VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

PŘÍSPĚVEK K PRAKTICKÉMU POSOUZENÍ EXPRESNÍ METODY PRO HODNOCENÍ KVALITY KLUZNÉHO KONTAKTU

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE Bc. MAREK KURZĘPA
AUTHOR

BRNO 2015

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

PŘÍSPĚVEK K PRAKTICKÉMU POSOUZENÍ EXPRESNÍ METODY PRO HODNOCENÍ KVALITY KLUZNÉHO KONTAKTU

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE Bc. MAREK KURZĘPA
AUTHOR

BRNO 2015

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

PŘÍSPĚVEK K PRAKTICKÉMU POSOUZENÍ EXPRESNÍ METODY PRO HODNOCENÍ KVALITY KLUZNÉHO KONTAKTU

CONTRIBUTION TO EXPRESS PRACTICAL ASSESSMENT METHODS FOR EVALUATING THE QUALITY OF THE SLIDING CONTACT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE Bc. MAREK KURZĘPA

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE doc. Ing. FRANTIŠEK VESELKA, CSc.

SUPERVISOR

BRNO 2015

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor

Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

Student:	Bc. Marek Kurzępa	***ID:***	125262
Ročník:	2	***Akademický rok:***	2014/2015

NÁZEV TÉMATU:

Příspěvek k praktickému posouzení expresní metody pro hodnocení kvality kluzného kontaktu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se s problematikou kluzného kontaktu a jeho diagnostikou.
2. Posuďte možnosti využití metody prachových částic pro tuto diagnostiku.
3. Navrhněte a realizujte měřicí přípravek pro studium metody prachových částic.
4. Ověřte koncepci snímacího zařízení se dvěma sklíčky.
5. Vyhodnoťte a okomentujte dosažené výsledky.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Termín zadání:	22.9.2014	***Termín odevzdání:***	26.5.2015

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

Konzultanti diplomové práce:

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

Práce se zabývá problematikou kluzného kontaktu a jeho diagnostiky, zejména diagnostiky využitím komparativní metody prachových částic. V práci je zpracován ukázkový příklad, jakým způsobem se postupuje při použití této metody, dále se zabývá vývojem laboratorního přípravku, který umožní větší variabilitu při studiu této metody. V poslední části diskutuje koncepci snímacího zařízení se dvěma sklíčky.

Abstract

This thesis is devoted to the topic of kluzný kontakt and its diagnostic, especially to the type of diagnostic using the method of -- of dust particles. The author presents an example of applying this method and deals with the topic of development of a laboratory template that will give access to bigger variability in studying this method.

Klíčová slova

kluzný kontakt, metoda prachových částic, mikroskop, matlab, zpracování obrazu,

Keywords

sliding contact, comparative method of dust particles, microscop, matlab, , image processing

Bibliografická citace

KURZĘPA, M. *Příspěvek k praktickému posouzení expresní metody pro hodnocení kvality kluzného kontaktu.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 60 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. František Veselka, CSc..

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Příspěvek k praktickému posouzení expresní metody pro hodnocení kvality kluzného kontaktu jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské 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 bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské 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 mé diplomové práce doc. Ing Františku Veselce za ochotu a trpělivost, se kterou mě vedl a pomáhal mi při této diplomové práci, za všechnu poskytnutou pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce. Také bych rád na tomto místě poděkoval všem, kteří mě během doby studia podporovali, zejména mé nejbližší rodině.

V Brně dne …… Podpis autora ……

Obsah

Seznam obrázků....10
Seznam tabulek....11
Seznam symbolů a zkratek....12
Úvod....13
1 Problematika kluzného kontaktu a jeho diagnostiky....14
1.1 Komponenty kluzného kontaktu....15
1.1.1 Kartáče....15
1.1.2 Držáky kartáčů....16
1.1.3 Komutátor....17
1.1.4 Sběrací kroužky....18
1.2 Diagnostika kluzného kontaktu....19
2 Metoda prachových částic....22
2.1 Stávající přístup k diagnostice kartáčů....22
2.2 Podstata metody prach. částic....22
2.3 Možnosti využití metody prachových částic v praxi....23
2.3.1 Analýza přítlačné síly metodou prachových částic....23
2.3.2 Analýza okolního prostředí....23
2.3.3 Analýza polarity kartáčů....24
2.4 Ověření efektivnosti metody prachových části....24
2.5 Ukázka ručního výpočtu na fiktivním vzorku....25
2.6 Počítačová analýza fiktivního a reálného vzorku....25
2.7 Vady vzorků....26
2.7.1 Bubliny....26
2.7.2 Šmouhy....27
2.7.3 Okrajové vady....28

2.7.4 Vady rozlišení....29
2.8 Postup při analýze vzorků s využitím Matlabu....29
2.9 Vyhodnocení poskytnutých vzorků....31
3 Měřící přípravek pro studium kluzného kontaktu....33
3.1 Koncepční zaměření přípravku....33
3.2 Teoretické aspekty broušení....34
3.2.1 Základy broušení....34
3.2.2 Tvorba třísky při broušení....35
3.3 Realizace přípravku....35
4 Měřící zařízení pro metodu prachových částic....44
4.1 Klíčové části snímacího zařízení....44
4.1.1 Jímací nástavce....44
4.1.2 Trubice....48
4.1.3 Držák sklíčka....48
4.2 Ověření koncepce snímacího zařízení se dvěma sklíčky....51
4.2.1 Příprava měření....52
4.3 Vlastní měření....53
4.4 Vyhodnocení dosažených výsledků....56
5 Závěr....59
6 Seznam použité literatury....60

Seznam obrázků

Obr. 1: Základní geometrické tvary kartáčů [3]....16
Obr. 2: Výkres sestavení držáku kartáče [3]....17
Obr. 3: Znázornění průběhu vystupování jednotlivých lamel komutátoru[3]....20
Obr. 4: Závislost velikosti opotřebení na proudové hustotě [3]....22
Obr. 5: Fiktivní vzorek pro demonstraci výpočtů [6]....26
Obr. 6: Reálný vzorek....26
Obr. 7: Vznik chyby typu bublina [6]....29
Obr. 8: Vznik chyby typu šmouha: [6]....30
Obr. 9: Okrajová vada[9]....30
Obr. 10: Chyba rozlišení (okraj částice)[6]....33
Obr. 11: Model záběru brousícího zrna....39
Obr. 12: Měřící zařízení pro studium kluzného kontaktu....45
Obr. 13: Ovalita hřídele....46
Obr. 14: Měření radiálního házení hřídele....46
Obr. 15: Detailní pohled na umístění kartáče....47
Obr. 16: Ovládací panel přípravku....48
Obr. 17: Měření vibrací na brzdě motoru....49
Obr. 18: Obroušený kartáč....50
Obr. 19: Prachové částice obroušeného kartáče....50
Obr. 20: Nástavec pro malé prostory....52
Obr. 21: Jímací zařízení pro odsávání prachu z řady kartáčů....52
Obr. 22: Nástavec pro analýzu okolního vzduchu....56
Obr. 23: Držák sklíčka....57
Obr. 24: Snímek prachových částic vzniklých ručním obráběním....58
Obr. 25: Pracoviště s laboratorní váhou....59

Obr. 26: Měřící pracoviště pro odsávání prachových částic.....60

Obr. 27: Vzorek zkoumaného prachu.....62

Obr. 28: Graf závislosti zachycených částic na rychlosti odsávání.....63

Seznam tabulek

Tab. 1: Záznam ručního měření prachových částic.....26

Tab. 2: Výsledky ručního měření prachových částic.....26

Tab. 3: Vyhodnocení diagnostiky reálného vzorku metodou prachových částic.....33

Tab. 4: Měření vystupování hřídele.....38

Tab. 5: Výsledky pro zařízení se dvěma sklíčky.....52

Seznam symbolů a zkratek

a	axiální rozměr kartáče	mm
r	radiální rozměr kartáče	mm
r_n	poloměr zaoblení ostří	rad
t	tangenciální rozměr kartáče	mm
v_e	řezná rychlost	m s-^{1}
v_r	posuvová rychlost	m s^{-1}
D	průměr prachové částice	mm
N_i	Počet prachových částic na i-tém vzorku	-
S	Plocha průřezu kartáče	mm^2
V	Celkový objem zachycených prachových částic	mm^3
V_i	Objem i-tého vzorku	mm^3
α_n	normálový úhel hřbetu	rad
γ_n	normálový úhel čela	rad
Δt	délkový úbytek kartáče	mm

Úvod

Využití elektrických pohonů přineslo řadu usnadnění a zlepšení v kvalitě lidského života. Můžeme se s nimi setkat prakticky ve všech jeho oblastech. Elektrické pohony můžeme najít nejen ve ventilátorech elektroniky, v ručním nářadí, vysavačích, pračkách, myčkách a podobně, ale také v dopravních prostředcích, jako jsou tramvaje, trolejbusy či vlaky. Pro své výborné regulační vlastnosti, vysokou účinnost, relativně tichý chod a „čisté“ pracovní podmínky mají elektrické pohony své nenahraditelné místo také v průmyslu, zemědělství a podobně.

Základem těchto elektrických pohonů je pak elektrický točivý stroj, který v drtivé většině případů stále obsahuje kluzný kontakt. Trendem poslední doby je však nasazovat stroje bez kluzného kontaktu. To proto, že použití kluzného kontaktu v současné době s sebou nese řadu různých neduhů. Tyto neduhy je možné odstranit pouze dvěma způsoby, a to buď eliminováním kluzného kontaktu jako celku, nebo zkoumáním jeho vlastností a následnou inovací.

Kluzný kontakt sám o sobě je nejproblematičtější částí elektrických motorů. Na jeho správné funkci také obvykle závisí funkčnost, bezpečnost a spolehlivost celého pohonů. Diagnostika kluzného kontaktu se však nejčastěji provádí v době, kdy je stroj odstaven. Tento fakt nevadí při malých domácích aplikacích, nicméně v průmyslu se objevují situace, kdy by bylo žádoucí diagnostikovat kluzný kontakt i bez odstavení stroje, které by vedlo k přerušení výroby a třeba i ekonomickým škodám. Jednou z takových diagnostických metod je komparativní metoda, nazývaná též metodou prachových částic.

Cílem této diplomové práce je seznámit čtenáře se základní problematikou kluzného kontaktu a jeho diagnostiky, zejména s využitím zmíněné metody prachových částic. Dále pak zkoumání možností využití této metody v průmyslové praxi a ověření její efektivnosti a vhodnosti pro diagnostiku kluzného kontaktu.

Kromě teoretických poznatků je také cílem vytvoření přípravku, který usnadní a urychlí výzkum této diagnostické metody. Praktickým měřením bude ověřena koncepce zařízení se dvěma sklíčky a posouzena efektivnost této inovace.

1 Problematika kluzného kontaktu a jeho diagnostiky.

Než je možné cokoli diagnostikovat, je třeba mít alespoň základní představu o činnosti a principech, se kterými je možné se u diagnostikovaného objektu setkat. Proto budou v této kapitole detailněji popsány jednotlivé komponenty kluzného kontaktu a problémy, které s sebou tyto části přinášejí.

Základní funkcí kluzného kontaktu je *vodivě propojit pohyblivou část elektrického stroje s vnějším obvodem*. Rozlišujeme dva druhy kluzných kontaktů:

a) rotační – tento typ kluzného kontaktu se nachází u točivých elektrických strojů, motorů a generátorů, kdy z rotoru potřebujeme proud přivádět nebo odebírat,
b) translační – s tímto typem kluzného kontaktu se nejčastěji setkáváme u elektrické trakce. Slouží k napájení elektrických vozidel, kdy je proud během pohybu vozidla odebírán z elektricky napájeného trolejového vedení.

Oba dva typy přinášejí svá určitá specifika. Tato práce se bude zabývat pouze prvním typem, tedy kluzným kontaktem vyskytujícím se u točivých strojů. Kluzný kontakt využívají zejména:

a) stejnosměrné či střídavé komutátorové motory, jejichž rotor je třeba napájet pro chod těchto strojů,
b) stejnosměrná dynama, z jejichž kotvy se odvádí elektrická energie,
c) asynchronní motory s kroužkovou kotvou, u kterých se provádí regulace proudu či otáček
d) synchronní stroje, ke kterým je třeba přivést energii do cívek rotoru, potřebnou pro vytvoření magnetického pole

Vzhledem k funkci kluzného kontaktu je zřejmé, že z konstrukčního hlediska můžeme rozlišit dva základní elementy. Tyto elementy nazýváme *akčními*, protože jsou to části, které po sobě bezprostředně kloužou, vedou elektrický proud a aktivně se podílejí na všech dějích, které se v kluzném kontaktu objevují. [3] Těmito částmi jsou:

a) kartáče

b) kroužky nebo komutátor

Velmi důležitou podmínkou je, aby elektrické spojení těchto části bylo realizováno bez jiskření a aby nedocházelo k jeho rozpojení. Z konstrukčního hlediska je tedy možné rozlišit dvě koncepce realizace kluzného kontaktu:

a) spojení kartáče – komutátor

b) spojení kartáče – kroužky.

Rozdíly mezi těmito koncepcemi můžeme spatřit jednak v rovině elektrické, jednak v rovině mechanické. Základním elektrickým rozdílem mezi použití kroužků a komutátoru je, že spojení kartáč - kroužky zajišťuje pouze převedení elektrické energie z otáčející se částí na statickou, nebo

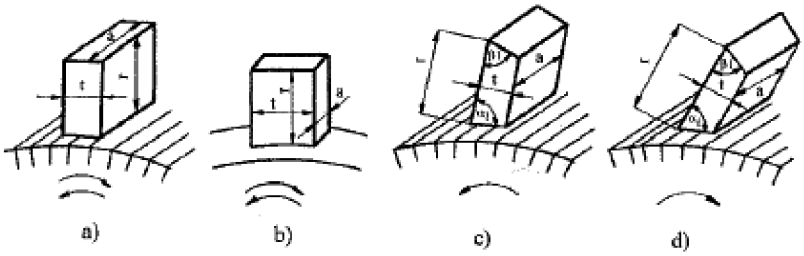
naopak. Oproti tomu spojení kartáč - komutátor má za úkol nejen převádět elektrickou energií mezi rotační a statickou částí elektrického stroje, ale také zajistit elektrické spojení lamel, na kterých jsou připojeny komutující cívky a vyrovnávat rozdíly mezi kompenzačním a reakčním napětím v komutující cívce.

Z hlediska mechanického namáhání je situace opět méně příznivá pro komutátor, protože při použití kroužků kloužou kartáče po jejich povrchu, který je spojitý, hladký, případně s drážkami ve směru otáčení, zatímco při použití komutátoru dochází k tomu, že kartáče narážejí na lamely komutátoru, které jsou odděleny drážkami kolmými na směr klouzání kartáčů.

1.1 Komponenty kluzného kontaktu

1.1.1 Kartáče

Jejich název je odvozen z historického hlediska, kdy první kartáče byly realizovány jako svazek drátů nebo měděná síťka stočená do svitku, jež vzhledově kartáč připomínaly. V dnešní době se používají kartáče uhlíkové, které se svým provedením blíží spíše kvádru. Aby se zamezilo nadměrnému množství všemožných tvarů a rozměrů, byly nejčastější hodnoty těchto rozměrů normalizovány. Hodnoty, do kterých se musí všechny jmenovité rozměry vejít, udává norma ČSN 350820. Základní geometrické tvary kartáčů jsou určeny podle osy kartáčů ke kluzné ploše, viz obr. 1.



Obr. 1: Základní geometrické tvary kartáčů [3]

Kartáče můžeme považovat za stěžejní části kluzného kontaktu. Významnou roli hraje vývoj materiálů, ze kterých jsou vyráběny, protože materiál a způsob zpracování kartáčů určuje jejich mechanické a elektrické vlastnosti. Tyto vlastnosti se pak podílejí velmi významnou mírou na opotřebení kartáčů, tedy na jejich životnosti. Kartáče, které se opotřebovávají příliš rychle, považujeme za nekvalitní. Přes velké množství různých jakostí kartáčů, můžeme podle [3]rozlišit šest základních skupin materiálů, ze kterých jsou vyráběny:

a) uhlografit – směs amorfního uhlíku a grafitu,

b) přírodní grafit – čistý přírodní grafit a pojivo,

c) elektrografit – amorfní uhlík z týž surovin jako uhlografit (koks, saze, grafit) zpracovaný vypalováním za teploty 2500 °C,

d) kovografit – směs kovů a grafitu,

e) speciální materiály jako bakelitový uhlografit, grafit impregnovaný kovem pro speciální účely,

f) inovované kartáče s teflonem

Materiály kartáčů určují jejich základní vlastnosti a kvalitu. Tyto vlastnosti jsou zjišťovány měřením elektrických a mechanických veličin. Je třeba mít na paměti, že tolerance naměřených hodnot je u kartáčů v poměrně velkých mezích a hodnota uvedená v katalogu představuje jakousi střední hodnotu měřených vzorků. Nejdůležitějšími vlastnostmi uhlíkových materiálu podle [3] jsou: měrný elektrický odpor, přechodový odpor, součinitel tření, tvrdost dovolené proudové zatížení dovolené proudové zatížení, dovolená obvodová rychlost, mechanická pevnost a komutační schopnost.

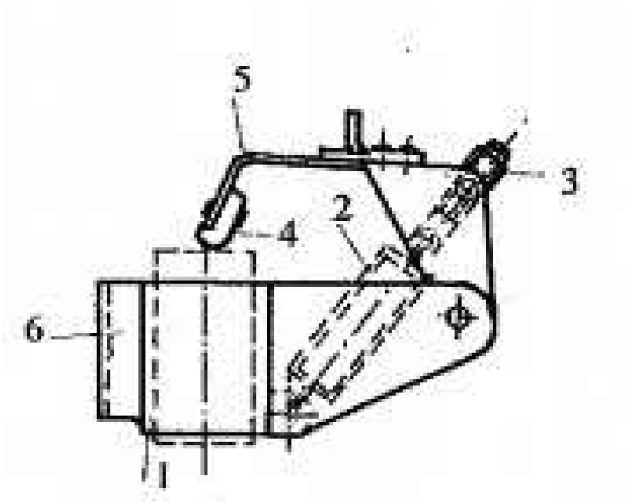
1.1.2 Držáky kartáčů

Držáky kartáčů jsou velmi důležitou komponentou kluzného kontaktu, zajišťující jeho správnou funkci. Jejich účelem je upevnění a vedení kartáče, případně několika kartáčů tak, aby byl zajištěn kontakt mezi kartáčem a komutátorem či kroužkem. Jsou nejdůležitější součástí sběracího ústrojí, ke kterému kromě držáků patří navíc svěrky pro upevnění držáků, roubíky, nebo nosiče držáků, brejle (nosiče roubíků) a spojovací pásy (sběrací kruhy) .[3]

Existuje celá řada různých držáků kartáčů, avšak u většiny z nich je možné identifikovat velmi podobnou strukturu součástí, ze kterých je sestaven. Příklad nejběžnějšího držáku kartáče je zobrazen na Obr. 2.

Legenda k Obr 2:

1. Krabička,
2. pružina,
3. pouzdro svěrky,
4. přítlačný palec,
5. tlumící pružina,
6. napínače pružiny,



Obr. 2: Výkres sestavení držáku kartáče [3]

Nejčastěji používané držáky umožňují kartáči pohyb v krabičce, ale existují i držáky, které tento pohyb neumožňují. Takové držáky je možné najít např. ve sběracím ústrojí asynchronních motorů.

Držáky jsou konstrukčně řešeny tak, že mohou obsahovat nejen jednu, ale i několik krabiček, obvykle dvě až tři, výjimečně i více. Existují také tzv. tandemové držáky, které mají dvě krabičky za sebou.

Jak bylo řečeno, držáky kartáčů zásadním způsobem ovlivňuji funkci celého kluzného kontaktu, proto je vhodné seznámit se důkladně s jejich funkcí, aby bylo možné eliminovat během měření chyby, které by mohly vzniknout v důsledku nesprávné funkce držáků.

Základní funkce držáku podle [3] jsou:

a) zajistit upevnění a vedení kartáče,

b) vyvodit potřebnou přítlačnou sílu ke styku kartáče s komutátorem, aby nedocházelo k přerušení tohoto styku,

c) zajistit rovnoměrné rozložení tlaku po celé kluzné ploše,

d) během opotřebení kartáče zajistit, aby přítlačná síla byla konstantní,

e) zajistit působení působení přítlačné síly v neměnném místě hlavy kartáče,

f) umožnit kartáči určitou volnost pohybu, zvláště ve směru kolmém na komutátor, aby se mohl přizpůsobit nerovnostem povrchu komutátoru

g) tlumit vzniklé vibrace a nárazy na kartáč.

Pokud by výše vypsané požadavky nebyly plněny vhodným způsobem, je pravděpodobné, že dojde ke zvýšení jiskření pod kartáčem, v důsledku čeho budou spalovány prachové částice potřebné k řádné analýze pomocí metody prachových částic

1.1.3 Komutátor

. Komutátor je část elektrického stroje, která zajišťuje přivedení či odvedení proudu do vinutí kotvy, nebo změně jeho frekvence či frekvence napájecí sítě. Skládá se ze soustředně uložených lamel, které jsou vzájemně izolovány. Cívky vinutí kotvy mohou být připájeny k lamelám přímo, anebo přes tzv. praporky, které se dělají z materiálů s výbornou odolností proti ohýbání. Praporky bývají připájeny v drážkách lamel. Důležitým požadavkem, kladeným na komutátor je, aby jeho konstrukce představovala dokonale hladkou jednolitou válcovou plochu.

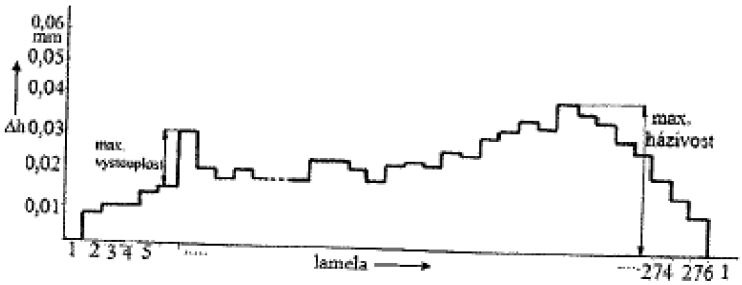
Rozlišujeme dva základní druhy komutátorů:

a) rybinové,

b) zděřové.

Nejběžnějším a nejčastěji používaným typem je právě komutátor rybinový. U strojů s velkou obvodovou rychlostí, případně dlouhým komutátorem, se můžeme setkat s provedením zděřovým, který je charakteristický tím, že jeho lamely jsou po obvodu staženy kruhovými zděřemi.

Jak bylo naznačeno výše, pro dobrou komutaci je velmi důležitý stav povrchu komutátoru, čili nerovnosti jeho povrchu. Rovnost povrchu a zajištění co nejhladší plochy a válcového tvaru komutátoru mají významný vliv na práci kluzného kontaktu, zejména na předčasné opotřebení kartáčů a zvýšenou míru jiskření. Důležité tedy je, aby komutátor zachoval válcovitý tvar, aby sousední lamely neměly značný výškový rozdíl a aby slídová izolace nevyčnívala nad lamely. I když mírná odchylka od ovality nemusí nutně znamenat špatný stav komutátoru, velký výškový rozdíl už jen dvou sousedních lamel představuje podstatný problém. V takovém případě dojde v kluzném kontaktu k havarijnímu jiskření, vylamování kartáčů a podobně. Měření vystupování lamel může být prováděno ve statickém nebo dynamickém stavu, přičemž měření v dynamickém stavu z různých důvodů není příliš rozšířené. Průběh ze statického měření vystupování lamel můžeme vidět na Obr. 3



Obr. 3: Znázornění průběhu vystupování jednotlivých lamel komutátoru[3]

1.1.4 Sběrací kroužky

Ačkoli kontakt kartáč – kroužek je mnohem jednodušší než kontakt kartáč komutátor, ať už po stránce elektrické – bez komutace, či mechanické - povrch kroužků je ve směru pohybu kartáčů jednotný, neznamená to, že se u tohoto typu kontaktu vyskytuje méně komplikací. I zde se vyskytuje poruchové jiskření, a proto je třeba věnovat pozornost jejich konstrukci, zejména stavu povrchu či materiálu, který může značným způsobem ovlivnit vlastnosti tohoto kontaktu. Nejčastějším materiálem jsou slitiny mědi, případně ocel, a to zejména u strojů s velkou obvodovou rychlostí, např. turboalternátorů. Požadavkem na tyto slitiny je, aby neobsahovaly ani stopové množství hliníku, který z hlediska kluzného kontaktu není příliš vhodný, protože způsobuje nadměrné opotřebování kartáčů i kroužků. Nevýhodou ocelových kontaktů je jejich náchylnost ke korozi, dále pak velký přechodový odpor, tedy i vyšší ztráty. Dalším z používaných materiálů je elektrolytická měď.

Rozhodujícím činitelem pro vlastnosti kroužku je podle [3] struktura slitiny. Měla by být

stejnorodá, jemně krystalická, vhodně tvrdá, neporézní, neokysličená a prostá nečistot. Struktura kroužku má vliv na opotřebení nejen kroužku, ale také kartáče. Čím jemnější, tím je opotřebení menší. Také je důležité, aby materiál kroužků byl mnohem tvrdší než materiál kartáče. Opotřebení kluzného kontaktu zvyšuje také poréznost materiálu, případně výskyt nečistot. Zvláště nepříznivé jsou snadno tavitelné příměsi, jako na příklad olovo, které se v kluzném kontaktu taví a vlivem odstředivé síly vytéká na kluznou plochu.

Kroužky, stejně jako komutátory, je možné opracovávat, jakmile dosáhnou opotřebení, které ohrožuje stabilitu stabilitu kluzného kontaktu. Nelze je však opracovávat na libovolně malý průměr. Také by se neměly obrábět na ideálně hladký povrch, aby se mohla na jejich povrchu vytvářet patina.

1.2 Diagnostika kluzného kontaktu

Z hlediska diagnostiky kluzného kontaktu jsou nejvíce sledované tyto parametry:

a) míra jiskření,

b) rychlost a míra opotřebení kartáčů,

c) stav sběracího ústrojí, komutátoru či kroužků.

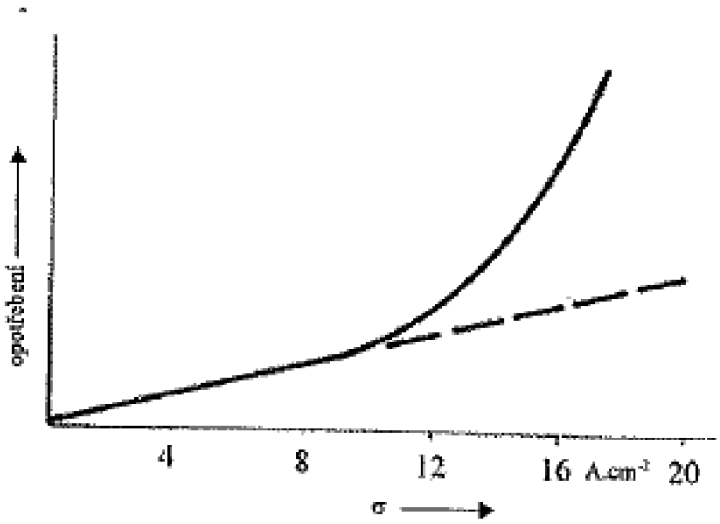
V této práci je pozornost zaměřena především na kartáče, pro jejichž diagnostiku byla právě metoda prachových částic vyvinuta.

Během diagnostiky kartáčů je nejvíce sledovanou hodnotou úbytek kartáčů a rychlost jejich opotřebení, dále pak kvalita povrchu kluzné plochy, která má značný vliv na předčasné opotřebení kartáčů. Předčasné opotřebení kartáčů pak může mít negativní důsledek zejména ekonomický, protože je třeba provést nejen servis stroje, ale také celý stroj dočasně odstavit, tím pádem buď zastavit výrobní proces, nebo mít v záloze další stroj, který odstavený nahradí. Procesů, podílejících se na opotřebování kartáčů je samozřejmě celá řada. Kromě již zmiňovaného mechanického opotřebení v důsledku tření degraduje kartáč taky v důsledku průchodu proudu. Tyto dva způsoby opotřebení se nazývají *přirozené opotřebení* kartáčů. Kromě přirozeného opotřebení existuje taky tzv. *předčasné (mimořádné) opotřebení* kartáčů. Předčasné opotřebení kartáčů souvisí se všemi vnějšími a vnitřními destrukčními procesy, které nesouvisí přímo s funkcí kluzného kontaktu. Může to být na příklad působením vibrací, působením elektrického oblouku nebo špatným mechanickým stavem komutátoru.

Zkoumání činitelů ovlivňujících přirozené opotřebení kartáčů je prováděno řadou výrobců kartáčů, avšak názory na tyto činitele se značně liší. Mezi nejvýznamnější z nich podle [3] patří:

a) Proudové zatížení kartáče – zde je možné říci, že čím vyšší je proudové zatížení kartáče, tím vyšší je také jeho opotřebení. Proud procházející kartáčem způsobuje přemisťování materiálů

mezi třecími plochami, vzniku patiny, což je žádoucí jev, který příznivým způsobem ovlivňuje tření mezi kartáčem a komutátorem. Malé tření pak vytváří dobré kluzné podmínky, což vede k tichému, klidnému a bezjiskrovému chodu stroje. Avšak dobré kluzné podmínky nemohou být dosaženy příliš rychlým úbytkem kartáčů. Takové kartáče by bylo třeba označit jako nekvalitní. Jak je vidět z Obr. 4, s rostoucím zatížením roste rychlost degradace kartáčů zprvu lineárně a od proudové hustoty rovné přibližně 12 $A \cdot cm^{-2}$ se degradace kartáčů zvyšuje rychleji. Tento jev je možné přisoudit obloukovým výbojům mezi komponenty. *Tyto výboje jistě pálí určité množství prachových částic, což negativním způsobem ovlivňuje komparativní metodu.*



Obr. 4: Závislost velikosti opotřebení na proudové hustotě [3]

b) Materiál kartáčů – je zřejmé, že kartáče různých materiálů se budou opotřebovávat jinak za naprosto stejných podmínek. Proto je třeba dbát pokynů výrobců kartáčů a opotřebované kartáče nahradit kartáči stejného typu.

c) Patina – vliv patiny je dvojího druhu: elektrický a mechanický. Nerovnoměrná patina může způsobit nerovnoměrné rozložení proudů na paralelní kartáče a tvořením skvrn, zejména na kroužcích, což vede ke vzniku jiskření. Výsledný efekt opotřebení se podobá diskutovanému opotřebení působením proudu. Z mechanického hlediska může drsná, znehodnocená patina vést k abrasivnímu opotřebení, případně ke změnám koeficientu tření, čehož důsledkem bude vibrační opotřebení kartáčů.

d) Okolní atmosféra – vlhkost, nečistoty v chladícím vzduchu, olejové a silikonové výpary se zajisté podílejí na opotřebení kartáčů. V chemickém průmyslu, hutích a trakcích se negativním způsobem podílí zejména vliv nečistot, které mohou způsobovat obrušování

kartáčů, případně poškozením patiny. Negativní vliv prachových částic se ale prokazatelněji projeví až spolu s působením olejů, které unikají na příklad z ložisek. Směs prachu a olejů může vést k vytvoření značně abrazivní složky na obou aktivních částech kluzného kontaktu. Prudký vzrůst opotřebení kartáčů způsobují páry křemikoorganických olejů

e) Teplota kartáčů – vyšší teplota vede k rozbrušování oxidové vrstvy komutátoru či kroužků a rozbrušené oxidy pak působí abrazivní opotřebení kartáčů.

f) Přítlačná síla - vliv přítlačné síly je nejvíce diskutovaným vlivem. Velká přitlačná síla způsobuje mechanické opotřebení, malá může vést ke zvýšenému přechodovému odporu a opotřebení vlivem proudových výbojů.

g) Polarita kartáčů – je možné zjednodušeně říci, že při malém proudovém zatížení se více opotřebovává anodický kartáč, zatímco při jmenovitých hodnotách proudu dochází k výraznějšímu opotřebení spíše kartáčů katodových.

h) Mechanické vlivy – jsou dané nejen vlastnostmi kartáče,ale také vlastnostmi komutátoru či kroužků. Vibrace ovlivňují zejména hrany kartáčů, při zvyšující se obvodové rychlosti se projeví vliv nerovnosti. Vliv obvodové rychlosti záleží také na tom, zda má stroj dobrou nebo špatnou komutaci, přičemž při špatné komutaci se vliv rychlosti projeví více.

2 Metoda prachových částic

2.1 Stávající přístup k diagnostice kartáčů.

Nejčastějším způsobem nahlížení na posuzování kvality kluzného kontaktu je analýza jeho délkového úbytku za určitou dobu provozu stroje. Tato doba je označována jako doba chodu stroje. Aby bylo možné zvolit vhodné kartáče k požadovaným jmenovitým parametrům stroje, provádí se dlouhodobé zkoušky v řádech stovek až tisíců hodin, během kterých dochází k opotřebování kartáčů, a po ukončení zkoušky vyhodnocení délkového úbytku. Ač tato metoda zní jednoduše, faktem je, že vyžaduje velmi přesné měření, neboť se jedná o úbytky dosti malé. Navíc dosedací plocha kartáčů málo kdy bývá rovinná, proto je třeba být precizní a měřit vždy ve stejném místě. Tyto zkoušky jsou z časového i ekonomického hlediska velmi náročné, proto jsou vítány inovace, které mohou efektivněji splnit tento účel.

2.2 Podstata metody prach. částic

Novou metodou, která by mohla v tomto směru přispět ke značnému zefektivnění těchto zkoušek, je komparativní metoda prachových částic. Podstata této metody spočívá v myšlence, že část kartáče, o kterou se během provozu kartáč zkrátí, se přemění v prach, který je možné zachytit a analyzovat. Ze znalosti geometrických rozměrů kartáče a zjištěného objemu odsátých prachových částic je možné nepřímým způsobem, tedy početně, určit hodnotu délkového úbytku. Prachové částice vznikají obvykle dvěma způsoby:

a) otěrem materiálu o kroužek či komutátor,

b) vylamováním části kartáče při narážení na vystouplé lamely komutátru.

Je třeba mít na paměti, že během chodu stroje se část materiálu kluzného kontaktu spálí účinky výbojů mezi kartáčem a komutátorem, a vzniknou tak nové pevné a plynné produkty. Pokud se všechny tyto částice podaří s dostatečnou přesností zachytit a změřit, otevírá se možnost nového přístupu k diagnostice kluzného kontaktu. Za předpokladu, že se rychlost tvorby těchto částic odpovídá rychlosti opotřebení kartáče, je možné zkrátit dobu zkoušek a rychlost opotřebení kartáčů měřit podstatně kratší dobu.

Původní koncepce komparativní metody, vymyšlená paní Ing. Hornou, spočívala v tom, že prachové částice byly zachytávány na sklíčko umístěné na doběhové straně kartáčů. K větší úspěšnosti zachytávání částic bylo sklíčko pokryto tenkou vrstvou oleje. Zachycené částice se pak ručně proměřovaly a vyhodnocovaly. Z takto zpracovaných údajů bylo možné výpočtem určit objem těchto prachových částic, tedy předpokládaný objem úbytku kartáče, a z jeho geometrických rozměrů pak dopočítat délkový úbytek. Nevýhodou byla pracnost při jeho situování do uvedeného

prostoru, úlet některých částic, negativní působení okolního prostředí na výsledky měření, malá univerzálnost (velké a malé kartáče, místa odběru, apod.) a nízká ekologičnost [11] K výše zmíněným nevýhodám lze jistě připočíst také pracnost při vyhodnocování získaných dat.

2.3 Možnosti využití metody prachových částic v praxi

Hlavním cílem metody je urychlení diagnostiky opotřebení kartáče. Ovšem při spojení poznatků z kapitoly 1.2, můžeme dojít k závěru, že použití metody prachových částic je možné rozšířit na zkoumání také určitých jevů, které toto opotřebení způsobují.

Podle [11] je metoda vhodná pro:

a) posouzení kvality materiálů různých kartáčů,

b) posouzení mechanického stavu dílčích částí kluzného kontaktu,

c) posouzení rychlosti otáčení na rychlost úbytku kartáčů,

d) posouzení kvality okolního prostředí,

e) studium prašnosti prostředí,

f) průběžnou diagnostiku stroje bez nutnosti jeho odstavení,

g) studium geometrie prachových částic,

h) studium práce jednotlivých kartáčů v řadě, a podobně.

2.3.1 Analýza přítlačné síly metodou prachových částic

Jak bylo zmíněno, přítlačná síla určitým způsobem ovlivňuje velikost a rychlost opotřebení kartáčů. Bude-li zachycené velké množství částic s velkým průměrem, můžeme to být příznak toho, že se jedná o částice vzniklé vylamováním. To samo o sobě ještě nemusí být důsledek pouze příliš velké přítlačné síly, ale budou-li mechanické částí kluzného kontaktu v pořádku, je možné se domnívat, že se jedná právě o důsledek špatné přítlačné síly.

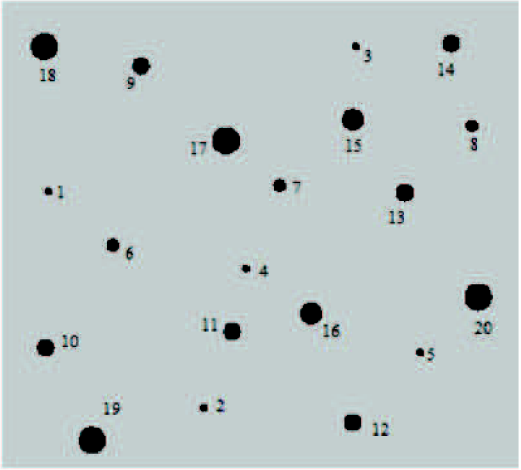
2.3.2 Analýza okolního prostředí

Odsáváním chladícího vzduchu, nebo obecně vzduchu v určitém prostotu, můžeme díky této metodě zkoumat míru prašnosti. Prachové částice jsou totiž v okolním prostředí několikanásobně větší oproti prachovým částicím z opotřebovaného kartáče. Metodou prachových je možné samozřejmě zkoumat nejen uhlíkový prach, ale obecně prachové částice jakéhokoli prachu. Tuto metodiku je možné pak použít nejen pro analýzu kluzného kontaktu, ale také například k posuzování ekologického či zdravotního hlediska prašnosti prostředí.

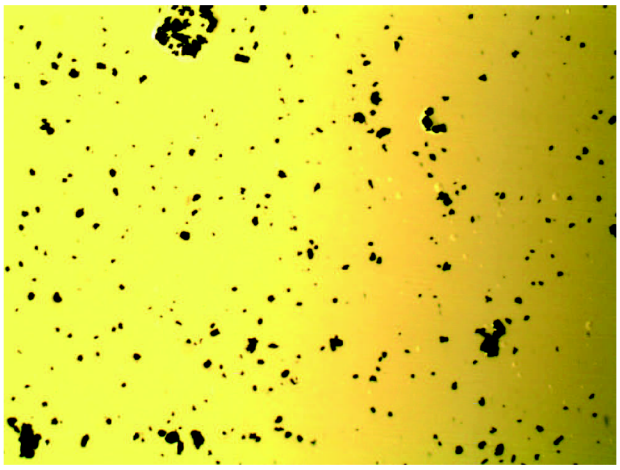
2.3.3 Analýza polarity kartáčů

Ačkoli nelze jednoznačně určit polaritu kartáčů podle velikosti či množství získaných částic, dřívější zkoušky (např. viz [6]) ukázaly, že částice zachycené z anodového nebo katodového kartáče mají symetrický charakter oproti kartáčům katodovým.

2.4 Ověření efektivnosti metody prachových částic



Obr. 5: Fiktivní vzorek pro demonstraci výpočtů [6]



Obr. 6: Reálný vzorek

Aby bylo možné ukázat postup analýzy vzorku a nedopustit se při tom chyby lidského faktoru, byl vytvořen fiktivní vzorek, do kterého byly zakresleny částice kruhového tvaru s přesně daným průměrem. Zobrazení reálných vzorků je podstatně složitější. Na Obr. 5 je zobrazen zkoumaný fiktivní vzorek, na Obr. 6je ukázka reálného vzorku. Cílem je ověřit procentuální chybu při ruční a počítačové analýze, dále pak představit chyby, které se na vzorku mohou vyskytnou a ukázat možnosti jejich eliminování.

Záznam reálného vzorku je prováděn mikroskopem. Protože není možné zachytit celé sklíčko najednou, je ono rozděleno do několika částí. Ať už s využitím softwarové podpory, nebo ruční analýzou, je třeba se rozhodnout, jakou koncepci získání celkového výsledku zvolit.

a) Méně přesná varianta předpokládá rovnoměrné rozložení prachových částic po celém vzorku. Stačí pak spočítat objem na jednom dílci sklíčka a vynásobit výsledek počtem dílců. Tato metoda je jistě upřednostňována při ručním výpočtu

b) Přesnější varianta, která spočívá v počítání částic na všech dílcích. Výsledný objem je dán součtem jednotlivých dílčích výsledků. Tato metoda se spíše hodí k počítačové analýze.

2.5 Ukázka ručního výpočtu na fiktivním vzorku

Nejprve je třeba proměřit a zjisti počet částic stejného průměru. Předpokladem pro výpočet objemu jednotlivých částic je, že jsou kulové. Jejich objem pak bude dán rovnicí:

$$V_i = N_i \cdot \frac{\pi \cdot D_i}{6} \tag{1}$$

Celkový objem částic na vzorku je sumou dílčích objemů:

$$V = \sum V_i \tag{2}$$

Délkový úbytek kartáčů je možné počítat z geometrických tvarů. Pro nejběžnější kartáče kvádrového tvaru tedy platí

$$\Delta t = \frac{V}{S} = \frac{V}{a \cdot r} \tag{3}$$

Pro přehlednost je možné změřené a vypočtené hodnoty uvést v tabulce.

D_i (mm^l)	N_i (-)	V_i (mm^3)
1	5	2,6
1,5	3	5,3
2	6	25,1
2,5	2	16,4
3	4	56,5

Tab. 1: Záznam ručního měření prachových částic

$\sum N_i$	$\sum V_i$ (mm^3)
20	105,9

Tab. 2: Výsledky ručního měření prachových částic

2.6 Počítačová analýza fiktivního a reálného vzorku

Počítačová analýza prachových částic je prováděna pomocí funkcí programu MATLAB, což je speciální, velice vyspělý matematický software. Postup této analýzy není až tak jednoduchý, jako u ručního výpočtu, avšak mnohem účinnější při analýze skutečných vzorků. Využití programové podpory s sebou nese řadu výhod, ale taky určitá omezení.

Pro hlubší pochopení těchto omezení, je třeba si uvědomit, jakým způsobem MATLAB zpracovává grafiku. Fotografie pořízené mikroskopem jsou rastrového typu. To znamená, že

výsledný obraz je v podstatě tvořen maticí $m \times n$ obrazových bodů, tzv. pixelů. Matlab tyto obrazy umí zpracovávat ve čtyrech typech barevných modelů:RGB, bínární, šedotonový a indexovaný. První částí počítačového zpracovávání fotografií je převedení vhodným způsobem jejich RGB obrazu do binárního modelu. Slovo „vhodným“ naznačuje, že tento převod nebude zcela bez pomoci lidského faktoru. Mezičlánkem převodu je převod do odstínů šedi. Je třeba si uvědomit, že jednotlivé převody se vyznačují nevratnou degenerací obrazové informace. Zatímco RGB obsahuje 3 krát 256 bitů, odstíny šedi už jen 256 bitů, binární obraz pouze 2 bity barevné informace na jeden obrazový bod. Nevhodným převedením obrazu dojde k chybám popsaným v kapitole 2.7

2.7 Vady vzorků

Aby bylo možné počítačově analyzovat vzorky, je třeba je nejprve vyfotit pomocí mikroskopu vybaveného záznamovým zařízením. Zde ovšem mohou nastat určité problémy, které negativním způsobem ovlivňují přesnost výpočtu. Mnohé z těchto chyb nelze odstranit úplně, nicméně je možné podniknout určitá opatření, která přispějí k jejich minimalizaci či odstranění.

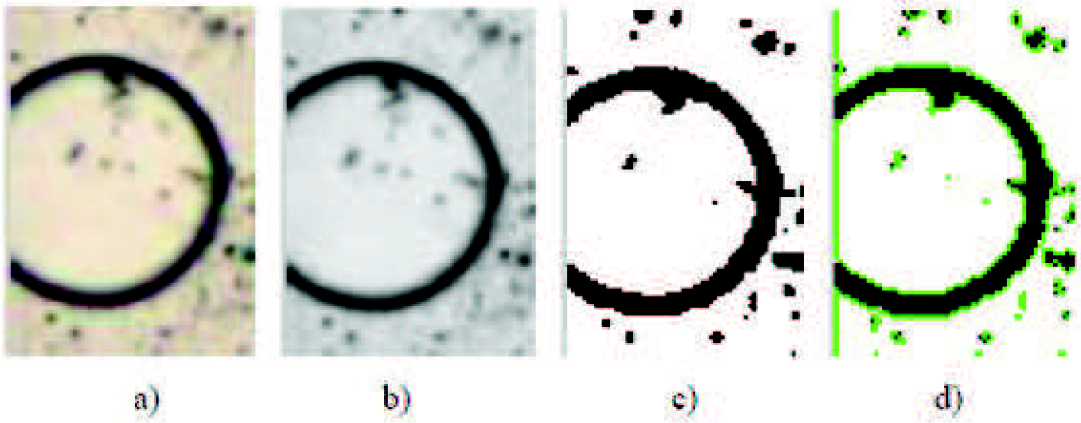
2.7.1 Bubliny

Bubliny vznikají v oleji na sklíčku a negativním způsobem ovlivňují výpočet dvěma způsoby

a) Bubliny z hlediska Matlabu jsou jen dalšími objekty. Tyto objekty jsou několika násobně větší oproti hledaným prachovým částicím. Odstranění tohoto problému lze velmi jednoduše provést tak, že se tyto velké objekty z výpočtů vyloučí. Vyloučení je možné provést již během analýzy Matlabu, nastavením hranice velikosti uvažovaných a neuvažovaných objektů

b) Druhý problém je složitější. Jestliže bude hranice bubliny, nebo jen její vnější či vnitřní okraj procházet nebo se dotýkat prachové částice, může dojít k tomu, že tyto objekty splynou v jeden. Řešení toho neduhu spočívá ve správném nastavení prahu převodu obrazu.

Princip vzniku chyby je vidět na Obr. 7.



Obr. 7: Vznik chyby typu bublina [6]

Legenda k Obr. 7:

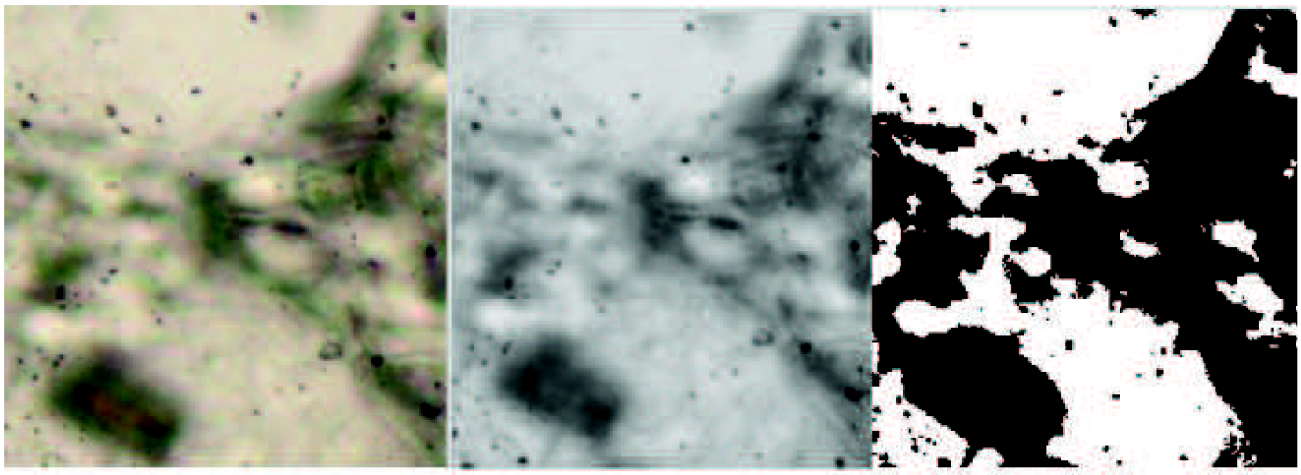
a) Reálný snímek z mikroskopu
b) Ukázka snímku po převodu do odstínů šedi
c) Snímek po aplikaci funkce treshold (práhování)
d) Snímek po vyznačení nalezených objektů

Jak je vidět, při převodu snímku do odstínů šedi nedošlo k uplatnění negativního vlivu bubliny. Teprve aplikací práhování s nesprávnou hodnotou detektoru dochází ke sloučení bubliny s částicemi. Nastavení správné hodnoty detektoru zde je obtížné, neboť při vysoké hodnotě dojde ke sloučení bubliny s částicí, při nízké hodnotě citlivosti dojde k neodstranění šumu. Řešením vzniklé situace může být použití hysterézního prahování. V podstatě se jedná o nastavení dvou hodnot prahů. Nejprve se nastavením vysoké hodnoty detektoru vyznačí výrazné hrany, od nich se pak pokračuje k detekování takových pixelů, jejichž odezva je vyšší než nastavené minimum. Takovýmto způsobem lze zkoumanou část vzorku vyčistit od bublin úplně.

2.7.2 Šmouhy

Zatímco bublina představuje spíše křivku, šmouha představuje defektní plochu na snímku. O kolik je složitější analýza plochy od křivky, o tolik je taky složitější odstraňování šmouhy ze snímku. Ukázka šmouhy a vzniklého problému je na obr. 13. Zde jsou taky zobrazeny kroky analýzy a výsledný efekt. Tento efekt není uspokojivý, protože šmouha překryla velké procento prachových částic. Při odstraňování tohoto defektu je opět nutné použít práhování s hysterezí, navíc některé šmouhy je možné odstranit úplně, bez odstranění případných prachových částic, použitím histogramu.

Princip vzniku chyby je na Obr. 8.



a) b) c)

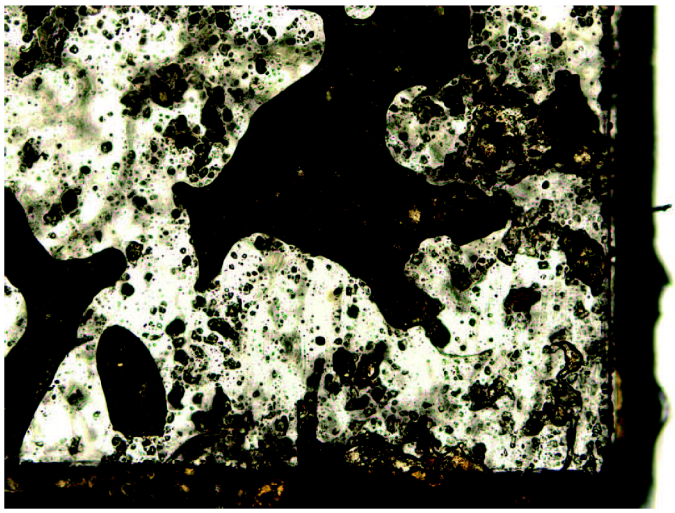
Obr. 8: Vznik chyby typu šmouha: [6]

Legenda k Obr. 8:

a) fotografie vzorku,
b) převod do odstínů šedí,
c) převod do bitové barvy

2.7.3 Okrajové vady

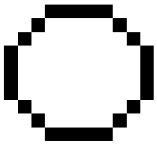
Tyto vady jakoby spojují problémy bubliny a šmouhy dohromady. Jedná se o slití oleje k okrajům sklíčka. Tato situace vzniká tehdy, je-li detekční sklíčko přitlačeno druhým sklíčkem (na příklad při přenosu vzorku z místnosti měření do místnosti s mikroskopem). Ukázka takové vady je na Obr. 9.



Obr. 9: Okrajová vada

2.7.4 Vady rozlišení

Tyto vady vznikají příliš nízkou hodnotou nastavení rozlišení. Jedná se tedy o to, že kruhové části nejsou čistě kruhové, ale složené z pixelů, které v určitých částech vyčnívají a podobně. Ukázka takovéto vady je zobrazena na Obr. 10 . Tato chyba se projevila také při analýze fiktivního vzorku.



Obr. 10: Chyba rozlišení

2.8 Postup při analýze vzorků s využitím Matlabu

Zpracování snímku počítačem může být velice efektivní, avšak i zde je třeba dbát určitých pravidel. Pro získání přesnějších výsledků je žádoucí, aby každá fotografie byla posuzována a prahována zvlášť. Je třeba si ale uvědomit, že množství vzorků bývá řádově ve stovkách až tisících. Nastavovat prahovou hodnotu individuálně je pak pro jedince nad míru náročné. Proto lze použít méně přesné varianty, tedy nastavení jedné hodnoty prahu, která se pak automaticky použije pro každý snímek. Tato varianta se jeví jako optimální z hlediska náročnosti i použitého algoritmu.

Základní kód Matlabu, potřebný ke zpracování vzorků, opracoval ve své práci [7] p. Ing Kopecký. Tento kód využívá základních funkcí k úpravě jasu. Velikost prahu, potřebnou pro převod obrazu z odstínu šedé do černobílé, je možné nastavit pomocí funkcí *impixelinfo* a *impixelregion*. Tato hodnota pak může být použita buď pro všechny vzorky, nebo pro jednotlivé vzorky zvlášť. Původní program byl navržen pro spolupráci s tabulkovým procesorem Excel. Velkou nevýhodou toho kódu je, že dokáže zpracovat výsledky pouze pro jeden obrázek, a navíc pouze částečně. Doplňující výpočty se musí provádět ručně. Takové řešení je ale časově velice náročné, proto byl program autorem této práce upraven tak, aby všechny výpočty proběhly automaticky. Časová úspora jde do řádu hodin. Program je navržen tak, aby, když se spustí ze složky s fotografiemi z mikroskopu, sám ve smyčce načítal jednotlivé obrázky. V současné podobě umí tento kód zpracovat až 300 obrázků. Rozšíření této hodnoty je samozřejmě možné. Program vyžaduje, aby analyzované fotografie dodržovaly určitou strukturu názvu. I toto je možné změnit či přizpůsobit uživateli, avšak jeví se výhodnější soubory hromadně přejmenovat na tvar *img001.jpg, p*řičemž číslice se inkrementují. Na trhu existuje spousta programů, včetně těch volně dostupných, které si

s tím hravě poradí.

Ukázka kódu pro použití metody prachových částic:

```
k = 1.2; %konstanta pro rozjasnění obrazu
j = 10; %konstanta pro rozjasnění obrazu
lut = uint8(k*(0:255) + j);
prah=150; %hodnota prahu
v=0; %objem zkoumaného vzorku
maxi=31;%maximální velikost částice
meritko_mm=1.6;
meritko_px = 1280;
pocet_vzorku=125;
x=1;%pomocné počítadlo
photos='001002003004005006007008009010011012013014015016017018019020
021022023024025026027028029030031032033034035036037038039040041042
043044045046047048049050051052053054055056057058059060061062063064
065066067068069070071072073074075076077078079080081082083084085086
087088089090091092093094095096097098099100101102103104105106107108109
110111112113114115116117118119120121122123124125126127128129130131
132133134135136137138139140141142143144145146147148149150151152153
154155156157158159160161162163164165166167168169170171172173174175
176177178179180181182183184185186187188189190191192193194195196197
198199200201202203204205206207208209210211212213214215216217218219
220221222232242252262272282292302312322332342352362372382392402412
422432442452462472482492502512522532542552562572582592602612622632
642652662672682692702712722732742752762772782792802812822832842852
862872882892902912922932942952962972982993 00';
while x<=pocet_vzorku
vzorek = strcat ('img',photos(x),photos(x+1),photos(x+2),'.jpg');
%vytvoření názvu souboru
x=x+3;
IMG = imread(vzorek); %načtení zpracovávaného obrazu
IMG_br = intlut(IMG, lut); %rozjasnění obrazu podle zadaných
parametrů
img=IMG_br; %načtení snímku
img=rgb2gray(img);%převod snímku do odstínů šedi
img=im2bw(img,prah/255); %převedení snímku podle prahu v rozsahu 0
- 1
img_double = im2double(img);%převedení snímku na matici typu double
black = find(img_double==0);%výpočet černých pixelů
F = imfill(img, 'holes'); %vyplneni detekovanch objektu
L = bwlabel(F); %detekce hran (zjisteni poctu objektu)
P = regionprops(L, 'Area', 'Perimeter'); %zapis plochy a polomeru v
pixelech
X = [P.Area; P.Perimeter ]'; %prevod struktury na jednoduchou
```

```
matici
S = size(X);

%výpočet objemu
for i=1:S(1,1)

    if X(i,1)<maxi
        v=v+(4/3)*pi*(X(i,2)*meritko_mm/meritko_px)^3;
    end
end

end
disp('Celkový počet černých pixelů je:')
length (black)
disp('Celkový objem je:')
v
```

2.9 Vyhodnocení poskytnutých vzorků

Protože z organizačních důvodů nebylo možné během plnění této diplomové práce provádět měření touto metodou, budou v této kapitole představeny výsledky zkoumání vzorků získaných v Petrohradu. Jednalo se o kartáč LFC 55h Carbon Lorrain, u něhož výrobce udává opotřebení Δh = 6,35 mm / 1000h. Udané rozměry kartáče jsou a = 20mm, t = 32 mm, r = 75 mm

Poskytnuté materiály obsahovaly fotografie sklíček po 10, 15 a 20 minutách měření. Fotografie byly pořizovány v rozlišení 2560 × 1920 pixelů při kvalitě fotografie 150dpi, s měřítkem 1mm : 928px

Celkem se jednalo o tři soubory fotografií po 99 snímcích každý. Nastavení parametrů analýzy byly provedeny podle doporučených hodnot. Experimentální zkoušení změny prahu a velikosti částice na náhodně vybraných vzorcích neprokazovalo lepší výsledky. Proto byla intenzita prahu zvolena na 70 a maximální velikost částic na 30px. Výsledný objem prachových částic byl díky znalosti geometrických rozměrů kartáče přepočítán na délkový úbytek podle rovnice (3). Výsledky byly zapsány do tabulky a porovnány s výrobními předpoklady, viz Tab. 3.

Aby bylo možné porovnávat výsledky měření s hodnotami uvedenými v katalogu, je nutné je přepočítat na stejný časový úsek. Platí:

$$\Delta t_{(10\,min)} = \frac{\frac{\Delta t}{1000} \cdot 10}{60} = 1{,}058\overline{3}\,mm \tag{4}$$

Čas zachytávání [min]	**Objem částic zjištěný počítačovou analýzou**	**Objem částic přepočítaný na dobu délkový úbytek**	**Délkový úbytek z katalogu přepočítaný na dobu měření**	**Odchylka**
[min]	*[mm^3]*	*mm*	*mm*	*%*
10	0,869928	0,001359	0,001058	28,45
15	1,626646	0,002542	0,001588	60,07
20	2,125653	0,003321	0,002117	54,03

Tab. 3: Vyhodnocení diagnostiky reálného vzorku metodou prachových částic.

3 Měřící přípravek pro studium kluzného kontaktu

Metoda prachových částic přináší značné ekonomické a ekologické výhody a ve srovnání s klasickými dlouhodobými zkouškami lze s její pomocí dosáhnout až 700 násobné efektivnosti [11]. Není proto divu, že je tato metoda stále aktivně rozvíjena a inovována. Tyto inovace zahrnují nejen teoretické možnosti vyhodnocování prachových částic, ale i snímací aparaturu.

Další úpravy a zpřesňování snímacího zařízení vyžadují praktické zkoušky. Příprava a samotná realizace takových měření však bývá obvykle časově i technicky dosti náročná a z těchto důvodů se je mnohdy nepodaří realizovat [11] Aby tedy bylo možné rozvíjet možnosti metody prachových částic, je velice žádoucí, aby existoval přípravek, který studium této metody usnadní.

3.1 Koncepční zaměření přípravku

Idea měřícího přípravku je taková, aby klasické podmínky práce kluzného kontaktu byly nahrazeny novými, které přinášejí větší variabilitu a operativnost při měření. Zkušební přípravek je koncipován jako univerzální, tj pro studium prachových částic různých druhů a tvarů kartáčů, při různém úběru materiálu kartáče, při různých otáčkách a podobně.Protože je metoda prachových částic nejčastěji využívána ke zkoumání především délkových úbytků kartáčů, bude se měřící přípravek zaměřovat zejména na tento aspekt. Proto bylo k jeho konstrukci využito analogie mezi postupným obrušováním kartáčů na kroužku či komutátoru a na druhé straně analogie s obrušováním kartáčů prostřednictvím brusného kotouče. Tato analogie však nepostrádá dílčí odlišnosti, jakými jsou:

a) zabrušování kartáčů – na reálném stroji dojde k zabroušení kartáčů s určitým rádiem, zatímco zabroušení pomocí kotouče je obvykle prováděno do roviny (samozřejmě s určitou rovinností). Zabroušení do roviny umožňuje snazší měření rozměrů kartáče a určení výsledného objemu, o který se kartáč reálně snížil. Správné určení tohoto objemu je velice důležité při zpřesňování algoritmu metody prachových částic.

b) koncentraci prachových částic do předem daného směru,

c) snadnou ovladatelnost,

d) snadnou regulaci otáček a velikosti úběru materiálu,

e) možnost zaujetí prakticky libovolnou polohu v prostoru,

f) nulové jiskření či jiné namáhání materiálu kartáčů průchodem proudu,

g) jiný tvar částic ovlivněný brusnými zrny kotouče.

3.2 Teoretické aspekty broušení

Aby bylo možné lépe pochopit problematiku prachových částic a její analýzy, je nutné získat alespoň základní povědomí o jejich vzniku. Zejména proto, že vyvinutý laboratorní přípravek, o kterém pojednává tato kapitola, vytváří prachové částice naprosto jiným způsobem, než je tomu u běžných elektrických strojů. V běžném provozu vnikají prahové částice otěrem o kroužek či komutátor, případně vylamováním o vystouplou lamelu komutátoru. Na popisovaném laboratorním přípravku je kartáč obrušován brusným kotoučem a částice jsou tedy oddělovány břitem brousícího kotouče. Jejich tvar je tedy dán brusnými zrny toho kotouče. Metoda prachových částic sice v obecném případě nutně nepředpokládá jejich kulový tvar, avšak v praxi je tento předpoklad s výhodou využíván. To proto, že při obrušování kartáčů na reálném stroji prachové částice tento tvar skutečně mají.

3.2.1 Základy broušení

Broušení je možné definovat jako „strojní obrábění mnohabřitým brusným nástrojem, který koná hlavní pohyb rotační a současně odřezává velký počet třísek proměnného průřezu extrémně vysokou řeznou rychlostí. Vedlejší pohyby přímočaré nebo i rotační vykonává obrobek, případně nástroj“ [10]

Metoda broušení se řadí mezi abrazivní způsoby opracování obrobku. Tyto metody jsou charakterizovány tím, že nástroje při nich používané nemají přesně definovanou geometrii břitu. Broušení se používá zejména tam, kde je požadavek na vysokou přesnost rozměrů a tvarů výsledného povrchu. Tento požadavek je pro popisovaný laboratorní přípravek vysoce aktuální, o čemž bude pojednáno níže. Proces broušení se podle [4] odehrává při vysokých řezných rychlostech (30 – 100 $m \cdot s^{-1}$) a při malých průřezech třísky(10^{-3} až 10^{-5} mm^2).

Proces broušení můžeme charakterizovat několika způsoby. Není předmětem této diplomové práce popsat všechny možné úhly pohledu na tuto problematiku, proto budou zohledněna pouze relevantní kritéria. Těmito kritérii jsou zejména tvar obrobeného výrobku a aktivní část brousícího kotouče.

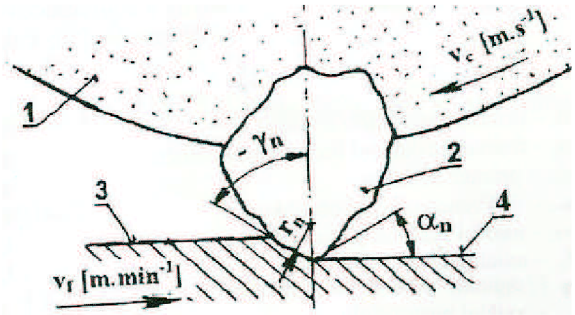
Z hlediska tvaru výsledného obrobku je broušení kartáče na laboratorním přípravku charakterizováno jako broušení rovinné, čili takové, jehož výsledkem bude rovinná plocha kartáče. Z hlediska aktivní části brousícího nástroje můžeme tento proces rozdělit do několika druhů, zejména pak na

a) tangenciální broušení, kde hlavní posuv obrobku je rovnoběžný s vektorem obvodové rychlosti ve zvoleném bodě,

b) axiální broušení, kde hlavní posuv obrobku je kolmý na osu brusného kotouče.

3.2.2 Tvorba třísky při broušení

Důležitým aspektem z hlediska metody prachových částic je vznik třísky. jak již bylo naznačeno, mechanismus vzniku třísky při broušení je odlišný než při otírání o kroužek či komutátor. Základní ilustrace, která přibližuje problematiku vzniku třísky, je zobrazena na obrázku Obr. 11.

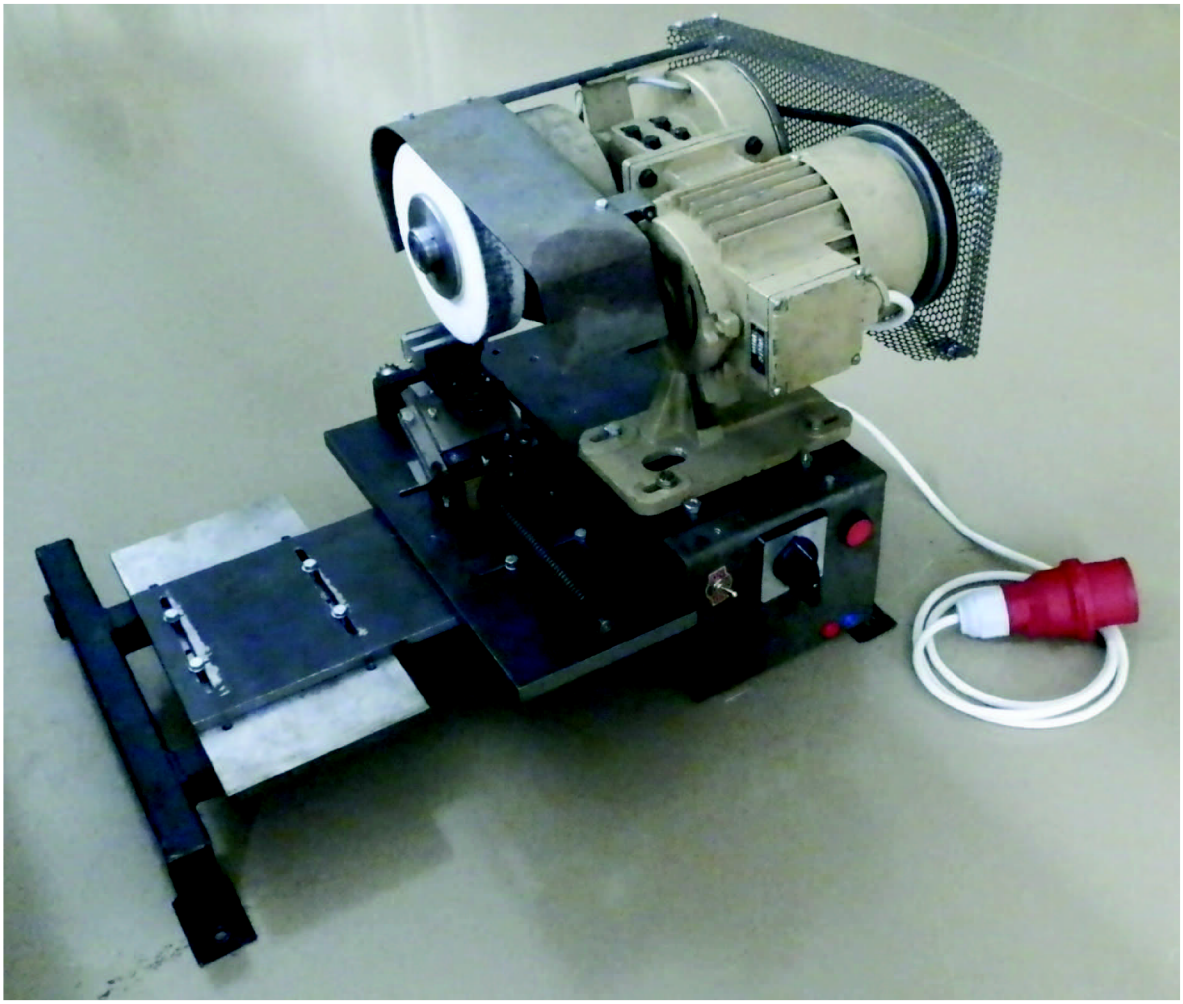


Obr. 11: Model záběru brousícího zrna [4]
1 – brousící kotouč, 2 -brousící zrno,
3 – obráběná plocha, 4 – obrobená plocha

Jednotlivá zrna brousícího kotouče mají nepravidelný geometrický tvar, vysokou tvrdost a odolnost prosti teplotě, nepravidelné zaoblení ostří r_n řádu několika tisícin milimetrů. Úhel čela γ_n těchto zrn se mění a bývá obvykle záporný. Dále mají také relativně velkou hodnotu úhlu hřbetu α_n. Jako řezná rychlost se při při broušení uvažuje obvodová rychlost brousícího kotouče. Rychlost posuvu obrobku nebo kotouče je možné vzhledem k rychlosti řezného pohybu v_e považovat za zanedbatelné. [4].

3.3 Realizace přípravku

Finální podoba celého měřícího přípravku je zobrazena na Obr. 12. Dominantní součástí celého přípravku je poháněcí asynchronní motor o výkonu 370kW se soustavou dvou elektromagnetických brzd. Tento motor spolu s brzdami je upevněn pomoci dvou nimbusových šroubů na šikmém rameni, které svírá s rovinou základny úhel DOPLNIT. Toto rameno je polohovací a umožňuje měnit svou velikost v rozsahu DOPLNIT, čemuž odpovídá maximální vertikální zdvih motoru vůči rovině země v rozsahu DOPLNIT. Tato prostorová konfigurace umožňuje orientační nastavení požadované výšky brousícího kotouče nad kartáčem. Další soustava šroubů, umístěných v horní části mezi motorem a brzdou, umožňuje napínání řemene řemenic.



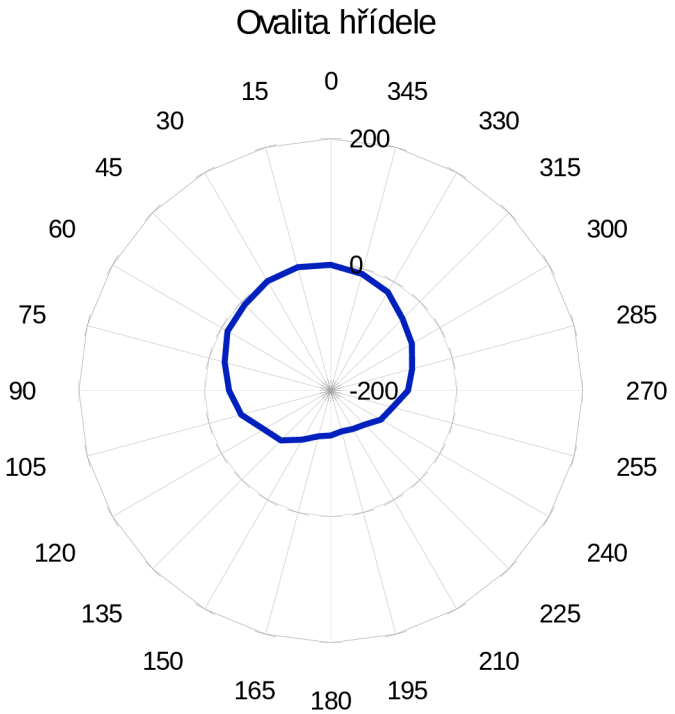
Obr. 12: Měřící zařízení pro studium kluzného kontaktu

Na hřídeli elektromagnetické brzdy je umístěn kotouč s jednostranným vybráním značky TYROLIT - TN 427817 o průměru 150 mm a šířky 32 mm. Protože je celý přípravek koncipován k úběru velmi malého množství materiálu s vysokým požadavkem na přesnost, je třeba při práci s tímto kotoučem počítat i s jeho radiálním házením (ovalitou), které může podle mezinárodní normy ISO 1394 dosahovat až maximálně +0,5 mm. Ovalita samotné hřídele, na které je umístěný kotouč, byla měřena digitálním úchylkoměrem Mitutoyo ID-H0530, ser. č.11094362. Při tomto měření byla hřídel rozdělena pomocí úhloměru na 24 částí po 15°. Výsledky tohoto měření jsou zaznamenány v Tab. 4 a zobrazeny v grafu na Obr. 13

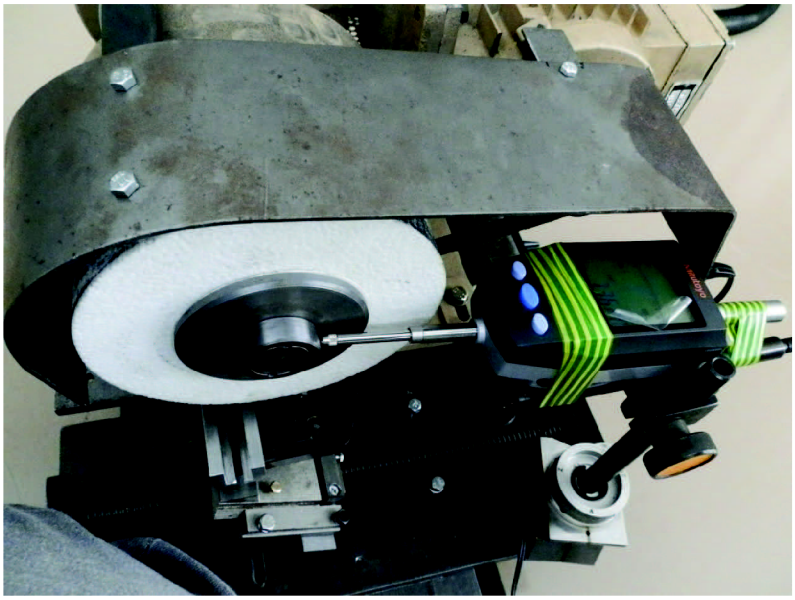
α [°]	Δh [mm]
0	0
15	3
30	1
45	-7
60	-11
75	-25,5
90	-38,4
105	-53
120	-77,5
135	-88,5
150	-110,5
165	-125
180	-129

α [°]	Δh [mm]
195	-133,5
210	-130
225	-124
240	-108,4
255	-98
270	-77,4
285	-66
300	-51
315	-38,5
330	-19
345	-8
360	-6
375	-1

Tab. 4: Měření vystupování hřídele

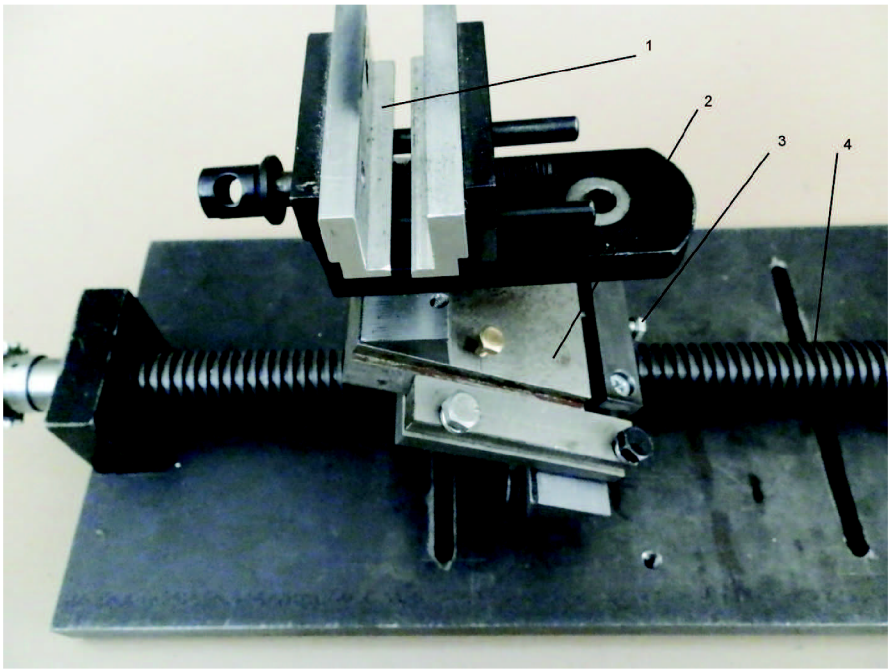


Obr. 13: Ovalita hřídele



Obr. 14: Měření ovality hřídele

Kartáč je držen v malém svěráku s vhodně tvarovanými přítlačnými destičkami, který je umístěn na speciální soustavě zajišťující jemné nastavování vertikální polohy v malých intervalech. Tato soustava zahrnuje šikmou rovinu se sklonem 30°, posuvný mechanismus se šroubkem, zajišťujícím přesné posunutí ve velmi malém intervalu, a druhou vyrovnávací šikmou plošinu, aby se svěráček s kartáčem nacházel ve vodorovné poloze. K nastavení polohy složí seřizovací šroubek se závitem M4. Stoupání tohoto šroubku je 0,7 mm. Poměr změny polohy na zešikmené ploše (nastavené polohovacím šroubkem) ku reálnému zdvižení kartáče ve směru kolmém na brusný kotouč je roven 0,5. Detailní pohled na držák kartáče je zobrazen na Obr. 15.



Obr. 15: Detailní pohled na umístění kartáče

Legenda k Obr. 15:

1) Svěrák, ve kterém je umístěný měřený kartáč
2) nastavovací mechanismus,
3) polohovací šroub,
4) závitová tyč, která zajišťuje pohyb pod brousícím kotoučem.

Aby bylo docíleno co největší variability tohoto přípravku, je žádoucí, aby bylo realizováno nejen výškové umístění kartáče, ale taky nastavení jeho polohy v rovině. K tomuto účelu slouží čtyř masivních železných desek. Tři kratší, jejichž delší hrana je rovnoběžná s vektorem broušení kartáče, a jedna delší (páteřní), jejíž delší hrana je na tento vektor kolmá. Tyto desky mají v sobě vyhloubené párové vodící drážky šířky 6mm, ve kterých jsou umístěny vždy dva vodící šrouby. To proto, aby byla skutečně zajištěna kolmost během posuvu. Použití pouze jedné drážky případně jednoho šroubu by vedlo k určité nežádoucí vůli při nastavování polohy. Hlavní deska, na které je umístěn svěrák s kartáčem, umožňuje polohu přiblížení či oddálení k brusnému kotouči posuvem po desce páteřní. Tato páteřní deska je položena na dvou menších deskách a umožňuje nastavit polohu ve směru broušení. Aby byl tento hrubý posuv co nejsnazší, byly styčné plochy menších desek velice pečlivě opracovány. Určitou nevýhodou tohoto zařízení je, že pro zajištění co největší kompaktnosti je základna motoru umístěna právě nad jednou z polohovacích desek, čímž se zhoršila

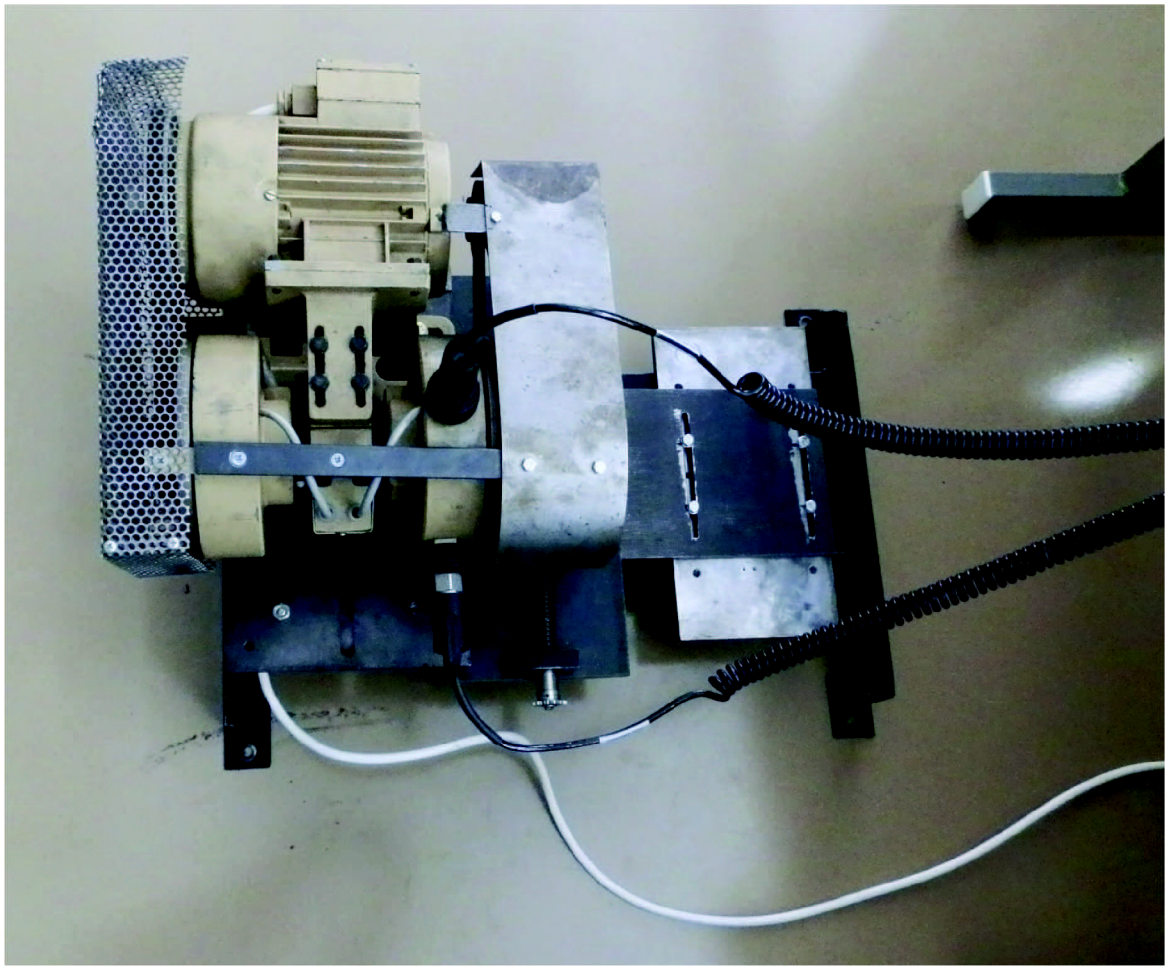
manipulace v této oblasti.

Celková koncepce zařízení je z bezpečnostních důvodů doplněna o kryty rotujících částí, tedy nejen kotouče, ale také druhé magnetické brzdy. Ke zvýšení komfortu práce s tímto přípravkem je na boční straně sestavy umístěn ovládací panel (Obr. 16). Na tomto panelu se nachází tří-polohový přepínač, který je určen k ovládání krokového motoru. Krokový motor v době dokončování této diplomové práce instalován není, a to z technických problémů s dodáním. Tento krokový motor má být řetězem spojen se závitovou tyčí a bude během obrušování zajišťovat posuv svěráku pod brusným kotoučem. Dále je na ovládacím panelu přepínač pro ovládání motoru. Jedná se o přepínač otáček, který byl opět instalován s myšlenkou co největší variability a případných rozšíření do budoucna. Posledním ovládacím prvkem je červené tlačítko bez aretace, které slouží k ovládání elektromagnetické brzdy. Napájení brzdy je přivedeno na červenou a modrou svorku, umístěnou v dolní části ovládacího panelu. Napájení motoru je přivedeno kabelem zakončeným pětikolíkovou vidlicí. Ke zvýšení bezpečnosti je navíc na zařízení umístěna ochranná svorka, která se nachází na desce, na které je umístěn motor.

Obr. 16: Ovládací panel přípravku

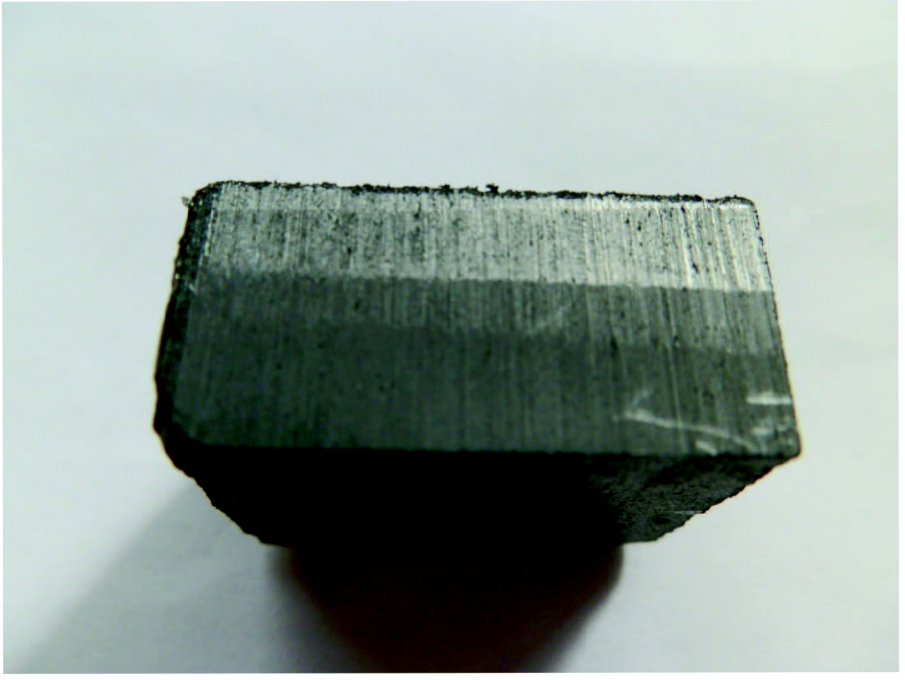
Kromě výše popisované ovality hřídele a brusného kotouče se bude na velikosti úběru materiálu z kartáče jistě podílet i chvění tohoto zařízení. Protože kotouč vodivý není, nelze na něm vibrace měřit. Avšak, abychom získali určité orientační povědomí o stavu stroje, bylo provedeno měření vibrací na krytě nad brousícím kotoučem a také na kostře brzdy, která je blíže kotouči (viz Obr. 17). Průběh těchto vibrací je zobrazen na grafech v přílohách P1-P4 umístěných na konci této této práce.

V rámci ověřování funkce stroje bylo provedeno obroušení kartáče, aby se zjistilo s jakou

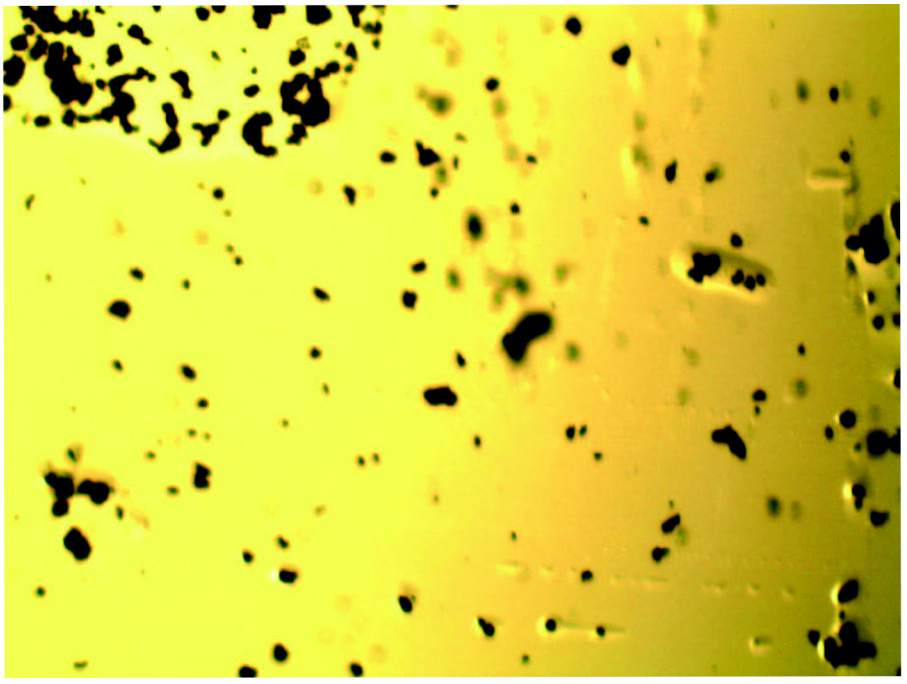


Obr. 17: Měření vibrací na brzdě motoru

rovinností bude tento stroj kartáče opracovávat. Snímek obroušeného kartáče je zobrazen na Obr. 18 Kartáč byl obroušen o 0,5 ±0,02 mm. Tato hodnota byla naměřena na pěti místech plochy kartáče. Výjimku tvoří akorát levá hrana (na fotografii) kartáče, která zbroušena nebyla. Důvodem zřejmě bylo špatné umístění ve svěráku. Ukázka prachových částic, které vzniknou na tomto přípravku je zobrazena na Obr. 19. Je vidět, že vzniklé částice opět nemají příliš kulovitý tvar. Nabízí se tedy otázka, zda je možné nalézt korekční součinitele, které nevhodný tvar částic budou reflektovat.



Obr. 18: Obroušený kartáč



Obr. 19: Prachové částice obroušeného kartáče

4 Měřící zařízení pro metodu prachových částic

Původní metoda prachových částic operovala s tím, že částice se zachytávají bezprostředně za doběhovou stranou kartáče, aby se vyloučila možnost negativního ovlivnění počtu částic chladícím vzduchem. Registrační sklíčko, bylo tedy umístěno hned za kartáčem, což vylučovalo použití této metody pro malé stroje. Další nevýhodou toho zařízení byla pak nutnost stroj zastavovat kvůli odebrání sklíčka a manipulace se sklíčkem samotným taky byla v tomto případě velmi nepohodlná a hrozilo zvýšené riziko poškození získaného vzorku

Proto bylo na Ústavu výkonové elektroniky a elektrotechniky navrženo nové snímací zařízení, které pracuje na principu odsávání prachových částic. Částice jsou unášeny proudem vzduchu a vlivem druhého Newtonova pohybového zákona dopadají na sklíčko, které je umístěno v cestě proudění vzduchu. Ke zvýšení efektivnosti zachycení částic, je vhodné aby na sklíčko byla nanesena vrstva oleje. Ten sice způsobuje určité defekty vzorku, jak o tom bylo pojednáno v kapitole 2.7, avšak tyto chyby je možné relativně účinně eliminovat, na rozdíl od možnosti vytrousení částic během přenášení a umisťování sklíčka pod mikroskop.

4.1 Klíčové části snímacího zařízení

4.1.1 Jímací nástavce

Prvním článkem celého zařízení jsou jímací nástavce. Aby se docílilo co největší variability při odsávání prachových částic na různých strojích bylo navrženo hned několik různých variant. Základní variantou je nástavec pro odsávání prachu z malého prostoru. Tento nástavec je zobrazen na Obr. 20. Jak je vidět, jedná se o trubici o průměru 10mm. Díky svým úzkým rozměrům je tedy vhodná k odsávání částic z malých strojů, u kterých je prostor v oblasti kluzného kontaktu velmi omezený.

Druhý typ jímacího zařízení umožňuje odsávání prachových částic z řady kartáčů, případně z kartáče větších rozměrů. Tento nástavec je zobrazen na Obr. 21. S řadou kartáčů se obvykle setkáváme u velkých strojů. Je zřejmé, že použití úzkého jímacího zařízení by nestačilo odsávat prach ze všech kartáčů současně. Avšak, při použití tohoto nástavce je třeba mít vždy na zřeteli, že je odsáván prach ze všech kartáčů v řadě najednou. Aby mohl být stanoven úbytek jednoho z kartáčů, je třeba použít důležitý předpoklad, a to, že všechny kartáče degradují stejně. Paradoxně se tento předpoklad promítá i při použití úzkého nástavce. Použití tohoto předpokladu dává dvě možnosti:

a) odsávání prachu jednoho kartáče,

b) odsávání prachových částic všech kartáčů a provedení korekčního výpočtu, tedy podělení celkového objemu počtem kartáčů v řadě.

Obr. 20: Nástavec pro malé prostory

Obr. 21: Jímací zařízení pro odsávání prachu z řady kartáčů.

Jak bylo uvedeno v odstavci 2.3.2, metodu prachových částic je možné využít i k analýze prašnosti prostředí. K tomuto účelu slouží speciální jímací nástavec, který je zobrazen na Obr. 22

Obr. 22: Nástavec pro analýzu okolního vzduchu

4.1.2 Trubice

Jedná se o plastový spojovací element, který usměrní proud vzduchu na držák sklíčka a dodá tak prachovým částicím požadovaný směr.

4.1.3 Držák sklíčka

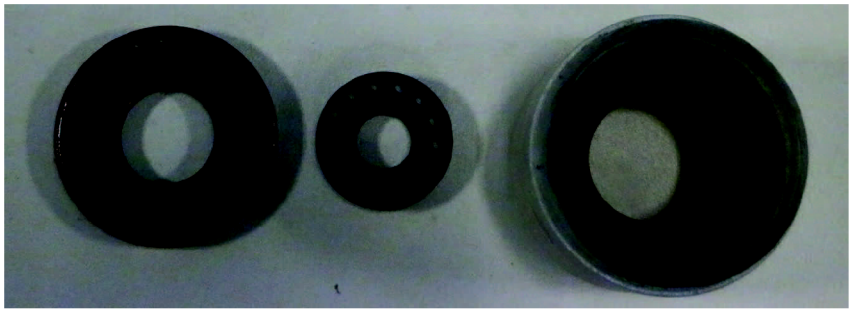
Jedná se o speciální přípravek, zobrazený na Obr. 23. Uprostřed přípravku se nachází prostor k umístění sklíčka. Tento prostor je průchozí z důvodu snazší manipulace se sklíčkem, zejména tedy s jeho umisťováním do správné polohy. Po obvodu se pak nachází řada otvorů, kterými proudí vzduch.

Držák sklíčka je velice klíčovým elementem tohoto měřícího přípravku, proto je jeho konstrukci a funkci věnována značná pozornost, zejména z hlediska možných inovací vedoucích ke zvýšení přesnosti této diagnostické metody. Jedním z aspektů podílejících se na počtu zachycených částic je počet a rozmístění ventilačních otvorů. Experimentálně bylo zjištěno [6], že otvory by měly být co největší, protože při použití příliš malých otvorů nedochází k vytvoření potřebného podtlaku pro odsávání prachových částic.

Původní koncepce držáku sklíček neobsahovala otvory po obvodu (viz Obr. 23, 2), ale pouze pár otvorů při samotném sklíčku. Toto řešení se ukázalo býti nevýhodné, protože vlivem prudké změny průřezu trubice dochází k turbulencím a značným ztrátám způsobeným těmito turbulencemi. Aby se zmírnil dopad prudké změny průřezu, bylo zařízení inovováno a doplněno o tyto doplňující otvory po obvodu přípravku. Toto řešení s sebou ale nese další úskalí. Dá se předpokládat, že těmito otvory zřejmě uniká určité procento prachových částic. Tento jev by měl být eliminován použitím zařízení se dvěma sklíčky umístěnými v kaskádě. Předpokládá se, že část těchto částic by měla být zachycena na tomto druhém sklíčku, což by celkově mohlo vést ke zvýšení účinnosti celé metody. Tento předpoklad je stále předmětem zkoumání a bude blíže diskutován v dalších odstavcích této

kapitoly.

Určitou nevýhodou tohoto elementu je, že je spojen s ostatními částmi přímo a pro odebrání sklíčka je třeba se zařízením manipulovat. Tento element je na trubici pouze nasazen a k jeho demontáži je potřeba překonání určitého tření. To může vést ke znehodnocení vzorku. Přílišným škubnutím může dojít k odpadnutí sklíčka nebo jen setřesení části prachových částic. Tento neduh je možné odstranit namazáním styčných ploch olejem či vazelínou. To vede ke snížení tření a snazší manipulaci se zařízením. Získáním určité praxe může pak člověk, který s tímto přípravkem pracuje, dosáhnout zanedbatelné chyby zapříčiněné vytahováním sklíčka z přípravku. Inovací tohoto elementu pak může být vytvoření závitového spoje, kterým bude držák propojen s odsávací trubicí. Toho však nelze dosáhnout dílenským obráběním.



Obr. 23: Držáky sklíčka: Přední, zadní, spojovací element

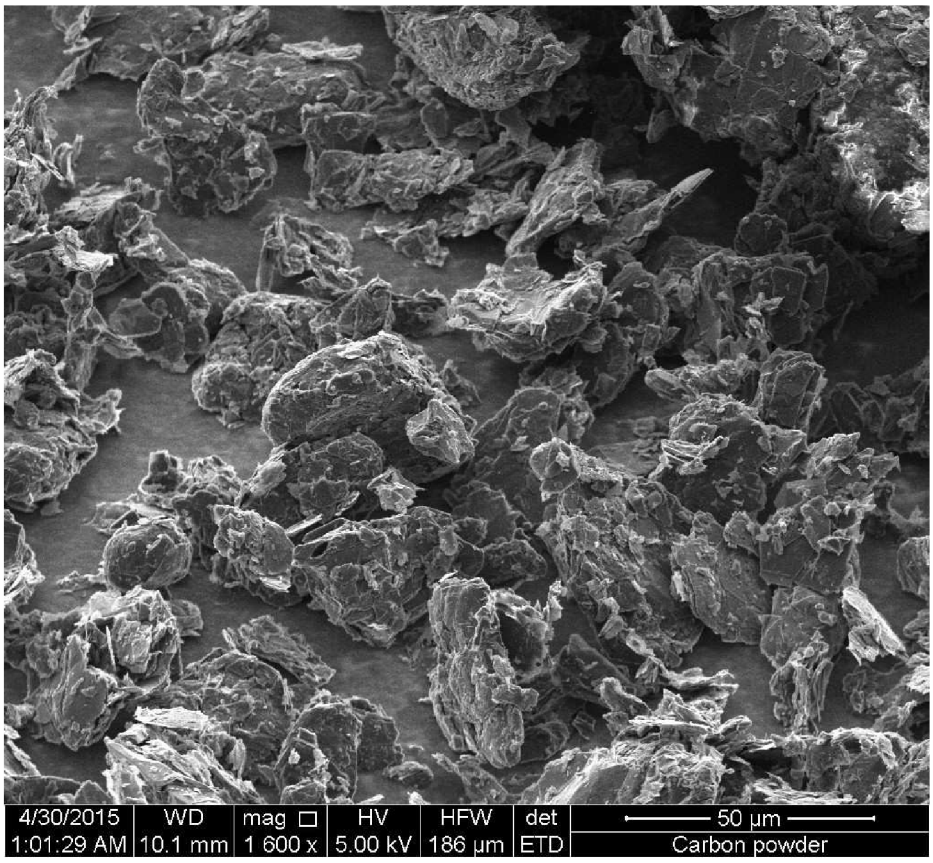
4.2 Ověření koncepce snímacího zařízení se dvěma sklíčky

Jak bylo popsáno výše, současná metodika měření pracuje pouze s jedním registračním sklíčkem. Je zde tedy prostor k diskuzi, jaká část prachových částic se dostane za registrační sklíčko, případně jaká část zůstane na stěnách jímacího zařízení či trubice a ke sklíčku se vůbec nedostane. Jedním z cílů této diplomové práce je provést určité měření, které by přispělo k posouzení, zda použití kaskády dvou registračních sklíček povede k významnému zpřesnění této metody, či nikoli. Objem prachových částic, které se k registračnímu sklíčku vůbec nedostanou, je možné zanedbat.

Podstata ověřovacího měření je velmi prostá. Bylo připraveno několik vzorků se stejným obsahem uhlíkového prachu. Měření se provádí ve dvou fázích – poprvé s použitím jednoho sklíčka, po druhé s použitím kaskády dvou sklíček. Následnou analýzou bude zjištěn objem zachycených částic v prvním a druhém případě a jejich vzájemným porovnáním bude stanoven procentuální objem, který přiblíží, zda se vyplatí používat snímací zařízení se dvěma sklíčky či nikoli. Je třeba zdůraznit, že použití druhého sklíčka s sebou nese určitou obtíž. Analýza byť i malého sklíčka je v současné době relativně náročná a samozřejmě zatížena všemi chybami, popsanými výše.

4.2.1 Příprava měření

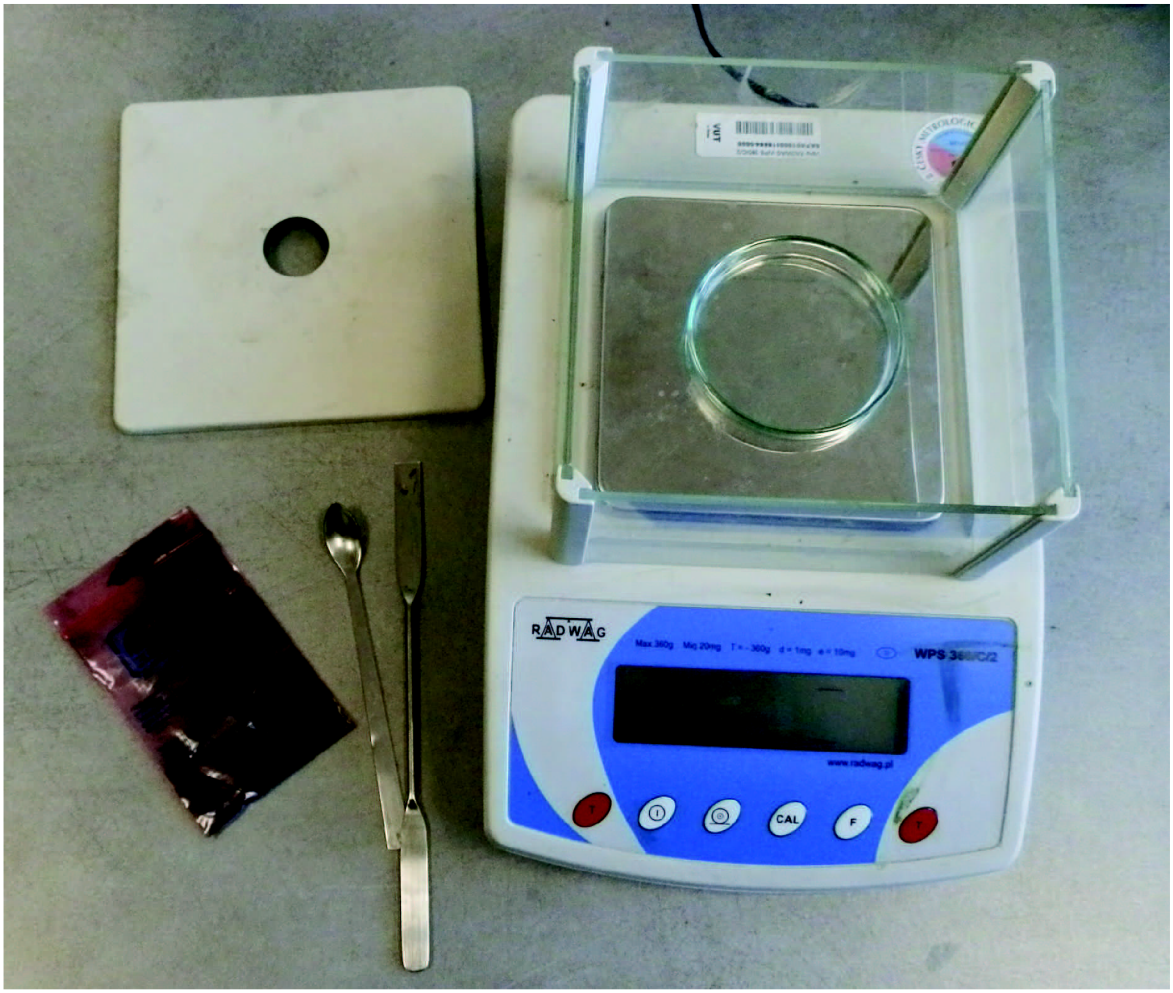
K tomuto experimentu bylo připraveno určité množství uhlíkového prachu. Tento prach nevznikl klasickým způsobem, čili otěrem kartáče o komutátor či kroužky během chodu nějakého točivého stroje, nýbrž byl získán ručním obráběním kartáčů. Tento fakt se projeví zejména na struktuře takto získaných třísek, tedy prachových částic, jejichž objem bude zjišťován. Při klasickém opotřebení mají částice spíše kulový tvar, zatímco tyto částice mají tvar velmi různorodý. Snímek těchto prachových částic, pořízený pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu, je zobrazen na Obr. 24.



Obr. 24: Snímek prachových částic vzniklých ručním obráběním

Aby bylo docíleno co nejpřesnějších velikostí jednotlivých vzorků, bylo k jejich rozdělení použito digitální laboratorní váhy RADWAG 360/C/2, SAP č. 16664-0000, zapůjčené Ústavem elektrotechnologie FEKT VUT. Jedná se o velmi precizní digitální laboratorní váhu s automatickou kalibrací a krytem proti okolním atmosférickým podmínkám. Váha váží s přesností 0,001g. Měřící pracoviště je zobrazeno na Obr. 25. K experimentu byly připraveny tři vzorky, každý po 10mg. Protože je minimální měřitelná hodnota, udávaná výrobcem je 20mg, byly vzorky umístěny do

skleněné misky. Toto řešení se jeví jako výhodné i z hlediska další manipulace se vzorkem. Miska, ve které byl vážen prach, byla vážena před i po odsátí prachu. Hmotnost prachu, zachyceného na jejich stěnách byla menší než 1mg.



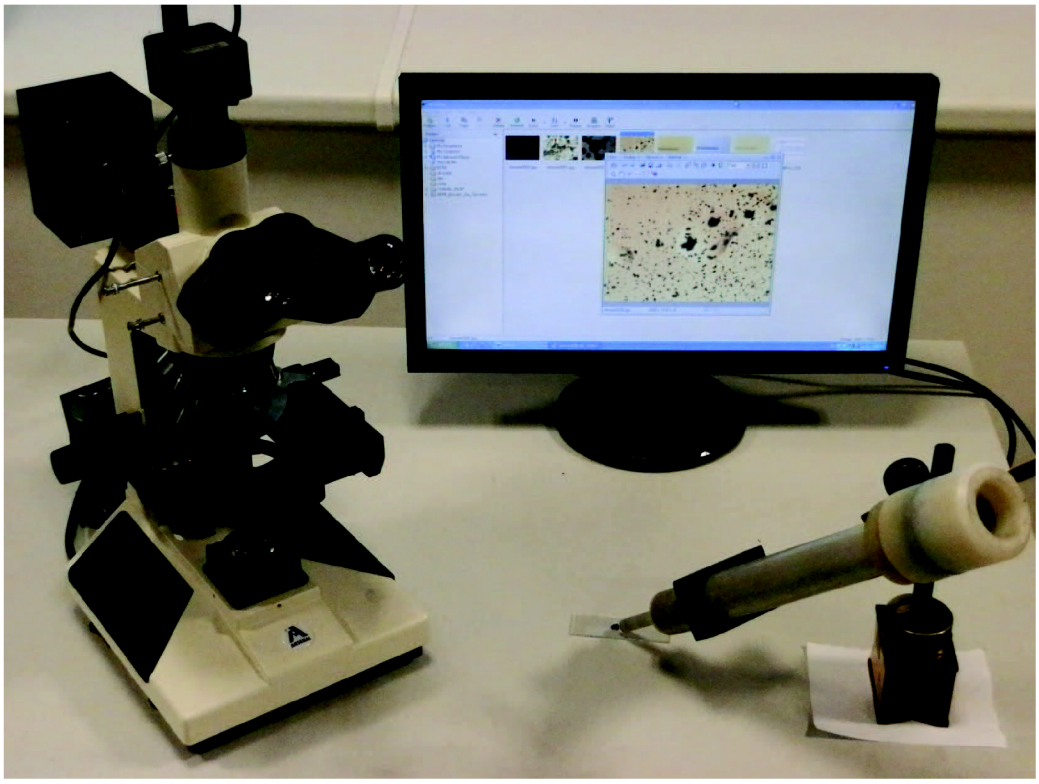
Obr. 25: Pracoviště s laboratorní váhou.

4.3 Vlastní měření

Vlastní měření se zařízením se dvěma sklíčky probíhalo v laboratořích Ústavu výkonové elektroniky a elektrotechniky. Samotné měření probíhalo ve dvou fázích. První fáze zahrnovala odsávání prachu na registrační sklíčko. Ve druhé fázi bylo prováděno snímání tohoto sklíčka mikroskopem a vytvoření obrazového záznamu potřebného pro další analýzu.

Měřící pracoviště pro odsávání je zobrazeno na Obr. 26. Aby byly podmínky pro měření všech vzorků co nejvíc identické, bylo samotné měřící zařízení umístěno magnetickém držáku a v této

poloze zafixováno. Protože měření pro svou časovou náročnost nemohlo být realizováno během jediného dne, byly všechny pomůcky řádně označkovány, aby bylo možné celou aparaturu vždy znovu přesně sestavit. Prachové částice byly odsávány na registrační sklíčko využitím běžného vysavače značky ETA typ 2406 s příkonem 2000W. Tento vysavač obsahuje regulátor výkonu sání. Díky tomu bylo možné zkoumat také závislost zachycených částic na rychlosti sání Rychlost odsávání byla měřena digitálním anemometrem.



Obr. 26: Měřící pracoviště pro metodu prachových částic

Z dřívějších měření (viz [6], [11]) bylo zjištěno, že přesnějších výsledků stanovení délkového úbytku kartáče se dosahuje při vyšších rychlostech odsávacího vzduchu. Tento fakt z principu metody znamená, že při těchto vyšších rychlostech docházelo k zachycení většího množství prachových částic na registrační sklíčko. Lze tedy předpokládat, že pro menší rychlosti bude počet prachových částic zachycených na druhém sklíčku větší. Tento jev by se pak dal vysvětlit pomocí druhého Newtonova zákona tak, že při menších rychlostech jsou prachové částice schopny ještě reagovat na změnu směru proudu vzduchu, zatímco při větších rychlostech už vlivem své setrvačnosti změnit směr tak rychle nedokážou. Jiným důvodem ale může být, že sací výkon při malých rychlostech odsávacího vzduchu není schopen překonat síly a dynamické vlastnosti všech částic. Ty se pak do odsávacího zařízení buď vůbec nedostanou, anebo skončí na jeho stěnách.

Protože toto měření probíhalo s dopředu připraveným prachem, mohlo se pracovat rovnou v laboratoři vybavené technickým mikroskopem ArsenalLPT 1513-T. Jedná se o laboratorní světelný mikroskop, který umožňuje pozorování zkoumaného objektu přímo přes okulár, nebo prostřednictvím digitální CCD kamery na monitoru počítače. Díky dodávanému softwaru je možné nejen obrázky snímky prohlížet, ale také je zaznamenávat. A to buď jako bitmapové obrázky nebo jako video sekvence. Výhoda měření přímo v laboratoři s mikroskopem spočívá v tom, že vzorek se nemusí přikrývat druhým sklíčkem a přenášet na větší vzdálenosti. Díky tomu bylo na vzorcích podstatně méně defektů

Mikroskop disponuje 5 objektivy se zvětšením 10x, 25x 40x a 60x. K vlastnímu vyhodnocování byl použit objektiv s desetinásobným zvětšením. To proto, že tento mikroskop neobsahuje automatické posouvání sklíčka. Při zvoleném zvětšení a rozlišení 2048×1536 dpi bylo možné zobrazit reálně pouze 1,6 × 1,2 mm. Tato velikost byla změřena objektivovým mikrometrem, dodávaným k mikroskopu jako příslušenství. Jednoduchým výpočtem je možné určit, že při zvoleném nastavení je k nasnímání celého sklíčka o rozměrech 22 × 22 mm potřeba 253 snímků. Pro druhé sklíčko je to pak 134 snímků. Celkem tedy na jedno měření připadá 387 snímků. Při snížení rozlišení či zvýšení zvětšení je počet snímků v řádu tisíců.

Z hlediska celé metody je časově nejnáročnější právě samotné snímání na mikroskopu., který sice disponuje určitým nastavovacím měřítkem, avšak zejména měřítko pro posuv zleva doprava je velmi špatně přístupné a pro takovéto zaznamenávání celého sklíčka dosti nevhodné. Důležitost správného posouvání je zřejmá – při ručním nastavování mohou být některé prachové částice nezaznamenány případně zaznamenány dvakrát.

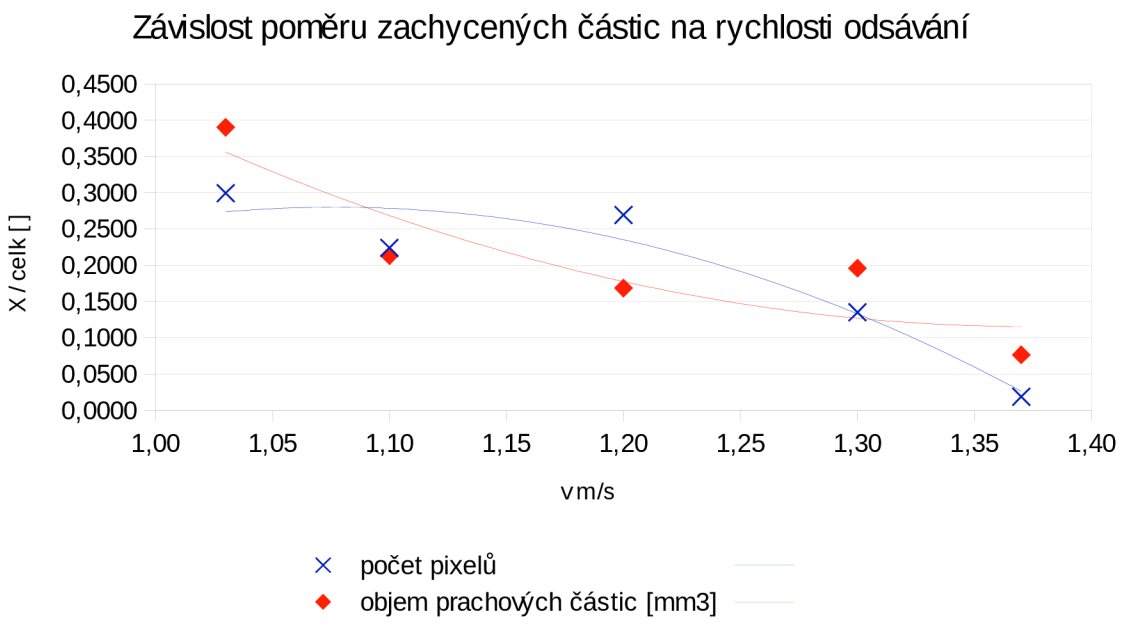
4.4 Vyhodnocení dosažených výsledků

Na Error: Reference source not found je zobrazena struktura prachu, který byl při měření použit. Jak již bylo diskutováno výše, částice nemají kulový tvar. To se jistě projeví na výpočtu objemu zachycených částic. Navíc částice se často překrývají a leží na sobě. Z toho důvodu bude vhodnější použít k vyhodnocení plochu, kterou částice na sklíčku zabírají. Tabulka vypočtených hodnot (viz Tab. 5) srovnává jak plochu, tak teoretický objem zachycených částic. Je vidět, že dosažené hodnoty se dle očekávání liší. Avšak, co je důležité, mají společný tendr. Z číselných dat nebo grafického záznamu, zobrazeného na Obr. 27 potvrzuje výchozí předpoklad, že pro malé rychlosti odsávání je vhodné použít koncepci se dvěma sklíčky, zatímco při větších rychlostech je hodnota zachycených částic na druhém sklíčku zanedbatelná.

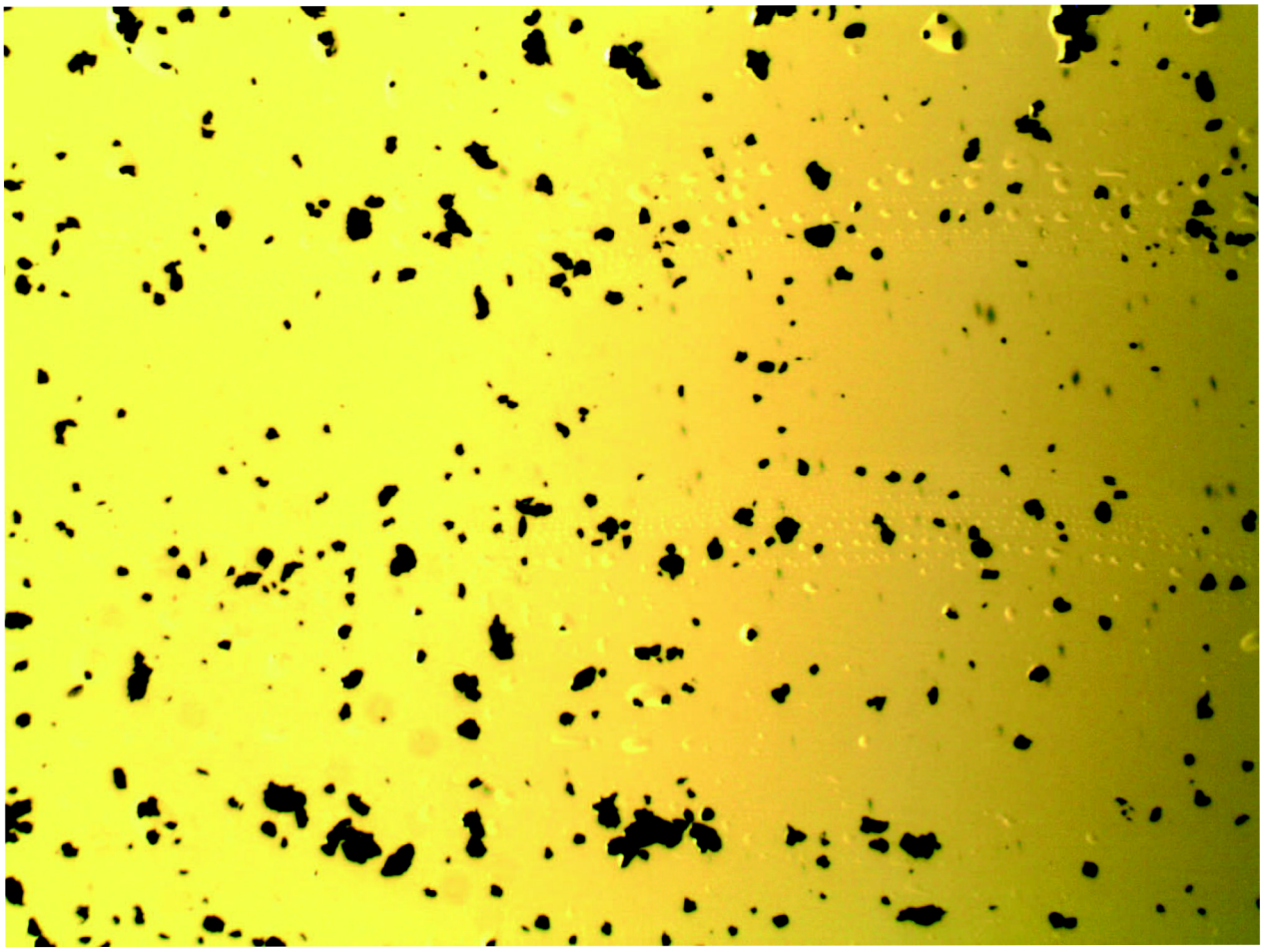
Zvláštní na těchto výsledcích je, že v zásadě neexistuje relevantní spojitost mezi plochou částic a jejich objemem. Tento jev je možné přisuzovat jednak tomu, že všechny částice byly odsáty hromadně, tudíž mohly tvořit hrudky, které software neumí rozpoznat, a jednak velkou variabilitou tvarů prachových částic danou tím, jak byl tento prach získán.

rychlost odsávání [m/s]		1,37	1,30	1,20	1,10	1,03
počet pixelů	přední sklíčko	153147	239842	464081	673428	769249
	zadní sklíčko	2916	277306	171076	194301	328553
	poměr	0,0187	0,1351	0,2693	0,2239	0,2993
objem prachových částic [mm³]	přední sklíčko	0,0930	0,0452	0,0227	0,0321	0,0222
	zadní sklíčko	0,0077	0,0110	0,0046	0,0087	0,0142
	poměr	0,0765	0,1957	0,1685	0,2132	0,3901

Tab. 5: Výsledky pro zařízení se dvěma sklíčky



Obr. 27: Graf závislosti zachycených částic na rychlosti odsávání



Obr. 28: Ukázka analyzovaného prachu

5 Závěr

Tato diplomová práce se zabývá problematikou kluzného kontaktu a posouzením vhodnosti metody prachových částic pro jeho diagnostiku.

V první kapitole je představena problematika kluzného kontaktu. Popsány jsou jeho základní komponenty a diskutovány vlivy různých činitelů na jeho přirozené opotřebení.

Na úvodní část navazuje kapitola popisující základní principy metody prachových částic s uvedením určitých vlivů, které touto metodou, dle domnění autora, je možné diagnostikovat. Těmito vlivy jsou kromě samotného opotřebení kartáčů taky materiál kontaktů, okolní prostředí, ve kterém je stroj provozován, nebo polarita kartáčů. Kromě teoretických poznatků je v této kapitole taky ukázkový výpočet ať už jednoduchého modelového příkladu, nebo reálného příkladu z praxe.

Řešení těchto příkladů sugeruje, že metoda prachových částic není vhodná pro ruční výpočet. Bez softwarové podpory je velice obtížné analyzovat důkladně všechny naměřené vzorky. Avšak ani počítačová analýza vzorků nenese uspokojivé výsledky. Při analýze fotografií reálného vzorku dosahovala odchylka hodnot zjištěných metodou prachových částic od hodnot přepočítaných z katalogových údajů 20-60%. Vzhledem k tomu, že se jedná o starší fotografie, je možné se domnívat, že vzorky byly pořizovány méně účinným způsobem. Dále je nutné podotknout, že byla zvolena méně přesná varianta analýzy, kdy všem vzorkům je nastaven stejný práh jasu a citlivosti. Z časového hlediska a organizačních důvodů nebylo možné provést důkladnější analýzu. Řešením těchto problémů může být využití sofistikovanějších algoritmů rozpoznávaní objektů v obraze, například neuronových sítí. Přínosem této kapitoly je pak inovace programového algoritmu pro analýzu vzorků metodou práhování. Díky této inovaci není nutné zkoumat snímky jednotlivě, nýbrž automaticky a naráz. Tato inovace přináší časovou úsporu v řádu hodin.

Třetí kapitola je věnována laboratornímu přípravku pro studium této diagnostické metody. Bylo navrženo, sestaveno a oživeno zařízení, které umožní ještě rychlejší a pohodlnější získávání kartáčového prachu, potřebného k výzkumu a inovacím dílčích prvků metody prachových částic.

Poslední kapitola zkoumá efektivnost použití koncepce snímacího zařízení se dvěma sklíčky. Na základě dosažených výsledků je možné říci, že pro malé rychlosti odsávání prachu je tato koncepce na místě, při velkém výkonu odsávání je nadbytečná. Avšak otázku této koncepce nelze takto uzavřít, neboť dosažené výsledky doprovází řada doplňujících dotazů a nejasností. Je zde na místě další výzkum. Při řešení tohoto bodu zadání autor odhalil další problematický článek praktické aplikace této metody. Pořizování snímků by mělo být automatizováno. Lidská analýza neumožňuje velké přiblížení mikroskopu, neboť to vede k značnému zvětšení rastru, na který je třeba jednotlivá sklíčka rozdělit. Není pak v lidských silách tento rastr důsledně dodržet.

Závěrem se dá říct, že metoda prachových částic má potenciál, avšak v určitých ohledech je třeba ji ještě zdokonalit. Přestože v případě zkoumaném v této práci se tato metoda jevila jako neefektivní, vědcům v Petrohradě se podařilo docílit více než 90% efektivnosti. A to už je výsledek, který je možné brát jako uspokojivý.

6 Seznam použité literatury

[1] 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..

[2] HAVLIŠ, P. Návrh měřicího zařízení pro studium kluzného kontaktu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 67 s. Vedoucí diplomové práce Doc. Ing. František Veselka, CSc..

[3] CHMELÍK, Karel a František VESELKA. Kluzný kontakt v elektrických strojích. Vyd. 1. Ostrava: Key Publishing, 2007, 256 s. ISBN 978-80-87071-59-5.

[4] KOCMAN, Karel. *Technologie obrábění*. 2. vyd. Brno: CERM, 2005, 270 s. ISBN 80-214-3068-0.

[5] KOCMAN, R. Vyhodnocování výsledků dlouhodobých zkoušek el. strojů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 56 s. Vedoucí bakalářské práce Doc. Ing. František Veselka, CSc..

[6] KOPECKÝ, J. Diagnostika kluzného kontaktu s využitím praktické aplikace „Metody prachových částic“. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 64 s. Vedoucí diplomové práce Doc. Ing. František Veselka, CSc..

[7] KOPECKÝ, J. Mikroskop a možnosti jeho využití v technické praxi. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 48 s. Vedoucí bakalářské práce Doc. Ing. František Veselka, CSc..

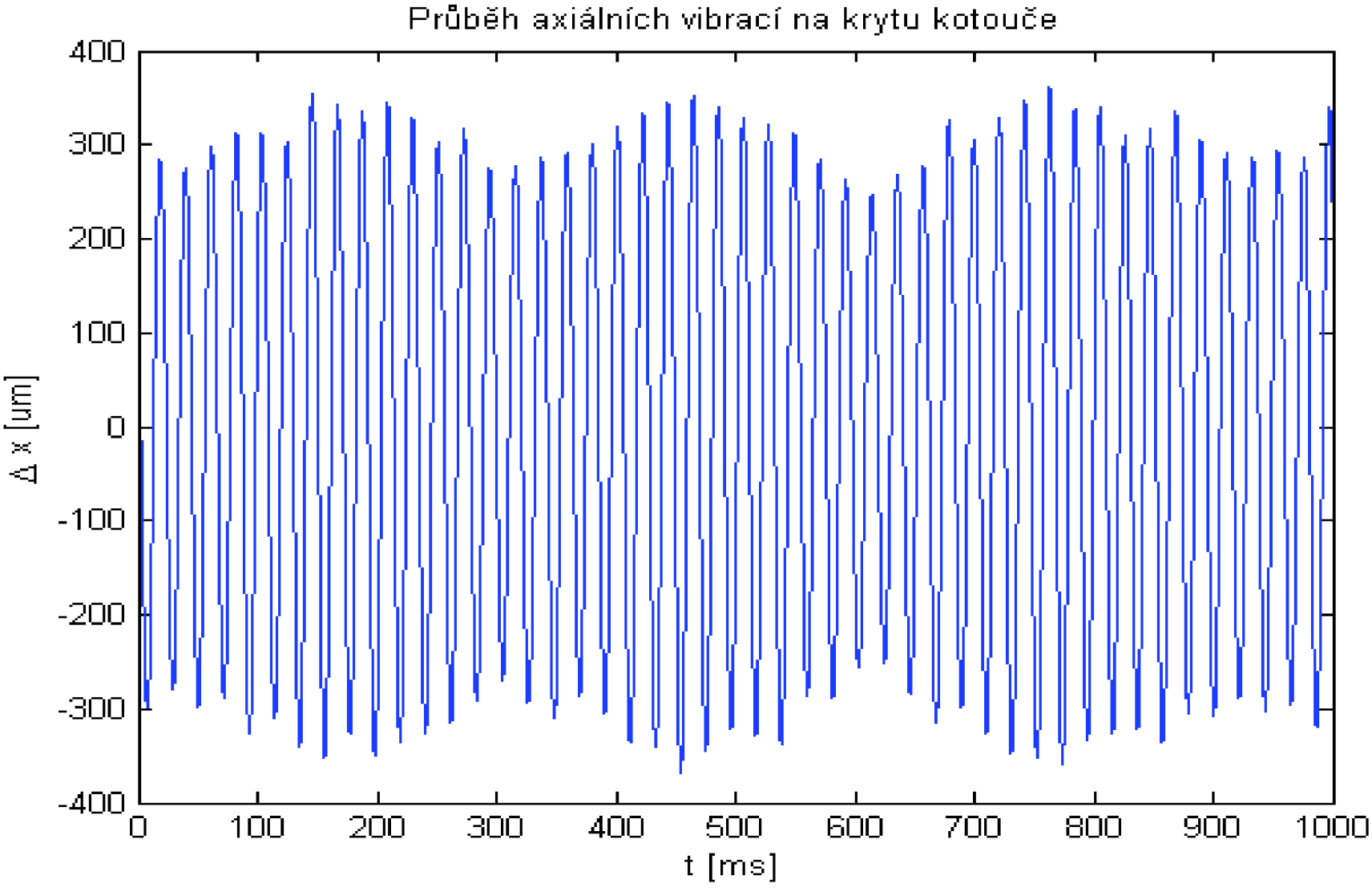
[8] KOZUMPLÍK, M. Problematika revize kluzného kontaktu elektrických strojů, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 49 s. Vedoucí bakalářské práce Doc. Ing. František Veselka, CSc..

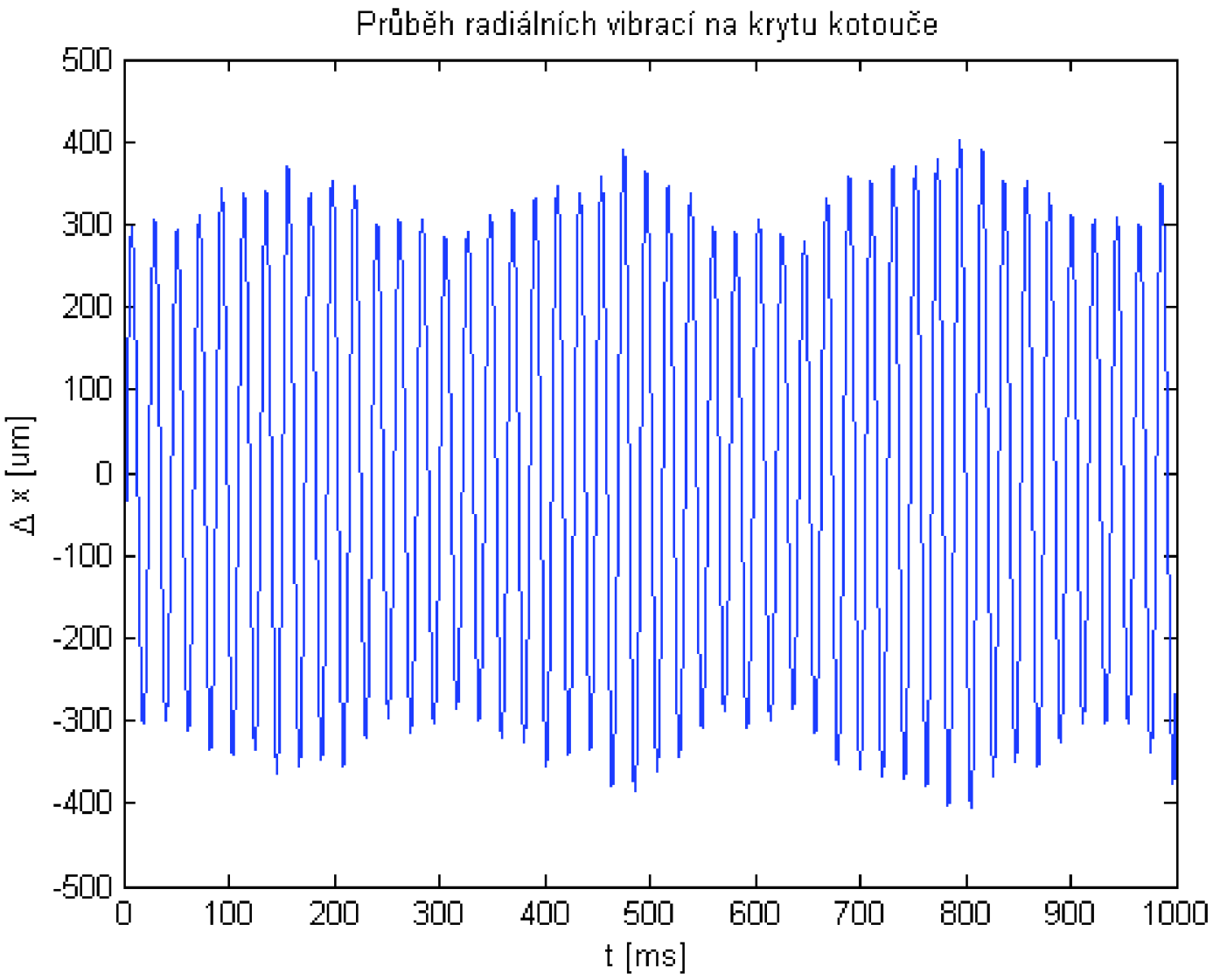
[9] MIŠINGER, L. Zlepšování provozních vlastností kluzného kontaktu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 70 s. Vedoucí diplomové práce Doc. Ing. František Veselka, CSc..

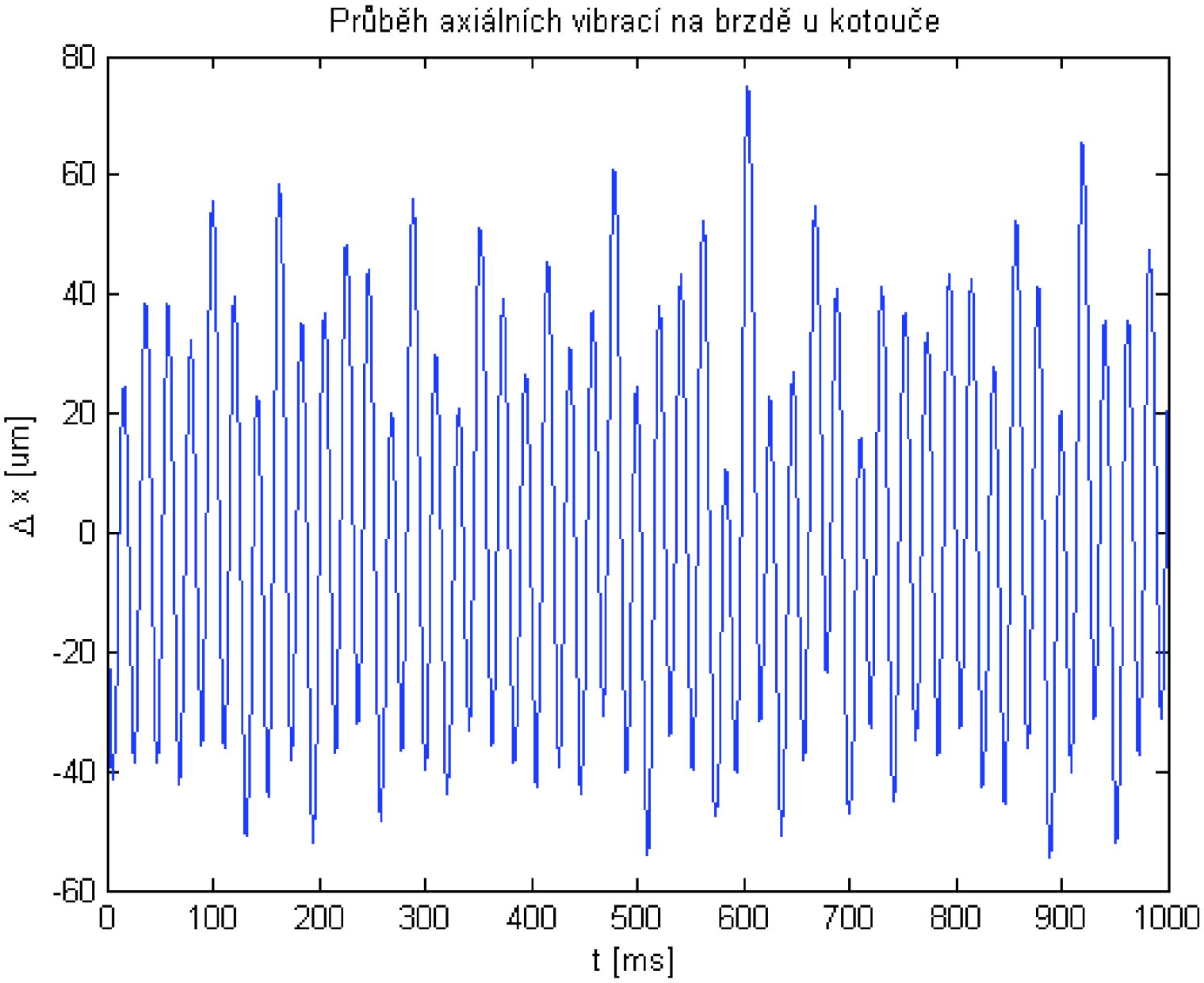
[10] ŘÍČKA, Jaroslav a Vladimír BULLA. *Základy strojírenské technologie obrábění: Určeno pro posl. fak. strojní*. Vyd. 1. Brno: Ediční středisko VUT, 1989, 31 s. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 80-214-1042-6.

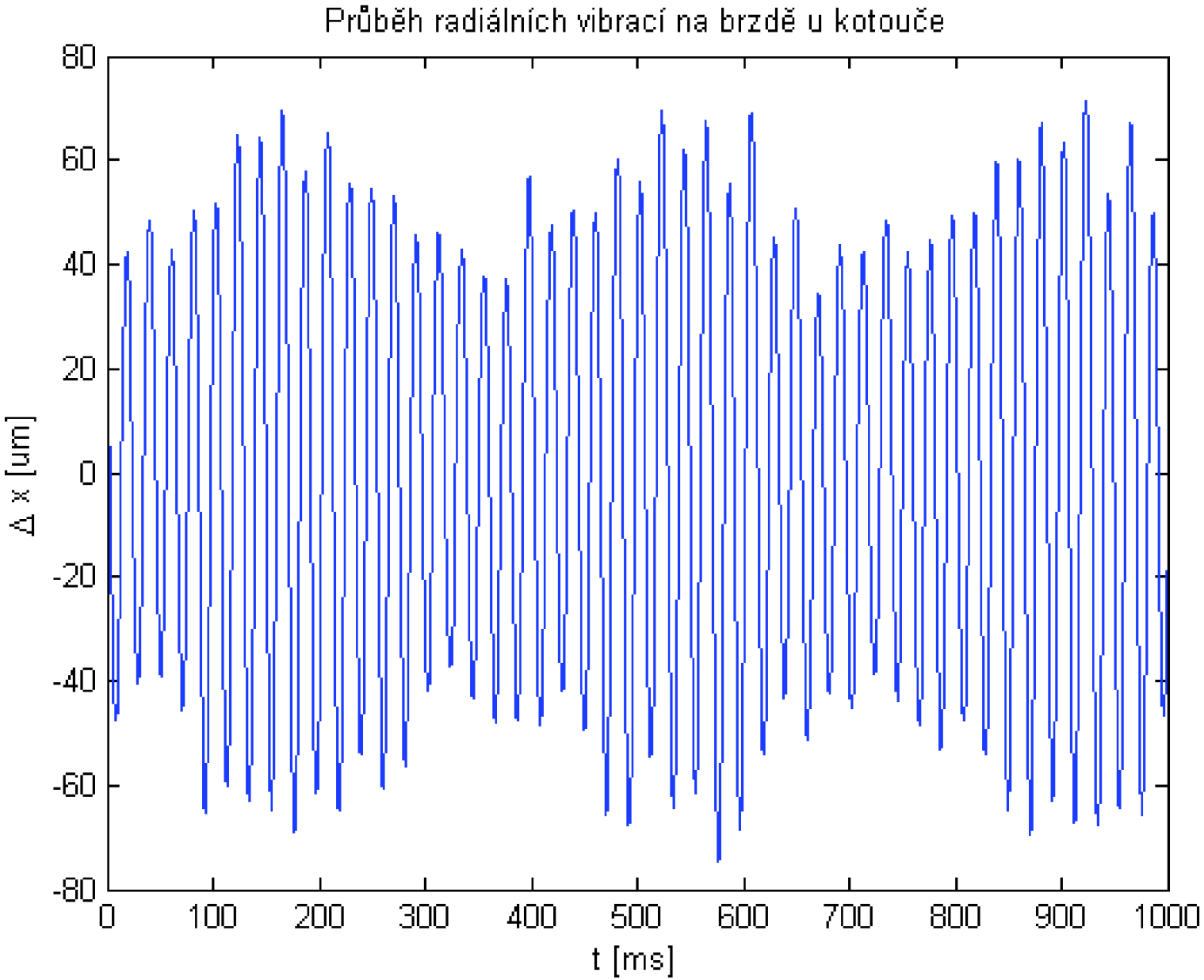
[11] VESELKA, F.: Poskytnuté podkladové materiály, Brno 2014

7 Přílohy:měření vibrací




Průběh radiálních vibrací na krytu kotouče
500
400
300
200
100
0
-100
-200
-300
-400
-500
Δ x [um]
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
t [ms]


Průběh axiálních vibrací na brzdě u kotouče
80
60
40
20
0
-20
-40
-60
Δ x [um]
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
t [ms]


Průběh radiálních vibrací na brzdě u kotouče
80
60
40
20
0
-20
-40
-60
-80
Δ x [um]
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
t [ms]