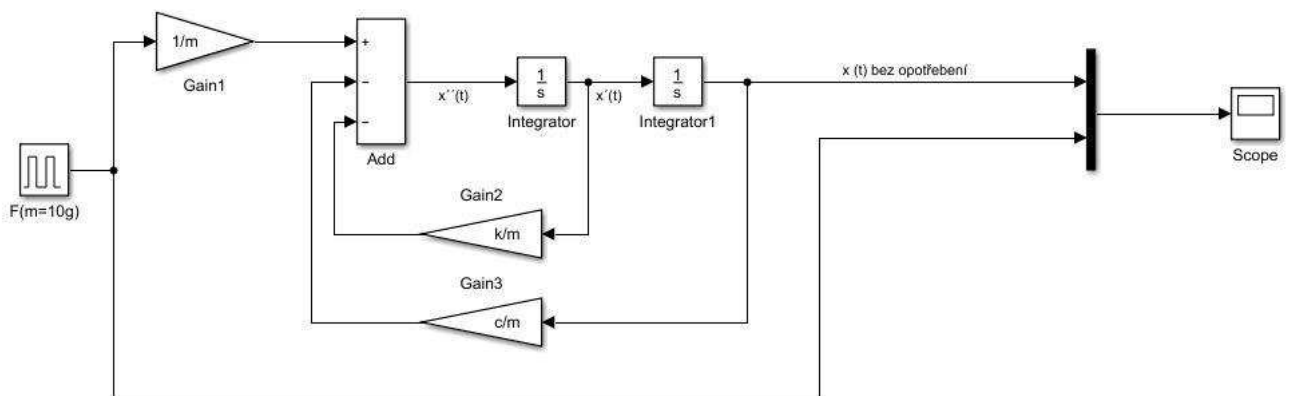
Model byl řešen v prostředí Matlab Simulink.

```

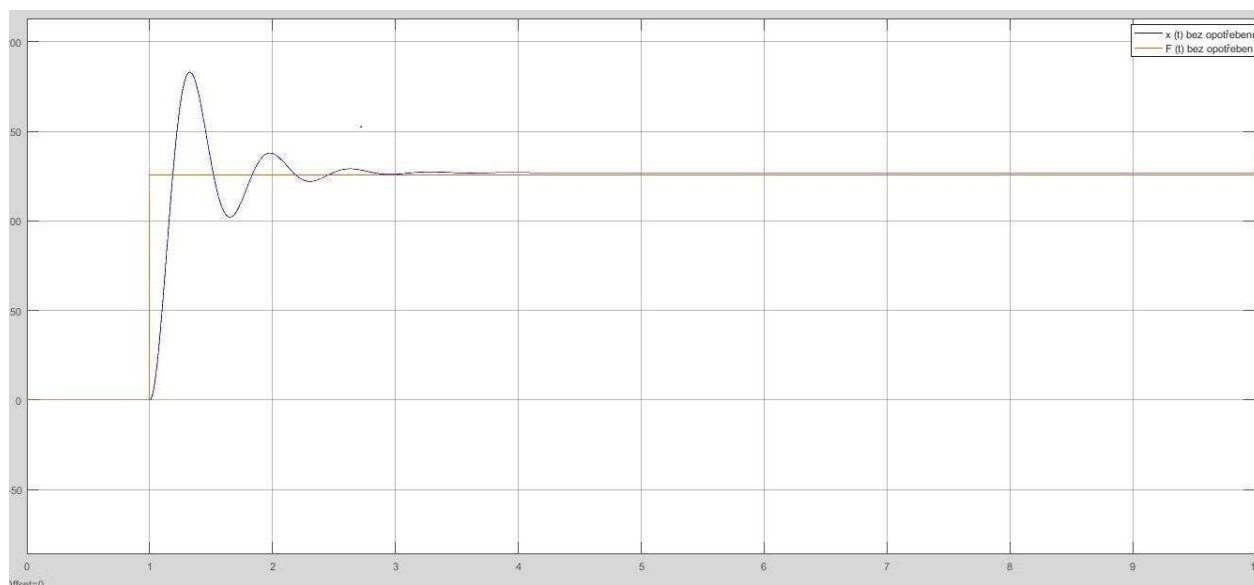
DP_Treci_uzel_1.m
1 - c=0.99;
2 - k=0.05;
3 - m=0.01;
4 - m50=0.005; %50 procent m 50 procent opotřebení kartáče
5 - m80=0.002; %20 procent m; 80 procent opotřebení kartáče
6 - m200=0.02; %200 procent m
7 - m500=0.05; %500 procent m;
8 - d=0.16;
9 - n=1500;
10 - t=0.001;
11 - t2=0.01; %čas 2*t
12 - t05=0.0005; %čas 0,5*t
13 - v=(pi)*d*n/60;
14 - a=v/t;
15 - F=m*a;
16
17 - a2=v/t2; %čas 2*t
18 - F2=m*a2; %čas 2*t
19 - a05=v/t05; %čas 0,5*t
20 - F05=m*a05; %čas 0,5*t |
21
22 - F50=m50*a; %50 procent m
23 - F80=m80*a; %10 procent m; 90 procent opotřebení kartáče
24 - F200=m200*a; %200 procent m
25 - F500=m500*a; %500 procent m; 90 procent opotřebení kartáče

```

Obr. 4.9: Script pro model třecího uzlu (Matlab Simulink)



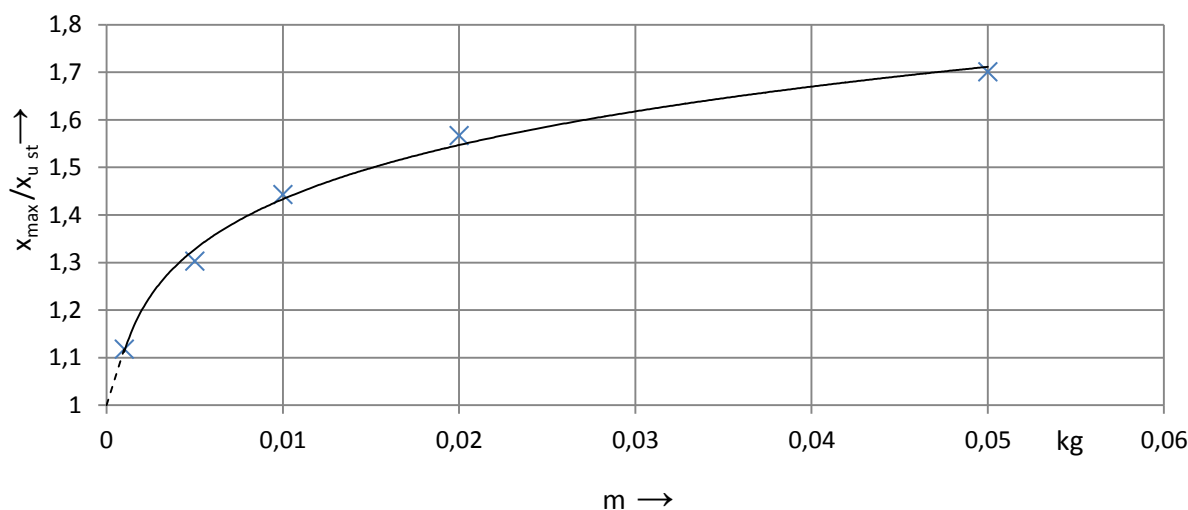
Obr. 4.10: Schéma pro vytvoření diferenciální rovnice (Matlab Simulink)



Obr. 4.11: Teoretický průběh "nadskočení" kartáče

Z průběhu zobrazeného na obrázku výše je patrné, že po silovém impulsu daném překážkou (částicí soli) v dráze kartáče po kroužku dojde k nadskočení kartáče. To způsobí vedení proudu obloukem, který může vytvořit kráter na povrchu kroužku. Následkem je zvýšení abrasivního opotřebení kartáče. Nadskočení má také vliv na zvýšení přechodového odporu mezi kartáčem a kroužkem, což ve svém důsledku znamená zvýšení teploty kluzného kontaktu a tedy další zvýšení opotřebení kartáče.

Je také třeba si uvědomit, že ve skutečnosti kartáč po „dosednutí“ na částici nemůže kmitat, jak je znázorněné na průběhu výše, ale od částice se odrazí (případně tuto částici rozdrtí). Přesto lze pomocí tohoto modelu sledovat některé parametry. Jeden z nich je uveden na obrázku 4.12.



Obr. 4.12: Závislost poměru maximální a ustálené hodnoty výchylky kartáče na hmotnosti kartáče podle modelu

Legenda:  $X_{\max}/X_{ust}$  – poměr maximální a ustálené hodnoty výchylky kartáče,  
 $m$  – hmotnost kartáče.

Tento graf popisuje, jak se mění poměr maximální a ustálené hodnoty výchylky kartáče při zvyšujícím se opotřebením kartáče a tedy i při jeho snižující se hmotnosti. Tedy ve stavu, kdy je kartáč nově nasazen, dochází k největšímu překmitu. Je nutné si však uvědomit, že výpočet zanedbává změny konstant tlumení a tuhosti, což se může projevit ve změně uvedené závislosti. V grafu jsou zobrazeny poměry pouze pro nižší hodnoty hmotností kvůli lepšímu znázornění uvedené závislosti. Při zadání skutečných hmotností (např. kartáč CEBES pro použití ve větrných elektrárnách váží 600 g) se bude poměr maximální a ustálené hodnoty blížit hodnotě 2 (pro zmíněných 600 g je tento poměr 1,922). Dále je nezbytné respektovat minimální hmotnost kartáče. Kartáč, který již je zcela opotřeben a musí být vyměněn, váží asi 20 % své původní hmotnosti. To znamená, že pokud by nový kartáč měl 600 g, jeho minimální hmotnost by byla 120 g. Pro nový kartáč o hmotnosti např. 50 g by byla minimální hmotnost 10 g.

Dále bylo výpočtem zjištěno, že pro různé hodnoty  $\Delta t$  zůstává poměr maximální a ustálené hodnoty konstantní. To tedy znamená, že s vyšší rychlostí „najeť“ na částici se silový impulz od částice zvyšuje lineárně.

Pro relevantní výsledky při výpočtech je zásadní znát co nejpřesněji vstupní parametry. Přestože však tyto hodnoty nejsou v našem případě odpovídající skutečným hodnotám u generátoru větrné elektrárny, pomáhá tento model třetího uzlu popsat chování soustavy při jednotkovém silovém rázu (který může být způsoben také právě částicí soli v dráze kartáče na kroužku).

## 4.5 Zkouška solnou mlhou

Vliv vlhkého prostředí na vznik koroze se nejčastěji zkoumá pomocí zkoušky korozní odolnosti v neutrální solné mlze (NSS) podle ČSN EN ISO 9227. Jedná se o urychlené korozní zkoušky používané především v automobilovém, leteckém, strojírenském a těžebním průmyslu a ve stavebnictví. Vzorky jsou zde kontinuálně exponovány v mlze neutrálního chloridu sodného (koncentrace 5 hm. %) za teploty 35 °C. Variantami jsou mlhy s roztokem chloridu sodného okyselené kyselinou octovou nebo s přísadkou chloridu měďnatého.

### 4.5.1 Popis zkoušky sběracího ústrojí

Východisky pro praktickou realizaci byly vzaty z norem ČSN EN ISO 12944–2, ČSN EN ISO 6270–1 a ČSN EN ISO 6270–2. Cílem zkoušek bylo ověření funkčnosti sběracího ústrojí. Kontrolován byl zejména ochranný povlak, který chrání proti korozi.

Zkouška probíhala tak, že se zkušební vzorek ve zkušební komoře vystavil účinkům solné mlhy o teplotě 35 °C  $\pm$  2 °C. Doba expozice odpovídala požadované specifikaci na zkoušený materiál, či výrobek. Pokud by tato doba specifikována nebyla, norma udává doporučené doby (2, 6, 24, 48, 96, 168, 240, 480, 720 a 1000 hod.). Hodnota pH se pohybovala v rozmezí 6,5 a 7,2, obsah chloridu sodného v nashromažděném roztoku dosáhl pak 50 g·l<sup>-1</sup>. Ve zkušební komoře musela být umístěna minimálně dvě sběrná zařízení, která zaznamenávala průměrnou rychlost shromažďování mlhy na vodorovné sběrné ploše. Tato hodnota měla být 1,5 ml·h<sup>-1</sup> s tolerancí  $\pm$  0,5 ml·h<sup>-1</sup>. Před i po ukončení zkoušky je podle normy požadováno zkoušený vzorek mechanicky a chemicky očistit (pokud není specifikováno jinak).

Při této konkrétní zkoušce, jejíž výsledky jsou popsány v následující podkapitole, však bylo dohodnuto, že vzhledem k velikosti a především složitému tvaru nebude sběrací ústrojí čištěno (zůstane tedy ve stavu po ukončení jeho výroby). Vzorky byly exponovány ve zkušební komoře po dobu 720 hod., což odpovídá doporučené době expozice podle normy.





Obr. 4.13: Zkušební komora pro zkoušku korozní odolnosti [18]

### 4.5.2 Výsledky

Sběrací ústrojí bylo vystaveno těmto podmínkám:

- zkušební teplota:  $35\text{ °C} \pm 0,5\text{ °C}$ ,
- typ soli: chlorid sodný,
- voda: demineralizovaná s vodivostí  $1\text{ }\mu\text{S}$ ,
- množství spadu: 34 ml za 24 hod.,
- pH spadu: 7,0,
- uložení vzorků: na vodorovném roštu.

Výsledky zkoušky jsou dokumentovány fotograficky na obrázcích 4.14, 4.15, 4.16 a 4.17. Proudovodné části, vyrobené ze železa a povrchově upraveny poniklováním, vykazovaly korozi nejen na montážních otvorech, ale i na rovných částech. Držáky kartáčů korozi nebyly nijak výrazně zasaženy, pouze došlo ke zdrsnění povrchu. Koroze ve velké míře však zasáhla kroužky, a to nejen povrchově, ale i do hloubky. Nutno však poznamenat, že zkouška byla prováděna pro sběrací ústrojí ve statickém stavu, kdy nedocházelo k samočisticímu efektu, jak je tomu v běžném provozu.



Obr. 4.14: Znárodnění stavu původního sběracího ústrojí po ukončení korozní zkoušky – pohled shora [18]



Obr. 4.15: Znáznornění stavu původního sběracího ústojí po ukončení korozní zkoušky – pohled zespodu [18]



Obr. 4.16: Držák kartáče po ukončení korozní zkoušky [18]



Obr. 4.17: Detail vnějšího povrchu kroužku po ukončení korozní zkoušky [18]

## 4.6 Inovované provedení kluzného kontaktu

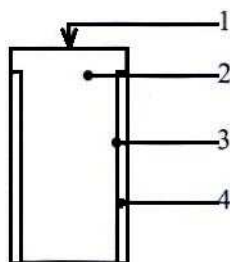
Kluzný kontakt generátorů větrných elektráren je možné inovovat několika způsoby. Může jím být inovace kartáčů, inovace držáků kartáčů, případně využití nové koncepce sběracího ústrojí. Nejlepším řešením se momentálně zdá být aplikace teflonu do pracovní oblasti kluzného kontaktu. Hlavním přínosem v mořském prostředí je skutečnost, že teflon odpouzuje vodu, což se projeví následky popsány dále.

### 4.6.1 Inovované kartáče

Kartáče lze inovovat dvěma základními způsoby:

- modifikací jejich struktury,
- změnou jejich konstrukčního provedení.

Modifikace struktury je prováděna výrobcem kartáčů. Podrobnější informace obvykle nejsou dostupné. Změnou konstrukčního provedení kartáčů se nejčastěji rozumí aplikace teflonu na těleso kartáče, tzv. provedení „sT“. Teflon nemusí být aplikován na obě strany kartáče (náběhovou i odběhovou), ale pouze na jednu z nich. Například pro asynchronní stroje se zpravidla umísťuje na náběhovou stěnu, ovšem pro komutátorové stroje je to na stranu odběhovou. Obrázek 4.18 znázorňuje inovovaný kartáč s aplikací teflonu do vlastního tělesa kartáče. Druhou možností je aplikace teflonu na vnější povrch kartáče.



Obr. 4.18: *Boční pohled na inovovaný kartáč v provedení „sT“ s vrstvou aplikovaného teflonu do vlastního tělesa kartáče [2]*

- Legenda:
- 1 – umístění vývodu kartáče,
  - 2 – vlastní těleso kartáče,
  - 3 – spoj kartáče s teflonem,
  - 4 – teflonová destička.

Celkově se dají shrnout přínosy inovovaných kartáčů pro generátory v mořském prostředí takto:

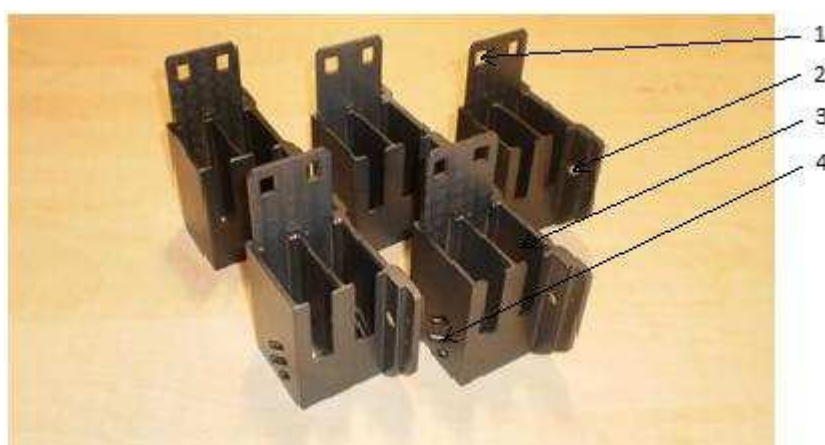
- snižuje pravděpodobnost vzniku oblouku,
- díky potlačení obloukového výboje nedochází k tepelnému rozrušování katody a tedy k přenosu materiálu z katody na anodu,
- tím, že teflon odpouzuje vodu, nedochází k vytváření vrstvičky vody na povrchu kroužku, a tedy elektrolýza bude částečně potlačena,
- teflon zabráňuje negativnímu vlivu kyslíku na uhlík, který jej neoxiduje, tím se minimalizuje vznik oxidu uhličitého. Díky vytvořenému povlaku z teflonu na pracovní ploše kartáče nedochází ke strukturálním změnám v uhlíku a tím se snižuje opotřebení kartáče.
- teflon nahrazuje mazací účinek grafitu,
- díky teplotní stálosti teflonu je možné dosáhnout vyšších pracovních teplot, kdy je součinitel tření minimální.

## 4.6.2 Inovované držáky kartáčů

Držák kartáče je možné inovovat např. segmentovým provedením vnitřního prostoru držáku kartáče. Díky tomuto provedení, kdy kartáč vedou pouze dílčí segmenty, je kartáč lépe veden, lépe chlazen a prach je lépe odváděn z prostor mezi kartáčem a vnitřní stěnou držáku kartáče.

Další možnou inovací je aplikace speciálních vrstev a teflonu na vnitřní stěny držáků kartáčů. Touto aplikací dochází ke snížení a optimalizaci vůli mezi kartáčem a držákem kartáče. To znamená, že dochází k dosednutí větší plochy kartáče na kroužek. Dále pak ke zlepšení dynamických vlastností a to např. tlumením vibrací sběracího ústrojí. Díky lepší dynamice jsou také zlepšeny podmínky pro tvorbu patiny tím, že se snižuje extrémní mechanické namáhání patiny.

Z důvodu lepšího chlazení se někdy v rámci inovace držáku kartáče na vnější strany držáku využívá otvorů pro lepší odvod tepla.



Obr. 4.19: *Inovované držáky kartáčů [18]*

- Legenda:
- 1 – otvory pro připevnění pružiny k držáku kartáče,
  - 2 – otvor pro připevnění držáku kartáče k nosiči držáků,
  - 3 – prostor pro vložení kartáče,
  - 4 – otvory pro lepší odvod tepla.



Obr. 4.20: *Detail inovovaného držáku kartáče [18]*

#### 4.6.2.1 Zkouška solnou mlhou pro inovované provedení držáků kartáče

Inovované držáky kartáčů byly podrobeny stejné korozní zkoušce jako původní provedení sběracího ústrojí. Inovované sběrací ústrojí bylo vystaveno okolním podmínkám s následujícími parametry:

- zkušební teplota:  $35\text{ °C} \pm 0,5\text{ °C}$ ,
- typ soli: chlorid sodný,
- voda: demineralizovaná s vodivostí  $1\text{ }\mu\text{S}$ ,
- množství spadu: 25 ml za 24 hod.,
- pH spadu: 7,0,
- uložení vzorků: na vodorovném roštu.



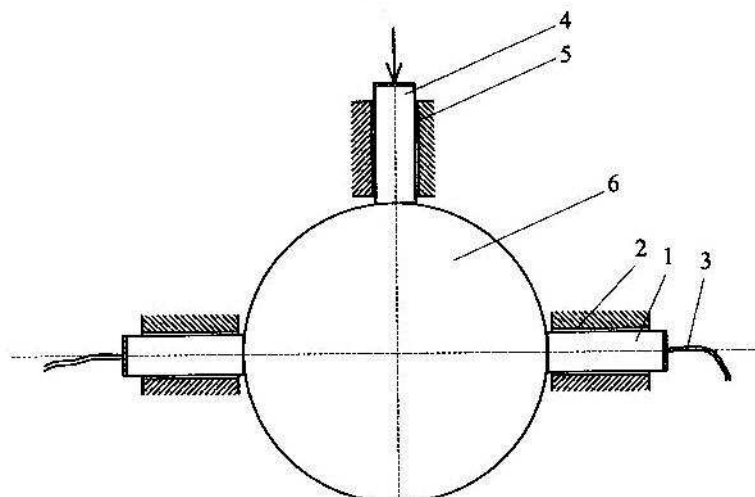
Obr. 4.21: *Inovované držáky kartáčů po ukončení korozní zkoušky [18]*

Výsledky korozní zkoušky prokázaly, že inovace kartáčů je výhodná i z hlediska potlačení koroze. Na držácích kartáčů nebyla na viditelných místech zjištěna žádná místa s hnědou korozí, pouze v rozích a na horních a dolních stranách držáku kartáčů se v minimálním rozsahu vyskytovala měděnka. Vnitřní povrch byl hladký a lesklý. Na proudovodných částech se objevila ojedinělá místa s hnědou korozí.

Zkoušky také prokázaly, že mnohem destruktivnější účinek má solná mlha než vysoká vlhkost.

#### 4.6.3 Nová koncepce sběracího ústrojí

Na inovované kartáče a držáky kartáčů je možné navázat aplikací nového konstrukčního řešení sběracího ústrojí. Řešení spočívá v zavedení tzv. pomocného kartáče z teflonu, nebo jiného kompozitního materiálu, díky kterému dochází ke zlepšení dynamických vlastností kluzného kontaktu. Podle [2] se toto řešení v budoucnosti značně rozšíří.



Obr. 4.22: *Nová koncepce sběracího ústrojí [2]*

- Legenda:
- 1 – kartáč,
  - 2 – držák kartáče,
  - 3 – přívodní lanko,
  - 4 – pomocný kartáč,
  - 5 – držák pomocného kartáče,
  - 6 – kroužek.

Nicméně nová koncepce sběracího ústrojí je stále ve fázi návrhu. Například při zkouškách u automobilového axiálního spouštěče (1 kW, 12 V), kde byly použity původní komponenty třecího uzlu, se teflonový blok opotřebovával 7x rychleji. To bylo dáno tím, že inovace vycházela z původního provedení kluzného kontaktu. Avšak tyto zkoušky se ukázaly jako úspěšné, protože po 5000 startech se velikost opotřebování kartáčů snížila o 22 % [2].

## 5 ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo provést analýzu problematiky kluzného kontaktu aplikovaného u generátorů větrných elektráren. Práci jsem rozdělil na tři části. První pojednává o větrných elektrárnách, druhá o kluzném kontaktu a hlavní část práce je věnována analýze kluzného kontaktu v mořském prostředí, včetně praktických zkoušek.

V části, zabývající se větrnými elektrárnami, jsou uvedeny dva základní typy větrných motorů – odporové a vztlakové. V rámci vztlakových větrných motorů jsou zmíněny způsoby jeho regulace, tedy STALL, PITCH a jejich variace. V této části jsou dále popsány používané generátory. Důraz je v práci kladen na dvojitě napájený asynchronní stroj z důvodu využívání tohoto typu firmou VESTAS, která je lídrem v oblasti výroby větrných elektráren. Výhodou tohoto typu je snížení požadavku na jmenovitý výkon frekvenčního měniče na hodnotu kolem 30 % jmenovité hodnoty asynchronního generátoru. V současnosti se dostává do popředí zájmu umístění větrných elektráren na moře. Toto řešení je využíváno stále více především kvůli snižujícímu se potenciálu vhodných lokalit na pevnině, dále pak složitosti transportu a stavby větrných elektráren největších výkonů.

Druhá část práce je věnována problematice kluzného kontaktu. Hlavními částmi kluzného kontaktu jsou kartáče, držáky kartáčů a kroužky. Od kartáčů je vyžadována především velká životnost, malý kontaktní i vnitřní odpor, velká zatížitelnost a dobrá mechanická pevnost. K tomu je potřeba najít vhodný materiál pro konkrétní aplikaci, zvolit správné rozměry, provést povrchovou úpravu, atd. Tato kapitola obsahuje také zprávu z měření ovality použité hřídele, kdy cílem bylo analyzovat možné degradační vlivy, které se mohly projevit při nasazení kroužků na tuto hřídel. Bylo zjištěno, že odchylky v částech, kde byly umístěny ložiska a kroužky, dosahovaly hodnot až 1 mm. Tato zjištěná nekrouhlost způsobovala při chodu stroje vibrace, které mohly zapříčinit degradaci především kartáčů, ale i ostatních částí komponent kluzného kontaktu.

Hlavním cílem této práce však bylo analyzování problémů spojených s provozem kluzného kontaktu v mořském prostředí, a navrhnout úpravy třecího uzlu k eliminaci těchto vlivů.

Prvním ze specifíků provozu v tomto prostředí je uplatnění elektrolyzy. Je způsobena vlhkostí, kdy vzdušná vlhkost kondenzuje na kroužku a mezi kartáčem a kroužkem vzniká vrstvička vody. Tato vrstvička pak působí jako elektrolyt.

Další kapitola se zabývá vlivem cizích částic v prostoru držáku kartáče na velikost přitlačné síly. Tyto cizí částice vznikají u generátorů offshore větrných elektráren především ve formě odlupující se rzi, jejíž zvýšený výskyt je daný sláným vlhkým prostředím na moři. Vliv tohoto prostředí na vznik koroze u sběracího ústrojí je pak analyzován v kapitole o zrychlené korozní zkoušce solnou mlhou. Vliv cizích částic na přitlačné síly byl zkoumán měřením na reálných vzorcích, poskytnutých firmou CEBES a.s. Bylo zjištěno, že hlavním parametrem, který má na přitlačnou sílu vliv, je velikost cizí částice. Pro lepší odvod částic větších rozměrů bylo proto doporučeno inovovat segmentové provedení tak, aby bylo dosaženo větší vůle mezi částí vedoucí kartáč a zbytkem vnitřní plochy krabíčky držáku kartáče.

Byl také vytvořen dynamický model kluzného kontaktu pomocí diferenciální rovnice. Pomocí tohoto modelu byl zkoumán stav, kdy se na kroužku objeví částice (nejčastěji ve formě krystalku soli) a kartáč kvůli této částici nadskočí nad kroužek a tedy proud bude veden obloukem, což vede k negativním vlivům na opotřebení kartáče.

Navrhovaným řešením pro třecí uzel pracující v náročných podmínkách ve větrných elektrárnách na moři je aplikace teflonu do pracovní oblasti jednoho nebo více elementů sběracího ústrojí. Jednat se může o inovaci kartáčů, inovaci držáků kartáčů, případně využít nový koncept sběracího ústrojí. Aplikací teflonu na kartáč je možné docílit mnoha přínosů, například k částečné eliminaci elektrolyzy, snížení opotřebení kartáče, snížení pravděpodobnosti vedení proudu obloukem a další. Inovované držáky kartáčů využívají teflon a jiné cizí vrstvy na vnitřních stranách držáku kartáče jako prostředek pro snížení a optimalizaci vůli mezi kartáčem a držákem kartáče. Tím dochází ke zlepšení dynamických vlastností, a díky tomu pak dochází k tlumení vibrační sběracího ústrojí. Dalším přínosem je snížení extrémního mechanického namáhání patiny a dosažení jejich lepších parametrů. Nová koncepce sběracího ústrojí je zatím spíše ve fázi návrhu a v praxi se příliš nevyužívá. Jedná se o aplikaci pomocného kartáče z teflonu (nebo jiného kompozitního materiálu) a tím ke zlepšení parametrů třecího uzlu podobně jako u inovovaného kartáče.



## 6 LITERATURA

- [1] NÝVLT, K. Praktické ověřování provozních vlastností elektrických strojů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2007. 73 stran. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. František Veselka, CSc.
- [2] CHMELÍK, Karel a František VESELKA. Kluzný kontakt v elektrických strojích. Ostrava: Key Publishing, 2007. ISBN 978-80-87071-59-5.
- [3] Technical guide: brushes for electrical machina, Le Carbone – Lorraine.
- [4] ŠTEKL, J. Vývojové trendy větrných elektráren. *Větrná energie*, 2006, č 1, s. 11 - 12.
- [5] *Průmyslové a drážní uhlíkové kartáče*, Schunk.
- [6] MASTNÝ, Petr. Obnovitelné zdroje elektrické energie. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04937-2.
- [7] MIŠÁK, Stanislav a Lukáš PROKOP. Provozní vlastnosti obnovitelných zdrojů. Ostrava: Asociace technických diagnostiků ČR, o.s., 2014. ISBN 978-80-260-6184-7.
- [8] ŠTEKL, J., HOŠEK, J. Referenční větrný potenciál. *Větrná energie*, 2006, č 1, s. 13 - 17.
- [9] KOČ, Břetislav. Větrné elektrárny VIII. – Mořské (offshore) větrné elektrárny. Tzbinfo [online]. [cit. 2017-12-17]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/vetrna-energie/15249-vetrne-elektrarny-viii-morske-offshore-vetrne-elektrarny>
- [10] BERNARD, I. Kluzný kontakt u elektrických strojů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 61 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. František Veselka, CSc.
- [11] Vertikale Windkraftanlagen. Klein Windkraftanlagen. [online]. [cit. 2017-12-17]. Dostupné z: <https://www.klein-windkraftanlagen.com/technik/vertikale-windkraftanlagen/>
- [12] Strojovna větrné elektrárny. ČSVE [online]. [cit. 2017-12-17]. Dostupné z: <http://www.csve.cz/cz/clanky/strojovna-vetrne-elektrarny/324>
- [13] Model VAS – mezivýsledek: průměrná rychlost v 10 m. Ústav fyziky atmosféry AV ČR, v.v.i. [online]. [cit. 2017-12-17]. Dostupné z: <http://www.ufa.cas.cz/vavf320f08f03.html>
- [14] Catalog. Lewis Banks & Sons (Engineers) Ltd. [online]. [cit. 2017-12-17]. Dostupné z: <http://www.lewis-banks.com/dcproducts.htm>
- [15] Catalog. SAV GmbH [online]. [cit. 2017-12-17]. Dostupné z: <https://www.sav.de/en/product/>
- [16] CHMELÍK, Karel a Jaroslav SOJKA. Ložiskové proudy a jejich degradační působení [online]. [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/loziskove-proudy-a-jejich-degradacni-pusobeni--14367>
- [17] FM - zdroj ložiskového proudu [online]. [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: <http://www.pohonnatechnika.cz/frekvencni-menice/fm-zdroj-loziskoveho-proudu>
- [18] VESELKA, František. *Výsledky korozních zkoušek sběracího ústrojí v klimatických komorách*. Brno 2018.

- [19] FOJTÍK, V. Svinovací pružina a její aplikace v kartáčovém držáku. *Technika elektrických strojů*, 1978, č 1, s. 22 - 30.
- [20] RYCHETNÍK, Václav, Jiří PAVELKA a Josef JANOUŠEK. *Větrné motory a elektrárny*. Praha: České vysoké učení technické, 1997. ISBN 80-01-01563-7.
- [21] CETKOVSKÝ, Stanislav, Bohumil FRANTÁL a Josef ŠTEKL. *Větrná energie v České republice: hodnocení prostorových vztahů, environmentálních aspektů a socioekonomických souvislostí*. Brno: Ústav geoniky Akademie věd ČR, 2010. *Studia geographica*. ISBN 978-80-86407-84-5
- [22] LORENZ, T. *Regulace příkonu přečerpávacích vodních elektráren v čerpadlovém provozu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 49 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jaroslava Orságová, Ph.D.