

# Technická univerzita v Liberci

Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií



## Defektoskopie vířivými proudy pomocí diferenčních reflexních snímačů

Autoreferát disertační práce

červen 2008

Jiří BAŽANT

# Technická univerzita v Liberci

Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií

## Defektoskopie vířivými proudy pomocí diferenčních reflexních snímačů

## Eddy Current Testing utilizing Differential Reflection Probes

Ing. Jiří BAŽANT

Studijní program: P 2612 Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 2612V045 Technická kybernetika

Pracoviště: Ústav řízení systémů a spolehlivosti  
Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií  
Technická univerzita v Liberci  
Studentská 2, 461 17 LIBEREC 1

Školitel: Doc. Ing. Ivan JAKSCH, CSc.

Rozsah disertační práce:

Počet stran: 127  
Počet příloh: 2 + CD  
Počet obrázků: 73  
Počet tabulek: 3

## Abstrakt

Diferenční reflexní sonda vířivých proudů je nejcitlivějším možným provedením sondy schopným detekovat nejmenší povrchové vady ze všech typů sond vířivých proudů. Nicméně toto provedení s sebou samozřejmě přináší i řadu komplikací ve srovnání s ostatními, méně citlivými provedeními. Rozhodně jej tedy nelze obecně označit za nejlepší typ provedení. Veškeré jeho nedostatky ve srovnání s ostatními lze ovšem shrnout do jediné vlastnosti, kterou je obtížná interpretace naměřených výsledků. Ta je dána dvěma skutečnostmi. Zaprvé, diferenční konstrukce dokáže dobře interpretovat bodové vady, způsobující rychlé změny signálu, ovšem velmi špatně plošně rozsáhlé vady, způsobující pomalou změnu a tedy minimální diferenční signál. Tato skutečnost je základní vlastností tohoto provedení a nelze ji odstranit. Druhou negativní skutečností, která je touto prací řešena, je kombinace diferenčního a reflexního režimu, který prakticky znemožňuje interpretovat měřený signál jako impedanci, pomocí které je interpretován na většině ostatních provedeních, resp. rozdílovou impedanci, pomocí které je interpretován na provedení čistě diferenčním. K interpretaci pomocí impedance resp. rozdílové impedance jsou vztaženy prakticky veškeré existující teorie v defektoskopii vířivými proudy, proto aplikace těchto teorií je v případě diferenčního reflexního provedení velmi omezená.

Tato práce hledá postupy, jak signál z diferenčního reflexního provedení interpretovat plnohodnotně ve srovnání s čistě diferenčním provedením tak, aby bylo možné využít všech předností reflexního režimu, především citlivosti na povrchové vady, ale potlačeny veškeré jeho nedostatky. Je zde zpracována komplexní metoda, jak měření z diferenčního reflexního provedení interpretovat jako ekvivalentní rozdílovou impedanci odpovídající čistě diferenčnímu provedení, včetně aspektů nejrůznějších provozních podmínek, kdy za určitých podmínek je tato interpretace snadnější a naopak za jiných velmi komplikovaná.

Jednou ze skutečností zajišťující vysokou citlivost tohoto provedení je jeho vysoká odolnost proti takzvanému „Lift-Off Noise“, tedy změně vzdálenosti mezi sondou a testovaným objektem během provozu. Mnohdy je tato vlastnost prezentována jako dokonalá a ne vždy je tak známo, že jistá citlivost na „Lift-Off Noise“ zde přeci jen existuje a díky častému použití této sondy k detekci těch nejmenších vad může znamenat srovnatelný problém jako u sond absolutních (nediferenčních). V této práci je detailně popsán princip citlivosti na „Lift-Off Noise“, který je u tohoto provedení odlišný než u absolutních provedení. Je zde zpracována analyticky vytvořená a odvozená metoda eliminující tuto „zbytkovou“ citlivost na „Lift-Off Noise“, která je teoreticky schopna zajistit úplnou odolnost. Tato metoda je založena na fundamentálních principech diferenční reflexní sondy a nalezena byla čistě analyticky bez použití jakýchkoli empirických poznatků. Empiricky je pouze testována. V souvislosti s touto metodou potlačení citlivosti na „Lift-Off Noise“ je zde rovněž odvozen analytický způsob částečné kvantifikace rozměru vady.

Soubor nových poznatků, které tato práce přináší, je schopen zvýšit spolehlivost a citlivost defektoskopických přístrojů, které je implementují, a zjednodušit orientaci v naměřených datech.

Klíčová slova: defektoskopie, vířivé proudy, diferenční sonda, hybridní sonda, rozdílová impedance, přiblížení

## Abstract

Hybrid eddy current probe working in differential and reflection mode simultaneously is the most sensitive probe to surface defects of all other modes of operation. But unlike other modes of operation that are less sensitive, this is more complicated in interpretation. So the differential reflection mode isn't the best mode in all cases. A differential signal measured in this mode is hard to interpret. This is caused for two reasons. First, the differential mode exceeds in the small spots interpretation because they cause fast signal change. But the interpretation of the defect situated on a large area is very hard to interpret because this causes very slow change then a very small differential signal. This is a fundamental feature and can't be removed any way. The second adverse reason we try to remove is the differential and reflection mode simultaneously. This disallow interpret the measured differential signal like an impedance. The impedance interpretation is used in all other modes. The pure differential mode employs the differential impedance interpretation. Because most of eddy current testing theory is based on the impedance a utilization of this theory on the differential reflection mode is limited.

This thesis try to discover a procedure capable to interpret the signal measured on the differential reflection probe the same like the pure differential probe. This procedure should exploit all advantages of the reflection mode, specially the good surface defects sensitivity, and suppress all disadvantages. In this case is here discovered a complex method enabling transformation of a directly measured signal on the differential reflection probe to an equivalent differential impedance of the pure differential probe. This method takes into account many operating conditions because under some conditions is this transformation relatively easy and under others is very complicated.

One of the features providing a high defect sensitivity of the differential reflection mode is liftoff insensitivity, so insensitivity to a change of a distance between the probe and a tested sample. This feature is often considered as an ideal feature but some liftoff sensitivity really there has been and may cause similar problem like on absolute (non-differential) probe because it is designed for adequate small defects. This thesis is detailing a principle of the liftoff sensitivity of the differential reflection mode which is other from absolute mode. As well discovers analytically formed method suppressing this residual liftoff sensitivity. This method is based strictly on a fundamental theoretic knowledge and it is able to achieve total liftoff insensitivity theoretically. In connection with this liftoff sensitivity suppressing method is here derived a method quantifying size of the defect partially.

A set of all this new findings this thesis discovers is able to improve eddy current device performance and resolution. As well makes the results better human readable.

Keywords: Non Destructive Testing, NDT, Eddy Current, Differential Probe, Hybrid Probe, Differential Impedance, Liftoff

# Obsah

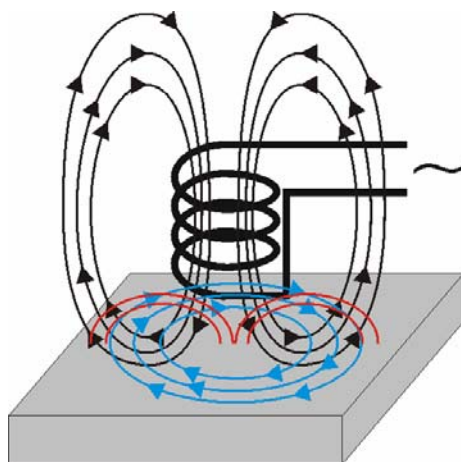
<b>1</b>	<b>ÚVOD</b> .....	<b>6</b>
1.1	Sondy vířivých proudů .....	7
<b>2</b>	<b>CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE</b> .....	<b>9</b>
2.1	Současný stav .....	9
2.2	Problém iniciující hlavní cíle disertační práce .....	10
<b>3</b>	<b>ANALÝZA ROZDÍLOVÉ IMPEDANCE</b> .....	<b>13</b>
3.1	Náhradní obvod diferenční reflexní sondy .....	13
<b>4</b>	<b>POTLAČENÍ VLIVU LIFT-OFF NOISE</b> .....	<b>16</b>
4.1	Souhlasná a nesouhlasná vzdálenost .....	16
4.2	Jednoduchý matematický model diferenční reflexní sondy .....	19
4.2.1	Profil citlivosti sondy .....	20
<b>5</b>	<b>VYBRANÉ EXPERIMENTY</b> .....	<b>22</b>
5.1	Model testovacího zařízení ložiskových kuliček .....	22
5.2	Impedanční trajektorie přiblížení .....	23
5.3	Význam citlivostního profilu pro detekci vad .....	25
5.4	Potlačení vlivu „lift-off noise“ pomocí citlivostního profilu .....	27
<b>6</b>	<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>31</b>
	<b>PŘEHLED PUBLIKACÍ</b> .....	<b>33</b>

# 1 Úvod

Defektoskopie vířivými proudy je metoda nedestruktivního testování vad a sledování různých vlastností vodivých materiálů, nejčastěji kovů. Jde o jednu z metod pracujících na principu elektromagnetismu. S její pomocí je možné určit vodivostní vlastnosti, ověřit složení či použité metalurgické procesy (kalení, žíhání), odhalit mechanické vady, měřit geometrické vlastnosti povrchu materiálu či jeho šířku atd..

Princip defektoskopie vířivými proudy, přesněji princip vzniku vířivých proudů, lze vysvětlit následujícím způsobem. Nastane-li vzájemný pohyb mezi elektricky vodivým materiálem a siločarami magnetického pole, je ve vodiči vyvolán rotující pohyb elektronů neboli indukován elektrický proud tekoucí v kruhových trajektoriích. Proto jsou tyto proudy nazývány vířivými proudy.

K defektoskopii je tohoto principu využito prakticky obvykle s pomocí cívky, jejíž vinutí je napájeno střídavým proudem. Tím dochází ke změně intenzity magnetického pole a tedy k pohybu siločar. Magnetické pole vyvolané průtokem proudu vinutím indukuje vířivé proudy do testovaného vzorku z vodivého materiálu umístěného v blízkosti vinutí. Indukované vířivé proudy tečou v uzavřených smyčkách, čímž vytvářejí sekundární magnetické pole v okolí testovaného vzorku. Toto magnetické pole indukuje elektrický proud do vinutí, což se projeví jako změna impedance vinutí. Uplatňuje se zde tedy vzájemná indukčnost.



**Obrázek 1:** Vířivé proudy

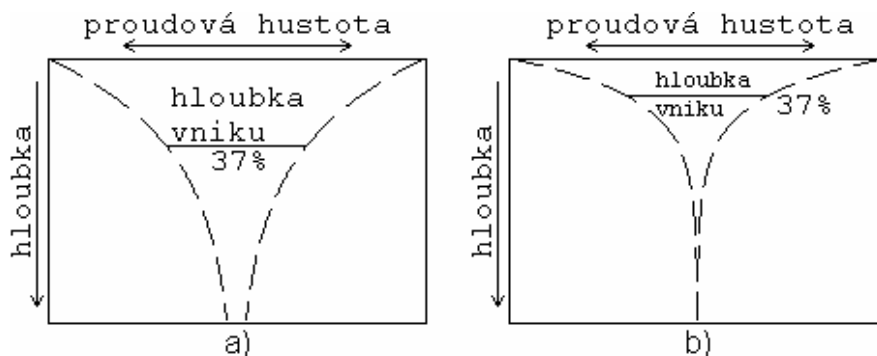
V případě vady vzorku například v podobě trhliny dojde k přerušení smyčky vířivých proudů v místě trhliny a tím ke změně sekundárního magnetického pole kolem vzorku a tedy i změně proudu indukovaného do vinutí. Tento stav je detekován změnou impedance vinutí oproti vzorku bez trhliny.

Smyčky vířivých proudů obvykle tečou v rovině rovnoběžné se závity vinutí i povrchem testovaného vzorku. Nejvyšší hustota vířivých proudů je na povrchu a s hloubkou exponenciálně klesá. Toto se nazývá povrchový jev „skin effect“. Velikost poklesu hustoty proudů v závislosti na podpovrchové hloubce je charakterizována hloubkou vniku  $\delta$ .

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \sigma}}, \quad (1)$$

kde  $\delta$  je hloubka vniku (m),  
 $f$  je frekvence střídavého proudu, kterým je napájeno vinutí (Hz),  
 $\mu$  je magnetická permeabilita materiálu testovaného vzorku ( $\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$ ),  
 $\sigma$  je měrná vodivost ( $\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$ ).

V hloubce odpovídající hloubce vniku činí hustota vířivých proudů  $1/e$  (37%) hustoty na povrchu.



**Obrázek 2:** Hustota vířivých proudů, a) nízká frekvence, b) vysoká frekvence

Jelikož citlivost defektoskopie vířivými proudy závisí na proudové hustotě v místě vady, je důležité znát hloubku vniku. Obecně by mělo být zajištěno, aby hloubka vniku byla vyšší než hloubka do které je třeba detekovat vadu. Hloubka vniku však nemá význam definitivní limitní hloubky, tj. velkou vadu je možné detekovat i ve větší hloubce. Naopak, jedná-li se o měření vodivosti nebo magnetických vlastností materiálu, je třeba zajistit hloubku vniku ne větší než  $1/3$  tloušťky testovaného materiálu, aby měření nebylo ovlivněno změnou tloušťky materiálu. Prakticky lze hloubku vniku ovlivnit pouze volbou frekvence.

Je třeba upřesnit, že citlivost na vady v různých hloubkách nezávisí pouze na hloubce vniku. Tj. i při dvojnásobné hloubce vniku bude citlivost na stejně velké vady ve dvojnásobné hloubce nižší. Jediný způsob dosažení vyšší hloubky vniku je snížení frekvence buzení. Nižší frekvence znamená nižší gradient magnetického pole, tedy i nižší relativní hustotu vířivých proudů v místě vady, indukce vířivých proudů je rozložena do většího objemu materiálu. Přerušením smyčky vířivých proudů důsledkem vady dojde k přerušení relativně menších proudů vůči celkovému množství indukovaných proudů. Zvýšením hloubky vniku tedy dojde ke zvýšení schopnosti detekovat vady ve vyšších hloubkách, ale zároveň k celkovému snížení citlivosti.

Přibližně lze tvrdit, že zvýšením hloubky vniku proti libovolné současné hloubce vniku dojde ke zvýšení citlivosti v hloubce větší, než je současná hloubka vniku, ale ke snížení citlivosti v menší hloubce.

## 1.1 Sondy vířivých proudů

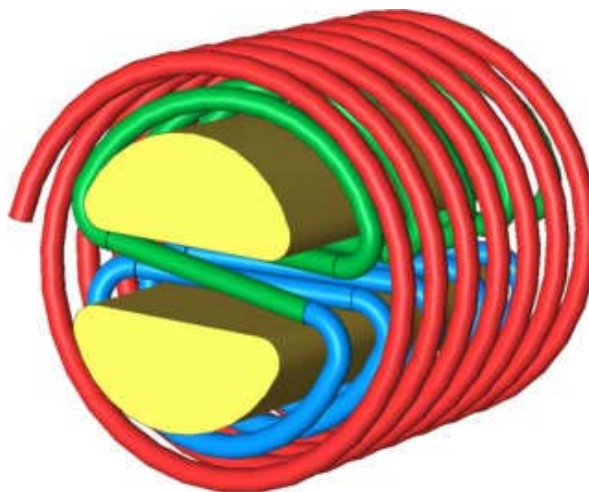
Sondy vířivých proudů obecně pracují na výše uvedeném principu. V blízkosti testovaného vzorku vybudí magnetické pole a ve stejném nebo blízkém místě detekují indukované magnetické pole vzorkem. Mohou ovšem pracovat v různých režimech lišících se počtem vinutí, jejich zapojením a uspořádáním. Zde jsou ve stručnosti shrnuty základní režimy.

**Absolutní sondy** jsou obvykle tvořeny jediným vinutím, které budí magnetické pole a zároveň snímá sekundární magnetické pole vybuzené vířivými proudy. Svým principem tedy přesně odpovídají obecnému principu z předchozího textu a obrázku 1. Změna magnetického pole se projeví jako změna impedance vinutí. Měřicí defektoskopický přístroj tak obvykle vyhodnocuje impedanci vinutí. Tyto sondy jsou vhodné pro měření vodivosti, tloušťky materiálu, vzdálenosti a trhlin.

**Diferenční sondy** jsou realizovány pomocí dvou vinutí ve fázi či protifázi. V případě, že se obě vinutí nachází nad nedefektní částí testovaného materiálu, rozdílový signál je nulový. Nachází-li se jedno z vinutí např. nad trhlinou, vznikne nenulový rozdílový signál, resp. rozdílová impedance, jelikož v případě diferenční sondy je nejčastěji vyhodnocován právě rozdíl mezi impedancemi obou vinutí. Aby nebylo nutné vyhodnocovat impedance každého z vinutí nezávisle za pomoci dvou „měřičů“ impedance, je používáno nejruznějších přibližných metod, analogových nebo číslicových. Nejčastěji můstkových převodníků rozdílové impedance. Diferenční provedení je na rozdíl od absolutního mnohem méně ovlivňováno změnou vzdálenosti od testovaného vzorku, tzv. přiblížením.

**Reflexní sondy** využívají dvou vinutí, z nichž jedno budí magnetické pole a druhé snímá změny magnetického pole. Snímací vinutí může být velmi malé, tedy citlivé na velmi malé vady. Jde v podstatě o transformátor. U těchto typů sond je standardně vyhodnocováno napětí na snímacím vinutí.

**Hybridní sondy** jsou konstruovány kombinací předchozích metod. Jako příklad je uveden diferenční reflexní snímač. Budící vinutí, na obrázku 3 označené červeně, je navinuto kolem dvou jader. Snímací vinutí jsou v tomto případě 2 a jsou navinuta každé zvlášť okolo jednoho jádra v opačném směru. Snímací vinutí jsou zapojena sériově. V případě ideálně symetrického snímače bude signál nulový, pokud se obě jádra budou nacházet nad nedefektní oblastí testovaného vzorku. Tento typ snímače je vůbec nejcitlivějším snímačem na povrchové trhliny. Konstrukce s feritovými jádry je jednou z možných variant, snímač může samozřejmě pracovat i bez použití jader.



**Obrázek 3:** Uspořádání vinutí v diferenční reflexní sondy ECT<sup>1</sup>

Závity mohou být navinuty kolem feritových jader. Jde o feromagnetický materiál. Magnetický tok je tak usměrněn do hrotu sondy, která je díky tomu citlivější.

U diferenční reflexní sondy je vyhodnocován rozdíl napětí mezi dvojicí snímacích vinutí. Stejně jako u čistě diferenčního provedení, je i zde mnohem menší ovlivnění přiblížením než u absolutního provedení nebo u čistě reflexního provedení.

---

<sup>1</sup> Eddy Current Testing



## 2 Cíle disertační práce

Cíle disertační práce byly iniciovány vývojem třídícího automatu ložiskových kuliček, který probíhal ve spolupráci s firmou Temos tools a.s. a firmou Stim tools a.s., a na němž se autor podílel. Tento třídící automat využívá ke kontrole kvality ložiskových kuliček diferenční reflexní snímač vířivých proudů. Nejdůležitějším požadavkem byla samozřejmě spolehlivost, přesnost a schopnost odhalit co možná nejmenší vady. Během vývoje bylo zjištěno, že splnění těchto požadavků je značně limitováno jednak obtížným porozuměním a interpretací naměřených výsledků, což je problém, který je i literaturou uváděn jako hlavní nevýhoda tohoto snímače. Za příčinu limitující uvedené požadavky byl rovněž konstatován jistý pohyb, který během kontroly vykonávala testovaná ložisková kulička a který způsoboval změnu vzájemné polohy mezi sondou a testovanou kuličkou. Tato problematika je anglickou literaturou označována jako tzv. „lift-off noise“ a tzv. „probe wobble“. Do češtiny přeloženo, šum způsobený přiblížením a oddalováním sondy a kývání sondy.

Cílem disertační práce proto je především zabývat se interpretací snímaného signálu z diferenční reflexní sondy a způsoby jak i v případě, že je tato sonda vystavena zmíněným nežádoucím efektům, rozpoznat vadu s co možná největší přesností a spolehlivostí, ideálně se stejnou spolehlivostí, které je dosahováno bez přítomnosti nežádoucího pohybu.

Protože u ložiskových kuliček je nejdůležitější především kvalita povrchu a protože i tento typ sondy je určen především na povrchové vady, zaměřit se především na optimalizaci pro povrchové vady.

### 2.1 Současný stav

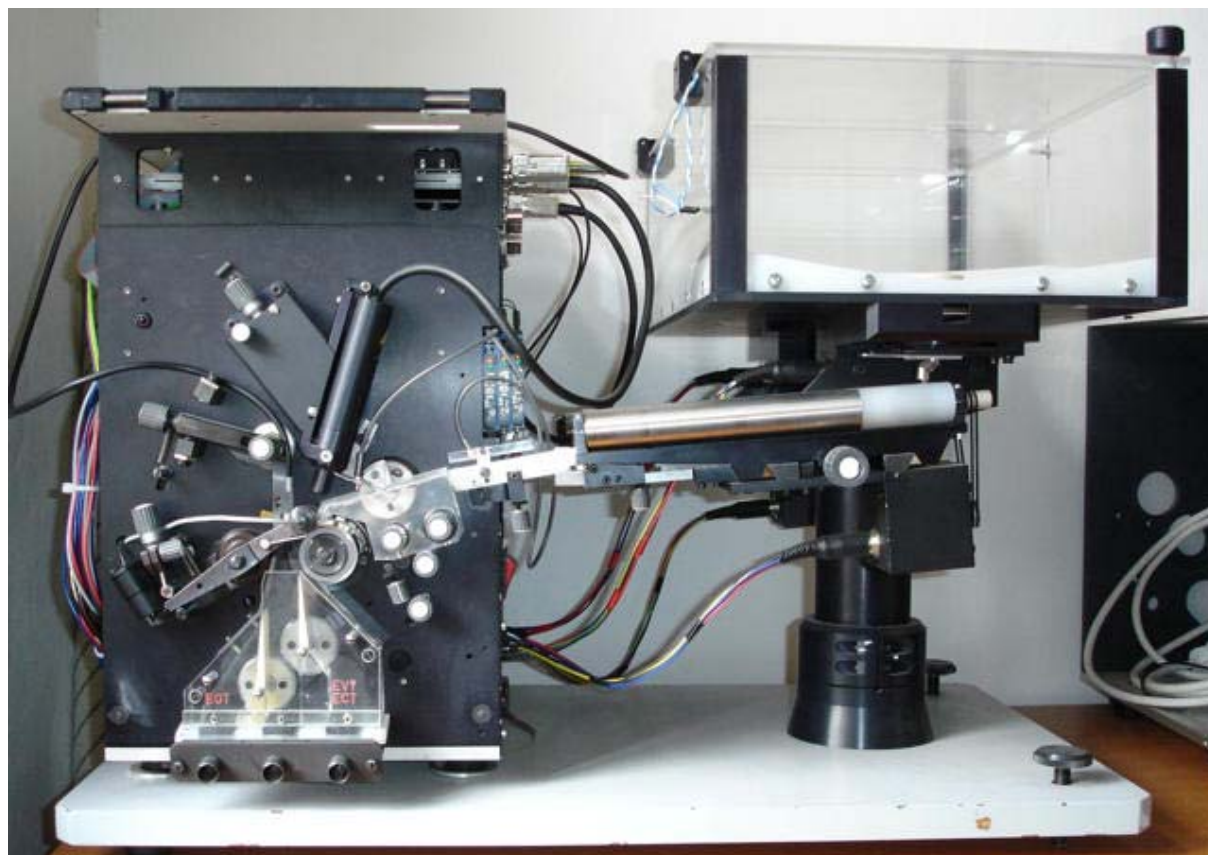
Obtížná interpretace měřeného signálu z diferenčního reflexního provedení lze shrnout do dvou faktorů. První je dán diferenční konstrukcí a je tudíž společný i pro čistě diferenční provedení, které dokáže dobře interpretovat bodové vady, jsou-li mnohem menší než snímaná plocha pod jednotlivými vinutími. Velmi špatně však interpretuje plošně rozsáhlé vady větší než snímaná plocha, které způsobují pomalou změnu a tedy minimální diferenční signál. V takovém případě je navíc diferenční sonda silně závislá na orientaci vůči vadě. Tato skutečnost vychází z principu diferenčního provedení a odborná literatura neuvádí prakticky žádný pokus tento problém obecně řešit.

Druhý faktor vychází naopak z reflexní konstrukce, která znemožňuje rozdílový signál interpretovat jako rozdílovou impedanci. To je velký problém, protože za pomoci impedanční interpretace je definována většina teorií v defektoskopii vířivými proudy. Odbornou literaturou je tato skutečnost považována za fakt a podobně, jako předchozí obtížná interpretace plošně rozsáhlých vad, není řešen.

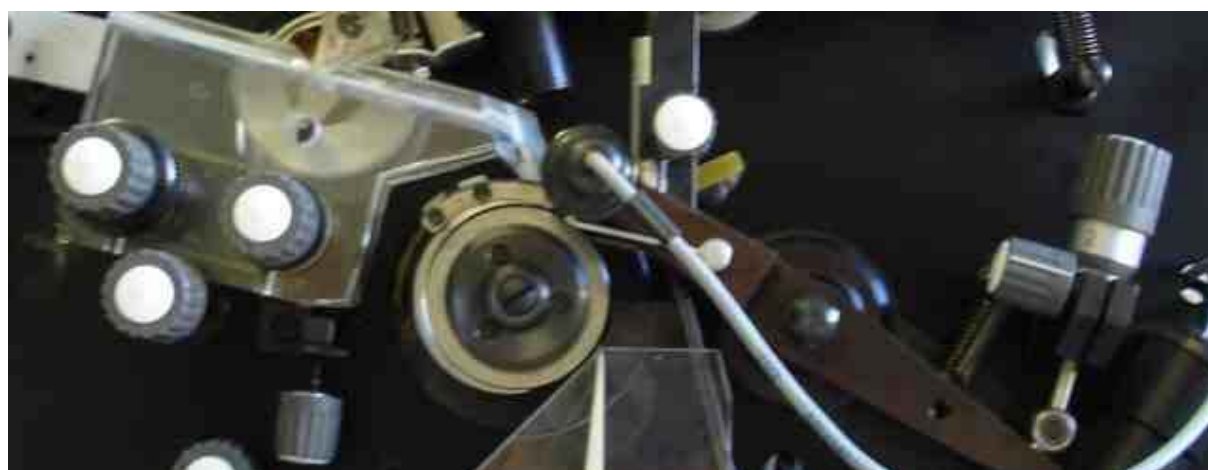
Diferenční konstrukce, ať již diferenční reflexní nebo čistě diferenční, je minimálně závislá na přiblížení sondy, „lift-off“ nebo „lift-off noise“. Z pohledu závislosti na přiblížení není mezi diferenční reflexní a čistě diferenční sondou velký rozdíl. Někdy je sice tato závislost označována za nulovou, nicméně tak tomu není.

Konkrétními a nejdůležitějšími cíly tedy jsou tyto. Nalézt prakticky jednoduše použitelnou metodu, která dokáže u diferenční reflexní sondy provádět defektoskopii analýzou rozdílové impedance stejně jako u čistě diferenční sondy a nelézt postup, který umožní ještě více potlačit závislost této sondy na přiblížení pomocí následného zpracování signálu, nikoli konstrukčními úpravami sondy. Pokusit se zlepšit obecnou interpretovatelnost měřeného rozdílového signálu z diferenční sondy.

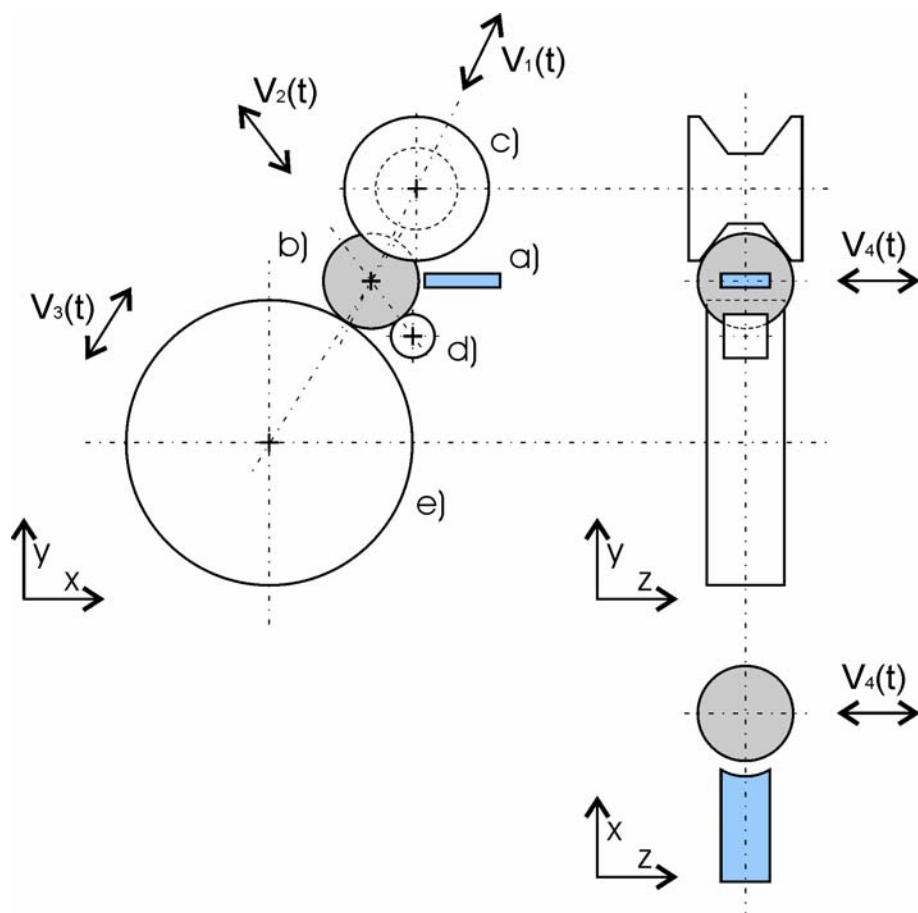
## 2.2 Problém iniciující hlavní cíle disertační práce



**Obrázek 4:** Mechanická část třídícího automatu ložiskových kuliček



**Obrázek 5:** Detail mechanismu třídícího automatu



**Obrázek 6:** Ilustrativní nákres mechanismu třídícího automatu

- a)** sonda vířivých proudů ECT
- b)** testovaná kulička
- c)** řídicí kladka (zajišťuje takový pohyb kuličky, aby byl otestován celý povrch)
- d)** opěrná kladka
- e)** roztáčecí kotouč

- $v_1(t)$  výchylka kmitů způsobených řídicí kladkou v tečném směru
- $v_2(t)$  kmity způsobené opěrnou kladkou v tečném směru
- $v_3(t)$  kmity způsobené roztáčecím kotoučem v tečném směru
- $v_4(t)$  kmity od řídicí kladky v příčném směru

Na obrázku je ilustrativně znázorněn mechanismus třídícího automatu ložiskových kuliček. Jde skutečně pouze o ilustraci nikoli o technický výkres. Úmyslně jsou maximálně zkresleny rozměry, polohy i tvary a vynecháno maximum detailů. Veškeré konstrukční i výrobní postupy jsou vlastnictvím firmy Temos Tools a.s., která mechanismus třídícího automatu zapůjčila a v žádném případě nebylo úmyslem zveřejnit nic, co by mohlo být zneužito.

Nežádoucí parazitní kmity/pohyby, které kulička vykonává relativně vůči sondě způsobují řádově větší úroveň vyhodnocovaného rozdílového signálu, než jakou úroveň vyvolá vada o velikosti odpovídající požadované prahové rozlišovací schopnosti. Tyto pohyby jsou zákonitým důsledkem rotačního pohybu všech jednotlivých částí a nelze je eliminovat.

Cylindrické kladky, které se dotýkají povrchu kuličky v jediném bodě, kladky *d*) a *e*), produkují vibrace resp. pohyb kuličky převážně ve směru normály mezi povrchem kladky a kuličky. Tyto směry jsou zde označeny jako  $v_2$  a  $v_3$ . Řídící kladka, která je tvořena dvěma protilehlými přibližně kuželovými plochami, se dotýká povrchu kuličky ve dvou bodech a lze opět předpokládat, že kmitý produkuje ve směru normál. Tyto lze tedy rozložit na příčný směr rovnoběžný s osou kladky v ose Z, označený  $v_4$  a směr v rovině XY odpovídající spojnici středů kladky a kuličky označený  $v_1$ . Řádově největší je výchylka ve směru  $v_4$ , což je nutným důsledkem speciálního tvaru kladky *c*) tak, aby zajistila rotaci ve dvou osách. Její tvar není ve skutečnosti zcela kuželový, neboť pak by takovýto pohyb nebyl zajištěn.

Aby bylo možné popsat přenos těchto kmitů do souhlasného a nesouhlasného pohybu, je třeba transformovat vektory do souřadného systému zvoleného podle polohy sondy ECT. V naznačeném pravoúhlém souřadném systému XYZ leží osa sondy ECT v ose X. Výsledný vektor kmitání rozložený do složek xyz bude následující.

$$v_x(t) = v_1(t) * \cos(\alpha) + v_2(t) * \cos(\beta) + v_3(t) * \cos(\chi)$$

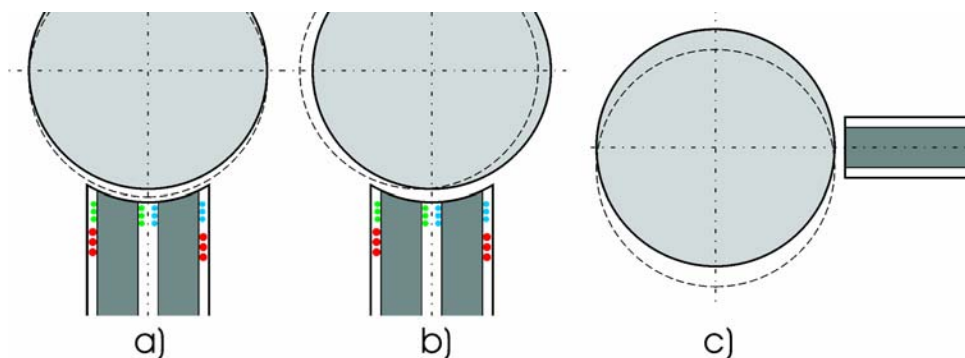
$$v_y(t) = v_1(t) * \sin(\alpha) + v_2(t) * \sin(\beta) + v_3(t) * \sin(\chi)$$

$$v_z(t) = v_4(t)$$

kde

$\alpha, \beta, \chi$  úhly mezi  $v_1, v_2, v_3$  a osou x

Velikost úhlů  $\alpha, \beta, \chi$  se mění v závislosti na konfiguraci. Důležitým zjištěním ovšem je, že ve směru osy Z se přenášejí pouze příčné kmity vyvolané kladkou *c*).



**Obrázek 7:** Relativní pohyb mezi sondou a kuličkou v různých osách kuličkou v různých osách

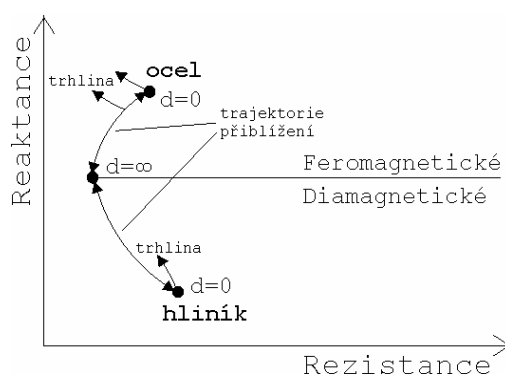
a) ve směru osy X, b) ve směru osy Z, c) ve směru osy Y

Z obrázku je patrné, že kmitý v ose X mají za následek shodnou změnu vzduchové mezery mezi testovaným povrchem a oběma jádry, rozloží se tedy převážně do souhlasného pohybu, tzv. přiblížení, proti kterému je tento typ sond podstatně odolnější než absolutní sondy. Při výrazně nesouhlasně orientované sondě se však částečně mohou rozložit i do pohybu nesouhlasného. Kmitání v ose Y nemá na souhlasnost ani nesouhlasnost prakticky žádný vliv. Kmitání v ose Z, které je produkováno výhradně příčnými výchylkami od kladky *c*), je rovněž výhradním zdrojem nesouhlasného pohybu. Výchylky v ose Z se ovšem rovněž rozkládají do pohybu souhlasného, což je výjimka u sondy sférického tvaru. Jelikož výchylka ve směru  $v_4$  je řádově největší, je také nejvýraznějším zdrojem souhlasného i nesouhlasného pohybu.

Relativní pohyb mezi sondou a testovaným vzorkem představuje velký problém a doposud je řešen výhradně konvenčním způsobem jako u většiny aplikací, tj. potlačováním nízkých frekvencí v rozdílovém signálu.

### 3 Analýza rozdílové impedance

U absolutní sondy je defektoskopie prováděna jednoduchým vyhodnocením impedance jejího vinutí. Základní principy jsou shrnuty na následujícím obrázku.



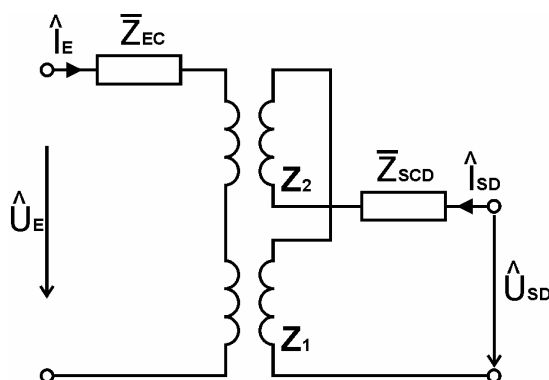
Obrázek 8: Impedance v závislosti na velikosti vzduchové mezery

S přibližováním sondy k testovanému objektu impedance roste resp. klesá v závislosti na tom, zda se jedná o feromagnetický nebo diamagnetický materiál. Trajektorie, po které okamžitá impedance v komplexní Gaussově rovině putuje během přiblížování, nazýváme impedanční trajektorií přiblížení. Směrnicí danou tečnou k této trajektorii v nominální vzdálenosti referenčním fázovým směrem. Povrchové vady v podobě povrchových trhlin vyvolají změnu impedance právě v referenčním fázovém směru. Podpovrchové vady ve směru pootočeném o dvojnásobek fázového zpoždění vířivých proudů v dané hloubce.

U diferenčních sond je podobným způsobem vyhodnocován rozdíl mezi impedancemi dvou vinutí. Problém nastává u sond diferenčních reflexních, které jsou sice velmi citlivé, ale aplikace těchto ve zkratce popsanych teorií i všech dalších vycházejících z analýzy impedance je velmi obtížná.

Zde se snažíme o možnost vyjádření rozdílové impedance u diferenční reflexní sondy ekvivalentně jako u čistě diferenční.

#### 3.1 Náhradní obvod diferenční reflexní sondy



Obrázek 9: Náhradní obvod diferenční reflexní ECT

kde

$\hat{I}_E$  je fázor budicího proudu (A).

$\hat{U}_E$  je fázor budicího napětí (V)

$\hat{I}_{SD}$  je proud snímacím vinutím diferenční reflexní sondy (A)

$\hat{U}_{SD}$  je rozdílové napětí na snímacím vinutí diferenční reflexní sondy (V)

$\bar{Z}_{EC}$  je náhradní sériová impedance budicího vinutí reflexní sondy zahrnující odpor vinutí a rozptylovou impedanci ( $\Omega$ )

$\bar{Z}_{SCD}$  je náhradní sériová impedance subtraktivně provedeného snímacího vinutí diferenční reflexní sondy zahrnující odpor vinutí a rozptylovou impedanci ( $\Omega$ )

$\mathbf{Z}_1$  a  $\mathbf{Z}_2$  jsou impedanční matice dvojbranu definované

$$\mathbf{Z}_1 = \begin{bmatrix} \bar{Z}_{X1} & \bar{Z}_{X1} \cdot K^{-1} \\ \bar{Z}_{X1} \cdot K^{-1} & \bar{Z}_{X1} \cdot K^{-2} \end{bmatrix}, \text{ analogicky } \mathbf{Z}_2$$

kde  $\bar{Z}_{X1}$  resp.  $\bar{Z}_{X2}$  odpovídá všem principy impedanci absolutní sondy a  $K$  je převod transformátoru (-).

Rozdílová impedance ekvivalentní čistě diferenčnímu provedení je definována

$$\bar{Z}_{XD}(t) = \bar{Z}_{X1}(t) - \bar{Z}_{X2}(t) = \hat{U}_{SD}(t) \cdot K / \hat{I}_E. \quad (2)$$

Za předpokladu použití zdroje budicího signálu s nekonečným vnitřním odporem a bez jakéhokoli zatížení snímacího vinutí lze rozdílovou impedanci určit nezávisle a elementárně z rozdílového napětí. Bohužel tyto podmínky nejsou splněny prakticky v žádné aplikaci. Sondy jsou obvykle buzeny generátorem budicího signálu s vnitřním odporem blízkým nule nebo impedančně přizpůsobeného, tj. jeho vnitřní odpor je blízký impedanci budicího vinutí. Snímací vinutí je pak obvykle zatíženo, nejčastěji dalším transformátorem kvůli zesílení signálu velmi nízké úrovně. Za těchto podmínek není nezávislé určení rozdílové impedance vůbec možné.

V disertační práci je poměrně rozsáhlým způsobem odvozen vztah, podle kterého je možné rozdílovou impedanci vyjádřit za těchto reálných podmínek. Přesný postup řešení zde nebudeme uvádět, je uveden v DP.

$$\bar{Z}_{XD} = \frac{K \cdot \left( \sqrt{K^2 \cdot (4 \cdot R_{is} \cdot \hat{U}_{SD}^2 \cdot (\bar{Z}_S + \bar{Z}_{SCD}) + \hat{U}_E^2 \cdot \bar{Z}_S^2 + 4 \cdot \hat{U}_{SD}^2 \cdot (\bar{Z}_{XA} + \bar{Z}_{EC}) \cdot (\bar{Z}_S + \bar{Z}_{SCD})) + 4 \cdot (R_{is} + \bar{Z}_{XA} + \bar{Z}_{EC}) \cdot \hat{U}_{SD}^2 \cdot \bar{Z}_{XA}} - 1 \right) \cdot \hat{U}_E \cdot \bar{Z}_S}{2 \cdot \hat{U}_{SD}} \quad (3)$$

kde  $\bar{Z}_{XA}$  je aditivní impedance, kterou je možné měřit podobným způsobem jako u absolutní sondy

$$\bar{Z}_{XA} = \bar{Z}_{X1} + \bar{Z}_{X2}.$$

$R_{is}$  je vnitřní odpor zdroje buzení ( $\Omega$ ) a

$\bar{Z}_S$  je zátěž snímacího vinutí ( $\Omega$ ).

Ke stanovení rozdílové impedance je tak kromě rozdílového napětí třeba měřit i impedanci budicího vinutí. Ačkoli tento vztah teoreticky vyjadřuje rozdílovou impedanci naprosto exaktně, pro praktické použití se ukázal jako velmi nevhodný. Vzhledem k jeho komplikovanosti a nelineárnosti je velmi obtížné dostatečně přesné nalezení všech parametrů náhradního obvodu.

Díky tomu, že se daný typ sondy používá pro detekci velmi malých vad, lze předpokládat velmi malý rozdílový signál. Uvažováním rozdílového napětí limitně blízkého nule, je v disertační práci vztah (3) zjednodušen na prakticky velmi dobře použitelný a srovnatelně přesný

$$\bar{Z}_{XD}(t) = \frac{(K^2 \cdot (\bar{Z}_S + \bar{Z}_{SCD}) + \bar{Z}_{XA}(t)) \cdot (R_{is} + \bar{Z}_{EC} + \bar{Z}_{XA}(t))}{K \cdot \hat{U}_E \cdot \bar{Z}_S} \cdot \hat{U}_{SD}(t) \quad \text{pro } |\hat{U}_{SD}| \rightarrow 0. \quad (4)$$

Princip zjednodušení je následující. Díky velmi malému rozdílovému signálu protéká snímacím vinutím zanedbatelně malý proud. Subtraktivně zapojené snímací vinutí kolem sebe vytváří pouze zanedbatelně malé magnetické pole, které celkově ovlivňuje pouze minimálně. Velikost impedance zátěže snímacího vinutí tak na vinutí budicím není pozorovatelná. Nedochozí k transformaci impedance zátěže snímacího vinutí na budicí, proto je právě tato transformace zanedbána.

## 4 Potlačení vlivu lift-off noise

Jak je zřejmé z obrázku 7, relativní pohyb, jehož vliv na snímaný rozdílový signál se snažíme eliminovat, lze rozdělit na tři různé složky. Jedná z těchto složek, obrázek 7c, nemá prakticky žádný vliv. Zbývající dvě však rozdílový signál značně ovlivňují. Aby bylo možné se jejich potlačováním vůbec zabývat, je třeba je exaktně rozlišit a definovat jejich vliv.

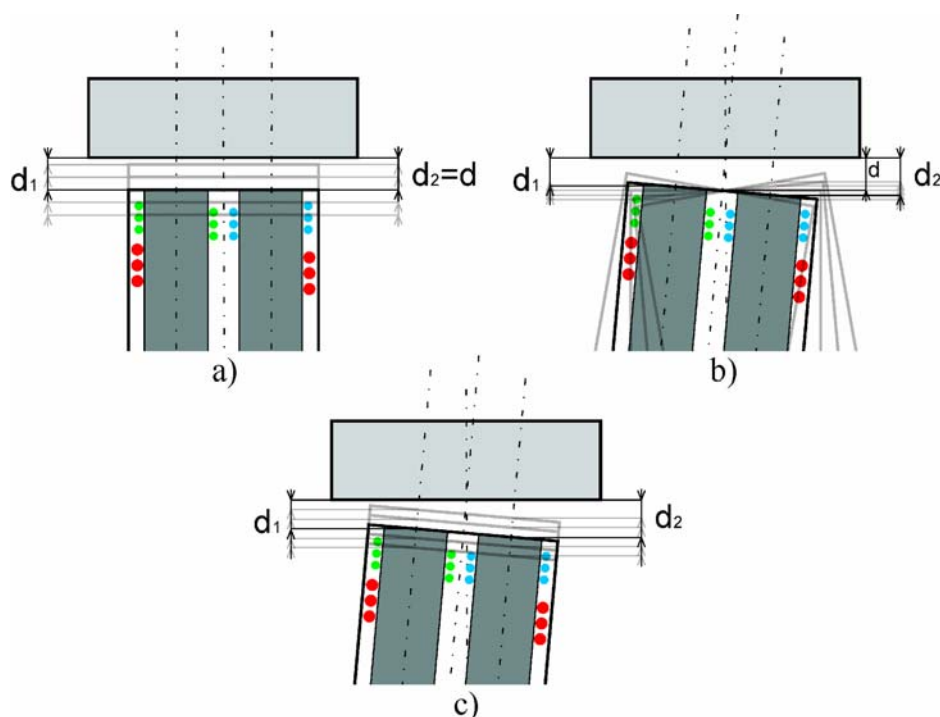
### 4.1 Souhlasná a nesouhlasná vzdálenost

Kvůli obecnosti a zjednodušení využijeme analogie mezi sondou konstruovanou pro kontrolu sférických povrchů se sondou pro rovinné povrchy, resp. tato analogie je vytvořena právě způsobem definice souhlasné a nesouhlasné vzdálenosti.

V rovinné aplikaci je změna souhlasné vzdálenosti způsobena axiálním pohybem a změna nesouhlasné vzdálenosti radiálním pohybem. Souhlasná změna vzdálenosti či souhlasná vzdálenost patrně nejlépe koresponduje s pojmem přiblížení resp. „lift-off“. Nesouhlasná změna vzdálenosti či nesouhlasná vzdálenost pak s pojmem „probe-wobble“. Protože pojmy „lift-off“ a „probe-wobble“ nejsou exaktně definovány, není zcela přesně zřejmý pohyb, který musí být vykonáván, aby se jednalo čistě o „lift-off“ nebo „probe-wobble“, zavedli a definovali jsme tyto.

Při aplikaci na jiný než rovinný tvar povrchu testovaného vzorku může být nesouhlasná změna vzdálenosti vyvolána rovněž axiálním pohybem.

Většina následujících tvrzení je aplikovatelná nejen na diferenční reflexní provedení sondy ECT, ale rovněž na čistě diferenční provedení.



**Obrázek 10:** Relativní pohyb sondy ECT vůči vzorku.

a) Souhlasná změna vzdálenosti, b) nesouhlasná změna vzdálenosti (dynamická nesouhlasná orientace), c) souhlasná změna vzdálenosti nesouhlasně orientované sondy.

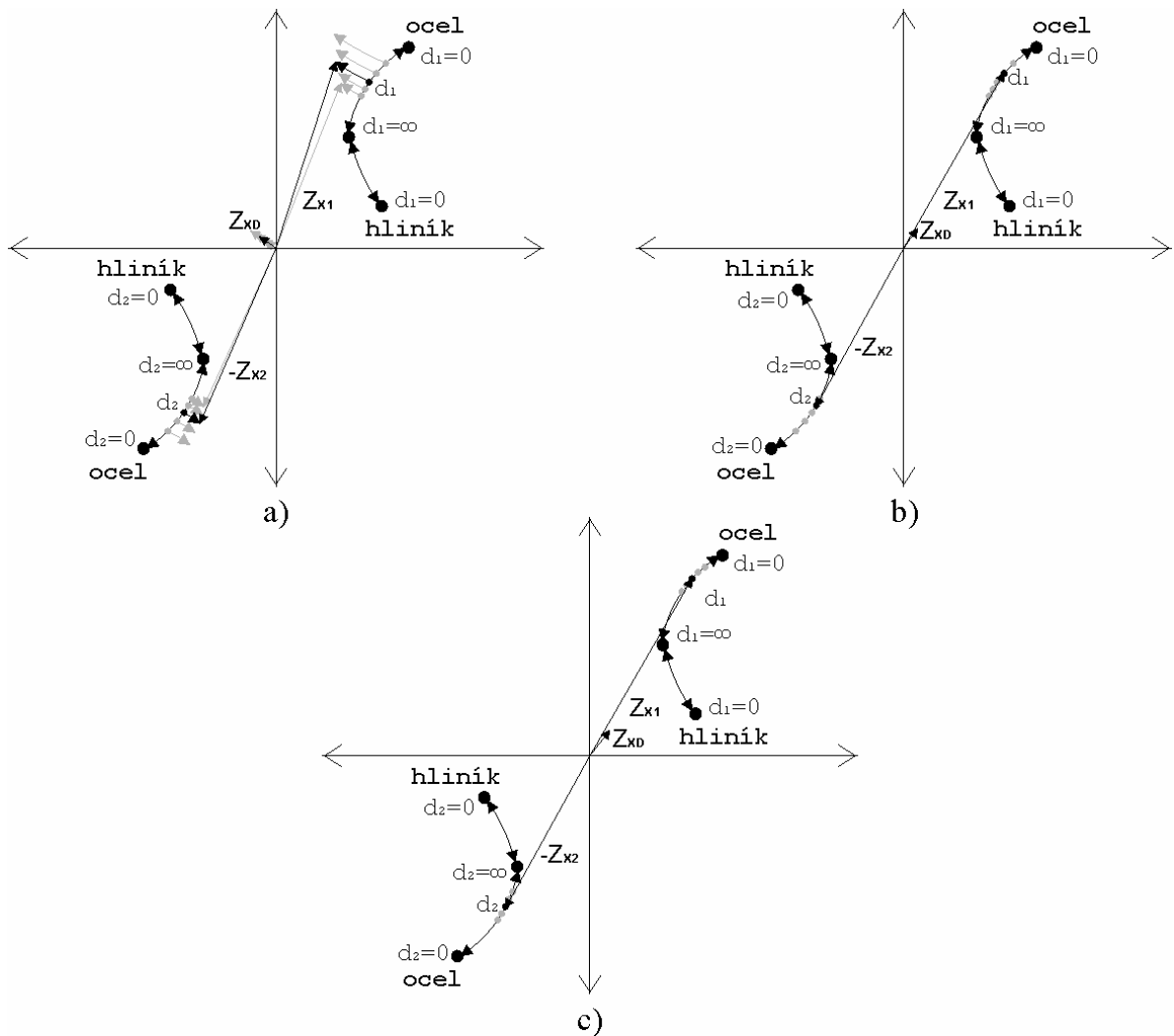


Souhlasná změna vzdálenosti podle obrázku 10a z principu způsobí změnu aditivní impedance stejně jako u absolutní ECT. Rozdílová impedance v ideálním případě bez přítomnosti vady dotčena nebude. Bude-li ovšem vada přítomna, nenulová veličina  $\bar{Z}_{XD}$  se bude měnit se změnou vzdálenosti, protože se bude měnit hustota vířivých proudů v místě vady. Tento efekt bude označován jako změna citlivosti. Jistě je i intuitivně zřejmé, že ve větší vzdálenosti bude sonda méně citlivá a naopak.

Obecně není zřejmé, zda se při vzájemné změně polohy podle obrázku 10b bude měnit  $\bar{Z}_{XA}$  a v jaké míře. V každém případě souhlasná vzdálenost  $d$  je jednoznačně určena při souhlasné orientaci sondy, obr. 10a. Při nesouhlasné orientaci je vzdálenost  $d$  obecně na všech obrázcích označena jako vzdálenost mezi středem čela sondy a vzorkem ve směru kolmém na povrch vzorku. Ve skutečnosti tomu tak být nemusí.

Empiricky lze změřit závislost  $|\bar{Z}_{XA}|$  na  $d$  při dokonale souhlasné orientaci sondy. Při nesouhlasné orientaci, kdy není zřejmé jakým způsobem vzdálenost  $d$  měřit geometricky, je její velikost určována z inverze této závislosti. Za souhlasnou vzdálenost  $d$  nesouhlasně orientované sondy od vzorku je tedy považována vzdálenost  $d$  ekvivalentní souhlasně orientované sondy se shodnou velikostí  $|\bar{Z}_{XA}|$ . Za čistě nesouhlasnou změnu vzdálenosti je tak považována taková změna vzájemné polohy, kdy dojde ke změně vzdálenosti středu jednoho nebo obou dílčích vinutí od povrchu vzorku, při zachování nezměněné velikosti  $d$  resp.  $|\bar{Z}_{XA}|$ .

Při čistě nesouhlasné změně se mění rozdílová impedance dle tečen trajektorií přiblížení/oddálení dílčích impedancí viz. obr. 11. Efekt na  $\bar{Z}_{XD}$  je tak podobný jako efekt vady s nulovým fázovým zpožděním neboli povrchové vady, což je velmi nežádoucí, neboť nesouhlasná změna tak může být za vadu velmi snadno zaměněna. Dílčí impedanční trajektorie přiblížení/oddálení nelze v praxi empiricky změřit. Teoreticky však představují průběhy impedance odpovídající pravé a levé části sondy v závislosti na souhlasné vzdálenosti vykreslené do Gaussovy roviny.



**Obrázek 11:** Důsledek relativního pohybu sondy ECT vůči vzorku na trajektoriích přiblížení/oddálení.

a) Souhlasná změna vzdálenosti, b) nesouhlasná změna vzdálenosti, c) souhlasná změna vzdálenosti nesouhlasně orientované sondy

Otázka sama pro sebe je kombinace obou pohybů, kdy je výsledný účinek dán vzájemným součinem jednotlivých účinků. Nejlépe je to zřejmé na příkladu stabilně nesouhlasně orientované sondy s měnící se souhlasnou vzdáleností  $d$  na obrázku 10c. Výchylka  $\bar{Z}_{XD}$  vyvolaná nesouhlasností na obrázku 11b, resp. trvale nesymetrickým postavením pracovních bodů označených  $d_1$ ,  $d_2$  na trajektoriích, je ovlivňována měnící se citlivostí sondy podobně, jako je ovlivňována výchylka vyvolaná vadou. To je jeden z možných způsobů interpretace. Druhý způsob vychází čistě z dynamických posuvů těchto pracovních bodů po trajektoriích přiblížení/oddálení na obr. 11c. I tento efekt lze očekávat za snadno zaměnitelný s povrchovou vadou.

Podobně, jako byla definována souhlasná vzdálenost a čistě nesouhlasná změna vzdálenosti, je třeba definovat čistě souhlasnou změnu a nesouhlasnou vzdálenost, resp. míru nesouhlasnosti. Čistě souhlasná změna vzdálenosti je taková změna vzájemné polohy, při níž se mění vzdálenost  $d$  při zachování konstantní míry nesouhlasnosti. Míra nesouhlasnosti je dána rozdílem dílčích vzdáleností  $d_1 - d_2$ . Ty jsou sice ve všech obrázcích obecně značeny jako vzdálenosti středů dílčích vinutí od povrchu

vzorku ve směru kolmém na povrch, nicméně podobně jako souhlasná vzdálenost jsou i tyto dílčí vzdálenosti definovány jinak. Při čisté souhlasné orientaci jsou všechny tři zmíněné veličiny identické a geometricky jednoznačně určitelné. Jejich variací vytvořené trajektorie přiblížení/oddálení jejichž každý bod odpovídá určité vzdálenosti, mohou opět sloužit opačným způsobem k určení dílčích vzdáleností. Za dílčí vzdálenost je tedy považována taková vzdálenost, která odpovídá bodu této trajektorie, jemuž je aktuální dílčí impedance nejbližší. Není zaručeno, že impedance budou „putovat“ po naprosto stejných trajektoriích při souhlasné i nesouhlasné orientaci sondy. Jelikož ale prakticky lze počítat pouze s velmi malou provozní nesouhlasností, trajektorie se budou i v tom nejhorším případě lišit pouze minimálně. Fakt, že se nepředpokládá velká provozní nesouhlasnost, tak zajišťuje i to, že vzdálenosti určené z trajektorií budou velmi blízké vzdálenostem určeným geometricky například právě způsobem naznačeným na obrázku. Zavedení metody stanovení vzdálenosti z impedančních trajektorií má tak ještě jeden důležitější význam v tom, že vytváří jednoduchou analogii mezi ECT konstruovanou pro testování rovinných povrchů a ECT konstruovanou pro vzorky s jiným tvarem povrchu.

## 4.2 Jednoduchý matematický model diferenční reflexní sondy

Zde je formulována relace mezi polohou sondy vůči testovanému vzorku a rozdílovou veličinou. Tato relace je však částečně i relací mezi stavem testovaného vzorku a rozdílovou veličinou. Tato problematika je anglickou literaturou označovaná jako „forward and inversion ECT problem“. Zabývá se možnostmi stanovení průběhu signálu ze sondy ECT na základě definovaných podmínek a naopak. Typickým problémem je odhad velikosti signálu na základě přesně definované velikosti vady. Současný stav této problematiky nenabízí žádné prakticky použitelné řešení. Existuje několik prací zabývajících se použitím neuronových sítí a konečných prvků. Pro praktické nasazení jsou příliš komplikované a především neřeší potlačení vlivu „lift-off noise“. My zde usilujeme o jednoduché a obecné řešení, které by přispělo ke snížení vlivu přiblížení.

Zavedeme veličinu nesouhlasná vzdálenost.

$$\Delta D = \frac{d_1 - d_2}{2} \quad (\text{mm}, \mu\text{m}) \quad (5)$$

Souhlasná vzdálenost byla definována.

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (\text{mm}, \mu\text{m}) \quad (6)$$

Úplná impedance budícího vinutí je definována

$$\bar{Z}_{XE} = \bar{Z}_{XA} + \bar{Z}_{EC}. \quad (7)$$

Dílčí vzdálenosti  $d_1$ ,  $d_2$  odpovídají hodnotám odečteným z dílčích trajektorií přiblížení  $\bar{Z}_{X1} = f(d)$ ,  $\bar{Z}_{X2} = f(d)$ . Předpokládá se symetrická konstrukce sondy, proto  $\bar{Z}_{X1}(d) = \bar{Z}_{X2}(d) = (\bar{Z}_{XE}(d) - \bar{Z}_{EC})/2$ . Odečet z dílčích trajektorií je pochopitelně míněn čistě teoreticky. Naproti tomu velikost souhlasné vzdálenosti je ze závislosti  $\bar{Z}_{XE} = f(d)$  skutečně odečítána.

Není-li míra nesouhlasnosti příliš velká, lze velikost rozdílové impedance vyvolané nesouhlasností bezpečně stanovit

$$\bar{Z}_{XD} = \frac{\partial \bar{Z}_{XE}}{\partial d} \cdot \Delta D, \quad (8)$$

kde  $\frac{\partial \bar{Z}_{XE}}{\partial d}$  ( $\Omega \cdot m^{-1}$ ) je první derivace závislosti impedance budicího vinutí na souhlasné vzdálenosti.

Přírůstek aditivní impedance resp. impedance budicího vinutí důsledkem změny souhlasné vzdálenosti lze za všech okolností vyjádřit

$$\Delta \bar{Z}_{XA} = \Delta \bar{Z}_{XE} = \frac{\partial \bar{Z}_{XE}}{\partial d} \cdot \Delta d, \quad (9)$$

kde  $\Delta d$  je přírůstek souhlasné vzdálenosti.

Na základě předchozích tvrzení lze přírůstek rozdílové impedance důsledkem změny souhlasné vzdálenosti, kdy nenulová hodnota rozdílové impedance je vyvolána výhradně malou nesouhlasností stanovit

$$\Delta \bar{Z}_{XD} = \frac{\partial^2 \bar{Z}_{XE}}{\partial d^2} \cdot \Delta D \cdot \Delta d, \quad (10)$$

kde  $\frac{\partial^2 \bar{Z}_{XE}}{\partial d^2}$  ( $\Omega \cdot m^{-2}$ ) je druhá derivace závislosti impedance budicího vinutí na souhlasné vzdálenosti.

#### 4.2.1 Profil citlivosti sondy

Potlačení vlivu změny souhlasné vzdálenosti (lift-off noise) zajišťuje, aby povrchová vada byla shodně kvantifikována při různých souhlasných vzdálenostech. Na základě zjištění podobnosti účinků povrchové vady a nesouhlasnosti se ukázalo, že dochází rovněž k potlačení nestejně citlivosti na nesouhlasnost. Postup této kompenzace získáme vyjádřením nesouhlasné vzdálenosti na levou stranu v rovnici (8).

$$\Delta D = \frac{\bar{Z}_{XD}}{\left( \frac{\partial \bar{Z}_{XE}}{\partial d} \right)} \quad (\text{m}, \mu\text{m}) \quad (11)$$

Fáze první derivace definuje referenční fázový směr v každé vzdálenosti mezi sondou a vzorkem. Prováděním kompenzace a vyhodnocováním veličiny  $\Delta D$  na místo rozdílové impedance tak odpadá veškerá problematika s určováním tohoto směru. Vektory ve směru referenčního fázového směru jsou ve veličině  $\Delta D$  zobrazeny na reálné ose. Velikost první derivace definuje citlivost sondy v dané vzdálenosti, kompenzací je tak výrazně potlačen efekt dynamické změny souhlasné vzdálenosti, tzv. „lift-off noise“, a výrazně je snížena možnost chyby kvantifikace vady vlivem nestejně citlivosti v různé vzdálenosti. Díky fyzikálnímu rozměru první derivace získala i kompenzovaná veličina  $\Delta D$  vhodnější fyzikální rozměr než jsou ( $\Omega$ ). Jde vlastně o přepočtený účinek vady na nesouhlasnou vzdálenost s ekvivalentním účinkem. Nejedná se tedy ještě o přímou kvantifikaci vady, nicméně interpretace signálu tímto způsobem je jistě dobrým prvním krokem, který by měl problém s následnou kvantifikací vady značně zjednodušit a zpřesnit. Důležité je, že tato metoda by měla zaručit konstantnější interpretaci na různých exemplářích sond, které mohou mít různou citlivost

důsledkem výrobních či konstrukčních odchylek. Interpretaci rozdílového signálu veličinou  $\Delta D$  budeme nazývat zobrazení v měřítku ekvivalentní nesouhlasnosti a průběh první derivace impedanční trajektorie přiblížení citlivostním profilem sondy.

Díky vyjádření rozdílového signálu nikoli jako rozdílové impedance, ale jeho přepočtem na nesouhlasnou vzdálenost, resp. vyjádřením v měřítku ekvivalentní nesouhlasnosti zcela vypadl vliv souhlasné vzdálenosti. Signál  $\Delta D$  je teoreticky zcela invariantní na souhlasné vzdálenosti.

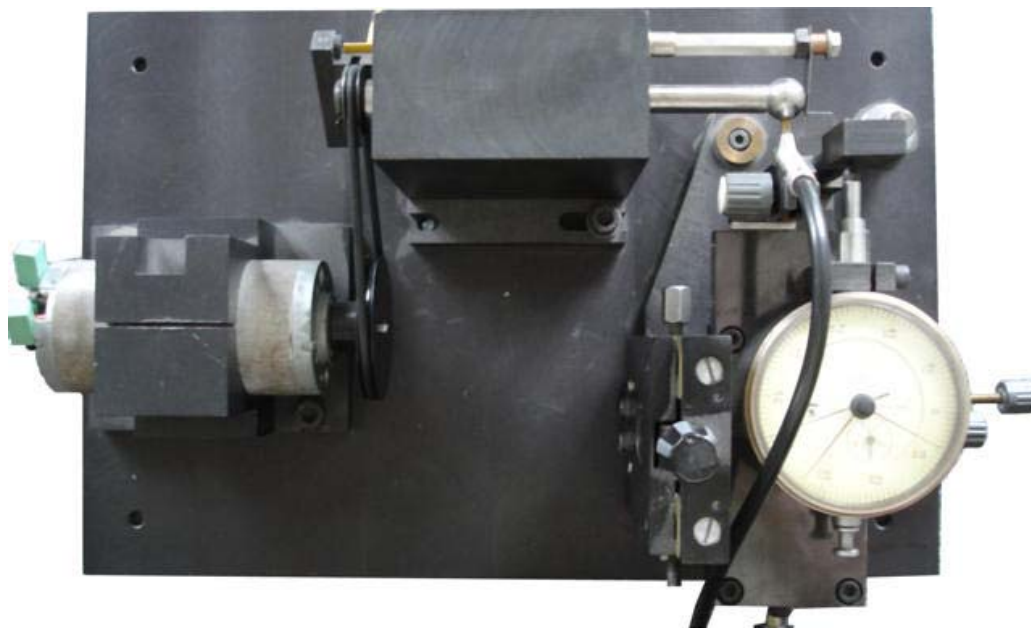
Obecně lze první derivaci závislosti impedance budicího vinutí na souhlasné vzdálenosti chápat jako absolutní citlivost sondy na nesouhlasnost a na povrchovou vadu. Tedy žádoucí citlivost a pozitivní vlastnost sondy, byť případná nesouhlasnost, nebo dokonce měnící se nesouhlasnost je jevem čistě negativním, nicméně citlivost na ni je neoddělitelná od citlivosti na vadu. Druhou derivaci je potom možné chápat jako citlivost na změnu souhlasné vzdálenosti neboli „lift-off“, tedy citlivost nežádoucí a negativní vlastnost sondy. Pokud by na základě těchto parametrů měla být hodnocena kvalita sondy v aplikaci, ve které úroveň parazitního signálu důsledkem měnící se souhlasné vzdálenosti překračuje úroveň nekorelovaného šumu a je tedy určující pro rozlišovací schopnost sondy, je vhodné hodnotit na základě kritéria daného podílem první a druhé derivace. Ten charakterizuje odstup užitečného signálu od tzv. „lift-off noise“ a mohl by být užitečný při hledání optimální provozní souhlasné vzdálenosti. V opačném případě, kdy je měnící se nesouhlasnost nepodstatná, je vhodné sledovat pouze první derivaci.

Naším primárním cílem vedoucím k hledání modelu nebylo sice měření velikosti vady, ale potlačení vlivu „lift-off noise“. Jako vedlejší produkt byl ovšem nalezen způsob částečného měření velikosti vady v měřítku ekvivalentní nesouhlasnosti. Teoreticky je možné pokusit se naši veličinu  $\Delta D$  násobit např. plochou vinutí a ověřit, jak bude výsledek korespondovat s objemem povrchových trhlin.

## 5 Vybrané experimenty

### 5.1 Model testovacího zařízení ložiskových kuliček

Umožňuje přiblížení sondy vířivých proudů k testovanému objektu, ložiskové kuličce, v přesné libovolné poloze. Je možný posuv ve třech osách a natáčení podél jedné osy. Zároveň přípravek uděluje testované kuličce rotační pohyb kolem jedné osy. Kontrola vířivými proudy tedy probíhá pouze na určité omezené prstencové ploše. Testovací přípravek byl zapůjčen firmou Temos Tools a.s..



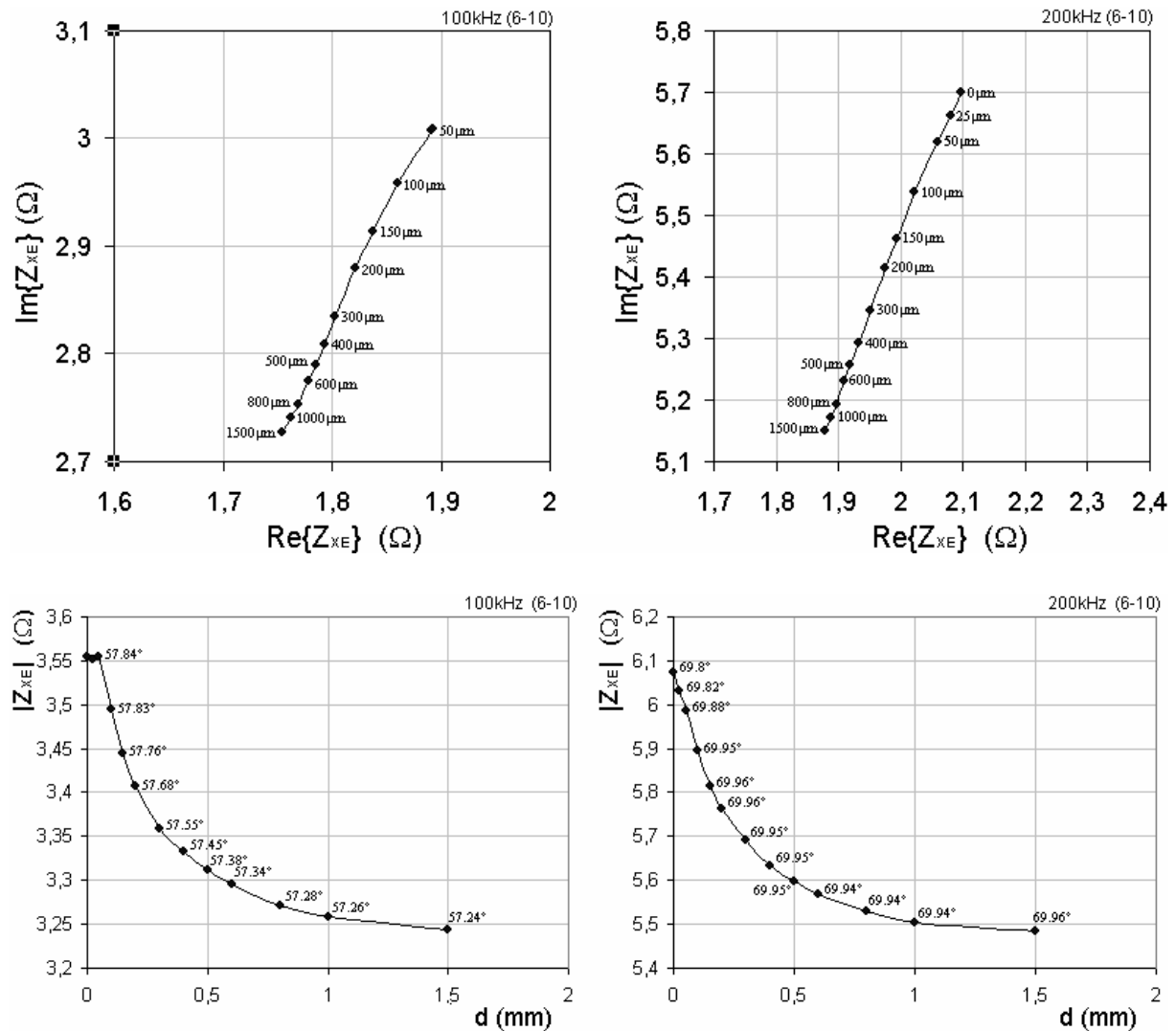
Obrázek 12: Testovací přípravek



Obrázek 13: Testovací přípravek – detail

Jako generátor budicího signálu byl použit funkční generátor **Agilent 33220A**. Rozdílové napětí na snímacím vinutí diferenčních sond bylo měřeno pomocí tzv. „Lock-in amplifier“ **DSP Lock-in amplifier EG&G INSTRUMENTS model 7265**. K digitalizaci analogových signálů sloužila měřicí multifunkční karta **NATIONAL INSTRUMENTS PCI-6251**.

## 5.2 Impedanční trajektorie přiblížení



Obrázek 14: Impedanční trajektorie přiblížení

Zobrazené impedanční trajektorie přiblížení sondy konstruované pro průměry kuliček 6 – 10 mm jsou prosté závislosti impedance budícího vinutí na souhlasné vzdálenosti při frekvenci budícího signálu 100 a 200kHz. Zobrazeny jsou jednak v Gaussově rovině, rovněž je zobrazen průběh závislosti modulu impedance. V obou případech jde o identické trajektorie přiblížení. Impedanční trajektorie přiblížení zde mají dvě funkce. Zaprvé, z jejich inverzní závislosti je určována okamžitá velikost souhlasné vzdálenosti. Zadruhé, lze z nich vypočítat profil citlivosti sondy umožňující potlačení vlivu „lift-off noise“.

Nejjednodušší způsob výpočtu a následné aplikace citlivostního profilu je aproximovat impedanční trajektorii přiblížení pomocí polynomu.

$$\bar{Z}_{XE(6-10)100} = 0.4483d^6 - 2.3762d^5 + 5.0138d^4 - 5.3854d^3 + 3.1471d^2 - 1.0213d + 1.9361 + (-0.4137d^6 + 0.9816d^5 + 0.334d^4 - 2.756d^3 + 2.9881d^2 - 1.4691d + 3.0764) \cdot j$$

$$\bar{Z}_{XE(6-10)200} = 0.1231d^6 - 0.9617d^5 + 2.6569d^4 - 3.5161d^3 + 2.4887d^2 - 1.0033d + 2.1007 + (-1.3113d^6 + 4.4859d^5 - 4.5591d^4 - 0.0004d^3 + 2.8299d^2 - 1.9794d + 5.7057) \cdot j$$

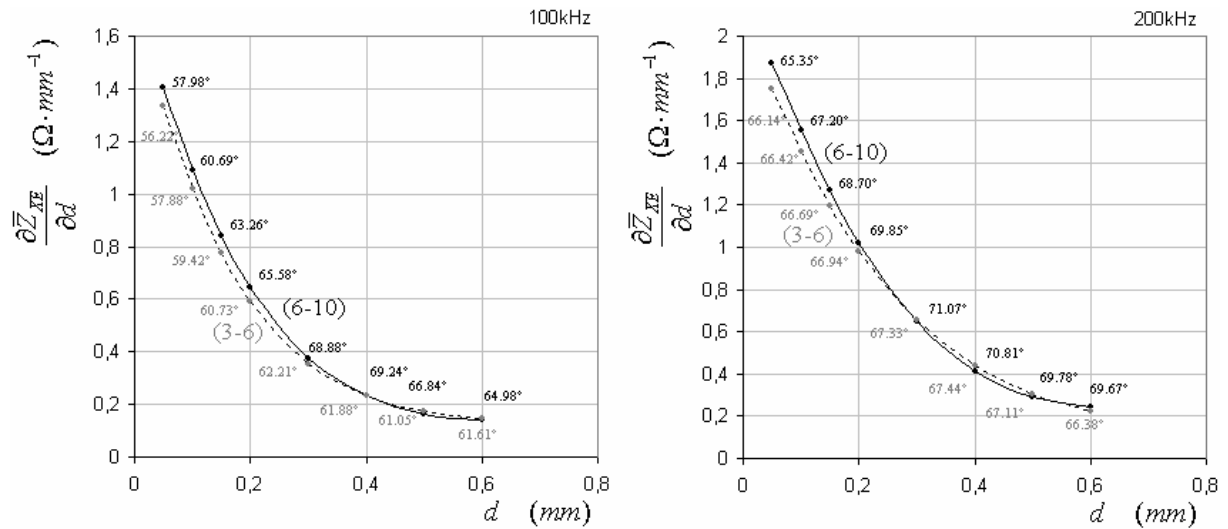
Citlivostní profil pak odpovídá jeho první derivaci.

$$\frac{\partial \bar{Z}_{XE(6-10)100}}{\partial d} = 2.6898d^5 - 11.881d^4 + 20.0552d^3 - 16.1562d^2 + 6.294d - 1.0213$$

$$+ (-2.4822d^5 + 4.908d^4 + 1.336d^3 - 8.268d^2 + 5.9762d - 1.4691) \cdot j$$

$$\frac{\partial \bar{Z}_{XE(6-10)200}}{\partial d} = 0.73872d^5 - 4.8083d^4 + 10.6277d^3 - 10.5484d^2 + 4.9775d - 1.0033$$

$$+ (-7.8677d^5 + 22.4296d^4 - 18.2364d^3 - 0.001053d^2 + 5.6597d - 1.9794) \cdot j$$

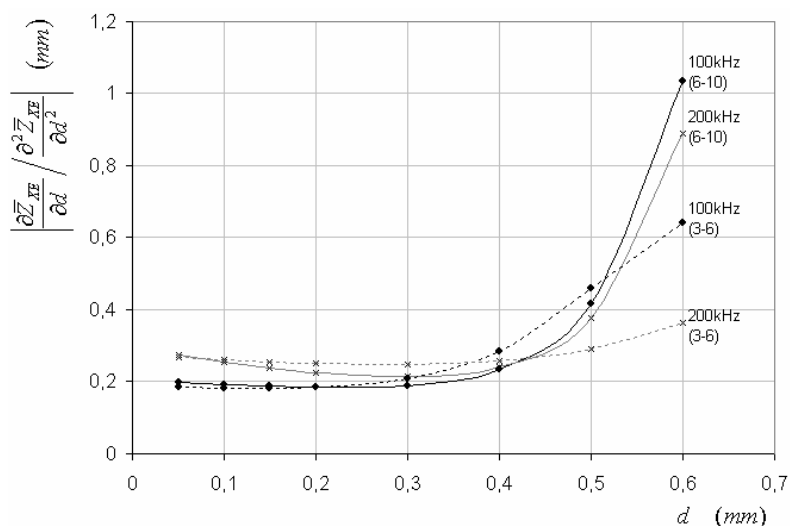


Obrázek 15: Profily citlivosti sondy

Plnou čarou jsou zobrazeny profily sondy pro průměry 6 – 10 mm, čárkovanou 3 – 6 mm. Argumenty derivací polynomů resp. úhly uvedené v obrázku definují referenční fázový směr v odpovídající souhlasné vzdálenosti.

Rovněž bylo vysloveno tvrzení o druhé derivaci impedančních trajektorií, mající význam citlivosti sondy na „lift-off“. Explicitně zde již nebudeme uvádět derivace předchozích polynomů, jde o triviální záležitost. Nebudeme zde ani zobrazovat průběhy druhých derivací, protože jejich význam není na první pohled zřejmý. Mnohem zřejmější je význam poměru obou těchto citlivostí resp. první a druhé derivace, který byl doporučen jako kritérium pro hodnocení kvality sondy resp. kvality její funkce za konkrétních podmínek.



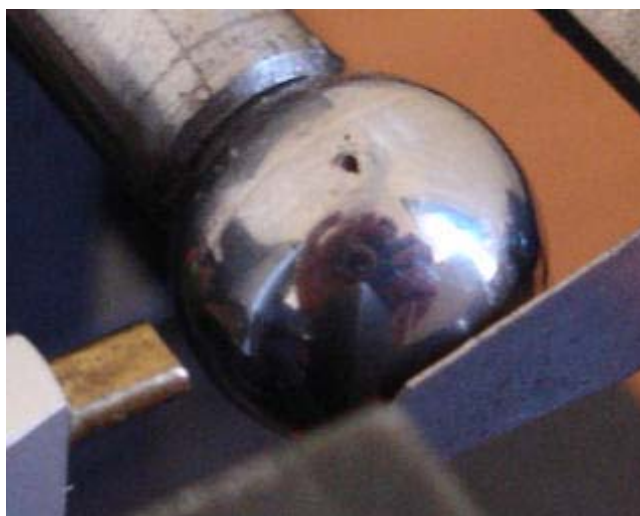


**Obrázek 16:** Profil odolnosti na „lift-off noise“

Vzhledem k velké chybě druhé derivace zde již neuvádíme argumenty resp. úhly.

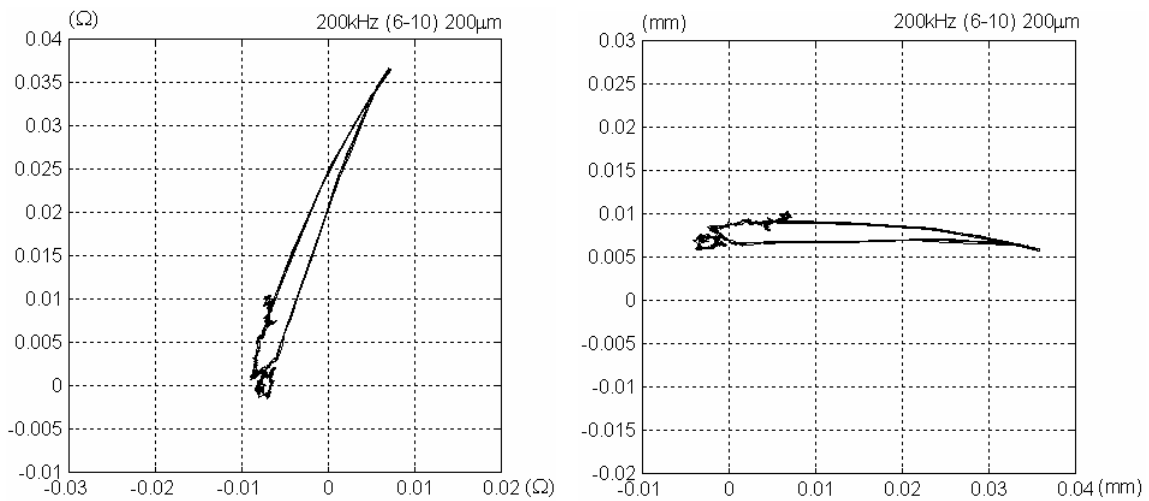
Význam tohoto profilu je velmi jednoduchý. Zjednodušeně řečeno, hodnota poměru obou citlivostí v konkrétní souhlasné vzdálenosti říká, že pokud bude sonda souhlasně oscilovat (přibližovat se a oddalovat) s amplitudou o velikosti právě tohoto poměru, důsledkem této oscilace bude produkován rozdílový signál o stejné velikosti, jako je velikost rozdílového signálu produkovaného aktuálně přítomnou vadou a/nebo nesouhlasnou orientací bez přítomnosti oscilace. Jde samozřejmě o velmi zjednodušené tvrzení, protože se zde pracuje s diferenciály, tedy nekonečně malými posuvy a za ty rozhodně nelze v tomto případě považovat souhlasný posuv 0.2mm. Nicméně tvrzení, že např. pokud bude sonda souhlasně oscilovat s amplitudou 10x nebo 100x menší, než je hodnota poměru citlivostí, bude důsledkem oscilace produkován signál 10x nebo 100x menší, má již praktické opodstatnění.

### 5.3 Význam citlivostního profilu pro detekci vad



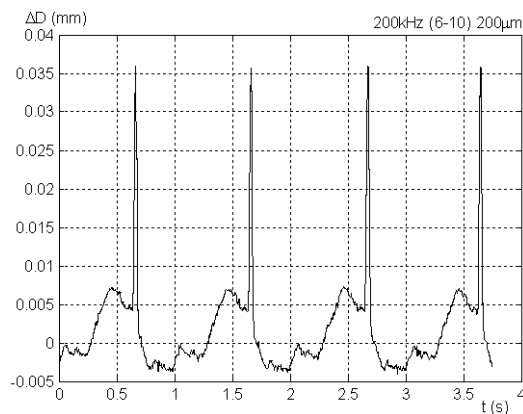
**Obrázek 17:** Vyjiskřená trhlina

Pro ověření výsledků aplikace citlivostního profilu na interpretaci vady byla použita kulička s uměle vytvořenou povrchovou trhlinou. Ta prováděla rotační pohyb tak, že vada se pohybovala pod sondou po prstencové trajektorii.



**Obrázek 18:** Zobrazení vady v Gaussově rovině (200kHz, 200μm)

Vlevo je zobrazen průběh rozdílového signálu přepočteného na rozdílovou impedanci pomocí popsaných metod. Vpravo potom tentýž signál po aplikaci citlivostního profilu, tedy průběh veličiny  $\Delta D$ . Tento test je proveden v souhlasné vzdálenosti 200μm, při frekvenci buzení 200kHz. Základní vlastností přepočtu na veličinu  $\Delta D$ , tzv. zobrazení v měřítku ekvivalentní nesouhlasnosti, je horizontální zobrazení povrchových vad. Toho lze velmi dobře využít a zkoumat pouze reálnou složku signálu, kterou lze snadno zobrazit v časové oblasti.



**Obrázek 19:** Časový průběh reálné složky (200kHz, 200μm)

Výsledky pro různé frekvence buzení v různých souhlasných vzdálenostech jsou následující.

$d$ ( $\mu\text{m}$ )	$Z_{XD}$ ( $\Omega$ )	$\Delta D$ ( $\mu\text{m}$ )
150	36	44
200	23	37
300	13	37
400	8	37

**tabulka 1:** Velikosti signálu špička-špička (100kHz)

$d$ ( $\mu\text{m}$ )	$Z_{XD}$ (m $\Omega$ )	$\Delta D$ ( $\mu\text{m}$ )
150	57	42
200	41	39
300	23	36
400	15	37

**tabulka 2:** Velikosti signálu špička-špička (200kHz)

Jak je zřejmé, díky citlivostnímu profilu jsme schopni ohodnotit velikost vady v libovolné souhlasné vzdálenosti i při libovolné frekvenci buzení a případně i při použití různých exemplářů sond takřka identicky. Navíc v délkových jednotkách, které jsou pro takový účel jistě pohodlnější.

Bez použití citlivostního profilu bychom byli nuceni zkoumat velikosti vad na rozdílové impedanci, pak dosáhneme v různých souhlasných vzdálenostech a pro různé frekvence buzení velmi odlišných výsledků.

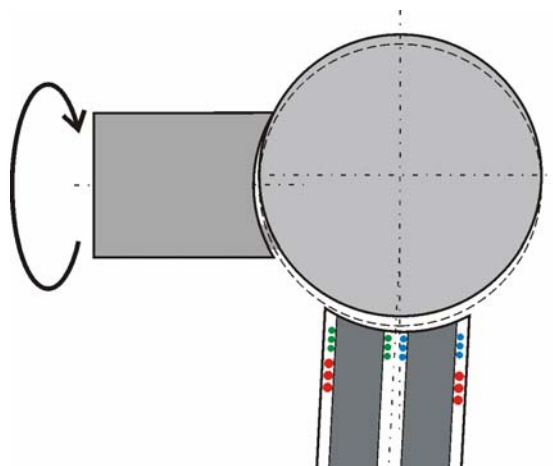
## 5.4 Potlačení vlivu „lift-off noise“ pomocí citlivostního profilu

Tento experiment je velice podobný předchozímu s tím rozdílem, že v každém okamžiku je aktuální hodnota rozdílové impedance dělena aktuální hodnotou citlivosti, která je stanovena na základě znalosti aktuální souhlasné vzdálenosti. Souhlasná vzdálenost je dosazována do polynomiálního vyjádření profilu citlivosti. K samotnému stanovení souhlasné vzdálenosti bylo použito měření amplitudy napětí přímo na budicích svorkách sondy. Díky více než stonásobně vyšší vnitřní impedanci buzení lze úroveň tohoto napětí považovat za úměrnou úplně impedanci budicího vinutí  $|\bar{Z}_{XE}|$ .

Relace mezi  $|\bar{Z}_{XE}|$  a souhlasnou vzdáleností byly opět realizovány polynomiální aproximací stejných dat, ze kterých byly aproximovány impedanční trajektorie přiblížení, pouze jde o inverzní relaci. Zde uvedená je pro případ sondy (6-10) pro frekvenci buzení 100kHz.

$$d = -484.180801 \cdot |\bar{Z}_{XE}|^5 + 8570.95913 \cdot |\bar{Z}_{XE}|^4 - 60670.3260 \cdot |\bar{Z}_{XE}|^3 + 214666.653 \cdot |\bar{Z}_{XE}|^2 - 379665.7 \cdot |\bar{Z}_{XE}| + 268525.054$$

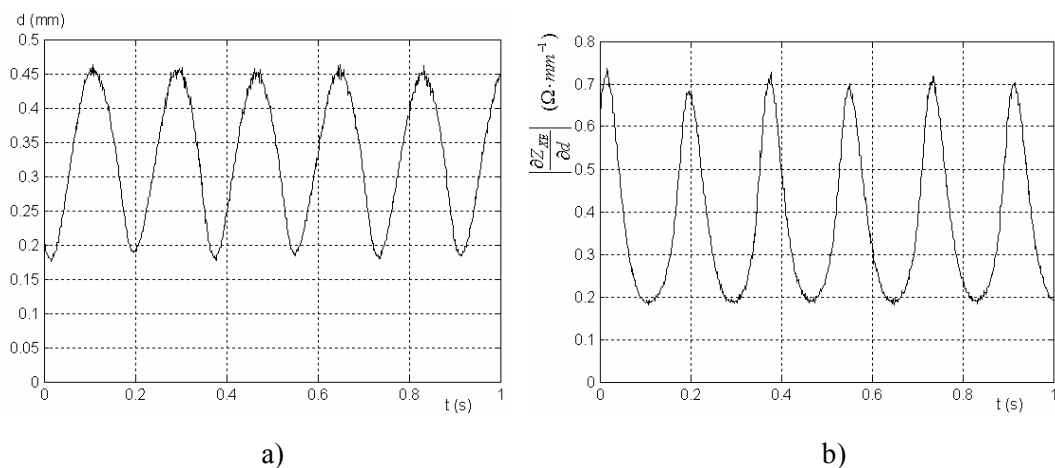
Podmínky dynamicky se měnící souhlasné vzdálenosti byly vytvořeny nesouosým spojením kuličky a roztáčecí hřídele.



**Obrázek 20:** Dynamicky se měnící souhlasná vzdálenost

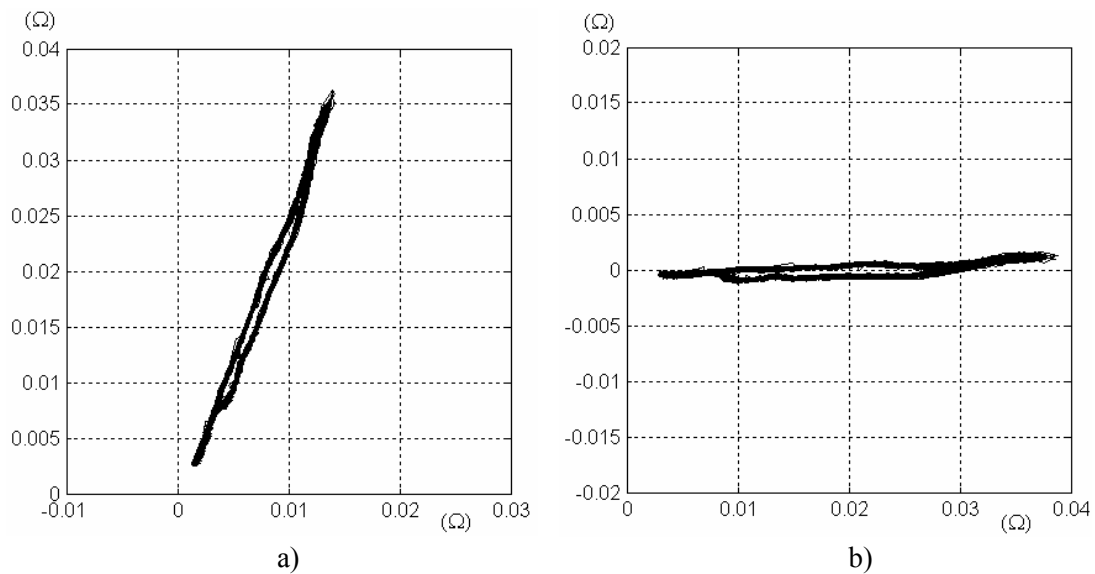
Aby diferenční reflexní sonda začala produkovat tzv. „lift-off noise“, měnící se souhlasná vzdálenost nestačí, je třeba vyvolat i jistou nesouhlasnost. Proto byla vychýlena i sonda. U kulových povrchů dosáhneme nesouhlasnosti pootočením nebo posunutím sondy.

Nejefektivnější by byla demonstrace za podmínek, při kterých by se dynamicky měnila velikost souhlasné vzdálenosti, ale nesouhlasnost by byla po celou dobu konstantní, pak bychom po aplikaci potlačení „lift-off noise“ dosáhli neměnné rozdílové impedance. Bohužel tyto podmínky se na tomto přípravku nepodařilo vytvořit. Tj. měnila se jak souhlasná tak nesouhlasná vzdálenost. Demonstrace za těchto podmínek není tak efektní, zato však lépe odpovídá běžným reálným podmínkám.



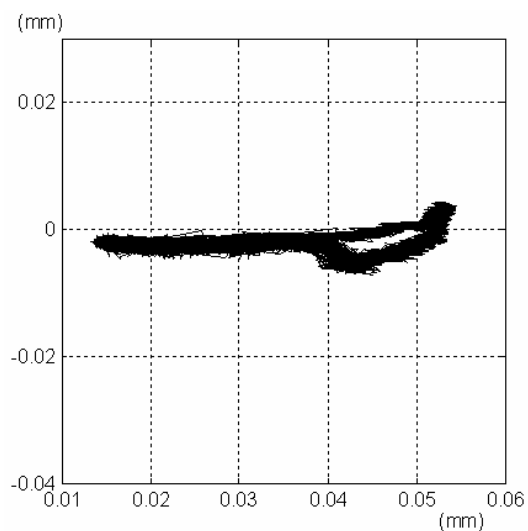
**Obrázek 21:** Průběh souhlasné vzdálenosti a), citlivosti b) v čase

Na obrázcích jsou zobrazeny časové průběhy souhlasné vzdálenosti a modulu citlivosti. Oba průběhy jsou vypočtené na základě měřeného průběhu amplitudy napětí na svorkách sondy.



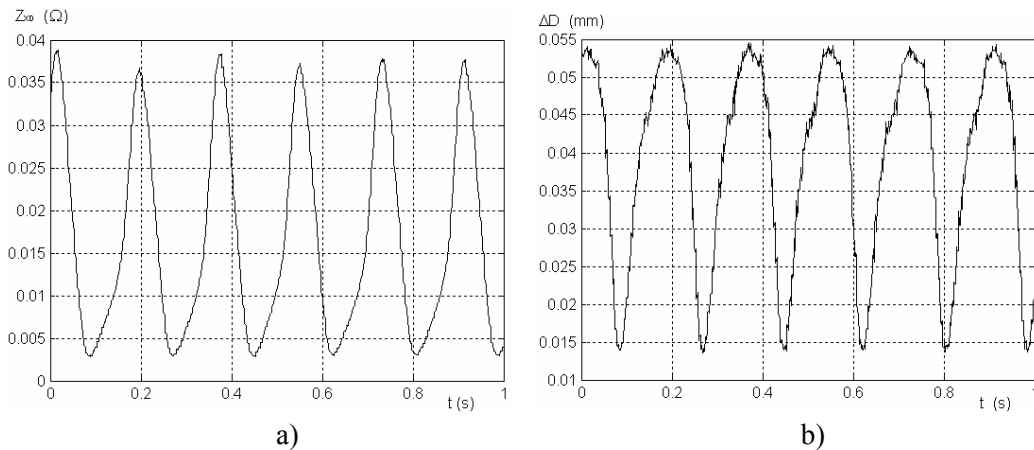
**Obrázek 22:** a) Rozdílová impedance, b) rozdílová impedance otočená o referenční fázový směr.

Na obrázku a) je vykreslen průběh rozdílové impedance během experimentu, na obrázku b) je identický průběh otočený o přibližný referenční fázový směr  $67^\circ$ .



**Obrázek 23:** Průběh ekvivalentní nesouhlasnosti.

Průběh ekvivalentní nesouhlasnosti  $\Delta D$  se od předchozích experimentů liší v tom, že každý jeho bod je kompenzován aktuální citlivostí.



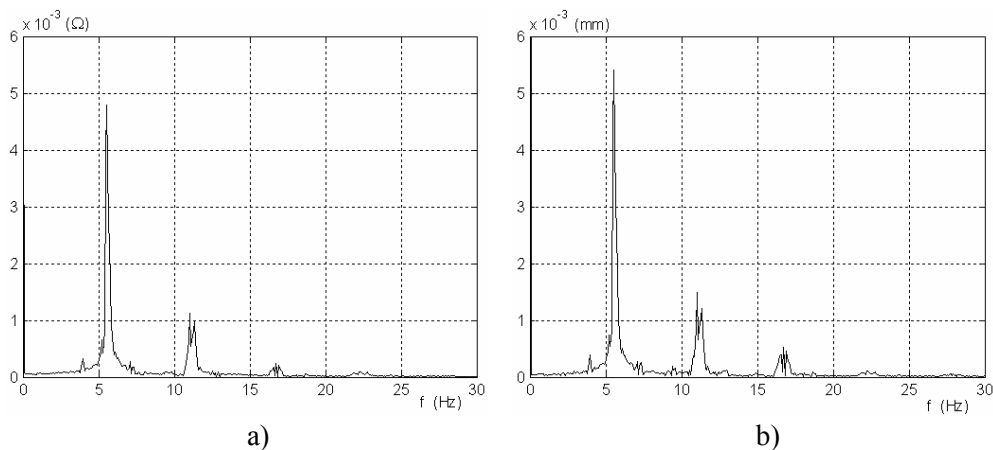
**Obrázek 24:** a) Průběh reálné složky impedance otočené o referenční fázový směr, b) průběh reálné složky ekvivalentní nesouhlasnosti

K otočení rozdílové impedance došlo právě kvůli možnosti srovnání těchto průběhů, na kterých je možné nejlépe pozorovat účinek potlačení „lift-off noise“.

V prvním řadě je třeba doplnit, že tento experiment byl prováděn na bezvadném vzorku a to z toho důvodu, že přítomnost vady by byla zavádějící vzhledem k extrémně velkému intervalu, na kterém dochází ke změně souhlasné vzdálenosti. Pokud by se vada nacházela v místě, které probíhá v maximální vzdálenosti, byl by výsledek velmi efektní. Pokud by se nacházela v místě minimální vzdálenosti, už by tomu tak nebylo. Praktické uplatnění této metody je především v situacích, kdy změna souhlasné vzdálenosti nastává v mnohem menším intervalu, ale zato s vyšší rychlostí, ve vyšším frekvenčním pásmu. Pak to, zda se vada nachází v nejbližším či nejvzdálenějším místě, nehraje téměř žádnou roli. Přítomnost vady by také znemožnila učinit jakékoli závěry z následujících spekter díky velkému množství vyšších harmonických způsobených právě vadou.

K ocenění pozitivního účinku je třeba se podívat zpět na průběh citlivosti. Zde vidíme, že citlivost se pohybuje v intervalu 0.2 – 0.7 Ω/mm. Hodnoty špička-špička průběhu rozdílové impedance jsou zhruba 35mΩ, ekvivalentní nesouhlasnosti 40μm. Pokud by byla přítomna trhlina např. o velikosti 40μm v nejbližším místě, tedy ten nejméně příznivý případ, v impedanční interpretaci by dosáhla velikosti 40 μm \* 0.7 Ω/mm = 28 mΩ. Zatímco při interpretaci v měřítku ekvivalentní nesouhlasnosti dosahovala právě prahové úrovně, při impedanční interpretaci je pod prahovou úrovní a to je ten nejméně příznivý případ. V nejpříznivějším případě 40 μm \* 0.2 Ω/mm = 8 mΩ by byla hluboko pod prahovou úrovní, tedy potlačení vlivu souhlasné změny by znamenalo 5ti násobné zvýšení rozlišovací schopnosti.

K podobným závěrům dojdeme i na základě spekter obou signálů.



**Obrázek 25:** Spektrum reálné složky a) otočené rozdílové impedance, b) ekvivalentní nesouhlasnosti

Tento experiment demonstruje aplikaci potlačení vlivu souhlasné změny za jedné konkrétní podmínky. Ty lze patrně nejlépe specifikovat tak, že průběh souhlasné vzdálenosti resp. citlivosti je korelovaný s průběhem nesouhlasného signálu a zároveň průběh citlivosti je téměř ve fázi s průběhem nesouhlasného signálu. Je zřejmé, že tato metoda nepřinese pozitivní výsledky za všech okolností. V případě, že by zmiňované signály byly v proti-fázi, pozorovali bychom účinek negativní. Nejpozitivnější účinek lze ovšem očekávat v případě, že oba zmíněné signály budou obsahovat výrazné nekorelované složky, kdy dojde k sečení šířek obsazených frekvenčních pásem obou signálů. Obdobně by to bylo v případě vzájemného fázového posuvu okolo  $90^\circ$ . Za těchto podmínek bude význam metody největší, protože v praktických aplikacích jsou tyto nežádoucí složky rozdílového signálu potlačovány nejčastěji potlačením spodních frekvencí.

## 6 Závěr

Předmětem disertační práce bylo hledání způsobů zlepšení interpretace měřených signálů z diferenčních reflexních sond vířivých proudů z hlediska charakterizace vad a hledání možností účinného potlačení vlivu vzájemných nežádoucích pohybů mezi sondou a testovaným vzorkem.

Základním kamenem byl především model umožňující impedance interpretaci signálu z této sondy pomocí veličiny rozdílová impedance. Pomocí impedance jsou interpretována měření na běžnějších typech sond, jako je absolutní, absolutní reflexní, nebo čistě diferenční sonda, u kterých získání informací o vadě zdaleka tak velký problém nepředstavuje. Zde byl nalezen jednoduchý mechanismus, který umožnil stejným způsobem interpretovat měřený signál z hybridního provedení, diferenční reflexní sondy, která je vůbec nejcitlivějším provedením, ovšem interpretace signálu zde byla vždy podstatně komplikovanější než u předchozích provedení. U tohoto hybridního provedení byl doposud měřený signál interpretován především z rozdílu napětí snímacích vinutí na základě empirických pozorování a poznatků, teoretické poznatky zde byly využívány podstatně méně než u předchozích jednodušších provedení. Tento nedostatek byl v této práci zcela vyřešen. Je zde zpracována i experimentálně ověřena vyvinutá metoda, která umožňuje provádět defektoskopii pomocí diferenční reflexní sondy analýzou rozdílové impedance ekvivalentně, jako u čistě diferenční sondy.

Velice důležitým krokem vedoucím jednak k interpretovatelnosti měřeného signálu z hlediska velikosti vady tak i k potlačení jisté části vlivu zmíněných nežádoucích pohybů, který je označován jako „lift-off noise“, byla formulace vztahu mezi jednotlivými druhy vzájemného pohybu a

impedančním popisem. Neméně důležitou byla formulace pojmů, která rozdělila tento pohyb na různé druhy podle účinků, kterým na impedanční popis působí. Jedná se o souhlasný a nesouhlasný pohyb.

Formulace souvislosti mezi tzv. impedanční trajektorií přiblížení, tedy jednoduchou závislostí impedance budícího vinutí na souhlasné vzdálenosti, a tzv. citlivostním profilem sondy pomocí jednoduchého modelu, umožnil velice snadné získání veškerých informací právě o vztahu mezi pohybem a rozdílovou impedancí.

Díky všem těmto předchozím krokům je v této práci prezentován kompletní algoritmus zajišťující jednak efektivní potlačování části vlivu vzájemného pohybu, přiblížení, „lift-off noise“, i velmi zajímavý způsob interpretace měřeného signálu charakterizující velikost vady v délkových jednotkách. Potlačení „zbytkového“ vlivu přiblížení, tento typ sondy je sám o sobě velmi odolný proti vlivu přiblížení, je zcela unikátní metodou. Jejím vedlejším produktem je metoda měření velikosti vady. Tato metoda umožňující měření v délkových jednotkách, anglickou literaturou označovaná jako „inverse ECT problem“, značně přispěla k praktičtějšímu řešení této problematiky, neboť jede o velmi snadno implementovatelnou metodu odvozenou výhradně analyticky. Dosavadní metody řešení byly založené na konečných prvcích, neuronových sítích, apod.. Jde jistě o velice fundované a v mnoha ohledech komplexnější metody než zde vytvořená. Nicméně právě jejich komplikovanost znemožňuje jejich širší nasazení např. implementací do univerzálních defektoskopických přístrojů. Komplikovaností není míněna výpočetní náročnost, která dnes již patrně není překážkou, ale např. obtížnost přizpůsobení takového modelu podmínkám konkrétní aplikace.

Výsledky této práce mohou u mnoha defektoskopických přístrojů využívajících diferenční reflexní sondy a v mnoha aplikacích značně zlepšit přesnost a rozlišovací schopnost těchto přístrojů. Jejich implementace i do stávajícího přístroje bude v řadě případů znamenat jen minimální zásah a minimum změn. Zájem lze tedy očekávat ze strany výrobců takových přístrojů, případně i ze strany uživatelů. Vzhledem k tomu, že defektoskopie pomocí diferenční reflexní sondy je schopna rozpoznat vůbec ty nejmenší vady, je používána pro kontrolu tam, kde spolehlivé odhalení každé, i té nejmenší, je mnohdy životně důležité, např. v leteckém průmyslu. Jakékoli zlepšení spolehlivosti či schopnosti odhalit ještě menší vady tak bude vždy přínosné. Naopak v aplikacích, kde taková kontrola je otázkou čistě ekonomickou, může metoda potlačování „lift-off noise“ pomocí algoritmu zpracování signálu, snížit náklady na mechanické provedení.



## Přehled publikací

- [1] BAŽANT, J.: *The virtual measuring and diagnostic system of induction motors*. In: Závěrečná zpráva grantu GAČR 102/01/1291 „Ivan Jaksch et al.: Diagnostics for Electrical Machines“, VUT v Brně, 2003, ISBN 80-214-2540-7
- [2] BAŽANT, J.: *Implementace souběžové filtrace*. In: „TD 2004 – DIAGON 2004“, Academia centrum Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, 2004, ISBN 80-7318-195-6
- [3] BAŽANT, J.: „*Aplikace signálových procesorů BlackFin pro zpracování obrazu*“ přednáška na seminářích *Analog Devices*. Praha, Brno, Ostrava, Žilina. 2004.
- [4] JAKSCH, I., BAŽANT, J.: *Demodulation Methods for Exact Induction Motor Rotor Fault Diagnostic*. In: SDEMPED 2005 – International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, Vídeň 2005
- [5] BAŽANT, J.: *Algoritmická optimalizace regulátorů kmitavých systémů*. Závěrečná zpráva centra PTSE, TU Liberec, Liberec (2007).
- [6] HERNYCH M., KRÁLOVCOVÁ J., BAŽANT J.: *Fuzzy Algorithm for the Control of Traffic Lights*. In: MOSATT 2007 – Modern Safety Technologies in Transportation, Košice, (2007).
- [7] BAŽANT, J.: *Implementace regulátorů kmitavých systémů do low-end mikrořadičů*. TU Liberec, Liberec (2008).

Ing. Jiří BAŽANT

**Defektoskopie vířivými proudy pomocí  
diferenčních reflexních snímačů**

*Autoreferát disertační práce*

Technická univerzita v Liberci  
Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií

33 stran  
Náklad: 15 výtisků

červen 2008