



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

DEGRADACE IZOLAČNÍCH MATERIÁLŮ VLIVEM CIZÍCH ČÁSTIC

DEGRADATION OF INSULATING MATERIALS DUE TO FOREIGN PARTICLES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jiří Hoferek

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. Jiří Hoferek

ID: 164732

Ročník: 2

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Degradace izolačních materiálů vlivem cizích částic

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Analyzujte pracovní podmínky el. strojů s kluzným kontaktem.
2. Charakterizujte a popište cizí částice.
3. Vysvětlete, proč dochází k degradaci izolačního materiálu vlivem cizích částic.
4. Analyzujte působení různých materiálů.
5. Zpracujte ekonomické vyhodnocení vybrané aplikace a doporučení pro průmyslovou praxi. .

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Kocman, V.: Fyzika a technologie elektrotechnických materiálů - Izolanty B, 1972
- [2] Dunovský, J.: Speciální technologie. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 1991.
- [3] Štupl, K., Košťál, A.: Technologie zpracování kovových materiálů. . Praha: České vysoké učení technické v Praze, 1990.
- [4] Minařík, V.: Tepelné dělení materiálů. Praha ,Vydavatelství ČVUT, 1993. ISBN 80-01-01028-7.
- [5] Mykiska, A.: Spolehlivost v systémech jakosti. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1995. ISBN 80-01-01262-X.
- [6] Chmelík, K., Veselka, F.: Kluzný kontakt v elektrických strojích. Ostrava: KEY Publishing, 2007. ISBN 978-80-87071-59-5.

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

Práce je věnována vlivu prachových částic na chod točivých strojů s kluzným kontaktem. V práci jsou popsány a charakterizovány prachové částice z prostředí vybraných strojů. Je zkoumán jejich vliv na chod kluzného kontaktu a vliv na izolační systém těchto strojů.

Klíčová slova

prachová částice, kluzný kontakt, izolace

Abstract

The work is devoted to the influence of dust particles on the operation of rotating machines with sliding contact. In the work are described and characterized dust particles from environment of selected machines. Their influence on sliding contact and influence on the insulation system of these machines is investigated.

Keywords

dust particles, sliding contact, insulation

Bibliografická citace:

HOFEREK, J. *Degradace izolačních materiálů vlivem cizích částic*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 71 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. František Veselka, CSc.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou závěrečnou práci na téma Degradace izolačních materiálů vlivem cizích částic 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 závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné 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 části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne **21. května 2018**

.....
podpis autora

Poděkování

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

Děkuji rodině za finanční a morální podporu během celé doby studia.

V Brně dne **21. května 2018**

.....

podpis autora

Obsah

1	Úvod	1
2	Kluzný kontakt.....	2
2.1	Kartáče	2
2.2	Držáky kartáčů	5
2.3	Komutátor	6
2.4	Sběrací kroužky	7
2.5	Měření parametrů použité hřídele a komutátoru	8
2.5.1	Měření ovality na spojeném tělese.....	8
2.5.2	Vyhodnocení mechanického stavu hřídele	11
2.5.3	Měření vystupování jednotlivých lamel	12
2.5.4	Vyhodnocení mechanického stavu povrchu komutátoru	14
3	Analýza prachových částic	15
3.1	Prachové částice z prostředí asynchronního stroje	15
3.2	Vliv prachových částic na provoz asynchronního stroje	17
3.3	Prachové částice z prostředí stejnosměrného stroje	18
3.4	Vliv prachových částic na provoz stejnosměrného stroje	20
3.5	Prachové částice z prostředí střídavého komutátorového stroje	20
3.6	Vliv prachových částic na provoz střídavého komutátorového stroje	24
4	Vyhodnocení vlivu prachových částic na kluzný kontakt.....	25
4.1	Vyhodnocení přítláčné síly kartáčů	25
4.1.1	Posouzení kvality sběracího ústrojí stroje s využitím vyhodnocení přítláčných sil v kartáčových držácích	30
4.2	Vliv proudového zatížení na chod kluzného kontaktu.....	33
4.2.1	Paralelní spolupráce kartáčů.....	34
4.2.2	Vyhodnocení proudového zatížení kartáčů	35
4.2.3	Posouzení kvality sběracího ústrojí stroje s využitím vyhodnocení proudového zatížení.....	37
5	Vliv prachových částic na přechodový odpor kluzného kontaktu.....	40
5.1	Výpočet přechodového odporu.....	42
6	Izolační materiály	47
6.1	Slída	47
6.1.1	Vlastnosti.....	47
6.1.2	Komutátorový mikanit.....	48
6.1.3	Prokládací mikanit	48
6.1.4	Mikanit k ražení.....	48
6.1.5	Ohebný mikanit	48
6.1.6	Formovací mikanit.....	49

6.1.7	Mikafólium.....	49
6.1.8	Slídová páska	49
6.2	Sklo	49
6.2.1	Vlastnosti.....	50
6.2.2	Skleněná vlákna	50
6.3	Epoxydová pryskyřice	51
6.2.1	Vlastnosti.....	51
6.2.1	Použití.....	51
6.4	Silikonové pryskyřice	51
6.2.1	Vlastnosti.....	52
6.2.1	Použití.....	52
7	Izolační systémy a jejich degradace	53
8.1	Požadavky na izolační systém	53
8.2	Stárnutí izolace	54
8.3	Namáhání vnějšími vlivy.....	54
8.4	Tepelné namáhání	58
8.5	Elektrické namáhání.....	60
8	Omezení vlivu prachových částic	64
8.1	Inovované kartáče s teflonem.....	65
8.1.1	Způsob ovlivněný chodu kluzného kontaktu	65
8.1.2	Praktický přínos inovovaných kartáčů s teflonem.....	66
8.2	Inovované držáky kartáčů s teflonem	67
8.2.1	Praktický přínos inovovaných kartáčů s teflonem.....	67
8.3	Výhody užití inovovaných kartáčů „sT“ a držáků kartáčů „sT“	67
8.4	Vyhodnocení ekonomického výsledku při použití inovovaných kartáčů a držáků kartáčů.....	68
9	Závěr	70

Seznam obrázků

Obr. 2.1 Kartáče určené pro použití v tandemovém držáku	3
Obr. 2.2 Radiální tandemový držák kartáčů	6
Obr. 2.3 Komutátor stejnosměrného motoru.....	7
Obr. 2.4 Kroužky asynchronního motoru s kroužkovou kotvou	8
Obr. 2.5 Základní sestava pro měření ovality hřídele	9
Obr. 2.6 Rozměry měřené hřídele.....	9
Obr. 2.7 Upřesnění polohy měřených drah	10
Obr. 2.8 Graf relativní výchyly v závislosti na úhlu natočení hřídele	11
Obr. 2.9 Znáznornění měřicí sestavy po měření vystupování jednotlivých lamel komutátoru.....	12
Obr. 2.10 Graf průběhu vystupování jednotlivých lamel ve středu kluzného kontaktu.....	14
Obr. 2.11 Graf průběhu vystupování jednotlivých lamel na okraji kluzného kontaktu.....	14
Obr. 3.1 Uhlíkový prach	15
Obr. 3.2 Detail uhlíkového prachu.....	16
Obr. 3.3 Prach zpracovávané horniny.....	16
Obr. 3.4 Detail prachových částic zpracovávané horniny	17
Obr. 3.5 Prachové částice z prostoru sběracího ústrojí.....	18
Obr. 3.6 Detail prachových částic z prostoru sběracího ústrojí	19
Obr. 3.7 Detail kulových prachových částic z prostoru sběracího ústrojí.....	19
Obr. 3.8 Prachové částice vznikající při použití kotouče CUBITRON II.....	21
Obr. 3.9 Prvková analýza prachových částic vzniklých při použití kotouče CUBITRON II.....	21
Obr. 3.10 Prachové částice vznikající při použití kotouče CUBITRON	22
Obr. 3.11 Prvková analýza prachových částic vzniklých při použití kotouče CUBITRON	22
Obr. 3.12 Prachové částice vznikající při použití kotouče WSM.....	23
Obr. 3.13 Prvková analýza prachových částic vzniklých při použití kotouče WSM	23
Obr. 4.1 Závislost elektrických a mechanických ztrát v kluzném kontaktu na přítlačné síle.....	26
Obr. 4.2 Schématické zobrazení rozložení roubíků na stroji v radiálním směru	26
Obr. 4.3 Tandemový držák kartáčů typu RD	27
Obr. 4.4 Schématické zobrazení jednotlivých drah akrtáčů	28
Obr. 4.5 Grafické znázornění průměrných přítlačných sil v jednotlivých drahách.	30
Obr. 4.6 Grafické znázornění průměrné přítlačné síly na jednotlivých roubících... ..	31
Obr. 4.7 Grafické znázornění rozložení maximální a minimální přítlačné síly	32

Obr. 4.8 Vliv proudového zatížení na třecí poměry v kluzném kontaktu.....	33
Tab. 4.9 Grafické znázornění maximálního a minimálního proudového zatížení kartáčů na jednotlivých roubících	38
Tab. 4.10 Grafické znázornění průměrného proudového zatížení kartáčů na jednotlivých roubících.....	38
Obr. 5.1 Rotor střídavého komutátorového motoru úhlové brusky	42
Obr. 5.2 Kartáče značky NAREX	42
Obr. 7.1 Zobrazení pukliny a trhliny ve struktuře izolačního materiálu	55
Obr. 7.2 Vývojový diagram dopadu vnějších vlivů na izolační systém.....	56
Obr. 7.3 Závislost odporu na době působení agresivních atmosfér	57
Obr. 7.4 Závislost ztrátového činitele na době působení agresivních atmosfér	58
Obr. 7.5 Závislost elektrické pevnosti na době působení agresivních atmosfér	58
Obr. 7.6 Vývojový diagram dopadu tepelného namáhání na izolační systém	60
Obr. 7.7 Vývojový diagram dopadu elektrického namáhání na izolační systém ...	63
Obr. 8.1 Schématické znázornění aplikace teflonu do a) tělesa kartáče, b) na stěnu kartáče	65

Seznam tabulek

Tab. 2.1 Parametry některých druhů kartáčů.....	5
Tab. 2.2 Hodnoty relativní výchylky v závislosti na natočení hřídele	10
Tab. 2.3 Hodnoty vystupování jednotlivých lamel komutátoru.....	13
Tab. 4.1 Rozměry tandemového držáku kartáčů.....	27
Tab. 4.2 Naměřené hodnoty přítláčných sil	28
Tab. 4.3 Rozdíly přítláčných sil oproti střední hodnotě.....	29
Tab. 4.4 Procentuální rozdíly přítláčných sil oproti střední hodnotě.....	29
Tab. 4.5 Zpracované hodnoty přítláčných sil na jednotlivých roubících.....	31
Tab. 4.6 Hodnoty proudového zatížení jednotlivých kartáčů.....	29
Tab. 4.7 Rozdíly proudového zatížení jednotlivých kartáčů	36
Tab. 4.8 Procentuální rozdíly proudového zatížení oproti střední hodnotě	37
Tab. 5.1 Nárůst přechodového odporu v závislosti na velikosti částice	44
Tab. 5.2 Nárůst přechodového odporu v závislosti na velikosti částice	45

1 ÚVOD

Elektrické točivé stroje pracují v různých podmínkách, jsou vystaveny působení různých vnějších vlivů. Jedním z vnějších vlivů, především v průmyslu, jsou cizí prachové částice. Jedná se o drobné částičky materiálu, které se uvolňují do okolní atmosféry při zpracování a dělení různých materiálu. Tyto částice se dostávají do oběhu chladicího média a působí negativně na chod stroje. Způsobují snížení izolačního stavu stroje a přispívají k degradaci jeho izolačního systému.

Řada těchto strojů využívá ke své činnosti kluzný kontakt kartáč -komutátor nebo kartáč – kroužek. Cizí prachové částice při vniknutí do pracovního prostoru kluzného kontaktu působí negativně na jeho činnost a tím ovlivňují chod celého stroje.

Práce se zabývá charakterem prachových částic, vznikajících při zpracování různých materiálů v průmyslu a při provozu strojů s kluzným kontaktem, a jejich následným vlivem na chod stroje, konkrétně na činnost kluzného kontaktu a vlivu na izolační systém těchto strojů.

2 KLUZNÝ KONTAKT

Slouží k přenosu elektrické energie mezi rotorem a statorem vybraných strojů. Skládá se ze dvou základních prvků:

- kartáčů, držáků kartáčů,
- komutátoru nebo kroužku. [1].

Z hlediska struktury jsou tedy možné dvě provedení kluzného kontaktu, a to kartáč-komutátor nebo kartáč-kroužek. Dále lze tyto kombinace rozdělit na základě toho, zda se přenáší střídavý nebo stejnosměrný proud. Obě uvedené skupiny se významně liší z hlediska mechanického i elektrického. [1].

Z hlediska mechanického je zásadní rozdíl v tom, že komutátor se skládá z lamel a jeho kluzná plocha ve směru otáčení je tedy přerušovaná, má drážky. Kartáč se ke komutátoru umísťuje tak, aby jeho kratší strana byla rovnoběžná se směrem jeho otáčení. Naproti tomu kroužek má ve směru otáčení kluznou plochu celistvou a kartáče se umísťují svou delší hranou ve směru jeho otáčení. [1].

Z hlediska elektrického se kluzný kontakt kartáč-kroužek liší od kluzného kontaktu kartáč-komutátor tím, že pouze zajišťuje vodivé spojení mezi rotující a statickou částí stroje. Naproti tomu kluzný kontakt kartáč-komutátor zajišťuje také vodivé spojení mezi lamelami komutátoru, ke kterým jsou připojeny komutující cívky, a zajišťuje vyvážení rozdílu vzniklého mezi kompenzačním a reaktančním napětím během komutace v cívce. [1].

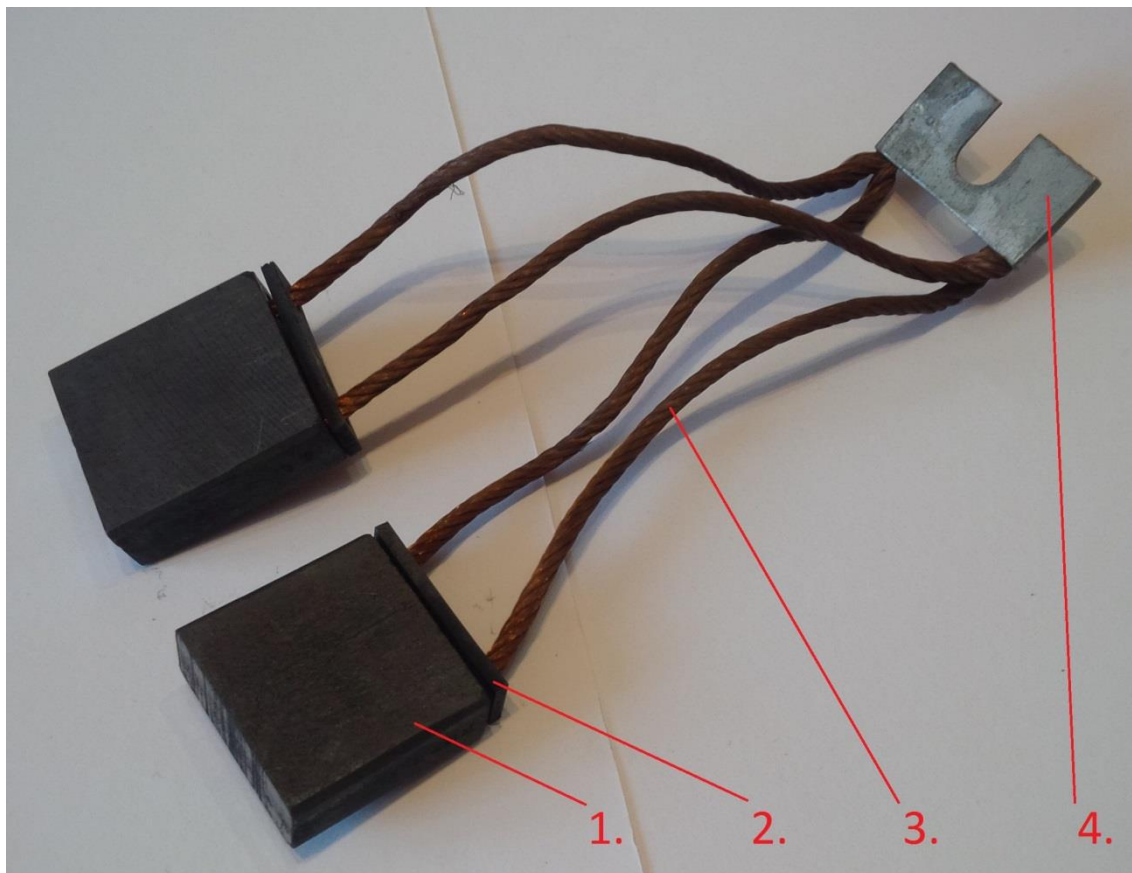
V následujících podkapitolách jsou specifikovány základní části kluzného kontaktu, sběracího ústrojí a vyhodnocení praktického měření povrchového stavu hřídele a komutátoru.

2.1 Kartáče

Kartáče umožňují vedení proudu z netočivé části stroje na rotující komutátor nebo kroužky, během komutačního děje realizují zkratování cívek a kompenzují rozdíl reaktančního a komutačního napětí. [1].

Jednotlivé typy kartáčů se liší svým geometrickým rozměrem a tvarem, počtem částí a vrstev, z kterých se kartáč skládá, způsobem úpravy hlavy, počtem a rozměry přívodních lanek, provedením kabelového oka a přídatnými prvky. Jmenovité rozměry kartáčů vychází z řady, kterou stanovuje norma ČSN 35 0821. Tato řada se skládá z hodnot 1,6; 2,0; 2,5; 3,2; 4,0; 5,0; 6,3; 8,0; 10,0; 12,5 a dále násobků deseti. Jmenovité rozměry se udávají jako násobky v pořadí šířka – tangenciální velikost, délka – axiální velikost a výška – radiální velikost kartáče. Kartáče určené pro tandemový držák kartáčů jsou zobrazeny na obrázku 2.1.

Legenda: 1. – kartáč, 2. - přítlačná podložka, 3. – lanko, 4. – praporcové očko. [1], [20].



Obr. 2.1 Kartáče určené pro použití v tandemovém držáku

Kartáče jsou vyráběny lisováním grafitu s dalšími příměsí jako keramické výrobky. Jako základní materiál je grafit využíván díky svým dobrým elektrickým, chemickým i termickým vlastnostem. Grafit má malý elektrický odpor, nízký činitel tření, vysoký bod tání, se změnou teploty téměř nemění svůj tvar a má výbornou mechanickou pevnost i při teplotách blížících se k 2000 °C. [1].

Rozhodující vlastnosti grafitových kartáčů jsou:

- Měrný elektrický odpor

Na základě velikosti měrného elektrického odporu kartáče lze stanovit kvalitu použitých materiálů při jeho výrobě. Jeho hodnota se mění na základě množství příměsí, struktury kartáče a postupů použitých při jeho výrobě. Grafitové kartáče jsou typické pro svou větší hodnotu odporu ve směru lisování, oproti směru kolmém na směr lisování. To je způsobeno anizotropním charakterem grafitových částic. Hodnoty odporu se můžou lišit až patnáctinásobně. Této vlastnosti ovšem lze využít ke zlepšení komutační schopnosti kartáče. Pokud je kartáč vyroben s větším odporem ve směru kolmém na komutátor, bude bránit průchodu příčných proudů, které jím protékají při komutaci. [1].

- Přechodový úbytek napětí

Ve většině případů výrobce uvádí voltampérovou charakteristiku udávající závislost přechodového úbytku napětí na proudovém zatížení při určité obvodové rychlosti a určité přitlačné síle na kartáč. [1].

Její průběh závisí především na kvalitě materiálů použitých při výrobě kartáče. Velikost úbytku napětí ovšem ovlivňuje i řada dalších veličin, například teplota v kluzném kontaktu, u stejnosměrného proudu jeho směr a také atmosférické podmínky. [1].

- Součinitel tření

Jeho velikost závisí na řadě veličin. To je způsobeno charakterem tření v kluzném kontaktu, který je ovlivněný proudem procházejícím přes kluzné plochy. To vede ke vzniku mazacího filmu, jehož vlastnosti a struktura závisí na velikosti proudového zatížení, teplotě, vlhkosti okolního vzduchu, obvodové rychlosti a materiálu kartáčů. [1].

Výrobce stanovuje hodnotu součinitele tření při konkrétní obvodové rychlosti komutátoru, jmenovitém proudovém zatížení kartáče a konkrétní přitlačné síle na kartáč. [1].

- Tvrdost

Určuje se pomocí metody, kombinující způsob měření podle Brinella a Rockwella. Jde pouze o informativní veličinu, sloužící pro výběr správné jakosti náhradních kartáčů. [1].

- Dovolené proudové zatížení

Má zásadní vliv na opotřebení kartáčů. Protože stroje jen zřídka pracují s konstantním proudovým zatížením, sehrává při výběru vhodného typu kartáčů zásadní roli způsob proudového zatížení daného stroje. Z hlediska dobré funkce kluzného kontaktu je nutné zajistit, aby proudové zatížení dosahovalo při provozu stroje alespoň jmenovité hodnoty. [1].

- Dovolená obvodová rychlost

Udává maximální obvodovou rychlost komutátoru, při které je zajištěna bezpečná funkce kartáčů. Je omezena z důvodu nedokonalé okrouhlosti komutátoru nebo kroužku, které by při vysokých rychlostech vedly k poruše kluzného kontaktu. [1].

- Mechanická pevnost

Je ovlivněna přitlačnou silou na kartáče a celkovým stavem povrchu rotační části. Kartáč musí být schopen sledovat celou svou pracovní plochou obvodovou dráhu kroužku nebo komutátoru. [1].

- Komutační schopnost

Je to schopnost kartáčů zajistit komutaci proudu bez jiskření, tedy schopnost vyrovnat rozdíly napětí vznikající v komutující cívce. Tato vlastnost je značně ovlivněna velikostí přechodového odporu a strukturou kartáčů. Kartáče s vysokou komutační schopností mají i vysoké opotřebení, nejsou však vhodné pro aplikaci s nízkým proudovým zatížením nebo pro aplikaci zahrnující chod naprázdno, neboť opotřebení kartáče pro vznik uhlíkové složky patiny je nedostatečné a má špatné komutační schopnosti. [1].

Základní provozní parametry vybraných grafitových kartáčů jsou uvedeny v tabulce 2.1.

Tab. 2.1 Parametry některých druhů kartáčů (převzaté z [1].)

Materiál	ρ [$\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$]	σ [$\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$]	v [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]
Uhlografity	25,00 - 60,00	6 - 8	10 - 25
Grafity	10,00 - 35,00	7 - 11	30 - 70
Elektrografity	15,00 - 70,00	10 - 12	30 - 50
Kovografity	0,05 - 10,00	12 - 25	20 - 30

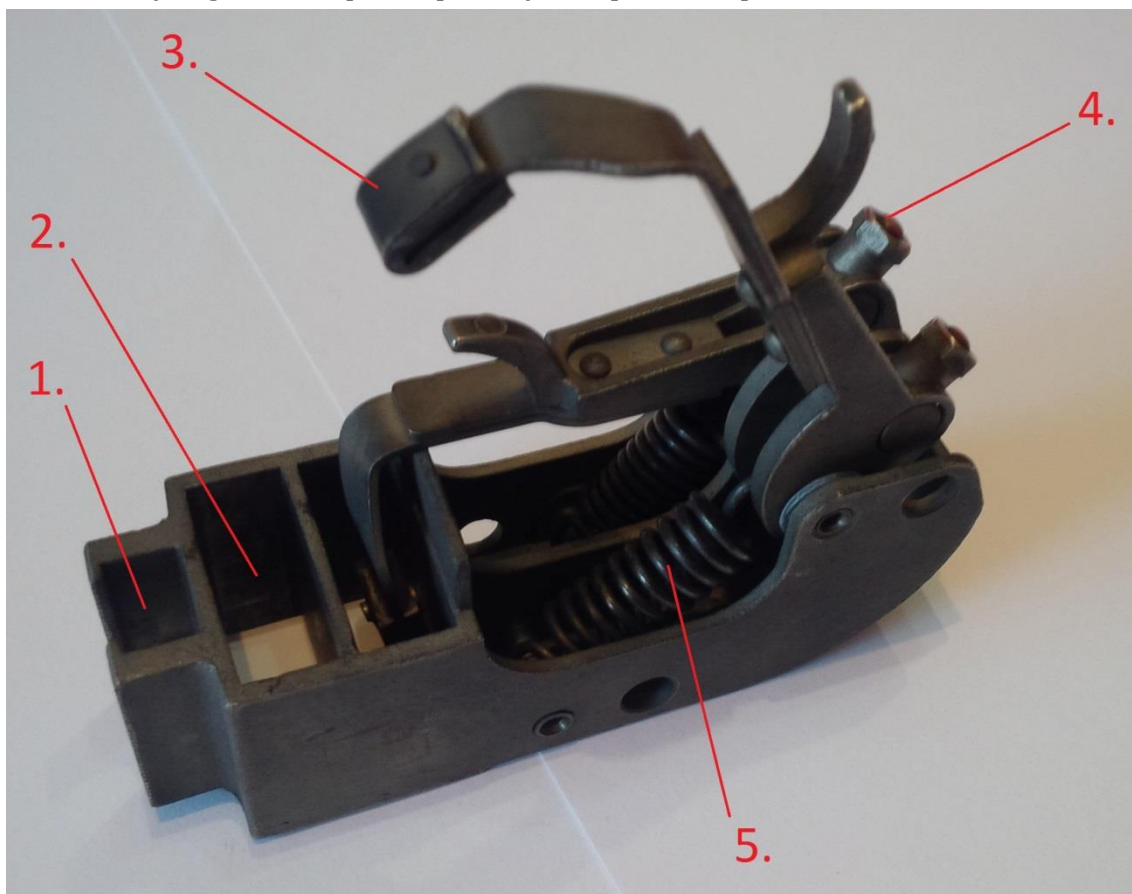
2.2 Držáky kartáčů

Jsou klíčovou součástí sběracího ústrojí. Slouží k držení a vedení kartáče v jeho dráze a zprostředkovávají kontakt mezi kartáčem a komutátorem, nebo kroužkem. Dělí se podle uložení kartáče v držáku, konstrukce, polohy krabičky vzhledem k povrchu komutátoru, nebo kroužku, způsobu použití a provedení. Obecně je funkcí držáků:

- stabilizovat a vést kartáč po jeho dráze,
- působit na kartáč patřičnou přitlačnou silou a zajistit tak bezpečný kontakt s komutátorem nebo kroužkem,
- působit konstantní silou na stále stejném místě hlavy kartáče i v průběhu jeho opotřebení,
- tlumit vibrace a dovolit kartáči se přizpůsobit povrchovým nerovnostem. [1], [21].

Ve sběracím ústrojí jsou uchyceny svěrkami ke kulatým roubíkům nebo přímo k nosičům držáků. [1].

Na obrázku 2.2 je zobrazen radiální tandemový držák kartáčů. Legenda: 1. – pouzdro k uchycení svěrky, 2. – krabíčka kartáče, 3. – přítlačný palec, 4. – mechanický regulátor napínací pružiny, 5. – přítlačná pružina.



Obr. 2.2 Radiální tandemový držák kartáčů

2.3 Komutátor

Komutátor se skládá ze soustředně uložených a fixovaných lamel. K lamelám jsou buď přímo, nebo pomocí praporků připojeny konce vinutí uloženého v rotoru. Nosná konstrukce, i vzájemně jednotlivé lamely, jsou odizolovány vhodnou izolací. Celkové provedení komutátoru musí zajistit, aby kluzná plocha byla naprosto hladká a souosá s osou rotace rotoru. [1].

Dle způsobu konstrukce lze komutátory rozdělit na:

- Rybinové – jednotlivé lamely jsou utaheny pomocí stahovacích kruhů.
- Zděřové – jednotlivé lamely jsou staženy pomocí kruhových zděří, které jsou izolovaně uloženy na povrchu komutátoru. [1].

Podle výrobního postupu můžeme komutátory rozdělit na:

- Lisované – jednotlivé lamely jsou vlisovány do komutátorové izolace.
- Skládané – jednotlivé lamely jsou prokládány mezilamelovou izolací a od nosné části a stahovacích prvků jsou odděleny izolací věnce. [1].

Komutátory čelí značnému tepelnému i mechanickému namáhání. To se může projevit zhoršením mechanického stavu jeho povrchu a následně i kluzných podmínek. K výrobě lamel pro běžné aplikace se proto používá lamelová měď, a u aplikací s extrémním zatížením slitiny mědi s kadmíem, nebo chromem. Izolace na komutátoru se vyrábí především z mikanitu a remiky. Na obrázku 2.3 je zobrazen komutátor stejnosměrného motoru. [1].



Obr. 2.3 Komutátor stejnosměrného motoru (převzato z [24].)

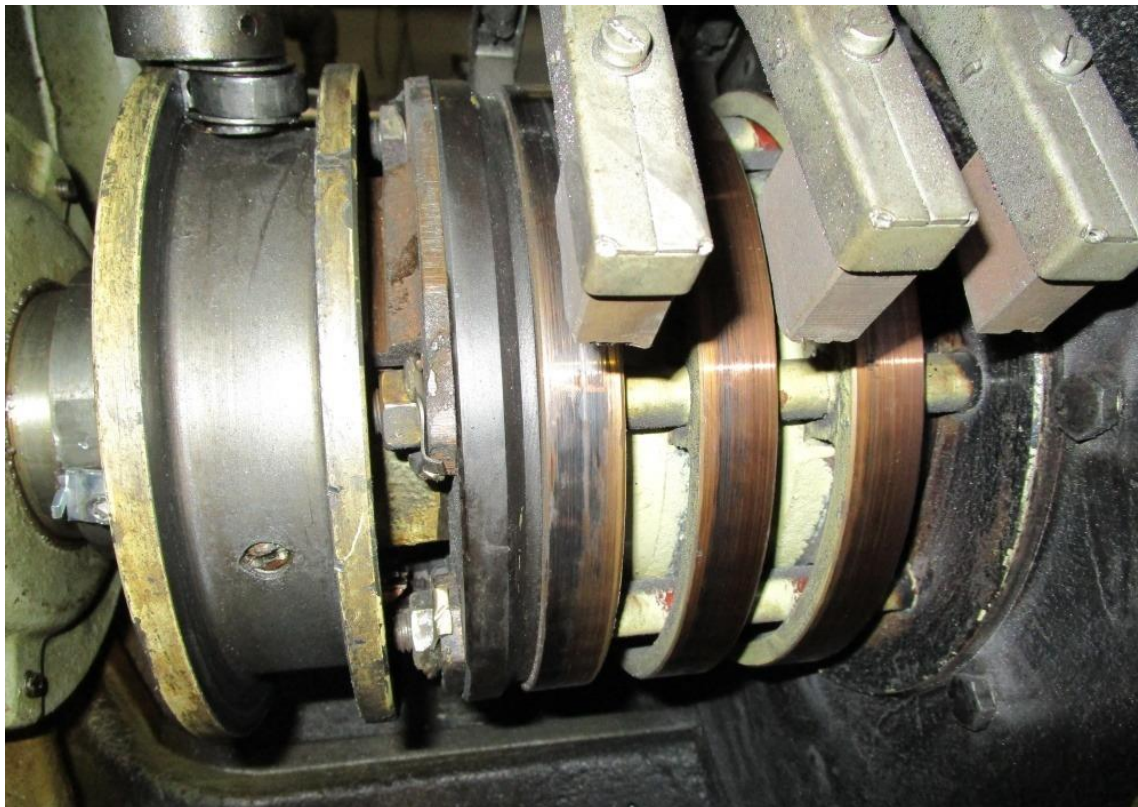
2.4 Sběrací kroužky

Kroužky u strojů s malými výkony bývají zalisovány do umělé pryskyřice. U výkonnějších strojů jsou kroužky připevněny na ocelovém pouzdře, které je od hřídele ještě odděleno izolací. K izolaci jednotlivých kroužků vůči sobě se používá tvrzený papír a tvrzené tkaniny. Provozní vlastnosti kroužků závisí na materiálu a způsobu jejich výroby. [1].

Nejběžnější je užití slitin mědi. Ty se kombinují s bronzovými slitinami a na základě jejich poměru se ovlivňuje výsledná kvalita kroužků. Pro aplikace s vysokými obvodovými rychlostmi, které vyžadují značnou mechanickou pevnost, se používají kroužky z oceli. Hlavní nevýhodou ocelových kroužků je lehká koroze jejich povrchu a značný přechodový odpor. [1].

Nejzásadnější vliv na kvalitu kroužků má způsob odlévání jejich slitiny. Výsledná struktura slitiny musí být stejnorodá, bez nečistot a nevhodných příměsí a bez pórů. Jen tak může být dosaženo vhodných provozních parametrů,

především z hlediska rovnocenného opotřebení kartáčů i kroužků. Na obrázku 2.4 jsou znázorněny kroužky asynchronního motoru s kroužkovou kotvou. [1].



Obr. 2.4 Kroužky asynchronního motoru s kroužkovou kotvou (převzato z [24].)

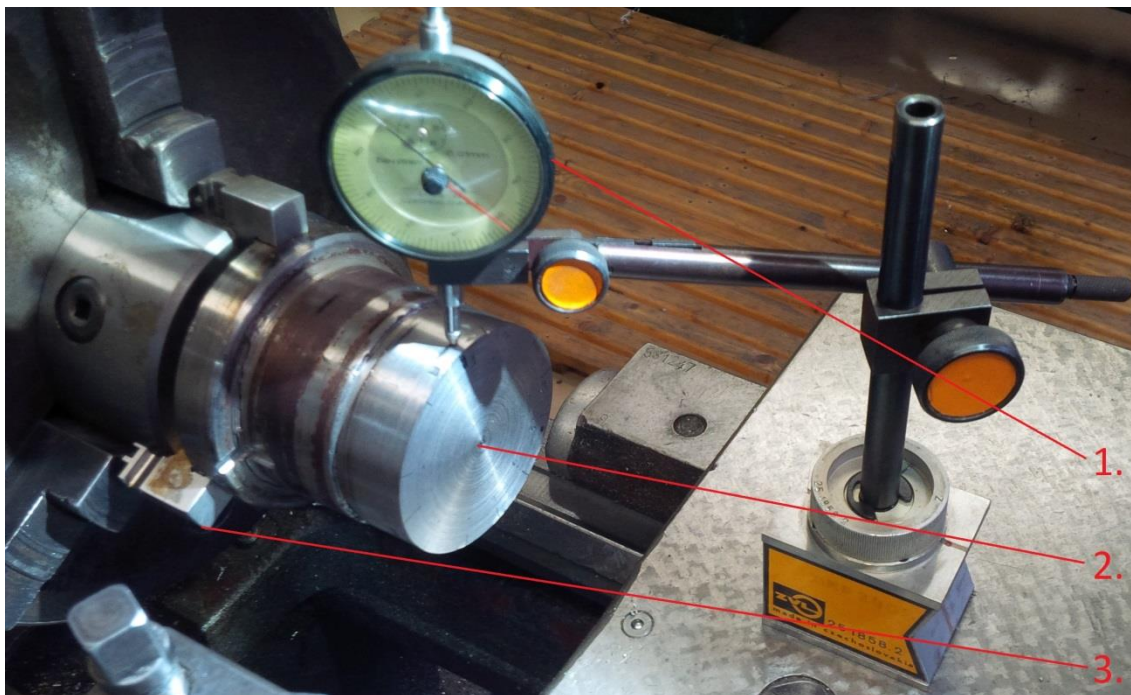
2.5 Měření parametrů použité hřídele a komutátoru

Pro získání základních poznatků a techniky měření bylo provedeno měření ovality na spojitém tělese – modelujícím poruchový stav u stroje, hřídel na obrázku 2.5, a vystupování lamel na komutátoru, komutátor na obrázku 2.9.

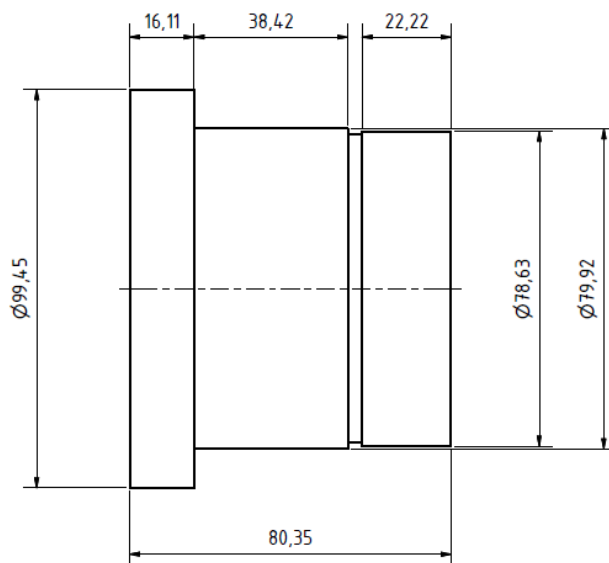
2.5.1 Měření ovality na spojitém tělese

Měření nevyváženosti hřídele bylo provedeno v dílně na FEKT. Měřená hřídel (pozice č. 2 na obrázku 2.5) byla uchycena do sklíčidla soustruhu (pozice č. 3 na obrázku 2.5). Nevyváženost byla měřena mechanickým měřidlem, a to pomocí hrotového úchylkoměru (pozice č. 1 na obrázku 2.5). Ten byl uchycen v pomocném stojanu s magnetickou základnou, která byla umístěna na posuvné kovové základně. Tím byla zajištěna pevná stabilita úchylkoměru po celou dobu měření.

Byla změřena nevyváženost mezi nulovou polohou, tedy nejnižším bodem na hřídeli v radiálním směru, a dalšími jedenácti polohami po obvodu hřídele.

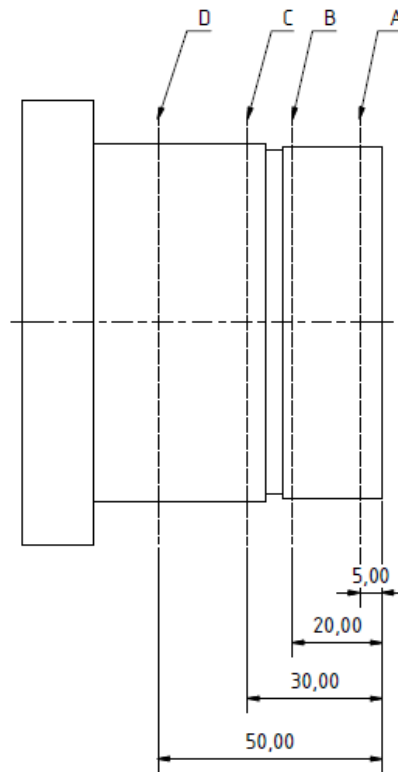


Obr. 2.5 Základní sestava pro měření ovality hřídele



Obr. 2.6 Rozměry měřené hřídele

Na hřídeli byly vytyčeny čtyři dráhy v radiálním směru, označené A, B, C a D. Jejich poloha je zakótovaná na obrázku 2.7. Hřídel se poté otáčela o 30 ° po celém svém obvodu. Takto bylo změřeno dvanáct hodnot pro každou osu. Jako výchozí bod měření byla vybrána poloha s nulovou odchylkou.



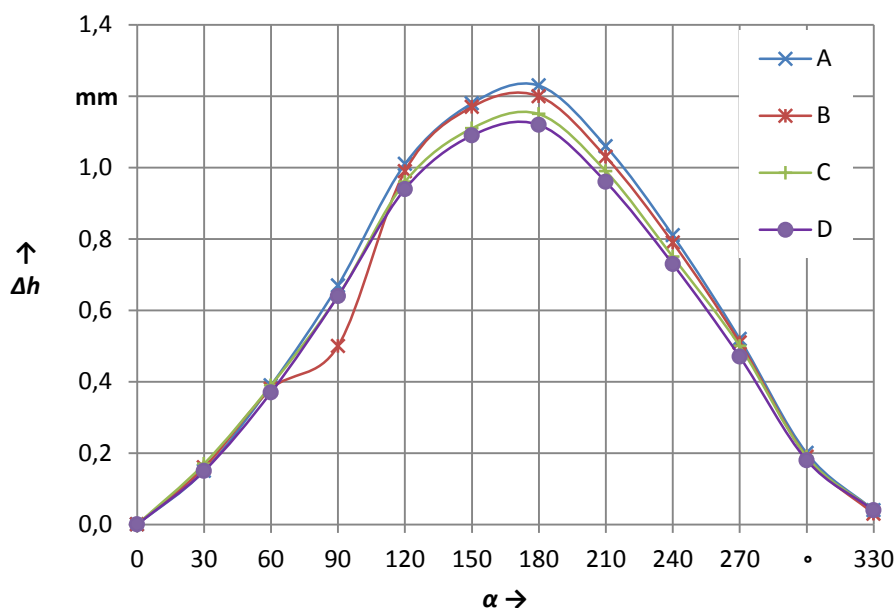
Obr. 2.7 Upřesnění polohy měřených drah

Naměřené hodnoty jsou zaznamenány v tabulce 2.2. Největší ovalitu dosahuje hřídel ve stavu natočení o 180° , kde relativní výchylka dosahuje hodnoty až 1,23 mm.

Tab. 2.2 Hodnoty relativní výchylky v závislosti na natočení hřídele

Δh [mm]	Osa	α [°]											
		0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
A		0	0,15	0,39	0,67	1,01	1,18	1,23	1,06	0,81	0,52	0,20	0,04
B		0	0,16	0,38	0,50	0,99	1,17	1,20	1,03	0,79	0,51	0,19	0,03
C		0	0,17	0,39	0,64	0,96	1,11	1,15	0,99	0,75	0,50	0,19	0,04
D		0	0,15	0,37	0,64	0,94	1,09	1,12	0,96	0,73	0,47	0,18	0,04

Z naměřených hodnot byl sestrojen graf relativní výchylky v závislosti na natočení hřídele, na obrázku 2.8. Na vertikální ose jsou vyneseny hodnoty relativní výchylky Δh , na horizontální ose úhel natočení hřídele α .



Obr. 2.8 Graf relativní výchylky v závislosti na úhlu natočení hřídele

2.5.2 Vyhodnocení mechanického stavu hřídele

Z naměřených hodnot vyplývá, že hřídel je značně neokrouhlá. Tato neokrouhlost se jen nepatrně liší ve směru axiální osy (jednotlivé dráhy A, B, C a D). Největší hodnota relativní výchylky byla naměřena při natočení o 180 ° oproti výchozí poloze, kde dosahovala hodnoty 1,23 mm v dráze A. V případě, že by hřídel byla osazena kroužky a byla použita ve stroji, lze předpokládat, že by její neokrouhlost vedla k následujícím jevům v kluzném kontaktu:

- vibrace a hlucení kartáčů,
- značné mechanické opotřebení kartáčů,
 - srážení hran kartáčů, při vysokých rychlostech jejich ulamování a vytrhávání přívodních lanek
- nerovnoměrné proudové zatížení kartáčů.
 - vlivem vysoké proudové hustoty v kontaktním místě vznik jiskrových a obloukových výbojů,
 - zvýšené elektroerozivní opotřebení komponent kluzného kontaktu,
 - nerovnoměrné rozložení patiny po obvodu kroužků,
 - vznik stínů na povrchu kroužků,
 - zvýšení teploty v kluzném kontaktu. [1], [7].

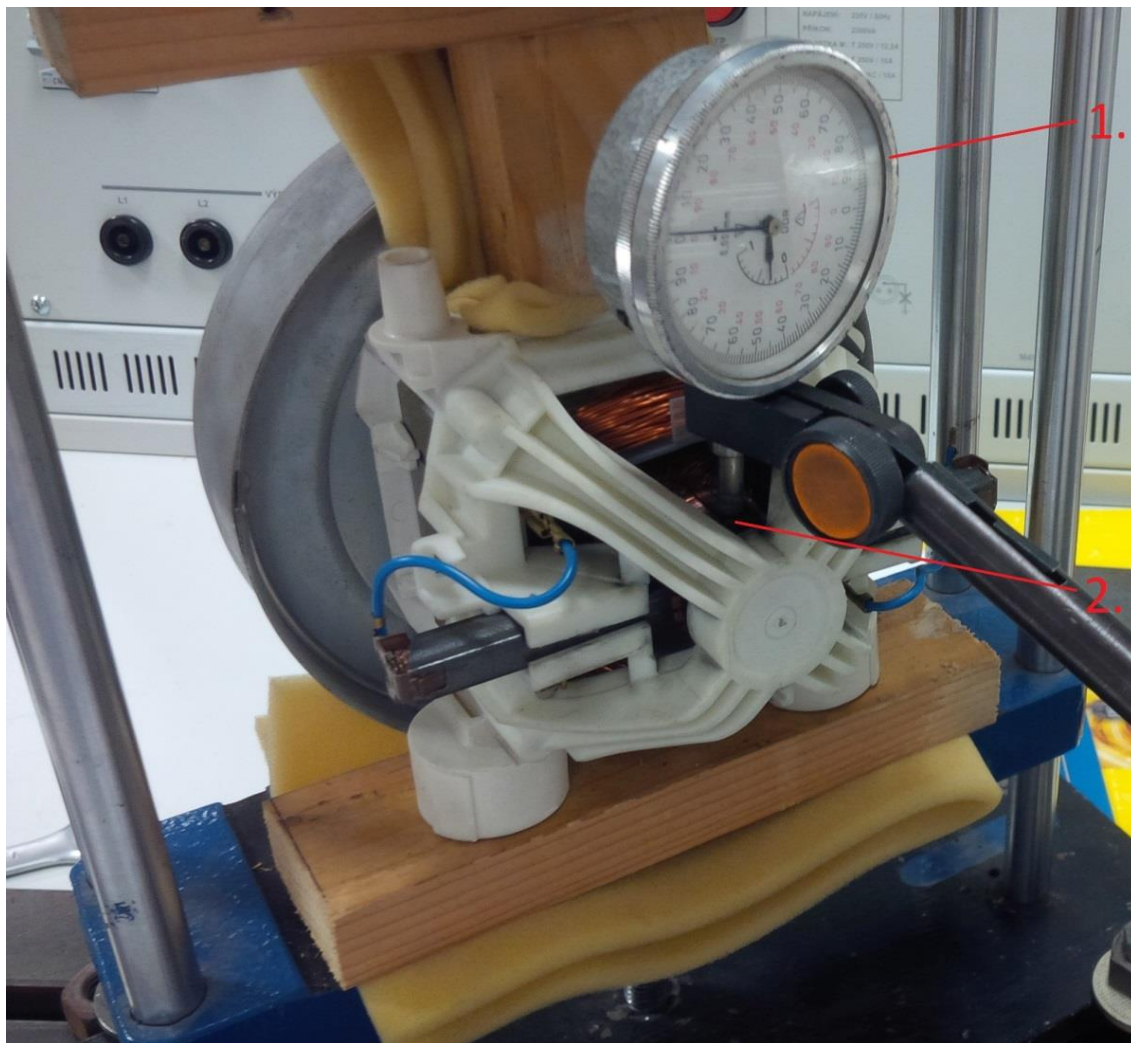
Uvedené vlivy by vedly k rychlé degradaci komponentů kluzného kontaktu, nebo ke vzniku havarijního stavu.

2.5.3 Měření vystupování jednotlivých lamel

Vystupování jednotlivých lamel komutátoru bylo měřeno citlivějším úchylkoměrem (obrázek 2.9, pozice č. 1), neboť úchylkoměr použitý při měření na hřídeli byl nedostačující.

Měření bylo realizováno na komutátoru malého motorku, který byl upevněn ve stojanu pomocí stahovacích tyčí. Celý stojan byl pomocí šroubů připevněn ke kovové pracovní desce, která byla umístěna na laboratorním pultu v laboratoři elektrických strojů. Číslcový úchylkoměr byl uchycen do stojanu s magnetickým podstavcem na pracovní desce, čímž byla zajištěna stabilita úchylkoměru po celou dobu měření.

Měření vystupování lamel na komutátoru proběhlo na dvou místech, ve středu lamel a na vnějším okraji lamel (obrázek 2.9, pozice č. 2). V těchto dvou místech bylo změřeno vystupování jednotlivých lamel při třech pootočení komutátoru. Naměřené výsledky jsou uvedeny v tabulce 2.3.



Obr. 2.9 Znáznornění měřící sestavy pro měření vystupování jednotlivých lamel komutátoru

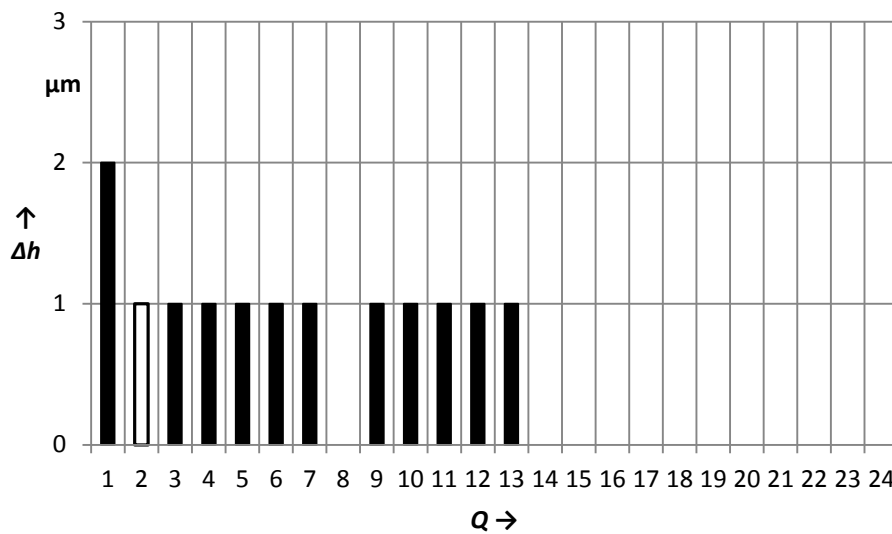
Tab. 2.3 Hodnoty vystupování jednotlivých lamel komutátoru

Q [-]	Δh [μm]					
	Střed lamel			Vnější kraj lamel		
	1. otáčka	2. otáčka	3. otáčka	1. otáčka	2. otáčka	3. otáčka
1)	1	1	1	2	0	1
2)	2	0	1	1	1	1
3)	2	0	1	1	1	0
4)	1	0	0	1	1	0
5)	2	0	0	1	1	0
6)	2	0	0	0	1	0
7)	2	1	1	0	1	0
8)	1	1	1	0	0	0
9)	1	0	1	1	0	1
10)	1	1	2	0	0	1
11)	1	1	1	1	0	1
12)	1	0	0	0	0	1
13)	1	0	0	0	0	1
14)	2	1	0	0	0	0
15)	2	1	0	0	0	0
16)	3	1	0	0	0	0
17)	2	1	0	0	0	0
18)	1	1	0	0	0	0
19)	0	1	0	0	0	0
20)	0	1	0	0	0	0
21)	0	1	0	0	0	0
22)	0	1	0	0	0	0
23)	0	0	0	0	0	0
24)	1	1	0	0	0	0

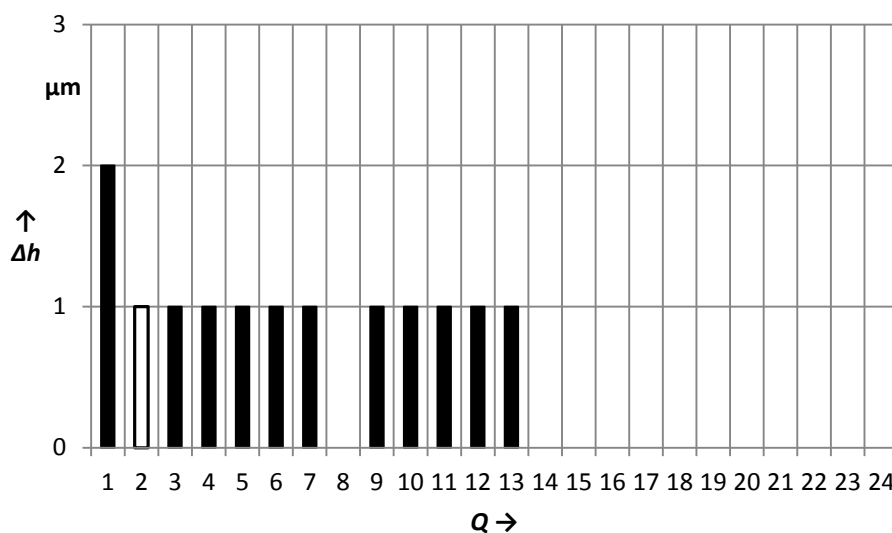
Z naměřených hodnot byly sestrojeny grafy pro každé měřené místo na komutátoru, pro místo ve středu lamel graf na obrázku 2.10, pro místo na kraji lamel graf na obrázku 2.11. V obou grafech jsou zobrazeny úchyly od výchozí lamely, kde Δh je relativní výchylka proti nulové lamely a Q jednotlivé lamely. Bílá barva reprezentuje nejmenší naměřenou hodnotu výchylky, černá nejvyšší hodnotu výchylky. V případě, kde u jednotlivých lamel nejsou sloupky ani jedné barvy, byla naměřená výchylka při všech třech měření nulová. V případě, že se hodnota nejvyšší a nejnižší výchylky shodovala, je vyznačena opět bílou barvou.

Při měření ve středu lamel byla naměřena největší házivost u lamely číslo 16 a zároveň největší vystoupení lamel bylo naměřeno mezi lamelou číslo 16 a 17.

Při měření na kraji lamel byla největší házivost naměřena u lamely číslo 1 a největší vystoupení mezi lamelou číslo 24 a 1.



Obr. 2.10 Graf průběhu vystupování jednotlivých lamel ve středu kluzného kontaktu



Obr. 2.11 Graf průběhu vystupování jednotlivých lamel na okraji kluzného kontaktu

2.5.4 Vyhodnocení mechanického stavu povrchu komutátoru

Dovolená ovalita komutátoru je přibližně 20 μm při rychlosti otáčení komutátoru dosahujících hodnot až 50 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Z naměřených hodnot je patrné, že ovalita se liší nejvíce o 2 μm mezi 16. a 17. lamelou při měření ve středu lamel a o 2 μm mezi 24. a 1. lamelou při měření na kraji lamel. Lze konstatovat, že povrch komutátoru je v dobrém mechanickém stavu. Při použití správného typu kartáčů pro daný způsob zatěžování stroje, by se na komutátoru při provozu stroje neměly projevit poruchové jevy a stroj by měl bez potíží plnit svoji funkci. [1].

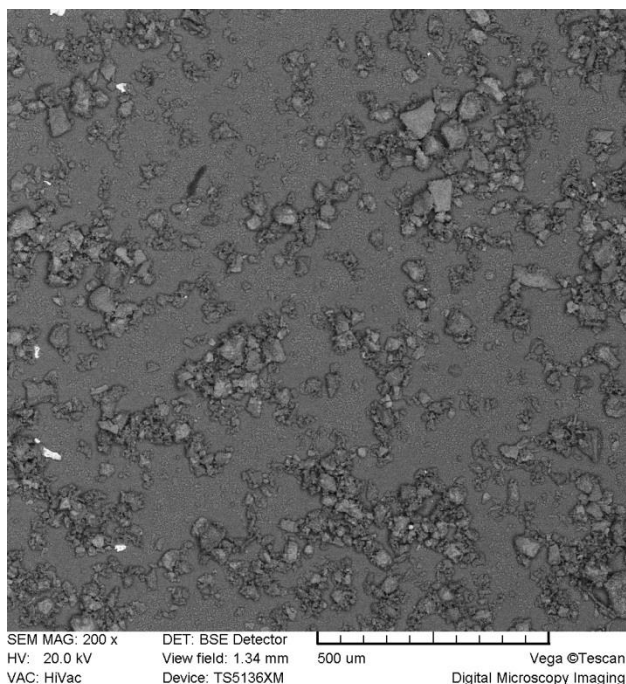
3 ANALÝZA PRACHOVÝCH ČÁSTIC

V normě ČSN 33 2000-3 o stanovení základních charakteristik je definováno prostředí s vlivem prachových částic pod označením AE4, AE5 a AE6, v závislosti na množství prachového spadu. Elektrické stroje pracující v tomto prostředí, musí být vybrány a instalovány v souladu s požadavky uvedenými v této normě. Analýzou prachových částic z okolí stroje, prachových částic vznikajících při provozu kluzného kontaktu a prachových částic vznikajících činnostmi stroje lze získat představu o jejich působení na kluzný kontakt a izolaci těchto strojů. [19].

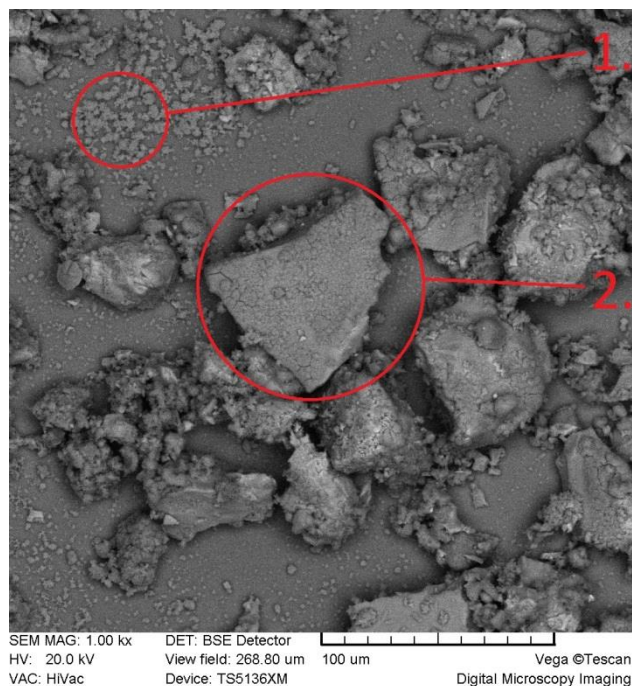
V následujících pasážích budou analyzovány prachové částice získané z pracovního prostředí tří různých strojů. Prvním strojem je asynchronní motor s kroužkovou kotvou, druhým strojem je stejnosměrný motor a třetím strojem je střídavý komutátorový motor. Analýza byla prováděna s využitím elektronového mikroskopu.

3.1 Prachové částice z prostředí asynchronního stroje

Jedná se o asynchronní motor s kroužkovou kotvou, který pohání kulový mlýn. Jeho funkcí je drcení horniny na drobnou drť. Tento stroj pracuje ve značně prašném prostředí. Na následujících snímcích jsou zobrazeny prachové částice získané z prostoru sběracího ústrojí tohoto stroje.

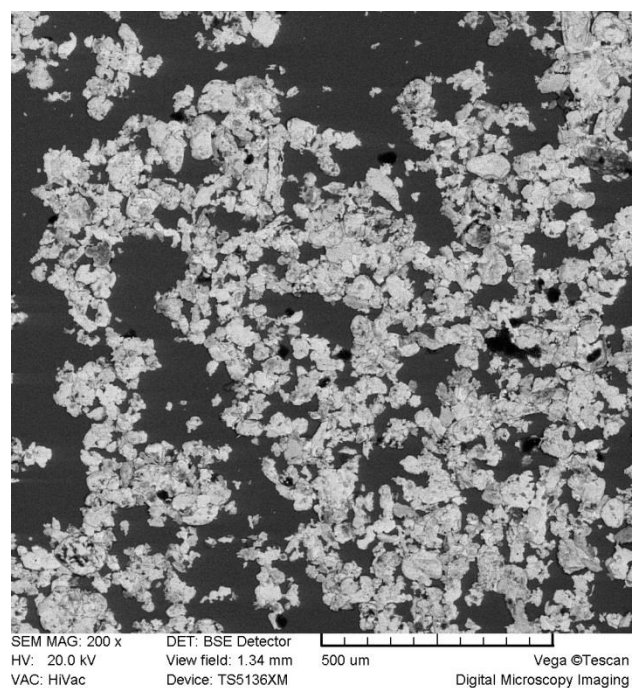


Obr. 3.1 Uhlíkový prach

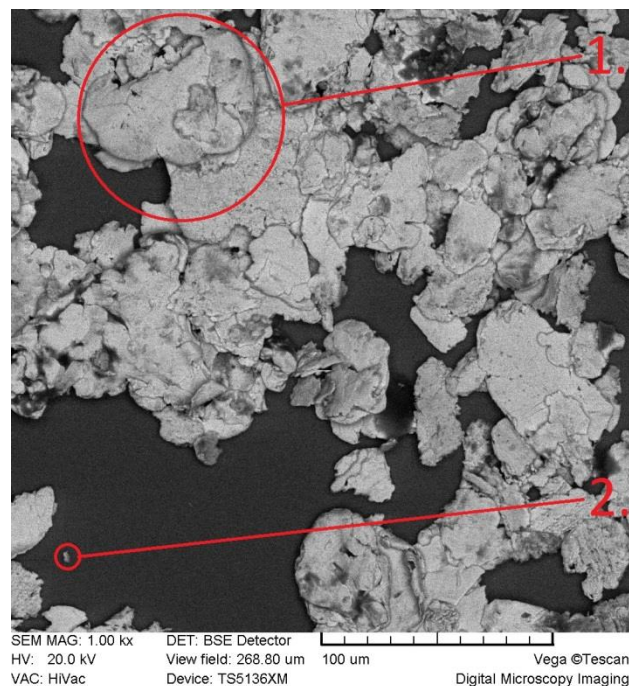


Obr. 3.2 Detail uhlíkového prachu

Detail hodnocených prachových částic je znázorněn na obrázcích 3.1 a 3.2. Jedná se o uhlíkové částice, které vznikly opotřebením kartáčů kluzného kontaktu stroje. Částice mají tvar nepravidelných n-úhelníků, s ostrými hranami a výstupky. Rozměr největších částic se pohybuje až kolem 700 μm , pozice 2 na obrázku 3.2, u těch nejmenších se budou pohybovat v jednotkách mikrometrů, pozice 1 na obrázku 3.2.



Obr. 3.3 Prach zpracovávané horniny



Obr. 3.4 Detail prachových částic zpracovávané horniny

Na obrázcích 3.3 a 3.4 jsou znázorněny prachové částice zpracovávané suroviny, které vznikají při jejím zpracování v kulovém mlýnu. Částice mají tvar nepravidelných oválů s tupými hranami a bez výstupků. Největší částice dosahují velikosti až 800 μm , pozice 1 na obrázku 3.4, rozměry nejmenších se pohybují kolem 50 μm , pozice 2 na obrázku 3.4.

3.2 Vliv prachových částic na provoz asynchronního stroje

Malé uhlíkové prachové částice vznikají přirozenou činností kartáčů při proudovém zatížení. Ulpívají na oxidované vrstvě na kroužcích a vytvářejí uhlíkovou složku patiny, čímž přispívají ke zlepšení třecích poměrů v kluzném kontaktu. [1].

Problém představují uhlíkové částice větších rozměrů. Ty vznikají při zvýšeném proudovém namáhání kartáčů nebo vlivem špatného mechanického stavu povrchu kroužků. Při jejich vniknutí do pracovního prostoru kluzného kontaktu dojde k následující reakci:

- snížení celkového počtu kontaktních míst kluzného kontaktu a nárůstu přechodového odporu,
- zvýšení proudové hustoty v kontaktních místech, vzniku obloukových výbojů a nárůstu elektroerozivního opotřebení komponent kluzného kontaktu,

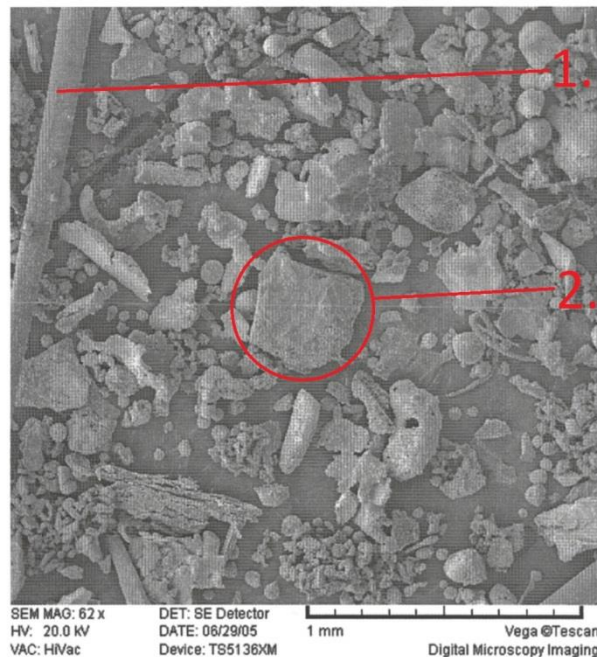
- zvýšenému tepelnému namáhání komponent kluzného kontaktu. [1].

U prachových částic zpracovávané horniny lze při jejich vniknutí do pracovní plochy kluzného kontaktu očekávat stejný vliv jako u velkých uhlíkových částic. Tedy zvýšení přechodového odporu a s tím souvisejících vlivů. Díky svému nevodivému charakteru lze očekávat, že mimo to budou narušovat souměrnou vrstvu patiny, v krajních případech můžou způsobit i rýhy na kroužcích. Narušená vrstva patiny se projeví následujícím způsobem:

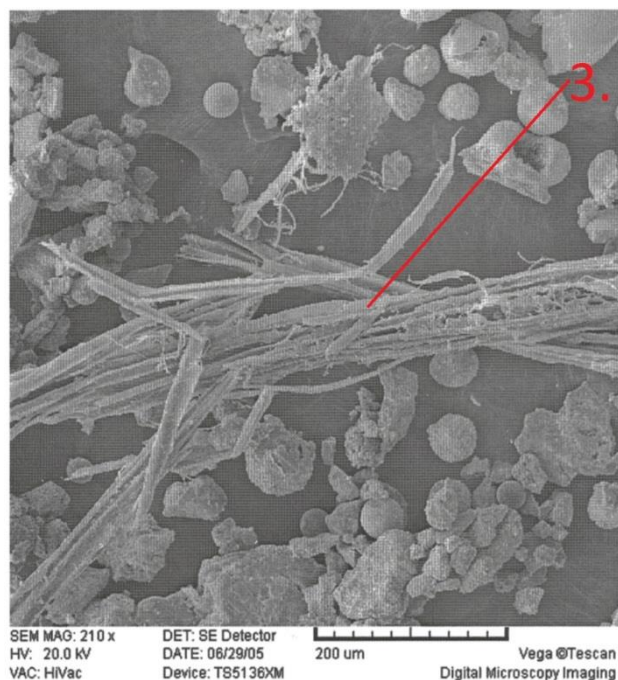
- zvětšením mechanických ztrát vlivem zhoršených kluzných podmínek,
- vznikem vibrací kartáčů a jejich předčasným mechanickým opotřebením, nárůstem produkce uhlíkových částic vnikajících do stroje. [1].

3.3 Prachové částice z prostředí stejnosměrného stroje

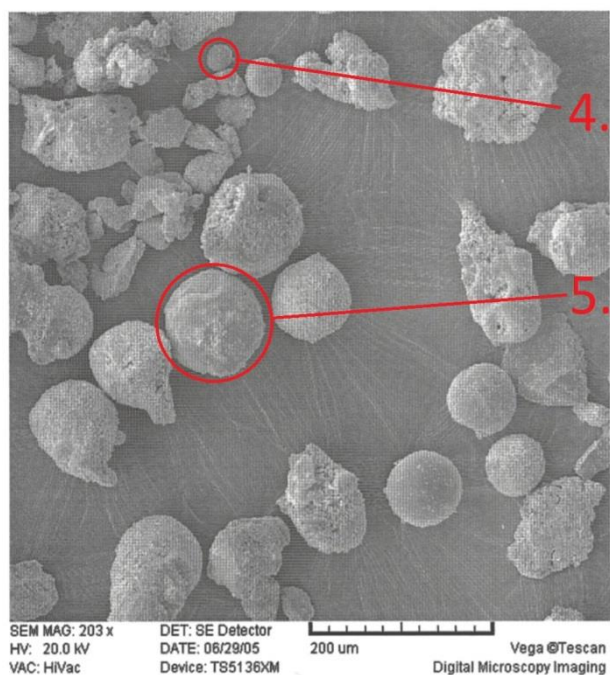
Následující vzorky prachů byly získány z prostoru sběracího ústrojí stejnosměrného stroje, který pohání válcovací stolici v hutích (viz. příloha). Na obrázcích 3.5, 3.6 a 3.7 je zobrazen detail těchto prachových částic.



Obr. 3.5 Prachové částice z prostoru sběracího ústrojí



Obr. 3.6 Detail prachových částic z prostoru sběracího ústrojí



Obr. 3.7 Detail kulových prachových částic z prostoru sběracího ústrojí

Geometrické prvky zastoupené v kovovém prachu se liší téměř u každé částice. Jsou zde prvky ve tvaru vlákna, nepravidelného n-úhelníku, nepravidelných oválů a koulí.

Vlákna, pozice 1 na obrázku 3.5, dosahují délky až jednotek milimetrů. Jejich průměr činí 1 mm a mají oblý tvar po celé své délce.

Největší částice mají tvar nepravidelné n-úhelníku, pozice 2 na obrázku 3.5, se stranami o délce až 4 mm a vystouplé ostré hrany.

Drobné vlákna, pozice 3 na obrázku 3.6, vzniklé roztřepením většího vlákna dosahují délky až jednotek milimetrů a šířky 200 μm .

Prvky ve tvaru koule, pozice 5 na obrázku 3.7, dosahují u největších částic v průměru 1 mm.

Nejmenší částice zastoupené ve zkoumaném vzorku prachu, pozice 4 na obrázku 3.7, dosahují velikosti 100 μm .

3.4 Vliv prachových částic na provoz stejnosměrného stroje

Prachové částice nacházející se v prostoru stejnosměrného stroje mají vodivý charakter. V případě vniknutí částic do pracovního prostoru kluzného kontaktu, budou tyto částice narušovat chod kluzného kontaktu:

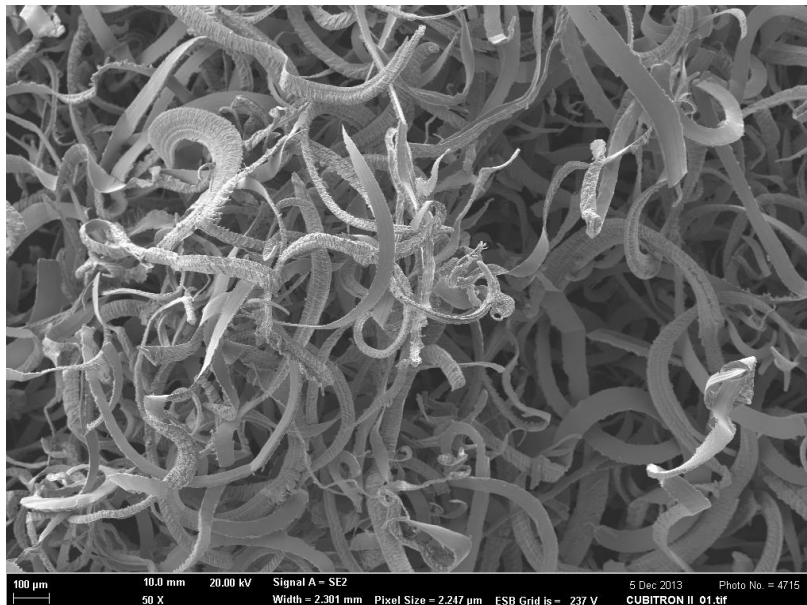
- dojde ke snížení počtu stykových míst mezi kartáčem a komutátorem, což povede k nárůstu přechodového odporu,
- zvýšení proudové hustoty v kontaktních místech, vzniku obloukových výbojů,
- při kondenzaci par olejů, unikajících z ložisek na komutátoru, vytvoří s prachovými částicemi směs, která po spálení v pracovním prostoru kluzného kontaktu vytvoří škváru a bude způsobovat rýhování komutátoru,
- v případě většího opotřebení mezilamelové izolace než samotných lamel, bude se tento prostor zanášet cizími prachovými částicemi a uhlíkovým prachem z kartáčů, budou snižovat izolační stav mezi lamelami a při překročení průrazného napětí dojde mezi lamelami k přeskoku a jejich zkratování. [1].

Prachové částice se budou díky pomalým otáčkám a pomalu proudícímu chladicímu médiu usazovat uvnitř stroje, což povede k výraznému snížení jeho izolačního stavu.

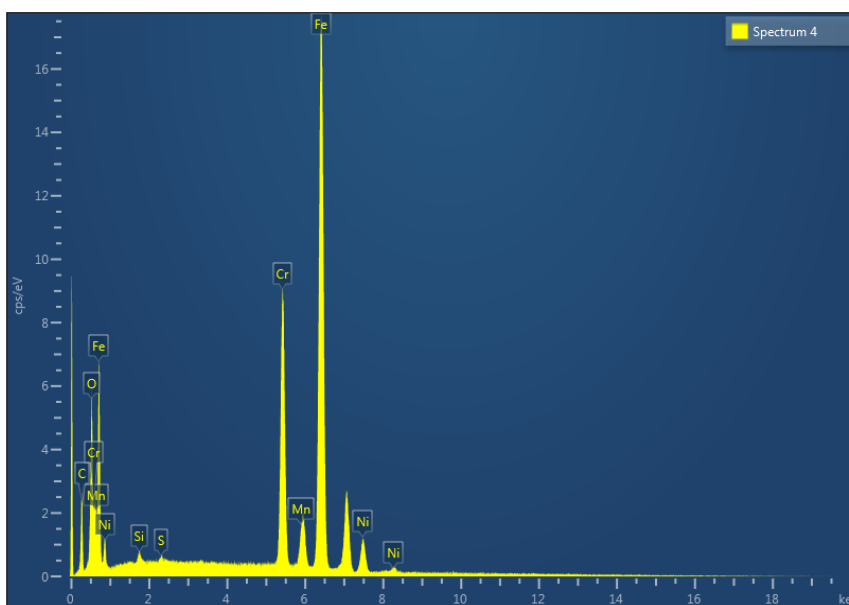
3.5 Prachové částice z prostředí střídavého komutátorového stroje

Střídavý komutátorový motor pohání úhlovou brusku značky NAREX. Ta byla postupně osazena třemi řeznými kotouči, které byly použity k dělení ocelové trubky. Jednotlivé vzorky reprezentují prachové částice, které produkují při řezání

dané řezné kotouče. Tyto prachové částice jsou nasávány do vnitřních částí poháněcího stroje. Zkoumané vzorky byly následně podrobeny prvkové analýze.



Obr. 3.8 Prachové částice vznikající při použití kotouče CUBITRON II

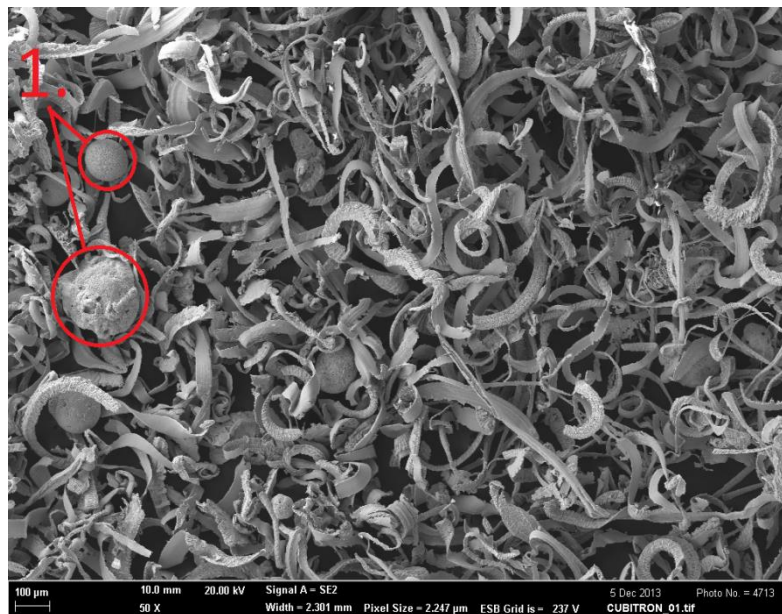


Obr. 3.9 Prvková analýza prachových částic vzniklých při použití kotouče CUBITRON II

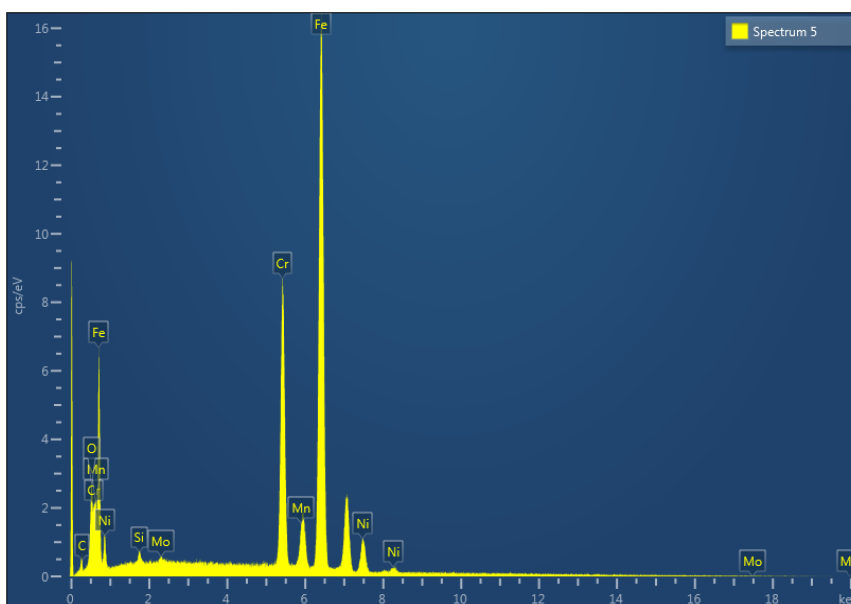
Prachové částice na obrázku 3.8 vznikly při řezání ocelové trubky pomocí kotouče CUBITRON II.

Geometrie jednotlivých prvků se skládá výhradně z podélných pásků, většinou zkroucených podle osy broušení. Jejich okraje jsou roztřepené s ostrými

hranami. Dosahují délky až 1000 μm a šířky 100 μm . Z prvkové analýzy vyplývá, že největší měrou je zastoupeno železo Fe (88 %) a nikl Ni (7,7 %).



Obr. 3.10 Prachové částice vznikající při použití kotouče CUBITRON



Obr. 3.11 Prvková analýza prachových částic vzniklých při použití kotouče CUBITRON

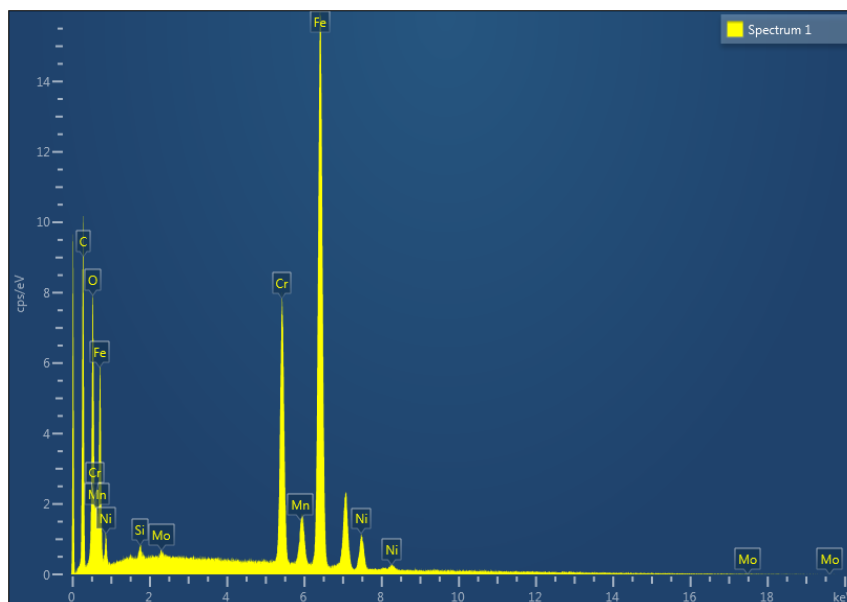
Prachové částice na obrázku 3.10 vznikly při řezání ocelové trubky pomocí kotouče CUBITRON.

Geometrie jednotlivých prvků se skládá především z podélných útvarů, ale jsou zde zastoupeny také kulové útvary, pozice 1 na obrázku 3.10. Podélné prvky, většinou úzké pásy, jsou zkroucené podle osy broušení. Některé z těchto prvků

mají značně roztřepené okraje a ostré hroty na jejich koncích. Největší z podélných částic dosahují délky až 700 μm a šířky 50 μm . Kulové útvary dosahují průměru 100 μm a jsou zastoupeny ojediněle. Prvkovou analýzou bylo zjištěno, že největší zastoupení ve zkoumaném vzorku má železo Fe (80,5 %) a nikl Ni (7,3 %).



Obr. 3.12 Prachové částice vznikající při použití kotouče WSM



Obr. 3.13 Prvková analýza prachových částic vzniklých při použití kotouče WSM

Prachové částice na obrázku 12 vznikly při řezání ocelové trubky pomocí kotouče WSM.

Prachové částice obsahují prvky kulovou a podélnou geometrií. Prvky s podélnou geometrií jsou zastoupeny především pásky, a to spíše úzkými o délce až 700 μm a šířce 20 μm , nebo tlustými o délce 300 μm a šířce až 100 μm . Některé pásky mají vystouplé hrany s ostrými hroty. Průměr kulových prvků se pohybuje od 30 μm u nejmenších částic až po 60 μm u těch největších. Prvkovou analýzou bylo zjištěno, že největší měrou je mezi materiály zastoupeno železo Fe (78,3 %) a uhlík C (15,9 %).

3.6 Vliv prachových částic na provoz střídavého komutátorového stroje

Prachové částice vznikající při činnosti úhlové brusky budou mít z principu svého vzniku vysokou teplotu a rychlost, budou tedy disponovat značnou kinetickou a tepelnou energií. V případě, že se dostanou do stroje, budou vlivem zmiňovaných atributů a dále také svými ostrými hranami působit značné mechanicko-tepelné namáhání izolačního systému stroje a tím výrazně urychlovat jeho degradaci. Jejich vliv při vniknutí do pracovního prostoru kluzného kontaktu bude obdobný jako u stejnosměrného stroje.

4 VYHODNOCENÍ VLIVU PRACHOVÝCH ČÁSTIC NA KLUZNÝ KONTAKT

Chování kluzného kontaktu je závislé i na vnějších vlivech. Kvalitu okolního prostředí ovlivňuje i přítomnost prachových částic. Uplatňuje se nejen jejich původ, chemické složení, ale i jejich geometrie. Právě geometrie částic v interakci s komponenty sběracího ústrojí je rozhodující pro jeho stabilitu. Významnou roli má velikost přítláčné síly přítláčného systému na kartáč. Tato problematika se nedá řešit u všech strojů, proto byl vybrán stejnosměrný motor válcovenského stroje, jehož sběrací ústrojí se skládá z velkého počtu paralelně pracujících kartáčů.

4.1 Vyhodnocení přítláčné síly kartáčů

Velikost přítláčné síly má zásadní vliv na velikost celkových ztrát vznikajících v kluzném kontaktu. Její hodnota se volí jako kompromis mezi ztrátami elektrickými a mechanickými. [1].

Velikost elektrických ztrát závisí na přechodovém odporu. Pro čistý, nezoxidovaný styk dvou materiálů se vypočítá odpor ve styku pomocí obecného vztahu (5.1):

$$R_s = \frac{k}{F^n} \quad (4.1) [1].$$

kde k je materiálová konstanta,
 n je exponent v rozmezí 0,5-1 udávající způsob kontaktního styku,
 F [N] je velikost přítláčné síly.

Pro uhlíkové kartáče se udává $n = 0,5$, což odpovídá bodovému styku. [1].

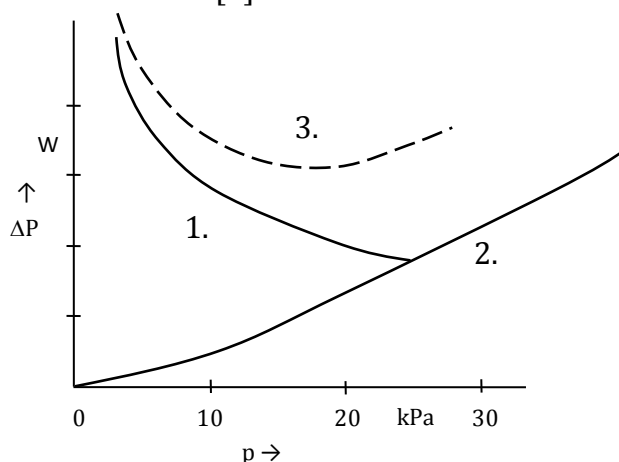
Mechanické ztráty vznikají v důsledku tření. Celkové ztráty v kluzném kontaktu jsou pak dány součtem ztrát mechanických a elektrických. Mechanické ztráty je možné určit pomocí výkonové rovnice (5.2):

$$P = \frac{\pi^2 \cdot n}{60} \cdot A \cdot B_0 \cdot \alpha \cdot D^2 \cdot L \quad (4.2) [1].$$

kde n [min⁻¹] jsou otáčky stroje,
 A [A·m⁻²] je lineární obvodová hustota proudu kotvy,
 B_0 [T] je magnetická indukce ve vzduchové mezeře,
 α [°] je pólové krytí,
 D [m] je průměr kotvy,
 L [m] je aktivní délka železa.

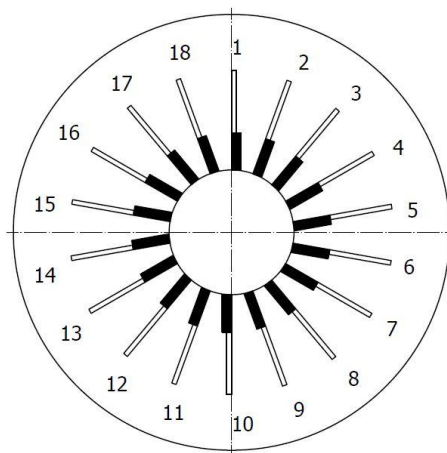
Grafické vyjádření elektrických ztrát a mechanických ztrát v závislosti na tlaku, pomocí rovnice pro stykový odpor (4.1) a výkonové rovnice (4.2), je zobrazeno na obrázku 4.1. Legenda: 1. – elektrické ztráty, 2. – mechanické ztráty, 3. – celkové ztráty.

Nejnižší ztráty dosahuje kluzný kontakt přibližně při tlaku 15 kPa. Při malém tlaku se na celkových ztrátách projevují především ztráty elektrické, a ztráty mechanické jsou téměř zanedbatelné. Při velkém tlaku naopak klesají ztráty elektrické a značně narůstají ztráty mechanické. Křivku celkových ztrát také ovlivňuje kvalita použitých kartáčů, velikost proudového zatížení, teplota ve styku a obvodová rychlost komutátoru. [1].



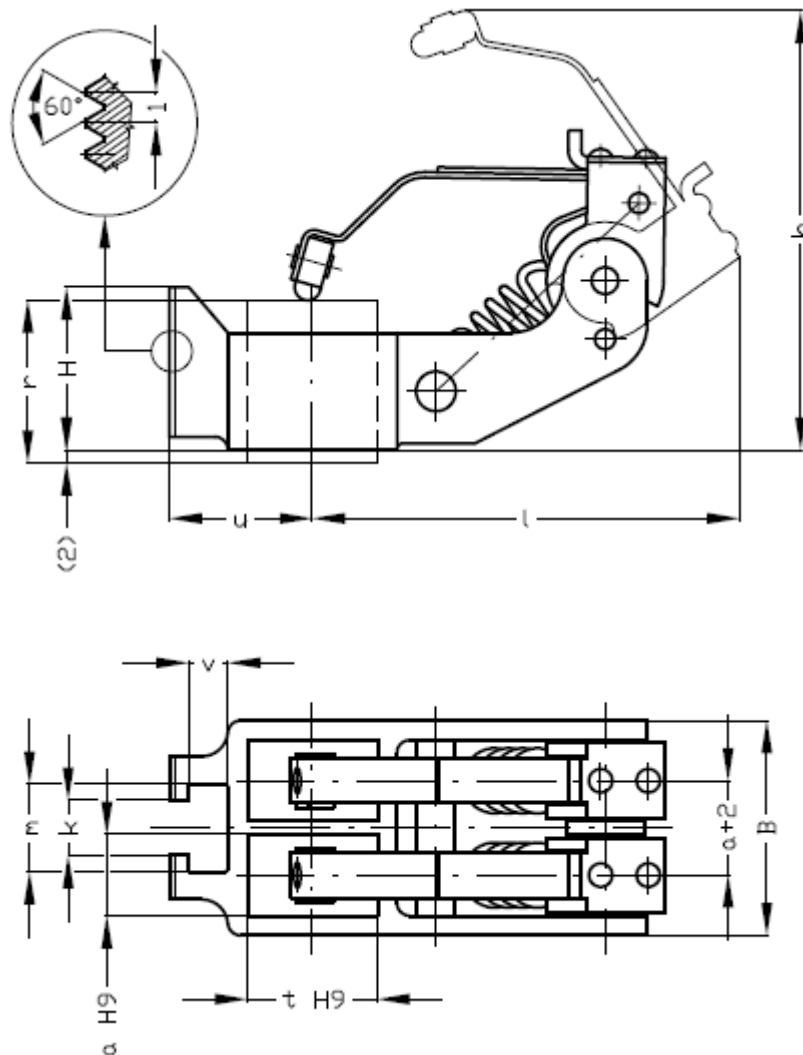
Obr. 4.1 Závislost elektrických a mechanických ztrát v kluzném kontaktu na přitlačné síle (převzato z [1].)

V rámci studia a případného vlivu prachových částic na kluzný kontakt bylo provedeno měření přitlačné síly jednotlivých kartáčů na komutátoru stejnosměrného stroje. Měření přitlačných sil bylo provedeno na šestipólovém stejnosměrném motoru o výkonu 2575 kW pohánějším válcovským strojem. Sběrací ústrojí se skládá z osmnácti roubíků, viz. obrázek 4.2.



Obr. 4.2 Schématické zobrazení rozložení roubíků na stroji v radiálním směru

Každý roubík je osazen celkem šesti tandemovými držáky kartáčů typu RD, viz. obrázek 4.3.

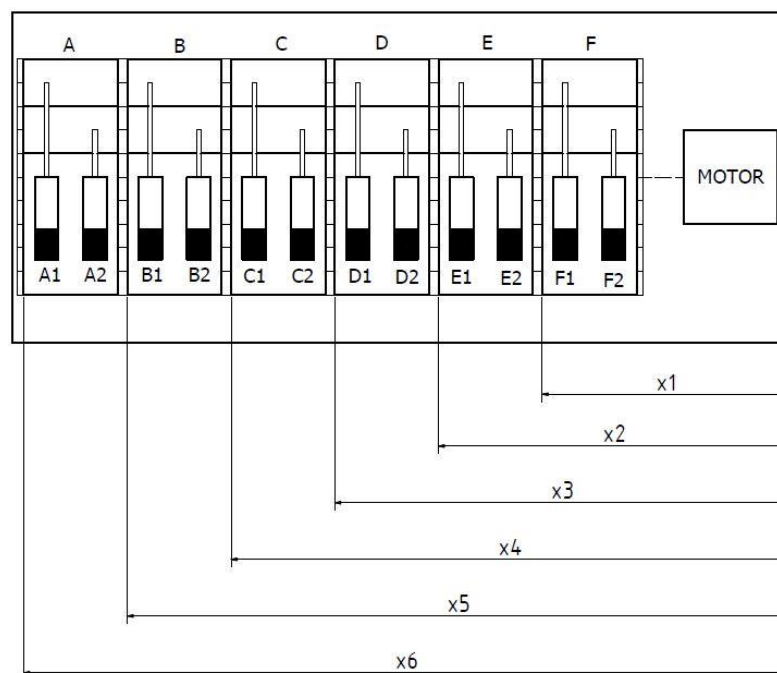


Obr. 4.3 Tandemový držák kartáčů typu RD (převzato z [23].)

Tab. 4.1 Rozměry tandemového držáku kartáčů RD (převzato z [23].)

Typ	t H9	a H9	r	u	k	m	v	B	H	l	h	m [kg]
2RD2016	20	16	25	0	8,5	13,5	6	40	25	67	70	0,28

Jednotlivé držáky vymezují kluznou dráhu označenou A, B, C, D, E a F, viz. obrázek 4.4. Každý držák je zároveň osazen dvěma kartáči, jejichž dráhy jsou vždy označeny číslicemi 1 a 2. Naměřené hodnoty přítláčných sil jsou uvedeny v tabulce 4.2. Přítláčná síla kartáčů byla změřena pomocí tenzometrického přístroje MPS-50N.



Obr. 4.4 Schématické zobrazení jednotlivých drah kartáčů

Tab. 4.2 Naměřené hodnoty přítláčných sil

Pozice kartáčů	F [N]											
	A		B		C		D		E		F	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1	7,60	7,50	10,70	11,20	7,50	7,70	8,00	7,60	7,50	7,30	7,00	7,00
2	8,30	6,80	7,90	7,60	13,50	13,60	11,60	12,20	5,60	7,90	9,70	12,00
3	7,70	6,80	7,00	8,20	8,10	7,90	7,60	7,60	6,10	7,40	9,90	7,10
4	11,20	10,60	7,20	7,20	7,90	7,60	7,60	7,70	8,10	5,80	8,70	7,90
5	8,80	7,50	7,20	7,20	16,40	10,70	0,00	10,80	7,70	6,80	11,70	12,10
6	7,20	6,70	6,70	6,20	7,40	8,10	11,80	11,30	6,40	7,20	11,20	11,80
7	8,50	6,40	7,10	5,50	10,60	11,20	10,90	10,60	7,30	7,70	7,90	7,20
8	7,40	6,20	5,80	10,50	7,20	6,40	7,30	6,70	6,90	7,00	8,50	8,40
9	7,00	6,40	6,00	6,60	7,50	7,10	8,40	6,20	6,50	6,20	8,40	7,60
10	8,60	7,00	8,90	8,00	12,70	14,20	6,40	7,00	7,20	5,90	6,20	7,50
11	6,80	7,70	7,10	6,90	10,20	14,90	14,30	14,60	6,70	7,10	7,40	7,00
12	7,10	4,50	7,90	8,70	8,20	6,00	13,60	10,10	4,50	6,70	6,70	7,30
13	14,20	11,60	7,50	7,20	7,40	7,40	10,30	15,60	6,50	5,70	7,60	5,60
14	7,60	9,10	7,60	7,70	8,10	6,30	11,50	11,90	6,70	8,70	6,70	7,70
15	7,80	7,10	7,40	9,10	7,90	8,10	10,30	8,70	14,40	19,80	7,80	7,90
16	7,30	5,00	11,10	11,00	7,60	8,00	7,40	6,00	7,70	11,80	12,00	11,70
17	7,30	7,00	7,90	7,10	11,90	10,50	8,10	7,40	12,30	13,60	11,70	13,40
18	11,10	14,30	7,10	6,50	7,20	6,70	12,90	12,30	10,70	10,40	7,10	7,90

Z naměřených hodnot byla stanovena střední hodnota přítláčné síly $F_{STŘ} = 8,55$ N. Následně byly zjišťovány odchylky jednotlivých kartáčů od střední hodnoty, tabulka 4.3 a procentuální hodnoty těchto odchylek, tabulka 4.4.

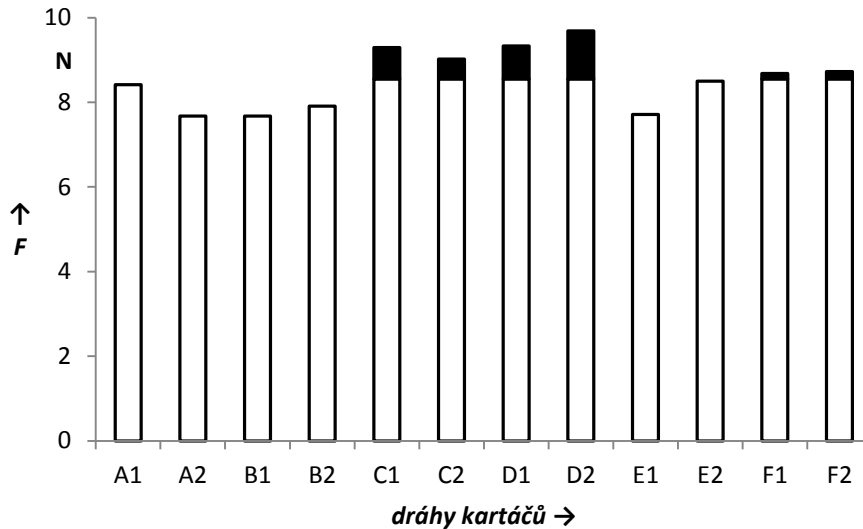
Tab. 4.3 Rozdíly přítláčných sil oproti střední hodnotě

Pozice kartáčů	F_{roz} [N]											
	A		B		C		D		E		F	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1	-0,95	-1,05	2,15	2,65	-1,05	-0,85	-0,55	-0,95	-1,05	-1,25	-1,55	-1,55
2	-0,25	-1,75	-0,65	-0,95	4,95	5,05	3,05	3,65	-2,95	-0,65	1,15	3,45
3	-0,85	-1,75	-1,55	-0,35	-0,45	-0,65	-0,95	-0,95	-2,45	-1,15	1,35	-1,45
4	2,65	2,05	-1,35	-1,35	-0,65	-0,95	-0,95	-0,85	-0,45	-2,75	0,15	-0,65
5	0,25	-1,05	-1,35	-1,35	7,85	2,15	-8,55	2,25	-0,85	-1,75	3,15	3,55
6	-1,35	-1,85	-1,85	-2,35	-1,15	-0,45	3,25	2,75	-2,15	-1,35	2,65	3,25
7	-0,05	-2,15	-1,45	-3,05	2,05	2,65	2,35	2,05	-1,25	-0,85	-0,65	-1,35
8	-1,15	-2,35	-2,75	1,95	-1,35	-2,15	-1,25	-1,85	-1,65	-1,55	-0,05	-0,15
9	-1,55	-2,15	-2,55	-1,95	-1,05	-1,45	-0,15	-2,35	-2,05	-2,35	-0,15	-0,95
10	0,05	-1,55	0,35	-0,55	4,15	5,65	-2,15	-1,55	-1,35	-2,65	-2,35	-1,05
11	-1,75	-0,85	-1,45	-1,65	1,65	6,35	5,75	6,05	-1,85	-1,45	-1,15	-1,55
12	-1,45	-4,05	-0,65	0,15	-0,35	-2,55	5,05	1,55	-4,05	-1,85	-1,85	-1,25
13	5,65	3,05	-1,05	-1,35	-1,15	-1,15	1,75	7,05	-2,05	-2,85	-0,95	-2,95
14	-0,95	0,55	-0,95	-0,85	-0,45	-2,25	2,95	3,35	-1,85	0,15	-1,85	-0,85
15	-0,75	-1,45	-1,15	0,55	-0,65	-0,45	1,75	0,15	5,85	11,25	-0,75	-0,65
16	-1,25	-3,55	2,55	2,45	-0,95	-0,55	-1,15	-2,55	-0,85	3,25	3,45	3,15
17	-1,25	-1,55	-0,65	-1,45	3,35	1,95	-0,45	-1,15	3,75	5,05	3,15	4,85
18	2,55	5,75	-1,45	-2,05	-1,35	-1,85	4,35	3,75	2,15	1,85	-1,45	-0,65

Tab. 4.4 Procentuální rozdíly přítláčných sil oproti střední hodnotě

Pozice kartáčů	F_{roz} [%]											
	A		B		C		D		E		F	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1	-11,1	-12,3	25,1	31,0	-12,3	-9,9	-6,4	-11,1	-12,3	-14,6	-18,1	-18,1
2	-2,9	-20,5	-7,6	-11,1	57,9	59,1	35,7	42,7	-34,5	-7,6	13,5	40,4
3	-9,9	-20,5	-18,1	-4,1	-5,3	-7,6	-11,1	-11,1	-28,7	-13,5	15,8	-17,0
4	31,0	24,0	-15,8	-15,8	-7,6	-11,1	-11,1	-9,9	-5,3	-32,2	1,8	-7,6
5	2,9	-12,3	-15,8	-15,8	91,8	25,1	-100,0	26,3	-9,9	-20,5	36,8	41,5
6	-15,8	-21,6	-21,6	-27,5	-13,5	-5,3	38,0	32,2	-25,1	-15,8	31,0	38,0
7	-0,6	-25,1	-17,0	-35,7	24,0	31,0	27,5	24,0	-14,6	-9,9	-7,6	-15,8
8	-13,5	-27,5	-32,2	22,8	-15,8	-25,1	-14,6	-21,6	-19,3	-18,1	-0,6	-1,8
9	-18,1	-25,1	-29,8	-22,8	-12,3	-17,0	-1,8	-27,5	-24,0	-27,5	-1,8	-11,1
10	0,6	-18,1	4,1	-6,4	48,5	66,1	-25,1	-18,1	-15,8	-31,0	-27,5	-12,3
11	-20,5	-9,9	-17,0	-19,3	19,3	74,3	67,3	70,8	-21,6	-17,0	-13,5	-18,1
12	-17,0	-47,4	-7,6	1,8	-4,1	-29,8	59,1	18,1	-47,4	-21,6	-21,6	-14,6
13	66,1	35,7	-12,3	-15,8	-13,5	-13,5	20,5	82,5	-24,0	-33,3	-11,1	-34,5
14	-11,1	6,4	-11,1	-9,9	-5,3	-26,3	34,5	39,2	-21,6	1,8	-21,6	-9,9
15	-8,8	-17,0	-13,5	6,4	-7,6	-5,3	20,5	1,8	68,4	131,6	-8,8	-7,6
16	-14,6	-41,5	29,8	28,7	-11,1	-6,4	-13,5	-29,8	-9,9	38,0	40,4	36,8
17	-14,6	-18,1	-7,6	-17,0	39,2	22,8	-5,3	-13,5	43,9	59,1	36,8	56,7
18	29,8	67,3	-17,0	-24,0	-15,8	-21,6	50,9	43,9	25,1	21,6	-17,0	-7,6

4.1.1 Posouzení kvality sběracího ústrojí stroje s využitím vyhodnocení přítlačných sil v kartáčových držácích



Obr. 4.5 Grafické znázornění průměrných přítlačných sil v jednotlivých drahách (poznámka: nejbliže ke stroji je orientována dráha F, nejdále dráha A)

Z porovnání přítlačných sil dvojic kartáčů na jednom držáku je patrné, že většina dvojic je zatěžována velmi nerovnoměrně a také, že vykazují velké rozdíly ve svých přítlačných silách oproti stanovené střední hodnotě přítlačné síly. Při porovnání jednotlivých drah kartáčů má nejmenší průměrnou přítlačnou sílu dráha B1 (7,67 N). Jde tedy o 10,3 % menší hodnotu než je střední hodnota přítlačné síly. Největší průměrnou přítlačnou sílu vykazuje dráha D2 se silou 9,68 N, tedy o 13,2 % větší než je střední hodnota přítlačné síly.

Z porovnání přítlačných sil jednotlivých držáků je patrné, že nejmenší rozdíl, pouhých 0,05 N je v dráze F. Největší rozdíl je pak v sousední dráze E a to 0,79 N.

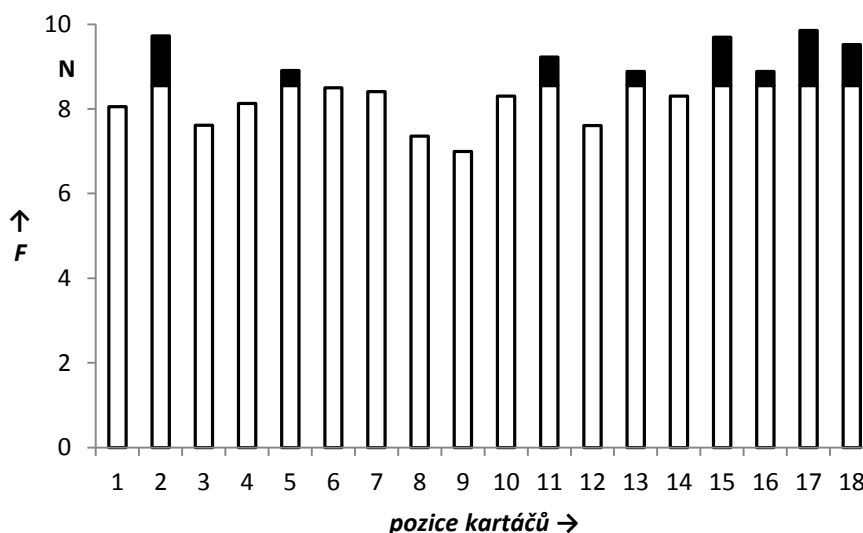
Z grafické závislosti průměrných přítlačných sil v jednotlivých drahách, na obrázku 4.5, je patrné, že průměrná hodnota přítlačných sil je v prostředních drahách C a D, v mezích vzdálenosti x2 až x4 od motoru, větší než v okrajových drahách A, B, E a F. Tato skutečnost je pravděpodobně způsobena nastavením přítlačné síly obsluhou. V případě vzniku vibrací, se budou projevat nejvíce uprostřed hřídele, tedy na pozicích kartáčů v drahách C a D, neboť na obou koncích je hřídel uchycena v ložiskových uzlech. Díky větší přítlačné síle bude zajištěna funkce kluzného kontaktu v těchto drahách.

Dále bylo přistoupeno k vyhodnocení přítlačných sil na jednotlivých roubících. Získané hodnoty jsou uvedeny v tabulce 4.5.

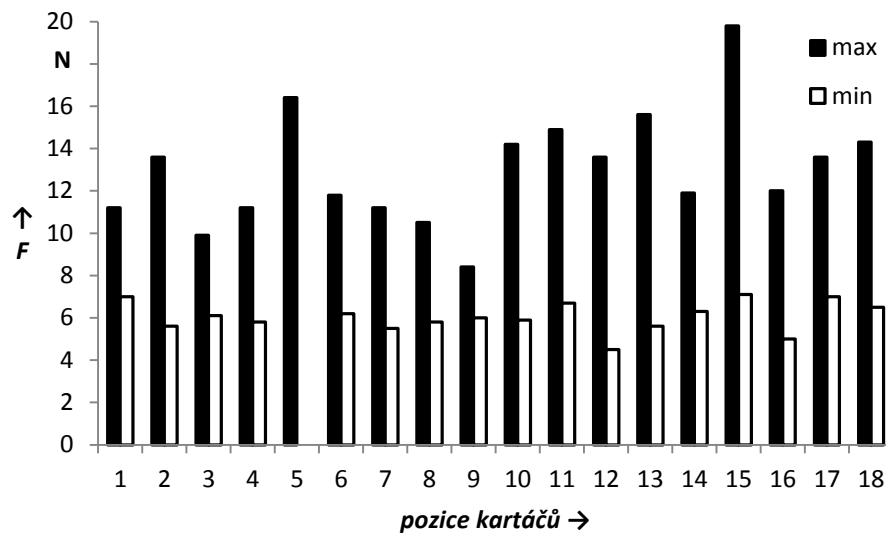
Tab. 4.5 Zpracované hodnoty přítláčných sil na jednotlivých roubících

Pozice kartáčů	Průměrná hodnota [N]	Odchylka od prům. hodnoty [N]	Maximální hodnota [N]	Minimální hodnota [N]	Rozdíl max./min. [N]
1	8,05	-0,50	11,20	7,00	4,20
2	9,73	1,18	13,60	5,60	8,00
3	7,62	-0,93	9,90	6,10	3,80
4	8,13	-0,43	11,20	5,80	5,40
5	8,91	0,36	16,40	0,00	16,40
6	8,50	-0,05	11,80	6,20	5,60
7	8,41	-0,14	11,20	5,50	5,70
8	7,36	-1,19	10,50	5,80	4,70
9	6,99	-1,56	8,40	6,00	2,40
10	8,30	-0,25	14,20	5,90	8,30
11	9,23	0,67	14,90	6,70	8,20
12	7,61	-0,94	13,60	4,50	9,10
13	8,88	0,33	15,60	5,60	10,00
14	8,30	-0,25	11,90	6,30	5,60
15	9,69	1,14	19,80	7,10	12,70
16	8,88	0,33	12,00	5,00	7,00
17	9,85	1,30	13,60	7,00	6,60
18	9,52	0,97	14,30	6,50	7,80

Při porovnání průměrných přítláčných sil jednotlivých roubíků je patrné, že síly působící na jednotlivé roubíky vykazují velké rozdíly. Největší síla působí na roubík na pozici číslo sedmnáct a to 9,85 N, tedy o 15,2 % větší silou než je střední hodnota. Nejmenší síla potom působí na roubík na pozici číslo devět, a to silou 6,99 N, což je o 18,2 % méně než je střední hodnota.



Obr. 4.6 Grafické znázornění průměrné přítláčné síly na jednotlivých roubících



Obr. 4.7 Grafické znázornění rozložení maximální a minimální přítláčné síly

Největší rozdíl mezi minimální a maximální přítláčnou silou na jednom roubíku byl potom naměřen na roubíku číslo pět. Na kartáč C1 působí síla 16,4 N, na kartáč D1 působí síla 0,0 N. Rozdíl tedy činí 16,4 N. Lze předpokládat, že pružina nebo přítláčné rameno kartáče na pozici D1 je poškozené.

Nejmenší rozdíl mezi minimální a maximální silou je na roubíku na pozici číslo devět. Tento rozdíl činí 2,4 N.

Z těchto skutečností lze formovat následující závěry:

- sběrací ústrojí pracuje v náročných podmínkách, kde velikost prachových částic se pohybuje v rozsahu od 100 μm do jednotek mm,
- vzhledem k tomu, že přítláčná síla kartáčů se pohybuje v uvedeném rozptylu, může dojít k tomu, že prachové částice mohou vniknout do pracovního prostoru kluzného kontaktu a změnit charakter vedení odpovídajícího proudu,
- to může vést ke vzniku jiskření stroje a k obtížnějšímu zvládnutí proudového přetížení, zejména v okamžiku, kdy začíná proces válcování.

Významným způsobem poměry v kluzném kontaktu ovlivňuje i velikost proudového rozložení. Proto bylo v následující části zpracování diplomové práce přistoupeno k analýze proudového zatížení stroje.

4.2 Vliv proudového zatížení kartáčů na chod kluzného kontaktu

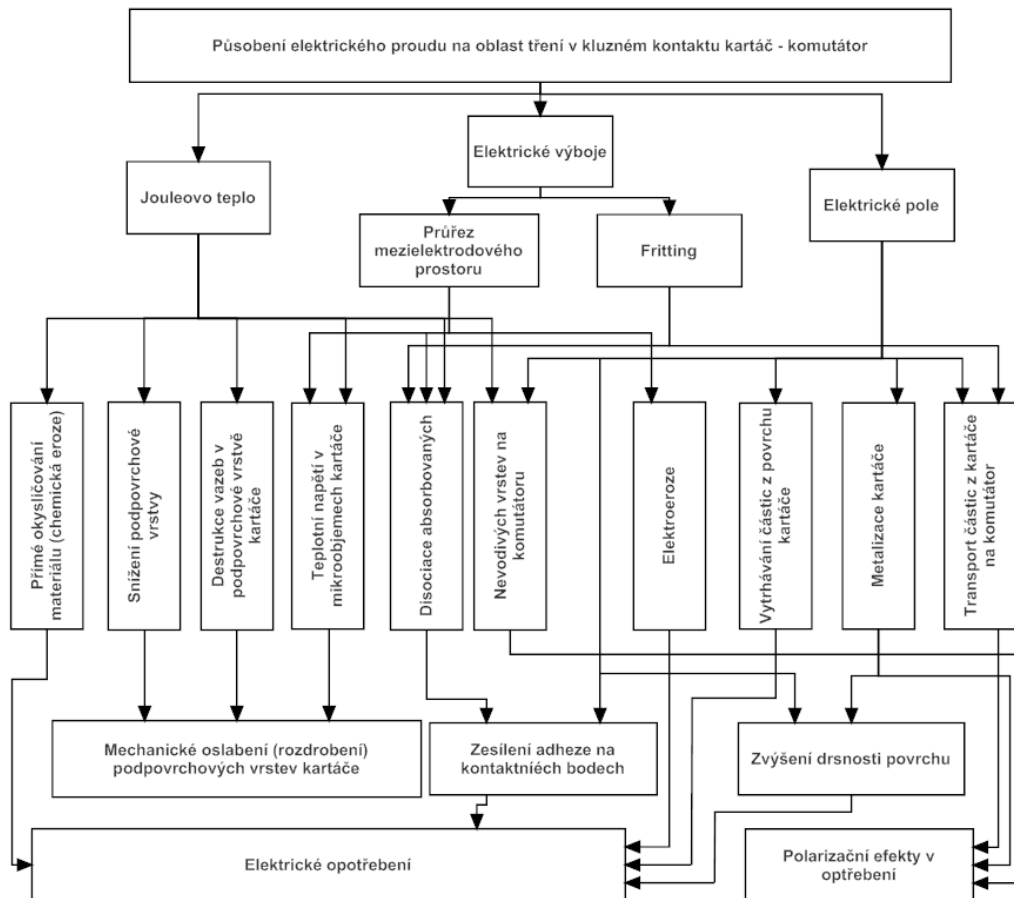
Velikost proudového zatížení má vliv na přechodový úbytek napětí v kluzném kontaktu a má tedy rozhodující vliv na elektrické ztráty, oteplení kluzného kontaktu a velikost elektrického opotřebení. [1].

Střední hodnota proudového zatížení kartáče se určí z rovnice (4.3):

$$\sigma = \frac{I}{S} \quad (4.3) [1].$$

kde I [A] je proud procházející kartáčem,
 S [m²] je plocha kartáče.

Reálné proudové zatížení jednotlivých kartáčů se bude od střední hodnoty proudu poměrně lišit, protože skutečná velikost pracovní plochy kluzného kontaktu zajišťující vedení proudu je velmi proměnná. Zatížení jednotlivých kartáčů se bude lišit i na kartáčích ve stejných řadách. Vliv proudu na třecí poměry v kluzném kontaktu je zobrazen na vývojovém diagramu na obrázku 4.8. [1].



Obr. 4.8 Vliv proudového zatížení na třecí poměry v kluzném kontaktu (převzato z [25].)

Z provozního hlediska je elektrické opotřebením kluzného kontaktu velmi žádané, protože jeho výsledkem je výrazné zlepšení třecích poměrů mezi kartáčem a komutátorem. To vede k omezení vibrací a hlučení kartáčů. Cílem volby kartáčů je tedy dosažení provozu kluzného kontaktu bez vibrací, hlučení a jiskření kartáčů. Tohoto stavu je potřeba dosáhnout bez použití kartáčů s mimořádným opotřebením, neboť toto řešení je z důvodu častých výměn kartáčů velmi neekonomické. [1].

4.2.1 Paralelní spolupráce kartáčů

Stejnoseměrný motor pohánějící válcovský stroj má 6 pólů a je osazen 18 roubíky. Na každém roubíku je 12 kartáčů. Z rovnice pro střední hodnotu proudového zatížení (4.3) a počtu pólů stroje lze odvodit, že bude dohromady spolupracovat 36 kartáčů, mezi které se rozdělí dané proudové zatížení. Poměrné rozdělení mezi paralelně pracující kartáče má zásadní vliv na tvorbu patiny, rovnoměrné opotřebením kartáčů a jejich bezjiskrový provoz. Způsob rozdělení proudového zatížení mezi paralelně spolupracující kartáče je hlavním indikátorem řádného chodu kluzného kontaktu při větším počtu kartáčů v řadě. [1].

Jako mezní poměr proudového zatížení jednotlivých kartáčů, při kterém bude zajištěna vyhovující činnost kluzného kontaktu, se udává rozdíl $\pm 20\%$ od střední hodnoty proudového zatížení. Tento stav lze však považovat za ideální, protože poměr rozdělení proudového zatížení při činnosti paralelních kartáčů se pohybuje až v mezích 1:3. [1].

Při práci více paralelních kartáčů jsou všechny přivedeny na stejný potenciál. Pokud budeme uvažovat, že všechny použité kartáče jsou stejné kvality, bude ohmický odpor všech kartáčů, počítaje přívodních lanek a spojů, totožný a lze ho zanedbat a uvažovat pouze přechodový odpor mezi kartáčem a komutátorem. Proudové zatížení se bude dělit mezi paralelně pracující kartáče nepřímou úměrně podle velikosti jejich přechodového odporu. Jeho velikost se přitom velmi značně mění s velikostí teploty v kontaktu, vibracemi kartáčů a vniknutím prachových částic do pracovní plochy. Lze konstatovat, že závislost rozdělení proudového zatížení mezi kartáče není závislá na celkové hodnotě proudového zatížení. Bude se odvíjet od konkrétní situace a provozních podmínek daného stroje. [1].

Značný dopad na rozdělení proudového zatížení mají také vzduchové polštáře vznikající v pracovním prostoru kluzného kontaktu. Kartáče, u nichž vznikají vzduchové klíny s otevřením na odběhové straně, přebírají větší podíl proudového zatížení. Kartáče, u nichž vzniká vzduchový klín otevřený na náběhové straně, naopak přebírají menší podíl celkového proudového zatížení. Obecně platí, že pro paralelní spolupráci je vhodné vybírat typy kartáčů, u nichž ke vzniku vzduchových klínů nedochází vůbec. [1].

V neposlední řadě hraje důležitou roli rovnoměrná vrstva patiny po celé ploše komutátoru. Není příliš důležitá rovnoměrnost patiny po obvodu komutátoru, jako její rovnoměrnost ve směru podélném. V případě, že bude vrstva patiny pod některým z kartáčů v řadě slabší, bude mít v tomto místě menší přechodový odpor a kartáč bude přebírat proudové zatížení od dalších kartáčů v řadě. [1].

4.2.2 Vyhodnocení proudového zatížení kartáčů

Pro vyhodnocení proudového zatížení jednotlivých kartáčů je nutné nejdříve určit střední hodnotu proudového zatížení. Jako první je nutné vypočítat celkovou plochu kartáčů. Ta se vypočítá podle rovnice (4.4):

$$S = a \cdot b \cdot k \cdot p \quad (4.4) [1].$$

kde a, b [m] jsou délky stran kartáčů,
 k je počet kartáčů na jednom roubíku,
 p je počet pólových dvojic.

Rozměry kartáčů určíme z tabulky 4.1 od výrobce držáku kartáčů. Stejnoseměrný stroj má 6 pólů. Spojení s komutátorem zajišťuje 18 roubíků, každý osazený 12 kartáči. Dosazením do rovnice (4.4) získáme celkovou plochu kartáčů:

$$S = a \cdot b \cdot k \cdot p = 2 \cdot 1,6 \cdot (12 \cdot 3) \cdot 3 = 345,6 \text{ cm}^2$$

Jmenovitý proud stroje je 3450 A. Získanou hodnotu plochy kartáče dosadíme spolu se jmenovitým proudem stroje do rovnice (4.3):

$$\sigma = \frac{I}{S} = \frac{3450}{345,6} = 9,98 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$$

Za zjednodušujícího předpokladu, že kartáč přitlačovaný střední hodnotou přitlačné síly vede střední hodnotu proudového zatížení, bylo vypočítáno proudové zatížení jednotlivých kartáčů na stroji, viz tabulka 4.6.

Tab. 4.6 Hodnoty proudového zatížení jednotlivých kartáčů

Pozice kartáčů	σ [A·cm ⁻²]											
	A		B		C		D		E		F	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1	8,87	8,75	12,49	13,07	8,75	8,99	9,34	8,87	8,75	8,52	8,17	8,17
2	9,69	7,94	9,22	8,87	15,76	15,87	13,54	14,24	6,54	9,22	11,32	14,01
3	8,99	7,94	8,17	9,57	9,45	9,22	8,87	8,87	7,12	8,64	11,56	8,29
4	13,07	12,37	8,40	8,40	9,22	8,87	8,87	8,99	9,45	6,77	10,16	9,22
5	10,27	8,75	8,40	8,40	19,14	12,49	0,00	12,61	8,99	7,94	13,66	14,12
6	8,40	7,82	7,82	7,24	8,64	9,45	13,77	13,19	7,47	8,40	13,07	13,77
7	9,92	7,47	8,29	6,42	12,37	13,07	12,72	12,37	8,52	8,99	9,22	8,40
8	8,64	7,24	6,77	12,26	8,40	7,47	8,52	7,82	8,05	8,17	9,92	9,80
9	8,17	7,47	7,00	7,70	8,75	8,29	9,80	7,24	7,59	7,24	9,80	8,87
10	10,04	8,17	10,39	9,34	14,82	16,57	7,47	8,17	8,40	6,89	7,24	8,75
11	7,94	8,99	8,29	8,05	11,91	17,39	16,69	17,04	7,82	8,29	8,64	8,17
12	8,29	5,25	9,22	10,16	9,57	7,00	15,87	11,79	5,25	7,82	7,82	8,52
13	16,57	13,54	8,75	8,40	8,64	8,64	12,02	18,21	7,59	6,65	8,87	6,54
14	8,87	10,62	8,87	8,99	9,45	7,35	13,42	13,89	7,82	10,16	7,82	8,99
15	9,10	8,29	8,64	10,62	9,22	9,45	12,02	10,16	16,81	23,11	9,10	9,22
16	8,52	5,84	12,96	12,84	8,87	9,34	8,64	7,00	8,99	13,77	14,01	13,66
17	8,52	8,17	9,22	8,29	13,89	12,26	9,45	8,64	14,36	15,87	13,66	15,64
18	12,96	16,69	8,29	7,59	8,40	7,82	15,06	14,36	12,49	12,14	8,29	9,22

Tab. 4.7 Rozdíly proudového zatížení jednotlivých kartáčů

Pozice kartáčů	σ_{ROZ} [A·cm ⁻²]											
	A		B		C		D		E		F	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1	-1,11	-1,23	2,51	3,09	-1,23	-0,99	-0,64	-1,11	-1,23	-1,46	-1,81	-1,81
2	-0,29	-2,04	-0,76	-1,11	5,78	5,89	3,56	4,26	-3,44	-0,76	1,34	4,03
3	-0,99	-2,04	-1,81	-0,41	-0,53	-0,76	-1,11	-1,11	-2,86	-1,34	1,58	-1,69
4	3,09	2,39	-1,58	-1,58	-0,76	-1,11	-1,11	-0,99	-0,53	-3,21	0,18	-0,76
5	0,29	-1,23	-1,58	-1,58	9,16	2,51	-9,98	2,63	-0,99	-2,04	3,68	4,14
6	-1,58	-2,16	-2,16	-2,74	-1,34	-0,53	3,79	3,21	-2,51	-1,58	3,09	3,79
7	-0,06	-2,51	-1,69	-3,56	2,39	3,09	2,74	2,39	-1,46	-0,99	-0,76	-1,58
8	-1,34	-2,74	-3,21	2,28	-1,58	-2,51	-1,46	-2,16	-1,93	-1,81	-0,06	-0,18
9	-1,81	-2,51	-2,98	-2,28	-1,23	-1,69	-0,18	-2,74	-2,39	-2,74	-0,18	-1,11
10	0,06	-1,81	0,41	-0,64	4,84	6,59	-2,51	-1,81	-1,58	-3,09	-2,74	-1,23
11	-2,04	-0,99	-1,69	-1,93	1,93	7,41	6,71	7,06	-2,16	-1,69	-1,34	-1,81
12	-1,69	-4,73	-0,76	0,18	-0,41	-2,98	5,89	1,81	-4,73	-2,16	-2,16	-1,46
13	6,59	3,56	-1,23	-1,58	-1,34	-1,34	2,04	8,23	-2,39	-3,33	-1,11	-3,44
14	-1,11	0,64	-1,11	-0,99	-0,53	-2,63	3,44	3,91	-2,16	0,18	-2,16	-0,99
15	-0,88	-1,69	-1,34	0,64	-0,76	-0,53	2,04	0,18	6,83	13,13	-0,88	-0,76
16	-1,46	-4,14	2,98	2,86	-1,11	-0,64	-1,34	-2,98	-0,99	3,79	4,03	3,68
17	-1,46	-1,81	-0,76	-1,69	3,91	2,28	-0,53	-1,34	4,38	5,89	3,68	5,66
18	2,98	6,71	-1,69	-2,39	-1,58	-2,16	5,08	4,38	2,51	2,16	-1,69	-0,76

Tab. 4.8 Procentuální rozdíly proudového zatížení oproti střední hodnotě

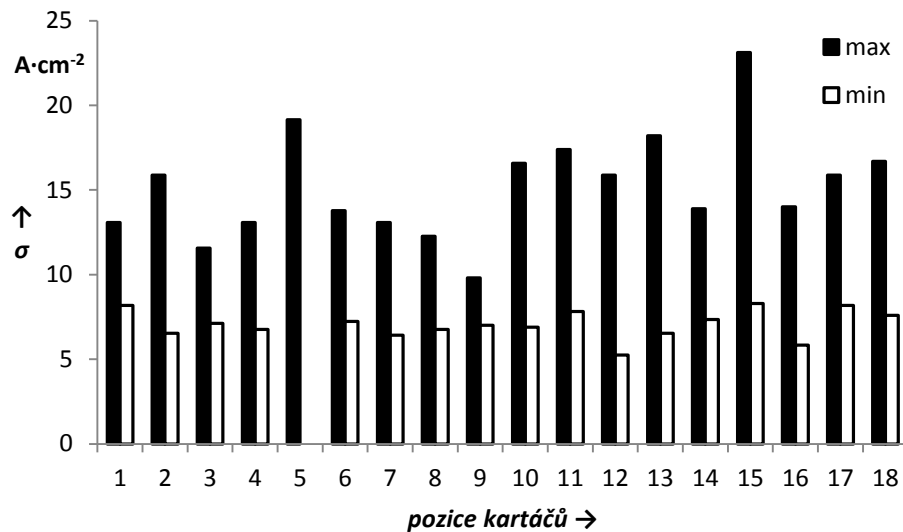
Pozice kartáčů	σ_{ROZ} [%]											
	A		B		C		D		E		F	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1	-11,1	-12,3	25,1	31,0	-12,3	-9,9	-6,4	-11,1	-12,3	-14,6	-18,1	-18,1
2	-2,9	-20,5	-7,6	-11,1	57,9	59,1	35,7	42,7	-34,5	-7,6	13,5	40,4
3	-9,9	-20,5	-18,1	-4,1	-5,3	-7,6	-11,1	-11,1	-28,7	-13,5	15,8	-17,0
4	31,0	24,0	-15,8	-15,8	-7,6	-11,1	-11,1	-9,9	-5,3	-32,2	1,8	-7,6
5	2,9	-12,3	-15,8	-15,8	91,8	25,1	-100,0	26,3	-9,9	-20,5	36,8	41,5
6	-15,8	-21,6	-21,6	-27,5	-13,5	-5,3	38,0	32,2	-25,1	-15,8	31,0	38,0
7	-0,6	-25,1	-17,0	-35,7	24,0	31,0	27,5	24,0	-14,6	-9,9	-7,6	-15,8
8	-13,5	-27,5	-32,2	22,8	-15,8	-25,1	-14,6	-21,6	-19,3	-18,1	-0,6	-1,8
9	-18,1	-25,1	-29,8	-22,8	-12,3	-17,0	-1,8	-27,5	-24,0	-27,5	-1,8	-11,1
10	0,6	-18,1	4,1	-6,4	48,5	66,1	-25,1	-18,1	-15,8	-31,0	-27,5	-12,3
11	-20,5	-9,9	-17,0	-19,3	19,3	74,3	67,3	70,8	-21,6	-17,0	-13,5	-18,1
12	-17,0	-47,4	-7,6	1,8	-4,1	-29,8	59,1	18,1	-47,4	-21,6	-21,6	-14,6
13	66,1	35,7	-12,3	-15,8	-13,5	-13,5	20,5	82,5	-24,0	-33,3	-11,1	-34,5
14	-11,1	6,4	-11,1	-9,9	-5,3	-26,3	34,5	39,2	-21,6	1,8	-21,6	-9,9
15	-8,8	-17,0	-13,5	6,4	-7,6	-5,3	20,5	1,8	68,4	131,6	-8,8	-7,6
16	-14,6	-41,5	29,8	28,7	-11,1	-6,4	-13,5	-29,8	-9,9	38,0	40,4	36,8
17	-14,6	-18,1	-7,6	-17,0	39,2	22,8	-5,3	-13,5	43,9	59,1	36,8	56,7
18	29,8	67,3	-17,0	-24,0	-15,8	-21,6	50,9	43,9	25,1	21,6	-17,0	-7,6

4.2.3 Posouzení kvality sběracího ústrojí stroje s využitím vyhodnocení proudového zatížení

Při pohledu na velikost proudového zatížení jednotlivých kartáčů, tabulka 4.6, vyplývá značná nerovnoměrnost jeho rozložení. To se bude projevovat nerovnoměrnou tvorbou patiny a opotřebením kartáčů. Opotřebení kartáčů narůstá rovnoměrně až do hodnoty 12 A·cm⁻². S dalším zvětšením proudového zatížení dochází k enormnímu nárůstu jejich opotřebení. V jednotlivých drahách tuto hodnotu přesahuje tento počet kartáčů: dráha A – 6 kartáčů, dráha B – 5 kartáčů, dráha C – 11 kartáčů, dráha D – 17 kartáčů, dráha E – 6 kartáčů a dráha F – 9 kartáčů. [1].

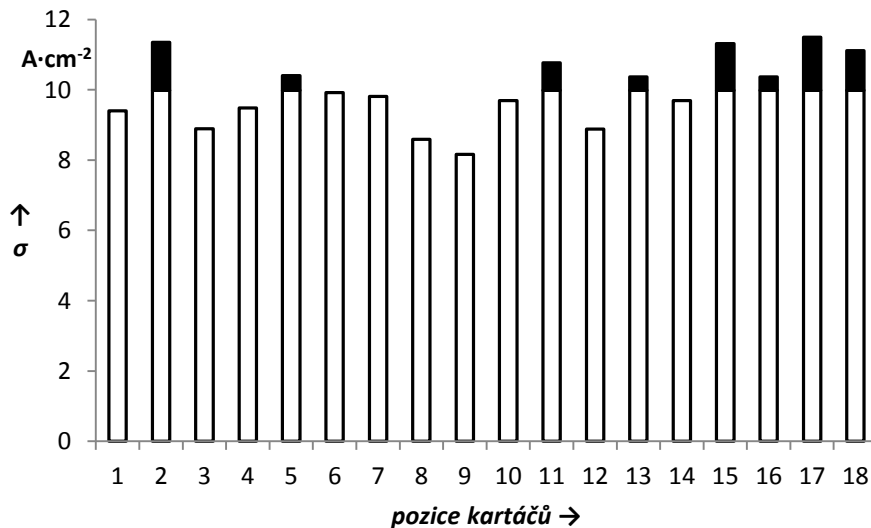
Největší proudové zatížení přenáší kartáč v dráze E2 na roubíku č. 11. Jeho hodnota proudového zatížení je větší o 13,13 A·cm⁻² oproti střední hodnotě proudového zatížení, což je hodnota větší o 130 % oproti střední hodnotě proudového zatížení. Nejmenší proudové zatížení přenáší kartáč v dráze D1 na roubíku č. 5. Jak již bylo zmíněno v předešlé kapitole, jedná se nejpravděpodobněji o kartáč osazený v poškozeném držáku kartáčů. Z tohoto důvodu nevede žádné proudové zatížení, které se musí rozdělit na zbývající paralelně spolupracující kartáče.

Rozdíly mezi maximálním a minimálním proudovým zatížením kartáčů na jednotlivých roubících je znázorněno na obrázku 4.9. Z grafu vyplývá, že mezi kartáči přenášející maximální a minimální proudové zatížení bude značný rozdíl.



Obr. 4.9 Grafické znázornění maximálního a minimálního proudového zatížení kartáčů na jednotlivých roubících

Průměrné proudové zatížení jednotlivých roubíků je znázorněno na obrázku 4.10. Z celkového počtu 18 roubíků jich 8 vede větší proudové zatížení než je střední hodnota proudového zatížení.



Obr. 4.10 Grafické znázornění průměrného proudového zatížení kartáčů na jednotlivých roubících

Z těchto skutečností lze formovat následující závěry:

- nerovnoměrné proudové zatížení povede k nerovnoměrnému rozložení patiny na komutátoru,
- přetěžované kartáče se budou znatelněji více opotřebovávat, než kartáče, které vedou menší proudové zatížení,
- pod přetěžovanými kartáči budou z důvodu větší proudové hustoty vznikat jiskrové a obloukové výboje, které povedou k elektroerozivnímu opotřebení komponentů kluzného kontaktu,
- kartáče s malým proudovým zatížením budou narušovat svým třením film na komutátoru, což může vést k jejich vibracím, hlučení a v krajním případě i k rýhování komutátoru,
- při vniknutí prachové částice do pracovní plochy kluzného kontaktu dojde ke změně jeho přechodového odporu, což povede ke změně proudového zatížení na všech paralelně spolupracujících kartáčích. [1], [7].

Z toho důvodu bylo přistoupeno k posouzení vlivu prachových částic na přechodový odpor kluzného kontaktu.

5 VLIV PRACHOVÝCH ČÁSTIC NA PŘECHODOVÝ ODPOR KLUZNÉHO KONTAKTU

Vlivem prachových částic na přechodový odpor kluzného kontaktu se zabýval Prof. Z. Muszalski. Ten při zkoumání jejich vlivu předpokládal, že prachová částice má kulovou geometrii.

Předpokládejme prachovou částici kulového tvaru o průměru d . Pokud se prachová částice dostane do pracovního prostoru kluzného kontaktu, způsobí kromě vibrací a nestability kartáče také pohyb kartáče v radiálním směru po dráze, kterou lze popsat rovnicí (5.1):

$$s = d \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot d \cdot \omega}{\lambda_s} \cdot \tau\right) \quad (5.1) [3].$$

kde d [m] je průměr prachové částice,
 ω [rad·s⁻¹] je úhlová rychlost komutátoru,
 λ_s [m] je délka dráhy pohybu kartáče, který kartáč vykoná při nadzvednutí prachovou částicí,
 τ [s] je čas radiálního pohybu kartáče při nadzvednutí prachovou částicí.

Délku dráhy, kterou kartáč vykoná při nadzvednutí prachovou částicí, je obtížné určit. Její velikost do značné míry závisí na průměru prachové částice, obvodové rychlosti komutátoru a velikosti zrychlení radiálního pohybu kartáče při nadzvednutí. Radiální zrychlení je vyjádřeno rovnicí (5.2):

$$a = \frac{d^2 s}{d\tau^2} = -d \cdot \left(\frac{\pi \cdot d \cdot \omega}{\lambda_s}\right)^2 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot d \cdot \omega}{\lambda_s} \cdot \tau\right) \quad (5.2) [3].$$

V případě komutátoru, na rozdíl od kroužků, hraje významnou roli rozteč mezi lamelami. Existuje šance, že při vniknutí prachové částice do kluzného kontaktu, tato zapadne do mezilamelového prostoru. Pokud budeme uvažovat, že radiální odstředivá síla kartáče je rovna, nebo menší přitlačné síle kartáče, lze vztah pro délku dráhy vykonanou kartáčem při nadzvednutí prachovou částicí vyjádřit přibližně takto:

$$\lambda_s = 2 \cdot \left(t_k + 0,5 \cdot D \cdot \omega \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{m \cdot d}{P_s}} \right) \quad (5.3) [3].$$

kde t_k [m] je mezilamelová rozteč,
 D [m] je průměr komutátoru,
 m [kg] je hmotnost kartáče,
 P_s [N] je přítláčná síla působící na kartáč.

Délku dráhy pohybu kartáče lze potom rozdělit do dvou kvadrantů. V prvním kvadrantu je její velikost dána rozměrem mezilamelové rozteče, v druhém kvadrantu je její velikost dána výsledkem odstředivé rychlosti a doby, kdy kartáč klesne z výšky o velikosti průměru prachové částice zpět na komutátor. [3].

Pokud mezera mezi kartáčem a komutátorem vzniká periodicky, lze ji popsat vztahem (5.4):

$$s(\tau) = 0,5 \cdot a \cdot \tau^2 \cdot A \quad (5.4) [3].$$

kde A je výraz popisující vzájemný pohyb kluzného povrchu kartáče a kluzného povrchu komutátoru, při relativní změně délky mezery.

Tento výraz lze vyjádřit rovnicí (5.5):

$$A = \frac{1}{\pi} + \frac{1}{2} \cdot \sin \omega_s \tau - \frac{2}{\pi} \cdot \sum \frac{\cos 2n \omega_s \tau}{(2n-1) \cdot (2n+1)} \quad (5.5) [3].$$

kde ω_s [s⁻¹] jsou mechanické pulzace kartáče,
 n [min⁻¹] jsou jmenovité otáčky komutátoru.

Výsledný vztah pro velikost přechodového odporu pak Prof. Muszalski odvodil jako rovnicí (5.6):

$$R_p(\tau) = \left\{ R_{p \max} \left[\frac{\pi^2}{3} - 4 \cdot \sum (-1)^{n+1} \cdot \frac{\cos 2n \omega_s \tau}{n^2} \right] \cdot A \right\}^2 \cdot e^{-3,24 \cdot 10^{-4} \cdot s^{-4} \cdot (\log s)^2} \cdot \left| \frac{s}{4 \cdot 10^{-6}} \cdot \sin \left(\frac{4 \cdot 10^{-6}}{s} \right) \right| + R_0 \quad (5.6) [3].$$

kde R_0 [Ω] je odpor přímého styku kluzného kontaktu,
 $R_{p \max}$ [Ω] je předpokládaná hodnota odporu neionizované vzduchové mezery mezi uhlíkovým kartáčem a měděnou lamelou.

Hodnotu odporu neionizované vzduchové mezery v kluzném kontaktu je obtížné určit, a předpokládané hodnoty vykazují značné rozdíly. Lze ovšem předpokládat, že při velikosti této mezery do $s \cong 10^{-4}$ m se hodnota kontaktního prostoru zvyšuje parabolicky až na hodnoty řádu 10^{12} Ω. [3].

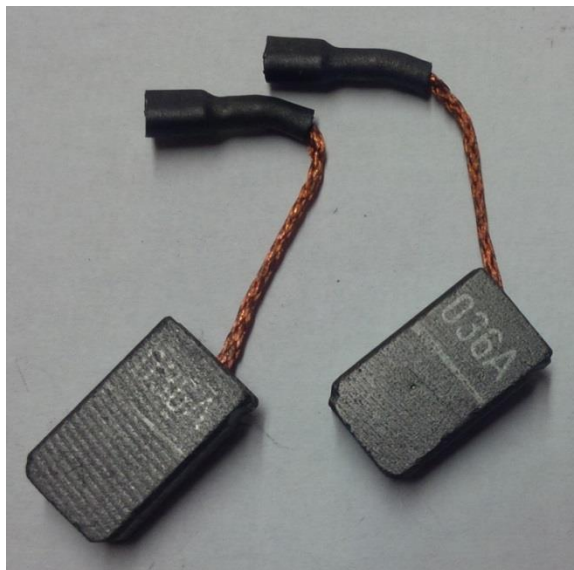
5.1 Výpočet přechodového odporu

Po konzultaci s vedoucím práce jsem dospěl k závěru, že nejvhodnější bude provést vzorový výpočet vlivu prachových částic na přechodový odpor pro úhlovou brusku. Ta je poháněna střídavým komutátorovým motorem. Na obrázku 5.1 je zobrazen rotor tohoto motoru.



Obr. 5.1 Rotor střídavého komutátorového motoru úhlové brusky

Pomocí posuvného měřidla byl změřen průměr komutátoru $D = 27,7$ mm a mezilamelová rozteč $t_k = 3,5$ mm.



Obr. 5.2 Kartáče značky NAREX

Bruska je osazena dvěma uhlíkovými kartáči značky NAREX (obrázek 2). Pomocí rovnice (5.7) stanovíme hmotnost kartáče:

$$m = \rho \cdot V \quad (5.7) [17]$$

kde m [kg] je hmotnost,
 ρ [kg·m⁻³] je materiálová hustota,
 V [m³] je objem kartáče.

Rozměry kartáčů jsou 4x9x1,7 mm. Hustota grafitu je 2100 kg·m⁻³, dosazením spolu s rozměry kartáče do rovnice (5.7) získáme jeho hmotnost:

$$m = \rho \cdot V = 2100 \cdot (0,004 \cdot 0,009 \cdot 0,017) = 1,29 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$$

Jmenovité otáčky úhlové brusky ve stavu naprázdno dosahují 11000 min⁻¹. Výpočet bude proveden ve stavu zatížení pro jmenovité otáčky 3000 min⁻¹. Úhlová rychlost se určí pomocí rovnice (5.8):

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \quad (5.8)$$

Dosazením jmenovitých otáček do rovnice (5.8) získáme úhlovou rychlost:

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 3000}{60} = (100 \cdot \pi) \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

Délku dráhy kartáče vykonanou při nadzvednutí prachovou částicí získáme dosazením do rovnice (5.3). Přítlačná síla na kartáče je 1,8 N, průměr prachové částice je 100 μm:

$$\begin{aligned} \lambda_s &= 2 \cdot \left(t_k + 0,5 \cdot D \cdot \omega \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{m \cdot d}{P_s}} \right) = \\ &= 2 \cdot \left(3,5 \cdot 10^{-3} + 0,5 \cdot 27,7 \cdot 10^{-3} \cdot 100 \cdot \pi \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{1,29 \cdot 10^{-3} \cdot 100 \cdot 10^{-6}}{1,8}} \right) = 10,29 \cdot 10^{-3} \text{ m} \end{aligned}$$

Délku dráhy, po které se kartáč bude pohybovat v radiálním směru, určíme dosazením do rovnice (5.1). Čas pohybu kartáče τ při nadzvednutí prachovou částicí byl zvolen $1 \cdot 10^{-3}$ s :

$$\begin{aligned} s &= d \cdot \sin \left(\frac{\pi \cdot d \cdot \omega}{\lambda_s} \cdot \tau \right) = \\ &= 100 \cdot 10^{-6} \cdot \sin \left(\frac{\pi \cdot 100 \cdot 10^{-6} \cdot 100 \cdot \pi}{4,29 \cdot 10^{-3}} \cdot 1 \cdot 10^{-3} \right) = 4,63 \cdot 10^{-6} \text{ m} \end{aligned}$$

Vztah popisující vzájemný pohyb kluzných ploch kartáče a komutátoru získáme dosazením do rovnice (5.5). Zde budeme uvažovat zjednodušení, a to že $\omega_s = \omega$, neboť frekvenci mechanických pulzací by bylo velmi obtížné určit:

$$A = \frac{1}{\pi} + \frac{1}{2} \cdot \sin \omega_s \tau - \frac{2}{\pi} \cdot \sum \frac{\cos 2n\omega_s \tau}{(2n-1) \cdot (2n+1)} =$$

$$= \frac{1}{\pi} + \frac{1}{2} \cdot \sin(100 \cdot \pi \cdot 1 \cdot 10^{-3}) - \frac{2}{\pi} \cdot \sum_{n=1}^{3000} \frac{\cos(2 \cdot n \cdot 100 \cdot \pi \cdot 1 \cdot 10^{-3})}{(2n-1) \cdot (2n+1)} = 5,48 \cdot 10^{-3}$$

Nakonec je možné přistoupit k vyčíslení velikosti přechodového odporu. Ten není určen podle rovnice (5.6), ale po konzultaci s vedoucím práce pomocí rovnice (5.9). Ta se liší velikostí mocniny dráhy v radiálním směru:

$$R_p(\tau) = \left\{ R_{p \max} \left[\frac{\pi^2}{3} - 4 \cdot \sum (-1)^{n+1} \cdot \frac{\cos 2n\omega_s \tau}{n^2} \right] \cdot A \right\}^2 \cdot e^{-3,24 \cdot 10^{-4} \cdot s^{-0,4} \cdot (\log s)^2} \cdot$$

$$\cdot \left| \frac{s}{4 \cdot 10^{-6}} \cdot \sin \left(\frac{4 \cdot 10^{-6}}{s} \right) \right| + R_0 \quad (5.9) [25].$$

Hodnotu $R_{p \max}$ byla zvolena $10^9 \Omega$. Výsledná hodnota přechodového odporu po dosazení do rovnice (5.9) bude:

$$R_p(\tau) = \left\{ R_{p \max} \left[\frac{\pi^2}{3} - 4 \cdot \sum (-1)^{n+1} \cdot \frac{\cos 2n\omega_s \tau}{n^2} \right] \cdot A \right\}^2 \cdot e^{-3,24 \cdot 10^{-4} \cdot s^{-0,4} \cdot (\log s)^2} \cdot$$

$$\cdot \left| \frac{s}{4 \cdot 10^{-6}} \cdot \sin \left(\frac{4 \cdot 10^{-6}}{s} \right) \right| + R_0 =$$

$$= \left\{ 10^9 \left[\frac{\pi^2}{3} - 4 \cdot \sum_{n=1}^{3000} (-1)^{n+1} \cdot \frac{\cos(2 \cdot n \cdot 100 \cdot \pi \cdot 1 \cdot 10^{-3})}{n^2} \right] \cdot 5,48 \cdot 10^{-3} \right\}^2 \cdot e^{-3,24 \cdot 10^{-4} \cdot (4,63 \cdot 10^{-6})^{-0,4} \cdot (\log(4,63 \cdot 10^{-6}))^2} \cdot$$

$$\cdot \left| \frac{4,63 \cdot 10^{-6}}{4 \cdot 10^{-6}} \cdot \sin \left(\frac{4 \cdot 10^{-6}}{4,63 \cdot 10^{-6}} \right) \right| + R_0 = (3538,23 + R_0) \Omega$$

V tabulce 5.1 jsou uvedeny hodnoty nárůstu přechodového odporu pro různé hodnoty jmenovitých otáček brusky a velikosti prachových částic.

Tab. 5.1 Nárůst přechodového odporu R_{pp} v závislosti na průměru částice d

$R_{pp} [\Omega]$			
$n [\text{min}^{-1}]$	$d [\mu\text{m}]$		
	10	50	100
3000	154,85	1319,87	2164,70
6000	27937,72	126492,07	180197,96

Stejný výpočet byl proveden pro stejnosměrný motor pohánějící válcovací stolicí. Vstupní hodnoty byly:

- lamelová rozteč $t_k = 6$ mm,
- přítláčná síla kartáče byla zvolena jako střední hodnota přítláčné síly, $P_s = 8,55$ N,
- hmotnost kartáče $m = 16,8 \cdot 10^{-3}$ kg,
- průměr komutátoru $D = 2,27$ m,
- čas radiálního pohybu kartáče byl opět zvolen $\tau = 1 \cdot 10^{-3}$ s,
- hodnota odporu R_{pmax} byla opět zvolena $10^9 \Omega$,
- stroj pracuje v režimu se dvěma různými velikostmi jmenovitých otáček – $n = 40 \text{ min}^{-1}$ a $n = 80 \text{ min}^{-1}$.

Získané výsledky hodnot nárůstu přechodového odporu jsou uvedeny v tabulce 5.2.

Tab. 5.2 Nárůst přechodového odporu R_{pp} v závislosti na průměru částice d

$R_{pp} [\Omega]$			
$n [\text{min}^{-1}]$	$d [\mu\text{m}]$		
	10	50	100
40	2808,92	42563,10	79950,88
80	10578,70	72136,61	113437,67

Při výpočtu bylo využito několik zjednodušení:

- čas radiálního pohybu kartáče τ byl zvolen $1 \cdot 10^{-3}$ s. Se změnou otáček a velikosti prachových částic, se bude měnit i čas pohybu kartáče, ten byl však uvažován pro všechny rychlosti otáčení i velikosti prachových částic konstantní,
- mechanické pulzace kartáče ω_s , odpovídají úhlové rychlosti komutátoru ω ,
- hodnota odporu R_{pmax} byla zvolena $10^9 \Omega$, její velikost značně ovlivňuje výslednou hodnotu přechodového odporu,
- pro výpočet výsledné hodnoty přechodového odporu byl použit upravený vztah.

Přesné vyčíslení nárůstu přechodového odporu je velmi obtížné. Řada proměnných je nejasně definovaná a Prof. Muszalski se snažil pouze o teoretické odvození závislosti velikosti prachových částic vniklých do pracovního prostoru kluzného kontaktu s nárůstem přechodového odporu. Při uvažování výše zmíněných zjednodušení, lze dojít k závěru, že dojde k navýšení přechodového odporu v řádech jednotek až desítek k Ω .

Na základě těchto skutečností, lze formulovat následující závěry:

- vlivem nárůstu přechodového odporu a oddálení stykových ploch při vniknutí prachové částice do pracovního prostoru kluzného kontaktu, dojde ke snížení celkového počtu stykových ploch v kluzném kontaktu,
- to povede ke změně způsobu vedení proudu, velikosti proudového zatížení kartáče a nárůstu proudové hustoty v místech styku kluzného kontaktu,
- v kluzném kontaktu budou vznikat jiskrové a obloukové výboje, které povedou ke zvýšenému elektroerozivnímu opotřebením jednotlivých komponent kluzného kontaktu a jejich zvýšenému tepelnému namáhání,
- zvýšené opotřebením a namáhání povede k poruchovému stavu stroje a nucené odstávce pro zajištění nezbytné údržby. [1], [16].

6 IZOLAČNÍ MATERIÁLY

Mezi nejpoužívanější izolační materiály ve strojích patří izolanty vyrobené z anorganických látek. Důvodem jejich užití jsou dobré vlastnosti, kterých dosahují v podmínkách, ve kterých stroje pracují. Při vysokém tepelném a elektrickém zatížení u nich nedochází k fyzické, dielektrické, ani pyrochemické degradaci. Dosahují značné odolnosti proti vlivům elektrického oblouku a elektrickým výbojům, a také plazivým proudům. Mají velmi malou nasákavost, v některých případech i nulovou, dále jsou nehořlavé a s postupem času nedochází k degradaci jejich vlastností. Tyto velmi cenné elektrické a chemické vlastnosti jsou vykoupeny špatnými mechanickými vlastnostmi. Izolační materiály z anorganických látek se snadno lámou a mají obecně malou mechanickou pevnost, především při rázovém namáhání. Lepších mechanických vlastností se dosahuje přidáváním impregnantů a pryskyřičných pojiv. Tím ovšem dochází ke zhoršení tolik ceněných izolačních vlastností. V pasážích 6.1 a 6.2 jsou popsány vlastnosti vybraných anorganických materiálů a způsob jejich využití v izolacích elektrických strojů. [2].

V kapitole 6.3 jsou popsány epoxidové pryskyřice a v kapitole 6.4 silikonové materiály. Ty se využívají k impregnaci vodičů a izolačních materiálů pro točivé elektrické stroje.

6.1 Slída

Minerál vyznačující se krystalickou strukturou. Obvykle se dělí na tři podskupiny, a to muskovity, biotity a slídy lithné. Tyto skupiny zastřešují jednotlivé druhy slídy. Jejich rozdíl je dán druhem a mocninou iontových příměsí. V elektrotechnice se využívají pouze dva druhy slídy, muskovit a flogopit. [2].

Muskovit – slída draselná. Pokud neobsahuje příměsí je bezbarvá, sklovitě průhledná a stříbřitě lesklá. [2].

Flogopit – slída hořečnatá. Od muskovitu ho rozlišuje jantarové až tmavohnědé zbarvení. [2].

Slída se zpracovává štípáním na pružné a ohebné lístky o tloušťce až v jednotkách mikrometrů. [2].

6.1.1 Vlastnosti

Muskovit má větší pevnost a tvrdost, flogopit je ohebnější. Slída je mírně navlhavá, aby se tedy dosáhlo ideálních dielektrických vlastností, musí se vysoušet. Dále se vyznačuje špatnou tepelnou vodivostí a vysokou tepelnou odolností, flogopit je stabilní do teploty 1000 °C, muskovit do teploty 600 °C. Při překročení těchto teplot dojde k uvolnění chemicky vázané vody a slída se nadouvá, získá stříbřitou

barvu, měkne a křehne. Pokud je takto vysoké teplotě vystavena dlouhodobě, nakonec se rozpadá. Obě slídy jsou značně chemicky odolné. [2].

Velké hodnoty elektrické pevnosti a měrného vnitřního odporu – kolmo k vrstvám, ve směru vrstev jsou její vlastnosti podstatně horší. Elektrická pevnost je závislá na tloušťce slídového materiálu, a také na typu napětí a celkovém času jeho působení. S teplotou se mění jen málo, ale při překročení teploty 300 °C dochází ke značnému poklesu. [2].

Její ztrátový činitel $tg \delta$ je silně závislý na teplotě a kmitočtu napětí. Při síťovém kmitočtu s rostoucí teplotou roste i ztrátový činitel, naopak při vysokých kmitočtech s rostoucí teplotou ztrátový činitel klesá. [2].

Měrný vnitřní odpor se mění s teplotou, směrem vrstev a vlhkostí. Při nízkých teplotách má lepší vlastnosti muskovit, při vysokých teplotách naopak flogopit. [2].

6.1.2 Komutátorový mikanit

Bývá vyráběn jako mezilamelová izolace komutátoru, na jehož výrobní kvalitu bývají kladeny nejvyšší nároky z důvodu kombinovaného namáhání, kdy na něj působí velký tlak i teplota. Kvůli náročným pracovním podmínkám musí mít co nejmenší stlačitelnost, s čímž přímo souvisí malý obsah pojiva, které by mohlo při vysokých tlacích a teplotách vytékat z komutátoru. Tloušťka výsledného materiálu musí být stejná po celé ploše, proto se brousí a tvaruje na setiny milimetrů. V některých případech se ještě polepuje papírem nebo tkaninou. [2].

Pro zmíněnou aplikaci mezi lamelami komutátoru je výhodný měkký mikanit flogopitový. Vlivem tření uhlíkových kartáčů se opotřebovává téměř stejnou mírou jako měděné lamely a komutátor se tedy nemusí vyškrabovat. [2].

6.1.3 Prokládací mikanit

Vyrábí se z muskovitu nebo flogopitu přidáním malého množství pojiva. Využívá se k oddělení vodičů v elektrických strojích nn a vn, které pracují při vysokých teplotách. [2].

6.1.4 Mikanit k ražení

Je vyráběn z muskovitu i flogopitu, přidáním většího množství pojiva, přibližně deset procent. Ražením a stříháním se z něj vyrábí izolace jednotlivých součástí elektrických přístrojů na nízké i vysoké napětí. [2].

6.1.5 Ohebný mikanit

Opět se vyrábí z muskovitu i flogopitu, pojivo tvoří až dvacet pět procent výsledného materiálu. Tím je dosažena dobrá ohebnost za studena i za tepla.

Mikanit se na závěr ještě potáhne skleněnou nealkalickou tkaninou, kterou se dosáhne větší pevnosti. Takto upravený materiál se využívá k izolaci drážek a vinutí v elektrických strojích, k ovíjení cívek a kovových součástí. [2].

6.1.6 Formovací mikanit

Je vyráběn z muskovitu i flogopitu, za přidání velkého množství pojiva. Využívá se k lisování mikanitových manžet, které se používají k izolaci věnce lamel od nosných a stahovacích částí komutátorů točivých strojů. [2].

6.1.7 Mikafólium

Svitkový izolant vyráběný lepením štípaných plátek slídy, flogopitu nebo muskovitu, na podkladový materiál, například papír. Při teplotě okolí je ohebný, po zahřátí tvárný a lepidelný. Využívá se k izolaci tyčových vinutí statorů a rotorů velkých elektrických strojů. [2].

6.1.8 Slídová páska

Vyrábí se stejným způsobem jako mikafólium, jenom podkladovým materiálem není papír, ale hedvábná tkanina nebo skleněná nealkalická tkanina. Je velmi dobře tvárná a ohebná i zastudena. Využívá se jako izolace statorových vinutí strojů na vysoké napětí a také jako izolace závitů rotorových cívek turbogenerátorů. [2].

6.2 Sklo

Jde o pevné amorfní látky ve stavu, který vznikne ztvrdnutím přechlazené kapaliny. Při ztvrdnutí kapaliny zamrzla také struktura kapaliny, a tu si sklo uchovává i při normální teplotě. Podmínkou je, aby byl přechod mezi kapalným a skelným stavem vratný. [2].

V závislosti na chemickém složení lze vyrobit skla s různými vlastnostmi. Skla používaná v elektrotechnice jsou většinou složena z kysličníků. Ty se dají dle postavení ve struktuře skla rozdělit na čtyři základní skupiny. První skupinou jsou látky, jejichž kationty tvoří s anionty kyslíku skelnou mříž. Druhou skupinu tvoří látky, které nejsou schopny sami vytvořit skelnou mříž, ale na její tvorbě se podílejí. Třetí skupinu opět tvoří látky, které nejsou schopny sami skelnou mříž vytvořit, ale mají schopnost tuto mříž pozměnit, a tím ovlivnit výsledné vlastnosti materiálu. Poslední skupinu tvoří látky, které jsou schopny výslednou podobu mříže pozměnit jako třetí skupina látek, nebo se podílet přímo na její tvorbě jako druhá skupina látek. Dále skla obsahují látky ovlivňující kvalitu výrobního procesu a výsledný vzhled skla, jako příměsi urychlující tavení skla, barviva a jiné. [2].

Název skla se odvozuje mimo jiné z chemického složení. Klíčová sklotvorná látka, bývá vždy na konci názvoslovného označení. Elektrotechnická skla jsou ve většině případů křemičitá. Dále se vyrábějí skla s obsahem kysličníku vápenatého a sodného a také oxidu boritého. [2].

6.2.1 Vlastnosti

Mechanické vlastnosti jsou závislé na kovalentních a iontových vazbách ve struktuře skla. Pevnost skla roste s počtem iontů s menším poloměrem. Pevnost v tahu se pohybuje od $30000 \text{ kp}\cdot\text{m}^{-2}$ u silikátových skel až po $120000 \text{ kp}\cdot\text{m}^{-2}$ u křemenného skla. Pevnost v tlaku bývá až patnáctinásobně větší a dosahuje hodnot až $1000000 \text{ kp}\cdot\text{m}^{-2}$. [2].

Tepelné vlastnosti skel, a především tepelná odolnost skel, se odvíjí především od součinitele teplotní roztažnosti, a dále také závisí na tvaru a rozměrech výrobku. Nejlepší tepelnou odolnost má čisté křemenné sklo, které má nejmenší součinitel roztažnosti, nejslabší tepelnou odolnost mají měkká alkalická skla. [2].

Chemická odolnost závisí na chemickém složení skla a fyzikálním stavu. Žádný druh skla však není zcela chemicky odolný a postupem času degraduje. [2].

Elektrické vlastnosti se odvíjí od chemického složení a okolního prostředí, ve kterém skla pracují. Měrný vnitřní odpor se pohybuje v hodnotách od $10^{14} \Omega\cdot\text{cm}$ až po $10^{20} \Omega\cdot\text{cm}$. Jeho velikost se výrazně mění s teplotou skla. U skel se proto udává teplota TK 100. Jedná se o teplotu, při které dosáhne hodnota měrného vnitřního odporu $10^8 \Omega\cdot\text{cm}$. Běžně se tato hodnota udává namísto měrného odporu. Velikost ztrátového činitele se odvíjí od množství alkalických kysličníků. Dále se velmi mění v závislosti na kmitočtu a teplotě. Elektrická pevnost se u skel pohybuje v rozmezí od 2000 do $5000 \text{ kV}\cdot\text{cm}^{-1}$. Největší elektrickou pevnost má stejně jako při tepelném namáhání sklo křemičité.

6.2.2 Skleněná vlákna

Důležitý izolant, vyrábějí se tažením taveniny skla. Průměr vlákna závisí na výrobní technologii. Samostatné tažené vlákno se nazývá fibrilka. Ty se dále zpracovávají do pramenů, motouzů, tkanin, přízí a jiných polotovarů. Skleněné příze se po impregnaci a zpevnění kvalitním lakem využívají k izolaci vinutí točivých strojů, které jsou silně tepelně namáhány nebo přetěžovány. Skleněné tkaniny se využívají jako podkladový materiál pro izolaci do drážek, a jako izolace cívek a vinutí strojů. [2].

6.3 Epoxydové pryskyřice

Jedná se o umělé plastové materiály, spadající do skupiny polykondenzačních látek. Jsou vyráběny kondenzací dianů a epichlorhydrinů nebo dichlorhydrinů v alkalickém prostředí. Střídavým působením kondenzace a adice vzniká tekutá až tuhá průsvitná slabě žlutá hmota s bodem měknutí mezi 50 °C až 180 °C. K vytvrzení hmoty jsou využívány tužidla. Ty vyvolají chemickou reakci vedoucí k prostorovému zesíťování makromolekul v tuhou látku. [4], [5].

6.3.1 Vlastnosti

Epoxydové pryskyřice mají znamenité adhezivní vlastnosti, a to především k těžce lepitelným materiálům. Dále se vyznačují nepatrnou navlhavostí, dobrou mechanickou pevností ve smyku, houževnatostí a některé druhy i dobrou elasticitou. [4], [5].

Jsou odolné proti chemickým vlivům zředěných kyselin, hydroxidů, benzínů a alkoholů. K jejich degradaci ovšem vede působení acetonu a chlorovaných uhlovodíků. [4], [5].

Tepelná odolnost se liší u jednotlivých typů od -30 °C do 150 °C. Jejich rozklad nastává při překročení teploty 340 °C. [4], [5].

Epoxydové pryskyřice mají značnou elektrickou pevnost (až 35 kV·mm⁻¹) a velkou hodnotu povrchového odporu. Zároveň vykazují dobrou odolnost proti plazivým proudům. [4], [5].

6.3.2 Použití

V elektrotechnice se používají v řadě aplikací. Používají se k lakování, zalití celých komponent nebo jako lepidla. V elektrických točivých strojích se používají jako pojivo při výrobě izolačních materiálů. [4], [5].

6.4 Silikonové pryskyřice

Stejně jako epoxidové pryskyřice spadají do umělých polymerních izolačních materiálů. Představují přechod mezi ústrojnými a neústrojnými látkami. Jedná se o sloučeniny křemičitých a organických látek. Základním stavebním řetězcem silikonů jsou atomy kyslíku a křemíku, ke kterým se vážou uhlovodíky. Vyrábí se sloučením metylchloridu s čistým křemíkem za přítomnosti katalyzátoru při teplotách pohybujících se kolem 350 °C. Jejich reakcí vzniká sloučenina monochlorsilan, která na sebe při styku s vodou váže vodík a chlor. Z vody zůstává hydroxylová skupina OH, která nahradí atom chlóru za atom kyslíku a změní tak silan na silanol. Při pokračující kondenzaci se slučují jednotlivé molekuly silanu, zároveň dochází k vylučování vody a vznikají tak makromolekuly siloxanu. Podle

charakteristiky a délky sítí jeho molekul má výsledný silikon různou strukturu a složení. Při vytvoření krátkých řetězců je výsledným produktem silikonový olej, při delším zesíťování molekul silikonový kaučuk a při nejvyšším stupni zesíťování jeho makromolekul vzniká silikonová pryskyřice. [4], [5].

6.4.1 Vlastnosti

Vyznačují se vysokou tepelnou odolností a lze je použít v rozsahu teplot od -90 °C do +300 °C. Jejich mechanické a fyzikální vlastnosti se s teplotou téměř nemění. [4], [5].

Dielektrické vlastnosti se s teplotou a frekvencí také téměř nemění. Obecně mají silikony velkou elektrickou pevnost. [4], [5].

Mají výbornou odolnost proti ozáření a jsou chemicky netečné a nejedovaté. [4], [5].

6.4.2 Použití

V elektrotechnice jsou především využívány jako silikonové laky při výrobě elektrických strojů i přístrojů k izolaci vodičů. Také se využívají k zalití a zapouzdření elektrotechnických součástí. Stejně jako epoxydové pryskyřice se využívají jako pojivo při výrobě izolace do točivých elektrických strojů. [4], [5].

7 IZOLAČNÍ SYSTÉMY A JEJICH DEGRADACE

Jednou ze základních částí každého točivého elektrického stroje je izolační systém. Bez něj by nedokázal žádný stroj pracovat. Tento systém chrání stroj před vnějšími vlivy a také proti vnitřním poruchám mezi jeho živými částmi. Proto jsou kladeny vysoké nároky na kvalitu jeho provedení. Vykáže-li stroj poruchu, je to z největší pravděpodobností zaviněno vadou v izolačním systému. To vede k havarijní odstávce stroje a ekonomickým ztrátám vyplývajícím z jeho nečinnosti. S ohledem na závažnost těchto příčin se na strojích pravidelně provádějí diagnostická měření a zkoušky, na základě kterých se vyhodnocuje stav izolačního systému a jeho změny. Pomocí těchto měření je možné určit přibližnou dobu vzniku poruchy. Díky tomu je možné plánovat údržbu stroje tak, aby nedocházelo k nežádoucím odstávkám vlivem poruchy. [6].

7.1 Požadavky na izolační systém

S výkonem stroje roste i vliv namáhání izolačního systému. Kvalita provedení izolačního systému je spolu s konstrukčním řešením stroje rozhodující veličinou výsledných vlastností stroje a jeho spolehlivého provozu. Izolační systém jako celek se skládá z několika elektroizolačních materiálů. Je tedy nutný patřičný výběr jednotlivých materiálů a způsobu jejich opracování, neboť všechny tyto aspekty se promítanou na celkové životnosti daného zařízení. Proto jsou na vlastnosti izolačních materiálů kladeny značné nároky z hlediska:

- elektrického

- velká elektrická pevnost,
- velký izolační odpor,
- malý ztrátový činitel a dielektrické ztráty,
- odolnost proti plazivým výbojům,

- mechanického

- odolnost v tahu i tlaku,
- potřebná pružnost a ohebnost,
- odolnost proti vibracím,

- tepelného

- velká tepelná odolnost,
- nehořlavost,
- malá tepelná roztažnost,
- dobrá tepelná vodivost,

- vnějších vlivů

- dobrá odolnost vůči vlhkosti, záření, chemickým látkám,

- dobrá odolnost vůči nečistotám a prachovým částicím. [6], [25].

Cílem při návrhu izolačního systému je dosažení co nejmenších rozměrů, tedy tloušťky izolace, při zachování co nejlepších izolačních vlastností a dlouhé životnosti izolace. Při volbě izolačního systému je proto nutné znát požadované výchozí podmínky stroje:

- pracovní vlastnosti izolantu,
- vliv technologie na charakter izolantu,
- podmínky pracovního prostředí a provozní podmínky stroje,
- požadavek na životnost stroje a jeho provozní bezpečnost,
- ekonomický požadavek. [6], [25].

7.2 Stárnutí izolace

I přes vysoké nároky na vlastnosti a kvalitu izolačních materiálů, dochází postupem času k jeho nevratným změnám vlivem stárnutí. Vlivem stárnutí se mění vlastnosti a charakter izolačního systému. Dochází ke zhoršení elektrických i mechanických vlastností izolantů. Za procesy vedoucí ke změně vlastností izolace stojí nejen přirozené pochody, které se ve stroji dějí během jeho provozu – vibrace, cykly ohřevu a chladnutí, působení elektrického pole, dynamické rázové zatížení, a další jevy vyskytující se během provozu. [22], [25].

Značný vliv na rychlost stárnutí izolace mají ale také vnější vlivy – vlhkost, výpary chemických látek, záření a v neposlední řadě nečistoty a prachové částice. Celková životnost izolace se odvíjí od intenzity působení jednotlivých vlivů. Ty se dají rozdělit do čtyř skupin z hlediska jejich původu. Jde o namáhání tepelné, mechanické, elektrické a namáhání vlivem okolního prostředí. A prachové částice přispívají větší nebo menší mírou ke všem čtyřem uvedeným způsobům. [22], [25].

V následujících kapitolách jsou specifikovány vlivy vybraných namáhání na izolační systém.

7.3 Namáhání vnějšími vlivy

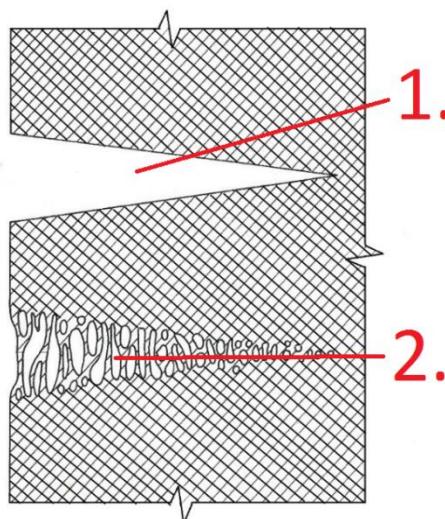
U každého dielektrika dojde při určité úrovni napětí k průrazu. Jeho odpor se zmenší na nulovou hodnotu a vznikne oblouk. U pevných dielektrik dochází k průrazu v místech, která jsou mechanicky poškozená – trhliny, třecí místa, póry, nebo vzduchové bubliny. Tyto nedokonalosti ve struktuře materiálu vznikají buď poškozením při provozu stroje, nebo chybou při výrobním procesu. [8].

Jednou z veličin působících mechanickým vlivem na povrch izolačního systému jsou prachové částice. Ty vnikají do pracovního prostoru stroje spolu s chladícím médiem, většinou okolním vzduchem a díky svým malým rozměrům

jsou schopné proniknout celým strojem. Průchod strojem může být např. laminární a částice budou narážet do některých částí uvnitř stroje, mimo jiné na izolaci čel vinutí. V závislosti na druhu aplikace a pracovním prostředí, budou mít různou teplotu, geometrii a rozměry. Podle těchto parametrů budou různou měrou působit na izolační systém stroje. [25].

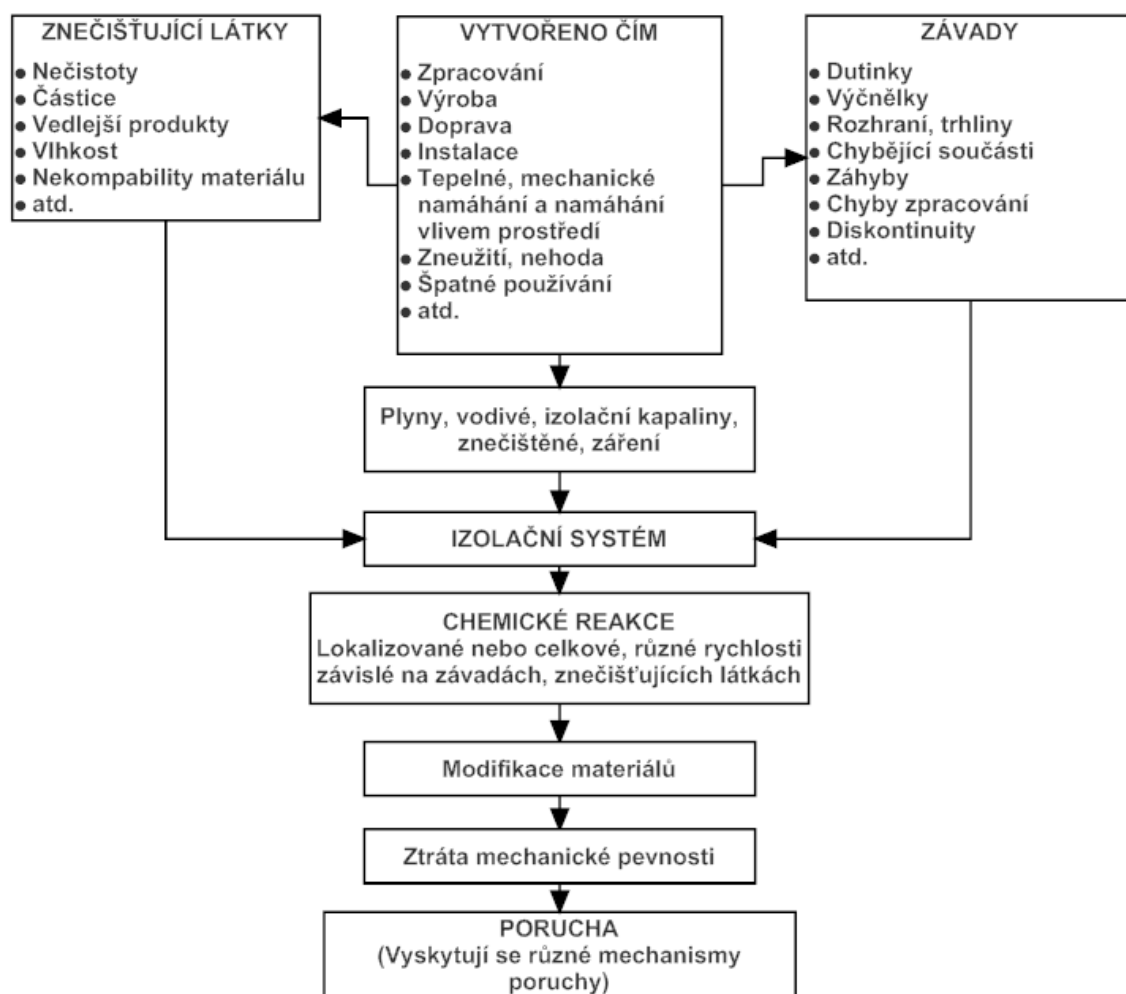
Pokud budeme uvažovat nejhorší případ, tedy částice s ostrými hranami, vysokou teplotou a letící vysokou rychlostí, bude tato částice vlivem vysoké kinetické energie při nárazu do čel vinutí působit mechanické a tepelné namáhání izolace. To se při jejich dlouhodobém působení projeví narušením povrchové struktury. Na poškozeném povrchu izolace se snadněji bude zdržovat vlhkost i další prachové částice. [25].

Dopad vnějšího poškození vlivem prachových částic lze dobře dokumentovat na izolačních materiálech na bázi polymeru. Na izolaci působí vlivem tepelných přechodů, mechanického zatížení stroje a elektrického pole řada sil. Jejich negativní účinek se bude projevovat především v místech izolace, které budou mít oslabenou povrchovou strukturu vlivem prachových částic. Tyto místa na povrchu izolace budou sloužit jako jakési zárodky větších fyzických narušení materiálu izolace. V první fázi dochází ke vzniku puklin, pozice 1 na obrázku 7.1, které mají narušený prostor vyplněný materiálem, který je stále vázaný na strukturu nosného izolačního materiálu a nevedou tedy ještě k destrukci izolantu. Vlivem dalších namáhání dojde ke zničení vazeb uvnitř pukliny a v izolantu se objeví trhlina, pozice 2 na obrázku 7.1. Se vznikem trhliny dojde ke značnému oslabení mechanické pevnosti izolantu v okolí jejího místa. To ještě umocňuje zvětšené tepelné a elektrické namáhání, které se v místě oslabené izolace objeví. [25].



Obr. 7.1 Zobrazení pukliny a trhliny ve struktuře izolačního materiálu (převzato z [25].)

V případě, že se v okolí stroje budou vyskytovat prachové částice bez ostrých hran a agresivní geometrie, letící pomalou rychlostí, nebude jejich vlivem docházet k narušení struktury izolantů. I přesto bude mít jejich vliv na izolační stav stroje značný dopad. Za těchto podmínek totiž budou částice ulpívat uvnitř stroje na jeho jednotlivých částech. V kombinaci s uhlíkovým prachem vznikajícím při činnosti kluzného kontaktu může dojít ke značnému snížení izolačního stavu stroje, v krajním případě může dojít i ke zkratu na kostru. Vývojový diagram podle normy ČSN EN 60505 zobrazující postup degradace na základě vnějších vlivů je znázorněn na obrázku 7.2. [25].



Obr. 7.2 Vývojový diagram dopadu vnějších vlivů na izolační systém (převzato z [22].)

Elektrické stroje jsou v mnoha případech vystaveny vysoké vlhkosti a výparům chemických látek zároveň. Pokud jsou v atmosféře obsaženy exhalace plynů jako NH_3 a HCl , chovají se jednotlivé složky v atmosféře jako individua a nedochází s vodní párou k žádné vzájemné reakci. Situace se změní, pokud se voda vyskytuje v kapalně podobě na např. na povrchu izolantu nebo v jeho pórech.

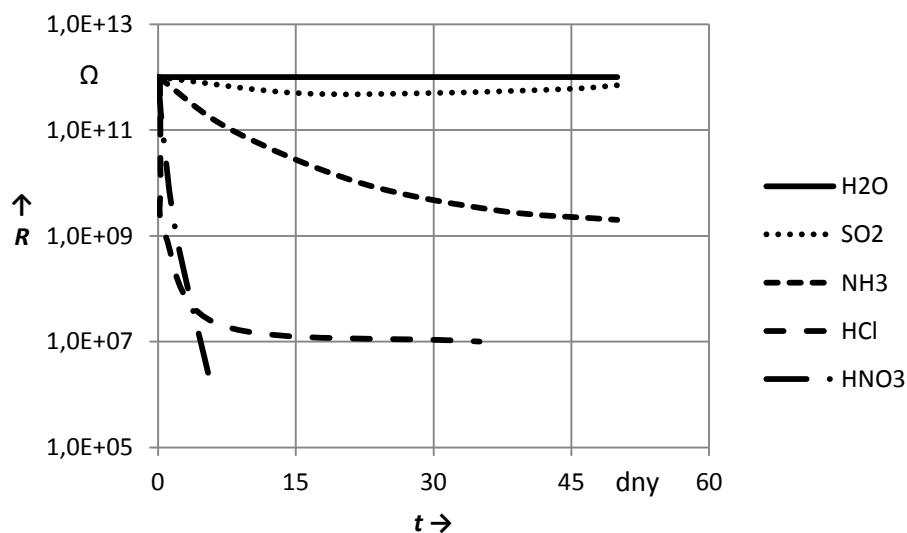
Pokud se v atmosféře vyskytují plynné látky HCl a NH₃, interakcí s vodním kondenzátem dochází k intenzivnímu rozpouštění kyseliny solné a čpavku, které vedou ke vzniku elektricky nabitých částic, a na povrchu izolantu se tvoří elektrolyt. [15].

Plyny SO₂ naproti tomu v přítomnosti vodní páry oxidují na H₂SO₄. Tento proces značně urychlují katalyzátory na bázi kovových sloučenin. Tuto roli mohou plnit různé kovové i nekovové prachové částice. [15].

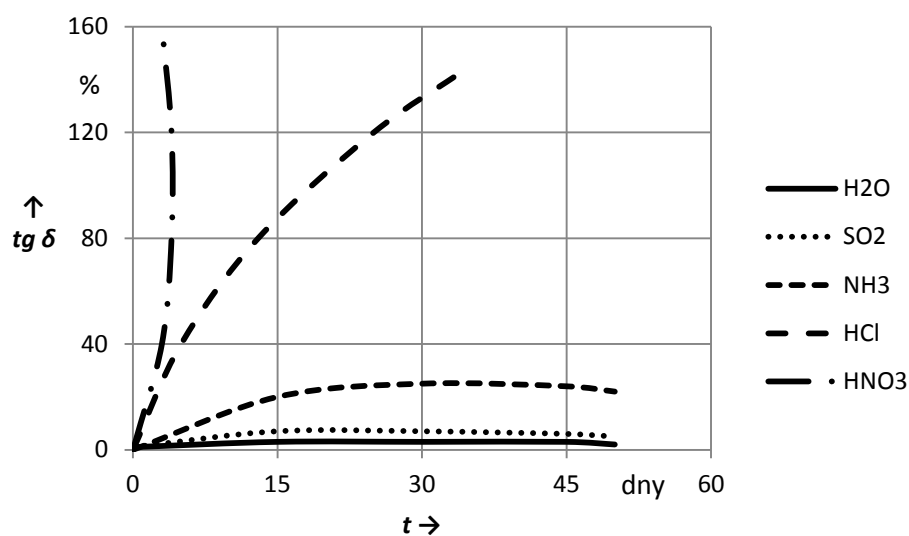
Kyslíčníky dusíku HNO₃ reagují s kapalnou vodou, rozpouštějí se v ní a dochází ke vzniku kyseliny dusičné. [15].

Plynný chlor Cl₂ při kontaktu s vodní párou nereaguje, k chemické reakci dochází až s kapalnou vodou. V té se plyny rozpouštějí a výsledkem hydrolyzy jsou kyselina solná a kyselina chlorná. Kyselina solná je značně silný elektrolyt a kyselina chlorná působí oxidačním účinkem. [15].

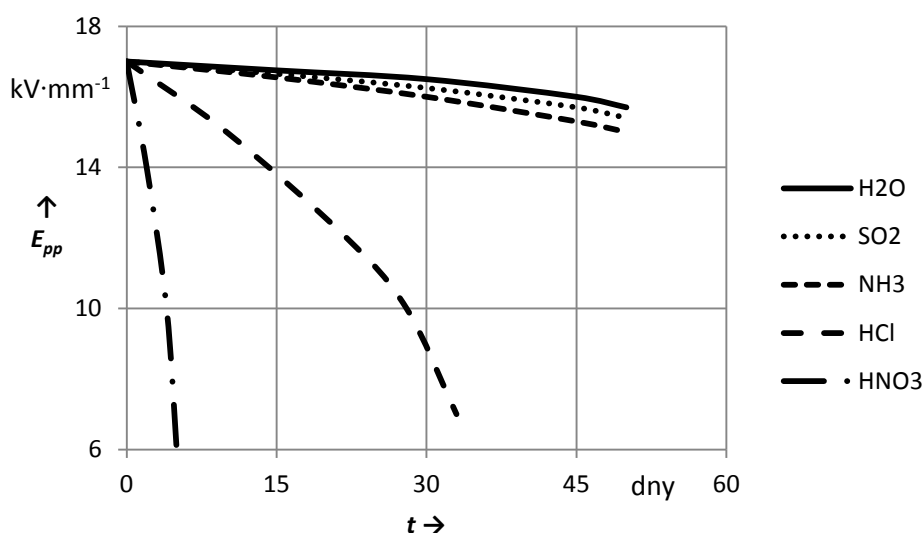
Jak je patrné, vznik iontů ve většině případů vyžaduje kapalnou vodu. Ta se ve strojích může vyskytovat jako kondenzát na povrchu izolačního materiálu nebo v jeho pórech. Již při difundování čisté vodní páry do izolantu, dochází při její kondenzaci k slabému zvýšení vodivosti vlivem cizích prachových částic. Při reakci s rozpustnými plyny narůstá počet disociovaných molekul a zvyšuje se vodivost elektrolytu. Tato úměra ovšem platí jen v určitém rozsahu koncentrací, neboť závislost vodivosti na koncentraci rozpuštěných látek má limitní charakter. Na obrázcích 7.1, 7.2 a 7.3 jsou zobrazeny závislosti elektrických vlastností epoxidové pryskyřice Epodur při působení jednotlivých agresivních atmosfér. [11], [15].



Obr. 7.3 Závislost odporu na době působení agresivních atmosfér (převzato z [15].)



Obr. 7.4 Závislost ztrátového činitele na době působení agresivních atmosfér (převzato z [15].)



Obr. 7.5 Závislost elektrické pevnosti na době působení agresivních atmosfér (převzato z [15].)

7.4 Tepelné namáhání

Největší vliv na životnost izolačního systému stroje má jeho tepelné namáhání. V elektrických strojích vznikají při jejich provozu tepelné ztráty. Požadavek maximálního objemového využití elektrického stroje při daných rozměrech vede k maximálnímu využití aktivních částí stroje a tím i k větším elektrickým ztrátám vznikajícím ve stroji, což se může v konečném důsledku projevit na nižší účinnosti stroje a nárůstu tepelného namáhání. Mezi základní elektrické ztráty ve stroji patří

ztráty v mědi, železe, mechanické a dodatečné. Tyto ztráty vedou k ohřívání částí stroje, ve kterých vznikají. [6]

Při běžném provozu stroje dochází k rozpínání izolace vlivem provozního kolísání teplot. Tyto změny jsou základním faktorem při tepelném namáhání izolace, byť nemají z pohledu celkového dopadu na stroj takový význam. Jeden z faktorů při návrhu stroje, který se zohledňuje, je oteplení stroje při provozním zatížení a v provozních podmínkách. Tomu se uzpůsobuje tepelná třída izolace. Ta udává maximální provozní teplotu izolace, při které je zaručena její bezpečná funkce a životnost za daných podmínek. [6], [12].

Tepelnou odolnost izolace lze hodnotit několika způsoby. Jedním ze způsobů je hodnocení na základě chemických a fyzikálních změn v materiálu, které vedou ke zhoršení podstatných vlastností izolačního materiálu. Tyto změny budou nastávat především v těch místech izolačního systému, které budou proti zbývající části oslabené nebo poškozené. To může zapříčinit mechanické poškození vibracemi stroje, zvýšené namáhání vlivem zkratového proudu nebo přepětí a také vlivem prachových částic, jak bylo popsáno v předešlé kapitole. [6], [12].

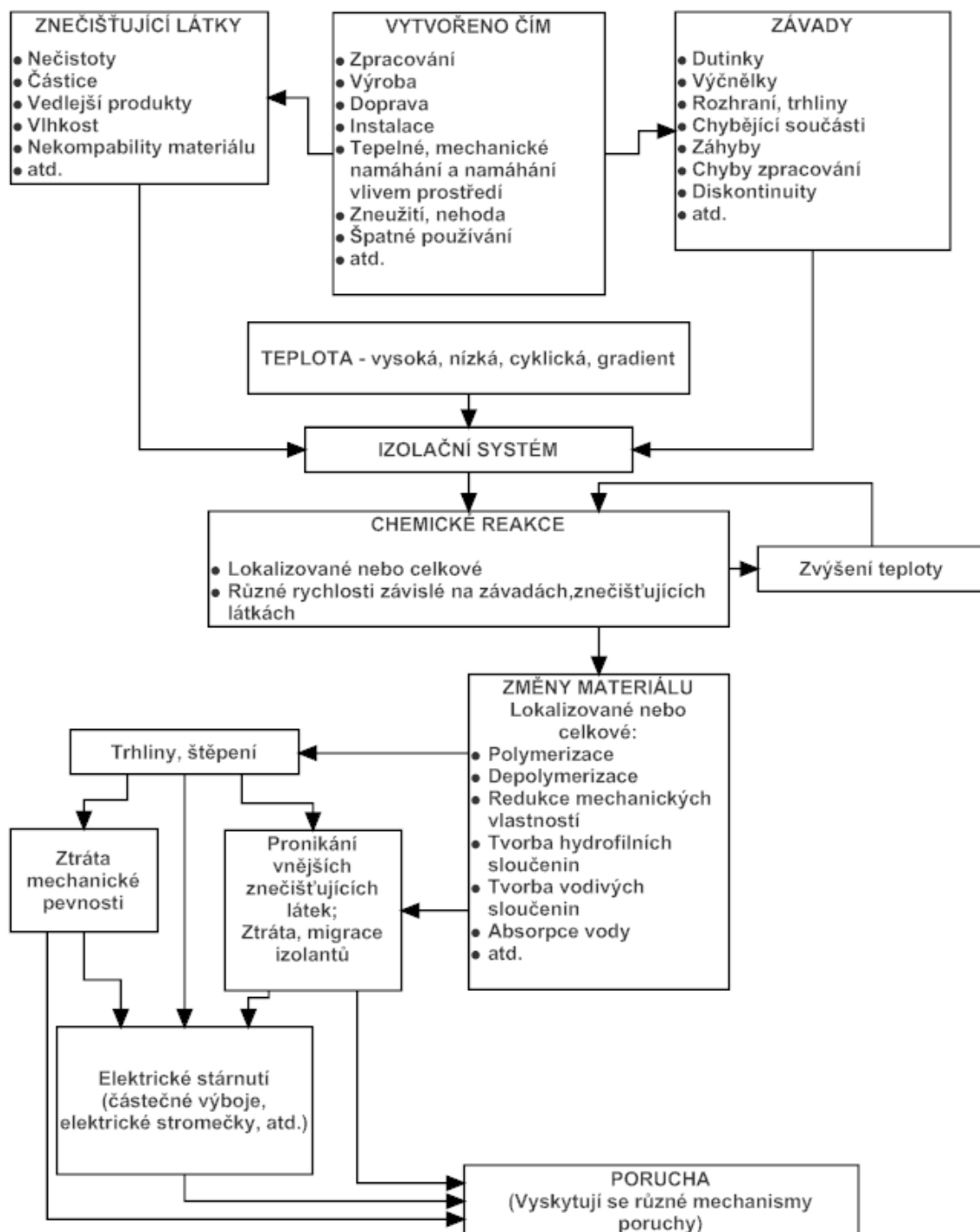
Zvýšené tepelné namáhání se projevuje vznikem dějů, jejichž vlivem dojde ke změně struktury a integrity izolace. V materiálu dochází k termooxidačním pochodům, které vedou ke snížení mechanické pevnosti, ztráty pružnosti a uvolnění těkavých látek. To se projeví vznikem plynových dutinek ve struktuře materiálu nebo mezi izolací a vodičem. [6], [12].

Vztah popisující kvantitativně tepelné stárnutí materiálu definoval Montsinger. Definoval ho na základě svých pokusů s izolací a vyjádřil ho pomocí rovnice:

$$T = T_0 \cdot e^{-A \cdot \Theta} \quad (7.1) [6].$$

kde T [s] je střední doba života,
 Θ [°C] je teplota,
 A je materiálová konstanta.

Ve svých pokusech zkoumal životnost izolačních materiálu při teplotách pohybujících se v rozmezí od 80 °C do 104 °C. Zjistil, že při nárůstu teploty o 8 °C se zkrátí životnost izolačního materiálu na polovinu. Naopak při snížení teploty o 8 °C se životnost materiálu prodlouží dvojnásobně. Ke stejným závěrům došel nezávisle na sobě i Burianov. Vývojový diagram vlivu tepelného namáhání dle normy ČSN EN 60505 je znázorněn na obrázku 7.6. [6].



Obr. 7.6 Vývojový diagram dopadu tepelného namáhání na izolační systém (převzato z [22].)

7.5 Elektrické namáhání

V izolačním systému vinutí strojů se mohou vyskytovat místa, kde má izolační materiál nehomogenní dielektrické vlastnosti. Tyto místa vznikají nedokonalostí technologie výroby izolačních materiálů a zvýšeným namáháním izolace

mechanickým zatížením, tepelným zatížením a působením vnějších vlivů. V těchto místech působí elektrické pole zvýšenou intenzitou. Pokud je toto místo vyplněno plynem, má podstatně menší elektrickou pevnost než pevný izolant. Pokud intenzita elektrického pole působícího v místě s plynným dielektrikem překročí jeho elektrickou pevnost, dojde v něm k průrazu. Tyto lokální průrazy se nazývají částečné výboje. Částečné proto, neboť výboj nepřeklene celou dráhu mezi elektrodami. Zápalné napětí je dáno Paschenovým zákonem:

$$U_z = \frac{B \cdot p \cdot d}{\ln \frac{A \cdot p \cdot d}{\ln \left(1 + \frac{1}{\gamma_e} \right)}} \quad (7.2) [6].$$

kde A [$\text{m}^2 \cdot \text{J}^{-1}$], B [$\text{m}^2 \cdot \text{C}^{-1}$] jsou konstanty závislé na teplotě,
 p [Pa] je tlak plynu,
 d [m] je vzdálenost,
 γ_e je součinitel udávající počet elektronů vzniklých na katodě působením jednoho elektronu z prostoru mezi elektrodami

Celková energie přenesená částečným výbojem se odvíjí od skutečných rozměrů, dielektrických vlastností, povrchového znečištění a tlaku plynu v místě narušení izolace. Na točivých strojích lze najít řadu míst, kde se tyto výboje v různé míře mohou vyskytovat:

- Výboje uvnitř materiálu
 U polymerních izolantů vznikají při výrobě izolačního materiálu dutinky vyplněné plynem.
- Výboje v drážkách
 Vlivem tepelného a mechanického namáhání může dojít k uvolnění izolace od povrchu drážky nebo poškození ochranného nátěru.
- Výboje na koncích vinutí
 Vlivem nevhodně rozloženého elektrického pole na rozhraní mezi vinutími, poškozením ochranných nátěrů.
- Výboje na povrchu izolace
 Vlivem vodivých prachových částic může dojít ke koncentraci částečných výbojů v určitém místě na povrchu izolace. Tyto výboje mohou vést k vytvoření vlásenkových dírek v izolačním materiálu. [8], [9], [25].

Pokud se zvyšuje hodnota napětí přiloženého k izolaci, zvyšuje se i napětí např. v dutinkách. Při překročení hodnoty zápalného napětí U_z dojde v dutince k průrazu. Během elektrického průrazu dojde k rozštěpení neutrálních molekul

plynu. Ionty vzniklé chemickou reakcí se pohybují k povrchu dutiny. Směr jejich pohybu závisí na jejich vlastní polaritě a na polaritě přiloženého napětí. Ionty se stejným nábojem se hromadí na opačných stranách dutinky, čímž vytvářejí uvnitř dutinky elektrické pole opačného směru, než je elektrické pole vnější a tím přispívají ke snížení napětí na dutince. Pokud napětí uvnitř dutinky klesne na hodnotu zhasací hodnotu napětí U_h , výboj uhasne. Pokud se napětí vnějšího elektrického pole stále zvyšuje, narůstá i vnitřní napětí dutinky, a pokud opět dosáhne hodnoty zapalovacího napětí U_z , dojde znovu k průrazu a celý proces se opakuje. [6]

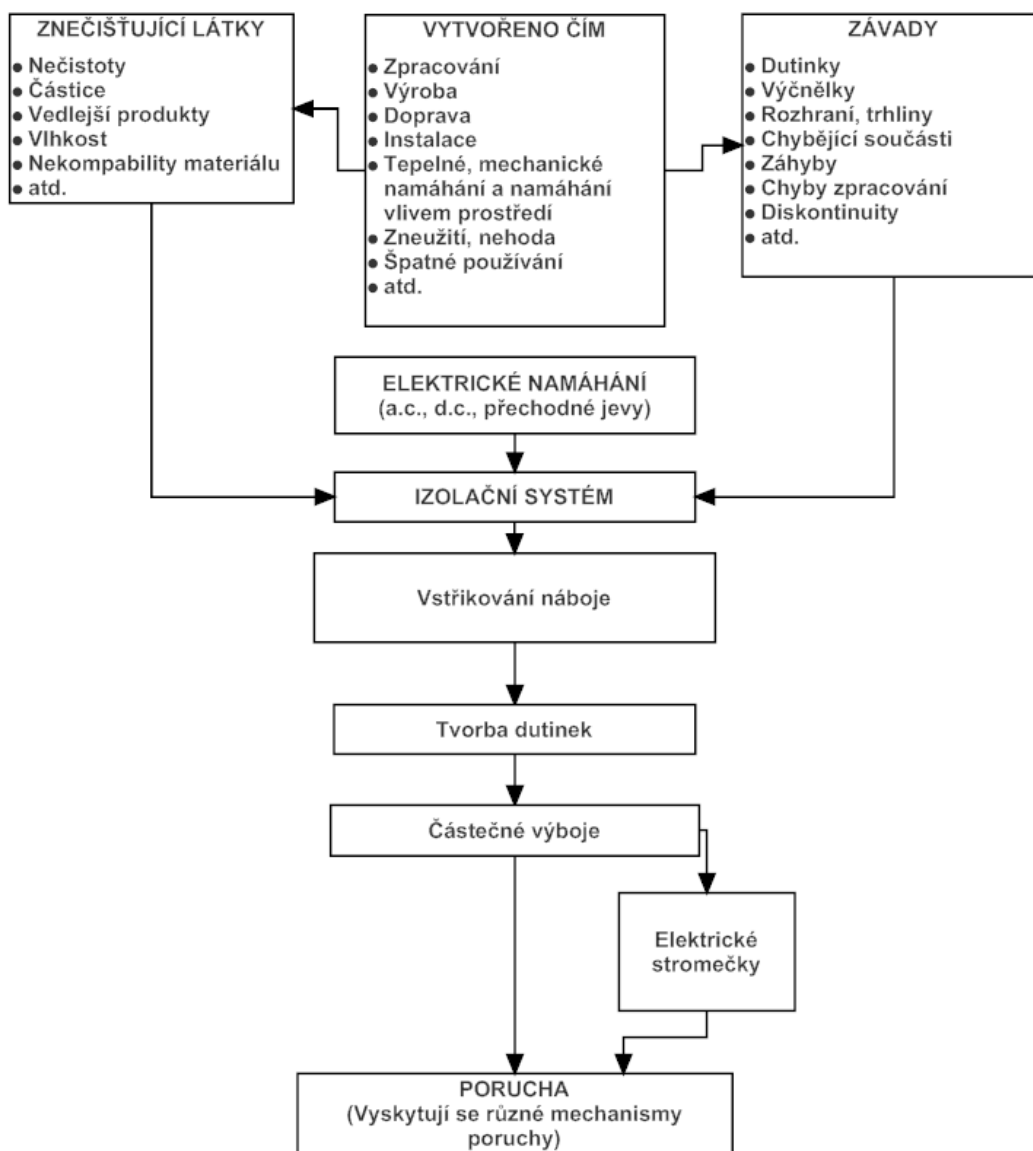
Pokud na izolaci působí napětí se sinusovým průběhem, napětí v dutince po přechodu nulovou hodnotou se bude zvyšovat až na hodnotu zápalného napětí U_z s opačným znaménkem. Výboje v dutinkách se tedy při přiloženém střídavém napětí mohou opakovat každou půlperiodu. Jejich množství závisí na rozpětí kladného a záporného vrcholu napětí v dutinkách. [6]

Částečné výboje vedou k degradaci mechanických a tepelných vlastností izolace v místě výbojů. Izolační materiály z anorganických sloučenin jsou proti jejich působení odolné, velmi negativně ovšem působí na izolační materiály organického původu:

- Elektro erozivní působení iontů
Ionty vznikající při zapálení oblouku dopadají na stěnu dutinky a narušují její povrchovou strukturu. Při zapálení oblouku vznikne v dutince výbojová dráha, která při dostatečné intenzitě vnějšího elektrického pole může způsobit elektrický průraz v izolačním materiálu.
- Teplotní účinek výboje
Vlivem výbojů dochází ke značnému tepelnému namáhání izolačního materiálu v jeho okolí. Zvýšená teplota v okolí porušeného izolantu navíc přispívá ke zvýšení rizika tepelného průrazu.
- Chemický účinek zplodin z výbojů
Při zapálení výboje dochází v okolním plynu k chemickým reakcím. Vlivem termochemických pochodů dochází ke změně kyslíku na ozon, který má silně oxidační charakter a působí degradaci izolace.
- Účinky záření vznikajícího při výbojích
Při chemické reakci po zapálení oblouku dochází ke vzniku ultrafialového záření, které pozitivně působí na nově vznikající chemické reakce.
- Účinek zvětšeného gradientu na konci výbojové dráhy
Na konci výbojové dráhy oblouku se soustřeďuje elektrické pole s vysokou intenzitou. V těchto místech tak může docházet k překročení elektrické pevnosti izolačního materiálu. V případě jejího překročení dojde k průrazu, který poškodí mikroskopickou oblast izolace. Konec výbojové dráhy se

posouvá do nové oblasti a celý děj se opakuje. Při dlouhodobém působení, vzniká v izolaci síť kanálků, vytvořená těmito výboji. Tyto kanálky vytvářejí strukturu připomínající značně rozvětvený strom. Tento děj probíhá do doby, než se podaří elektrickému výboji překlenout vzdálenost mezi elektrodami a dojde k faktickému průrazu izolace a jejímu znehodnocení. [10], [6], [25].

Kombinace všech druhů namáhání vede k fyzikálním a chemickým změnám izolantu, které se projeví nevratnými změnami jeho elektrických, tepelných a mechanických vlastností. Vývojový diagram degradace izolačního systému dle normy ČSN EN 60505 při elektrickém namáhání je zobrazen na obrázku 7.7.



Obr. 7.7 Vývojový diagram dopadu elektrického namáhání na izolační systém (převzato z [22].)

8 OMEZENÍ VLIVU PRACHOVÝCH ČÁSTIC

Na snížení izolačního stavu stroje a degradaci izolace má největší význam uhlíkový prach vznikající při provozu kluzného kontaktu. Za jeho nadměrnou produkci může být řada činitelů – špatný mechanický stav komutátoru nebo kroužku, nevhodný typ kartáčů pro dané proudové zatížení a také prachové částice z okolí stroje. Tito činitelé způsobují nadměrné opotřebení kartáčů, které je nežádoucí z hlediska ekonomického i bezpečnostního. Pro omezení jejich vlivu je důležité provádět řádnou údržbu sběracího ústrojí a předcházet škodlivým vlivům:

- řádná ovalita komutátoru a kroužku – musí být dodržena přípustná velikost ovality; je nepřípustná skoková změna vystupování mezi lamelami nebo lamelou a mezilamelovou izolací komutátoru,
- kondice kartáčových držáků – jednotlivé držáky v řadě musí mít shodné, rovnoměrné rozteče; krabičky držáků musí být stejně vysoko nad komutátorem,
- tlak na kartáče – dodržovat předepsanou hodnotu přitlačné síly na kartáče,
- včasná výměna opotřebovaných částí – osazení držáků novými kartáči ještě před nežádoucím opotřebováním současných kartáčů; pokud to podmínky dovolí, vyměnit všechny kartáče v řadě,
- dodržovat jmenovité proudové zatížení stroje – velké proudové zatížení vede k předčasnému opotřebování kartáčů, malé proudové zatížení může způsobit rýhování komutátoru,
- zabránit vibracím kartáčů, které jsou způsobeny nevhodným proudovým zatěžováním, vystupujícími lamelami nebo mezilamelovou izolací, nevhodnou přitlačnou na kartáče,
- zabránit rýhování komutátoru – přetížení stroje může vést k elektrickému průrazu patiny a elektroerozivnímu opotřebování jednotlivých komponent kluzného kontaktu; stejně tak dojde k rozrušení vrstvy patiny při nízké provozní teplotě; vnější prachové částice z okolní atmosféry narušují vrstvu patiny a dochází k suchému tření; podobně můžou působit některé chemické výpary,
- zabránit jiskření a opalování kartáčů – vzniká na základě proudového přetížení, nerovnostem komutátoru, nebo špatným nastavením magnetické neutrality. [18], [1].

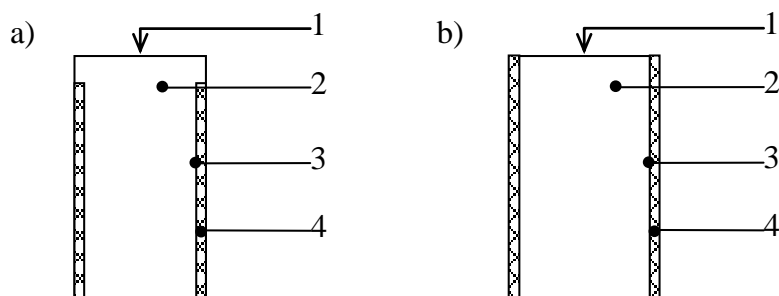
Pečlivá starost o dobrý stav sběracího ústrojí a kluzného kontaktu je jedním ze zásadních faktorů pro omezení vzniku nežádoucího nadměrného množství uhlíkového prachu. Další možností je použití inovovaných kartáčů a kartáčových držáků na bázi teflonu.

8.1 Inovované kartáče s teflonem

Inovaci kartáčů lze v zásadě provést dvěma způsoby:

- změnou struktury kartáče,
- modifikací konstrukce kartáče. [1].

Jednou z možností modifikace konstrukce je aplikace vrstvy teflonu na boční stěny kartáče. Tuto inovaci je možné využít téměř pro všechny druhy kartáčů. To se provede nanesením na povrch kartáče nebo aplikací přímo do tělesa kartáče. Přičemž pro získání výhod plynoucích z provozu inovovaných kartáčů s teflonem je potřeba aplikace teflonu alespoň na jednu stěnu kartáče. U strojů s komutátorem se doporučuje aplikovat teflon na odběhovou stěnu, u strojů s kroužky na náběhovou. Aplikace teflonu na kartáče je zobrazena na obrázku 8.1. Legenda: 1 - umístění vývodu kartáče, 2 - vlastní těleso kartáče, 3 - spoj kartáče s teflonem, 4 - teflonová destička. [1].



Obr. 8.1 Schématické zobrazení aplikace teflonu do a) tělesa kartáče, b) na stěnu kartáče (převzato z [1].)

8.1.1 Způsob ovlivnění chodu kluzného kontaktu

Zásadní dopad na funkci kluzného kontaktu má vrstva patiny, která se tvoří na vnějším povrchu komutátorů a kroužků. Tato vrstvička hraje významnou roli ve výsledné velikosti přechodového odporu kluzného kontaktu a jeho třecích kvalitách. Při použití běžných kartáčů ovlivňují její původ a strukturu především pracovní podmínky a vliv okolního prostředí. Charakter patiny se odvíjí především od oxidů vznikajících na povrchu komutátoru nebo kroužku a také od uhlíkových částic, které ulpívají na oxidované vrstvě nebo v povrchových nerovnostech na komutátoru nebo kroužku. [13], [1].

Vrstvička oxidů má v malé míře kladný dopad na třecí poměry a komutační proces. Během zabrušování kartáčů, které se provádí při sníženém proudovém zatížení, ulpívají na vrstvě oxidu částičky uhlíku a vrstva oxidu se zvětšuje. Při tomto procesu získává pracovní plocha kartáče zrcadlový lesk, patina se začíná

zbarvovat a postupně klesá součinitel tření. Vznik patiny za těchto podmínek trvá dlouhou dobu – v závislosti na konkrétním případě několik dnů i týdnů. Postup jejího vzniku je poměrně komplikovaný a závisí na mnoha dalších proměnných – teplotě v kluzném kontaktu, jakosti pracovní plochy kartáče, velikosti přitlačné síly a prachových částicích v okolní atmosféře. Při jakékoliv změně provozních podmínek dochází během krátkého časového úseku ke změně struktury a vlastností patiny. [13]

Použitím teflonového materiálu na kartáčích lze pozitivně ovlivnit výslednou jakost patiny i průběh jejího vzniku. Při tření kartáčů ulpívají částičky teflonu vzniklé opotřebením v prohlubních a nerovnostech na povrchu komutátoru nebo kroužku. Z těchto míst vytlačují vodu a prachové částice, což vede ke snížení styku komutátoru nebo kroužku s okolní atmosférou. Díky tomu dojde k poklesu tloušťky vrstvy oxidů. Tato schopnost inovovaných kartáčů je dána materiálovými vlastnostmi teflonu, který je dobře tvárný, má malou teplotní roztažnost a je hygroskopický. [13], [1].

Použití teflonu na kartáčích povede k následujícím účinkům:

- teflon působí mazacími účinky jako voda u klasického kluzného kontaktu,
- ta se díky jeho hygroskopickým vlastnostem není schopna dlouhodobě udržet na povrchu patiny a neuplatňuje se v takovém rozsahu elektrolýza,
- omezení nárazové ionizace a tím eliminuje předpoklady ke vzniku obloukových výbojů,
klasická vodivost bude převládat nad vedením proudu výboji, zlepšení komutačních podmínek,
- rovnoměrnější rozdělení proudového zatížení mezi paralelně pracujícími kartáči,
- kartáč lépe udržuje kontakt s komutátorem a kroužkem, minimalizuje se jeho opotřebením a množství nežádoucího uhlíkového prachu,
- omezuje vliv prachových částic na chod kluzného kontaktu,
- snižuje součinitel tření a oteplení v kluzném kontaktu. [13], [1].

8.1.2 Praktický přínos inovovaných kartáčů s teflonem

Uvedené změny se prakticky na chodu stroje projeví:

- úplným odstraněním nebo potlačením vzniku stínů na kroužcích,
- zvýšenou stabilitou kluzného kontaktu,
- potlačením vzniku rýhování na povrchu kroužků a komutátoru,
- potlačením vzniku jiskrových a obloukových výbojů,
- zvýšením doby mezi stávající údržbou povrchu kroužků a komutátoru. [13], [1].

8.2 Inovované držáky kartáčů s teflonem

Inovace držáků kartáčů se provádí podobným způsobem jako inovace kartáčů. Teflon je v tenké vrstvě nanesen na vnitřní stěny krabičky držáku kartáčů. Toto zlepšení je možné použít téměř na všechny druhy držáků kartáčů.

Použití teflonu povede k následujícím změnám:

- snížení vůle mezi krabičkou držáku kartáče a kartáčem, což povede k nárůstu celkové plochy, kterou kartáč naváže kontakt s komutátorem nebo kroužkem,
- zlepšením dynamiky kartáče – snížení vzdálenosti kartáče mezi kroužkem nebo komutátorem, lepší optimalizace přítláčné síly na kartáče a lepší využitelnost síly, omezení vlivu vibrací a s tím souvisejících jiskrových a obloukových výbojů,
- nárůst celkového počtu dotykových míst,
- pokles oteplení v kluzném kontaktu. [13], [1].

8.2.1 Praktický přínos inovovaných držáků kartáčů

Uvedené změny se prakticky projeví:

- rovnoměrnějším opotřebením kartáčů,
- značným omezením rýhování, případně omezením hloubky rýhování, kroužků a komutátoru,
- rovnoměrnějším rozložením proudového zatížení mezi paralelně pracujícími kartáči,
- omezením množství nečistot zůstávajících mezi kartáčem a krabičkou držáku na kartáče,
- výrazným nárůstem životnosti kluzného kontaktu. [13], [1].

8.3 Výhody užití inovovaných kartáčů „sT“ a držáků kartáčů „sT“

Při aplikaci inovovaných kartáčů „sT“ a držáku kartáčů „sT“, bude mít tato kombinace znatelný pozitivní dopad na chod stroje:

- omezuje vznik poruch v kluzném kontaktu a sběracím ústrojí,
- snižuje počet odstávek stroje nutných pro údržbu,
- zvětšuje bezpečnost a spolehlivost provozovaného stroje,
- vede ke zvýšení využitelnosti stroje,
- vede k ekonomickým úsporám,
- vede k výraznému snížení znečištění vnitřních prostor stroje uhlíkovým prachem. [13], [1].

8.4 Vyhodnocení ekonomického výsledku při použití inovovaných kartáčů a držáků kartáčů

Na základě dostupných informací z dlouhodobého sledování vyplývá, že při použití inovovaného třecího uzlu v tepelném generátoru o výkonu 200 MW bylo dosaženo v ročním průměru následujících výsledků:

- pokles spotřeby kartáčů o 56 %,
- přímé snížení nákladů daných nižší spotřebou kartáčů ve výši 82 000 Kč,
- sekundární úspory nákladů ve výši až 1 114 333 Kč,
- další snížení nákladů díky úspoře času a práce obsluhy tepelného generátoru. [14].

Dále byly použity inovované kartáče a inovované držáky kartáčů na bázi teflonu na třech generátorech 60 MVA/10,5 kV ve vodní elektrárně. Kartáče zajišťovali napájení budícího vinutí generátorů. Tyto stroje jsou napájeny ze statického tyristorového usměrňovače a pracují v přerušovaném režimu. Při mnohaletém provozu těchto strojů byly zjištěny následující výsledky:

- zlepšení životnosti kartáčů o 220 %,
- snížení počtu odstávek nutných pro čištění stroje,
- nárůst technické doby života kluzného kontaktu generátorů o 300 %,
- značné sekundární úspory nákladů, které lze jen obtížně vyčíslit. [14].

Vliv na ekonomické úspory při použití inovovaných kartáčů s teflonem byl také sledován na záložním zdroji firmy VUES Brno. Ten pohání asynchronní kroužkový generátor o výkonu 430 kVA. Vyhodnocením výsledků získaných při jeho dlouhodobém provozu byly zjištěny následující výsledky:

- úspory přímých nákladů i díky spotřebě kartáčů ve výši 12 000 Kč,
- průměrný nárůst doby života kartáčů o 200 %,
- snížení doby mezi odstávkami nutnými pro údržbu stroje,
- a s tím spojené značné sekundární úspory nákladů, které se nepodařilo přesně vyčíslit. [14].

Výše zmíněné stroje se liší od strojů, kterými se zabývala tato práce. Ekonomické vyhodnocení vlivu inovovaných kartáčů a inovovaných držáků kartáčů na bázi teflonu při použití na těchto strojích by vyžadovalo několikaletou práci a bylo by velmi obtížné. V laboratorních podmínkách FEKT na VUT v Brně není možné tyto dlouhodobé zkoušky provádět. Inovace teflonem je vhodná pro stroje různého výkonu, otáček a konstrukčního provedení. Lze přepokládat, že při jejich aplikaci do těchto strojů, je možné očekávat výrazné zlepšení funkčních

vlastností těchto strojů a snížení problémovosti z hlediska prachových částic. Z hlediska ekonomického lze u těchto strojů očekávat dosažení analogických výsledků. Ty se projeví především udržováním dobrých provozních vlastností stroje, které se prakticky projeví prodloužením doby mezi odstávkami nutnými pro údržbu stroje, prodloužením životnosti částí kluzného kontaktu a nárůstem využitelnosti stroje.

9 ZÁVĚR

V diplomové práci jsem se zabýval působením prachových částic na provozní vlastnosti točivých strojů s kluzným kontaktem a jejich izolační systém.

V první části práce jsou popsány základní komponenty kluzného kontaktu, sběracího ústrojí a jejich parametry. V rámci úvodu do problematiky kluzného kontaktu bylo provedeno měření mechanické kvality povrchu použité hřídele a vystupování lamel použitého komutátoru.

V druhé části práce byly analyzovány prachové částice vznikající při provozu tří různých strojů s kluzným kontaktem. Byly analyzovány prachové částice vznikající v prostředí asynchronního stroje s kroužkovou kotvou, stejnosměrného stroje a střídavého komutátorového stroje. Jejich analýza byla provedena pomocí elektronového mikroskopu a byla zkoumána velikost, geometrie a možný dopad prachových částic na chod stroje.

Další část práce se věnuje vlivu prachových částic na provoz kluzného kontaktu. Kvalita povrchu rotačních částí kluzného kontaktu, stejně jako správné nastavení sběracího ústrojí, má značný dopad na spolehlivý a bezporuchový chod stroje. Proto bylo přistoupeno k vyhodnocení přítláčných sil kartáčových držáků stejnosměrného stroje. Tento stroj pohání válcovací stolici v hutích, a protože byla zjištěna značná nevyrovnanost ve velikosti přítláčných sil jednotlivých držáků, bylo přistoupeno k vyhodnocení proudového zatížení jednotlivých kartáčů. Zde bylo zjištěno, že paralelně spolupracující kartáče jsou značně nerovnoměrně proudově zatíženy, což může vést k poruchovým jevům v kluzném kontaktu, především na začátku procesu válcování, kdy motorem protéká značný proud.

V následující části byl proveden výpočet vlivu prachových částic na velikost přechodového odporu v kluzném kontaktu. Pro vzorový výpočet byla po konzultaci s vedoucím DP vybrána úhlová bruska NAREX, kterou pohání střídavý komutátorový motor. Pro tento motor byl proveden výpočet změny velikosti přechodového odporu v kluzném kontaktu. Ten se mění v závislosti na velikosti prachové částice. Na základě teoretického vztahu, odvozeného pro nárůst přechodového odporu kluzného kontaktu vlivem prachové částice, byl potvrzen předpoklad změny přechodového odporu a s tím souvisejících elektrických a mechanických vlivů na chod kluzného kontaktu.

V předposlední části bylo přistoupeno k posouzení vlivu prachových částic na izolační stav točivých strojů s kluzným kontaktem a jejich vlivu na degradaci izolačního systému těchto strojů. Prachové částice v závislosti na svém charakteru vedou ke snížení celkového izolačního stavu stroje, případně přispívají k urychlení mechanické, chemické, tepelné a elektrické degradaci izolačního systému.

V poslední části se práce zabývá omezením vlivu prachových částic na provoz stroje. Zde se jeví jako nejlepší možnost předcházení jejich vzniku. Toho lze dosáhnout vhodnou údržbou kluzného kontaktu a sběracího ústrojí. Další možností omezení jejich vlivu je použití inovovaných kartáčů s teflonem a inovovaných držáků kartáčů s teflonem. Jejich použití povede nejen k omezení vlivu cizích prachových částic na chod kluzného kontaktu a snížení množství uhlíkového prachu vznikajícího činností kluzného kontaktu, ale také k celkovému zlepšení provozních vlastností kluzného kontaktu.

Literatura

- [1] CHMELÍK, Karel a František VESELKA. *Kluzný kontakt v elektrických strojích*. Ostrava: KEY Publishing, 2007. ISBN 978-80-87071-59-5.
- [2] KOČMAN, Vladimír. *Fyzika a technologie elektrotechnických materiálů - Izolanty B*. 1972.
- [3] MUSZALSKI, Zbigniew. *Teoria i fizyka komutacji maszyn elektrycznych*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN Sp., 1997. ISBN 83-01-12214-5.
- [4] HASSDENTEUFEL, Josef. *Izolanty*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1962.
- [5] ŠKERŮ, Jan. *Plasty v elektrotechnice*. 1991: Nakladatelství technické literatury, 1991. ISBN 80-03-00657-0.
- [6] BARTÁK, Alexandr, Luděk MRAVINÁČ, Jacek NEUMANN a Jan VAŘÁK. *Diagnostika poruch izolací elektrických strojů*. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1984.
- [7] PROCHÁZKA, Pavel a Zdeněk HARNA. Hodnocení mechanické kvality kluzného kontaktu elektrického stroje. *Elektrotechnický obzor*. 1989, (1), 24-26. DOI: 621.3.066.6.
- [8] VĚTROVEC, Václav. Vady v dielektriku - jejich důkaz a určení. *Elektrotechnický obzor*. 1983, (3), 163-164. DOI: 537.226.
- [9] ZÁLIŠ, Karel. Měření částečných výbojů na alternátorech vn. *Elektrotechnický obzor*. 1989, (5), 259-263.
- [10] ŠTOFA, Ján a Veronika ŠTOFOVÁ. Znehodnotenie izolantov z polyetylénu a polyvinylchloridu účinkom výbojov. *Elektrotechnický obzor*. 1976, (10), 621-622. DOI: 621.315.96:537.52.
- [11] HÜTTNER, Ludovít. Posouzení navlhnutí izolace strojů. *Elektrotechnický obzor*. 1976, (10), 620-621. DOI: 621.315.6:551.573.
- [12] BLAHNÍK, Roman a Laura MAGYAR. Tepelná odolnost nehomogenního izolantu. *Elektrotechnický obzor*. 1981, (5/6), 280.
- [13] VESELKA, František a Viktor VRABEC. První série ručního nářadí s inovovaným kluzným kontaktem. *Elektro*. 2014, (1/2014), 44-45.
- [14] VESELKA, František. Inovace komponent kluzného kontaktu elektrických strojů (9. část). *Elektro*. 2018, (1/2018), 62-64.
- [15] BARTÁKOVÁ, Bernarda a Blanka HRANIČKOVÁ. Laboratorní modelování vlivu agresivních chemických exhalací na izolanty a izolace. *Elektrotechnický obzor*. 1970, (5), 254-259.
- [16] NOVOTNÝ, Vladimír. Vliv spínacího oblouku na mikrostrukturu kontaktů. *Elektrotechnický obzor*. 1981, (4), 219-220. DOI: 621.316.5.064.
- [17] MIKULČÁK, Jiří. *Matematické, fyzikální a chemické tabulky pro střední školy*. 4. vyd. Praha: Prometheus, 2007. Pomocné knihy pro žáky (Prometheus). ISBN 978-80-7196-345-5.

- [18] KOPECKÝ, Jaroslav. Udržovat stejnosměrné stroje, nebo je nahradit střídavými?. *Elektro*. 2012, (10/2012), 30-31.
- [19] ČSN 33 2000-3. *Elektrotechnické předpisy: Část 3: Stanovení základních charakteristik*. Český normalizační institut, 1994.
- [20] ČSN 35 0821. *Elektrické stroje točivé: Kefy pre elektrické stroje točivé*. Elektrokarbon Topolčany, 1977.
- [21] ČSN 35 0830. *Elektrické stroje točivé: Kartáčové držáky*. Vydavatelství ÚN, 1960.
- [22] ČSN EN 60505. *Hodnocení a třídění elektroizolačních systémů*. Český normalizační institut, 2002.
- [23] *Katalog kartáčových držáků* [online]. Dostupné z: <http://www.cebes.cz>
- [24] *Přehled a zapojení motorů* [online]. Dostupné z: <https://www.mylms.cz/text-prehled-a-zapojeni-motoru/>
- [25] VESELKA, František. *Poskytnuté podkladové materiály*. Brno, 2018.

Seznam symbolů, veličin a zkratek

Značka	Jednotka	Význam
a	[m]	délka strany kartáče
a	[m·s ⁻²]	radiální zrychlení kartáče
b	[m]	délka strany kartáče
A	[A·m ⁻²]	lineární obvodová hustota proudu
A	[-]	vzájemný pohyb kluzného povrchu kartáče a komutátoru
A	[-]	materiálová konstanta
A	[m ² ·J ⁻¹]	teplotně závislá konstanta
B	[m ² ·C ⁻¹]	teplotně závislá konstanta
B_0	[T]	magnetická indukce ve vzduchové mezeře
d	[m]	průměr prachové částice
d	[m]	vzdálenost
D	[m]	průměr kotvy
D	[m]	průměr komutátoru
E_{pp}	[V·m ⁻¹]	elektrická pevnost
F	[N]	velikost přitlačné síly
$F_{stř}$	[N]	střední hodnota přitlačné síly
F_{ROZ}	[N]	rozdíl přitlačné síly
F_{ROZ}	[%]	rozdíl přitlačné síly
I	[A]	proud
k	[-]	materiálová konstanta
k	[-]	počet kartáčů
L	[m]	aktivní délka železa
m	[kg]	hmotnost
n	[-]	způsob kontaktního styku
n	[min ⁻¹]	otáčky stroje
n	[min ⁻¹]	jmenovité otáčky komutátoru
p	[-]	počet pólových dvojic
p	[Pa]	tlak plynu
P	[W]	výkon
P_s	[N]	přítlačná síla na kartáč
Q	[-]	číslo lamely
v	[m·s ⁻¹]	rychlost otáčení
R	[Ω]	odpor
R_0	[Ω]	odpor přímého styku kluzného kontaktu

R_p	[Ω]	přechodový odpor
R_{pmax}	[Ω]	předpokládaná hodnota odporu
R_{pp}	[Ω]	nárůst přechodového odporu
R_s	[Ω]	odpor ve styku
s	[m]	dráha v radiálním směru
S	[m ²]	plocha kartáče
t_k	[m]	mezilamelová rozteč
$tg \delta$	[-]	činitel ztrát
T	[s]	střední doba života
U_z	[V]	zápalné napětí
U_h	[V]	zhášecí napětí
V	[m ³]	objem kartáče
α	[°]	úhel natočení
α	[°]	pólové krytí
γ_e	[-]	součinitel počtu elektronů na katodě
Δh	[m]	relativní výchylka
θ	[°C]	teplota
λ_s	[m]	délka dráhy pohybu kartáče
ρ	[$\Omega \cdot m^2 \cdot m^{-1}$]	měrný elektrický odpor
ρ	[kg·m ⁻³]	materiálová hustota
σ	[A·m ⁻²]	proudová hustota
σ_{ROZ}	[A·m ⁻²]	rozdíl proudové hustoty
σ_{ROZ}	[%]	rozdíl proudové hustoty
τ	[s]	čas radiálního pohybu kartáče
ω	[rad·s ⁻¹]	úhlová rychlost
ω_s	[s ⁻¹]	pulzace kartáče

Seznam příloh

Příloha 1. Řez pohonem válcovací stolice

Příloha 2. Znázornění zabudování pohonu válcovací stolice v základovém tělese

Příloha č. 1 Řez pohonem válcovací stolice

