

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA TEORETICKÉ ELEKTROTECHNIKY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Nedestruktivní defektoskopie elektricky
vodivých materiálů s využitím vířivých proudů**

Karel SLOBODNÍK

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Karel SLOBODNÍK**
Osobní číslo: **E11N0150P**
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Nedestruktivní defektoskopie elektricky vodivých materiálů s využitím vířivých proudů**
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

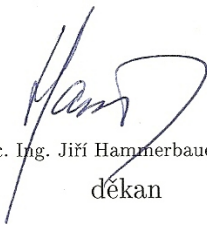
Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Popište současný stav metod nedestruktivní defektoskopie elektricky vodivých materiálů.
2. Navrhněte matematický a numerický model na bázi vířivých proudů.
3. Navrhněte vhodné experimentální ověření metody, způsob měření a vyhodnocení dat.
4. Zhodnoťte výsledky měření a počítačového modelu.


Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

1. Ladislav Janoušek, Tomáš Marek, Daniela Gombárska: Eddy Current Non-Destructive Evaluation Of Conductive Materials, 2006, Communications, Zilina

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Pavel Karban, Ph.D.**
Katedra teoretické elektrotechniky
Konzultant diplomové práce: **Ing. František Mach**
Regionální inovační centrum elektrotechniky
Datum zadání diplomové práce: **15. října 2012**
Termín odevzdání diplomové práce: **9. května 2013**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Anotace

Předložená diplomová práce se zabývá technologií defektoskopie pomocí vířivých proudů. Cílem práce je navržení a experimentální ověření funkce defektoskopického zařízení na bázi vířivých proudů.

V úvodu práce je uveden souhrn technologií, využívaných pro nedestruktivní defektoskopii, jejich omezení a oblasti praktického využití. Dále je odvozen matematický model, popisující rozložení nestacionárního magnetického pole, buzeného harmonickým proudem. Tento matematický model je poté srovnán s výsledky experimentálního měření na navrženém zařízení.

Abstract

The master thesis deals with non destructive defectoskopy technology with use of eddy curenents. The main goal of the thesis is to design and and experimental verification of defectoskopy device based on eddy currents.

The introduction of the thesis contains the summary of nondestructive defec-toscopy technologies, their disadvantages and field of practical use. The mathematical model of nonstationary, harmonic current driven magnetic field is formulated in the second part. This mathematical model is compared with experiment results.

Klíčová slova

Nedestruktivní defektoskopie, vířivé proudy, magnetické pole, Agros2D

Keywords

Nondestructive defectoscopy, eddy currents, magnetic field, Agros2D

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem svou závěrečnou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 270 trestního zákona č. 40/2009 Sb.

Také prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 9. května 2013

Karel Slobodník

Poděkování

Zde bych rád poděkoval vedoucímu práce doc. Ing. Pavlu Karbanovi, Ph.D. za příkladné vedení, odborné rady, a trpělivost při vedení. Dále bych rád poděkoval Ing. Františku Machovi za podnětné připomínky, náměty a pomoc při měření. V neposlední řadě bych rád poděkoval svým rodičům, bez jejichž podpory by tato práce zřejmě nikdy nevznikla.

Diplomová práce vznikla na základě výzkumné činnosti na Katedře teoretické elektrotechniky FEL ZČU v Plzni v rámci grantu SGS-2012-039.

Diplomová práce vznikla s podporou Evropského fondu pro regionální rozvoj a Ministerstva školství, mládeže s tělovýchovy ČR v rámci projektu Regionální inovační centrum elektrotechniky (RICE), číslo projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0094

Obsah

1	Současný stav znalostí	11
1.1	Úvod do problematiky	11
1.2	Princip využití vířivých proudů	13
1.3	Sondy ECD	14
1.3.1	Cívkové sondy	14
1.3.2	Magnetorezistivní sondy	18
1.3.3	Hallova sonda	18
1.3.4	SQUID senzory	19
2	Matematický model	20
2.1	Model magnetického pole	20
3	Numerické řešení	22
3.1	Model magnetického pole	22
3.2	Inspekční hloubka	23
3.3	Výsledky řešení matematického modelu	24
3.3.1	Rozložení magnetického pole	24
3.3.2	Rozložení magnetického pole v okolí uměle vytvořených vad	24
4	Experimentální ověření	27
4.1	Návrh detekční sondy	27
4.1.1	Reflexní absolutní kruhová sonda	28
4.1.2	Reflexní diferenciální kruhová sonda	28
4.2	Princip experimentálního měření	28
4.2.1	Zapojení měřícího řetězce	29
4.3	Výsledky měření osově symetrických vad	30
4.3.1	Vada se skokovou změnou	30
4.3.2	Vada s pozvolnou změnou	32
4.4	Měření detekce vad	32
4.4.1	Podélná vada č.1	32
4.4.2	Podélná vada č. 2	33
4.4.3	Příčná vada	36
4.4.4	Kruhová vada č. 1	37
4.4.5	Kruhová vada č. 2	39
5	Závěr	40

Seznam použitých symbolů

Elektromagnetické pole

H	$A \cdot m^{-1}$	intenzita magnetického pole
B	T	magnetická indukce
A	Wb/m	vektorový magnetický potenciál
J	$A \cdot m^{-2}$	proudová hustota
ϕ	Wb	magnetický indukční tok
δ	m	hloubka vniku naindukovaných proudů

Materiálové parametry

γ	$S \cdot m^{-1}$	elektrická vodivost
μ	$H \cdot m^{-1}$	permeabilita

Obecné

f	Hz	frekvence
ω	$rad \cdot s^{-1}$	úhlová frekvence
I	A	elektrický proud

1

Současný stav znalostí

1.1 Úvod do problematiky

Současná doba je charakteristická rychlým vývojem sofistikovaných technologií. Vzhledem k ceně těchto nových technologií a možným následkům jejich selhání je stálá kontrola jejich integrity a funkčnosti stále důležitější. Kontrola má mnoho aspektů, a proto bylo vyvinuto mnoho různých přístupů. Nedestruktivní defektoskopie (NDD) hraje mezi nimi důležitou roli, protože nedochází k poškození testovaného vzorku a ve většině případů není nutné ani jeho rozložení na díly. Díky tomu se NDD používá pro průběžné kontroly zařízení, stejně tak, jako pro hodnocení výrobních procesů. Spolehlivé inspekční metody jsou důležité z dvou důvodů. Prvním, a důležitějším, je bezpečnost. Detekce strukturálních anomálií a předcházení nehodám je základním úkolem NDD. Druhý důvod je ekonomický, protože efektivní údržba a bezpečné prodloužení životního cyklu nákladných zařízení, jako jsou nukleární reaktory, přehrady, vesmírné zařízení, letadla, ponorky, lékařská zařízení atd. je založené na pravidelném sledování jejich stavu.

Nejdůležitějším úkolem nedestruktivní defektoskopie je detekce nejružnějších typů strukturálních vad. Tyto vady vznikají během výroby nebo provozu z důvodu únavy materiálu, přetížení, nebo vlivem extrémních podmínek. K tomuto účelu byly vyvinuty nejružnější metody. Záleží na charakteru testovaného materiálu, stejně jako na struktuře, velikosti a umístění předpokládané vady, na kterou metodu se spolehne. Tyto metody se liší především rozlišením a citlivostí vůči různým typům strukturálních vad.

Metody nedestruktivního vyhodnocení se dělí do několika základních skupin:

- Metody využívající mechanické vlnění – mechanické vibrace testovaného vzorku jsou vyhodnocovány, jmenovitě šíření povrchového nebo objemového mechanického vlnění ve sledovaném vzorku, či akustická emise vln ze vzorku. Rozlišení

metod na základě mechanického vlnění je limitováno vlnovou délkou nebo frekvencí vlnění. [1]

- Ultrazvuková defektoskopie,
 - Akustická emise,
 - Zkoumání frekvenčního spektra mechanického vlnění.
- Metody na základě elektromagnetického vlnění – vyhodnocuje se vzájemné působení elektromagnetické vlny a zkoumaného objektu, především šíření, odraz a rozptyl elektromagnetické vlny způsobené nehomogenitami ve struktuře vzorku.
 - Optické metody (např. mikroskopické vyšetření, holografické a interferometrické metody) jsou velmi efektivní především v případě vyšetřování deformace vzorku, nebo změn kvality jeho povrchu.
 - Infračervená termografie se používá pro vyšetřování nehomogenního teplotního profilu vzorku způsobeného elektrickými či mechanickými ztrátami (zahřívání brzd, zahřívání elektrických spojů či elektrických zařízení)
 - Rentgenové vyšetření reprezentuje velice efektivní a mocný nástroj defektoskopie. Je zkoumán vliv struktury vzorku na průchod rentgenového záření skrz vzorek. Metoda je citlivá na vnitřní defekty vzorků, jako například svařované spoje, části motoru atd. [2]
 - Nukleární metody
 - Metoda radioaktivního vzorkování pracuje na základě přídavku radioaktivní substance (kapaliny nebo plynu) do proudící tekutiny a následného dozimetrického vyhodnocení šíření kapaliny vyšetřovaným systémem, nebo pronikání do zjišťovaných defektů.
 - Nukleární magnetická rezonance je metoda, schopná objevit speciální atomy ve vzorku, např. vodíkové atomy vody. Tato metoda je často využívaná k vyšetření organických struktur (např. rostlin)
 - Metody na základě počítačové tomografie - reprezentují moderní nástroje vyvinuté ve spojitosti s vývojem výkonných počítačů. Tomografické vykreslování spočívá v počítačovém zpracování obrovského množství dat, získaných detekcí záření emitovaného zkoumaným objektem. Zdrojem signálu může být rentgen, nukleární magnetická rezonance, radioaktivní emise atd. Počítačová tomografie je nástroj pro 3D zobrazení vnitřní struktury vzorku. [3]
 - Elektromagnetické induktivní metody - využívají vzájemné působení mezi střídavým magnetickým polem a elektrodynamickou strukturou vodivého materiálu.
 - Akustická vlna, která se šíří vzorkem může být generována elektromagnetickým polem v povrchové vrstvě vodivého vzorku. Speciální sonda, která se využívá pro generování a detekci těchto vln se nazývá EMAT

(Electromagnetic-Acoustic Transducer). Metoda kombinuje výhody ultrazvukového vyšetření spolu s bezkontaktní metodou generování a detekce ultrazvuku. [4]

- Externí elektromagnetické pole generuje v povrchové vrstvě vzorku silně oslabenou elektromagnetickou vlnu, známou jako skin efekt. Ta je spojená s existencí indukovaných vířivých proudů. Nedestruktivní defektoskopie pomocí vířivých proudů je uzpůsobená pro bezkontaktní vyšetření vodivých objektů.

1.2 Princip využití vířivých proudů

Princip nedestruktivní defektoskopie s využitím vířivých proudů spočívá v interakci mezi indukovanými vířivými proudy a strukturou zkoumaného tělesa. Harmonické magnetické pole generované příslušnou cívkou pronikne povrchovou vrstvou objektu do efektivní hloubky dané vzorcem

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu\omega\sigma}}, \quad (1.1)$$

kde ω je úhlová frekvence, μ je permeabilita a σ je konduktivita zkoumaného materiálu. [5]

Vířivé proudy jsou ovlivněny defekty a dalšími nehomogenitami ve struktuře testovaného vzorku. Elektromagnetické pole generované vířivými proudy může být detekováno stejnou cívkou, kterou jsou buzeny vířivé proudy a je vyhodnoceno jako změna impedance této cívky. Impedance není ovlivněna pouze vlastnostmi vzorku ale také konfigurací cívky a vzdáleností cívky od povrchu vzorku. Vyhodnocení získaného signálu je předmětem zkoumání mnoha odborníků na tuto problematiku. Vztah mezi zjištěnou změnou impedance cívky a strukturou zkoumaného vzorku je velmi komplexní a musí být vyhodnocen pomocí speciálních transformačních procedur s využitím počítačových kódů (inverzní problematika) vyvinutých na základě simulací problematiky ECD.

Metoda ECD je efektivně využitelná pouze pro zkoumání povrchových a podpovrchových defektů, protože amplituda EC exponenciálně klesá s hloubkou v testovaném vzorku. Povrchová vrstva, která lze být efektivně vyhodnocena pomocí ECD se nachází mezi několika desetinami mm (100 kHz) a několika mm (jednotky kHz). Výběr frekvence závisí na předpokládaném tvaru, stejně jako na hloubce defektů. Na druhé straně, rozlišení metody je limitováno elektromagnetickou vlnovou délkou, která je srovnatelná s efektivní hloubkou vniku

$$\lambda = 2\sigma\mu \quad (1.2)$$

a tudíž závisí na frekvenci. Obvykle se během ECD využívá multifrekvenční signál. [6]

Vstupní impedance a tudíž primární proud budícího obvodu je ovlivněná materiálovými vlastnostmi vzorku, geometrickým uspořádáním samotné sondy a vzdáleností sondy od povrchu vzorku. Pokud poslední dva jmenované parametry zůstávají během

měření konstantní, závisí měřený signál pouze na materiálových vlastnostech a poskytuje nám informace o umístění nespojitosti, její tvar a proporce.

Hlavní výhody použití ECD metod jsou [7]:

- citlivost na malé vady a strukturální nehomogenity,
- vysoká rozlišovací schopnost,
- všestrannost,
- testování dává okamžité výsledky,
- přenosné vybavení,
- bezkontaktní měření,
- vyšetření poměrně komplexních struktur.

Na druhou stranu, ECD má několik omezení vycházejících ze samotného fyzikálního principu. Hlavní omezení je schopnost použití metody pouze pro vodivé materiály. Hloubka vniku vířivých proudů je limitována tzv. skin efektem, tudíž tato metoda je použitelná pouze pro detekci povrchových a podpovrchových vad nebo pro objemovou inspekci tenkých materiálů. Vady ležící paralelně s vinutím cívky jsou obtížně detekovatelné. Navíc, drsnost povrchu testovaného vzorku ovlivňuje naměřená data a zvyšuje pravděpodobnost nesprávného vyhodnocení vady. Nicméně, díky výhodám uvedeným výše, je metoda ECD často využívána v mnoha průmyslových odvětvích.

1.3 Sondy ECD

Existuje mnoho typů sond pro nedestruktivní defektoskopii, jako například solenoidové cívky, supravodivé kvantové interferenční zařízení (SQUID) a Hallovy či magnetorezistivní senzory. Tato sekce se zabývá těmito typy sond a obsahuje nejnovější výzkumy v oblasti jejich návrhu. Obecně poskytuje sonda tím vyšší citlivost, čím silněji je ovlivněn nespojitostmi tok vířivých proudů. [8]

1.3.1 Cívkové sondy

Tyto sondy jsou nejčastěji používaným typem sond pro ECD. Nyní se zaměříme blíže na různé typy cívkových sond, nejdůležitější parametry a obvody pro vyhodnocování signálů.

Rozdělení cívkových sond

Různé struktury cívek jsou použitelné pro detekci široké škály trhlin.

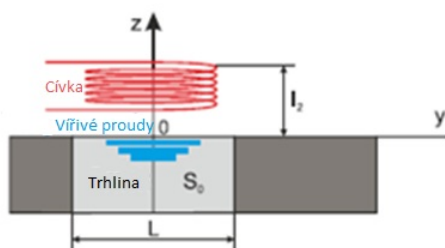
Průchozí sondy Jedná se o nejčastěji užívaný typ sond pro ECD. Obvykle se tyto sondy využívají pro vyšetřování tyčí nebo trubek. Průchozí sondy jsou citlivé na nespojitosti vzniklé paralelně k ose tyče či trubky. Vnitřní průchozí sondy umožňují detekci trhlin na vnější straně trubek. Nejčastěji se využívají pro kontrolu tepelných výměníků v elektrárnách.

Přestože většina průchozích sond má kruhový průřez, někteří výrobci poskytují možnost návrhu sond různých tvarů průřezu pro speciální aplikace. [9]

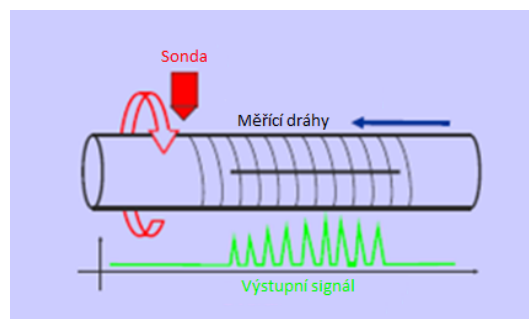
Příložné sondy Příložné sondy tvoří cívky, jejichž osa je kolmá na povrch testovaného vzorku. Cívky mohou mít vzduchové nebo ferritové jádro, přičemž sondy s ferritovým jádrem mají vyšší permeabilitu také vyšší impedanci, než sondy se vzduchovým jádrem. Tento typ sond je vysoce citlivý na zdvih sondy a nerovnosti povrchu vzorku. Tento typ sond se používá ke kontrole rovných povrchů. Vířivé proudy v testovaném vzorku vznikají soustředně a paralelně k povrchu (viz obr. 1.1). Z tohoto důvodu není tento typ sond vhodný pro detekci laminárních trhlin, protože nedochází k výraznému ovlivnění toku vířivých proudů.

Příložné sondy lze použít pro manuální, nebo automatické testování. Manuální sondy jsou navrhovány především pro testování povrchových defektů prvků, které vyžadují častý dohled, a jsou využitelné zejména pro údržbu částí letadel.

Příložné sondy mohou být také použity pro automatickou detekci podélných trhlin v trubkách nebo tyčích, díky použití rotačního systému, při kterém sonda rotuje vysokou rychlostí okolo testovaného vzorku, který se pohybuje podélně, a skenuje jeho povrch (viz obr. 1.2). [10]



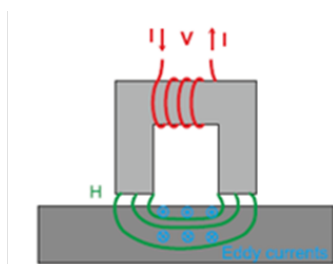
Obr. 1.1: Příložná sonda se znázorněnými vířivými proudy [11]



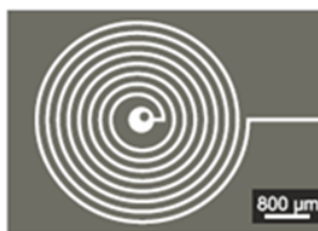
Obr. 1.2: Automatická rotační defektoskopie [11]

Další typy sond Další typy sond, používané v defektoskopii vířivými proudy, jsou podkovové sondy, spirálové sondy a pole cívkových sond.

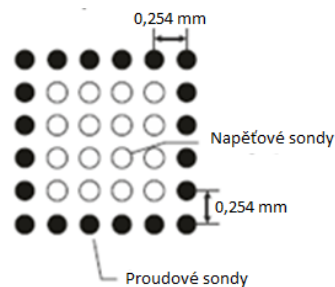
Obrázek 1.3 zobrazuje podkovovou sondu, která je užitečná pro detekci podélných trhlin. V poslední době se tento typ sond používá pro kontrolu uhlíkových kompozitních materiálů. Magnetický tok proniká paralelně s povrchem a tok vířivých proudů se uzavírá podle obrázku 1.3. Podélné trhliny značně ovlivní tok vířivých proudů, což vysvětluje vysokou citlivost tohoto typu sond.



Obr. 1.3: Podkovová sonda [11]



Obr. 1.4: Spirální sonda [11]



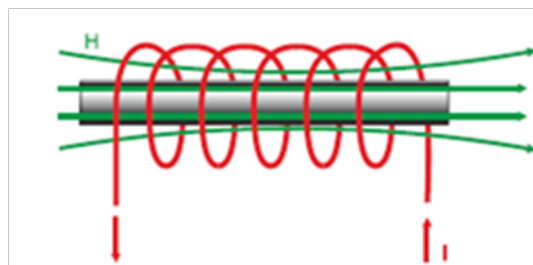
Obr. 1.5: Pole cívek [11]

V poslední době se pro defektoskopii vířivými proudy experimentuje se spirálovými sondami. Podle výsledků jejich testů, nabízí tyto sondy zajímavé vlastnosti, především v oblasti citlivosti.

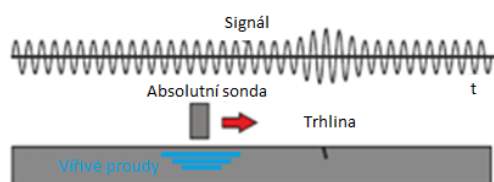
Sadu cívek uspořádaných do pole zobrazuje obrázek 1.5. Tento typ sond umožňuje 2D zobrazování a použití technik zpracování obrazu. Rozlišení závisí na velikosti cívek a může být zvýšeno miniaturizací. [12]

Absolutní sondy

Nejjednodušší absolutní sondy se skládají z prosté cívky, generující vířivé proudy a sledující změny v poli vířivých proudů, viz obr. 1.6. Absolutní sondy poskytují absolutní napěťový signál, jak ukazuje obrázek 1.7. Nevýhodou těchto sond je jejich vysoká citlivost ke změnám teploty. Zlepšení vlastností může nastat napěťovou kompenzací



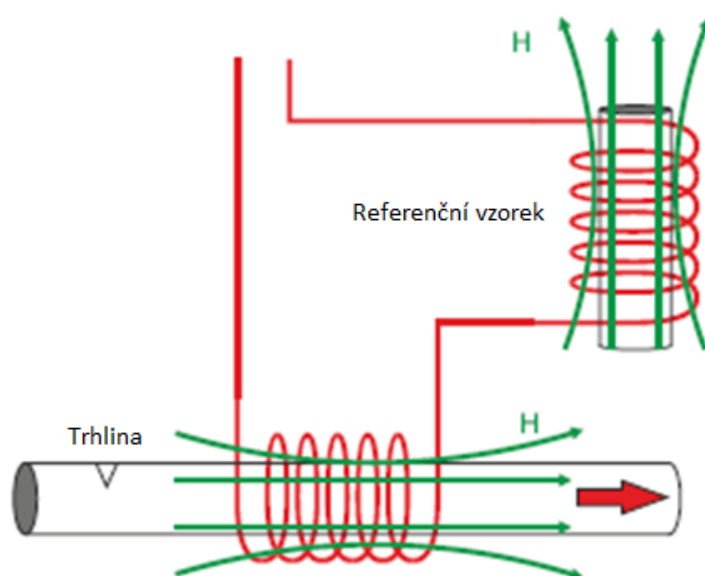
Obr. 1.6: Cívka nekompenzované absolutní sondy [11]



Obr. 1.7: Průběh signálu nekompenzované absolutní sondy [11]

pomocí přidání referenční cívky, která je vzdálená od zkoumaného vzorku, viz obr. 1.8. Tím se sníží citlivost sondy na změny teploty.

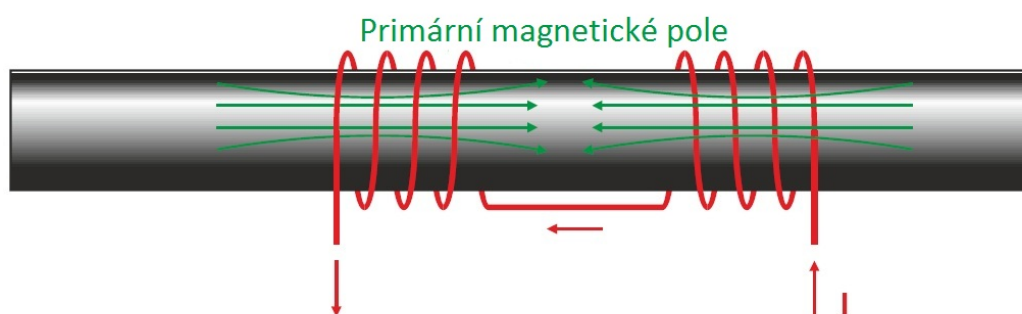
Absolutní sondy detekují dlouhé trhliny nebo pomalé změny rozměrů trubek nebo tyčí, které diferenční sondy nemohou detekovat. Navíc, absolutní změna impedance cívky poskytuje mnoho informací o testovaném materiálu, jak například zrnitost, tvrdost nebo měření namáhání.



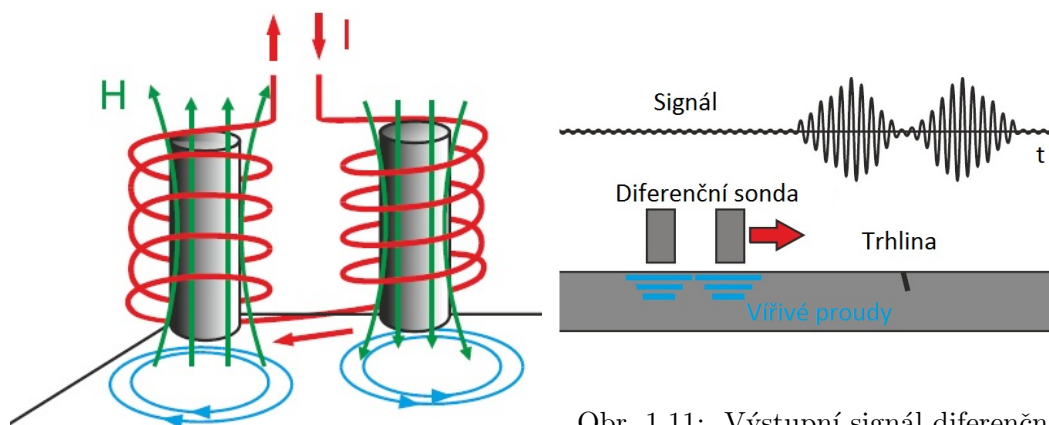
Obr. 1.8: Kompenzovaná absolutní sonda [11]

Diferenční sondy

Diferenční sondy se skládají ze dvou cívek, které porovnávají dvě přilehlé části zkoumaného materiálu, jak ukazuje obrázek obr. 1.9 a 1.10. Detekční cívky jsou navinuty vzájemně opačně, z důvodu vyrovnání indukovaného napětí vzniklého vybuzením primárního pole viz obr. 1.9. Pokud se neobjeví trhlina v blízkosti sondy, je diferenční napětí sondy nulové. Trhlina v testovaném vzorku, který se pohybuje konstantní rychlostí, poruší rovnováhu a následně detekujeme dva napěťové pulzy. [13]



Obr. 1.9: Diferenční průchozí sonda [11]



Obr. 1.10: Diferenční příložná sonda [11]

Obr. 1.11: Výstupní signál diferenční sondy vířivých proudů [11]

Výhodou diferenčních cívek je jejich schopnost detekovat velmi malé nespojitosti. Nicméně, diferenční cívky nedetekují pozvolnou změnu rozměru nebo vnitřní struktury, a proto jsou typicky cívky velice blízko sebe. Proběhlo mnoho pokusů o zvýšení citlivosti diferenčních sond. Jednou z těchto metod bylo použití dvojice gradientních cívek.

1.3.2 Magnetorezistivní sondy

Magnetorezistivní senzory jsou převodníky magnetického pole, které vykazují lineární změnu elektrického odporu při působení vnějšího magnetického pole. Magnetorezistivní senzory jsou velice citlivé a přesné, ale jejich hlavní nevýhodou je vysoký teplotní koeficient. Existují dva typy magnetorezistivních senzorů:

- SV (spin valve = spinový ventil),
- MTJ (magnetic tunnel junction = senzory využívající magnetického tunelového jevu).

SV magnetometry jsou magneticky citlivé tranzistory použité jako senzory magnetického pole a mají hybridní strukturu polovodič-feromagnetikum. Magnetické tunelové přechody jsou založeny na spinové závislosti tunelového jevu.

Magnetorezistivní senzory jsou využívány k detekci sekundárního magnetického pole vyvolaného vířivými proudy. [14]

1.3.3 Hallova sonda

Hallové sondy mohou detekovat magnetické pole vyvolané vířivými proudy a jsou proto využívány v ECD. Hallovo napětí je úměrné proudu tekoucímu sondou a magnetické indukci kolmé k sondě. Hallové sondy jsou používány především v oblasti jednotek mT a mohou být snadno miniaturizovány a integrovány uvnitř mikroelektronických obvodů. K jejich nevýhodám patří omezená citlivost, vyšší úroveň tzv. 1/f

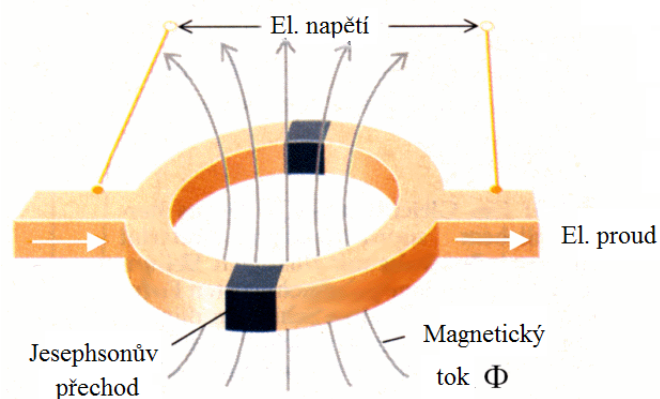
šumu (šum o takové šířce pásma, že jeho výkonová hustota je úměrná převrácené hodnotě frekvence) a relativně vysoký offset.

Jedním ze směrů vývoje těchto senzorů je vytvoření sensorového pole Hallových sond pro vyšetřování nerezové oceli. Další z vědeckých týmů se zaměřili na testování diferenciální Hallové sondy pro detekování trhlin nýtovaných struktur v letadlech. Výsledný signál byl však silně rušen šumem, což vedlo k nepřesnostem v detekci trhlin. Proto bylo potřeba použít metod průměrování a vlnového odrušení výsledného signálu. [15]

1.3.4 SQUID senzory

Supravodivá kvantová interferenční zařízení jsou velmi citlivé magnetometry navržené pro měření extrémně slabých magnetických polí. Zařízení typu SQUID jsou založena na supravodivé smyčce obsahující Josephsonovy přechody. Nevýhodou tohoto typu senzorů je požadavek na kryogenní chlazení pro snížení šumové úrovně, což značně omezuje jejich použití v mnoha odvětvích. Pro ECD se využívají od roku 1980.

V konvenčních ECD systémech, kde je magnetické pole vířivých proudů snímáno cívkou, je typická úroveň šumu okolo pro frekvence okolo 100 kHz. V případě některých speciálních aplikací je tato úroveň příliš vysoká a z důvodu přesnosti a citlivosti je nutné místo solenoidální sondy použít SQUID magnetometr. [16]



Obr. 1.12: SQUID senzor [17]

2

Matematický model

V této kapitole je uveden obecný matematický model zařízení využívající indukce vířivých proudů ve zkoumaném vodivém tělese, umístěném v nestacionárním magnetickém poli vybuzeném cívkou protékanou harmonickým elektrickým proudem.

2.1 Model magnetického pole

Matematický model magnetického pole vychází z 1. Maxwellovy rovnice v diferenciálním tvaru. V této rovnici zanedbáme remanentní složku, protože zdrojem magnetického pole je pouze cívka (kvazistacionární pole). Další úprava spočívá v zanedbání posuvných proudů. Pak lze tuto rovnici zapsat ve tvaru

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J}, \quad (2.1)$$

kde \mathbf{H} je vektor intenzity magnetického pole a \mathbf{J} je vektor celkové proudové hustoty. Využijeme-li vztahu mezi intenzitou magnetického pole \mathbf{H} a magnetickou indukcí \mathbf{B}

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (2.2)$$

a následně tuto indukci vyjádříme pomocí magnetického vektorového potenciálu \mathbf{A} , obdržíme předchozí rovnici pole ve tvaru

$$\operatorname{rot} \mu^{-1}(\operatorname{rot} \mathbf{A}) = \mathbf{J}, \quad (2.3)$$

kde μ je permeabilita.

Abychom mohli vyjádřit proudovou hustotu \mathbf{J} na pravé straně rovnice (2.3), musíme nejprve definovat zobecněnou intenzitu elektrického pole \mathbf{E}' , která je dána

součtem intenzity vnějšího elektrického pole \mathbf{E} a intenzity elektrického pole vznikající vlivem vzájemného pohybu prostředí a vnějšího magnetického pole

$$\mathbf{E}' = \mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B} = \mathbf{E} + \mathbf{v} \times \text{rot } \mathbf{A}, \quad (2.4)$$

kde \mathbf{v} je rychlost vzájemného pohybu a \mathbf{B} je indukce zmíněného vnějšího magnetického pole. Dosadíme-li za intenzitu \mathbf{E} do druhé Maxwellovy rovnice, získáme

$$\text{rot} \left(\mathbf{E}' - \mathbf{v} \times \text{rot } \mathbf{A} \right) = -\text{rot} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}. \quad (2.5)$$

Odstraněním operátoru rotace a vynásobením rovnice elektrickou vodivostí γ získáme výsledný vztah pro celkovou proudovou hustotu vířivých proudů ve tvaru

$$\mathbf{J} = \gamma \mathbf{E}' = \gamma (\mathbf{v} \times \text{rot } \mathbf{A}) - \gamma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \gamma \text{grad } \varphi + \mathbf{J}_{\text{ext}}. \quad (2.6)$$

Dosazením celkové proudové hustoty vířivých proudů \mathbf{J} do rovnice (2.3) získáme již výslednou parciální diferenciální rovnici popisující rozložení magnetického pole ve tvaru

$$\text{rot } \mu^{-1} \text{rot } \mathbf{A} + \gamma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \gamma (\mathbf{v} \times \text{rot } \mathbf{A}) = \mathbf{J}_{\text{ext}} - \gamma \text{grad } \varphi. \quad (2.7)$$

Kde složka \mathbf{J}_{ext} označuje vnější proudovou hustotu.

Pro případ nestacionárního magnetického pole vyvolaného harmonickým elektrickým proudem se nebude uplatňovat pohybová složka proudové hustoty vířivých proudů, protože neuvažujeme vzájemný pohyb zařízení vůči měřenému objektu. Dále může uvažovat nulovou divergenci \mathbf{E} ($\varphi = 0$), tzn. existenci pouze uzavřených proudů. Rovnici (2.7) lze tedy pro tento případ zapsat ve tvaru

$$\text{rot } \mu^{-1} \text{rot } \mathbf{A} + \gamma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = \mathbf{J}_{\text{ext}}. \quad (2.8)$$

Protože zdrojem magnetického pole je cívka protékaná harmonickým proudem, lze využít symbolicko-komplexní metody. Díky této úpravě můžeme časovou derivaci nahradit členem $j\omega$

$$\text{rot } \mu^{-1} \text{rot } \mathbf{A} + j\gamma\omega \mathbf{A} = \mathbf{J}_{\text{ext}}. \quad (2.9)$$

Uvedená rovnice se nazývá Helmholtzova.

3

Numerické řešení

Za účelem provádění experimentů spojených s nedestruktivní defektoskopií využívající vířivé proudy bylo navrženo a sestaveno experimentální zařízení. Toto zařízení využívá magnetické pole, buzené harmonickým elektrickým proudem cívkou, k indukování vířivých proudů do zkoumané části.

3.1 Model magnetického pole

Rozložení magnetického pole bylo řešeno v cylindrických souřadnicích jako osově souměrná úloha. Protože se jedná o osově souměrnou úlohu, byla použita pouze polovina modelu. Definiční oblast modelu je uvedena na obr. 3.1, a skládá se z oblasti budící cívky 1, měřících cívek 2 a 3, zkoumaného tělesa 4 a okolního prostředí, které je ohraničeno fiktivní hranicí.

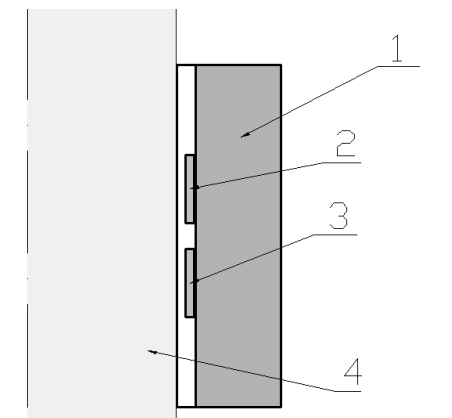
Fiktivní hranice ohraničuje definiční oblast. Na této hranici je definována hodnota vektorového magnetického potenciálu $\mathbf{A} = \mathbf{0}$. Zdůvodnění této podmínky lze provést na základě totožnosti této hranice se siločárou magnetického pole. Na základě provedené konvergence řešení a nutného posuvu sondy během výpočtu byla určena vzdálenost fiktivní hranice od středu vady 0,15 m.

Jak bylo odvozeno v kapitole 3, rozložení magnetického pole v systému je popsáno rovnicí vektorového magnetického potenciálu

$$\operatorname{rot} \mu^{-1} \operatorname{rot} \mathbf{A} + j\gamma\omega \mathbf{A} = \mathbf{J}_{\text{ext}}, \quad (3.1)$$

přičemž pravé straně rovnice je nenulová pouze v oblasti 1 a v oblasti 4 a v okolí je uvažováno $\gamma = 0$.

Materiálové vlastnosti použité pro numerické řešení modelu jsou uvedeny v tabulce 3.1



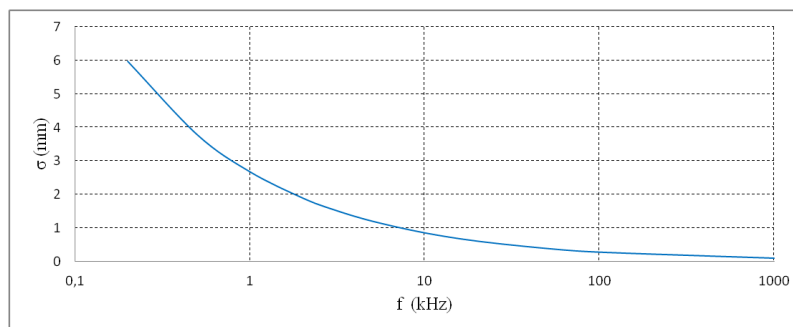
Obr. 3.1: Definiční oblast modelu magnetického pole (1 - budící vinutí; 2,3 - měřící vinutí; 4 - zkoumané těleso)

Tab. 3.1: Materiálové vlastnosti použité při řešení modelu

Materiál	Materiálové vlastnosti
Hliník	$\gamma_{Al} = 37 \text{ MSm}^{-1}$, $\mu_{Al} = 1$
Měď	$\gamma_{Cu} = 56 \text{ MSm}^{-1}$, $\mu_{Cu} = 1$

3.2 Inspekční hloubka

Důležitým parametrem při návrhu zařízení využívajících vířivé proudy je inspekční hloubka, určená hloubkou vniku. Jak již bylo uvedeno v kapitole 1, tato vlastnost závisí na permeabilitě a konduktivitě testovaného materiálu. Na obr. 3.2 je zobrazena závislost hloubky vniku pro hliník při teplotě 20°C .

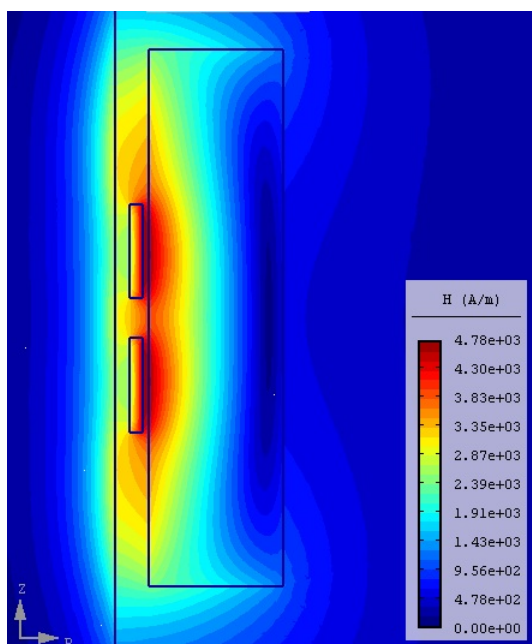


Obr. 3.2: Závislost hloubky vniku na frekvenci pro hliník při teplotě 20°C

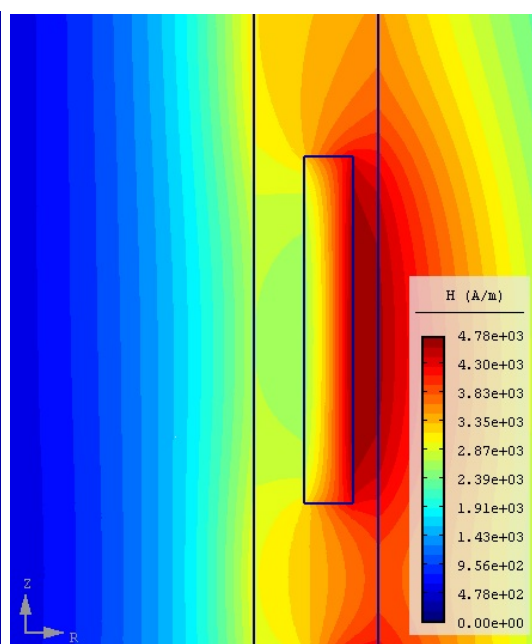
3.3 Výsledky řešení matematického modelu

3.3.1 Rozložení magnetického pole

Řešení matematického modelu magnetického pole bylo provedeno v programu Agros2D, jehož specifika jsou uvedeny v [18]. Pro výpočet byl na všech elementech použit polynom 2. řádu. Řešená síť je na obrázku 3.5. Výsledné rozložení magnetického pole je zobrazeno na obr. 3.3. Na obr. 3.4 je zobrazen detail rozložení magnetického pole v okolí snímacího vinutí.



Obr. 3.3: Magnetické pole testovacího zařízení

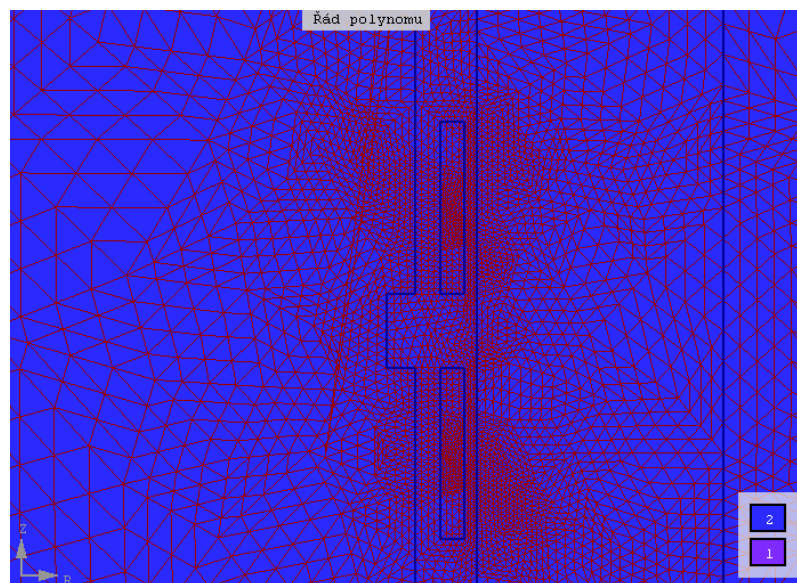


Obr. 3.4: Detail rozložení mag. pole v okolí snímacího vinutí

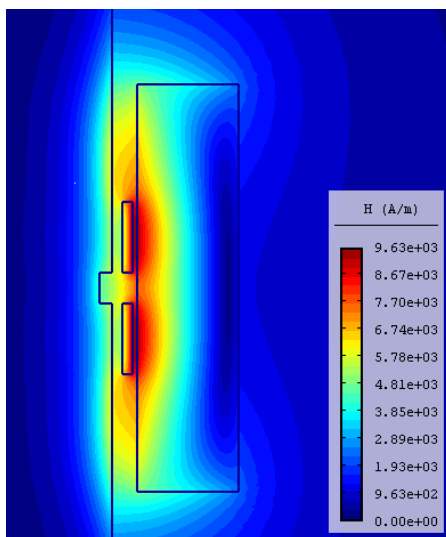
3.3.2 Rozložení magnetického pole v okolí uměle vytvořených vad

Z důvodu možnosti porovnání numerického řešení s reálným experimentem byla proveden výpočet rozložení magnetického pole pro materiál s dvojicí uměle vytvořených vad. První z nich je vada se skokovou změnou o šířce 3 mm a hloubce 1,4 mm. Detail rozložení magnetického pole v okolí drážky je uveden na obrázku 3.7

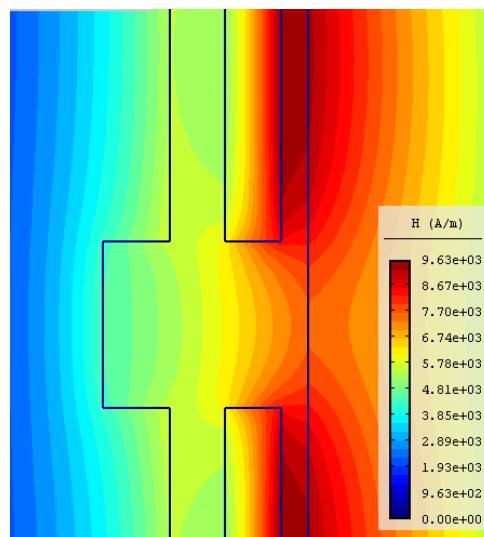
Druhá je vada s pozvolnou změnou o šířce 19 mm a hloubce 1,2 mm. Detail rozložení magnetického pole v okolí drážky je uveden na obrázku 3.9



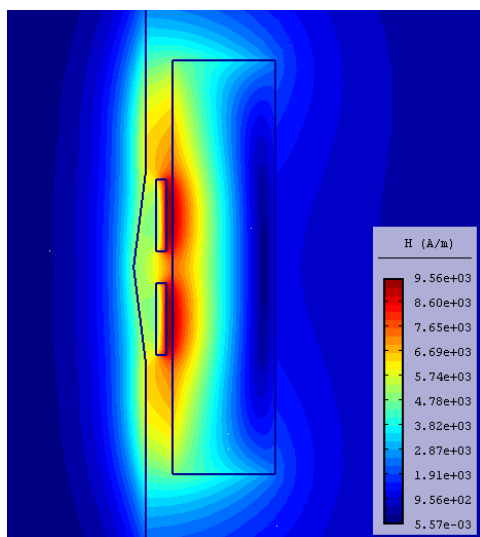
Obr. 3.5: Řešená síť s vyznačeným řádem polynomu



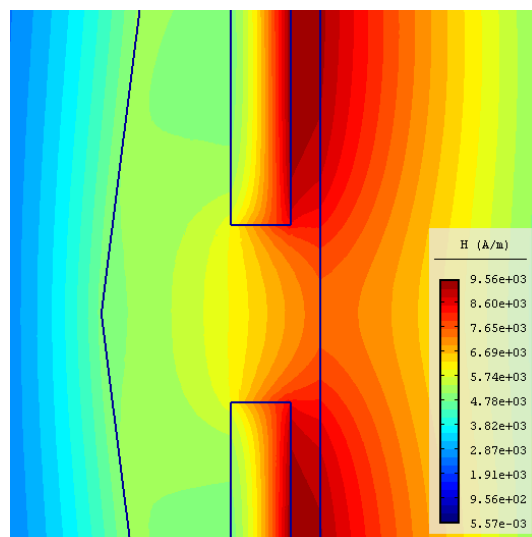
Obr. 3.6: Magnetické pole testovacího zařízení pro případ s vadou se skokovou změnou



Obr. 3.7: Detail rozložení mag. pole v okolí uměle vytvořené vady se skokovou změnou



Obr. 3.8: Magnetické pole testovacího zařízení pro případ s vadou s pozvolnou změnou



Obr. 3.9: Detail rozložení mag. pole v okolí uměle vytvořené vady s pozvolnou změnou

4

Experimentální ověření

Tato kapitola se zabývá návrhem experimentálního zařízení - detekční sondy, dále postupem experimentálního měření a poté výsledky experimentu ve formě odezvy detekční sondy na řadu uměle vytvořených vad v materiálu.

Součástí, která byla pořízena za účelem testování, je hliníková tyč o průměru 35 mm. Jak je patrné z chemického složení uvedeného v tabulce 4.1, lze pro zjednodušení materiál testovaného tělesa považovat za čistý hliník.

Tab. 4.1: Chemické složení materiálu testovaného tělesa

Prvek	Al	Si	Fe	Mn	Cu	Cr	Zn	Ti
Zastoupení (%)	99	0,2	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

4.1 Návrh detekční sondy

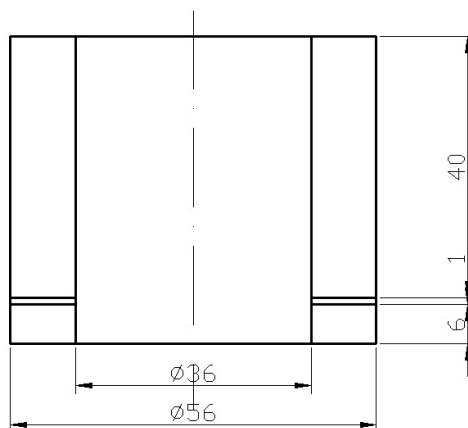
Přes značný pokrok v oblasti nedestruktivní defektoskopie pomocí vířivých proudů je většina publikací v této oblasti zaměřena výhradně na teoretickou stránku problému. Praktická stránka, především vnitřní uspořádání vnějších kruhových sond, je zpravidla součástí firemního tajemství výrobců, proto bylo nutné provést návrh detekční sondy na základě teoretických předpokladů. Tyto návrhy byly poté zdokonaleny s využitím výpočetního prostředí programu Agros2D. Na základě zmíněných předpokladů byla navržena a vytvořena dvě testovací zařízení, tzv. detekční sondy.

4.1.1 Reflexní absolutní kruhová sonda

Tato sonda byla prvním navrženým zařízením. Výsledné zařízení je na obrázku 4.1 a její rozměry potom na obrázku 4.2. Skládá se z dvojice cívek, jedné budící a druhé snímací. Budící cívku tvoří 1500 závitů vodiče o průměru 0,7 mm a měřící cívku 500 závitů vodiče o průměru 0,2 mm. Tato sonda byla navržena pro kmitočty 100 Hz až 1 kHz. Měření byly zjištěny značné nedostatky tohoto typu sondy, především velice nízká citlivost a špatná použitelnost pro vyšší kmitočty. Na základě těchto poznatků byla jako další vývojový stupeň vytvořena sonda diferenciální.



Obr. 4.1: Fotografie navržené absolutní sondy



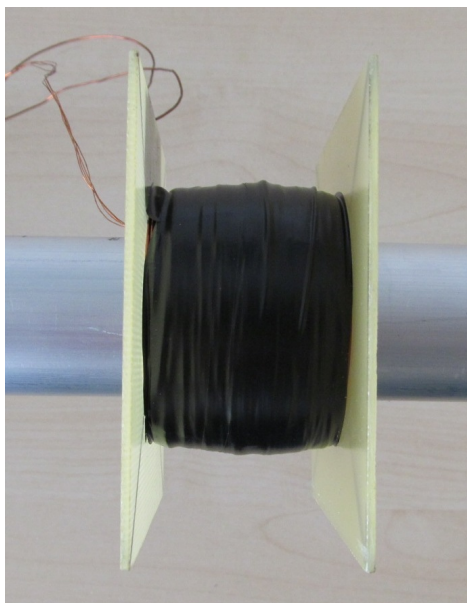
Obr. 4.2: Rozměry navržené absolutní sondy

4.1.2 Reflexní diferenciální kruhová sonda

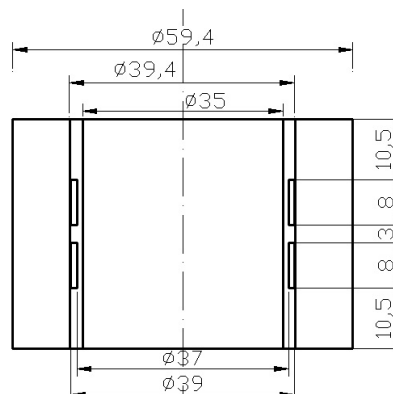
Po provedení první sady měření s absolutní sondou, byla na základě zjištěných poznatků navržena a vytvořena diferenciální sonda, jejíž uspořádání je na obrázku 4.4. Budící vinutí této sondy tvoří 400 závitů vodiče průměru 0,7 mm a každé z měřících vinutí 160 závitů vodiče o průměru 0,2 mm. Tato sonda bylo využita pro výsledné experimentální měření a srovnání s numerickým řešením matematického modelu.

4.2 Princip experimentálního měření

Princip experimentálního měření spočívá v určení odezvy měřícího vinutí na přítomnost uměle vytvořené vady. Měření proběhla ve dvou fázích. V první fázi byly vytvořeny osově symetrické vady pro srovnání výsledků měření s numerickým řešením. V této fázi nebylo výstupní napětí zesíleno, aby byla zajištěna co nejmenší chyba měření. Ve druhé fázi probíhala detekce dvojice podélných vad, jedné příčné vady a dvojice bodových vad. Výstupní napětí pro tato měření bylo nutné přivést na vstup diferenciálního zesilovače AD620AN, z důvodu zvýšení citlivosti zařízení.

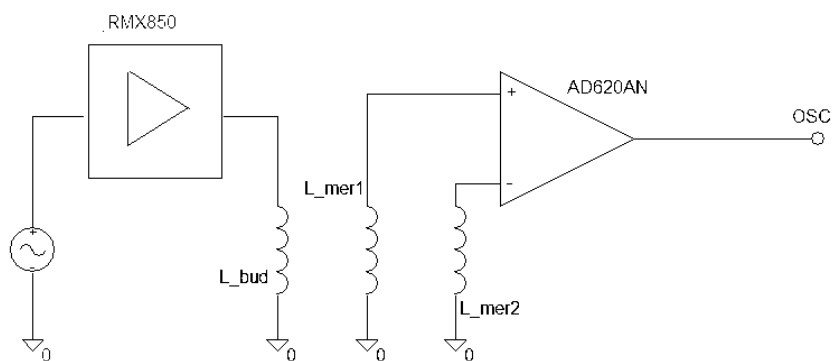


Obr. 4.3: Fotografie navržené diferenciální sondy



Obr. 4.4: Rozměry navržené diferenciální sondy

4.2.1 Zapojení měřícího řetězce



Obr. 4.5: Zapojení měřícího řetězce

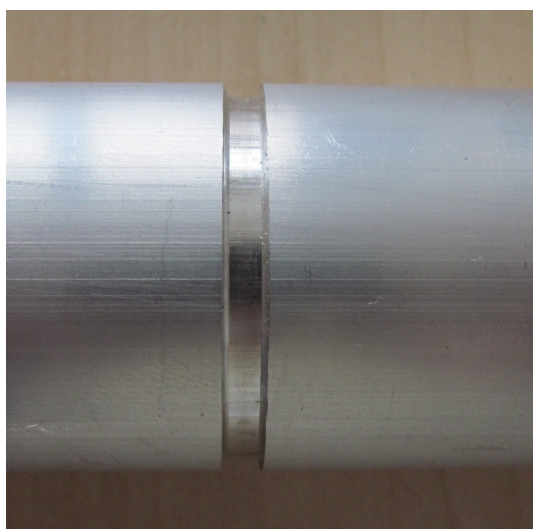
Základní zapojení testovacího řetězce je na obrázku 4.5. Zdrojem vstupního signálu je funkční generátor Tektronix AFG 3021, jehož výstupem je harmonický signál o maximální amplitudě 2 V. Tento signál je přiveden do koncového zesilovače QSC RMX 850 kterým je buzeno magnetické pole budícího vinutí. Výstupy měřících vinutí jsou přivedena na vstupy diferenciálního zesilovače AD620AN, který provádí rozdíl měřených signálů a následně provede zesílení tohoto rozdílu se ziskem $G = 50$.

Výsledný zesílený signál je nakonec snímán osciloskopickou sondou.

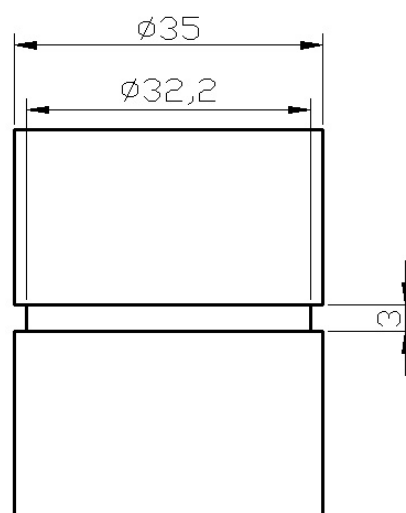
4.3 Výsledky měření osově symetrických vad

Protože byl problém řešen jako osově symetrická úloha, bylo nutné (jak bylo již uvedeno v kapitole ??) vytvoření dvojice symetrických vad, které bylo posléze možné porovnat s numerickým řešením. Jedná se o vadu se skokovou změnou a dále o vadu s pozvolným přechodem hran.

4.3.1 Vada se skokovou změnou



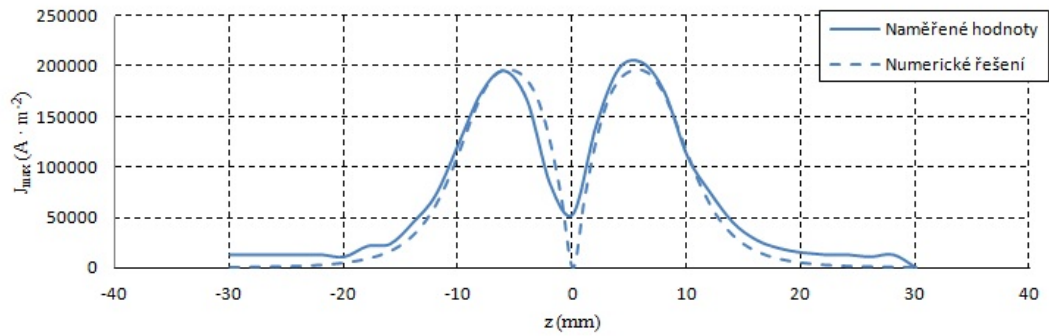
Obr. 4.6: Fotografie osově symetrické skokové vady



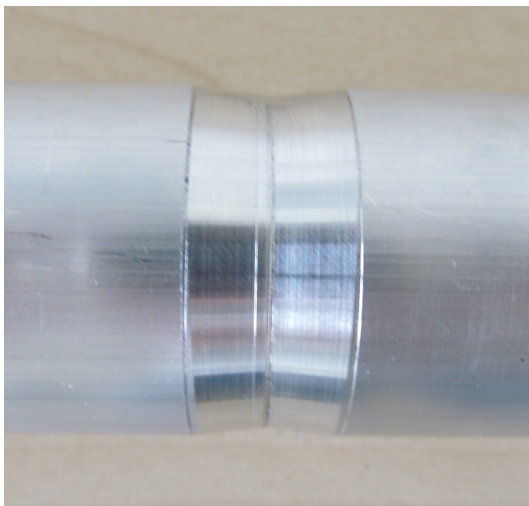
Obr. 4.7: Rozměry osově symetrické skokové vady

Nento typ vady simuluje, z hlediska diferenciální sondy, nejpříznivější případ vady, protože dochází k maximální diferencii napětí na jednotlivých měřicích vinutí. Fotografie testované vady je na obrázku 4.6 a její rozměry jsou na obrázku 4.7.

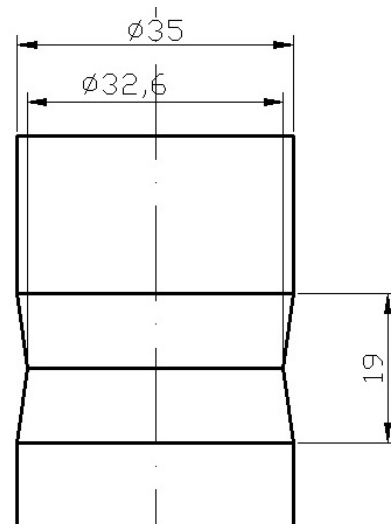
Na obrázku 4.8 je srovnání naměřených hodnot a výsledků numerického řešení. Z výsledků měření je patrný rozdíl mezi oběma měřícími vinutími, který se projevil hodnotou offsetu v oblasti bez vady, a dále rozdílem maximálních hodnot pro obě vinutí. Vzhledem k ručnímu navíjení celého zařízení nebylo možné této chybě zabránit.



Obr. 4.8: Závislost maximální hodnoty proudové hustoty výstupního vinutí na poloze sondy vzhledem ke středu skokové trhliny



Obr. 4.9: Fotografie osově symetrické pozvolné vady

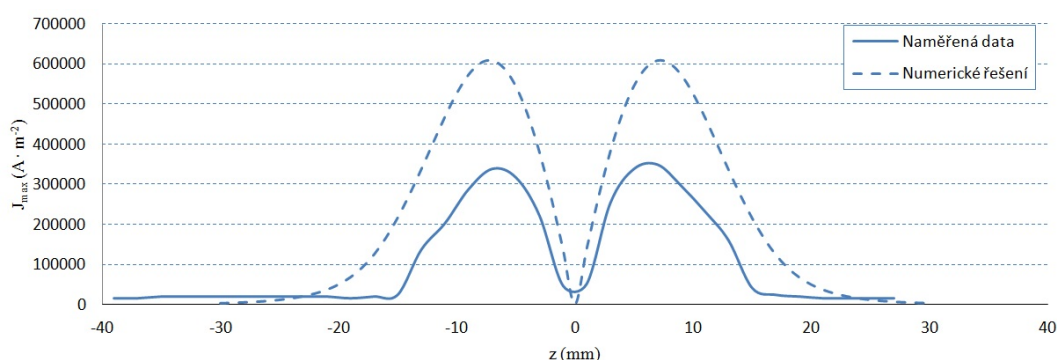


Obr. 4.10: Rozměry osově symetrické pozvolné vady

4.3.2 Vada s pozvolnou změnou

Tento typ vady představuje z hlediska diferenciální sondy nejméně příznivý případ. Jedná se o vadu, jejíž harnici netvoří skoková změna, nýbrž pozvolný přechod. Tato skutečnost má za následek snížení rozdílu indukovaných napětí obou měřících vinutí. Fotografie vytvořené vady je zobrazena na obrázku 4.9 a její celkové rozměry jsou uvedeny na obrázku 4.10

Na obrázku 4.11 je srovnání naměřených hodnot s výsledky numerického řešení. Jak je patrné z obrázku, naměřené hodnoty jsou o téměř 40 % nižší, než výsledky numerického řešení. Tato skutečnost je pravděpodobně způsobena nízkou citlivostí reálného zařízení na malou změnu indukovaného napětí mezi měřícími vinutími.



Obr. 4.11: Závislost maximální hodnoty proudové hustoty výstupního vinutí na poloze sondy vzhledem ke středu pozvolné trhliny

4.4 Měření detekce vad

Účelem tohoto měření bylo určení změny amplitudy výstupního napětí detekční sondy v blízkosti některých typů nesymetrických, uměle vytvořených vad. Jednalo se o dvojici podélných vad, příčnou vadu a dále dvojici kruhových vad. Měření probíhalo pro kmitočty budícího proudu 1 kHz a 3 kHz. Jak bylo uvedeno výše, pro tato měření byl pro zesílení výstupního signálu využit přístrojový zesilovač AD620AN. Toto způsobilo také zesílení offsetu Výstupního napětí v klidovém stavu na hodnotu 600 mV pro 1 kHz a 1680 mV pro 3 kHz.

4.4.1 Podélná vada č.1

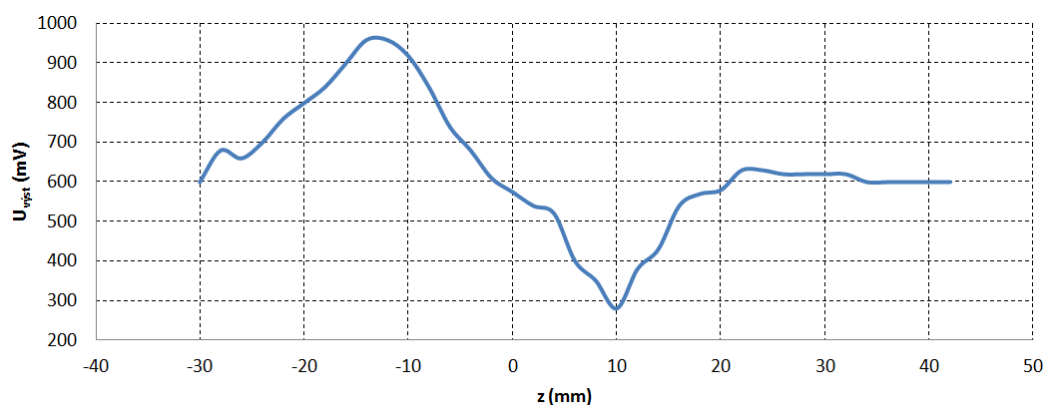
První z testovaných vad je podélná vada o délce 14 mm, šířce 0,9 mm a hloubce 0,6 mm. Fotografie této vady je na obrázku 4.12.

Amplituda výstupního napětí v okolí vady pro kmitočty 1 kHz je na obrázku 4.13 a pro kmitočty 3 kHz je na obrázku 4.14. Průběh naměřených hodnot napětí koreponduje s teoretickými předpoklady. Rozdíl maximálních hodnot a klidové hodnoty



Obr. 4.12: Podélná vada č.1 - foto

výstupního napětí je 350 mV pro 1 kHz a 980 mV pro 3 kHz. Tyto hodnoty jsou dostatečné pro další zpracování, např. při automatických měření.

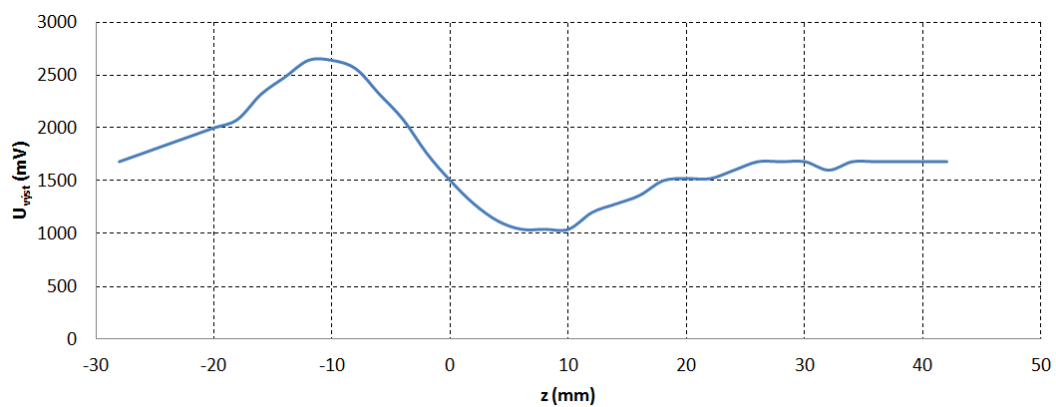


Obr. 4.13: Závislost amplitudy výstupního napětí na poloze sondy vzhledem ke středu podélné vady č. 1 pro 1 kHz

4.4.2 Podélná vada č. 2

Jedná se o druhou z testovaných podélných vad. Délka této vady je 24 mm, šířka je 1,3 mm a hloubka je 1,5 mm. Fotografie této vady je na obrázku 4.15.

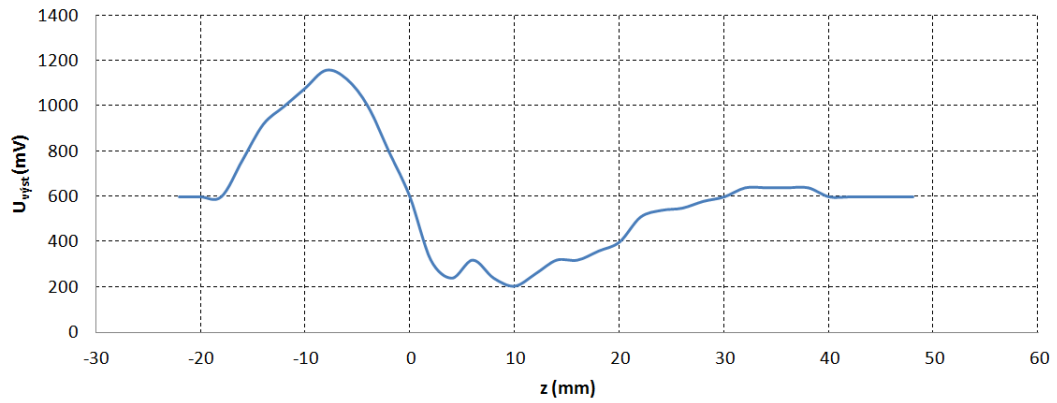
Amplituda výstupního napětí v okolí vady pro kmitočet 1 kHz je na obrázku 4.16 a pro kmitočet 3 kHz je na obrázku 4.17. Při srovnání s předchozím typem podélné vady jsou patrné vyšší špičkové hodnoty výstupního napětí. Tato skutečnost odpovídá předpokladu, že zvýšením rozměrů vady se zvýší odpor průchodu vířivých proudů tělesem.



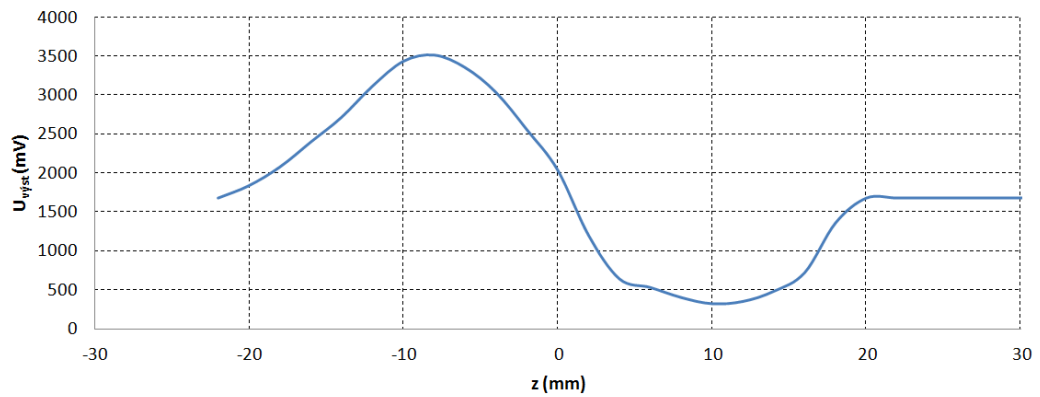
Obr. 4.14: Závislost amplitudy výstupního napětí na poloze sondy vzhledem ke středu podélné vady č. 1 pro 3 kHz



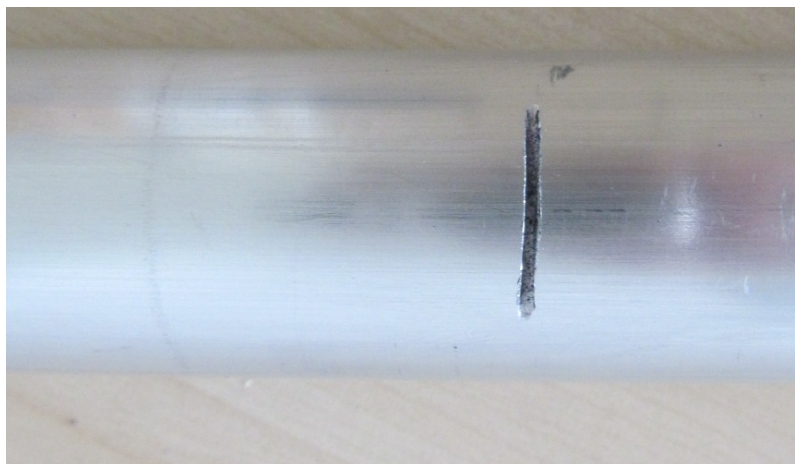
Obr. 4.15: Podélná vada č. 2 - foto



Obr. 4.16: Závislost amplitudy výstupního napětí na poloze sondy vzhledem ke středu podélné vady č. 2 pro 1 kHz



Obr. 4.17: Závislost amplitudy výstupního napětí na poloze sondy vzhledem ke středu podélné vady č. 2 pro 3 kHz

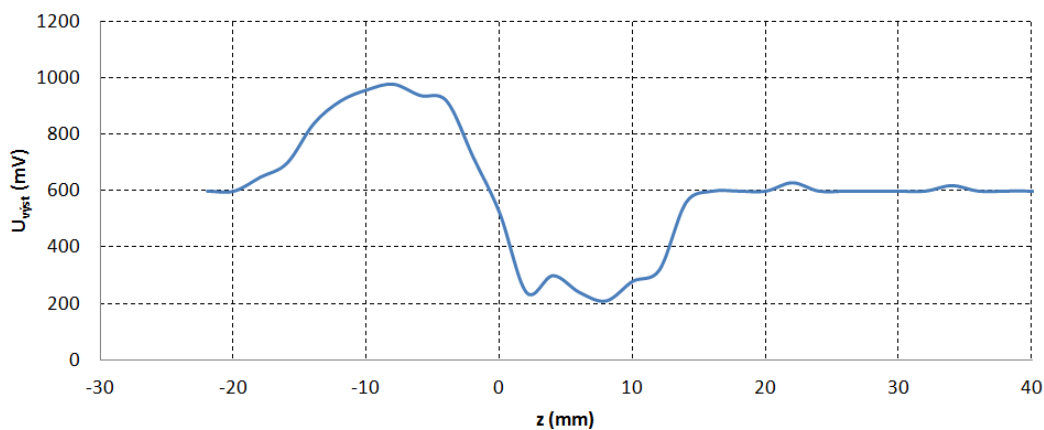


Obr. 4.18: Příčná vada - foto

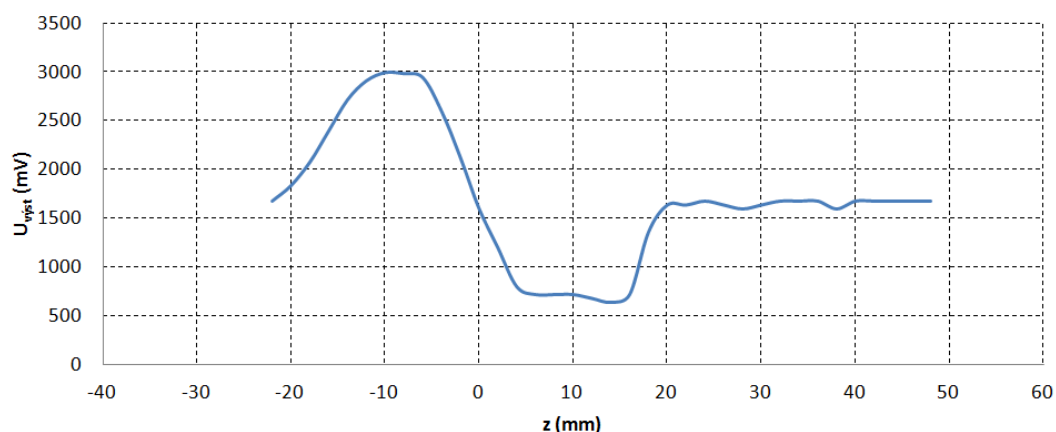
4.4.3 Příčná vada

Třetí z měřených vad byla orientována příčně k testované tyči. Délka této vady je 22 mm, šířka 2 mm a hloubka je 2,2 mm. Fotografie této vady je na obrázku 4.18.

Amplituda výstupního napětí v okolí vady pro kmitočet 1 kHz je na obrázku 4.19 a pro kmitočet 3 kHz je na obrázku 4.20. Při porovnání naměřených hodnot s podélnou vadou č. 2 jsou patrné podstatně nižší špičkové hodnoty výstupního napětí, přestože rozměry těchto vad jsou srovnatelné. Toto zjištění potvrzuje vliv orientace vady vůči toku vířivých proudů na detekovatelnost vady.



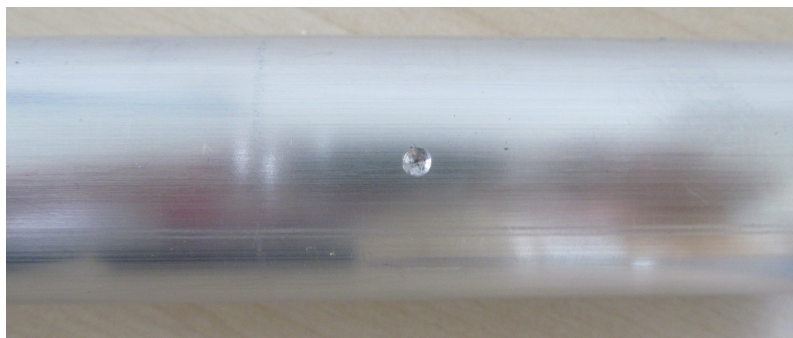
Obr. 4.19: Závislost amplitudy výstupního napětí na poloze sondy vzhledem ke středu příčné vady pro 1 kHz



Obr. 4.20: Závislost amplitudy výstupního napětí na poloze sondy vzhledem ke středu příčné vady pro 3 kHz

4.4.4 Kruhová vada č. 1

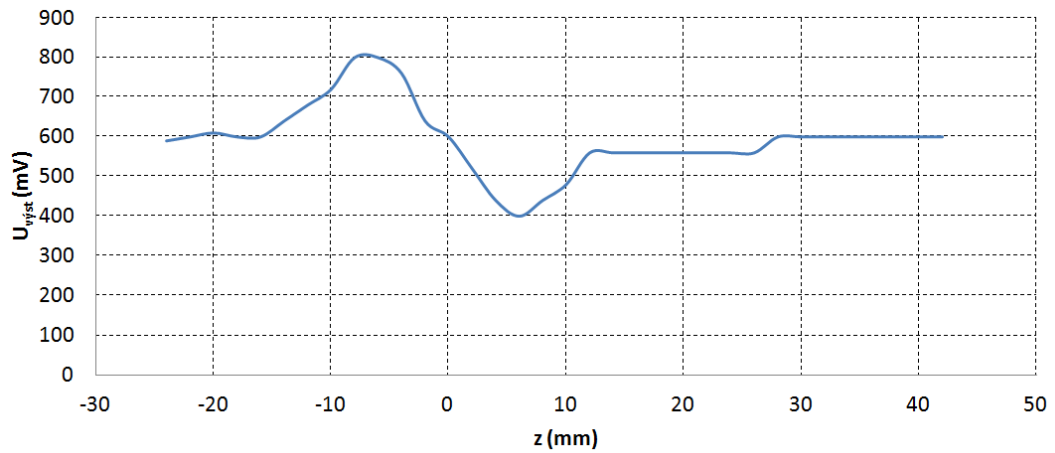
První testovanou kruhovou vadou je vada o průměru 5 mm a hloubce 1,3 mm. Fotografie této vady je na obrázku 4.21.



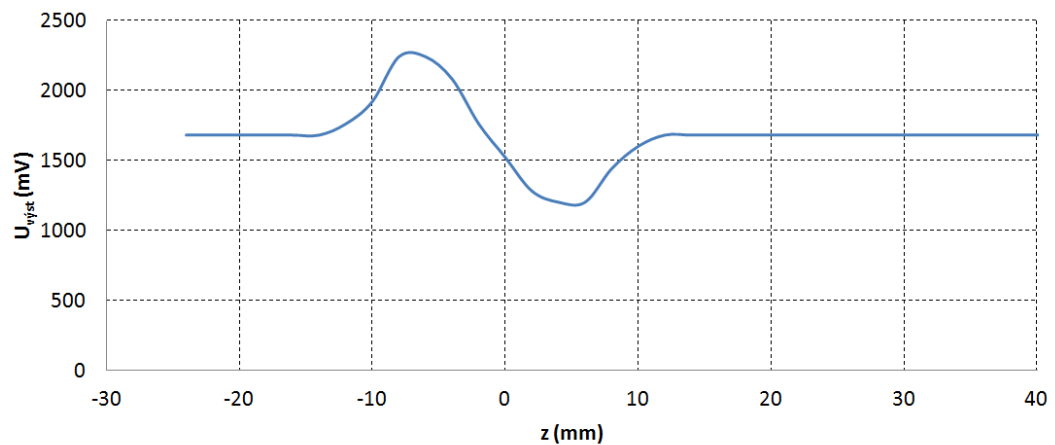
Obr. 4.21: Kruhová vada č. 1 - foto

Amplituda výstupního napětí v okolí vady pro kmitočet 1 kHz je na obrázku 4.22 a pro kmitočet 3 kHz je na obrázku 4.23.

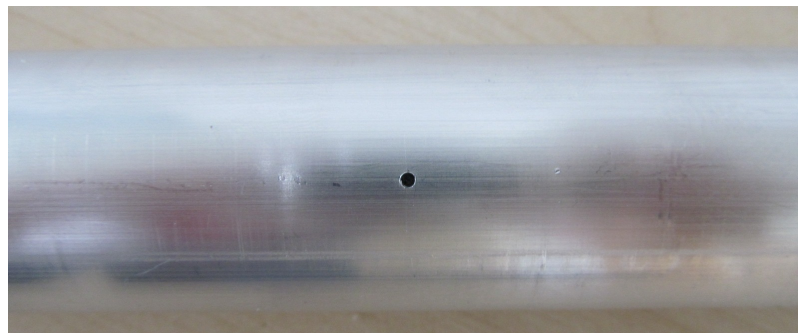
Špičkové hodnoty amplitudy výstupního napětí jsou nižší než v předchozích případech, což značí menší míru ovlivnění toku vířivých proudů touto vadou. To je způsobeno malou délkou vady v podélném směru a zároveň malou hloubkou.



Obr. 4.22: Závislost amplitudy výstupního napětí na poloze sondy vzhledem ke středu kruhové vady č. 1 pro 1 kHz



Obr. 4.23: Závislost amplitudy výstupního napětí na poloze sondy vzhledem ke středu kruhové vady č. 1 pro 3 kHz

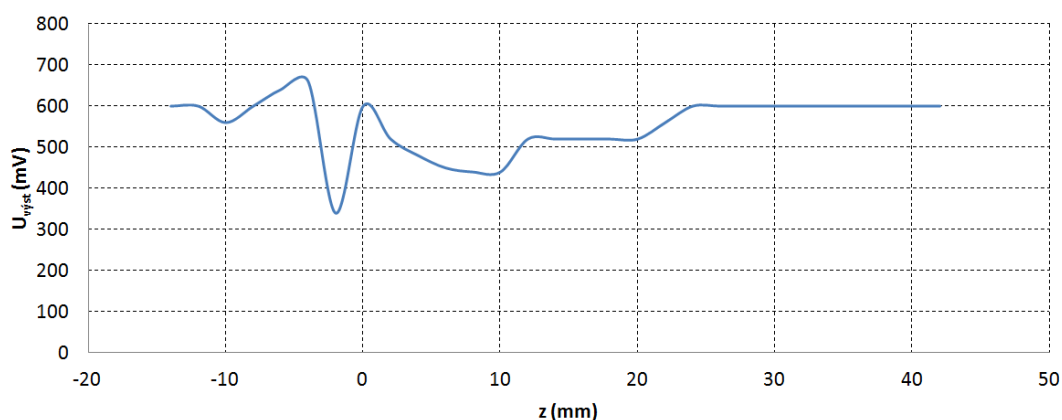


Obr. 4.24: Kruhová vada č. 2 - foto

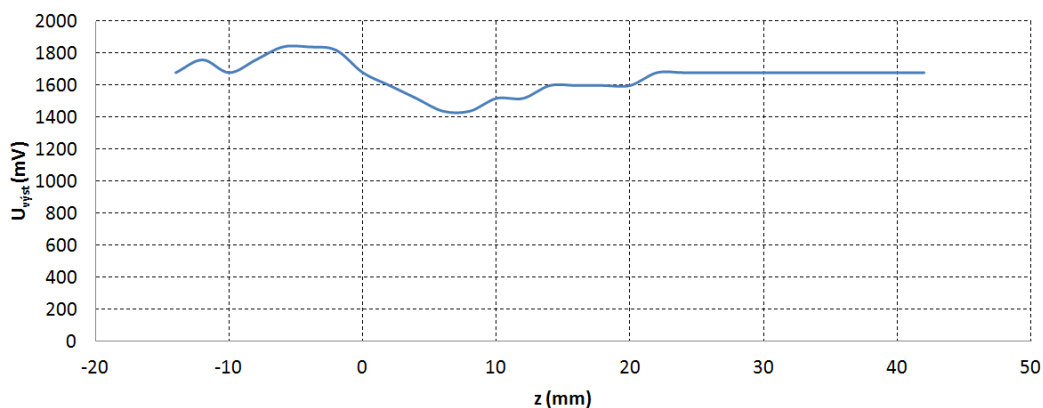
4.4.5 Kruhová vada č. 2

Druhá z testovaných kruhových vad je vada o průměru 1 mm a hloubce 2 mm. Fotografie této vady je na obrázku 4.24.

Amplituda výstupního napětí v okolí vady pro kmitočet 1 kHz je na obrázku 4.25 a pro kmitočet 3 kHz je na obrázku 4.26. Výsledky tohoto měření dokazují nízkou citlivost sondy na tento typ vady. To je způsobeno faktem, že (podobně jako příčná vada) tento typ vady ovlivňuje tok vířivých proudů pouze minimálně. Pro kmitočet 1 kHz nebylo možné získat hodnoty napětí prokazující přítomnost vady. Pro 3 kHz je průběh výstupního napětí obdobný, jako v předchozím případě, ovšem s podstatně nižší špičkovou hodnotou výstupního napětí.



Obr. 4.25: Závislost amplitudy výstupního napětí na poloze sondy vzhledem ke středu kruhové vady č. 2 pro 1 kHz



Obr. 4.26: Závislost amplitudy výstupního napětí na poloze sondy vzhledem ke středu kruhové vady č. 2 pro 3 kHz

5

Závěr

Hlavním cílem této práce bylo navržení a experimentální ověření funkce zařízení využívajícího technologii vířivých proudů pro nedestruktivní defektoskopii vodivých materiálů. V kapitole 1 byl nejprve proveden výčet technologií využívaných v oblasti nedestruktivní defektoskopie vodivých materiálů, poté byla nastíněna teorie vířivých proudů a následně byly uvedeny typy detekčních zařízení využívaných v nedestruktivní defektoskopii pomocí vířivých proudů.

Matematický model magnetického pole byl odvozen z diferenciálního tvaru 2. Maxwellovy rovnice. Výsledný model plně respektuje fyzikální podstatu vzniku vířivých proudů v kvazistacionárním poli. Postup odvození matematického modelu je uveden v kapitole 2.

Ověření odvozeného matematického modelu bylo provedeno na experimentálním zařízení, které bylo pro tyto účely navrženo a sestaveno. Přímé porovnání zařízení a numerického řešení matematického modelu proběhlo na dvou typech vad. Pro vadu se skokovou změnou je patrná velmi dobrá shoda. Chyby v tomto porovnání jsou způsobeny především rozdílem obou měřících vinutí, který vytváří nenulovou hodnotu klidového výstupního napětí. Této chyby bohužel z důvodu ručního navíjení nebylo možné zabránit. Pro vadu s pozvolným přechodem byl již rozdíl naměřených hodnot oproti numerickému řešení vyšší. Toto bylo způsobeno pravděpodobně nižší citlivostí reálného zařízení.

Po porovnání funkce zařízení s numerickým řešením bylo provedeno experimentální měření, spočívající v detekci pěti uměle vytvořených, osově nesymetrických vad. Z výsledků měření vyplývá, že navržená detekční sonda je vhodná pro detekci podélných vad, ovšem již méně vhodná pro detekci vad orientovaných rovnoběžně s tokem vířivých proudů, popř. bodových vad.

Další vlastností, která byla v rámci experimentálního měření ověřována byla změna fázového posuvu výstupního napětí sondy v závislosti na hloubce vytvořené vady.

Tento předpoklad ovšem nebyl ověřen a mohl by být předmětem budoucího zkoumání.

Dalším krokem v experimentálním ověřování zůstává vytvoření automatizovaného měření s digitalizací výstupního signálu sondy a jejího následného zpracování pomocí PC.

Literatura

- [1] I. N. Prassianakis. The non-destructive testing of ultrasound, an excellent tool for solving fracture mechanics problems. *Journal of Materials and Product Technology*, 26(1):71–88, 2006.
- [2] G. Harding and J. Kosanetzky. Scattered x-ray beam nondestructive testing. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 280:517–528, 2089.
- [3] A. Tamburrino and G. Rubinacci. Fast methods for quantitative eddy current tomography of conductive materials. *IEEE TRANSACTION ON MAGNETICS*, 42(8):2017–2028, 2006.
- [4] K. Mirkhani, Ch. Chaggares, Ch. Masterson, M. Jastrzebski, T. Dusatko, A. Sinclair, R. J. Shapoorabadi, A. Konrad, and M. Papini. Optimal design of emat transmitters. *NDT A INTERNATIONAL*, 37:181–193, 2004.
- [5] D. Mayer. *Teorie elektromagnetického pole*. Západočeská univerzita v Plzni, 2004.
- [6] T. Chady and R. Sikora. Flaw detection and characterization using the multi-frequency excitation and spectrogram ect method. *Electromagnetic Nondestructive Evaluation*, 4(4):87–94, 1983.
- [7] L. Janoušek, T. Marek, and D. Gombárska. Eddy current non-destructive evaluation of conductive materials. *COMMUNICATIONS*, 1:29–33, 2006.
- [8] V. Zilberstein, D. Schlicker, K. Walrath, V. Weiss, and N. Goldfine. Mwm eddy current sensors for monitoring of crack initiation and growth during fatigue tests and in service. *International Journal of Fatigue*, 21:477–485, 2003.
- [9] R. Grimberg, A. Savin, E. Radu, and S.M. Chifan. Eddy current sensor for non-destructive evaluation of metallic wires, bars and pipes. *Sensors and Actuators*, 81:224–226, 2000.
- [10] Ndt. <http://NDT.net>. 5.2.2013.
- [11] J. García-Martín, J. Gómez-Gil, and E. Vázquez-Sánchez. Non-destructive techniques based on eddy current testing. *SENSORS*, 11:2525–2565, 2011.
- [12] A. Zaoui, H. Menana, M. Feliachi, and G. Berthiau. Inverse problem in non-destructive testing using arrayed eddy current sensors. *SENSORS*, 10:8696–8704, 2010.

- [13] T. Chady and M. Enokizono. Crack detection and recognition using an eddy current differential probe. *IEEE TRANSACTION ON MAGNETICS*, 35(3):1849–1852, 1999.
- [14] K. Tsukada, M. Yoshioka, T. Kiwa, and Y. Hirano. A magnetic flux leakage method using a magnetoresistive sensor for evaluation. *NDT A INTERNATIONAL*, 44:101–105, 2011.
- [15] J. Hwang, J. Lee, and S. Kwon. The application of a differential-type hall sensor array to the nondestructive testing of express train wheels. *NDT A INTERNATIONAL*, 42:34–41, 2009.
- [16] Y. Hatsukade, A. Miyazaki, H. Matsuura, T. Maeda, A. Suzuki, and S. Tanaka. Study of inspection of wire breakage in aluminium transmission line using squid. *NDT A International*, 42:170–173, 2009.
- [17] Squid sensor. <http://www.csiro.au>. 5.2.2013.
- [18] P. Karban, F. Mach, P. Kůs, D. Pánek, and I. Doležel. Numerical solution of copled problem using code agros2d. *COMPUTING*, pages 1–28, 2013.

Seznam obrázků

1.1	Příložná sonda se znázorněnými vířivými proudy [11]	15
1.2	Automatická rotační defektoskopie [11]	15
1.3	Podkovová sonda [11]	16
1.4	Spirální sonda [11]	16
1.5	Pole cívek [11]	16
1.6	Cívka nekompensované absolutní sondy [11]	16
1.7	Průběh signálu nekompensované absolutní sondy [11]	16
1.8	Kompensovaná absolutní sonda [11]	17
1.9	Diferenční průchozí sonda [11]	17
1.10	Diferenční příložná sonda [11]	18
1.11	Výstupní signál diferenční sondy vířivých proudů [11]	18
1.12	SQUID senzor [17]	19
3.1	Definiční oblast modelu magnetického pole(1 - budící vinutí; 2,3 - měřící vinutí; 4 - zkoumané těleso)	23
3.2	Závislost hloubky vniku na frekvenci pro hliník při teplotě 20 °C . . .	23
3.3	Magnetické pole testovacího zařízení	24
3.4	Detail rozložení mag. pole v okolí snímacího vinutí	24
3.5	Řešená síť s vyznačeným řádem polynomu	25
3.6	Magnetické pole testovacího zařízení pro případ s vadou se skokovou změnou	25
3.7	Detail rozložení mag. pole v okolí uměle vytvořené vady se skokovou změnou	25
3.8	Magnetické pole testovacího zařízení pro případ s vadou s pozvolnou změnou	26
3.9	Detail rozložení mag. pole v okolí uměle vytvořené vady s pozvolnou změnou	26
4.1	Fotografie navržené absolutní sondy	28
4.2	Rozměry navržené absolutní sondy	28
4.3	Fotografie navržené diferenciální sondy	29
4.4	Rozměry navržené diferenciální sondy	29
4.5	Zapojení měřícího řetězce	29
4.6	Fotografie osově symetrické skokové vady	30
4.7	Rozměry osově symetrické skokové vady	30

4.8	Závislost maximální hodnoty proudové hustoty výstupního vinutí na poloze sondy vzhledem ke středu skokové trhliny	31
4.9	Fotografie osově symetrické pozvolné vady	31
4.10	Rozměry osově symetrické pozvolné vady	31
4.11	Závislost maximální hodnoty proudové hustoty výstupního vinutí na poloze sondy vzhledem ke středu pozvolné trhliny	32
4.12	Podélná vada č.1 - foto	33
4.13	Závislost amplitudy výstupního napětí na poloze sondy vzhledem ke středu podélné vady č. 1 pro 1 kHz	33
4.14	Závislost amplitudy výstupního napětí na poloze sondy vzhledem ke středu podélné vady č. 1 pro 3 kHz	34
4.15	Podélná vada č. 2 - foto	34
4.16	Závislost amplitudy výstupního napětí na poloze sondy vzhledem ke středu podélné vady č. 2 pro 1 kHz	35
4.17	Závislost amplitudy výstupního napětí na poloze sondy vzhledem ke středu podélné vady č. 2 pro 3 kHz	35
4.18	Příčná vada - foto	36
4.19	Závislost amplitudy výstupního napětí na poloze sondy vzhledem ke středu příčné vady pro 1 kHz	36
4.20	Závislost amplitudy výstupního napětí na poloze sondy vzhledem ke středu příčné vady pro 3 kHz	37
4.21	Kruhová vada č. 1 - foto	37
4.22	Závislost amplitudy výstupního napětí na poloze sondy vzhledem ke středu kruhové vady č. 1 pro 1 kHz	38
4.23	Závislost amplitudy výstupního napětí na poloze sondy vzhledem ke středu kruhové vady č. 1 pro 3 kHz	38
4.24	Kruhová vada č. 2 - foto	38
4.25	Závislost amplitudy výstupního napětí na poloze sondy vzhledem ke středu kruhové vady č. 2 pro 1 kHz	39
4.26	Závislost amplitudy výstupního napětí na poloze sondy vzhledem ke středu kruhové vady č. 2 pro 3 kHz	39

Seznam tabulek

3.1	Materiálové vlastnosti použité při řešení modelu	23
4.1	Chemické složení materiálu testovaného tělesa	27