

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

Ing. Pavel Štorek

**MĚŘENÍ FYZIKÁLNÍCH VELIČIN NA
ROTUJÍCÍCH ČÁSTECH**

PHYSICAL QUANTITIES MEASUREMENT OF THE
ROTATING PARTS

ZKRÁCENÁ VERZE Ph.D. Thesis

Obor: Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika
Školitel: Doc. Ing. František Veselka, CSc.
Oponenti:
.....
Datum obhajoby: 2009

KLÍČOVÁ SLOVA

komutátor, indukční snímací sonda, bezkontaktní měření vzdálenosti, vystupování lamel.

KEYWORDS

commutator, induction measuring probe, distance contactless measurement, bars protrusion.

MÍSTO ULOŽENÍ PRÁCE

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky FEKT VUT v Brně,

OBSAH

1. ÚVOD.....	5
2. FORMULACE PROBLÉMU A CÍLE JEHO ŘEŠENÍ.....	5
2.1 Problematika související s konstrukcí a provozem komutátorových strojů.....	6
3. VLIV OKOLÍ, PODMÍNEK MĚŘENÍ A MĚŘICÍ APARATURY NA CHYBU MĚŘENÍ.....	7
3.2 Vliv vibrací	7
3.3 Vliv EMC.....	9
3.4 Vliv teploty	9
3.5 Vliv vlhkosti a tlaku vzduchu	10
3.6 Vliv parametrů indukčních sond	11
3.7 Vliv digitálního osciloskopu jako A/D převodníku na chybu měření	12
3.8 Vliv načítací a vyhodnocovací procedury programu	13
3.9 Vliv tvaru měřeného objektu na měření.....	14
3.10 Vliv pozice snímací sondy vzhledem ke sledovanému objektu na chybu měření.....	15
3.11 Vliv změny materiálových parametrů na měření.....	15
4. MĚŘICÍ SYSTÉM	17
4.1 Teoretický rozbor funkce použitých sond.....	17
4.2 Konfigurace měřicího zařízení a popis měřicího řetězce.....	17
4.3 Elektromechanické uspořádání měřicího zařízení	18
4.4 Programové vybavení měřicího pracoviště.....	18
5. OVĚŘENÍ FUNKCE MĚŘICÍHO PRACOVIŠTĚ.....	18
5.1 Měření vystupování lamel komutátoru univerzálního motoru malého výkonu.....	19
5.2 Měření na elektrickém stroji typu Schrage v laboratoři.....	20
5.3 Měření na uhlíkovém radiálním komutátoru	21
5.4 Měření na axiálním (diskovém) komutátoru.....	22
5.5 Shrnutí poznatků z ověření funkce měřicího pracoviště.....	24
6. ZÁVĚR.....	24
7. POUŽITÁ LITERATURA A ODKAZY.....	26
8. CV AUTORA.....	27
9. ABSTRACT	28

1. ÚVOD

Diagnostika a zkoušení představuje nedílnou součást návrhu, konstrukce a výroby moderních zařízení, splňujících stále vyšší požadavky zákazníků. I v oblasti elektrických strojů a pohonů je měření, testování a diagnostika velmi důležitým ukazatelem kvality vyrobených strojů a použitých technologií. Nové měřicí metody musí mít samozřejmě lepší parametry, být automatizované a splňovat požadavky na vyjadřování chyby měření podle dnešních předpisů. Takové měřicí metody pak pomáhají jako kvalitní zpětná vazba při určování technologického zpracování a jakosti výroby.

Nezanedbatelnou skupinu elektrických strojů tvoří elektrické stroje s komutátorem. Je to dáno plněním technických požadavků uživatelů a i v případě některých nedostatků (životnost, nutnost údržby) je jejich využití z ekonomického hlediska výhodné.

Limitujícím faktorem životnosti komutátorového elektrického stroje je především životnost sběracího ústrojí, tedy kartáčů, držáků kartáčů a komutátoru. Míra opotřebení součástí je podmíněna elektromechanickými vlivy, působícími za provozu stroje. Degradace kluzného kontaktu je závislá i na způsobu jeho provozu. Pokud je stroj provozován v cyklickém režimu (časté zapínání a vypínání), může dojít ke snížení jeho životnosti až na několikanásobně kratší dobu v důsledku vyššího namáhání komutátoru a kartáčů, než v případě spojitého běhu. Pokud je prováděna kontrola povrchu komutátoru v průběhu technického života elektrického stroje, jsou dobře patrné změny jeho profilu, tedy vystupování jednotlivých lamel, zapříčiněné nejen lokálním opalováním, ale především ztrátou mechanické pevnosti uchycení lamel v tělese komutátoru. Měřicí zařízení pro diagnostiku kvality povrchu komutátoru za provozu stroje musí být, vzhledem k výše zmíněným problémům na kluzných kontaktech komutátorových stojů, schopno snímat otáčky (zrychlení, zpomalení) měřeného rotoru, měřit malé vzdálenosti od povrchu vodivého materiálu lamel, snímat vibrace v pracovní oblasti kluzného kontaktu a to bez vlivu teploty měřeného tělesa na výsledek měření. Aby bylo možné zjistit vystupování jednotlivých komutátorových lamel za rotace stroje (v dynamickém režimu), je třeba provádět diagnostiku povrchu komutátoru bezkontaktně. Obecně je nutné provádět dostatečně přesná měření, pohybující se v řádu jednotek až desítek mikrometrů, nad rychle se pohybujícím nespojitým prostředím na otáčkových hladinách, blížících se 60000 min^{-1} .

V této práci bylo užito ke snímání polohy lamel indukčních sond s potlačeným polem, pracujících na principu vířivých proudů. Z důvodu nedostupnosti (především cenové) např. vhodné optické aparatury, lze toto řešení považovat za vhodnou volbu k realizaci kompletního měřicího pracoviště.

2. FORMULACE PROBLÉMU A CÍLE JEHO ŘEŠENÍ

Diagnostika kvality povrchu komutátorů popř. kroužků elektrického stroje rozhoduje i o délce technického života elektrického stroje a případné opravě (výměně) komutátoru. Rozhodnutí o případné opravě nebo nutné údržbě musí být

podloženo výsledky měření parametrů komutátoru (ovalita, převýšení dvou sousedních lamel, apod.), které byly změřeny se zaručenou a definovanou chybou měření a za daných podmínek měření.

Dílní cíle lze formulovat v následujících bodech:

- Zpracování problematiky související s diagnostikou povrchu komutátorů, včetně literární a patentové rešerše.
- Návrh a realizace měřicího a vyhodnocovacího řetězce zařízení, umožňující provádění laboratorních a provozních testů.
- Návrh měřicího softwaru s využitím již realizovaných indukčních měřicích sond.
- Základní zpracování přesnosti měření s použitím daných měřicích sond a měřicího programu a řetězce.
- Provedení měření na reálných strojích různého výkonu a posouzení získaných výsledků.

2.1 PROBLEMATIKA SOUVISEJÍCÍ S KONSTRUKCÍ A PROVOZEM KOMUTÁTOROVÝCH STROJŮ

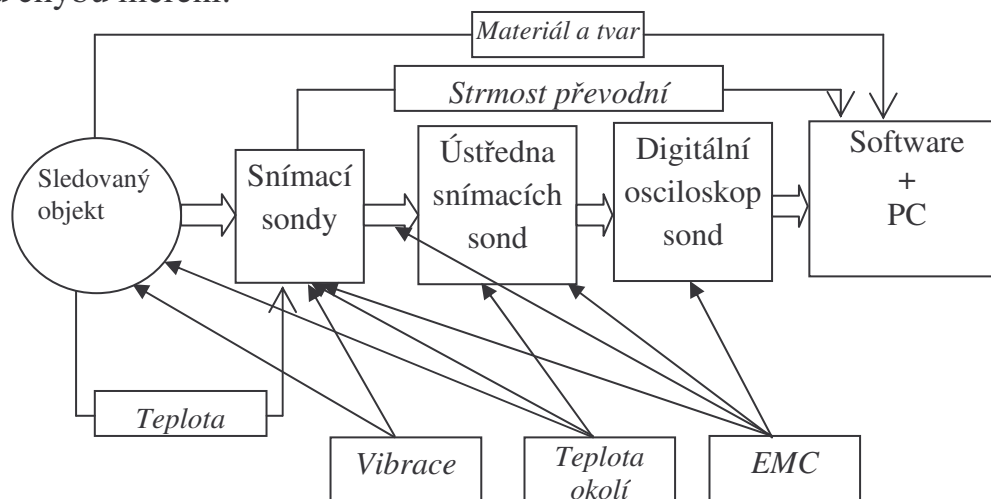
Analogicky jako u ostatních typů elektrických strojů, dochází i u strojů s komutátorem k neustálému zvyšování výkonových a kvalitativních parametrů. Jde především o zvyšování životnosti, prodlužování intervalu mezi dvěma poruchami a s tím spojených oprav. V neposlední řadě se rovněž jedná o snižování vibrací a hluchnosti. K docílení těchto ukazatelů je nutné zajistit co nejvyšší využití magnetického a elektrického obvodu stroje a s tím souvisejících součástí, včetně komutátoru.

Komutace ve stejnosměrných a střídavých točivých strojích, jejíž podstatou je přechod cívek z jedné paralelní větve do druhé, při současné změně směru proudu procházejícího cívkou, je provázena složitým komplexem elektromagnetických, mechanických a jiných dějů probíhajících v cívce i na komutátoru, které spolu bezprostředně souvisí.

Na životnost stroje má vliv především opotřebení jeho pohyblivých částí. Namáhání kluzného kontaktu je značné, nejen po stránce elektrické, ale i po stránce mechanické. Zhoršení mechanických podmínek komutace (nevyhovující vystupování jednotlivých lamel komutátoru, či nadměrný tlak kartáče na lamely) má za následek zvýšené opotřebení kartáčů i komutátoru. Například opotřebení kartáčů se neprojevuje pouze nutností jejich výměny, ale zároveň usazováním drobných částic vodivého materiálu uvnitř stroje. Dochází ke snížení izolačního stavu, což často může vést v náročných provozních podmínkách k přeskokům a následnému porušení izolace kotvy nebo statoru. Důsledkem je nutnost častější a komplikovanější údržby, která zvyšuje nejen provozní náklady, ale může eliminovat destrukci elektrického stroje s následným nepříznivým ekonomickým dopadem.

3. VLIV OKOLÍ, PODMÍNEK MĚŘENÍ A MĚŘICÍ APARATURY NA CHYBU MĚŘENÍ

Chyba měření je způsobena řadou vlivů, působících na měřený objekt a měřicí aparaturu v průběhu měření. Pro celkové vyjádření chyby a stanovení její velikosti je nutné prozkoumat vliv parametrů v procesu měření na chybu naměřené hodnoty. Na Obr. 3.1 jsou znázorněny uvažované vlivy a okolního prostředí působící na výslednou chybu měření.

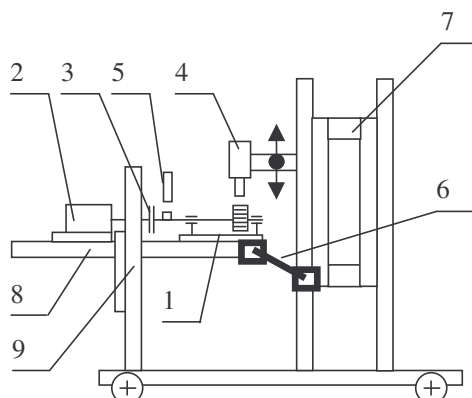


Obr. 3.1 : Zjednodušené schéma měřicího řetězce s vyznačenými vlivy působícími na výslednou chybu měření.

Na výslednou chybu měření mají vliv nejen vlastní části měřicího řetězce, ale i okolní podmínky. Je nutné tyto vlivy respektovat a definovat jejich vliv na chybu měření. Je možné rovněž identifikování dominantních vlivů.

3.2 VLIV VIBRACÍ

U měřicího pracoviště byla provedena analýza vibrací v otáčkovém rozsahu do 10000 min^{-1} a vyhodnoceny vlastní rezonanční frekvence. Dále byl posouzen vliv průběhu vibrací v měřicí oblasti na výsledky měření v případě použití nebo nepoužití dodatečných vzpěr.



Obr. 3.2 : Nákres měřicího pracoviště

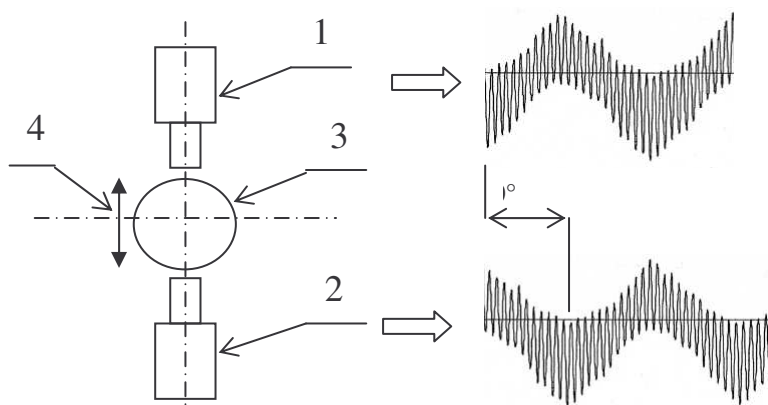
Legenda: 1 – přípravek s komutátorem a kroužkem na hřídeli, 2 – hnací stroj, 3 – spojka, 4 – indukční snímací sonda, 5 – optický snímač otáček, 6 – přídatné vzpěry, 7 – měřicí rám, 8 – základna motoru, 9 – svislý nosník s vodícím ložem.

Měření vibrací bylo provedeno ve spolupráci s odborníky z Ústavu mechaniky těles FSI VUT v Brně. Bylo použito moderního přenosného měřicího systému PULSE 3560, sloužícího k diagnostice vibrací mechanických systémů a jejich odezvy na budící signály. Při měření bylo použito piezo-akcelerometrických snímačů. Signály z piezoelektrických senzorů byly připojeny přes ústřednu do počítače. V počítači umožňuje speciální měřicí software okamžité zpracování naměřených dat s použitím FFT a zobrazení frekvenčního spektra FFT v závislosti na otáčkách měřeného stroje. Tato měření byla provedena jako první. Frekvenční spektra byla zpracována pro všechny připojené piezoelektrické snímače. Rozmístění snímačů bylo na měřicím zařízení následující:

- ložiskové pouzdro měřicího přípravku,
- hrot měřicí sondy,
- vrchní část měřicí sondy,
- základna měřicího pracoviště pro připevnění měřeného stroje.

Ve druhém kroku byla změřena modální analýza celého pracoviště. Provedené měření popisovalo frekvenční odezvu systému na jednotkový budící impuls. Z výsledků frekvenčních spekter je patrné odstranění nižších rezonančních frekvencí při použití dodatečných vzpěr. Vibrace základny s upevněným měřeným strojem byly sníženy o 70%, avšak vazba mezi základnou a měřicím rámem zvýšila vibrace snímací sondy až o 50%. Celkový výsledek byl pozitivní. Modální analýza měření byla provedena s použitím kladívka a snímače zrychlení na pouzdru ložiska. Na snímači byl zaznamenán průběh vzniklých vibrací při úderu kladívka na různých bodech konstrukce. Z modální analýzy vyplývá zpevnění konstrukce použitím dodatečných vzpěr a utlumení rezonančních frekvencí menších do 10kHz.

Dále bylo u měřicího pracoviště provedeno hodnocení měření vibrací s použitím vyrobených indukčních sond a s tím spojeno jejich možné eliminování z měřeného průběhu. Zpočátku byla eliminace vibrací mezi strojem a sondami zajišťována a eliminována měřením s použitím dvou měřicích sond umístěnými nad povrchem komutátoru v jeho svislé ose. Uspořádání měřicích sond je pro tento případ naznačeno na Obr. 3.3.



Obr. 3.3 : Původní uspořádání sond v měřicí oblasti pro eliminaci vibrací
 Legenda: 1 – sonda1, 2 – sonda2, 3 – komutátor měřeného elektrického stroje,
 4 - znázornění vibrací komutátoru měřeného elektrického stroje

Experimentální výsledky ukázaly, že z napěťových průběhů při tomto způsobu měření je jen velmi obtížné určit parametry vibrací, a následně je eliminovat z naměřených průběhů vystupování lamel komutátoru. Ve další etapě byla proto k měření nežádoucích vibrací v pracovní oblasti použita jedna snímací sonda a druhou sondou byla zjišťována úroveň vibrací. Pro minimalizaci chyby měření, vznikající tím, že vibrace snímané první sondou neodpovídají přesně vibracím mezi druhou sondou a měřeným strojem, je nutné mezi oběma sondami vytvořit pevnou vazbu. V důsledku existence této tuhé vazby, již nedochází k odlišným vibracím jednotlivých sond.

3.3 VLIV EMC

Vliv elektromagnetického rušení na měřicí zařízení a vyzařování elektromagnetického rušení do okolí měřicího pracoviště nebyl přesně zjišťován měřením, které by vyžadovalo speciální měřicí laboratoř. V tomto případě je důležitá odolnost měřicího zařízení pro měření vystupování lamel na pracujícím stroji. Jde především o měření na univerzálním komutátorovém stroji, který má nejvyšší úroveň vyzařování elektromagnetického pole do svého okolí, pokud není použit odrušovací člen. Na tento způsob rušení jsou samozřejmě nejvíce citlivé ty části měřicího zařízení, používající analogových napěťových vstupů a výstupů. Tato situace existovala u propojení snímacích sond a vyhodnocovací ústředny III. generace zařízení. Nedostatek byl vyřešen u IV. generace měřicího zařízení, kdy propojení mezi sondami a ústřednou bylo převedeno do digitální formy.

3.4 VLIV TEPLoty

Dalším parametrem, ovlivňujícím chybu měření na indukčním principu, je teplota. Negativní vliv teploty může být rozdělen podle její oblasti výskytu na dvě základní varianty:

- teplota okolí,
- teplota měřeného objektu.

Prvním je teplota okolního prostředí a její vliv na jednotlivé části měřicího řetězce. Chyby měření, podmíněné vlivem teploty okolí, jsou dány teplotně nestabilními díly. Takto jsou ovlivněny všechny přístroje měřicího řetězce včetně snímacích sond. K potlačení vlivu okolní teploty na vlastnosti přístrojů, jsou citlivá místa teplotně stabilizována. Např. stabilizaci teploty vnitřního prostoru sondy zajišťuje temperování vnitřního prostoru sondy na teplotu vyšší, než je maximální teplota okolí 40°C.

Výstupní signál snímací sondy je dán vlastnostmi snímací cívky v hrotu sondy. Vlastnosti cívky jsou pak ovlivněny i její teplotou. Teplota je stanovena okolními podmínkami. Změna teploty cívky v hrotu sondy způsobuje chybu měření. Rezonanční obvod, v němž je snímací cívka zapojena, je paralelní a fázový posun oproti referenčním signálu je dán vztahem:

$$\operatorname{tg} \varphi = Q \cdot \left(p - \frac{1}{p} \right) \quad (3.1)$$

$$\text{jestliže platí, že } Q = \frac{\sqrt{L}}{R} \quad \text{a } p = \frac{\omega}{\omega_0} \quad (3.2)$$

Frekvence rezonančního obvodu je naladěna tak, aby platilo $p=1$. Z rovnic (3.1) a (3.2) je patrné, že fázový posun, odpovídající výstupní hodnotě napětí a tedy i vzdálenosti měřeného objektu je nepřímo úměrný hodnotě $\arctg(R_{\text{cívky}})$. Z teplotního koeficientu odporu mědi lze odvodit chybu měření okolo 1% v případě změny teploty cívky o 20°C. Při praktických měřeních byla tato chyba zanedbána z důvodu konstantní okolní teploty. Teplota cívky v hrotu sondy je také ovlivněna pracujícím komutátorem s vyšší teplotou. Druhou variantou vlivu teploty na chybu měření představuje změna teploty měřeného objektu. Tato chyba měření se objeví pouze při měřeních vystupování lamel na pracujících strojích, kdy je teplota měřeného objektu (komutátoru, nebo kroužku) podstatně vyšší než teplota okolí. Tato změna teploty způsobí změny následujících parametrů:

- měrného elektrického odporu materiálu měřeného objektu,
- rozměrové změny měřeného objektu,
- změnu teploty snímací cívky – ovlivněno vyšší teplotou blízko se pohybujícího měřeného objektu o vyšší teplotě.

Z převodních charakteristik, změřených pro různé druhy konstrukčních materiálů, lze odvodit závislost převodních charakteristik na hodnotě měrného elektrického odporu při měření neferomagnetických materiálů. Pro závislost měrného elektrického odporu na teplotě platí:

$$\rho = \rho_0 \cdot (1 + \alpha \Delta T) \quad (3.3)$$

Změna strmosti převodní charakteristiky v závislosti na ρ , spolu se závislostí změny ρ na teplotě, vyjadřuje chybu, způsobenou změnou teploty sledovaného komutátoru.

Dalším zdrojem chyby měření jsou rozměrové změny velikosti lamel komutátoru vlivem teploty. Teplotní roztažnost materiálu je definována následujícím vztahem:

objemová roztažnost –

$$V_{\Delta\vartheta} = V_{20} \cdot (1 + \gamma \Delta\vartheta) \quad (3.4)$$

délková roztažnost –

$$l_{\Delta\vartheta} = l_{20} \cdot (1 + \alpha \Delta\vartheta) \quad (3.5)$$

Šířka lamely se změní o lamely o 1% při teplotní změně 80°C. Tato změna šířka způsobí chybu výstupního signálu menší než 0.25%. Chybu nemění strmost převodní charakteristiky a nemá tedy vliv na výsledek měření.

3.5 VLIV VLHKOSTI A TLAKU VZDUCHU

Změny vlhkosti a tlaku okolního prostředí výslednou chybu měření výrazně neovlivňují, s ohledem na princip snímání. Vybavení laboratoře neumožnilo experimentální ověření závislosti celkové chyby měření na okolním tlaku a vlhkosti. Všechna měření vystupování lamel komutátorů byla provedena za běžných atmosférických podmínek. Stejně tak jsou definovány i podmínky okolního prostředí pro provoz měřícího zařízení.

3.6 VLIV PARAMETRŮ INDUKČNÍCH SOND

U snímacích indukčních sond má značný vliv na chybu měření několik jejích parametrů a to:

1) Charakteristika závislosti výstupního napětí sondy na vzdálenosti hrotu od povrchu

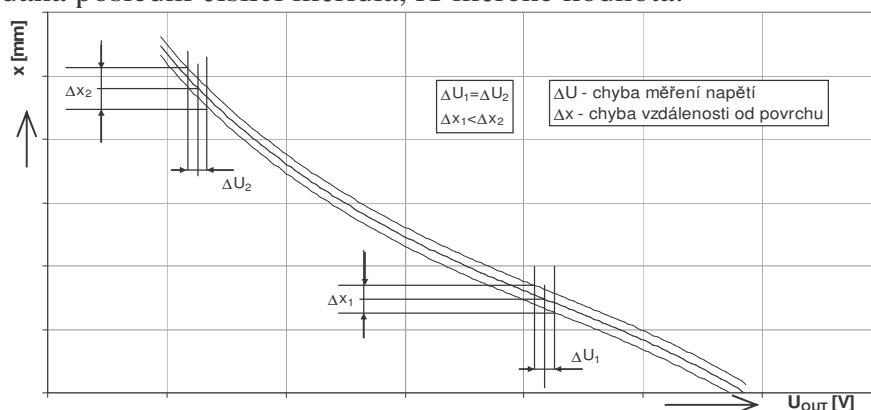
- strmost převodní charakteristiky,
- tvar převodní charakteristiky.

2) Závislost převodní charakteristiky na časové konstantě teplotní stabilizace

Ad 1) Přesnost vytvoření převodní charakteristiky určuje chybu napětí snímací sondy na vzdálenost. Prvním krokem vytvoření převodní charakteristiky je změření závislosti výstupního napětí sondy na vzdálenosti hrotu sondy od sledovaného povrchu. Měření s rozsahem 3mm bylo provedeno s rozlišením 1 μ m. Kalibrace měřidla vzdálenosti prokázala chybu 0,3% z měřené hodnoty. Další chyba je způsobená číslicovým údajem a je rovna $\Delta_{digit} = \pm 0,5 \mu\text{m}$. Těmito dvěma chybami je určena chyba, vzniklá při měření vzdálenosti převodní charakteristiky:

$$\Delta_X = \Delta_{digit} + \delta_{X1} \cdot X = 0,5 + 0,3 \cdot X \quad (3.6)$$

Kde: ΔX – chyba měření vzdálenosti, $\delta X1$ – relativní chyba měřidla daná kalibrací, Δ_{digit} – chyba daná poslední číslicí měřidla, X – měřené hodnoty.

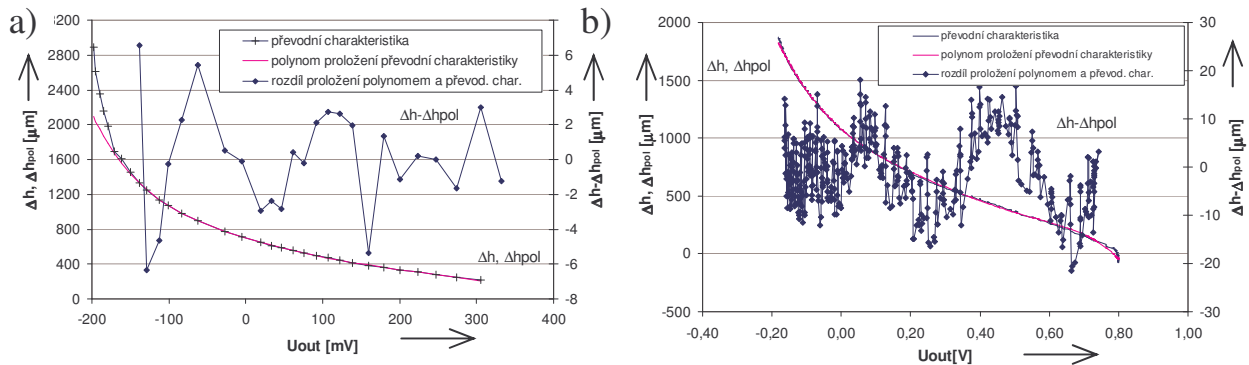


Obr. 3.4 : Příklad převodní charakteristiky se znázorněním vlivu strmosti na chybu měření.

Druhou měřenou veličinou při měření vzdálenosti je výstupní napětí sondy. Výrobce udává chybu měření pro použitý DC napěťový rozsah je $\delta_{U_{out}} = 2\%$ z měřicího rozsahu. Na použitém měřicím rozsahu 1V by byla chyba měření napětí až 20mV. Tuto chybu nelze zanedbat a dále je prezentováno jakou měrou se projeví ve výsledku měření převodní charakteristiky. Obr. 3.4 znázorňuje závislost chyby výsledku měření na vzdálenosti měření a tím různých oblastech strmosti převodní charakteristiky.

Z výše uvedených chyb vyplývá chyba měření převodní charakteristiky až 10 μm . Převodní charakteristika s tak velkou chybou měření by určitě neposkytovala požadovanou chybu měření maximálně do 2 μm . Všechny, tímto způsobem naměřené převodní charakteristiky, mají v měřicím řetězci funkci převodníku výstupního napětí sondy zpět na vzdálenost. To je provedeno proložení převodní charakteristiky polynomem šestého řádu. Odchytky proložení polynomem od

změřených hodnot převodních charakteristik jsou zobrazeny v tzv. korekční křivce. Proložení v celém rozsahu vzdálenosti převodní charakteristiky je provedeno s odchylkami $\pm 6 \mu\text{m}$. Proložení na rozsahu 200–700 μm je provedeno s max. odchylkou pouze $\pm 1.5 \mu\text{m}$. Převodní charakteristika měřená automatickým měřením je dána vyšším počtem měřených bodů. To, společně se šumem, způsobuje vyšší odchylku proložení.



Obr. 3.5 : a) Proložení manuálně měřené převodní charakteristiky v rozsahu vzdálenosti od 0 do 2 mm, b) Proložení automaticky měřené převodní charakteristiky v rozsahu vzdálenosti od 0 do 2 mm

Hladkým proložním jednotlivých naměřených bodů se snižuje chyba způsobená náhodnými jevy a šumem u převodní charakteristiky. Z průběhů praktických měření a jejich vyhodnocení lze v závěru stanovit chybu měření převodní charakteristiky na $\pm 1,5 \mu\text{m}$.

Pro určení „pravé“ převodní charakteristiky bylo provedeno zpracování několika proložení převodních charakteristik pro jeden měřený objekt. Na všech převodních charakteristikách byly dopočítány body pro stejné vzdálenosti a byl proveden výpočet průměrné hodnoty pro jednotlivé body. Mezi pravou převodní charakteristikou a naměřenými převodními charakteristikami je tvarová shoda. Odchylka jednotlivých naměřených bodů je max. 4%. Tím je definována chyba použití převodní charakteristiky z jednoho měření.

Ad 2) V práci je uvedena teplotní stabilizace vnitřní elektroniky snímací indukční sondy. Každá teplotní stabilizace má definována dobu nutnou k provedení stabilizace přístroje. Bylo nutné stanovit dobu teplotní stabilizace indukčních snímacích sond od počátku zapnutí jejich napájení. Měření provedené po zapnutí v kratším čase než vyžaduje teplotní stabilizace je ovlivněno chybou. Stanovení doby vycházelo z provedeného měření výstupního napětí snímací sondy za konstantních podmínek v závislosti na čase od začátku napájení sond. Doba teplotní stabilizace byla určena okamžikem, kdy změna výstupního napětí byla menší než 1% hodnoty a doba byla zaokrouhlena na 30 minut od zapnutí snímacích sond.

3.7 VLIV DIGITÁLNÍHO OSCILOSKOPU JAKO A/D PŘEVODNÍKU NA CHYBU MĚŘENÍ

Digitální osciloskop je v měřicím řetězci použit jako převodník A/D. Jeho funkcí je tedy převod zobrazeného analogového výstupního napětí snímací indukční sondy na digitální průběh. Signály na obrazovce osciloskopu jsou zobrazeny s

osmibitovým rozlišením na y-ové ose. U každého digitálního měřicího přístroje vzniká kvantizační chyba, podle [2]. Dále je proveden příklad výpočtu kvantizační chyby měření při použití osciloskopu. Výpočet je proveden pro vybraný signál měření vystupování lamel Cu komutátoru s 24 lamelami a $d=\text{Ø}28$ mm.

Hodnoty nastavení parametrů vstupního kanálu osciloskopu při měření výstupního signálu snímací sondy jsou uvedeny v Tab. 3.1.

Tab. 3.1 : Nastavení kanálu osciloskopu pro měření výstupního napětí snímací sondy

Anlg Ch	State	Volts/div	Position	Coupling	BW Limit	Invert
Ch 1:	On	5mV	130.2mV	DC	Off	Off

Příklad výpočtu kvantizační chyby pro měření:

Rozsah měření je: $X_R = 8 \cdot 5 = 40 \text{ mV}$

Měřicí rozsah obrazovky osciloskopu je 110,2 mV až 150,2 mV. Jedná se o 8mi bitový převodník. Analogový signál je kvantován na $2^8=256$ úrovní digitálního signálu. Velikost jednoho kvanta je:

$$X_q = \frac{X_R}{n} = \frac{40}{256} = 0,156 \text{ mV} \quad (3.7)$$

Velikost absolutní kvantizační chyby činí:

$$\Delta q = \pm \frac{X_q}{2} = \pm 0,078 \text{ mV} \quad (3.8)$$

Relativní hodnota kvantizační chyby je rovna:

$$\delta_q = \frac{\Delta q}{X_R} = \frac{0,078}{40} = \pm \frac{1}{2n} = 0,00195 = 0,195\% \quad (3.9)$$

Výsledná měřená hodnota je zatížena kvantizační chybou $\pm 0,078$ mV. Tato kvantizační chyba hodnoty napětí po přepočtu na vzdálenost znamená chybu výsledné hodnoty vzdálenosti $\pm 0,078$ μm . To platí pro převodní charakteristiku Cu komutátor. Velikost této chyby závisí na převodní charakteristice a pro každé měření je nutné ji přepočítat. K této kvantizační chybě se přičítá chyba měření osciloskopu, která je uvedena pro výše uvedený měřicí rozsah 2% z měřicího rozsahu. U osciloskopu je zapnuto průměrování (Averaging) měřeného signálu, čímž je částečně odstraněno rušení měřeného signálu vysokými kmitočty.

3.8 VLIV NAČÍTACÍ A VYHODNOCOVACÍ PROCEDURY PROGRAMU

Při převedení analogové hodnoty na digitální, nevznikají při jejím přenosu ve vyhodnocovacím softwaru další chyby. Zpracování a vyhodnocení digitální formy měřeného napětí je spojeno již pouze s jedinou chybou. Jedná se o vyhodnocení vystupování jednotlivých lamel detekcí špiček měřeného signálu. Detekce špičky signálu je vytvořena použitím funkce „Peak Detection“, v prostředí Labview. Tato chyba byla zjištěna v průběhu praktických měření při porovnání manuálně a automaticky vyhodnoceného průběhu. Odchylka mezi výsledky s manuálním a automatickým vyhodnocením, vedla ke zkoumání metod vyhodnocení špiček. Bylo zjištěno, že rozdíl je způsoben použitou funkcí detekce špiček v Labview. Tato funkce nevyhodnocuje hodnotu špičky rovnu maximální hodnotě průběhu (z měřených bodů), ale hodnota špičky je dána maximální hodnotou polynomu, kterým

jsou proloženy změřené body špičky. V dostupné literatuře není uvedeno, jakým způsobem je tato funkce přesně realizována. U této funkce je možné definovat šířku detekované špičky. Tento parametr ovlivňuje proložení změřených bodů na špičce a tím i vyhodnocenou hodnotu špičky. V průběhu praktických měření byla chyba, způsobená funkcí detekce špiček, zanedbána vzhledem k nastavené hodnotě šířky špičky 4 body. Chyba určení špičkové hodnoty, je pro detekovanou šířku 4 body nepatrná. Při šířce detekované špičky 10 bodů dosahuje chyba velikosti až 0,5 um.

3.9 Vliv tvaru měřeného objektu na měření

Jedním z vlivů, působících na výsledky měření malých vzdáleností s využitím indukčního principu, je tvar vlastního měřeného objektu. U běžně používaných indukčních snímačů uvádí výrobce v katalogu rozměr aktivní plochy pod hrotem sondy, ve které působí elektromagnetické pole indukčního snímače. Tento parametr musí zůstat konstantní v průběhu měření, nebo jeho případná změna způsobí chybu měření. Byla provedena specifikace elektromagnetického pole pod hrotem. Měřením byla zjištěna taková velikost plochy sledovaného povrchu pod hrotem snímací sondy, že její další zvětšování nemá za následek zvyšování výstupního napětí snímací sondy. Jednalo se o popsání aktivní plochy pod hrotem sondy. Vycházelo se měření závislosti výstupního napětí měřicí indukční sondy na velikosti plochy sledovaného povrchu pod jejím hrotem. Měření bylo provedeno pro sondu č. 2 a speciální vzorek materiálu. Experiment byl založen na snímání výstupního napětí indukční sondy a jejího posuvu nad sledovaný vzorek Cu. Vzdálenost mezi hrotem sondy a sledovaným povrchem byla konstantní.

Měření bylo provedeno třikrát s ohledem na minimalizování náhodné chyby měření. Pro tři měření byly zaznamenány tři hodnoty polohy hrotu sondy vzhledem k hraně sledovaného objektu. Vzájemná poloha hrotu sondy a hrany vzorku byla nastavena vizuálně. Z průběhů je určena minimální velikost aktivní kruhové plochy pod hrotem sondy a vliv polohy snímaného objektu pod hrotem sondy na úroveň výstupního signálu. Lineární změna polohy hrotu v čase značí konstantní rychlost posuvu. Na základě známé konstantní rychlosti posuvu je dopočítána poloha hrotu sondy pro celý časový záznam. Pro výpočet rychlosti posuvu byly odečteny hodnoty dráhy $s=3$ mm a času $t=1,63$ s. Rychlost posuvu je pak rovna $1,84$ mm.s⁻¹.

Nyní je možno určit polohu hrotu nad hranou objektu v celém měřeném průběhu při znalosti časového údaje. Minimální možná změřená hodnota sondy je dána 1% maximální výchylky výstupního napětí snímací sondy a je rovna $X_R=0,857$ V. Minimální možná změřená hodnota je rovna 1% z rozsahu U_{out} , což odpovídá napětí 8,57 mV. Hodnota výstupního napětí snímací sondy určující hranici počátku měření je rovna -0,268 V a 0,571 V. Pro napětí určující hranici citlivosti, byly odečteny hodnoty časového údaje. Odečtené hodnoty časových údajů a přepočtené na vzdálenost jsou 4,8 mm, 5,2 mm a 5,2 mm.

Pro dosažení hladších průběhů byla výsledná hodnota změny napětí vypočtena jako klouzavý průměr. Z průběhu změny strmosti výstupního napětí při konstantní rychlosti posuvu je určen časový okamžik a následně poloha hrotu sondy nad hranou objektu s maximální změnou výstupního napětí sondy. Tím je určena aktivní oblast

pod hrotem sondy. Průměrná hodnota je rovna 5,1 mm. Za předpokladu kruhové diskové cívky v hrotu sondy, je aktivní plocha sondy definována kruhovou plochou o průměru 5,1 mm se středem v ose sondy. Jedná se o 1,7-mi násobek průměru hrotu sondy. Z průběhů je patrná změna citlivost sondy s polohou vodivého materiálu vzhledem k ose hrotu. Z naměřených výsledků lze odvodit, že hodnota výstupního napětí sondy je závislá na velikosti plochy povrchu sledovaného vodivého materiálu v aktivní oblasti pod hrotem cívky. V textu byla specifikována závislost výstupního napětí snímací sondy na velikosti plochy snímaného objektu pod hrotem sondy. Závislost určuje odezvu sondy na změnu tvaru lamel měřených komutátorů. První jsou lamely s šířkou blízkou rozměrům hrotu sondy tj. se šířkou od 2 mm do 5 mm. Pro lamely těchto rozměrů dosahuje bezkontaktní sonda maximálního výstupního napětí nad středem lamely. Poloha hrotu sondy v průběhu měření nad lamelou je demonstrována špičkou sinusového průběhu.

Druhý případ představují lamely se šířkou větší než 5 mm. U takových lamel již střed lamely není určen nejvyšším výstupním napětím a dochází ke zplošťování špiček sinusového průběhu se zvyšující se šířkou lamely. Ve třetí skupině jsou zahrnuty komutátory se šířkou lamel menší než 2 mm. Zde se snižuje rozdíl mezi maximální hodnotou výstupního napětí nad středem lamely a minimální výstupní hodnotou nad mezilamelovým prostorem. Tím dochází ke snížení citlivosti sondy. Při malé šířce lamely, která je menší než polovina průměru hrotu, dochází k indikaci maximálního výstupního napětí nad mezilamelovým prostorem a nikoli nad středem lamely.

Speciálním sledovaným objektem jsou axiální komutátory. Lamely těchto komutátorů mají tvar kruhové výseče a šířka lamely axiálních komutátorů se mění s poloměrem měření. Je tedy nutné zachovat poloměr měření stejný po celou dobu měření.

3.10 VLIV POZICE SNÍMACÍ SONDY VZHLEDEM KE SLEDOVANÉMU OBJEKTU NA CHYBU MĚŘENÍ

Správné nastavení snímací sondy vzhledem k měřenému komutátoru je kolmo k povrchu lamely, osa hrotu sondy přitom prochází osou rotace komutátoru. V tomto nastavení jsou měřeny převodní charakteristiky pro jednotlivé komutátory, popř. kroužky elektrických strojů. Pokud při měření dojde k natočení nebo posunutí snímací sondy vzhledem ke sledovanému komutátoru, vzniká tím chyba, daná změnou nastavení sondy vzhledem k rotujícímu povrchu. Vznik této chyby lze odstranit pečlivostí při měření nebo je možné pro nové nastavení sondy v měřicí oblasti zpracovat novou převodní charakteristiku. Pro výpočet celkové chyby měření vystupování lamel komutátoru lze tento jev zanedbat. Každé nastavení sondy v měřicí oblasti bylo vždy doplněno o měření nové převodní charakteristiky.

3.11 VLIV ZMĚNY MATERIÁLOVÝCH PARAMETRŮ NA MĚŘENÍ

V této kapitole je analyzován vliv vlastností materiálu na chybu měření. Existují totiž dvě vlastnosti materiálu ovlivňující citlivost indukčního bezkontaktního měření. První je měrný elektrický odpor materiálu ρ , druhým je permeabilita

materiálu μ . Indukční princip měření snímacích sond je založen na změně jakosti cívky umístěné v hrotu sondy. Při měření se v elektricky vodivém materiálu, působením střídavého elektromagnetického pole, indukují vířivé proudy, působící proti magnetickému toku vysokofrekvenčně napájené cívky, čímž je snižována jakost cívky. Vzhledem k této závislosti, je vždy změřena převodní charakteristika sledovaného objektu pro každý nový materiál. Převodní charakteristiky a strmosti převodních charakteristik byly zpracovány pro konstrukční materiály uvedené v Tab. 3.2. Měření většího počtu konstrukčních materiálů je uváděno proto, aby bylo možné posoudit sledování malých vzdáleností s indukčním principem snímání. První skupinu tvoří neferomagnetické materiály a jako nejvýznamnější zástupce je uvedena technická měď. Přehled strmostí převodních charakteristik je uveden v Tab. 3.3. V Tab. 3.2 je uveden přehled různých konstrukčních materiálů společně s měrným elektrickým odporem a teplotním koeficientem změny elektrického odporu.

Tab. 3.2 : *Tabulka měrných elektrických odporů různých konstrukčních materiálů*

Materiál	Měrný elektrický odpor ρ [$\mu\Omega\text{cm}$]	Teplotní koeficient ρ [K^{-1}]
Hliník Al	2,83	0,0042
Cín Sn	11,50	0,0049
Měď Cu	1,75	0,0040
Mosaz (50-99% Cu, Zn)	7,50	0,0020-0,0070
Železo Fe	9,80	0,0060
Chrom Cr	12,00	--
Ocel 12140	13,00	--
Elektrotechnický grafit	33,00-185,00	-0,0060 \div 0,0120

Druhou skupinu měřených materiálů tvoří feromagnetické materiály. Studovány byly vzorky konstrukční oceli třídy 11 a dynamoplech tloušťky 0,5 mm. Pro oba vzorky byly zpracovány převodní charakteristiky s vyhodnocenou strmostí. U těchto materiálů dochází ke snižování výstupního napětí v závislosti na menší vzdálenosti hrotu od povrchu. Opačné chování je dáno principem snímání, založeném na jakosti elektromagnetického obvodu cívky.

Přehled strmostí převodních charakteristik pro měřené materiály je v Tab. 3.3.

Tab. 3.3 : *Shrnutí strmostí převodních charakteristik pro různé konstrukční materiály a pro tři vzdálenosti hrotu snímací sondy od snímaného povrchu*

Materiál / objekt	Vzdálenost hrotu sondy od povrchu [μm]		
	300	500	800
Strmost převodní charakteristiky Δ_{char} [$\text{mV}/\mu\text{m}$]			
Al / rovinný povrch	1,03	0,85	0,53
Cu / lamel stroj Schrage	0,95	0,89	0,46
Cu / lamel univ. Motoru	0,88	0,69	0,37
Cu / lamela axiálního komutátoru	0,63	0,49	0,32
Chrom / plocha 4x8 mm	0,36	0,30	0,15
Grafit / lamela komutátoru	0,24	0,15	0,08
Ocel třídy 11 xxx / rovinný povrch	0,73	0,44	0,19
Dynamo plech	1,36	0,90	0,43

Hodnoty ρ byly přiřazeny jednotlivým materiálům podle Tab. 3.2. V praktických měřeních je nutné si uvědomovat a respektovat závislost citlivosti snímací sondy na strmosti převodní charakteristiky a tím i na měrném elektrickém odporu

sledovaného materiálu. Existuje tedy soubor materiálů, jako jsou měď, hliník, ocel, které lze doporučit jako materiály pro indukční princip snímání malých vzdáleností. Na druhou stranu pak existují materiály, které nejsou příliš vhodné.

Měření může být prováděno s požadavkem co nejpřesnějšího výsledku s vyjádřenou nejistotou měření. Po kalibraci měření jsou do celkové chyby měření zahrnuty následující chyby:

- kvantizační chyba rovná $\pm 0,08 \mu\text{m}$,
- chyba převodní charakteristiky $\pm 1,5 \mu\text{m}$,
- teplotní chyba 0,25%.

Výše uvedené chyby platí pro převodní charakteristiku se strmostí 1 mV/ μm . Výsledná chyba měření je pak dána součtem jednotlivých chyb. Pro měřenou hodnotu ovality běžně okolo 10 μm pak celková absolutní chyba měření je zaokrouhlena na $\pm 2 \mu\text{m}$.

Dále může být provedeno měření informativního charakteru, kdy je možné zjednodušení celého měření. V těchto případech absolutní chyba měření dosahuje chyby až $\pm 20 \mu\text{m}$. Informace o tvaru sledovaného objektu však není zkrácena a v měřítku odpovídá skutečnému tvaru sledovaného objektu.

4. MĚŘICÍ SYSTÉM

4.1 TEORETICKÝ ROZBOR FUNKCE POUŽITÝCH SOND

Indukční snímač je často používán pro bezdotykové měření polohy strojních součástí a dráhy jejich mechanických kmitů. Využívá ke své činnosti buď změny indukčnosti měřicí cívky, nebo účinků vířivých proudů, indukovaných střídavým magnetickým polem snímače ve vodivém měřeném objektu, přičemž vířivé proudy zpětně ovlivňují snímač. Neferomagnetický objekt pole snímače zeslabuje, a proto se někdy hovoří o snímačích s potlačeným polem. Impedance snímače se jejich působením mění o tzv. vnesenou impedanci. Její velikost je obecně závislá na:

- rozměrech cívky vzhledem k měřenému objektu,
- počtu závitů,
- poloze cívky vůči vodivému prostředí,
- permeabilitě prostředí,
- měrném odporu prostředí, tloušťce, tvaru,
- napájecí frekvenci a s tím související rychlostí objektu.

Z uvedeného plyne, že funkce, vyjadřující závislost vnesené impedance a dráhy objektu je, značně složitá. Princip indukčních sond je popsán v [9].

4.2 KONFIGURACE MĚŘICÍHO ZAŘÍZENÍ A POPIS MĚŘICÍHO ŘETĚZCE

Měřicí stůl obsahuje vestavěné prvky a přístroje, určené ke sběru naměřených dat a ovládání měřicího rámu. Na ploše stolu je umístěna měřicí ústředna, digitální osciloskop a řídicí počítač. Na čelním panelu stolu jsou umístěny moduly ovládání krokových motorů podélných suportů a čtveřice modulů stejnosměrných zdrojů, sloužících pro napájení měřených a pomocných zařízení. Uvnitř stolu je umístěna

mikroprocesorová jednotka pro ovládání a řízení krokových motorů. Výstupní signály ze snímacích sond jsou napojeny do měřicí ústředny. Na výstup ústředny je připojen digitální osciloskop AGILENT 54622A, který je dále spojen přes rozhraní IEEE-488 s počítačem. Počítač komunikuje s osciloskopem prostřednictvím softwaru Labview.

4.3 ELEKTROMECHANICKÉ USPOŘÁDÁNÍ MĚŘICÍHO ZAŘÍZENÍ

Měřicí zařízení je složeno ze dvou hlavních částí. Prvním je měřicí rám, obsahující základnu pro montáž snímaného stroje a rám s posuvnými suporty pro upevnění snímacích indukčních analogových sond. Druhou část tvoří pojízdný stůl, obsahující ovládací prvky pro posun suportu a spouštění měřeného stroje či poháněcího stroje. Stůl obsahuje také veškerou měřicí aparaturu měřicího řetězce, tvořenou digitálním osciloskopem, měřicí ústřednou a počítačem.

4.4 PROGRAMOVÉ VYBAVENÍ MĚŘICÍHO PRACOVÍŠTĚ

Pro tvorbu softwaru byl vybrán vývojový systém Labview pro jeho možnost návrhu výkonného řídicího softwaru automatizovaného měřicího systému, při současném zajištění minimalizace formálních a logických chyb v průběhu návrhu, pro relativně jednoduchý způsob vytváření složitých struktur i pro osoby bez dřívějších zkušeností s programováním, umožňující vytvoření univerzálního, v širokém rozsahu konfigurovatelného měřicího softwaru. Mezi objekty softwaru Labview se nachází řada procedur pro analýzu a složité matematické operace se získanými daty (filtry, prokládání křivek, FFT, detekce špiček, statistické funkce a další). Systém LabView přistupuje k programování měřicích systémů tak, že uživatel vytváří virtuální měřicí přístroje. Virtuální přístroj je logický prvek, reprezentující buď skutečný měřicí přístroj, nebo prvek měřicího systému.

Programový diagram se vytváří z grafických prvků, zahrnujících množiny datových objektů, programových struktur, operací a komunikaci prostřednictvím standardizovaných rozhraní a objekty pro ovládání zásuvných měřicích karet. Virtuální přístroj může obsahovat dříve vytvořený virtuální přístroj hierarchicky nižšího řádu a naopak. V systému Labview je vytvořen hlavní měřicí program, tvořící základ navrženého systému. Dále jsou vytvořeny externí procedury pro načtení dat z měřicích přístrojů, které je možno modifikovat podle použité aparatury měření. Celá programová aplikace je navržena tak, aby byla uživatelsky velice přehledná. Po spuštění aplikace uživatelem je zobrazen přední panel se všemi potřebnými údaji pro práci se systémem. Jedná se o zadání a nastavení převodní charakteristiky, tlačítka ovládání programu a grafy se vstupními průběhy a vyhodnocenými daty, diskrétními průběhy v grafech s ovládáním parametrů vyhodnocovací procedury.

5. OVĚŘENÍ FUNKCE MĚŘICÍHO PRACOVÍŠTĚ

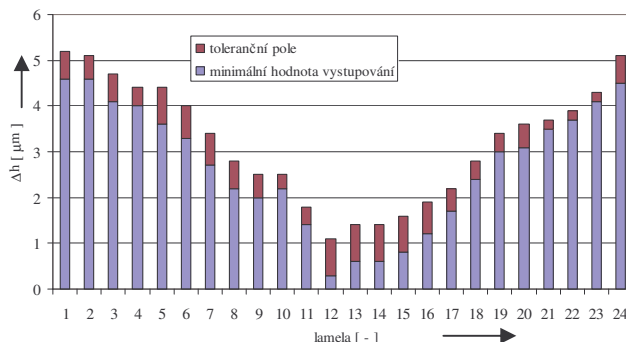
Ověření funkce měřicího pracoviště probíhalo v několika etapách, během nichž bylo provedeno nejen nastavení a kalibrace měřicí aparatury, ale zároveň bylo třeba ověřit funkčnost všech dílčích komponent měřicího pracoviště. Jednotlivé etapy zahrnují:

- naměření převodních charakteristik sond pro různé materiály povrchů a různé typy komutátorů rychloběžných elektrických strojů a jejich zadání do programu automatického vyhodnocení měření,
- měření vystupování lamel komutátoru poháněného po hřídeli,
- měření vystupování lamel komutátoru stroje poháněného vlastní silou (prostředí se zvýšeným elektromagnetickým rušením),
- měření vystupování lamel na dalších speciálních komutátorových strojích.

Pro uvedená měření platí, že: “Jediné porovnání měřené hodnoty s hodnotou pravou nedovoluje posoudit celkovou chybu měření. Teprve vícenásobným měřením je získána hodnota soustavné chyby a střední kvadratická chyba, jako měřítko rozptylu nahodilých chyb. Pokud se při měření vyskytnou hrubé chyby, překračující očekávané meze chyb, pak se z hodnocení vylučují, neboť jejich příčiny spočívají v omylech, závadách nebo poškození přístrojů.”

5.1 MĚŘENÍ VYSTUPOVÁNÍ LAMEL KOMUTÁTORU UNIVERZÁLNÍHO MOTORU MALÉHO VÝKONU

Jako představitel malého komutátorového stroje, byl vybrán univerzální komutátorový motor, používaný ve domácích vysavačích, typ 2988.000. Jako první měření tohoto stroje je uvedeno kontaktní měření. Tímto způsobem měření bylo dosaženo výsledků uvedených v Tab. 5.1 a průběh vystupování jednotlivých lamel, zobrazených na Obr. 5.1.



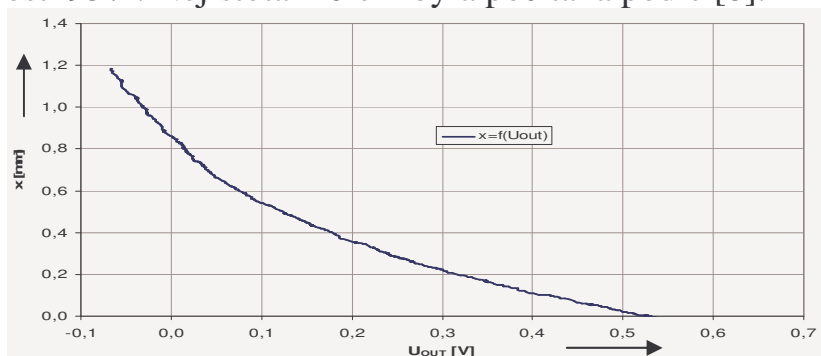
Obr. 5.1 : Průběh vystupování lamel komutátoru elektrického stroje typ 2988 č. 5.

Tab. 5.1 : Výsledky kontaktního měření vystupování lamel komutátoru stroje 2988.000

Maximální vystupování dvou sousedních lamel	1,5 um
Ovalita (maximální vystupování lamely vzhledem k referenční lamele)	4,9 um

Druhá sada výsledků měření komutátoru tohoto stroje uvádí výsledky řady bezkontaktních měření. Jako u všech bezkontaktních měření byla nejdříve změřena převodní charakteristika snímací sondy, viz Obr. 5.2. Jako první bylo provedeno měření při otáčkách sledovaného stroje $n=2000 \text{ min}^{-1}$. Vibrace měřeného stroje nebyly při provedených měřeních snímány. Každé prováděné měření je zatíženo chybami a nepřesnostmi, které se projevují na dosaženém výsledku měření. Každá akreditovaná laboratoř musí mít vypracovaný konfirmační systém. Nedílnou součástí konfirmačního systému je nejistota měření. Výsledná hodnota maximálního vystupování lamely komutátoru vzhledem k referenční lamele při bezkontaktním

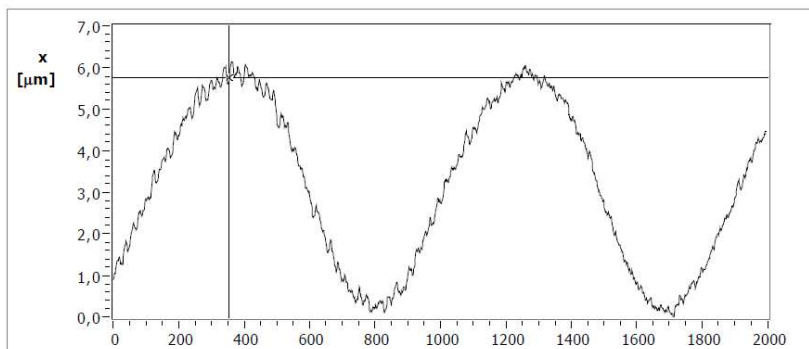
měření na otáčkové hladině 2000 min^{-1} je rovna $\Delta h_{\text{MAX}} = 4,90 \pm 0,63 \text{ } \mu\text{m}$ s pravděpodobností 95%. Nejistota měření byla počítána podle [8].



Obr. 5.2 : Převodní charakteristika změřená pro sondu č. 2 a komutátor elektrického stroje Typ 2988.000 č. 5.

Druhá hladina otáček byla zvolena $n=10000 \text{ min}^{-1}$. Většina z provedených měření byla provedena při vzdálenosti $L_{\text{SP}}=0,1 \text{ mm}$. Dvě měření pak byla provedena při $L_{\text{SP}}=0,4 \text{ mm}$. Vypočítaný výsledek z řady měření je roven $6,57 \pm 1,59 \text{ } \mu\text{m}$ s pravděpodobností 95%.

Poslední měření bylo provedeno při $n=20000 \text{ min}^{-1}$. V těchto výsledcích je patrný vliv vibrací v měřicí oblasti. Vibrace v měřené oblasti byly změřeny individuálně s použitím sondy č. 1 (Obr. 5.3). Velikost vibrací špička-špička je přibližně $6 \text{ } \mu\text{m}$. Je patrné, že výsledná ovalita komutátoru je stejné velikosti, jako jsou vibrace ve snímané oblasti a pro přesné vyhodnocení tvaru komutátoru by bylo nutné průběh vibrací eliminovat. Výsledek vypočtený z řady měření je roven $10,78 \pm 1,42 \text{ } \mu\text{m}$ s pravděpodobností 95%.



Obr. 5.3 : Vibrace stroje změřené při $n=20000 \text{ min}^{-1}$ elektrického stroje typ 2988.000 č. 5.

Výsledná ovalita měření se zvyšuje se zvyšujícími se otáčkami, což je způsobeno vlivem vibrací v měřicí oblasti. Tím vzniká systematická chyba měření, kterou by bylo možno eliminovat, při dokonalém snímání vibrací v měřicí oblasti.

5.2 MĚŘENÍ NA ELEKTRICKÉM STROJI TYPU SCHRAGE V LABORATOŘI

Měření bylo provedeno na motoru, který byl bezprostředně dostupný v laboratořích elektrických strojů na ÚVEE FEKT VUT v Brně. Jednalo se o motor Schrage 2T2733E. Jako první bylo provedeno měření vystupování jednotlivých lamel kontaktní sondou na celém obvodu komutátoru. Toto měření bylo provedeno třikrát. Výsledky měření byly vyhodnoceny podle daného postupu. Byla určena

průměrná hodnota ze tří měření a bylo vyhodnoceno vystupování dvou sousedních lamel a vystupování jednotlivých lamel vzhledem k referenční lamele. Max. vystupování lamely bylo 23 μm . Měření bylo na tomto stroji velice časově náročné.



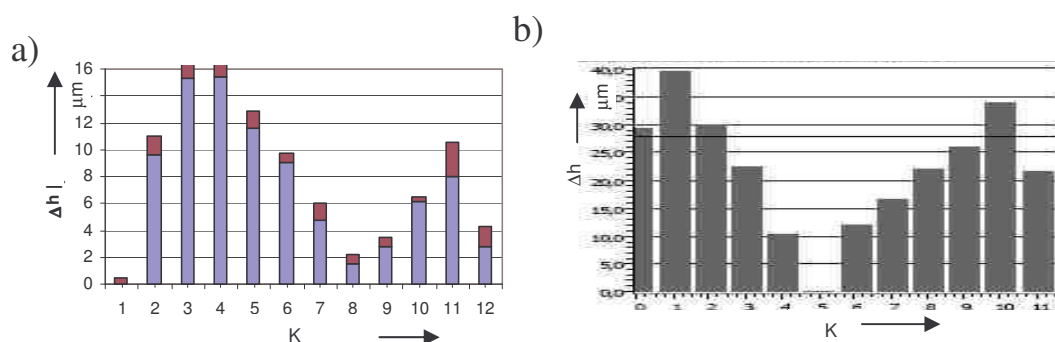
Obr. 5.4 : Zobrazení měřicího zařízení při měření na motoru Schrage.

Legenda: 1 – digitální osciloskop, 2 – ústředna AE2DS pro měření malých vzdáleností, 3 – ústředna snímacích sond, 4 – snímací indukční sondy, umístěné nad komutátorem stroje, 5 – motor typu Schrage

Další měření bylo realizováno bezkontaktním měřením vystupování lamel komutátoru. Jako první bylo provedeno měření převodní charakteristiky. Záznam naměřených hodnot převodní charakteristiky byl automatický. Následně bylo provedeno měření vystupování lamel komutátoru na dvou drahách uhlíkových kartáčů a v rozsahu otáček od 780 – 1500 min^{-1} . Důležité je také porovnání kontaktního a bezkontaktního systému měření. Zmíněna byla již velká časová náročnost kontaktní způsobu. Kontaktním způsobem byla vyhodnocena ovalita komutátoru $\Delta h_v = 23 \mu\text{m}$ a převýšení dvou sousedních lamel do 3 μm . Bezkontaktním způsobem měření s použitím indukčních sond byl výsledek max. vystupování lamely komutátoru roven $\Delta h_v = 26 \mu\text{m}$. Maximální převýšení dvou sousedních lamel bylo $\Delta_M = 6 \mu\text{m}$. Z průběhů vystupování lamel komutátoru vzhledem k referenční lamele je patrná blízká shoda průběhů kontaktního a bezkontaktního měření. Rozdíly ve výsledcích mezi jednotlivými metodami měření jsou ovlivněny tím, že bezkontaktní měření bylo provedeno mimo měřicí zařízení na reálném stroji a tím byla snížena přesnost měření. Bezkontaktní metoda měření je pro případ komutátoru se 139 lamelami, mnohem rychlejší nejen při měření ale i při vyhodnocení, které je zcela automatické.

5.3 MĚŘENÍ NA UHLÍKOVÉM RADIÁLNÍM KOMUTÁTORU

K měřeným rotačním komponentům elektrických strojů byl zařazen i komutátor s tělesem z pryskyřice, osazený 12 lamelami z uhlíkového materiálu. Kontaktní háčky pro připojení vinutí jsou měděné. Takový komutátor se s výhodou používá v prostředí s vyšší chemickou agresivitou. Výsledky statického a dynamického měření jsou znázorněny na Obr. 5.5.



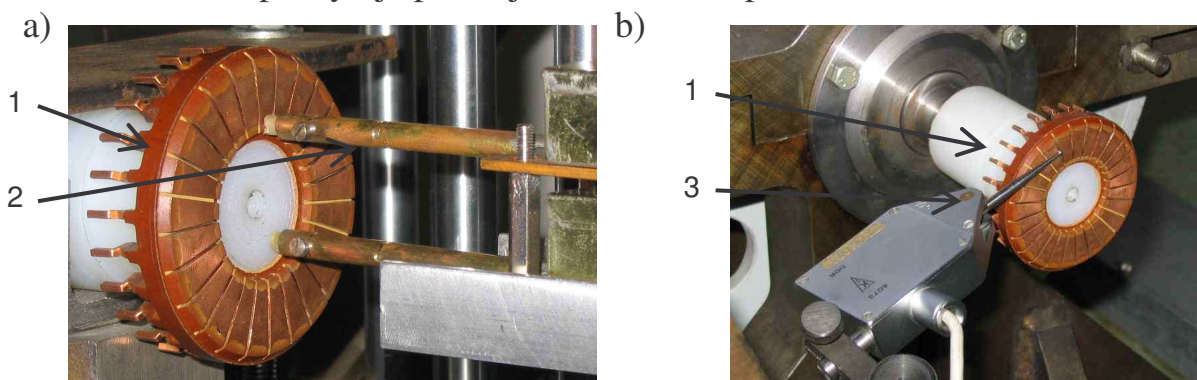
Obr. 5.5 : Průběh vystupování jednotlivých lamel komutátoru s uhlíkovými lamelami vzhledem k referenční lamelle: a) měřeno staticky, kontaktní metodou, b) měřeno dynamicky, bezkontaktní metodou při $n = 1200 \text{ min}^{-1}$.

Rozdíly mezi výsledky kontaktního a bezkontaktního měření jsou dány různými převodními charakteristikami každé lamely, vzniklé pravděpodobnou nehomogenitou materiálu [4]. Jedná se o systematickou chybu, u které je možná i její eliminace. Dalším zdrojem chyby může být zdvojení vrcholu měřeného průběhu. Dva extrémů může vyhodnocovací algoritmus detekovat chybně jako dvě lamely.

5.4 MĚŘENÍ NA AXIÁLNÍM (DISKOVÉM) KOMUTÁTORU

Jako zástupce axiálních komutátorů byl vybrán lisovaný komutátor z epoxidové pryskyřice. Komutátor byl pro účely měření nalisován na přípravku představující volný konec hřídele pro montáž komutátoru. Měřený axiální komutátor, osazený na hřídeli z umělé hmoty, je zobrazen na Obr. 5.6.

První bylo provedeno měření s použitím soustavy pro měření malých vzdáleností AE2DS a kontaktní sondou 4073 DDR. Vystupování lamel komutátoru kontaktní metodou bylo měřeno pro různé poloměry hrotu na lamelle komutátoru. Výsledky měření byly zpracovány pomocí programu pro automatické vyhodnocení naměřených dat v LabVIEW. Na první lamelle byla patrná nerovnost na povrchu. Kontaktní měření poskytuje přesnější informace o povrchu komutátoru.

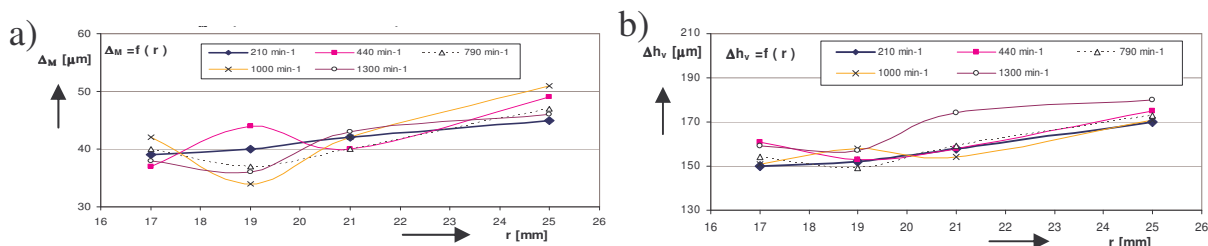


Obr. 5.6 : a) Axiální komutátor při bezkontaktním měření, b) axiální komutátor uchycen na hřídeli stroje při kontaktním měření
 Legenda: 1 – Axiální Cu komutátor, 2 – indukční snímací sonda, 3 – kontaktní snímač vzdálenosti.

Průběhy vystupování lamel vzhledem k referenční hodnotě byly měřeny na poloměrech 17 mm, 19 mm, 21 mm, 22 mm a 25 mm. Na Obr. 5.7 je vynesena závislost maximálního vystupování vzhledem k referenční lamelle na poloměru

komutátoru a maximální hodnota vystupování dvou sousedních lamel na poloměru měření. Tyto dva průběhy vystupování lamel vzhledem k referenční lamela, společně s dalšími průběhy získané kontaktním měřením, pak mohou signalizovat nepřesné usazení komutátoru vzhledem k ose rotace.

Ve druhé části měření bylo provedeno měření převodních charakteristik bezkontaktním způsobem měření s použitím snímací sondy č.2. Převodní charakteristiky byly proměřeny pro dané poloměry axiálního komutátoru. Pro měření s minimální chybou musí být vzdálenost hrotu snímací sondy od sledovaného povrchu 200 μm . Reálně byly nastaveny hodnoty 200 – 400 μm .



Obr. 5.7 a) Závislost maximálních hodnot vystupování vzhledem k referenční lamela na poloměru komutátoru pro bezkontaktní měření, b) Závislost maximálního vystupování dvou sousedních lamel na poloměru komutátor, bezkontaktní měření.

Dále bylo provedeno bezkontaktní měření s použitím snímací sondy č. 2. Odlišností oproti měřením na klasických válcových komutátorech bylo, že měření nebylo prováděno pouze v závislosti na otáčkách sledovaného komutátoru, ale také v závislosti na poloměru měření na povrchu axiálního komutátoru.

Tab. 5.2 : Tabulka naměřených hodnot vystupování lamel axiálního Cu komutátoru

Typ měření	Poloměr měření na povrchu axiálního komutátoru								
		r [mm]							
		17mm	17mm	17mm	19mm	21mm	22mm	25mm	25mm
Kontaktní	Δh [um]	106	101	103	115	113	165 *)	129	126
	Δ [um]	21	18	18	30	27	48 *)	30	34
Bezkontaktní $n=210\text{min}^{-1}$	Δh [um]	150	-	-	152	-	158	170	-
	Δ [um]	39	-	-	40	-	42	45	-
Bezkontaktní $n=440\text{min}^{-1}$	Δh [um]	161	-	-	153	-	158	175	-
	Δ [um]	37	-	-	44	-	40	49	-
Bezkontaktní $n=790\text{min}^{-1}$	Δh [um]	154	-	-	149	-	159	173	-
	Δ [um]	40	-	-	37	-	40	47	-
Bezkontaktní $n=1000\text{min}^{-1}$	Δh [um]	151	-	-	158	-	154	171	-
	Δ [um]	42	-	-	34	-	42	51	-
Bezkontaktní $n=1300\text{min}^{-1}$	Δh [um]	159	-	-	157	-	174	180	-
	Δ [um]	38	-	-	36	-	43	46	-

*) Měření bylo provedeno s rozlišovací schopností měřidla $\pm 1\mu\text{m}$, ostatní kontaktní měření bylo provedeno s rozlišovací schopností $\pm 0,1\mu\text{m}$.

Výstupem každého měření je standardně záznam naměřených napětí na osciloskopu a současně pak i grafické průběhy schodovitých funkcí vystupování lamel vzhledem k referenční hodnotě a vystupování dvou sousedních lamel. Z průběhů byly zpracovány závislosti maximálního vystupování vzhledem k referenční hodnotě a vystupování dvou sousedních lamel na poloměru měření. Tyto závislosti jsou zobrazeny v Obr. 5.7. V průběhu celého měření bylo nutné se

vyhnout rezonančním kmitočtům pohonu, které by ovlivnily výsledky měření. V souhrnu se pak i dvojnásobně zvýšila hodnota maximálního vystupování jednotlivých lamel. Celkové výsledky měření jsou shrnuty v tabulce Tab. 5.2.

Z nich je možné konstatovat, že axiální komutátor byl nejen podle výsledků kontaktního, ale i bezkontaktního měření nepřesně nalisován na upevňujícím nástavci hřídele. Také lze identifikovat jistou nepravidelnost na povrchu komutátoru. Úroveň házení v axiálním směru dosahuje až 30 um.

Z vyhodnocení měření axiálního komutátoru s použitím existujících bezkontaktních snímacích sond lze konstatovat, že tuto metodu je možné použít. Lze ji však doporučit pouze pro axiální komutátory s průměrem větším než 40mm a s menším počtem lamel, jako ve výše uvedeném případě. Nevýhodou těchto měření, oproti válcovým komutátorům, je velmi obtížné sledování vibrací sledovaného povrchu.

5.5 SHRNUTÍ POZNATKŮ Z OVĚŘENÍ FUNKCE MĚŘICÍHO PRACOVÍŠTĚ

Ověření měřicího pracoviště a vyhodnocovacího programu bylo provedeno při opakovaném měření komutátorů na vybraných elektrických stojích. V této kapitole jsou prezentovány výsledky měření čtyř elektrických strojů s odlišnými parametry a provedením komutátoru. V jednom případě bylo měření provedeno i mimo měřicí rám zařízení, čímž byla prokázána mobilita celého zařízení a vlastní metody měření.

Měření uhlíkového komutátoru ukázalo sníženou citlivost sond u materiálů s vyšším měrným elektrickým odporem. Při snímání komutátoru s uhlíkovými lamelami došlo ke snížení citlivosti indukčních sondy přibližně čtyřikrát. S tím souviselo také zvýšení chyby měření až na 10 um.

Měření vícelamelového stroje prokázalo velmi dobrou shodu výsledků kontaktního a bezkontaktního měření, při kterém došlo výraznému snížení času potřebného na provedení celého měření, a tím byla demonstrována další výhoda měřicího zařízení.

Pro výsledky měření komutátoru univerzálního stroje byla vypočtena i chyba měření s pravděpodobností 95%. Tato chyba odpovídá teoreticky odvozené chybě v kapitole 4, zabývající se rozbohem vlivů, ovlivňujících chybu měření.

6. ZÁVĚR

Práce je věnována problematice měření velmi malých vzdáleností na rotujících vodivých částech elektrických strojů. Pozornost byla především věnována sledování vystupování lamel komutátorů elektrických strojů a vnějšího povrchu kroužků elektrických strojů. Navazuje na již existující práce týkající se měřicího pracoviště pro sledování malých vzdáleností na elektrických stojích a měřicího řetězce, které dále rozvíjí. Stávající pracoviště bylo v průběhu práce osazeno novými snímacími sondami, které zajistily snížení chyby měření a zvýšení odolnosti k EMC rušení od pracujících zkoušených komutátorových strojů. Aplikovaný indukční princip u snímacích sond umožňuje navíc určit i měrný elektrický odpor materiálu sledovaného objektu a jeho tvarové odchylky. Práce se především věnuje

konfiguraci měřicího pracoviště s novými sondami pro sledování malých vzdáleností s cílem zajistit co nejnižší chybu měření a opakovatelnost měření. Tyto požadavky úzce souvisí s vyhodnocením naměřených dat, jejich záznamem a dodržováním stanoveného postupu měření. V průběhu práce byl realizován vývoj nového vyhodnocovacího programu v softwaru Labview, zajišťujícího dodržování pouze jednoho definovaného systému vyhodnocení naměřených dat. Dříve totiž docházelo při vyhodnocení v programu MS Excel k rozdílnému způsobu vyhodnocení a tím i k nevyhovující korelaci jednotlivých měření. Vyvinutý program zajišťuje rovněž okamžitou možnost vyhodnocení a tisk naměřených dat, čímž se podařilo několikanásobně snížit časovou náročnost vyhodnocení v porovnání s programem MS Excel. Vzhledem k tomu, že dnes je věnována u měřicích zařízení pozornost i tomu, s jakou chybou a nejistotou měření je provedeno konkrétní měření, jsou v práci rozpracovány jednotlivé části měřicího řetězce a studováno působení různých vlivů na velikost chyby, ovlivňující měření. Po rozboru jednotlivých vlivů, působících na výsledky měření, je možné jich většinu ohodnotit jako systematické chyby měření s tím, že při dodržení přesného postupu měření je možná jejich eliminace. Systematické chyby jsou dány především tvarovými rozdíly sledovaných objektů a také jejich materiálovou různorodostí. Nadále je nutno počítat s náhodnými chybami, způsobenými obsluhou při měření a vlastním měření, které již nelze ovlivnit ani úpravou měření případně změnou postupu při měření. Jedná se zde především o chybu, způsobenou změnou teploty snímací cívky a chybu měření převodní charakteristiky. S respektováním těchto nepřesností byla vyjádřena chyba měření pro běžné měřené komutátoru s šířkou lamel větší než 2,5 mm. Velikost této chyby se pohybuje v rozsahu ± 2 μm . V práci je rovněž prezentována řada měření průběhů vystupování lamel komutátoru na reálných strojích.

7. POUŽITÁ LITERATURA A ODKAZY

- [1] Hruška, K: *Statistické metody I*,
- [2] ČSN 35 0101, Elektrické stroje točivé. Zkoušení stejnosměrných strojů, účinnost 1988-01-01, v platném znění.
- [3] ČSN 35 0847, Elektrické stroje točivé. Lisované komutátory, účinnost 1966-04-01, v platném znění.
- [4] ČSN 35 0846, Elektrické stroje točivé. Válcové komutátory, účinnost 1978-04-01, v platném znění.
- [5] ČSN 35 0010, Točivé elektrické stroje. Zkoušky, účinnost 1992-08-01, v platném znění.
- [6] ČSN 01 4406, Všeobecné tolerance. Část 2: Nepředepsané geometrické tolerance, účinnost 1994-10-01, v platném znění.
- [7] <http://www.micro-epsilon.com>, 2007.
- [8] Bradík, J.: Metodika vyjadřování nejistoty měření, *Elektrorevue*, www.elektrorevue.cz, ISSN 1213-1539, Brno 5.2.2002.
- [9] Pozdník, J : Inovace měřicího zařízení pro sledování malých vzdáleností. Disertační práce, ÚVEE FEKT VUT Brno 2005.
- [10] Dědek, L., Dědková, J.: *Elektromagnetismus*. Brno 1998, ISBN 80-214-1106-6.
- [11] Šmajstrla, V.: Impedance indukčnosti snímače nad pohybujícím se objektem měření, *Elektrotechnický obzor*, str. 497-502, 1987.
- [12] Šmajstrla, V.: Vztažná soustava rotujícího objektu měření, *Elektrotechnický obzor*, str. 361–364, 1987.
- [13] http://www.gotoemerson.com/brands/motor_tech/br_mt_dp.html., 2007
- [14] Technical documents of the charge amplifier 2635. Brüel & Kjaer, Dánsko, 1993.
- [15] Čermák, L., Hlavička, R.: Numerické Metody řešení soustav lineárních rovnic, Ústav matematiky, FSI, VÚT Brno, 6. února 2006.
- [16] <http://www.ndt-ed.org/EducationResources/>, 20. listopad 2008
- [17] Veselka, F.: Podkladové materiály k měřicímu pracovišti, Brno 2000.

8. CV AUTORA

Jméno a příjmení: Ing. Pavel Štorek
Email: stori@email.cz
Datum narození: 8. 5. 1979

Dosažené vzdělání:

2002 – nyní Postgraduální studium – VUT v Brně,
Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky
1997 – 2002 Magisterské studium – VUT, Brno – titul Ing.
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky
1993 – 1997 SPŠ Elektrotechnická, Pardubice – maturita
obor Elektronické počítačové systémy

Pracovní zkušenosti:

2007 – 2009 Honeywell spol. s r.o., pozice servisní inženýr a podpora testování
- technický dohled na testovací zařízení, příprava testů a vyhodnocení
- programová podpora testování a příprava testů podle specifických požadavků (hluk vibrace)
2005 – 2007 VUES a.s., Brno – Inženýr projekce konstrukce elektrických zařízení
- práce v oddělení návrhu a výpočtu elektrických strojů
- specializace na lineární motory
- podle požadavků zákazníků zpracování návrhu řešení pro jejich aplikace
2003 – 2005 VUT, Brno – Ústav silnoproudé elektrotechniky a elektroniky
účast na výuce v laboratořích
- vedení semestrálních projektů, konzultant při vedení diplomových prací

Další znalosti a dovednosti:

Znalost cizích jazyků: AJ – aktivní znalost, střední úroveň - komunikativní
Znalost práce na PC: Labview (vývoj vyhodnocovacího programu měření),
FEMM 2.0 (výpočty elektromagnetických zadání),
VBA – Visual Basic for Application

9. ABSTRACT

This work is dedicated to small distance contact-less measurement. Especially the surface detection of the commutator or collector of the electrical machines was described. The probes utilising the induction principle of the distance measurement have been developed. The part of the work described the history of the induction distances sensing in FEEC BUT and the using of the induction principle in the industry small distances sensing nowadays. The paper concretely determines the possibilities of the small distances measurement using mentioned probes. The sensitivity for different materials was investigated and the error of the measurement for different measuring object was investigated, too. The effects, that could affected the measurement error, were described in the work. The contribution of the each effect for the total measuring error was specified. Next part is including the description of the measuring workstation and of the hardware and software. At the end the verification of the measuring principle and measuring workstation is presented. The verification has been made on three different commutator types. The verification results are in the conclusion.