

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA TEORETICKÉ ELEKTROTECHNIKY

**Nedestruktivní testování vodivých
materiálů s využitím vířivých proudů**

Disertační práce

PLZEŇ 2018

ING. KAREL SLOBODNÍK

Anotace

Předložená disertační práce se zabývá technologií nedestruktivního testování pomocí vířivých proudů buzených pulzním magnetickým polem. V úvodu se zaměřuje na současný stav problematiky nedestruktivní defektoskopie, využívané technologie a principy využití vířivých proudů. V další kapitole je pak nastíněno rozložení a princip měřicího zařízení a vysvětlena korelace dvou signálů a její význam pro vyhodnocení naměřených dat.

V práci je dále definován matematický model defektoskopické sondy, který je následně řešen. Je zde představena pulzně buzená sonda vířivých proudů, která byla v rámci této práce navržena na základě řešeného numerického modelu a také je popsáno její základní uspořádání. Dále je na tomto zařízení experimentálně ověřena použitelnost korelace v rámci analýzy výstupního signálu. V práci je také provedena řada experimentů na několika sadách uměle vytvořených vad o různých rozměrech a relativní pozici vůči povrchu materiálu. Účelem těchto experimentů bylo určit vliv velikosti a pozice hledané vady na vlastnosti a tvar výstupního signálu. V závěru práce je pak popsáno použití automatického vyhodnocovacího algoritmu, využívajícího soubor naměřených dat z předchozích experimentů a jejich korelace s referenčními pulzy pro vyhodnocení geometrických rozměrů a pozice uměle vytvořených povrchových a podpovrchových vad.

Závěrem jsou zhodnoceny výsledky experimentů, přínos samotné práce a nastin možností dalšího směru výzkumu.

Tato práce vznikla s podporou Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy ČR v rámci projektu RICE – Nové technologie a koncepce pro inteligentní systémy, číslo projektu LO1607.

Klíčová slova

Nedestruktivní defektoskopie, vířivé proudy, magnetické pole, pulzní signál, matematický model, sonda, COMSOL Multiphysics

Abstract

The dissertation thesis deals with the non-destructive testing technology using eddy currents pulsed by the pulse magnetic field. In the introduction it focuses on the current state of the non-destructive defectoscopy, the technology used and the principles of the use of eddy currents. The next chapter outlines the layout and principle of the measuring device and explains the correlation of two signals and its significance for evaluation of the measured data.

In the thesis is further defined the mathematical model of the defectoscopic probe, which is subsequently solved. Here is presented a pulse-driven swirl current probe, which was designed in the framework of this work based on the solved numerical model and its basic layout is also described. Furthermore, the applicability of the correlation in the analysis of the output signal is experimentally verified on this device. There is also a series of experiments on several sets of artificially created defects of different dimensions and relative position relative to the material surface. The purpose of these experiments was to determine the effect of the size and position of the defect sought on the properties and shape of the output signal. At the end of the thesis is described the use of automatic evaluation algorithm using a set of measured data from previous experiments and their correlation with reference pulses for evaluation of geometric dimensions and position of artificially created surface and subsurface defects.

In conclusion, the results of the experiments, the contribution of the work itself and the outline of the possibilities of the next direction of research are evaluated.

This dissertation was supported by the Ministry of Education, Youth and Sports of Czech republic within of project RICE – New technologies and concepts for intelligent systems, project LO1607.

Keywords

Nondestructive defectoscopy, eddy currents, magnetic field, pulsed signal, mathematical model, probe, COMSOL Multiphysics

Poděkování

Zde bych rád poděkoval mému školiteli prof. Ing Pavlu Karbanovi, Ph.D. za příkladné vedení, cenné rady, připomínky a ochotu. Dále bych rád poděkoval Ing. Jindřichu Jansovi za velice důležitou pomoc, cenné rady a nápady v počátcích této práce.

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě práci ke státní doktorské zkoušce, zpracovanou v rámci doktorského studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem svou závěrečnou práci vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této práce, byl použit dle licenčních podmínek.

V Plzni dne 17. dubna 2019

Karel Slobodník

Seznam použitých symbolů a zkratek

Elektromagnetické pole

E	$V \cdot m^{-1}$	intenzita elektrického pole
D	$C \cdot m^{-2}$	elektrická indukce
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
p_J	$W \cdot m^{-3}$	měrné Jouleovy ztráty
a	m	hloubka vniku naindukovaných proudů

Materiálové parametry

σ	$S \cdot m^{-1}$	elektrická vodivost
μ	$H \cdot m^{-1}$	permeabilita
R	Ω	rezistivita

Obecné

f	Hz	frekvence
ω	$rad \cdot s^{-1}$	úhlová frekvence
v	$m \cdot s^{-1}$	rychlost
λ	m	vlnová délka

Důležité zkratky

NDT	Non-destructive Testing
ECT	Eddy Current Testing
PECT	Pulsed Eddy Current Testing
ACFM	Alternated Current Field Measurement
SQUID	The Superconducting Quantum Interference Device
AMR	Anisotropic Magneto-Resistance
GMR	Giant Magneto-Resistance
TMR	Tunnel Magneto-Resistance
MEG	Magnetoencefalografie

Obsah

1	Úvod	1
2	Cíle práce	3
3	Současný stav problematiky	5
3.1	Nedestruktivní testování	5
3.2	Definice vady materiálu	6
3.3	Metody nedestruktivního testování	7
3.4	Princip metody vířivých proudů	21
3.4.1	Faktory ovlivňující testování vířivými proudy	23
3.5	Sondy pro ECT	25
3.5.1	Indukční sondy	25
3.5.2	Rozdělení sond z hlediska zapojení měřicích prvků	27
3.5.3	Magnetorezistivní sondy	29
3.5.4	Hallova sonda	31
3.5.5	SQUID senzory	31
3.5.6	Fluxgate senzory	32
4	Formulace problému	34
4.1	Korelace signálu	35
4.2	Pulzní buzení vířivých proudů	36
5	Matematický model a jeho numerické řešení	39
5.1	Model magnetického pole	39
5.2	Numerické řešení	41
6	Experimentální zařízení na principu vířivých proudů	44

7	Provedené experimenty	49
7.1	Ověření využití metody korelace	49
7.2	Vliv hloubky povrchové vady na odezvu systému na pulzní signál	55
7.3	Identifikace hlubokých povrchových a podpovrchových vad . . .	62
7.4	Odhad geometrických rozměrů povrchových a podpovrchových vad	69
8	Zhodnocení přínosů předložené práce	74

1

Úvod

Současná doba je charakteristická rychlým vývojem nových a 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, proto bylo vyvinuto mnoho různých přístupů. Nedestruktivní testování (NDT) hraje mezi nimi důležitou roli, protože nedochází k poškození testovaného vzorku nebo systému a ve většině případů není nutné ani jeho rozložení na jednotlivé součásti. Díky tomu se NDT používá pro průběžné kontroly zařízení a systémů, stejně tak, jako pro hodnocení výrobních procesů nebo celkově všude tam, kde by byly náklady na destruktivní zkoušení příliš vysoké .

Spolehlivé inspekční metody jsou důležité především ze dvou hlavních důvodů. Prvním z nich je bezpečnost, protože detekce strukturálních anomálií a předcházení nehodám je základním úkolem NDT. Druhý důvod je čistě ekonomický. Efektivní údržba a bezpečné prodloužení životního cyklu nákladných zařízení jsou založené na pravidelném sledování jejich stavu. Mezi tyto zařízení patří např. jaderné reaktory, přehrady, vesmírné zařízení, letadla, ponorky a lékařská zařízení. Nejdůležitějším úkolem nedestruktivního testování je detekce nejrůznějších typů strukturálních vad. Tyto vady vznikají již během výroby nebo během provozu z důvodu únavy materiálu, přetížení, nebo vlivem extrémních podmínek. K tomuto účelu byly vyvinuty nejrůznější metody využívající široké

spektrum fyzikálních polí a jevů. Metody jsou zvoleny v závislosti na konkrétní aplikaci, charakteru testovaného materiálu, stejně jako na struktuře, velikosti a umístění předpokládané vady. Metody se mezi sebou liší především rozlišovací schopností a citlivostí vůči různým typům strukturálních vad, popř. jejich omezením na některé typy materiálů. Jednou z významných a často používaných metod NDT je bezesporu testování založené na principu vířivých proudů.

2

Cíle práce

Cílem práce je definovat a numericky řešit matematický model elektromagnetického pole a problému vyhodnocení signálu pulzně buzené měřicí sondy pro nedestruktivní defektoskopii založené na bázi vířivých proudů. Dále představit experimentální měřicí zařízení, které bylo v rámci této práce vyvinuto k základním experimentům na Katedře teoretické elektrotechniky FEL ZČU a popsat jeho základní uspořádání. Experimentálně ověřit detekci uměle vytvořených defektů a srovnat výsledky simulace z řešeného numerického modelu a výsledky experimentu. Poté vyhodnotit rozlišovací schopnost této metody. Na základě získaných zkušeností je dalším cílem navržení nového typu měřicího zařízení a provedení optimalizace jejich rozměrů. Poté na základě zkušeností se současným experimentálním zařízením a zjištěných možností jeho optimalizace vytvořit návrh numerického modelu pro nové detekční zařízení. Poslední částí práce bude návrh a zhotovení automatického měřicího řetězce, včetně vyhodnocení výstupního signálu.

Souhrnně by tato práce měla splnit cíle, popsané v následujících bodech:

- Představit metodu nedestruktivního testování s využitím vířivých proudů.
- Definovat a numericky řešit matematický model elektromagnetického pole v okolí defektoskopické sondy pracující na principu vířivých proudů

- Experimentálně ověřit technologii nedestruktivní defektoskopie založené na principu vířivých proudů
- Prozkoumat možnosti pulzního buzení elektromagnetického pole a vyhodnocení výstupního rozdílového signálu
- Na základě předchozích kroků provést úpravu tvaru cívek a celkového uspořádání měřícího řetězce

3

Současný stav problematiky

V následující kapitole jsou představeny základní metody nedestruktivního testování, dále je popsán princip metody vířivých proudů a následně jsou zhodnoceny vlastnosti snímacích prvků, využívaných pro měření sekundárního magnetického pole vířivých proudů.

3.1 Nedestruktivní testování

Nedestruktivní testování je proces kontroly, nebo vyhodnocování materiálů, součástek nebo soustrojí na vady nebo změny ve struktuře bez snížení provozní spolehlivosti nebo zničení součástí zařízení či systému. Testované zařízení je poté tedy schopno bez omezení dalšího provozu.

Pro určení některých fyzikálních vlastností materiálů jako například odolnost vůči nárazu, pevnost nebo houževnatost je vhodné destruktivní testování. Nehomogenity ve vnitřní struktuře materiálu jsou efektivněji zjištělné pomocí metod nedestruktivního testování.

Moderní metody nedestruktivního testování jsou používány pro kontrolu a řízení výrobních procesů, snížení výrobních nákladů, dále při provozních zkouškách k zajištění integrity a spolehlivosti testovaných systémů. Patří proto neodmyslitelně k jakékoliv průmyslové výrobě.

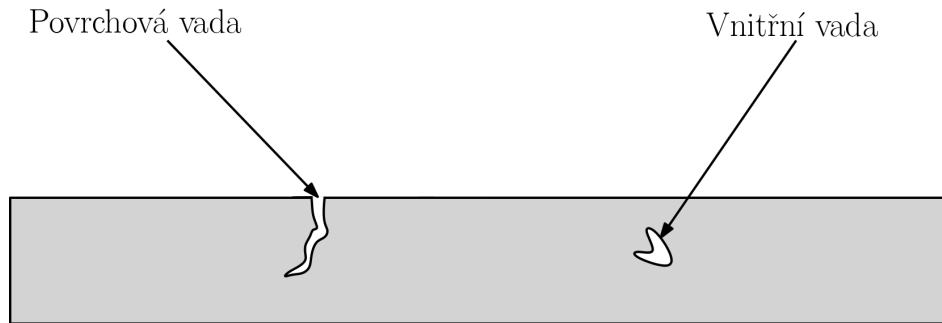
3.2 Definice vady materiálu

Pro účely NDT rozumíme vadami zejména odchylky od geometrických rozměrů, chemického složení, struktury a nehomogenity ve struktuře materiálu.

Typické druhy vad materiálu

Jednotlivé techniky nedestruktivního testování materiálů indikují materiálové nehomogenity výrobků a jejich spojení jako definované odchylky od standardů. Nejdůležitějším parametrem je vliv detekované nehomogenity na fyzikální vlastnosti materiálu resp. na odezvu tohoto materiálu na vystavení některému z fyzikálních polí. Z tohoto hlediska je potřebné věnovat pozornost zejména následujícím vlastnostem [26]:

- **Fázové složení** - geometrické uspořádání atomů v dané struktuře. Vlastnosti materiálu a jeho odezva na různé NDT techniky nezávisí jen na tom, z jakých prvků se skládá, ale také na tom, jakým způsobem jsou tyto prvky prostorově uspořádané.
- **Stupeň disperzity** - velikost oddělených stavebních jednotek agregátní struktury materiálu. Má velký vliv na jeho mechanické, fyzikální a chemické vlastnosti, a tím i na odezvu při kontrole materiálu různými technikami. Význam tohoto vlivu je přímo úměrný rostoucímu stupni disperzity materiálu. tzn. se snižující velikostí strukturálních elementů.
- **Heterogenita** - různorodost ve struktuře materiálu v závislosti na pozici. Vznik heterogenní struktury materiálu může být způsoben rozličnými faktory (povrchové úpravy materiálu, tváření, svařování, plastická deformace apod.).
- **Anizotropie** - závislost materiálových vlastností na směru působení fyzikální veličiny. Má významný vliv na mechanické, tepelné, elektromagnetické a chemické vlastnosti.



Obr. 3.1: Dělení vad z hlediska místa výskytu

Dle místa výskytu dále vady dělíme na vady povrchové a na vady vnitřní (viz. Obr. 3.1). Povrchové vady jsou v přímém kontaktu s povrchem testované součásti. Vnitřní vady jsou ukryty uvnitř materiálu. Nemají s povrchem jakýkoliv kontakt a tudíž je pro jejich hledání nutné použít odpovídající metody. Vady dále dělíme dle metod výroby zařízení (odlitky, tvářené výrobky, svary apod.). Například v případě svarů považujeme za vady ve struktuře materiálu [2]:

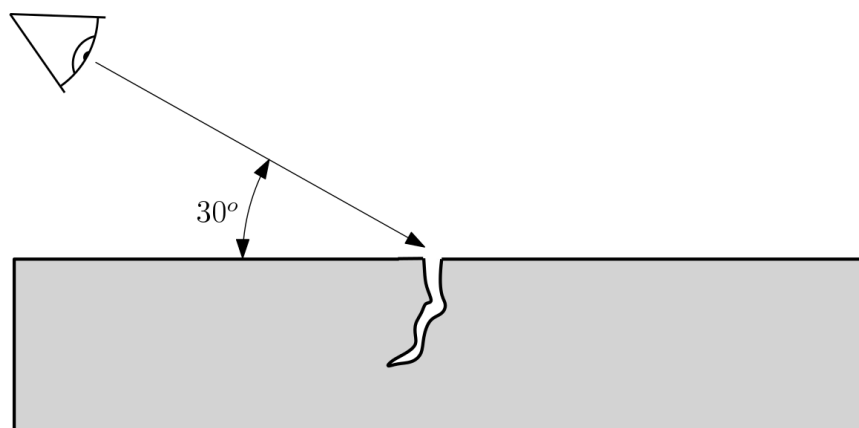
- Trhliny (podélné, příčné, radiální, kráterové...)
- Praskliny
- Studené spoje
- Dutiny
- Bubliny
- Struskovitost
- Pórovitost
- Vměsky

3.3 Metody nedestruktivního testování

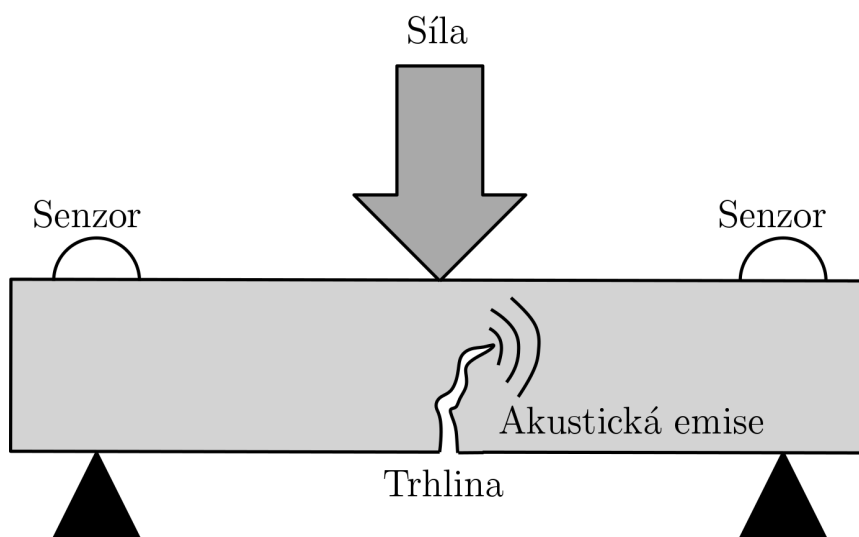
Metody nedestruktivního vyhodnocení struktury materiálu se dělí do několika základních skupin v závislosti na použitém fyzikálním principu.

Vizuální kontrola

Vizuální kontrola tvoří nejstarší a nejčastěji používanou metodu kontroly. Spočívá v důkladném vyhodnocení kvality povrchu materiálu technikem. Může se jednat o kontrolu přímou, nebo nepřímou. Při přímé kontrole pracovník zkontroluje stav zařízení zrakem (viz. Obr. 3.2). Nepřímá kontrola je založena na použití optických zařízení, např. mikroskopů, endoskopů nebo kamer. Výhodou nepřímé vizuální kontroly je možnost automatického počítačového zpracování obrazu a následné vyhodnocení na základě porovnání s referenčním vzorkem.



Obr. 3.2: Princip vizuálního testování materiálu přímou metodou



Obr. 3.3: Princip testování metodou akustických emisí

Zkouška akustických emisí

Zkouška akustických emisí je založena na lokalizované aplikaci vnější síly, např. skokového mechanického zatížení nebo rychlé změny tlaku, které jsou detekovány snímači připojenými k povrchu testované části. Při použití několika snímačů může být vyhodnocena přítomnost a pozice vnitřní či povrchové nehomogenity ve struktuře. [22]

Vibrační analýza

Základním principem vibrační analýzy je proces záznamu vibrací, specifických pro rotační zařízení a jejich analýzy pro určení stavu daného systému. Obvykle se používají tři typy snímačů: snímače polohy, snímače rychlosti a akcelerometry.

Snímače polohy využívají vířivé proudy pro zjištění vertikálního nebo horizontálního posuvu a jsou vhodné např. pro určení výchylky hřídele motoru.

Snímače rychlosti využívají princip elektromagnetické indukce v cívce, kterou prochází magnet. Vnější pouzdro snímače je připojeno ke kontrolované části. Cívka ovlivněna nestacionárním magnetickým polem generuje časově proměnný elektrický signál. Tento signál je měřen přijímačem, a následně analyzován.

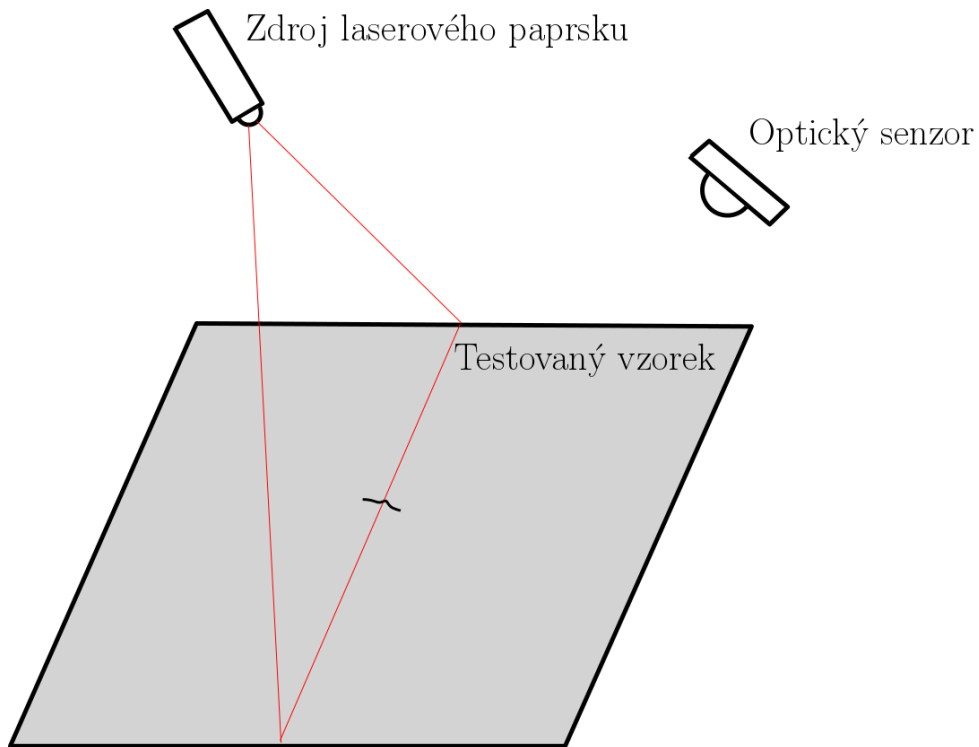
Základní akcelerometry využívají piezoelektrického jevu. Akcelerometrický senzor je umístěn na součást ve které dochází v důsledku pohybu ke vzniku mechanického vlnění. Vlivem vibrací generuje měřicí sonda nízkourovňový signál, charakteristický pro frekvenci mechanického vlnění. Akcelerometry jsou velmi účinné pro detekci vysokofrekvenčních vibrací, vytvářených vysokorychlostními turbínovými lopatkami. [11]

Laserové metody

Laserové metody využívají laserové záření k vyhodnocení celistvosti povrchu měřené součásti. Skupina laserových metod zahrnuje dvě techniky, Holografické měření a laserovou profilometrii. [19]

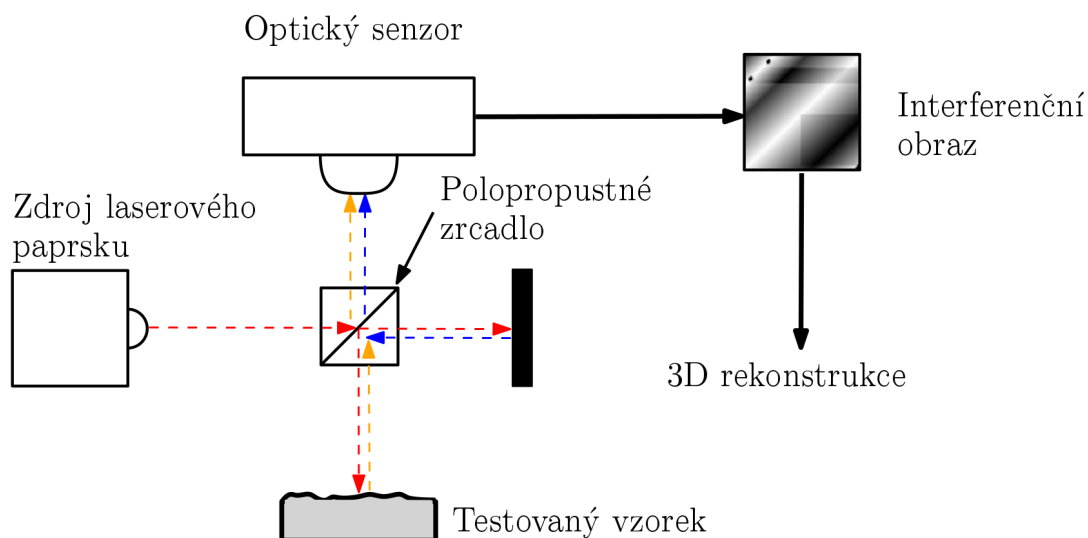
- **Holografické měření** využívá laserový paprsek k detekci změn povrchu součásti deformované mechanickým namáháním. Toto může být aplikováno ve formě mechanického napětí, teplotní nebo tlakové difference nebo vibrační energie. Povrch součásti je zkoumán pomocí vysílaného laserového paprsku, který je od tohoto povrchu odražen a snímán optickým senzorem. Výsledným obrazem je topografická mapa povrchu, na jejímž základě je možné odhalit povrchové deformace v rozsahu $0.05 \mu\text{m}$ až $0.005 \mu\text{m}$ bez

poškození testované součásti. Porovnáním výsledků testů s nepoškozeným referenčním vzorkem lze holografické testování použít k vyhledání a vyhodnocení trhlin, delaminací či pórů na povrchu testované části.



Obr. 3.4: Princip vyšetřování pomocí laserového holografického měření

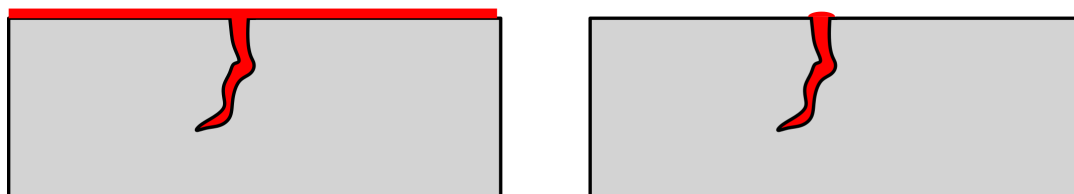
- **Laserová interferometrie** je metoda velice přesného posouzení stavu povrchu zkoumané části. Využívá laserový zdroj, jehož paprsek je polo-propustném zrcadle rozdělen do dvou směrů. Jeden dopadá na zkoumaný povrch, druhý paprsek je nasměrován na referenční zrcadlo. Po opětovném odražení jsou oba tyto paprsky složeny a je vytvořen tzv. interferenční obrazec. Na základě změny tohoto obrazce lze posoudit i velice malé změny povrchu a tak odhalit např. korozi materiálu i ve velice raném stádiu.



Obr. 3.5: Princip laserové 3D profilometrie

Kapilární metody

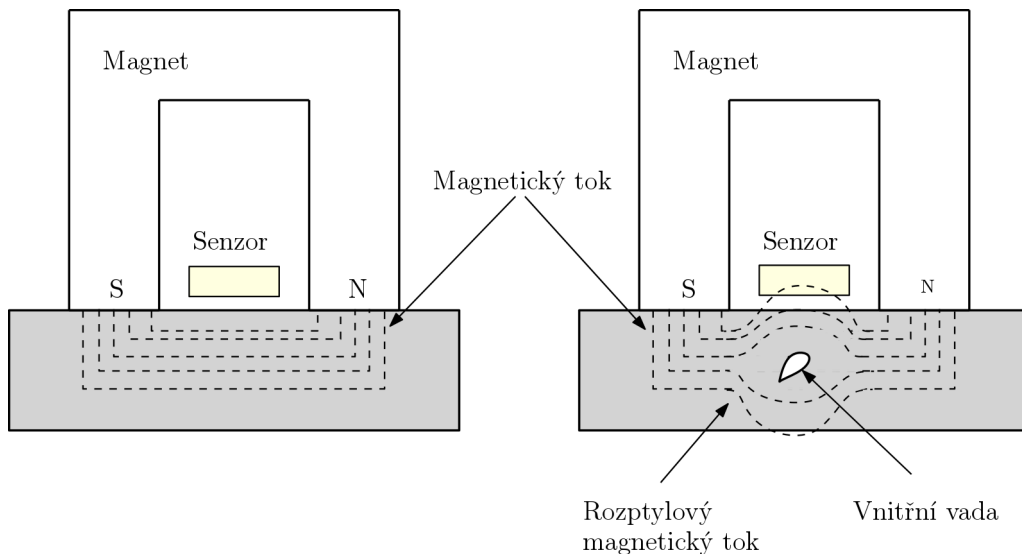
Základním principem kapilárních metod je aplikace kontrastní látky (penetrantu) o nízké viskozitě na povrch zkoumaného vzorku. V případě přítomnosti povrchové trhliny dojde vlivem kapilárního jevu k vniku kontrastní látky do této trhliny. Zbytkové množství kontrastní látky je poté odstarněno z povrchu vzorku. Po jejím odstranění je možné identifikovat povrchové vady pomocí detekce přítomnosti kontrastní látky viz. obr. 3.6. Pro některé kontrastní látky je pro zvýšení detekčních schopností této metody aplikována tzv. vývojka, která zvýší kontrast mezi kontrastní látkou a povrchem zkoumané látky. Pro fluorescentní kontrastní látky se provádí následná vizuální kontrola za přítomnosti UV záření. [27]



Obr. 3.6: Princip kapilární metody

Metoda rozptylového magnetického toku

Tato metoda využívá rozptylového magnetického toku vznikajícího v okolí nehomogenity ve feromagnetických materiálech saturovaných magnetickým polem. Toto pole je poté měřeno senzory intenzity magnetického pole. Nejčastěji je tato metoda využívána pro kontrolu trubek, potrubí a stěn nádrží. [21]



Obr. 3.7: Princip metody rozptylového magnetického toku

Zkoušení netěsností

Tato skupina metod využívá průnik částic skrz potenciální trhliny ve struktuře materiálu. Rozeznáváme tři základní druhy testování netěsností: [20]

- **Bublíková metoda** využívá vizuální detekci plynu (obvykle vzduchu) unikajícího z tlakového systému. Malé části mohou být natlakovány a ponořeny do nádrže s kapalinou a větší nádoby mohou být natlakovány a kontrolovány rozprašováním roztoku mýdla, který vytváří jemné bubliny v testované oblasti. U plochých povrchů může být mýdlový roztok aplikován na povrch a pro vytvoření podtlaku z inspekční strany lze použít vakuovou nádobu. Pokud dojde k netěsnosti, vytvoří se na povrchu bubliny, které signalizují místo úniku.
- **Metoda tlakové difference** může být aplikována pouze na uzavřených systémech. Detekce úniku se provádí zvýšením tlaku uvnitř systému a

jeho následným měřením. Snížení tlaku ve stanoveném časovém úseku znamená, že v systému dochází k úniku.

- **Halogenové diodové testování** se provádí přivedením směsi vzduchu a stopovacího plynu obsahujícího stopové množství halogenu do testovaného systému. Po uplynutí specifikovaného časového úseku se provede vyšetření povrchu pomocí detekční diodové jednotky nebo tzv. "sniffer" pro detekci úniků halogenových částic.

Magnetické práškové testování

Metoda práškového testování využívá jedno nebo více magnetických polí k nalezení povrchových nespojitostí ve feromagnetických materiálech. Když magnetické pole prochází nespojitostí, příčnou ke směru magnetického pole, dochází ke vzniku rozptylového magnetického toku. Na povrch dílu se poté nanáší feromagnetické částice, které jsou vlivem rozptylového toku přitahovány do diskontinuity. Tím dojde ke vzniku viditelné indikace na povrchu dílu. Magnetické částice mohou být naneseny ve formě suchého prášku nebo jako suspenze v kapalném roztoku. Mohou být zbarveny viditelným nebo UV fluorescentním barvivem. Zdrojem magnetického pole může být elektromagnet buzený stejnosměrným elektrickým proudem nebo permanentní magnet. [21]

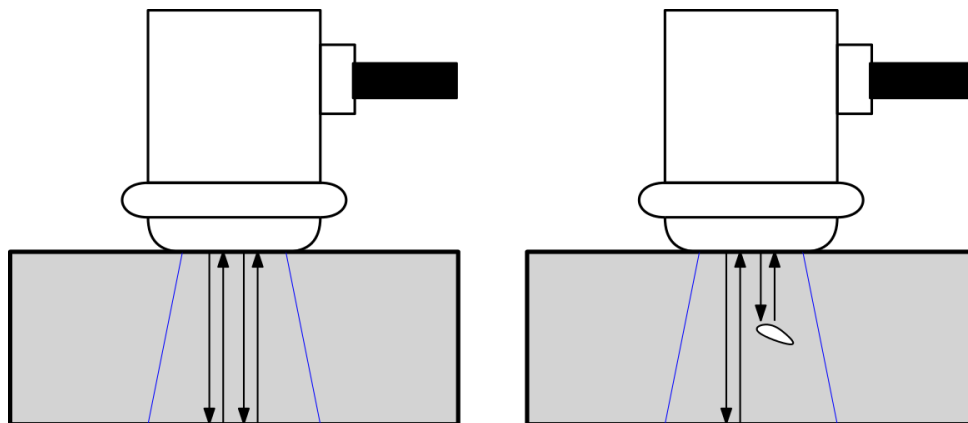
Ultrazvuková defektoskopie

Testovaná část je vystavena vlivu akustického signálu v ultrazvukovém frekvenčním pásmu. Při průchodu akustické vlny testovaným materiálem dochází k částečnému odrazu akustické vlny na případném materiálovém rozhraní. Toto materiálové rozhraní může vzniknout nejen na povrchu vzorku ale také přítomností vnitřní nehomogenity. Tato odražená vlna může být detekována a na základě znalosti rychlosti zvuku v materiálu může být určena vzdálenost materiálového rozhraní od měřicí jednotky. Nejčastější frekvence, využívané pro akustické testování, se pohybují mezi 1 MHz a 10 MHz. Tyto frekvence jsou neslyšitelné a jsou okamžitě utlumeny ve vzduchu. Nižší frekvence lépe pronikají materiálem, mají však nižší citlivost na malé nehomogenity. Naproti tomu vyšší frekvence mají nižší schopnost proniknout materiálem, ale vyšší citlivost na drobné vady. [8]

Nejčastějšími typy akustických vln, využívané v průmyslových aplikacích, je vlna podélná a vlna příčná. Podélná vlna způsobí vibrace částic paralelně ke

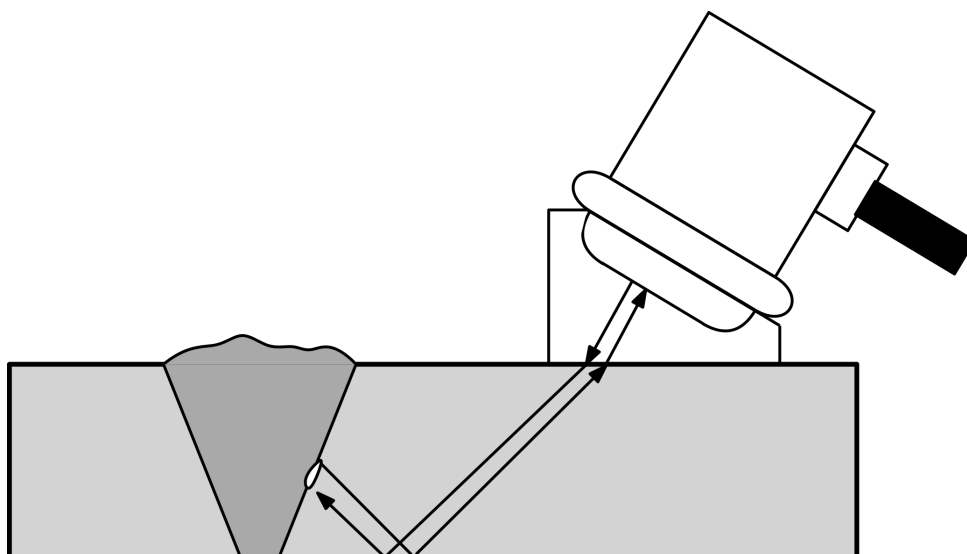
směru pohybu akustické vlny. Příčná vlna způsobí kmitání částic kolmo ke směru pohybu postupující akustické vlny. Rychlost průchodu příčné vlny je přibližně poloviční ve srovnání s vlnou podélnou. Akustická vlna je do materiálu zavedena pomocí ultrazvukového měniče, který přemění elektrické impulzy v akustické vlny a následně odražené akustické vlny zpět na elektrický signál, který je možné zpracovat a zobrazit. Rozeznáváme následující typy ultrazvukového testování:

- **Přímá metoda** využívá podélné vlny k vyhodnocení testovaného vzorku. Akustická vlna je v tomto případě vyslána kolmo k povrchu testovaného vzorku. Po průchodu materiálem dojde k jejímu odrazu na zadní straně testovaného vzorku. Pokud se ve vzorku nachází nehomogenita, dojde k částečnému odrazu na této nehomogenitě, přičemž tato odražená vlna dorazí zpět k měniči dříve, než vlna odražená na zadní straně vzorku. [15]

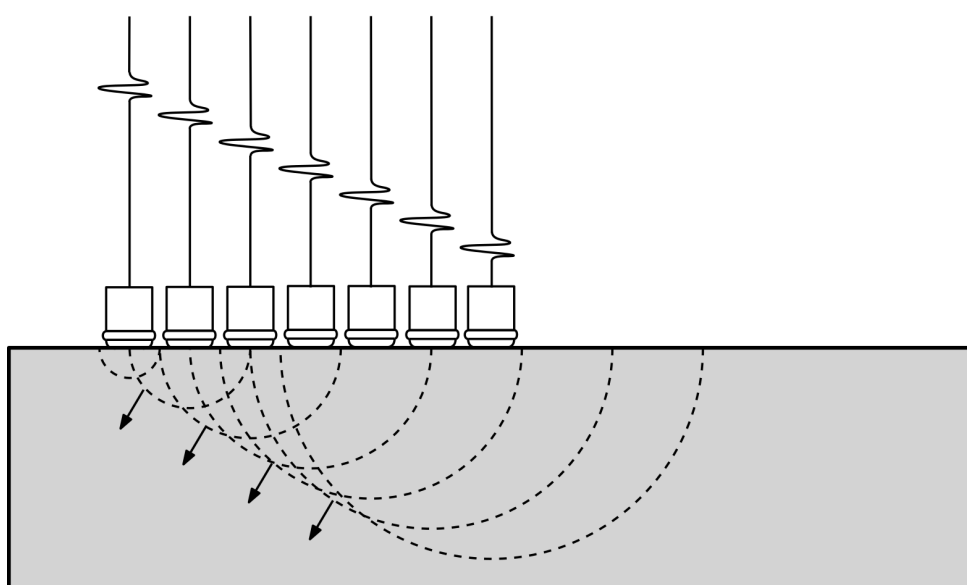


Obr. 3.8: Přímá odrazová metoda s využitím dvojitého měniče

- **Úhlová metoda** využívá stejné ultrazvukové měniče, jako přímá metoda. Tyto měniče jsou umístěné na povrchu plexisklového klínu, na kterém nastává lom. Ultrazvukový signál je tedy do materiálu vyslán pod určitým úhlem a podélná vlna se pak na rozhraní transformuje na příčnou. Nejčastěji používané úhly jsou 45° , 60° a 70° . Úhlová metoda je často využívána pro vyhodnocení kvality mechanického spoje, přičemž je testovací sonda postupně přibližována k testovanému spoji, aby došlo k jeho celkovému prošetření [8]



Obr. 3.9: Úhlová odrazová metoda s úhlem 45°

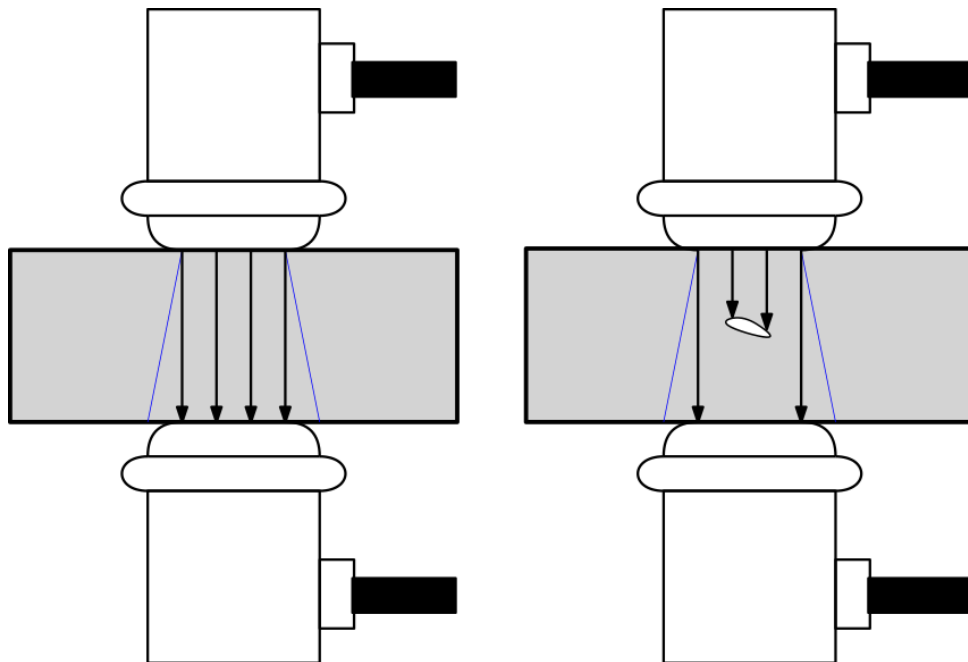


Obr. 3.10: Naklápění svazku vlnění pomocí fázového pole

- **Metoda fázového pole** využívá soustavu akustických měničů k vyšetření vnitřní struktury materiálu. Každý z těchto měničů může být aktivován individuálně. Využitím vhodně zvoleného fázového posuvu mezi aktivací jednotlivých měničů je dosaženo vyslání akustické vlny v daném směru.

Výsledná naměřená data mohou jsou poté superponována do jednoho výsledného zobrazení vnitřní struktury [15]

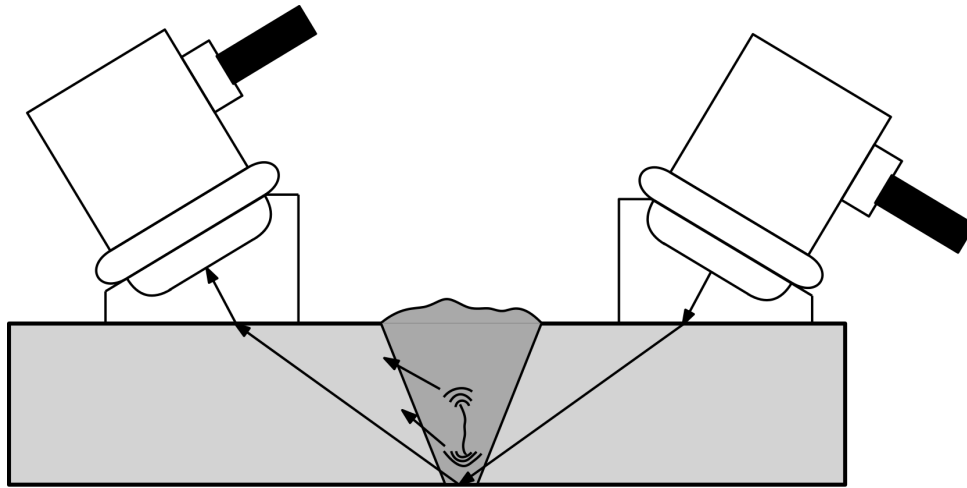
- **Průchodná metoda** využívá jevu zeslabení ultrazvuku při průchodu materiálem v místě s chybou. Při této metodě se používají dvě sondy umístěné proti sobě. Jedna sonda pouze vysílá a druhá přijímá ultrazvukový signál, který projde materiálem. Na Obr. 3.11 lze vidět uspořádání zkoušky. Tuto techniku však lze použít pouze tam, kde je přístup k oběma protilehlým povrchům. Další nevýhoda této metody spočívá v nutnosti zajištění dokonalé osové souměrnosti použitých sond [15]



Obr. 3.11: Dvojice měničů vysílač-přijímač využívaná pro průchodnou metodu

- **Difrakční metoda** využívá dvojici akustických měničů umístěných na opačných stranách svarového spoje ve specifické vzdálenosti. Na rozdíl od jiných reflektivních metod nedochází ke změně vzájemné vzdálenosti mezi měniči, ale k jejich současnému posuvu podél testovaného svaru. Vysílací měnič generuje dvě akustické vlny, první prochází po povrchu testovaného vzorku, druhá pod úhlem skrz svar a odrazem k měřicímu měniči. Pokud měřený svar obsahuje vnitřní trhlinu, část akustické vlny je rozptýlena od její hrany a vytvoří nízkourovňovou akustickou vlnu, která je zachy-

cena měřicím měničem. Při zesílení výstupních signálů jejich počítačovým zpracováním se jedná o jednu z nejcitlivějších ultrazvukových metod. [8]



Obr. 3.12: Princip rozptylu akustické vlny na trhlině při difrakční metodě

- **Testování řízenou vlnou** je založeno na řízeném vyslání jedné nebo více ultrazvukových vln po délce testované trubky. Vlivem změn ve vnitřní struktuře nebo průřezu stěny trubky dochází k částečným odrazům. K zavedení řízené vlny do potrubí se používá soustava akustických měničů. Sestavy měničů je navržena speciálně pro předepsaný průměr zkoušené trubky. Výhoda tohoto systému spočívá v možnosti kontrolovat změny v objemu stěny potrubí na dlouhé vzdálenosti bez nutnosti odstraňování povlaků nebo izolace. Testy s řízenou vlnou mají vysokou citlivost, nevýhoda spočívá v nemožnosti rozlišit mezi povrchovou a vnitřní vadou. [15]

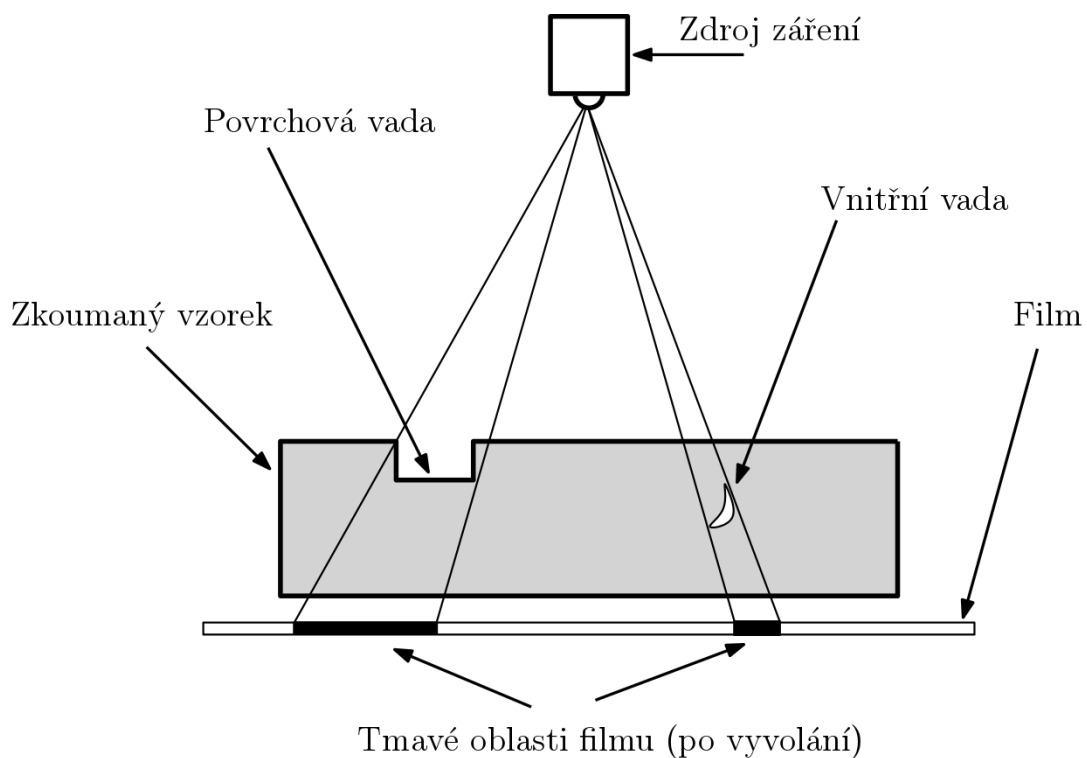
Radiografické metody

Průmyslová radiografie zahrnuje vystavení testovaného objektu pronikajícímu záření tak, aby záření procházelo kontrolovaným objektem. Záznamové médium je poté umístěno na protilehlé straně předmětu. Pro vzorky s menší tloušťkou nebo materiály o nižší hustotě (např. hliník) se běžně používá rentgenové záření. Materiály o vyšší hustotě se obecně vyšetřují s využitím gama záření.

Gama záření vzniká při rozpadu radioaktivních materiálů, přičemž dvěma nejčastěji používanými zdroji gama záření jsou Iridium-192 (Ir-192) a Cobalt-60 (Co-60). Ir-192 se obecně používá pro ocel do cca 8 cm, Co-60 je používán pro silnější materiály kvůli jeho větší penetrační schopnosti.

Záznamovým médiem může být průmyslový rentgenový film nebo jeden z několika typů digitálních detektorů záření. Oba typy záření procházející zkoušeným objektem následně ovlivní nahrávací médium. Vlivem tohoto ovlivnění vzniknou tmavší oblasti v místě, kde prochází větší množství záření. Světlé oblasti pak značí menší množství pronikajícího záření. Nehomogenita ve struktuře testovaného vzorku se tak projeví tmavým artefaktem na filmu nebo detektoru záření. Mezi radiografické metody řadíme následující technologie [12]:

- **Filmová radiografie** používá tenký průhledný plastový film, potažený jemnou vrstvou krystalů bromidu stříbrného na jedné nebo obou stranách. Na místech vystavených záření dojde k redukci AgBr a vytváření drobných deposit kovového stříbra, na které lze poté pomocí vývojky navázat další stříbrné vrstvy. Po aplikaci ustalovače, vymytí neozářených krystalů a vysušení je film dokončen a připraven pro analýzu.



Obr. 3.13: Princip filmové radiografie

Aby byla metoda dostatečně prokazatelná, musí být zkoumaná oblast na fólii vykazovat dostatečný kontrast a citlivost, aby bylo možné detekovat případné nehomogenity. Tyto položky jsou funkcí síly záření, vzdálenosti

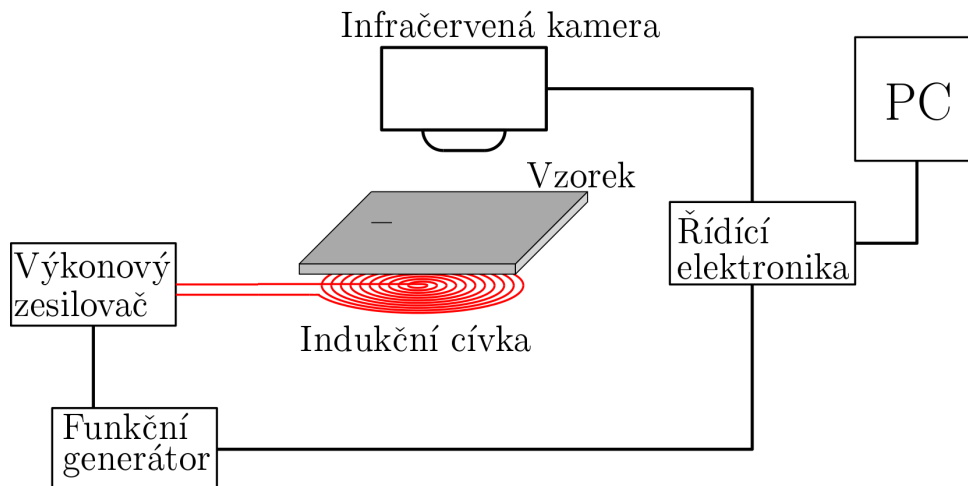
zdroje záření od filmu a tloušťky kontrolované části. Pokud některý z těchto parametrů není splněn, musí být oblast součásti podrobena další expozici.

- **Počítačová radiografie** vznikla jako přechodná technologie mezi filmovou a přímou digitální radiografií. Tato technika využívá opakovaně použitelnou, flexibilní, foto-stimulovatelnou fosforovou desku, která je vystavena podobným způsobem jako v případě tradiční filmové radiografie. Deska je poté umístěna do laserového čtecího zařízení, kde je digitalizována. Digitální obraz je poté možné analyzovat s pomocí výpočetní techniky
- **Počítačová tomografie** používá počítač k rekonstrukci obrazu celé průřezové roviny objektu na rozdíl od konvenčního rentgenu. Obraz CT je složen z několika pohledů pořízených v různých pohledech, které jsou rekonstruovány s použitím počítače. Během počítačové tomografií počítač trianguluje pomocí každého bodu v rovině, jak je vidět z mnoha různých směrů.
- **Digitální radiografie** digitalizuje záření, které prochází skrze objekt přímo do obrazu, který lze zobrazit na monitoru počítače. Tyto snímky jsou k dispozici pro prohlížení a analýzu v řádu několika sekund. Toto je hlavní výhodou této metod ve srovnání s radiografickými snímky, dále také umožňuje vyšší rozlišení, než je tomu v počítačové radiografii a většině filmových aplikací.
- **Neutronová radiografie** využívá paprsek nízkoenergetických neutronů k průniku materiálem namísto gama záření, či rentgenových paprsků využívaných v tradiční radiografii. Neutrony, generované v lineárních urychlovačích nebo betatronech, proniknou většinou kovových materiálů, jsou ale utlumeny většinou organických materiálů, včetně vody. Proto jsou tyto materiály viditelné uvnitř zkoumaného vzorku. Použití neutronové radiografie umožňuje vyhodnocení struktury vnější i vnitřních součástí systému.

Infračervené testování

Infračervené testování spočívá v mapování infračerveného záření z povrchu zkoumaného vzorku. Využívá se zde faktu, že množství tohoto záření závisí lokálně na vnitřní struktuře materiálu. Testování probíhá zvýšením teploty zkoumaného

vzorku a následným snímáním teplotního profilu povrchu pomocí zařízení pro tepelné zobrazování, tzv. infračervených kamer. Podmínkou tohoto měření je přímá viditelnost termokamery na zkoumaný vzorek a tím nutnost odstranění případných krytů a izolací. [3]



Obr. 3.14: Princip Ukázka infračerveného testovacího řetězce

Elektromagnetické testování

Metody elektromagnetického testování zahrnují testy vířivými proudy, měření střídavého proudového pole (ACFM) a metoda vzdáleného pole. Všechny tyto techniky používají indukci elektrického proudu nebo magnetického pole do vodivé části a výsledné efekty jsou zaznamenány a vyhodnoceny.

- **Metoda vířivých proudů** je založena na principu elektromagnetické indukce. Cívka buzená nestacionárním elektrickým proudem generuje ve svém okolí časově proměnné magnetické pole. Pokud je do dosahu tohoto magnetického pole vložen testovaný elektricky vodivý vzorek, dojde v něm ke vzniku indukovaného napětí. Vlivem tohoto napětí dojde v objemu testovaného vzorku k průchodu tzv. vířivých proudů. Elektromagnetické pole těchto proudů působí proti směru primárního pole budící cívky. Průchod vířivých proudů je ovlivněn vnitřní strukturou testovaného tělesa a změna hustoty vířivých proudů může být detekována a použita k charakterizaci případné nespojitosti. Správnou volbou typu budící a měřicí cívky lze tuto zkušební metodu aplikovat na ploché povrchy nebo trubkové výrobky.

Tato metoda funguje nejlépe na hladkém povrchu a má omezenou hloubku vniku, obvykle menší než 7 mm. [23]

- **Měření pole střídavého proudu (AFCM)** používá specializovanou sondu, která zavádí střídavý proud do povrchu testovaného vodivého tělesa a vytváří tak magnetické pole. V částech bez přerušení bude toto pole rovnoměrné. Pokud se v povrchu testovaného vzorku nachází vada, dojde k vychýlení průchodu proudu. Toto vychýlení způsobí změnu magnetického pole, která je detekována senzory uvnitř sondy. ACFM poskytuje lepší výsledky na drsných površích než metoda vířivých proudů a může být použita přes velké množství povrchových vrstev.

3.4 Princip metody vířivých proudů

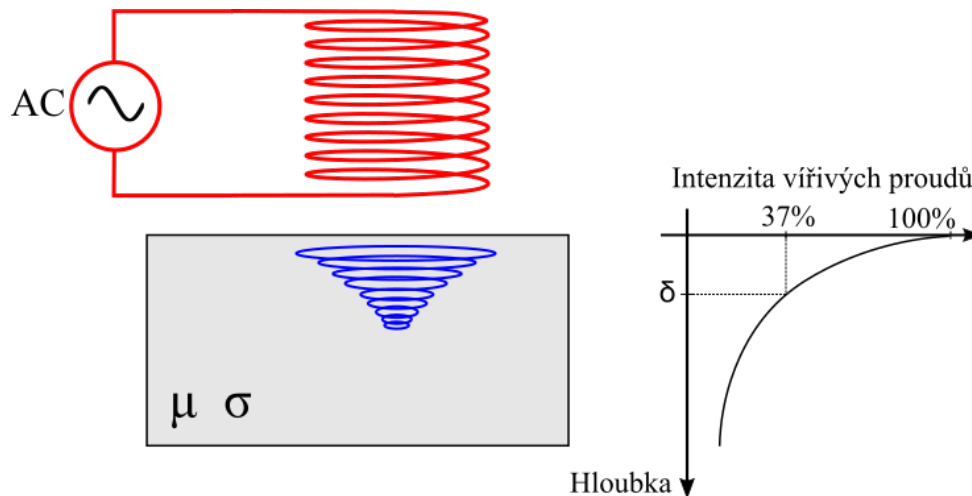
Princip nedestruktivní defektoskopie s využitím vířivých proudů spočívá v interakci mezi indukovanými vířivými proudy a strukturou zkoumaného tělesa. Intenzita vířivých proudů ve vodivém materiálu klesá exponenciálně s hloubkou materiálu (viz obr. 3.15). Hloubku, ve které dojde k poklesu intenzity vířivých proudů na 37 % povrchové hodnoty, nazýváme standardní hloubka vniku. Tato hodnota je rozhodujícím omezujícím parametrem použitím metody vířivých proudů. Hloubka vniku vířivých proudů v materiálu je definována vztahem [24]:

$$a = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot \mu \cdot f \cdot \sigma}}, \quad (3.1)$$

kde a je hloubka vniku, f představuje frekvenci budicího signálu, μ je permeabilita zkoumaného materiálu a σ je vodivost zkoumaného materiálu. Protože amplituda vířivých proudů klesá exponenciálně s hloubkou, proudová hustota v hloubce x je dána předpisem:

$$J(x) = J_0 \cdot e^{-\frac{x}{a}}, \quad (3.2)$$

kde J_0 značí povrchovou hodnotu proudové hustoty.



Obr. 3.15: Exponenciální pokles elektromagnetické vlny ve směru průchodu materiálem

Útlum elektromagnetické vlny je způsobený přeměnou energie vlnění na Jouleovo teplo prostřednictvím vířivých proudů. 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 její vzdáleností od povrchu vzorku. Vyhodnocení získaného signálu je předmětem zkoumání mnoha odborníků na tuto problematiku. Vztah mezi zjištěnou impedancí cívky a strukturou zkoumaného vzorku je velmi komplexní a musí být vyhodnocen pomocí speciálních transformačních procedur (inverzní problematika) vyvinutých na základě simulací problematiky ECT.

Metoda ECT je obecně efektivně využitelná pouze pro zkoumání povrchových a podpovrchových vad, protože amplituda vířivých proudů exponenciálně klesá s hloubkou v testovaném vzorku (viz. obr. 3.15). Povrchová vrstva, kterou je možné efektivně vyhodnotit se nachází mezi několika desetinami mm (100 kHz) a několika mm (jednotky kHz). Výběr frekvence závisí na předpokládaném tvaru, stejně jako na hloubce defektu. Na druhé straně, rozlišení metody je limitováno elektromagnetickou vlnovou délkou λ , která je srovnatelná s efektivní hloubkou vniku

$$\lambda = 2\sigma\mu \quad (3.3)$$

a proto závisí na frekvenci. [24]

Vstupní impedance a tudíž primární proud budicího obvodu je ovlivněna 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, a jejím tvaru a proporci.

Hlavní výhody ECT metod jsou [14]:

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

Na druhou stranu, ECT má několik omezení, která vychází ze samotného fyzikálního principu. Hlavním omezením je schopnost použití metody pouze pro vodivé materiály. Hloubka vniku je limitována tzv. povrchovým jevem, 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 ECT často využívána v mnoha průmyslových odvětvích. [28]

3.4.1 Faktory ovlivňující testování vířivými proudy

Řada faktorů ovlivňuje odezvu systému na průchod vířivých proudů. Výstupní signál měřicího zařízení je součtem příspěvků různých vlivů, včetně odezvy vlivem vady, celkovou geometrií měřeného vzorku, rušení vlivem pohybu nebo zdvihu. Pro dostatečné vyhodnocení struktury materiálu je nutné určit vliv jednotlivých faktorů na výstupní signál, popř. tento vliv minimalizovat. [29]

- **Vodivost materiálu** má přímý vliv na průchod vířivých proudů a tak přímo ovlivňuje výstupní signál měřicího elementu. Vodivost materiálu může být silně ovlivněna strukturou materiálu, tepelným zpracováním, teplotou kalení a mechanickým namáháním.
- **Permeabilita materiálu** vyjadřuje vliv materiálu nebo prostředí na působící magnetické pole. U feromagnetických kovů dosahuje μ_r hodnoty několik set a to má velmi významný vliv na reakci vířivých proudů. U feromagnetických materiálů je proto tok vířivých proudů koncentrován extrémně blízko k povrchu, což vede k nižší citlivosti na podpovrchové vady feromagnetických materiálů.
- **Geometrie** reálných vad v testovaných zařízeních vykazuje geometrické rysy jako zakřivení, hrany a drážky, které ovlivní reakci vířivého proudu. Zkušební techniky musí tuto skutečnost respektovat, aby byly zachovány konzistentní výsledky kontroly.
- **Lift-Off (zdvih)** je vzdálenost měřicí sondy vířivých proudů od povrchu testovaného vzorku. Se vzrůstajícím zdvihem klesá intenzita sekundárního magnetického pole, vyvolaného vířivými proudy a tím také ke snížení citlivosti měřicího zařízení. [28]
- **Frekvence** zvoleného budicího signálu ovlivňuje hloubku působení vířivých proudů. Jedná se o hlavní parametr, kterou můžeme obsluha zařízení během testování ovládat. Vyšší frekvence snižují hloubku průniku a zvyšují fázový rozdíl mezi blízkými a vzdálenými vadami, což usnadňuje detekci a rozlišení drobných defektů. Nižší frekvence zvyšují hloubku průniku signálu, což umožňuje provádět detekci vad ve větší hloubce pod povrchem, ale za cenu snížené citlivosti na drobné vady.
- **Hloubka vniku** představuje limitní hloubku, do které dává metoda vypovídající informace. Kontrola vířivých proudů poskytuje silnější výstupní signál v blízkosti chyby, když se tato chyba nachází blíže k povrchu materiálu. Amplituda výstupního signálu klesá s hloubkou průniku. Vyšší vodivost a permeabilita materiálu vede ke snížení hloubky vniku. Použitím nižší frekvence je toto možné kompenzovat.

3.5 Sondy pro ECT

Existuje mnoho typů sond pro nedestruktivní defektoskopii na principu vířivých proudů. Hlavní hledisko dělení spočívá ve využitém prvku pro měření změny magnetického pole. Mezi nejčastější patří solenoidové cívky, supravodivé kvantové interferenční zařízení (SQUID), Hallovy či magnetorezistivní senzory. Tato sekce se zabývá typy sond a obsahuje nenovější výzkumy v oblasti jejich návrhu. Obecně poskytuje sonda tím vyšší citlivost, čím silněji je ovlivněn nespojitostmi tok vířivých proudů [7].

3.5.1 Indukční sondy

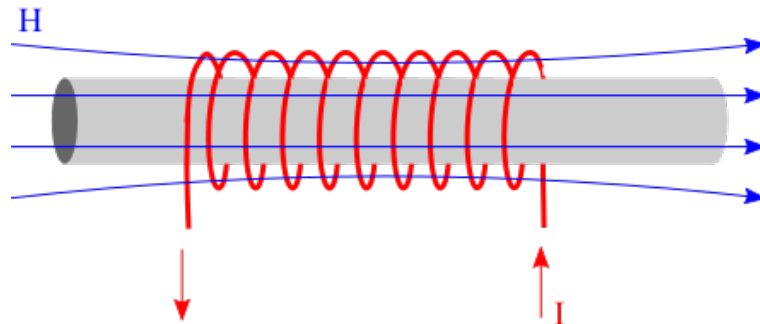
Tyto sondy jsou nejčastěji používaným typem sond pro ECD. Využívají princip elektromagnetické indukce napětí do měřicí cívky. Různé struktury cívek jsou použitelné pro detekci široké škály trhlin. Ve srovnání s ostatními ECD senzory vykazují indukční cívky následující výhody:

- Velmi dobrá linearita, malá hystereze
- vysoká flexibilita konfigurace senzoru
- snadný návrh záznamových a zesilovacích elektronických prvků

Mezi nevýhody indukčních sond můžeme řadit omezenou reprodukovatelnost a vysokou časovou náročnost výroby precizních měřicích cívek, vedoucích k jejich vyšší ceně.

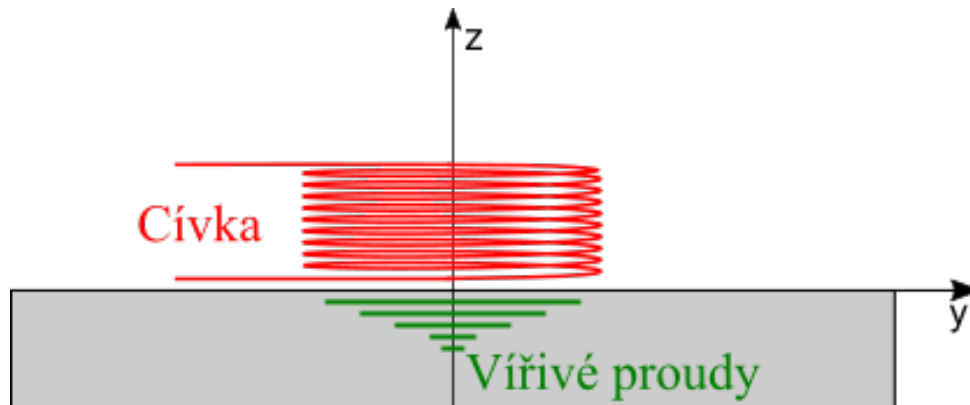
Průchozí sondy – jedná se o nejčastěji užívaný typ sond pro ECD. Obvykle se tyto sondy využívají pro vyšetřování tyčí nebo trubek. Ukázka využití tohoto typu sond je na obrázku 3.16. Průchozí sondy jsou citlivé na nespojitosti vzniklé paralelně k ose tyče či trubky. Vnitřní průchozí sondy umožňují detekci trhlin na vnitřní 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. [7]



Obr. 3.16: Princip průchozí sondy

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

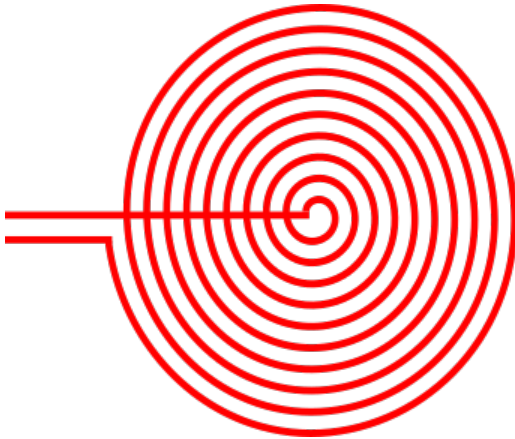


Obr. 3.17: Princip příložné sondy

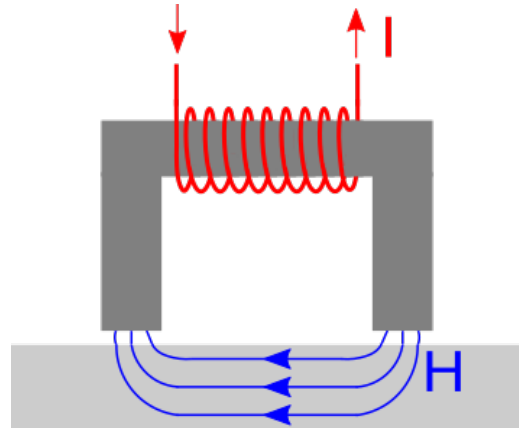
Příložné sondy lze využít pro manuální nebo automatické testování. Manuální sondy jsou navrhovány především pro testování povrchových defektů prvků, které vyžadují častý dohled a jsou využívány například pro kontrolu vnějšího pláště a dalších částí letadel.

Příložné sondy mohou být také použity pro automatickou detekci podélných trhlin v trubkách nebo tyčích, díky rotačnímu systému, při kterém sonda rotuje

vysokou rychlostí okolo testovaného vzorku, který se pohybuje podélně a skenuje jeho povrch. [7]



Obr. 3.18: Spirálová sonda



Obr. 3.19: Podkovová sonda

Další typy indukčních sond - Další typy induktivních sond, používaných v defektoskopii vířivými proudy, jsou podkovové sondy, spirálové sondy a pole cívkových sond. [1]



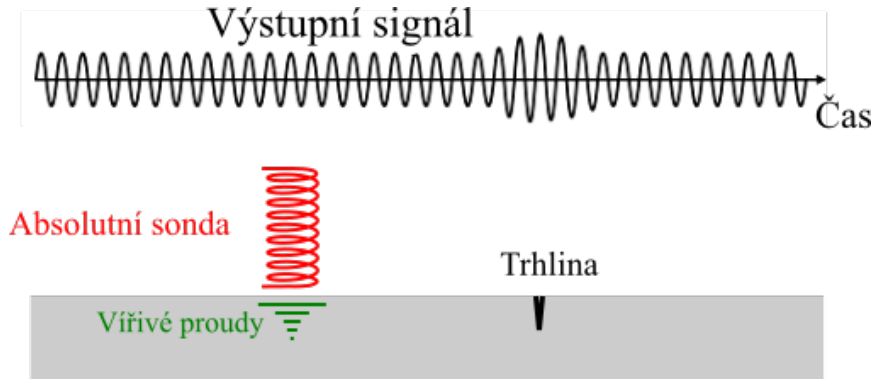
Obr. 3.20: Porovnání rastrování jednou sondou a použití pole cívkových sond

3.5.2 Rozdělení sond z hlediska zapojení měřicích prvků

Absolutní sondy

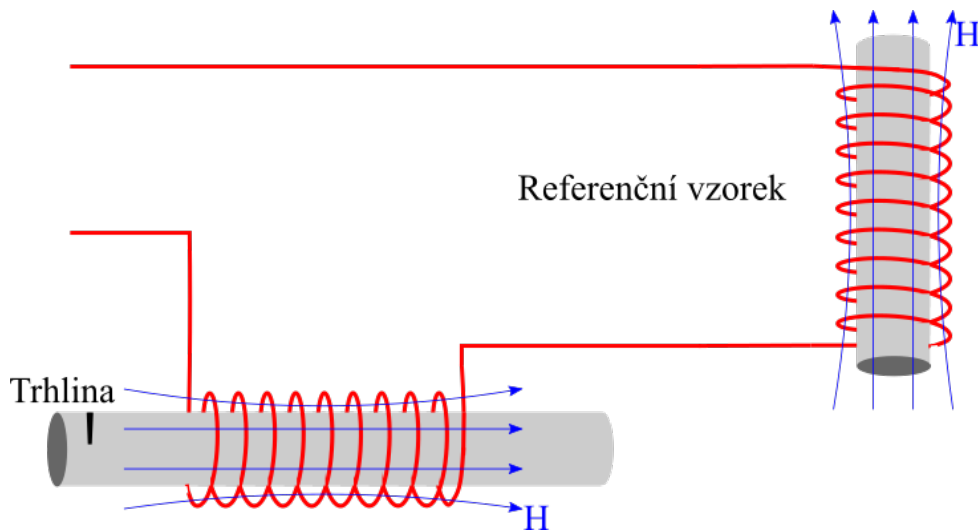
Nejjednodušší absolutní sondy se skládají z prosté cívky generující magnetické pole a zároveň sledující změny v poli vířivých proudů. Absolutní sondy poskytují absolutní napěťový signál (viz. obr. 3.21). Nevýhodou těchto sond je jejich

vysoká citlivost ke změnám teplot. Zlepšení může nastat napětíovou kompenzací pomocí přidané referenční cívky, která je vzdálená od zkoumaného vzorku (viz. obr. 3.22).



Obr. 3.21: Výstupní signál absolutní sondy v okolí vady

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



Obr. 3.22: Absolutní sonda s referenční cívkou

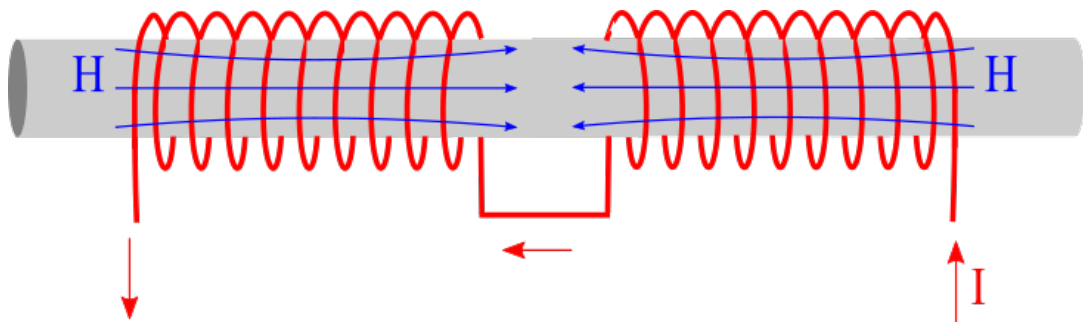
Diferenční sondy

Diferenční sondy se skládají ze dvou cívek, které porovnávají dvě přilehlé části

zkoumaného materiálu. Detekční cívky jsou navinuty vzájemně opačně, z důvodu vyrovnání indukovaného napětí vzniklého vybuzením primárního pole. Pokud je materiál v okolí dvojice měřicích cívek homogenní, je diferenční napětí sondy nulové. Trhlina v testovaném vzorku naruší rovnováhu a následně jsou detekovány napěťové pulzy, jejichž amplituda a orientace je dána polohou trhliny vůči měřicím cívkám.

Výhody diferenčního zapojení- nízké klidové výstupní napětí, umožňující využít plný dynamický rozsah zesilovače signálu. Významný je i pokles vlivu zdvihu (lift-off) a vlivu vnějších rušivých signálů.

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 [7].



Obr. 3.23: Princip diferenční sondy

3.5.3 Magnetorezistivní sondy

Magnetorezistivita (MR) je vlastnost materiálu, projevující se změnou rezistivity při vystavení tohoto materiálu působení magnetického pole. Všechny elektricky vodivé materiály vykazují velmi slabé MR vlastnosti, pro většinu materiálů nejsou ovšem dostatečně významné pro praktickou aplikaci v senzorech. Některé feromagnetické materiály vykazují silnější magnetorezistivní jev, tzv. anisotropní magnetorezistivitu (AMR). Nedávný vývoj v oblasti nanášení tenkých vrstev umožnil vznik nových multivrstvých nanostruktur, ve kterých se uplatňují výraznější magnetorezistivní jevy, například obří magnetorezistivita (GMR) a tunelová magnetorezistivita (TMR). Významným parametrem pro

hodnocení MR materiálů je tzv. magnetorezistivní poměr $MR\%$ který je určen předpisem:

$$MR\% = \frac{R_{\max} - R_{\min}}{R_{\max}}. \quad (3.4)$$

kde R_{\max} je maximální hodnota rezistivity odpovídající antiparalelní magnetické konfiguraci a R_{\min} je minimální hodnota rezistivity odpovídající paralelní magnetické konfiguraci. Magnetorezistivní poměr definuje maximální množství informace, kterou je možné ze senzoru získat. MR poměr pro AMR senzory je obvykle 1-2 %, pro GMR se tato hodnota pohybuje v rozmezí 20-50 % a TMR dosahuje hodnot 50-60 %. [25]

Anizotropní magnetorezistivita (AMR) nastává u tenkých vrstev některých feromagnetických materiálů. Je založena na principu změny elektrického odporu materiálu vlivem natáčení vektoru magnetizace, vzhledem ke směru toku proudu v dané vrstvě. Obecně je tato změna rezistivity dána předpisem:

$$R = R_0 + \Delta R \cos^2(\Theta), \quad (3.5)$$

kde R_0 je podélná rezistivita tenké vrstvy, ΔR je maximální změna rezistivity vlivem magnetického pole a Θ je úhel mezi tokem elektrického proudu a vektorem magnetizace,

Obří magnetorezistivita (GMR) je efekt, pozorovatelný ve vícevrstvých struktur feromagnetických materiálů (typicky NiFe a CoFe) oddělených tenkých vrstev nemagnetických materiálů (Cu, Au nebo Ru) u kterých je pozorována významná změna rezistivity v důsledku ovládní interakce elektronů s magnetickými dipóly v látce magnetickým polem. Tento jev se výrazně projevuje již při nízkých hodnotách magnetické indukce a GMR měřicí sondy mají vyšší citlivost, než v případě AMR. Zvláštním typem GMR sensorů je tzv. spinový ventil (Spin Valve). [9] [10]

Tunelová magnetorezistivita (TMR) je nejnovějším jevem využívaným v oblasti MR měřicích zařízení. TMR měřicí zařízení se skládá se dvou vrstev feromagnetických materiálů oddělených tenkou vrstvou izolačního materiálu, umožňujícího průchod elektronů mezi magnetickými vrstvami v důsledku kvantového tunelování. Množství elektronů je ovlivněno úhlem magnetizace jednotlivých vrstev. [18]

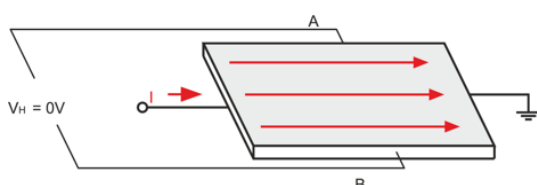
3.5.4 Hallova sonda

Princip Hallovy sondy je založen na vzniku potenciálového rozdílu (tzv Hallovo napětí) na elektrodách polovodičové destičky, kterou protéká elektrický proud a zároveň se nachází v magnetickém poli s magnetickou indukcí orientovanou ve směru znázorněným na obr. 3.24. Hallovy sondy mohou detekovat magnetické pole vyvolané vířivými proudy a jsou proto využívány v ECD. Hallovo napětí je úměrné proudu tekoucímu sondou a magnetické indukci B kolmé k sondě ve vztahu:

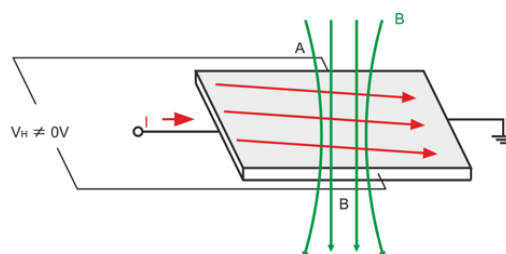
$$U_H = R_H \frac{1}{a} B, \quad (3.6)$$

a je tloušťka citlivé vrstvy a R_H je konstanta vzorku.

Hallovy sondy jsou používány především v oblasti jednotek mT a mohou být snadno miniaturizovány a integrovány uvnitř mikroelektronických obvodů. Jedním ze směrů vývoje těchto senzorů je vytvoření sensorového pole Hallových sond pro vyšetřování nerezové oceli. Další z vědeckých týmů se zaměřil na testování diferenciální Hallovy 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 využít metod průměrování a vlnového odrušení výsledného signálu. [13]



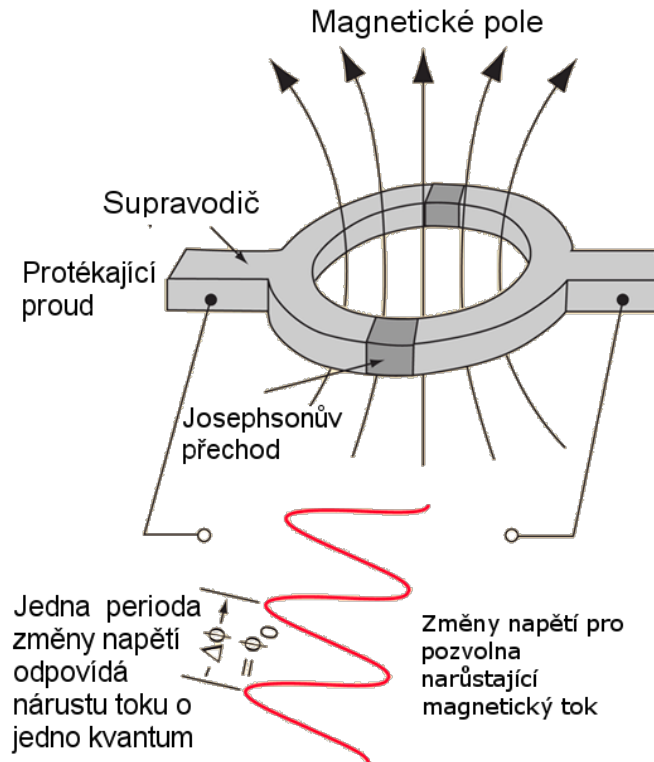
Obr. 3.24: Hallova sonda uložené mimo dosah magnetického pole



Obr. 3.25: Hallova sonda v přítomnosti magnetického pole

3.5.5 SQUID senzory

Supravodivá kvantová interferenční zařízení (SQUID) jsou velice citlivé magnetometry, založené na supravodivé smyčce obsahující dvojici Josephsonových přechodů. navržené pro měření extrémně slabých magnetických polí. Zařízení



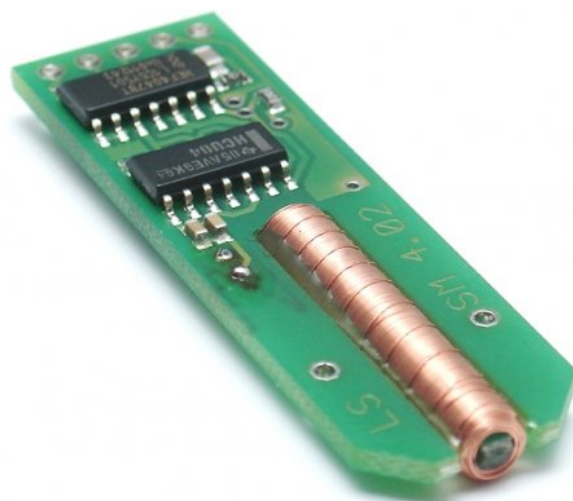
Obr. 3.26: Princip SQUID senzoru [4]

typu SQUID jsou. 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. [6]

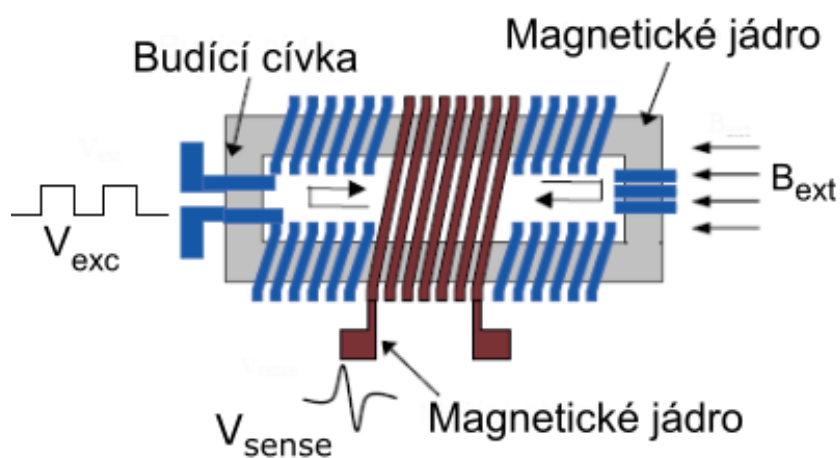
Mimo ECD aplikací se SQUID senzory využívají také při tzv. magnetoencefalografii (MEG).

3.5.6 Fluxgate senzory

Fluxgate senzory jsou v současné době nejcitlivějšími senzory magnetického pole a pracujícími při pokojové teplotě. Typicky pracují v rozsahu 0,1 nT až 100 μT s dlouhodobou stabilitou až 1 nT. Základním principem je periodické přesycování magneticky měkkého materiálu jádra pomocí budicího obvodu. Současným trendem při vývoji fluxgate senzorů je jejich miniaturizace. Ta ovšem přináší několik problémů. Se zmenšováním klesá citlivost senzoru, zvyšují se nároky na příkon budicí části. [17]



Obr. 3.27: Ukázka průmyslově používaného Fluxgate senzoru [16]



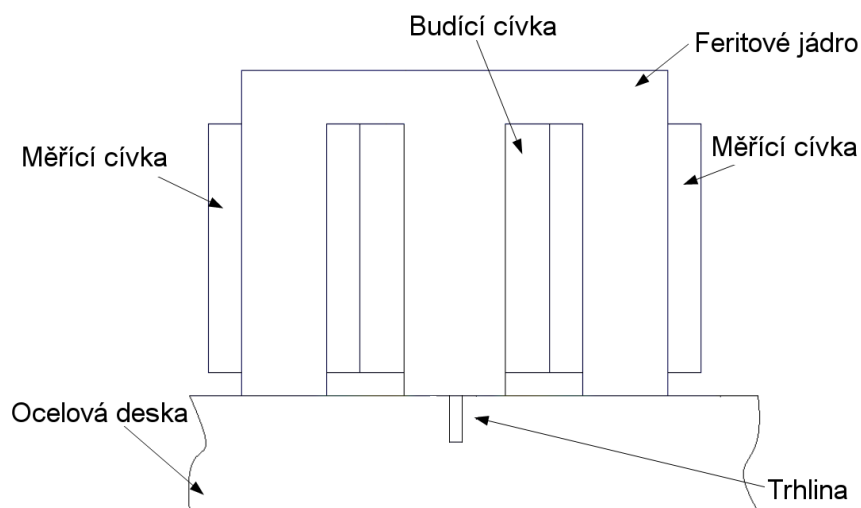
Obr. 3.28: Princip Fluxgate senzoru [16]

Tento typ senzoru, někdy také nazývaný „Magnetická indukční sonda“, je určen pro měření nízkofrekvenčních magnetických polí (maximálně jednotky kHz). Základ tvoří toroidní jádro ze slitiny s vysokou permeabilitou, na kterém je navinuta jedna nebo více cívek.

4

Formulace problému

Základem metody nedestruktivního testování pomocí vířivých proudů je vhodné navržení měřicího zařízení s ohledem na přesné měření sekundárního elektromagnetického pole, vzniklého vlivem vířivých proudů. Ze seznamu měřicích prvků magnetického pole, uvedených v předchozí kapitole, byly zvoleny induktivní senzory.



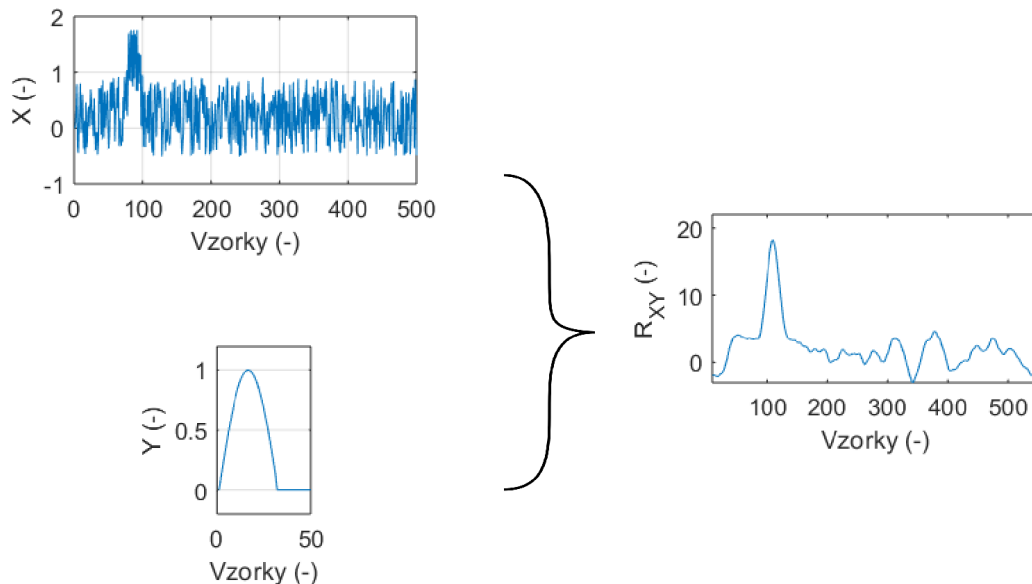
Obr. 4.1: Základní princip a uspořádání defektoskopické sondy

Princip a uspořádání defektoskopické sondy, na kterou se tato práce zaměřuje, je znázorněn na Obr. 4.1. Jedná se o měřicí zařízení využívající principu vířivých proudů. Budicí cívka, protékána budičím proudem pulzního charakteru, vytváří nestacionární magnetické pole. Pokud je v dosahu tohoto pole umístěn vzorek z elektricky vodivého materiálu, dochází v tomto materiálu vlivem elektromagnetické indukce ke vzniku vířivých proudů, jejichž odezva je snímána dvojicí diferencně zapojených měřicích cívek.

Nedílnou součástí nedestruktivního testování je také zpracování výstupního signálu. Základním krokem je snížení vlivu případného rušení, dále také extrakce základních informací o výskytu vady. Výsledná informace by měla mít nejen kvalitativní ale také kvantitativní charakter. Jednou z metod, popsaných v této práci v rámci analýzy měřeného signálu je korelace s referenčním signálem.

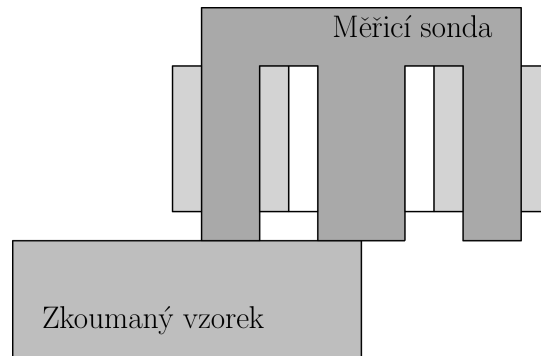
4.1 Korelace signálu

Korelace je matematická operace, jejímž výstupem je funkce, jejíž hodnoty závisí na vzájemné podobnosti dvou vstupních funkcí. Hlavní myšlenkou je nalezení průběhu podobného referenčnímu pulzu v souboru naměřených hodnot. Základní princip je zobrazen na Obr. 4.2. Korelace by poté měla vykazat špičkové hodnoty výstupní funkce (záporné či kladné) v oblastech, kde naměřené hodnoty vykazují největší podobnost s referenčním pulzem.



Obr. 4.2: Princip korelace signálu s referenčním pulzem

Referenční pulz byl pro účely této práce vytvořen jako maximální odezva měřicího zařízení. Princip jeho měření je zobrazen na Obr. 4.3, kdy je diferenční měřicí zařízení umístěno na okraj testovaného vzorku. V této pozici je přítomností materiálu ovlivněna pouze jedna z měřicích cívek.



Obr. 4.3: Princip měření referenčního pulzu

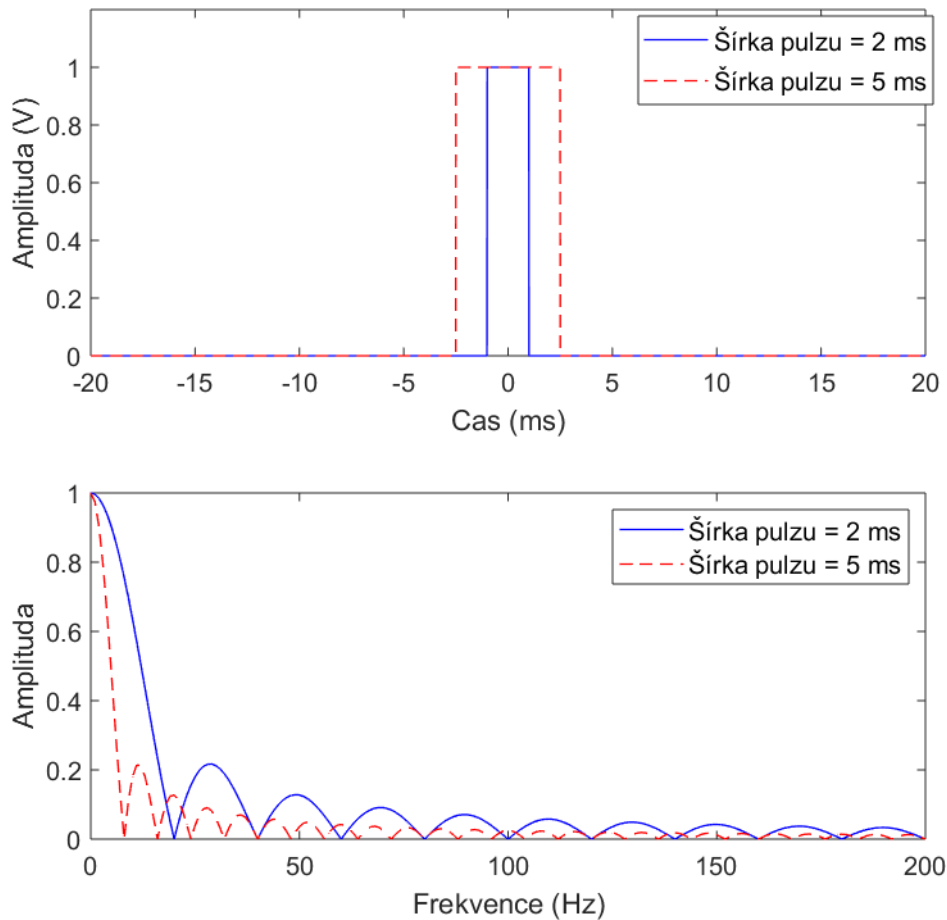
Korelace $R_{XY}(k)$ (určená funkcí `xcorr` v prostředí Matlab) je dána předpisem

$$R_{XY}(k) = \begin{cases} \sum_{i=1}^{N-k+1} X(k+i-1) \cdot Y(i), & k \geq 0, \\ R_{XY}^*(-k), & k < 0. \end{cases} \quad (4.1)$$

kde X a Y jsou vektory hodnot pro vzájemnou korelaci. V tomto případě X reprezentuje vektor naměřených dat a Y je referenční pulz. Výsledný algoritmus pro vyhodnocení výstupního signálu a odhad geometrických rozměrů vady ve struktuře materiálu je založen na korelaci řady naměřených dat se sadou referenčních signálů.

4.2 Pulzní buzení vířivých proudů

Konvenční metody ECT aplikují harmonický budicí signál o jedné frekvenci f , která definuje hloubku vniku signálu. Tato frekvence je volena podle předpokládané hloubky a velikosti typických vad. Díky tomu obtížněji detekují spolehlivě zároveň povrchové i vnitřní vady. Upravená verze je tzv. multi-frekvenční ECT, která aplikuje sadu po sobě jdoucích harmonických kmitočtů. Metoda testování pomocí pulzně buzených vířivých proudů (PECT) využívá buzení primárního magnetického pole pulzním, typicky obdélníkovým signálem. [5]



Obr. 4.4: Příklady obdélníkových budicích signálů a jejich příslušných frekvenčních spekter

Ve srovnání s multi-frekvenčním ECT, PECT může být potenciálně využito pro rychlejší vyhodnocení různých hloubek, protože PECT aplikuje široké spektrum kmitočtů obsažených v jednom budicím pulzu (viz. Obr. 4.4). Obsah harmonických kmitočtů v budicím pulzu může být určen pomocí Fourierovy transformace. Předpokládáme-li budicí signál ve tvaru

$$f(t) = \begin{cases} A, & -\frac{T}{2} \leq t \leq \frac{T}{2}, \\ 0, & |t| > \frac{T}{2}, \end{cases} \quad (4.2)$$

kde A značí amplitudu budicího pulzu a T je šířka pulzu.

Frekvenční spektrum budicího signálu je pak definováno jako

$$F(\omega) = \frac{2\sin(\frac{\omega T}{2})}{\omega}. \quad (4.3)$$

Ve většině PECT aplikací má budicí proud či napětí obdélníkový tvar. V některých případech byly použity i jiné tvary budicích pulzů, související s konkrétní aplikací. Studie porovnávající různé tvary budicích pulzů, jmenovitě obdélník, trojúhelník a kladnou polovinu sinusového signálu, poukazuje na značné výhody obdélníkového tvaru budicího signálu [14].

5

Matematický model a jeho numerické řešení

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 pulzním elektrickým proudem.

5.1 Model magnetického pole

Matematický model magnetického pole vychází z 1. Maxwellovy rovnice v diferenciálním tvaru. Zdrojem magnetického pole je pouze hustota proudu v cívce (jedná se o kvazistacionární pole). Další úprava spočívá v zanedbání posuvných proudů. Po výše uvedených úpravách lze tuto rovnici zapsat ve tvaru

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J}, \quad (5.1)$$

kde \mathbf{H} je intenzita magnetického pole a \mathbf{J} je celková proudová hustota. Využijeme-li vztahu mezi intenzitou magnetického pole \mathbf{H} a magnetickou indukcí \mathbf{B}

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (5.2)$$

kde μ je permeabilita a následně tuto rovnici vyjádříme pomocí magnetického vektorového potenciálu \mathbf{A} , obdržíme rovnici 5.3 ve tvaru

$$\operatorname{rot} \mu^{-1}(\operatorname{rot} \mathbf{A}) = \mathbf{J} \quad (5.3)$$

Abychom mohli vyjádřit proudovou hustotu \mathbf{J} na pravé straně rovnice 5.3, musíme nejprve definovat zobecněnou intenzitu elektrického pole \mathbf{E}' , která je dána součtem intenzity vnějšího magnetického pole \mathbf{E} a intenzity elektrického pole vznikající vlivem vzájemného pohybu prostředí a vnějšího magnetického pole

$$\mathbf{E}' = \mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B} = \mathbf{E} + \mathbf{v} \times \operatorname{rot} \mathbf{A}, \quad (5.4)$$

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

$$\operatorname{rot} (\mathbf{E}' - \mathbf{v} \times \operatorname{rot} \mathbf{A}) = -\operatorname{rot} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}, \quad (5.5)$$

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

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}' = \sigma(\mathbf{v} \times \operatorname{rot} \mathbf{A}) - \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \sigma \operatorname{grad} \varphi + \mathbf{J}_{\text{ext}}, \quad (5.6)$$

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

Dosazením celkové proudové hustoty vířivých proudů \mathbf{J} do rovnice (5.3) získáme již výslednou parciální diferenciální rovnici popisující rozložení magnetického vektorového potenciálu ve tvaru

$$\operatorname{rot} \frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \mathbf{A} + \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \sigma(\mathbf{v} \times \operatorname{rot} \mathbf{A}) = \mathbf{J}_{\text{ext}} - \sigma \operatorname{grad} \varphi, \quad (5.7)$$

Pro případ nestacionárního magnetického pole vyvolaného pulzním elektrickým proudem se nebude uplatňovat pohybová složka proudové hustoty vířivých proudů, protože neuvažujeme vzájemný pohyb zařízení vůči měřenému objektu. Dále můžeme uvažovat existenci pouze uzavřených proudů. Rovnici (5.7) lze tedy pro tento případ zapsat ve tvaru

$$\operatorname{rot} \frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \mathbf{A} + \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = \mathbf{J}_{\text{ext}}, \quad (5.8)$$

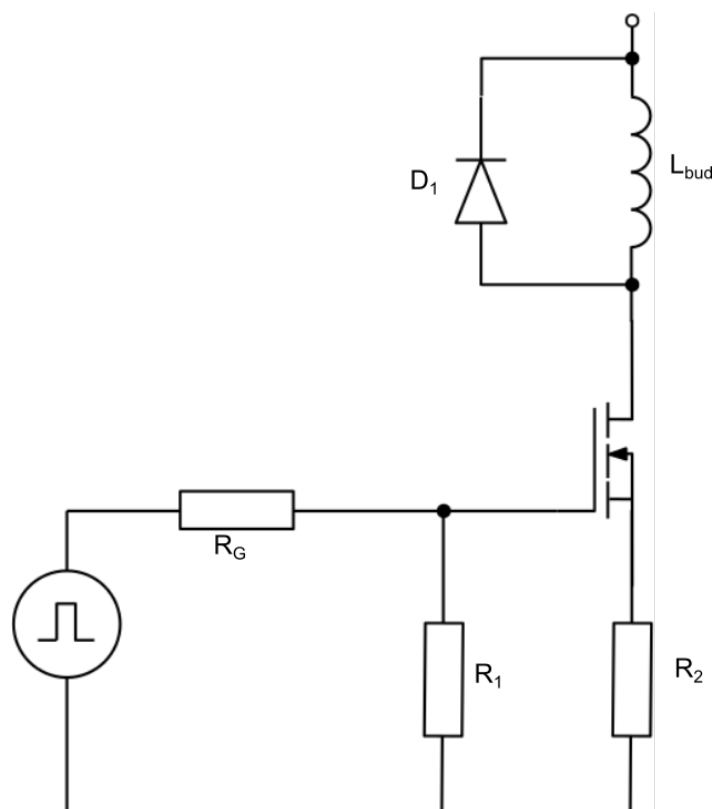
5.2 Numerické řešení

Výše uvedený matematický model (rovnice 5.8) byl numericky řešen aplikací COMSOL Multiphysics. Tato aplikace je výkonný nástroj pracující s metodou konečných prvků. Využívá se pro řešení širokého spektra fyzikálních polí (např. elektromagnetické, tepelné, akustické a další) a jejich kombinací.

Řešený numerický model byl rozdělen na dvě vzájemně provázané části, část elektrických obvodů a část elektromagnetického pole. Obě dvě části jsou obsaženy v modulu elektromagnetického pole, který je součástí programu COMSOL Multiphysics.

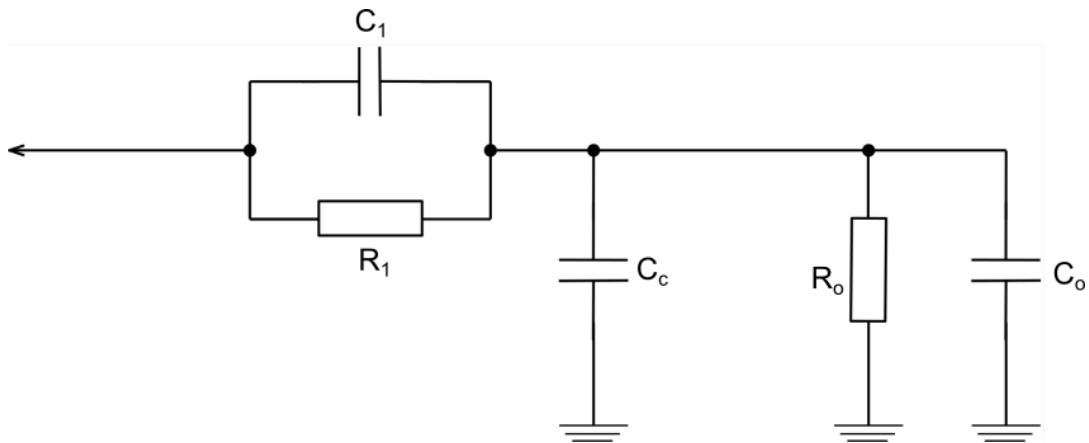
Řešení elektrických obvodů

Pomocí modulu externího elektrického obvodu byl nejprve vytvořen proudový impuls pro budící cívku. Na obr. 5.1 je zobrazen zjednodušený budící obvod, jehož základem je funkční generátor a MOSFET tranzistor jako spínač.



Obr. 5.1: Spínací obvod budící cívky

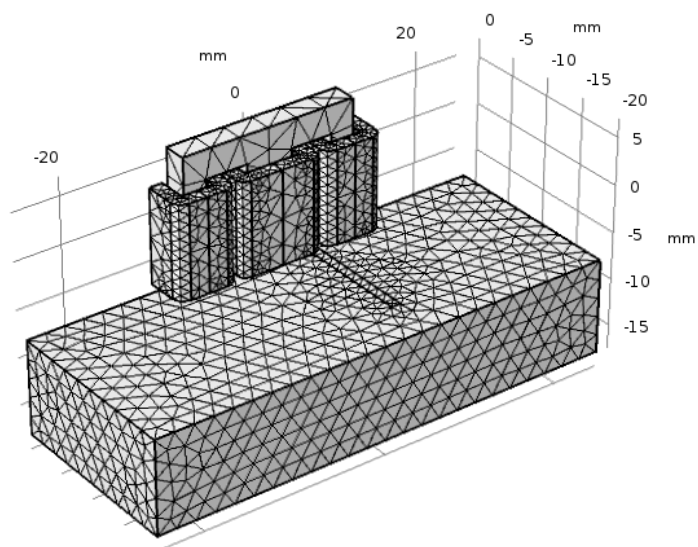
Rezistor R_G o hodnotě $R_G = 50 \Omega$ tvoří výstupní odpor funkčního generátoru. Resistor R_2 slouží k omezení špičkové hodnoty proudu cívkou a jeho hodnota je $R_2 = 10 \Omega$. Cívka L_{bud} slouží jako port pro spojení s 3D modelem budící cívky. Hodnoty napětí indukovaného v měřících cívkách byly přivedeny přes port do oblasti elektrického obvodu, kde byl zohledněn vliv měřících sond digitálního osciloskopu. Zjednodušený model osciloskopické sondy je zobrazen na Obr. 5.3. Hodnoty jednotlivých parametrů byly nastaveny ve shodě s katalogovým listem. Vstupní odpor $R_1 = 9 \text{ M}\Omega$, vstupní kapacita $C_1 = 10 \text{ pF}$ a kapacita přívodního koaxiálního kabelu $C_C = 50 \text{ pF}$. Parametry R_O a C_O tvoří vstupní impedanci osciloskopu a jejich hodnoty jsou $R_O = 1 \text{ M}\Omega$ a $C_O = 25 \text{ pF}$.



Obr. 5.2: Zjednodušené náhradní schéma osciloskopické sondy

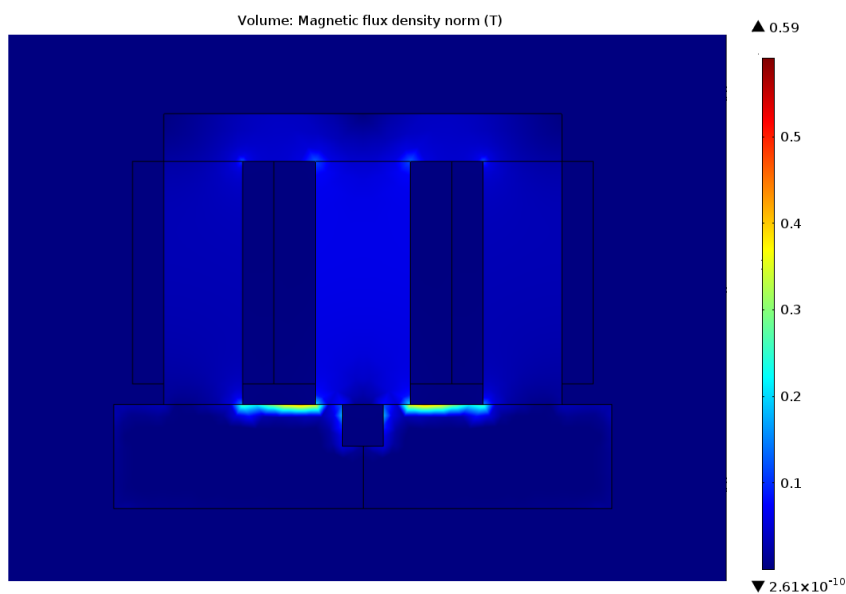
Řešení rozložení elektromagnetického pole

V druhé části bylo řešeno rozložení nestacionárního magnetického pole v okolí sondy na základě časově proměnného proudu budící cívky. Průběh proudu procházejícího cívkou L_{bud} na Obr. 5.1 byl použit pro určení průběhu externí proudové hustoty při řešení rovnice 5.8 v modulu elektromagnetického pole. Geometrie problému je zobrazena na Obr. 5.3. Z důvodu vlivu povrchového jevu bylo především ve zkoumaném vzorku nutné nastavit velice nízkou velikost jednotlivých elementů, z čehož vznikly poměrně velké nároky na výpočetní výkon. Proto bylo využito v modelu rovinné symetrie podle podélné roviny. Tímto způsobem došlo ke snížení potřebného výpočetního výkonu.



Obr. 5.3: Využití rovinné symetrie

Model byl řešen jako tranzientní úloha. Ukázka rozložení velikosti magnetické indukce B v okolí měřicí sondy pro čas $t = 5 \cdot 10^{-5}$ s je zobrazena na Obr. 5.4

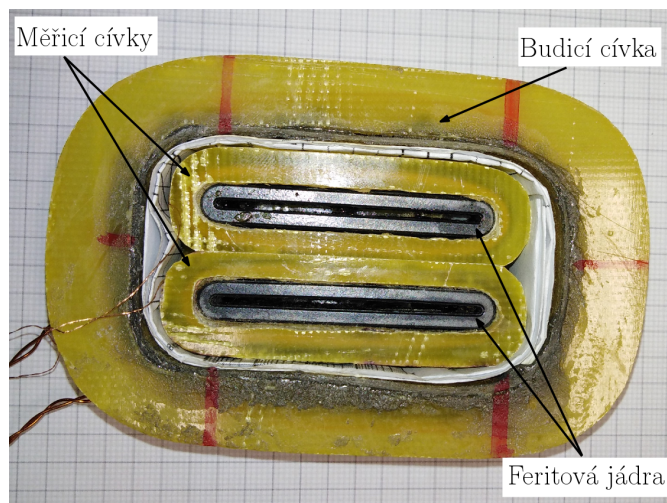


Obr. 5.4: Rozložení velikosti magnetické indukce B v okolí měřicí sondy

6

Experimentální zařízení na principu vířivých proudů

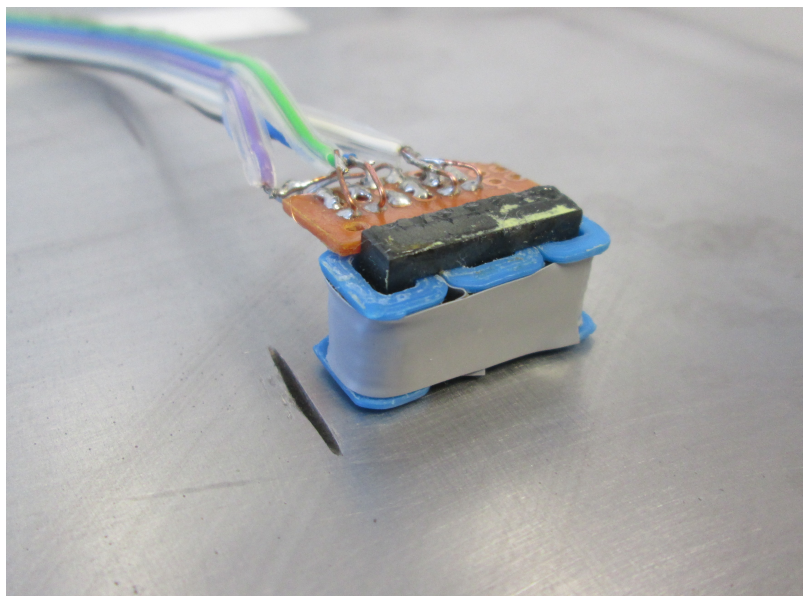
Pro účely této práce bylo na základě výše uvedeného numerického modelu vytvořeno experimentální měřící zařízení v laboratoři Katedry teoretické elektrotechniky FEL ZČU v Plzni.



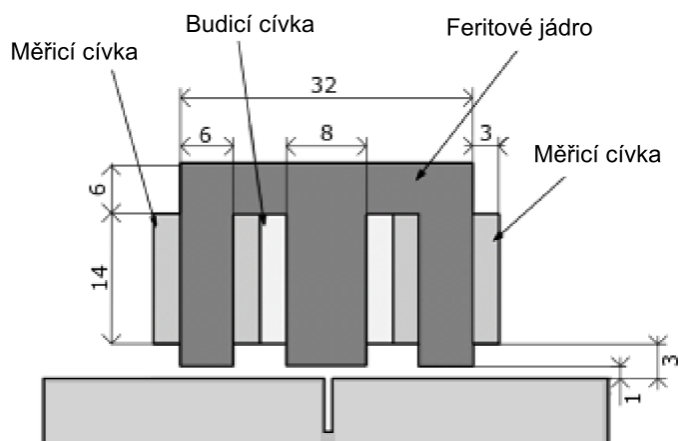
Obr. 6.1: Prototyp první sondy použitá pro ověření metody korelace

KAPITOLA 6. EXPERIMENTÁLNÍ ZAŘÍZENÍ NA PRINCIPU VÍŘIVÝCH PROUDŮ

Základní princip a funkce jednotlivých částí byl vysvětlen výše. Jedná se o testovací zařízení využívající vířivé proudy generované pulzně buzenou budicí cívkou. Odezva systému je následně měřena dvojicí diferenčních cívek. První verze měřícího zařízení je zobrazena na obr. 6.1. Vlastní indukčnost budicího vinutí je $L_1 = 4.24$ mH a vlastní indukčnost měřících vinutí je $L_2 = 82.5$ mH a $L_3 = 92.5$ mH.



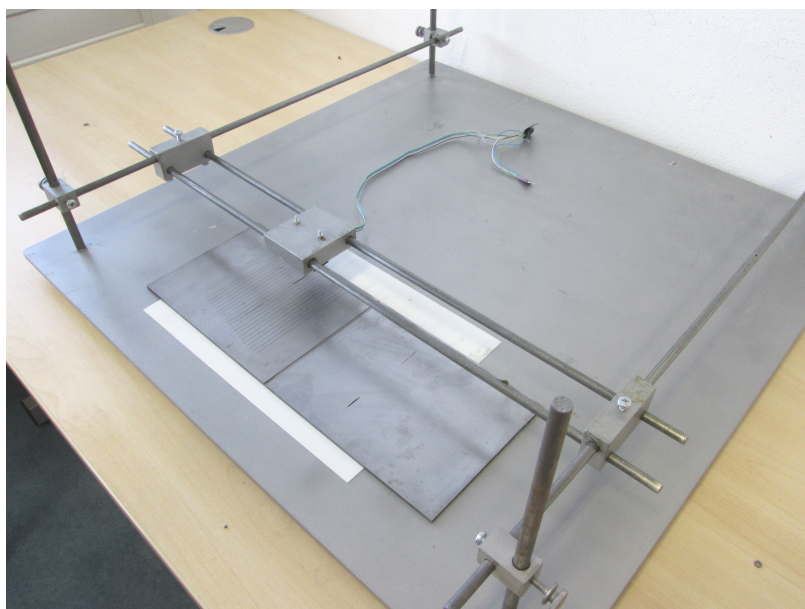
Obr. 6.2: Měřící sonda v blízkosti uměle vytvořené vady



Obr. 6.3: Rozměry měřící sondy včetně zdvihu

KAPITOLA 6. EXPERIMENTÁLNÍ ZAŘÍZENÍ NA PRINCIPU VÍŘIVÝCH PROUDŮ

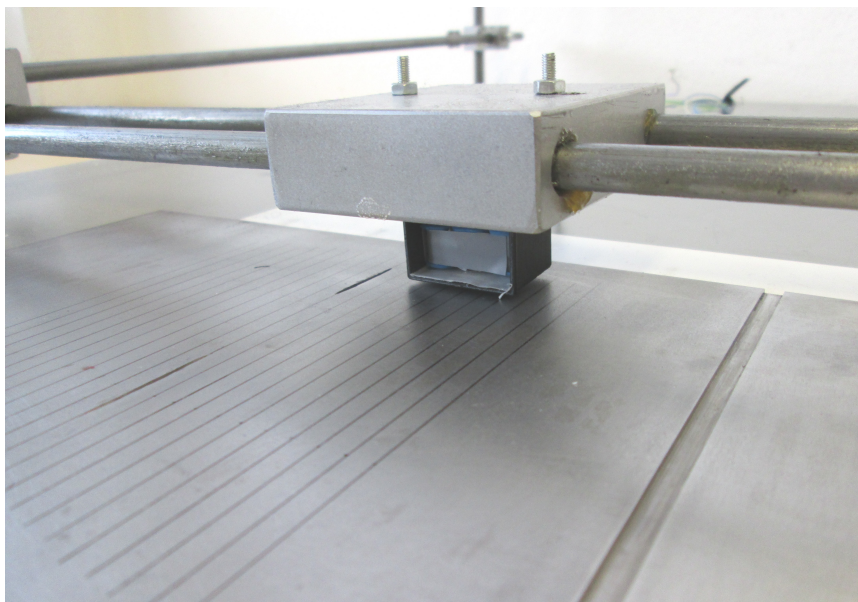
Toto zařízení bylo využito pro ověření metody korelace s referenčním pulzem při zpracování výstupního signálu. Nevýhodou tohoto zařízení je jeho velikost (šířka 95 mm a délka 65 mm) a poměrně nízká citlivost na drobné povrchové vady. Proto byla navržena a vytvořena druhá detekční sonda, zobrazená na obr. 6.2 Geometrické rozložení této sondy bylo navrženo na základě numerického řešení s ohledem na rozlišovací schopnost drobných vad a pulzní charakter buzení. Celková šířka sondy je 38 mm a celková výška je 22 mm. Konstrukční prvky cívek byly vytvořeny 3D tiskem, což zjednodušilo jejich navíjení. Vlastní indukčnost budícího vinutí je $L_1 = 2.35$ mH a vlastní indukčnost měřících vinutí je $L_2 = 4.5$ mH a $L_3 = 4.6$ mH.



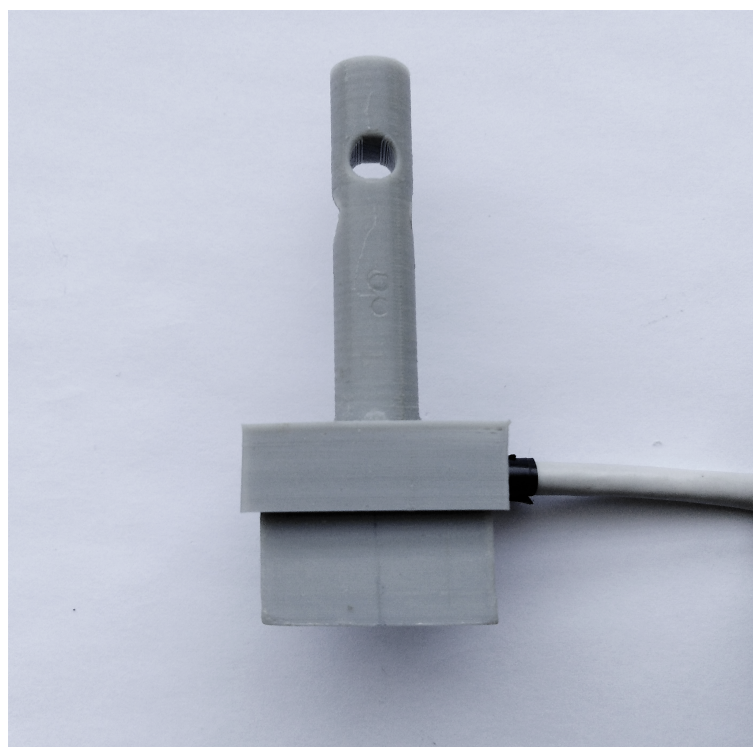
Obr. 6.4: Měřící stanoviště nedestruktivní defektoskopie

Základní podoba experimentálního stanoviště je zobrazena na obrázku 6.1. Velká ocelová deska slouží k homogenizaci prostředí v okolí vady a zamezuje vlivu kovových prvků pod měřícím stanovištěm (např. kovové části stolu) které by mohli negativně ovlivnit případné měření. Toto měřící stanoviště dále umožňuje pohyb měřící sondy ve dvou osách, přičemž osa x byla využita jakožto hlavní směr pohybu pro potřeby automatické evaluace.

Na obrázku 6.5 je ukázka hlavního pohyblivého elementu měřícího stanoviště se zavěšením detekční sondy, které bylo navrženo a vytvořeno pomocí 3D tisku. Toto zavěšení zajišťuje konstantní vzdálenost mezi měřící sondou a testovaným objektem po celou dobu měření.



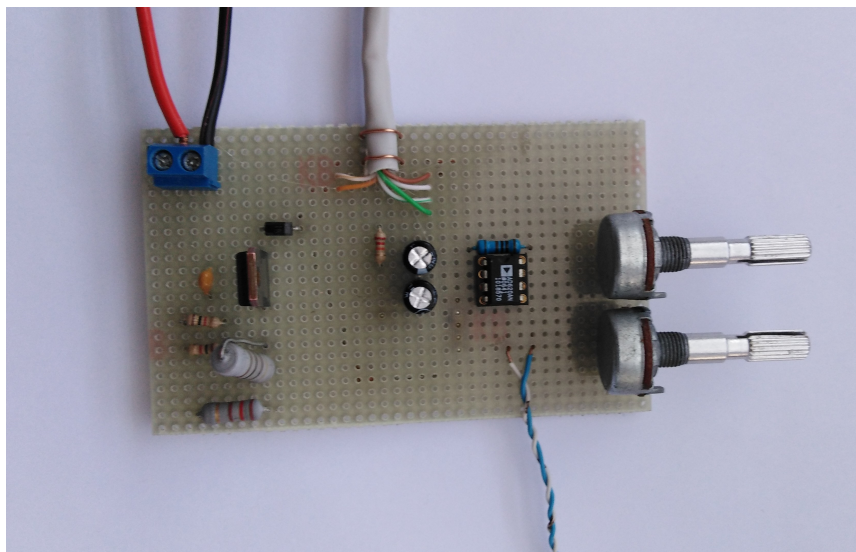
Obr. 6.5: Pohyblivé zavěšení měřící sondy



Obr. 6.6: Konečná podoba měřící sondy včetně zapouzdření a uchycení pro automatické měření

KAPITOLA 6. EXPERIMENTÁLNÍ ZAŘÍZENÍ NA PRINCIPU VÍŘIVÝCH PROUDŮ

V průběhu práce byla zjištěna nevhodnost původního stanoviště pro automatická plošná měření ve dvou osách. Z tohoto důvodu byla finální automatická měření provedena v laboratoři Katedry teoretické elektrotechniky a bioinženýrství na univerzitě v Žilině. Na obr. 6.6 je zobrazena výsledná podoba měřicí sondy pro automatické měření včetně možnosti nastavení sklonu sondy.



Obr. 6.7: Budící a měřící obvody sondy

Na obr. 6.7 je zobrazen budící a měřící obvod, včetně zesílení rozdílového signálu z měřících cívek, využitý pro základní zpracování a zesílení naměřených dat. Potenciometry na pravé straně desky slouží k úpravě napěťových úrovní jednotlivých cívek tak, aby v klidovém stavu bylo výsledné rozdílové napětí co nejbližší nulové hodnotě. Tímto se částečně kompenzují drobné odchylky ve vlastnostech obou měřících cívek.

7

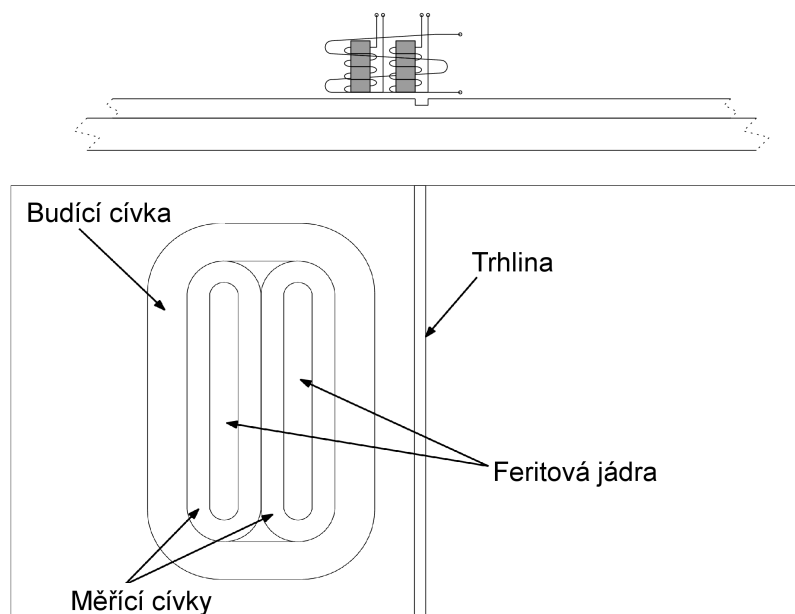
Provedené experimenty

V rámci této dizertační práce bylo provedeno několik experimentů. Úkolem těchto experimentů bylo ověření metody korelace při vyhodnocení výstupního signálu měřicí sondy, vyhodnocení omezení pulzního buzení vířivých proudů při detekci hlubokých podpovrchových vad a také ověření vytvořeného algoritmu pro odhad rozměrů hledaných vad.

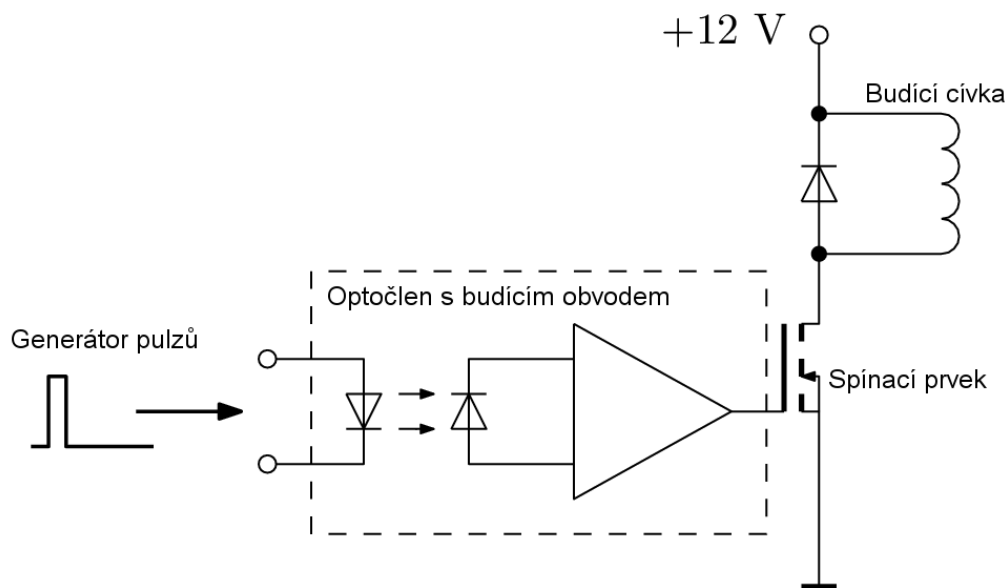
7.1 Ověření využití metody korelace

Úkolem tohoto experimentu bylo ověření možnosti využití korelace naměřených dat s referenčním pulzem jako základu pro vyhodnocení výstupního signálu PECT sondy. Metoda byla ověřována v rozložení viz. obr. 7.1. Měřicí zařízení se skládá z jedné budicí cívky a dvojice měřicích cívek a je zobrazeno na obr. 6.1. Veškeré materiálové parametry vzorku byly známy.

Hloubka uměle vytvořené obdélníkové vady byla $d = 2$ mm a její hloubka byla $h = 1$ mm. Vzorek byl umístěn na široké ocelové desce, aby bylo zabráněno účinkům vlivů okolního prostředí (např. konstrukčních prvků) umístěných pod měřicím stanovištěm.



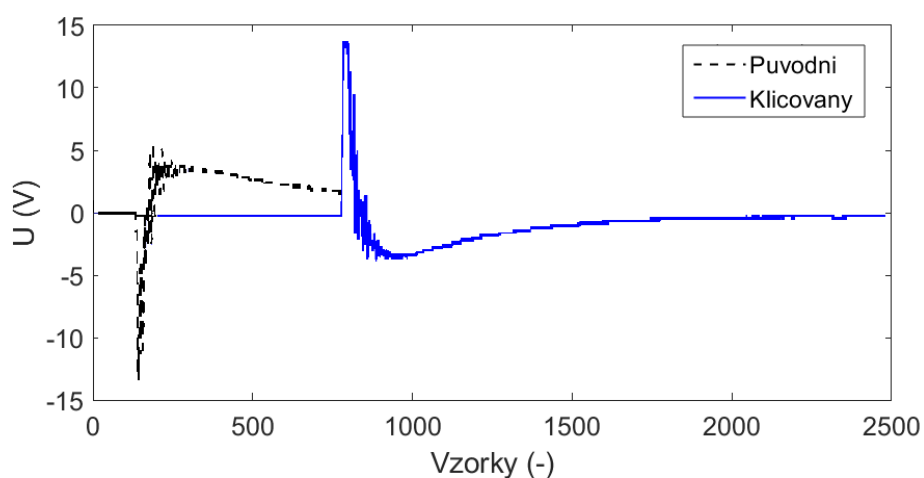
Obr. 7.1: Princip měření: nahoře – nárys, dole – půdorys



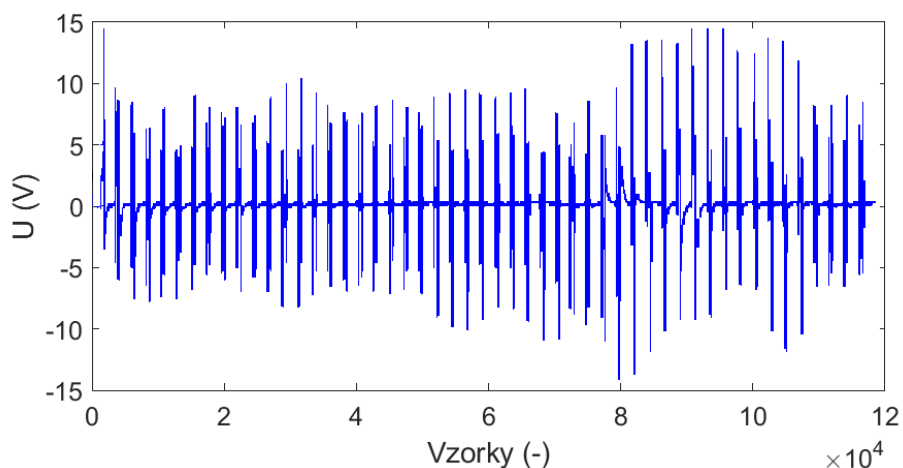
Obr. 7.2: Schéma elektrického budícího obvodu

Měřicí zařízení bylo umístěno ve výšce 1,4 mm nad povrchem vzorku, paralelně k umělé vadě (viz. Obr. 7.1, spodní část) a posouván v diskretních krocích $h = 5$ mm podél měřeného vzorku. V každé pozici byl změřen a zaznamenán

časově proměnný výstupní signál z obou měřicích cívek. Tyto hodnoty byly zprůměrovány přes 15 časových period kvůli eliminaci náhodného šumu. Pozice sondy na okraji vzorku byla použita jako referenční vada. Výstupní signál v tomto místě byl použit pro hledání podobností s měřenými hodnotami. Experimentální systém se skládá z reflexní sondy buzené MOSFET výkonovým spínačem řízeným laboratorním generátorem pulzního signálu (viz. Obr. 7.2). Šířka budicího obdélníkového pulzu byla 1 ms. Výstupní napětí bylo měřeno a zaznamenáno pomocí digitálního osciloskopu.



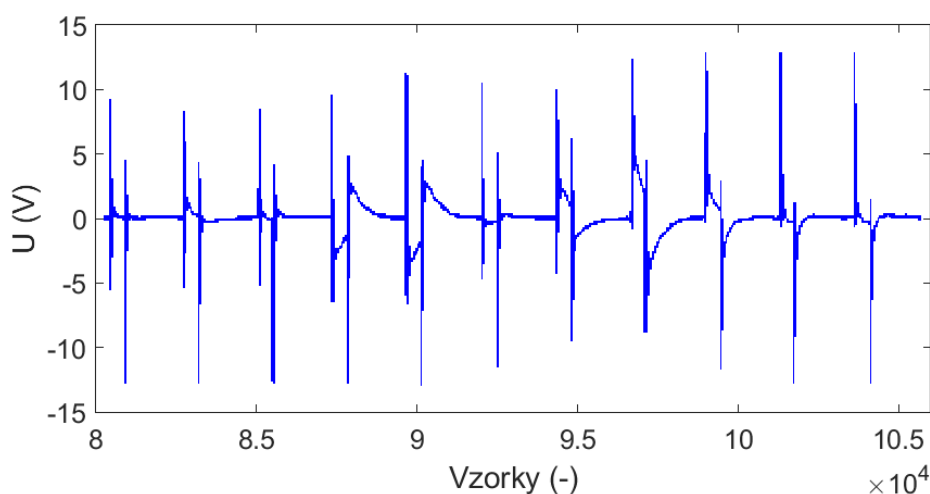
Obr. 7.3: Referenční signál



Obr. 7.4: Soubor naměřených dat

Příklad odezvy na obdélníkový pulz je zobrazena na obrázku 7.3 přerušovanou čarou. Tento průběh byl změřen na okraji testovaného vzorku. Protože se jedná o maximální odezvu rozdílových cívek, byl tento průběh použit jako referenční pulz pro následnou korelaci vektoru naměřených dat.

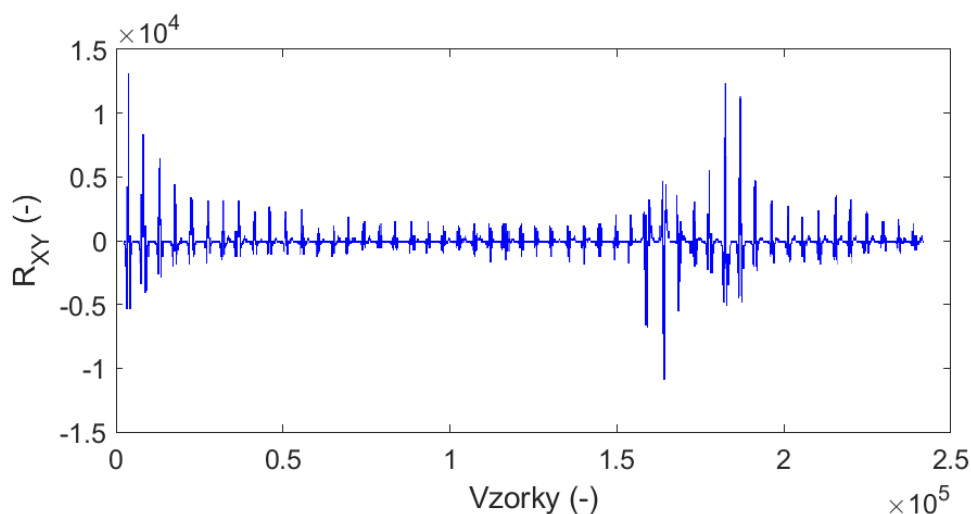
V každé pozici měřicí sondy byla změřena a zaznamenána odezva systému na budicí pulz. Pro účely vyhodnocení byly tyto průběhy pro všechny pozice sondy složeny do celkového souboru naměřených dat zobrazeného na Obr. 7.4. Tento soubor dat byl poté použit pro korelaci s referenčním pulzem. Umístění defektu je přibližně na začátku třetí třetiny signálu. Detail naměřených průběhů v okolí zkoumané vady je zobrazen na Obr. 7.5.



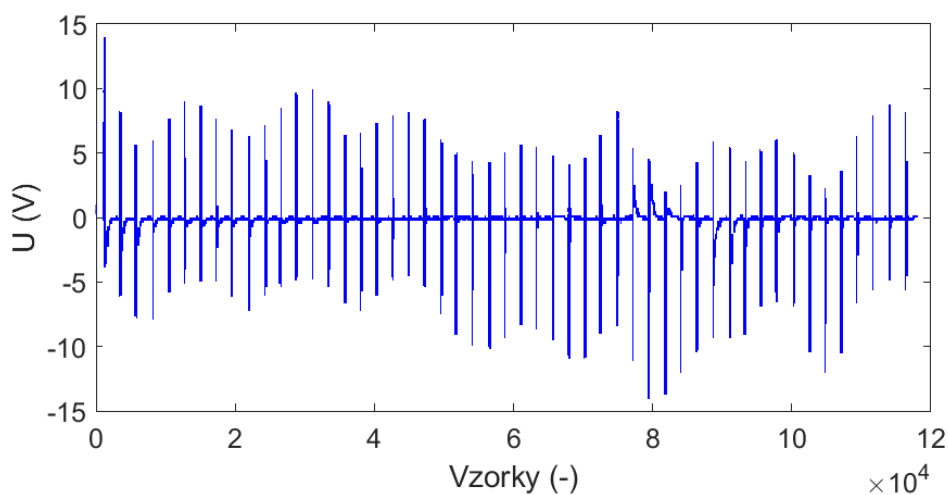
Obr. 7.5: Detail naměřených dat v okolí hledané vady

Na obr. 7.6 je zobrazen výsledný průběh korelace naměřeného signálu z obr. 7.5 s pulsem 7.3. Výsledný průběh vykazuje vysoké špičky na okraji měřeného vzorku a v okolí umělé vady. Ve shodě s teoretickými předpoklady se v místě středu defektu mění polarita špičkových impulzů. Nevýhodou toho průběhu je fakt, že odezva na pulzní budicí signál je sama o sobě periodická, tudíž její hlavní vrcholy jsou obklopeny dalšími vrcholy způsobenými vzájemnou podobností kladné a záporné části referenčního průběhu. Z tohoto důvodu má výsledná korelační funkce průběh, který je stále značně složitý pro automatické vyhodnocení.

Tento problém může být vyřešen použitím pouze jedné poloviny odezvy, zatímco druhá část je rovna nule. Průběh budicího pulzu byl proto použit jako maska pro klíčování naměřených dat.

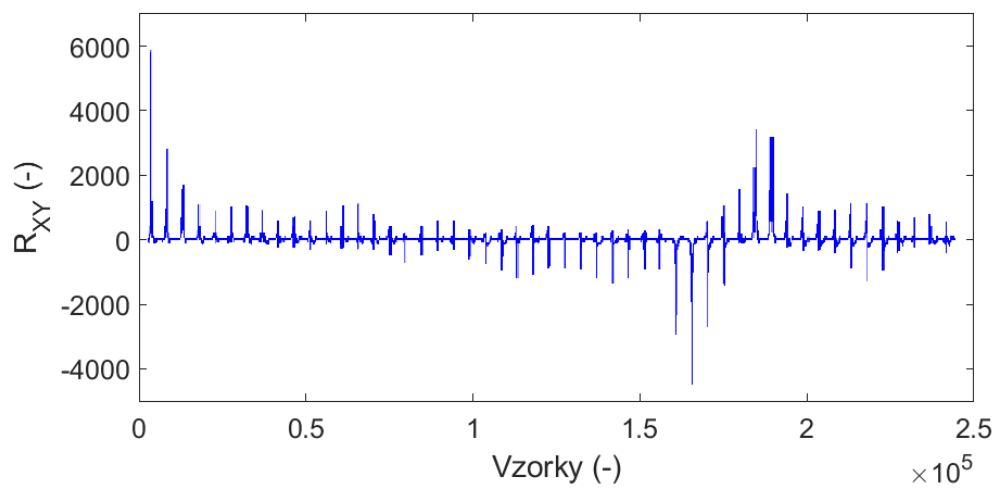


Obr. 7.6: Korelace naměřených dat s referenčním pulzem



Obr. 7.7: Klíčovaná naměřená data

Takto upravený referenční pulz je pak zobrazený na Obr. 7.3 zakreslený plnou čarou a klíčovaný vektor naměřených dat je zobrazený na Obr. 7.7. Výsledná korelace těchto dvou signálů je zakreslena na Obr. 7.8 kde již vidíme průběh obsahující především prosté pulzy jasně značící polohu okraje desky a hledané vady. Výsledné průběhy Obr. 7.6 a Obr. 7.8 jasně ukazují, že metoda korelace je vhodným nástrojem pro úpravu rušeného a samostatně neprůkazného výstupního signálu PEC sondy.



Obr. 7.8: Korelace klíčovaných dat s referenčním pulzem

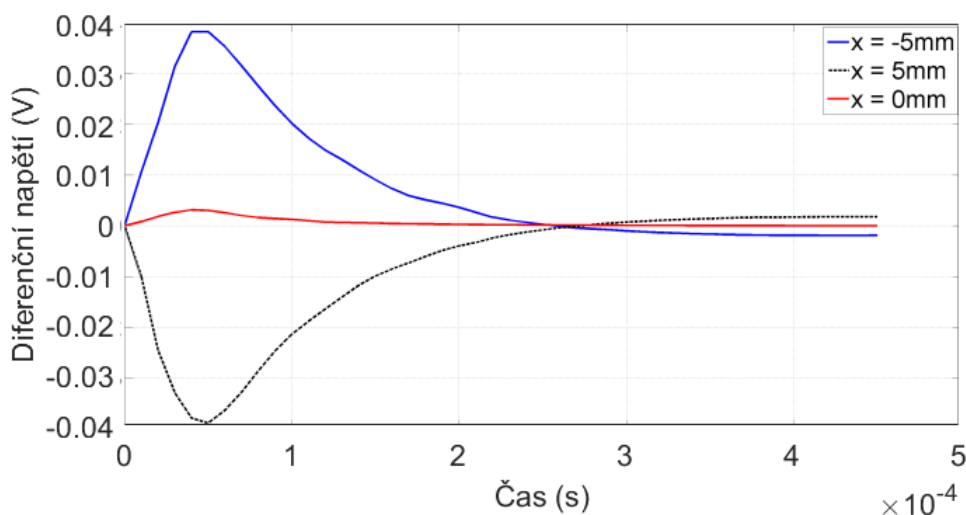
7.2 Vliv hloubky povrchové vady na odezvu systému na pulzní signál

Úkolem tohoto experimentu bylo vyhodnocení vlivu hloubky povrchové vady na hodnoty korelační funkce výstupního signálu s referenčním pulzem. Pro tento účel byl vytvořen testovací vzorek ve formě ocelové desky o tloušťce 5 mm se sadou uměle povrchových vad o následujících rozměrech:

Tab. 7.1: Sada povrchových vad

Vada	Délka (mm)	Šířka (mm)	Hloubka (mm)
1	20	0.8	0.5
2	20	0.9	1
3	20	1	2
4	20	1	3

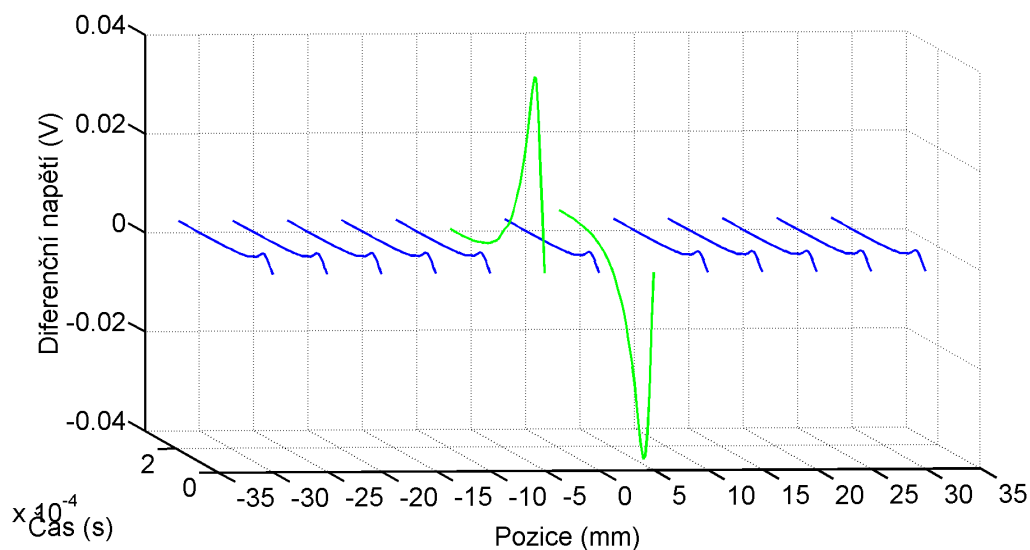
Pro jejich detekci byl využit nový typ měřicí sondy viz. Obr. 6.2. Nejprve byl výstupní signál při měření těchto vad určen pomocí numerického řešení v programu COMSOL Multiphysics, poté byly rozlišovací schopnosti měřicího zařízení ověřeny experimentálním měřením.



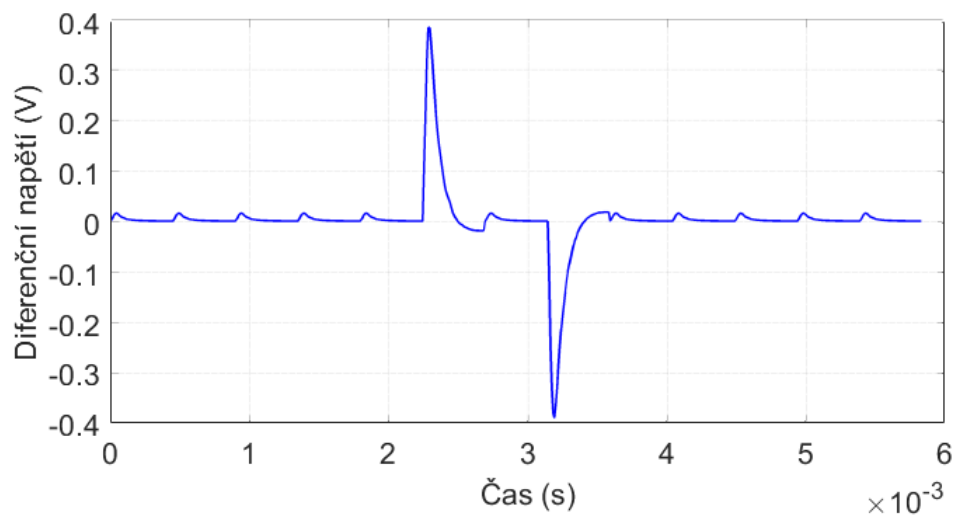
Obr. 7.9: Ukázka odezvy systému na pulzní buzení

Pro numerické řešení byly použity pouze vady o hloubce 1 mm, 2 mm, 3 mm. Hloubka 0.5 mm již hraničila s rozměrem elementu pro numerické řešení a

proto nebyly výsledky průkazné. Obrázek 7.9, ukazuje příklad časového průběhu výstupního rozdílového napětí pro vadu o hloubce 1 mm. Průběhy v jednotlivých bodech okolí vytvořené vady jsou zobrazeny na obrázku 7.10.

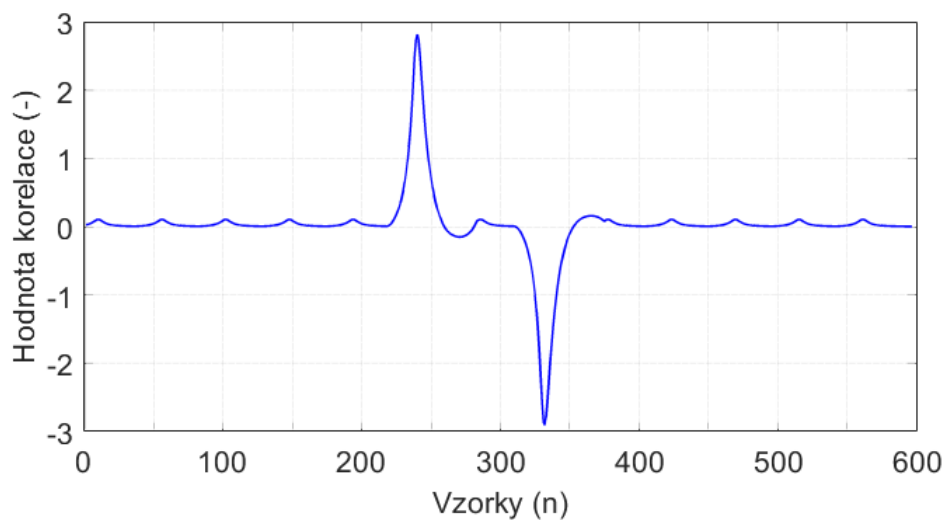


Obr. 7.10: Suma diferenčních signálů – čas

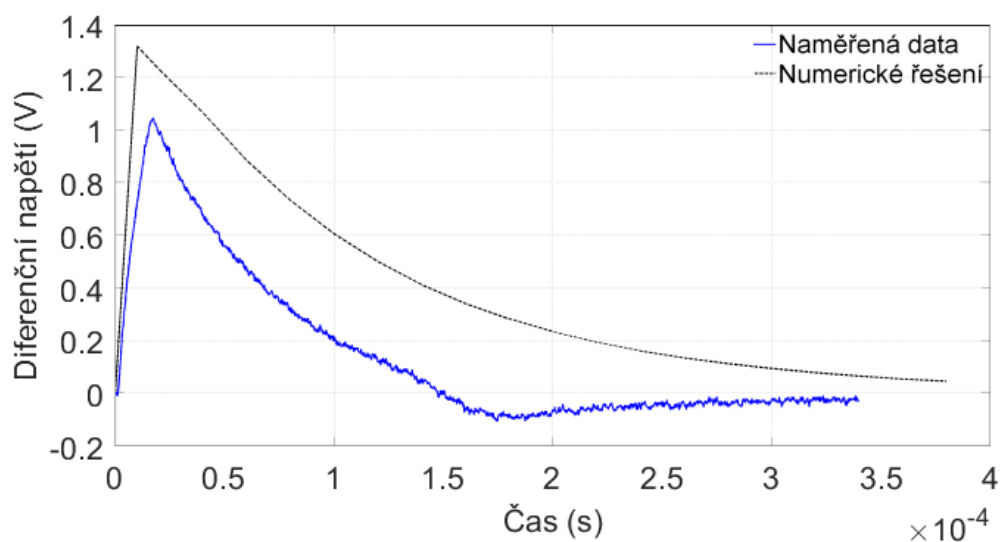


Obr. 7.11: Suma diferenčních signálů – vzorky

Pro přípravu automatického vyhodnocení byla vytvořena posloupnost měřených signálů ve všech po sobě jdoucích pozicích viz. obr. 7.11. V této posloupnosti můžeme nyní provést vyhodnocení pomocí korelace s referenčním impulzem.



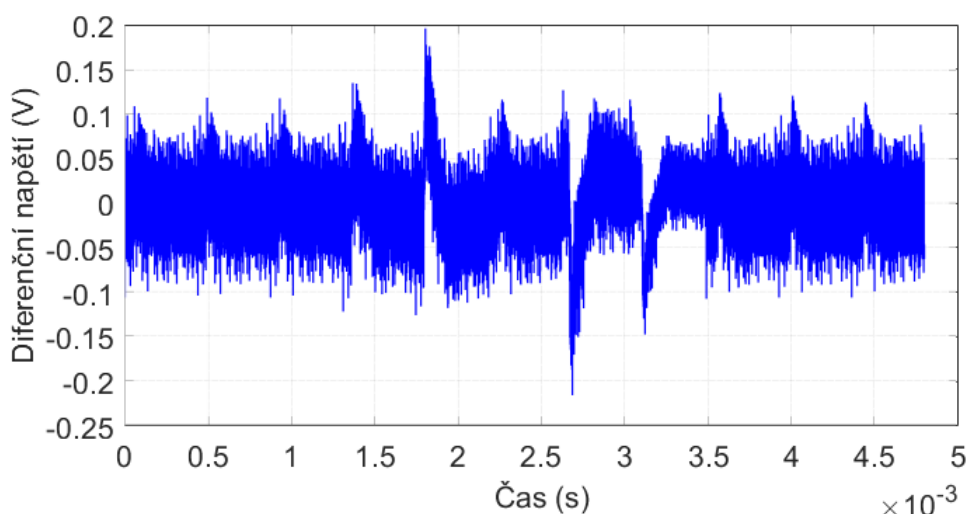
Obr. 7.12: Korelace numerického řešení pro hloubku defektu 1 mm



Obr. 7.13: Porovnání referenčních signálů

Referenční impuls pro korelaci numerického řešení je na Obr. 7.12 (přerušovaný průběh). Zde je také vidět poměrně významný rozdíl mezi průběhem numerického řešení a naměřenými daty. Toto je dáno pravděpodobně rozdílem mezi materiálovými vlastnostmi reálného vzorku a katalogovými hodnotami, nedokonalostmi ve výrobě měřících vinutí a drobným sklonem měřící sondy. Ukázka korelace výstupního signálu s referenčním pulzem je na Obr. 7.13. Jak je vidět, tento průběh vykazuje špičkové průběhy pouze v okolí vady a jsou potlačeny i špičky dané chybou numerického řešení.

Experimentální měření bylo provedeno posuvem měřícího zařízení v krocích 5 mm kolmo k povrchu ocelové desky v okolí uměle vytvořené vady. Toto zařízení se skládá z jedné budicí a dvojice měřících cívek vzájemně spojených ferritovým E jádrem. Signál, indukovaný v měřících cívkách, byl poté v každém kroku zaznamenán digitálním osciloskopem.

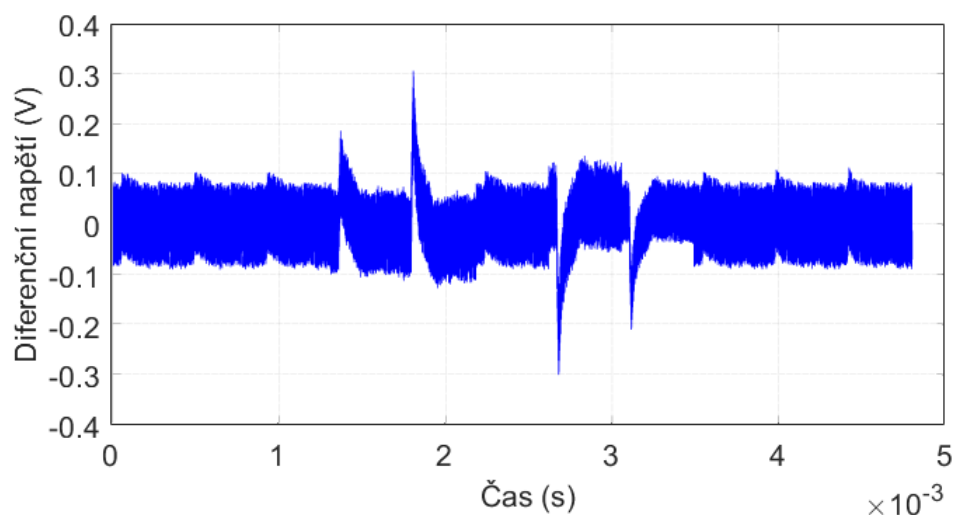


Obr. 7.14: Soubor naměřených dat pro vadu o hloubce 0.5 mm

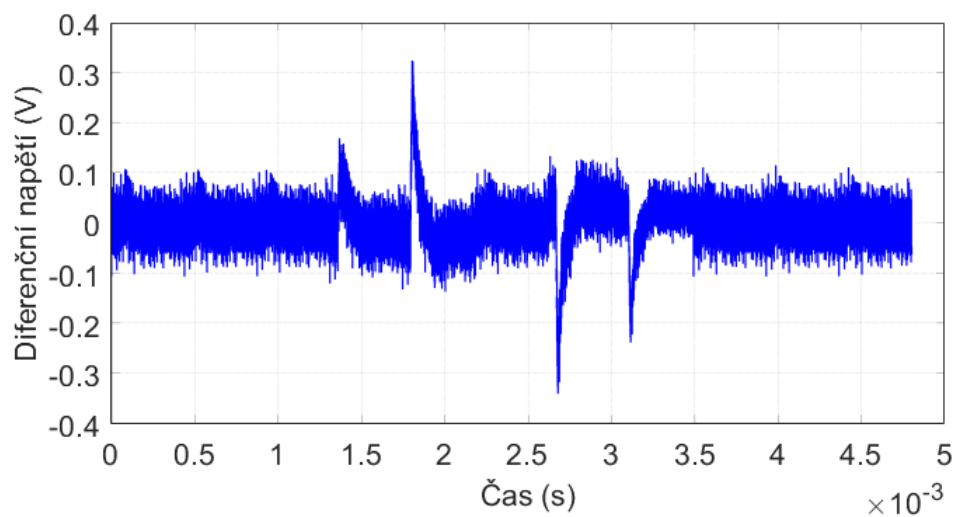
Referenční impuls (viz. obr. 7.12, spojitý průběh) byl získán zaznamenáním výstupního signálu ze sondy umístěné na hraně měřené ocelové desky. Tímto způsobem byla ovlivněna pouze jedna z měřených cívek a tudíž získáváme maximální rozdílové napětí. Tento průběh byl poté využit ke snížení vlivu šumového napětí pomocí korelace.

Soubory naměřených hodnot pro jednotlivé hloubky vad jsou zobrazeny na Obr. 7.14, Obr. 7.15, Obr. 7.16 a Obr. 7.17, přičemž umístění defektu je v uprostřed souboru naměřených dat. Tyto soubory byly vytvořeny stejným

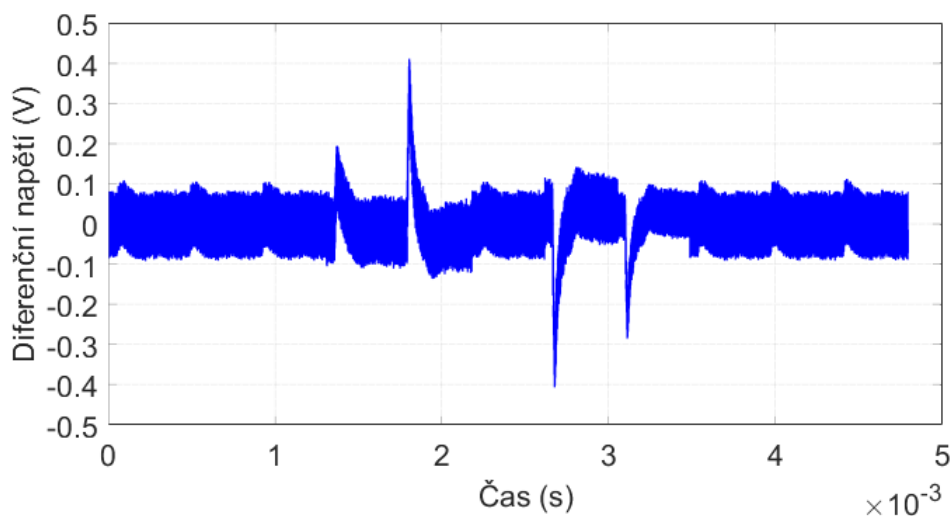
způsobem, jako tomu bylo u numerického řešení.



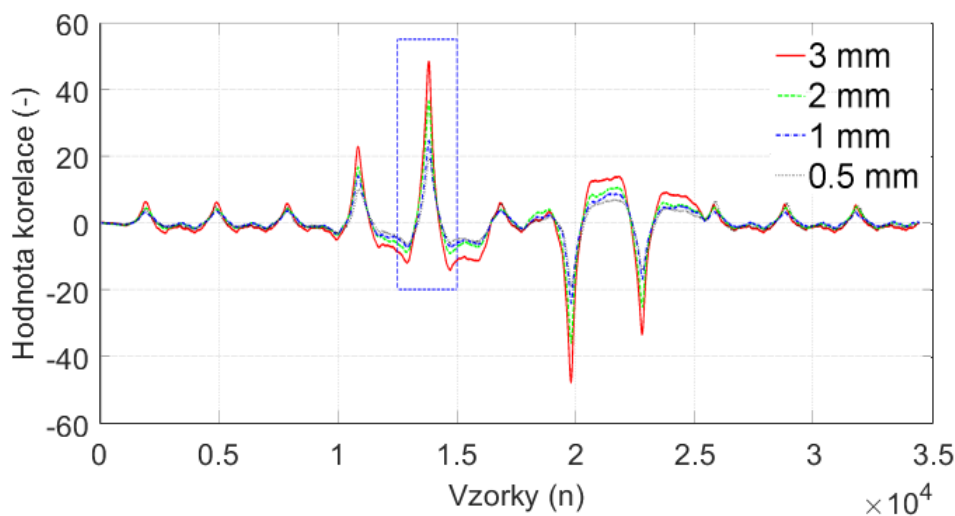
Obr. 7.15: Soubor naměřených dat pro vadu o hloubce 1 mm



Obr. 7.16: Soubor naměřených dat pro vadu o hloubce 2 mm



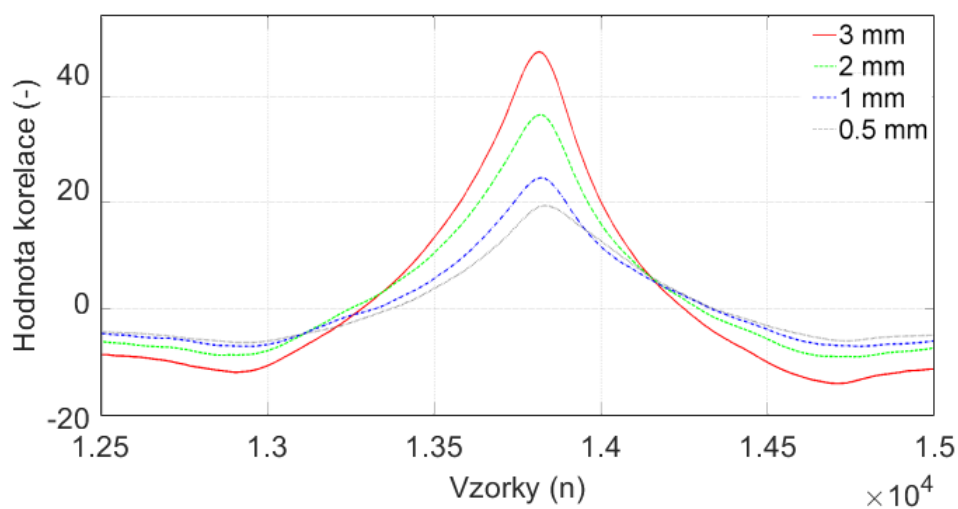
Obr. 7.17: Soubor naměřených dat pro vadu o hloubce 3 mm



Obr. 7.18: Výstupní funkce korelace pro všechny měřené hloubky vad

Na těchto průbězích je jasně vidět vliv rušení, který by měl negativní účinky na případné automatické vyhodnocení. Pro snížení vlivu tohoto rušení byla provedena korelace s referenčním signálem, viz. obrázek 7.13 (modrý průběh). Výsledná funkce po provedení této korelace je na obrázku 7.18. Detail porovnání špičkové hodnoty po provedení korelace pro různé hloubky defektu je na obrázku 7.19. Zde je vidět, že při zachování referenčního pulzu roste hod-

nota korelační funkce přímo úměrně s hloubkou povrchové vady. Dále je při porovnání Obr. 7.18 a Obr. 7.12 možné rozpoznat poměrně dobrou shodu tvarů výsledných korelačních pulzů v těsném okolí hledané vady.



Obr. 7.19: Detail špičkových hodnot výstupních funkcí korelací

7.3 Identifikace hlubokých povrchových a podpovrchových vad

Ve většině světových publikací je uvedeno omezení použití metody vířivých proudů pouze na povrchové vady. Detekční schopnosti metody pulzního testování byly proto ověřeny na sadě vzorků. Testované vzorky byly vyrobeny z austenitické oceli SUS316L se sadou uměle vytvořených vad obdélníkového tvaru. Elektrická konduktivita vzorků je $\sigma = 1.35 \text{ MS/m}$ a relativní permeabilita materiálu je $\mu_r = 1$. Tloušťka vzorku č. 1 je $h_1 = 10 \text{ mm}$ a tloušťka vzorku č. 2 je $h_2 = 30 \text{ mm}$. Vzorky obsahují sadu uměle vytvořených vad o rozměrech uvedených v tabulkách Tab. 7.2, Tab. 7.3, Tab. 7.4 a Tab. 7.5.

Tab. 7.2: Sada povrchových vad ve vzorku č. 1

Vada	Délka (mm)	Šířka (mm)	Hloubka (mm)
1	10	0.5	1
2	10	0.55	3
3	10	0.6	5
4	10	0.6	7
5	10	0.6	9

Tab. 7.3: Sada povrchových vad ve vzorku č. 2

Vada	Délka (mm)	Šířka (mm)	Hloubka (mm)
1	30	0.5	5
2	30	0.55	10.3
3	30	0.6	16
4	30	0.7	20.5
5	30	0.7	24.5

Vady byly vyhodnoceny ze strany jejich výskytu (tj. vady povrchové), poté ze strany protilehlé (tj. vady podpovrchové). Pro vady podpovrchové značí hloubka místo jejich výskytu pod povrchem, nikoliv výšku samotné vady. Měření probíhalo automatickým posunem měřicího zařízení v ose x podél délky zkoumané vady v krocích $\Delta x = 2 \text{ mm}$. V každém kroku byla zaznamenána odezva systému na budicí pulz. V rámci tohoto experimentu bylo primární elektromagnetické pole buzeno pulzním obdélníkovým signálem o amplitudě $U_{\max} = 12 \text{ V}$ a frekvenci $f = 1 \text{ kHz}$. Dalšími parametry budicího napěťového pulzu je šířka

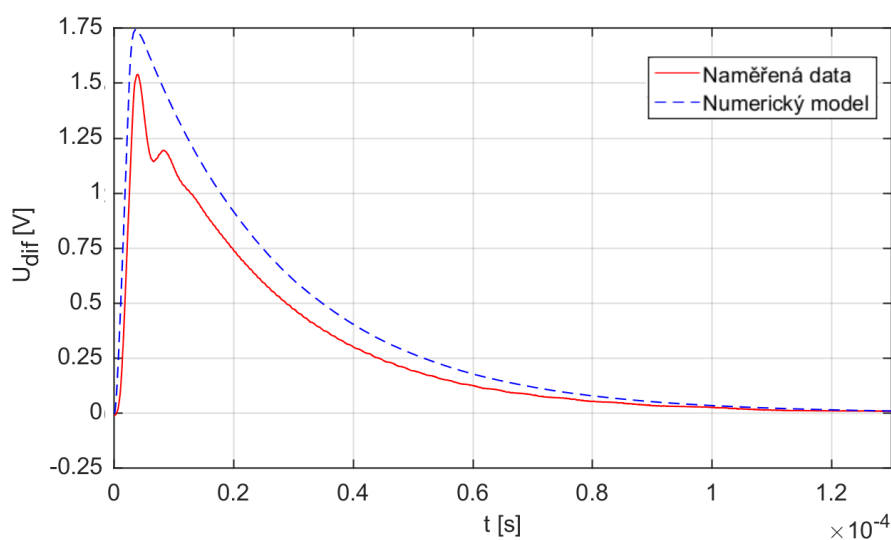
Tab. 7.4: Sada podpovrchových vad ve vzorku č. 1

Vada	Délka (mm)	Šířka (mm)	Hloubka (mm)
1	10	0.6	1
2	10	0.6	3
3	10	0.6	5
4	10	0.55	7
5	10	0.5	9

Tab. 7.5: Sada podpovrchových vad ve vzorku č. 2

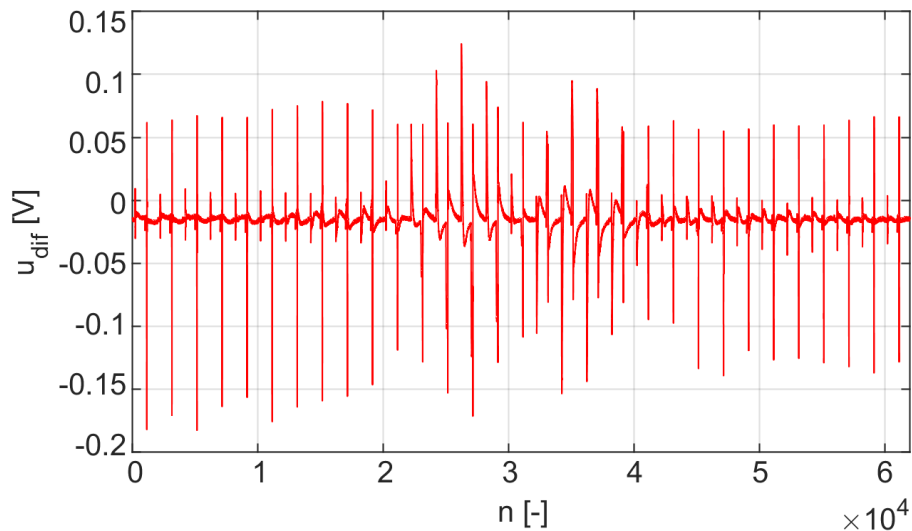
Vada	Délka (mm)	Šířka (mm)	Hloubka (mm)
1	30	0.7	5.5
2	30	0.7	9.5
3	30	0.6	14
4	30	0.55	19.7
5	30	0.5	25

$t_d = 0.1$ ms, doba náběhu $t_r = 10$ ns a doba sestupu $t_f = 10$ ns. Tyto hodnoty byly zvoleny na základě znalosti materiálových vlastností vzorků a indukčnosti budící cívky pomocí numerického modelu.

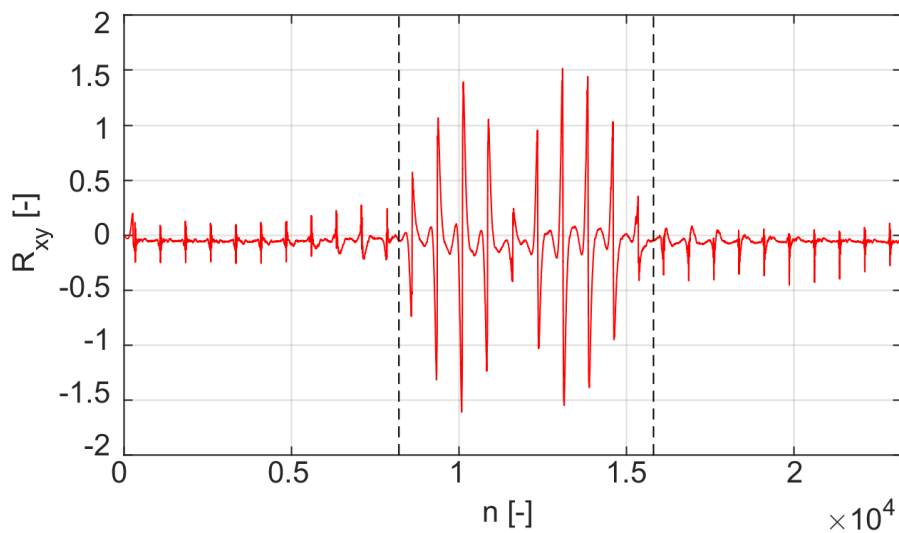


Obr. 7.20: Porovnání referenčních pulzů pro materiál SUS316L

Příklad naměřeného souboru výstupních hodnot v okolí podpovrchové vady je na obrázku Obr. 7.21. je zobrazen výstupní diferenciální signál v okolí podpovrchové vady, která se nachází ve středu průběhu. Vyhodnocení tohoto signálu je složité vzhledem k jeho silnému zarušení.

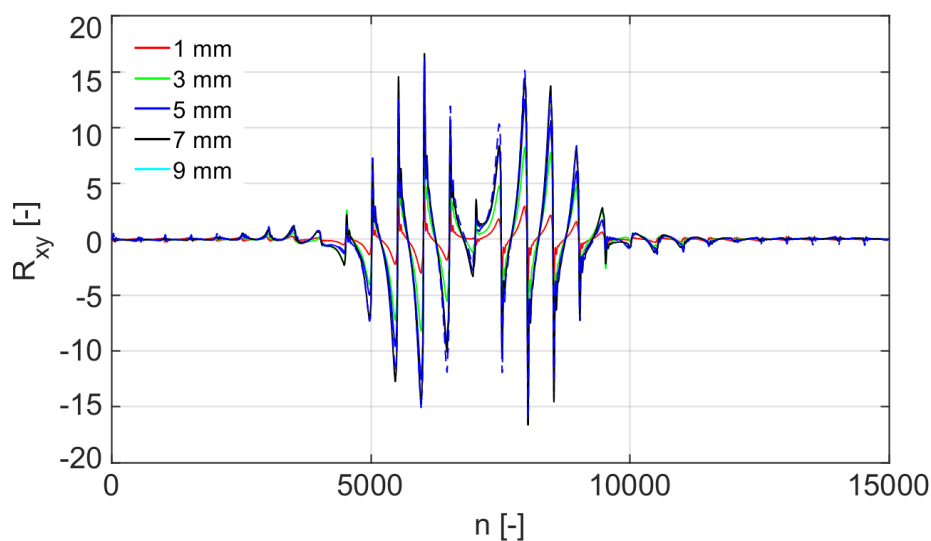


Obr. 7.21: Ukázka vektoru naměřených dat v okolí podpovrchové vady

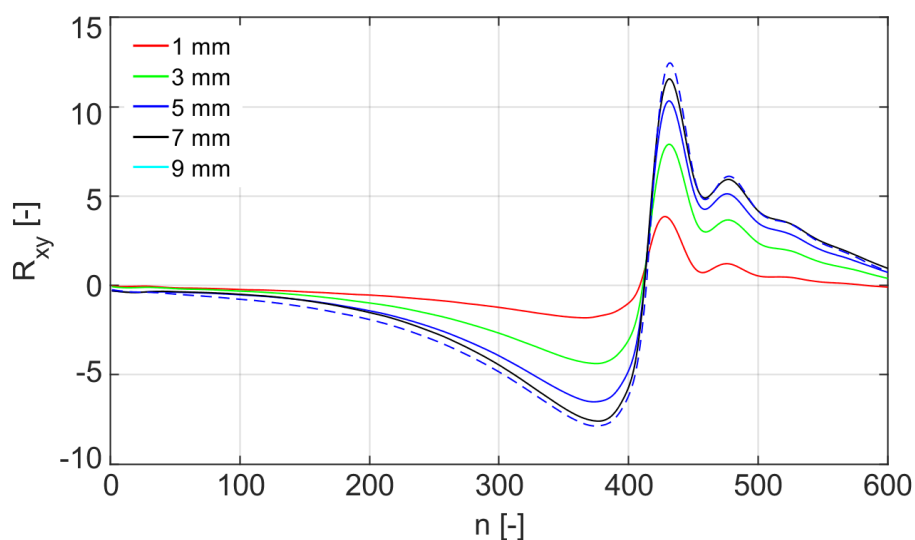


Obr. 7.22: Korelační funkce naměřených dat s referenčním signálem

Výsledná korelační funkce naměřených dat z Obr.7.21 a referenčního pulzu viz Obr.7.20 je zobrazena na Obr.7.22. Zde je vidět výrazný pozitivní vliv na informační hodnotu sady naměřených dat z hlediska dalšího vyhodnocení. Navíc ze znalosti pozice sondy v prostoru lze určit délku zkoumané vady, v tomto případě naznačenou dvojicí svislých čar.

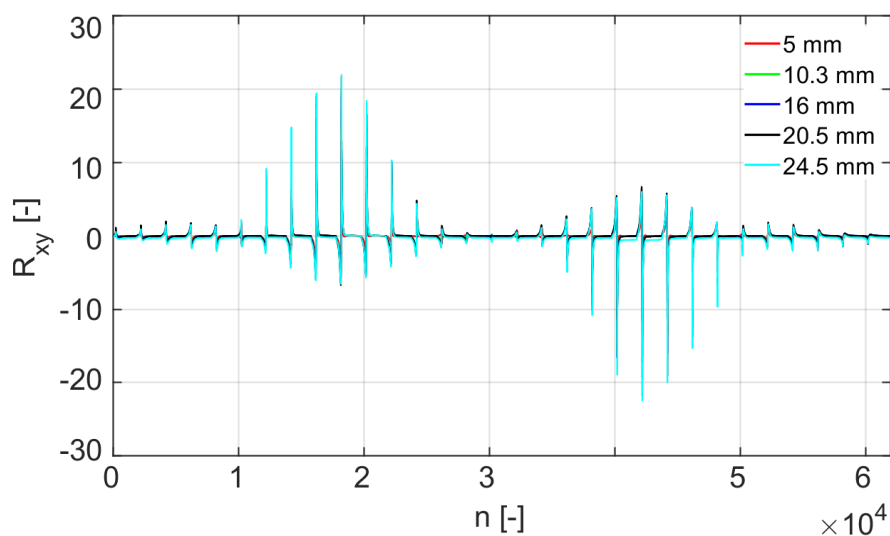


Obr. 7.23: Porovnání korelačních funkcí pro povrchové vady vzorku č. 1

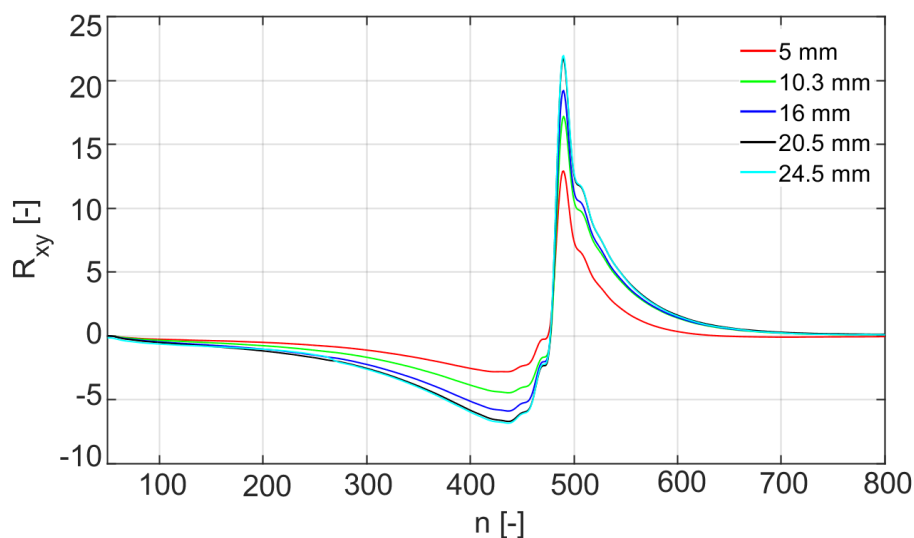


Obr. 7.24: Porovnání korelačních funkcí pro povrchové vady vzorku č. 1 - detail

Nejprve byla vyhodnocena sada povrchových vad vzorku č. 1. pro hodnoty 1 mm až 9 mm. Výsledné průběhy jsou zobrazeny na Obr. 7.23. Na Obr. 7.24 je pak zobrazen detail závislosti špičkových hodnot na hloubce zkoumané povrchové vady. Výsledné hodnoty pro sadu povrchových vad vzorku č. 2 jsou zobrazeny v Obr. 7.25.

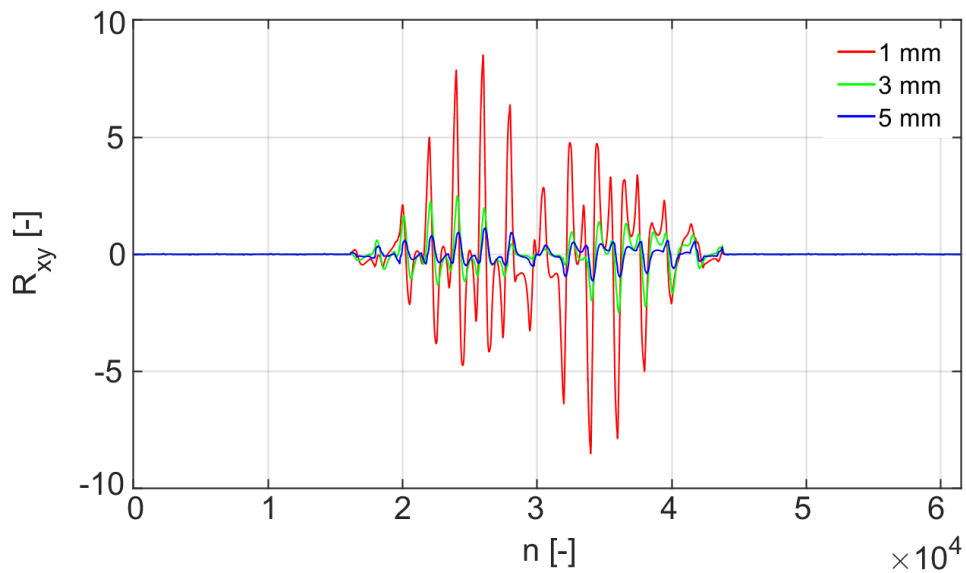


Obr. 7.25: Porovnání korelačních funkcí pro povrchové vady vzorku č. 2

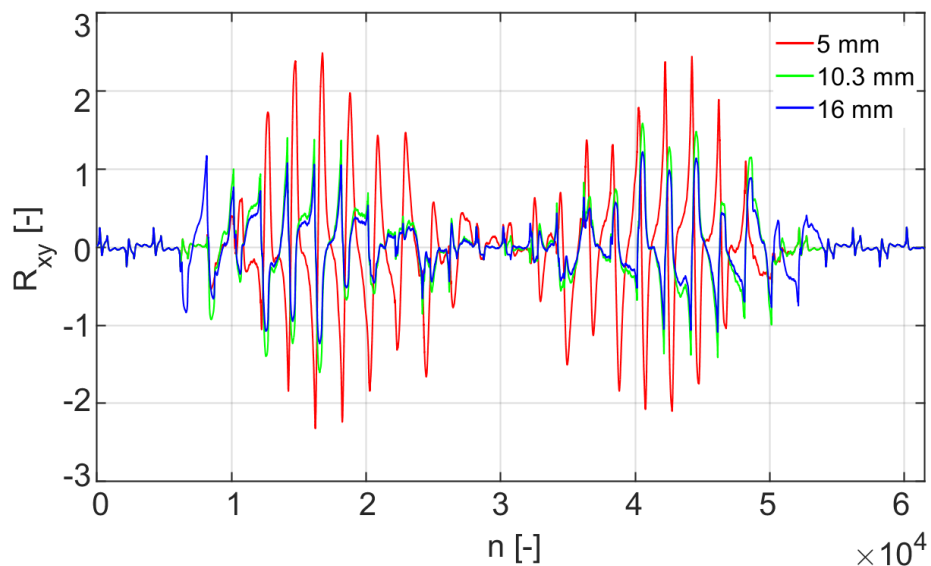


Obr. 7.26: Porovnání korelačních funkcí pro povrchové vady vzorku č. 2 - detail

Z detailu špičkových hodnot na Obr. 7.26 je zřejmé že vlivem povrchového jevu je velice obtížné vzájemné rozlišení povrchových vad o hloubce větší než 20 mm.



Obr. 7.27: Porovnání korelačních funkcí pro podpovrchové vady vzorku č. 1



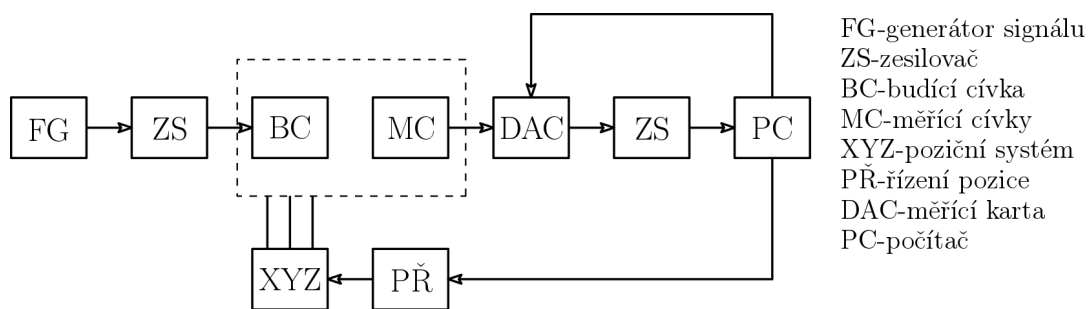
Obr. 7.28: Porovnání korelačních funkcí pro podpovrchové vady vzorku č. 2

Pro určení detekčních schopností metody pro podpovrchové vady byla změřena sada podpovrchových vad obou vzorků. Výsledné korelační funkce s referenčním pulzem z Obr. 7.20 jsou zobrazeny na Obr. 7.27 pro vzorek č. 1 a Obr. 7.28 pro vzorek č. 2.

Na průběhu z Obr. 7.28 je vidět, že bylo možné prokázat přítomnost podpovrchových vad až do hloubky 14 mm pod povrchem. Pro hlubší podpovrchové vady nebylo ani při využití korelace možno odlišit užitečný signál od zbytkového šumu. Data získaná během této sady experimentů byla použita pro tvorbu evaluačního algoritmu, který na základě podobnosti korelačních funkcí provádí odhad geometrických rozměrů měřené vady.

7.4 Odhad geometrických rozměrů povrchových a podpovrchových vad

V rámci tohoto experimentu byl určení vlastností vyhodnocovacího algoritmu, pro odhad měřených povrchových a podpovrchových vad v rámci automatického měření. Tento algoritmus byl vytvořen v prostředí Matlab. Sada zkoumaných vad byla totožná se vzorky v kapitole 7.3 a jejich rozměry jsou uvedeny v Tab. 7.4 a Tab. 7.5. Oblast automatického měření byla $s = 48 \text{ mm} \times 48 \text{ mm}$ vzorek o tloušťce $h = 10 \text{ mm}$ a $s = 60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ pro vzorek o tloušťce $h = 30 \text{ mm}$. Krok posuvu měřicího zařízení v ose x byl $\Delta x = 0.01 \text{ mm}$ a krok v ose y byl $\Delta y = 0.5 \text{ mm}$. Zdvih měřicího zařízení byl nastaven na $l_o = 1 \text{ mm}$. Testované vzorky byly vyrobeny z austenitické oceli SUS316L se sadou uměle vytvořených vad obdélníkového tvaru. Elektrická konduktivita vzorků je $\sigma = 1.35 \text{ MS/m}$ a relativní permeabilita materiálu je $\mu_r = 1$. Výstupní signál měřicích cívek byl zaznamenán pomocí měřicí karty s rozlišením 16 bit/kanál a vzorkovací frekvencí $f_s = 15 \text{ kS/s}$. Budicí cívka byla buzena napěťovým pulzem o amplitudě 8 V a frekvenci 1 kHz. Dalšími parametry budicího napěťového pulzu je šířka $t_d = 0.1 \text{ ms}$, doba náběhu $t_r = 10 \text{ ns}$ a doba sestupu $t_f = 10 \text{ ns}$. Uživatelské rozhraní a řízení pozice sondy bylo realizováno pomocí prostředí LabVIEW. Na Obr. 7.29 je zobrazen měřicí řetězec.



Obr. 7.29: Blokový diagram automatického měřicího řetězce

V rámci vyhodnocení výstupního signálu byl použit testovací algoritmus, který nejprve provedl korelaci všech řádků matice naměřených dat se sadou známých referenčních signálů. Výsledné korelační funkce byly poté složeny do výsledné korelační matice, která byla dále vyhodnocena. Na základě výskytu maximálních špičkových hodnot v celé korelační matici byl na základě dat z předchozích měření a znalosti rozměrů testovacího elementu proveden odhad délky hledané vady. Na základě porovnání podobnosti špičkových hodnot, sy-

metrie a sklonu pulzů výsledné korelační matice byl proveden odhad hloubky testovaných vad.

Vyhodnocení povrchových vad

Výsledky měření povrchových vad jsou prezentovány v tabulkách Tab. 7.6 a Tab. 7.7. Označení l_c , l_e , d_c a d_e odpovídají katalogové hodnotě délky vady, odhadu délky vady, katalogové hodnotě hloubky vady a odhadu délky vady.

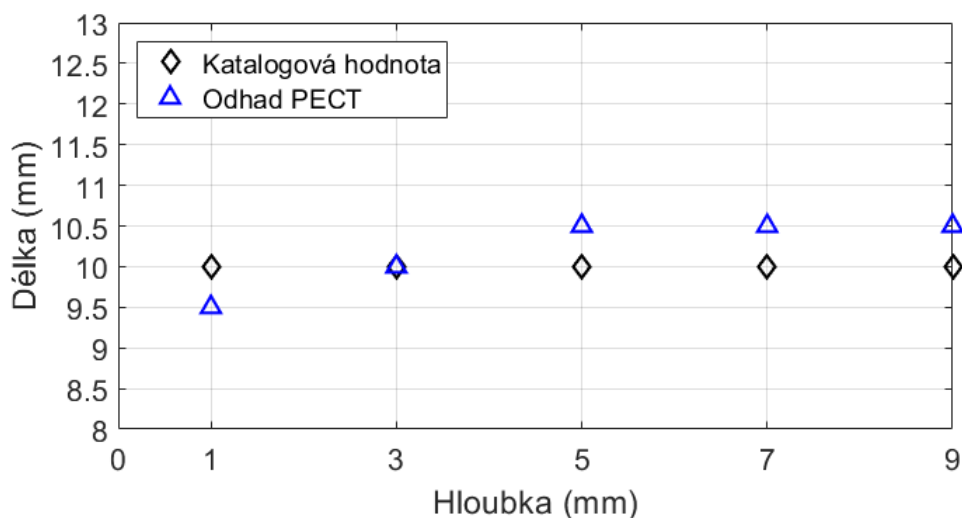
Tab. 7.6: Tabulka výsledných hodnot pro povrchové vady vzorku č.1

Vada	l_c (mm)	l_e (mm)	d_c (mm)	d_e (mm)
1	10	10	1	1
2	10	10.5	3	3
3	10	10.5	5	4.5
4	10	11	7	7.5
5	10	11.5	9	9.5

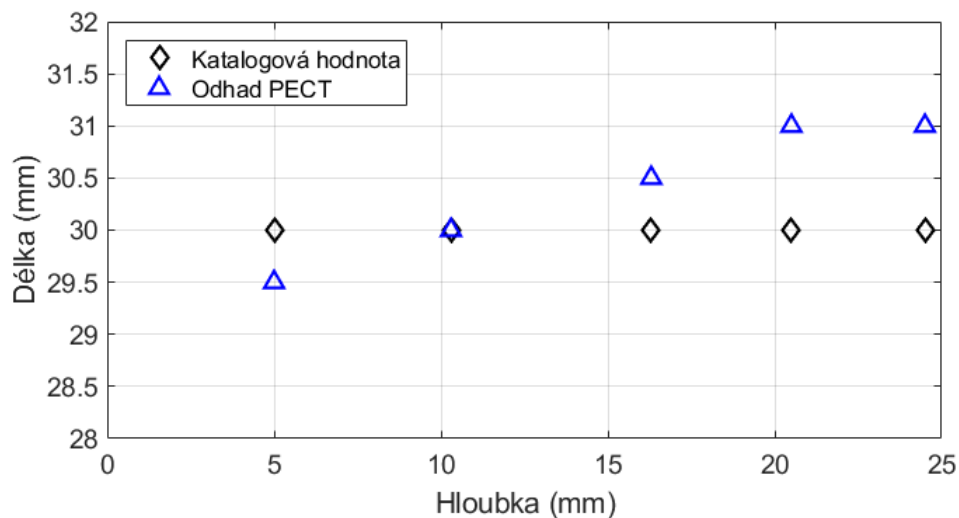
Tab. 7.7: Tabulka výsledných hodnot pro povrchové vady vzorku č.2

Vada	l_c (mm)	l_e (mm)	d_c (mm)	d_e (mm)
1	30	29.5	5	5.5
2	30	30	10.3	10.5
3	30	30.5	16	15.5
4	30	31	20.5	20
5	30	31.5	24.5	25.5

Výsledné odhady délky pro jednotlivé vady v závislosti na hloubce vady jsou zobrazeny na Obr. 7.30 a Obr. 7.31. Průběhy ukazují vliv povrchového jevu, způsobující rostoucí absolutní chybu odhadu délky se zvyšující hloubkou vady. Největší absolutní odchylku pro povrchové vady vykazují povrchové vady o hloubce $d = 20.5$ mm a $d = 24.5$ mm. Tento fakt odpovídá výsledkům získaným v kapitole 7.3. Maximální relativní odchylka odhadu délky pro povrchové vady tvořila 5 % pro vzorek č. 1 a 3 % pro vzorek č. 2. Maximální relativní odchylka odhadu hloubky povrchové vady tvořila 10 % pro vzorek č. 1 a 3 % pro vzorek č. 2. Toto měření prokázalo dobrou rozlišovací schopnost PECT metody i pro hluboké povrchové vady.



Obr. 7.30: Délky povrchový vad pro vzorek $h = 10$ mm



Obr. 7.31: Délky povrchový vad pro vzorek $h = 30$ mm

Vyhodnocení podpovrchových vad

Výsledky měření podpovrchových vad jsou prezentovány v tabulkách Tab. 7.8 a Tab. 7.9.

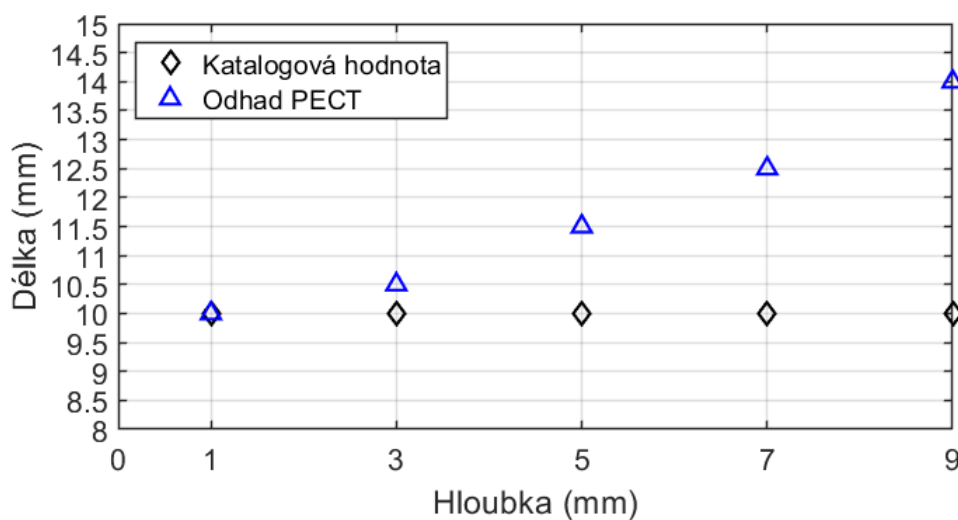
Výsledné odhady délky pro jednotlivé podpovrchové vady v závislosti na hloubce vady jsou zobrazeny na Obr. 7.30 a Obr. 7.31.

Tab. 7.8: Tabulka výsledných hodnot pro podpovrchové vady vzorku č. 1

Vada	l_c (mm)	l_e (mm)	d (mm)
1	10	10	1
2	10	10.5	3
3	10	11.5	5
4	10	12	7
5	10	14	9

Tab. 7.9: Tabulka výsledných hodnot pro podpovrchové vady vzorku č. 2

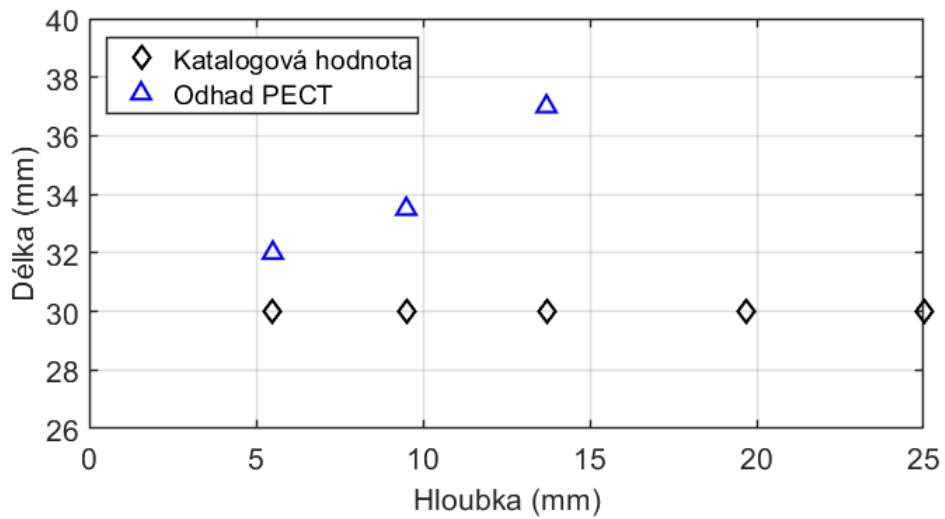
Vada	l_c (mm)	l_e (mm)	d (mm)
1	30	32	5
2	30	33.5	10.3
3	30	36	16
4	30	-	20.5
5	30	-	24.5



Obr. 7.32: Délky podpovrchových vad pro vzorek $h = 10$ mm

Měření podpovrchových vad prokázalo omezení této metody vlivem povrchového jevu. Proto vady, které se nachází v hloubce větší než 14 mm nebylo možné prokazatelně určit. Dále experiment prokázal, že se vzrůstající hloubkou vady významně klesá přesnost metody a v případě podpovrchových vad s tento efekt projevuje mnohem významněji než u povrchových vad. Maximální

odchylka byla 24 % pro vzorek č. 1 a až 40 % pro vadu v hloubce 14 mm ve vzorku č. 2. Metoda ovšem prokázala poměrně dobrou přesnost odhadu rozměrů pro mělké podpvrchové vady.



Obr. 7.33: Délky podpvrchový vad pro vzorek $h = 30$ mm

8

Zhodnocení přínosů předložené práce

V rámci předložené disertační práce byl diskutován současný stav a metody ne-destruktivní defektoskopie. V návaznosti na to byla blíže představena metoda využívající vířivé proudy. Byl sestaven příslušný matematický model testovacího zařízení na bázi vířivých proudů, který byl využit k základnímu návrhu numerického modelu pro návrh experimentálního zařízení. Tento model byl následně řešen v programu COMSOL Multiphysics. Dále byla představena metoda korelace výstupního signálu s referenčním impulzem a jeho možný přínos při analýze výstupního signálu. Dále bylo představeno měřící zařízení navržené na základě numerického řešení. S tímto zařízením byla provedena série měření různých typů uměle vytvořených vad.

V rámci této práce byly demonstrovány rozlišovací schopnosti ne-destruktivního testování s využitím vířivých proudů. Byl vytvořen algoritmus založený na korelaci matice naměřených dat se sadou referenčních pulzů. Výhodou tohoto algoritmu je poměrně přesný odhad rozměrů testovaných vad a krátký výpočetní čas. Vlastnosti tohoto algoritmu byly ověřeny na dvojici vzorků z austenitické oceli SUS316L, přičemž každý vzorek obsahoval sadu uměle vytvořených vad se známými katalogovými hodnotami rozměrů. Tyto vady byly zkoumány ze strany jejich výskytu (povrchové vady) i z protilehlé strany (podpovrchové vady). Pro povrchové vady nepřekročila relativní odchylka odhadu délky 5 % a maximální relativní odchylka odhadu hloubky vady činila 10 %. Při

detekci a odhadu rozměrů podpovrchových vad se velmi silně projevil vliv povrchového jevu. Přesto však byla prokázána schopnost metody odhalit přítomnost podpovrchových vad až do hloubky $d = 14$ mm pod povrchem, což překonává možnosti běžných harmonických metod. Toto činí PECT metodu vhodnou pro hledání podpovrchových vad, stejně tak jako vyšetřování vodivých materiálů pod silnou vrstvou izolace.

Návrhy směru dalšího výzkumu:

- Optimalizace tvaru referenčního pulzu s ohledem na vlastnosti podpovrchových vad a jejich detekci
- Optimalizace tvaru budícího vinutí s ohledem na homogenizaci primárního magnetického pole v okolí měřicích elementů
- Určení omezení metody vlivem přítomnosti izolačních materiálů a vliv jejich rozměrů na odezvu systému

Seznam publikací

Publikace související s tématem disertační práce

1. Slobodník, K., Karban, P. Detection of Surface Crack Using Eddy Currents. ISTET 2013 - Proceedings. Pilsen: University of West Bohemia, 19-20, 2013. ISBN: 978-80-261-0246-5
2. Slobodník, K. Surface Defect Detection Using Pulsed Eddy Currents and Cross Correlation. Elektrotechnika a informatika 2014. Část 1., Elektrotechnika. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 107-110, 2014. ISBN: 978-80-261-0367-7
3. Jansa, J., Doležel, I., Slobodník, K., Karban, P. Cross-Correlation as a New Evaluation Tool in Pulsed Eddy Current Defectoscopy. Elektro 2014. Žilina: University of Žilina, Faculty of Electrical Engineering, 571-574, 2014. ISBN: 978-1-4799-3721-9
4. Jansa, J., Doležel, I., Slobodník, K., Karban, P. Cross-correlation technique for revealing defects in pulsed eddy current defectoscopy. Poznan University of Technology Academic Journals : Electrical Engineering. Poznaň: Poznaň University of Technology, 77: 47-53, 2014. ISSN: 1897-0737.
5. Slobodník, K. Numerické řešení a experimentální ověření odezvy pulsního signálu v nedestruktivní defektoskopii. Elektrotechnika a informatika 2015. Elektrotechnika, elektronika, elektroenergetika. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 95-98, 2015. ISBN: 978-80-261-0514-5
6. Slobodník, K., Jansa, J. Numerical modeling of eddy current defectoscopy probe. Proceedings of the Conference on Advanced Methods of the Theory of Electrical Engineering (AMTEE 2015). Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 6-7, 2015. ISBN: 978-80-261-0527-5

7. Slobodník, K., Karban, P. Cross-correlation technique for revealing defects in differential pulsed eddy current defectoscopy. Proceedings of 11th International Conference Elektro 2016. Piscataway: IEEE, 637-640, 2016. ISBN: 978-1-4673-8698-2.
8. Slobodník, K. Návrh a počítačové modelování pulzně buzených defektoskopických sond na bázi vířivých proudů. Elektrotechnika a informatika 2016. Elektrotechnika, elektronika, elektroenergetika. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 63-66, 2016. ISBN: 978-80-261-0516-9
9. Slobodník, K. Detection and evaluation of subsurface defects using pulse eddy current differential probe. Proceedings of 2017 18th International Conference Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE). Piscataway: IEEE, 1-4, 2017. ISBN: 978-1-5386-1040-4.
10. Slobodník, K., Karban, P. Subsurface cracks evaluation using pulsed eddy current and cross correlation. 12th International Conference Elektro 2018: proceedings. Piscataway: IEEE, 1-4, 2018. ISBN: 978-1-5386-4759-2.
11. Slobodník, K., Karban, P. Pulse shape influence evaluation for nondestructive eddy current testing. 41st Conference on fundamentals of electrotechnics and circuit theory (SPETO 2018): proceedings. Gliwice-Ustron: Silesian University of Technology, 97-98, 2018. ISBN: 978-83-85940-40-7.
12. Behůň, L. Slobodník, K. Harmonic and pulsed eddy current testing methods as tools for surface and subsurface defect evaluation. Journal of Electric Engineering. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislavě, 69(5):395-39, 2018. ISSN: 1335-3632.

Ostatní publikace a výstupy

1. Pánek, D., Slobodník, K., Design and optimization of air coil magnetic shields. Škoda Electric, a.s., 2014.
2. Slobodník, K., Karban, P., Mach, F., Doležel, I. Induction heating of rotating cylindrical nonmagnetic billets with prescribed temperature profile. In Proceedings of IECON 2014 : 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Piscataway: IEEE, 2014. s. 3233-3239. ISBN: 978-1-4799-4033-2 , ISSN: 1553-572X

3. Vodňanský, J., Pánek, D., Hamar, R., Slobodník, K. Development of induction brazing coil - Lucie End. Valeo Výměníky Tepla s.r.o., 2015.
4. Vodňanský, J., Pánek, D., Hamar, R., Slobodník, K. Development of induction brazing coil - Monoblock. Valeo výměníky tepla s.r.o., Skandinávská 992, 267 53 Žebrák, 2015.
5. Hamar, R., Pánek, D., Slobodník, K., Development of induction brazing coil for Lucie evaporators using generator CEIA 25-SA/80. Valeo výměníky tepla, s.r.o., 2017.
6. Kotlan, V., Hamar, R., Pánek, D., Slobodník, K. Development of massive induction brazing coils for Lucie evaporators of type MQB A0 and GEM. Valeo Výměníky Tepla, s.r.o., 2018.

Literatura

- [1] R. Abrantes, L. S. Rosado, P. M. Ramos, and M. Piedade. Embedded measurement system for non-destructive testing using new eddy currents planar array probe. *2014 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings*, pages 583–589, 2014.
- [2] S.V. Adiban and M. Ramu. Study on the effect of weld defects on fatigue life of structures. *Materials Today: Proceedings*, 5(9, Part 1):17114 – 17124, 2018.
- [3] Patrick Bouteille and G Legros. Induction thermography as an alternative to conventional ndt methods for forged parts. *Proceedings of Quantitative InfraRed Thermography Conference*, page 134, 2014.
- [4] Evgeny Burmistrov, A.N. Matlashov, Henrik Sandin, Larry Schultz, Petr Volegov, and M Espy. Optimization and configuration of squid sensor arrays for a meg-mri system. *Applied Superconductivity, IEEE Transactions on*, 23:1601304–1601304, 2013.
- [5] 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.
- [6] Michael Faley, E.A. Kostyurina, Konstantin Kalashnikov, Yu V Maslennikov, Valery Koshelets, and Rafal Dunin-Borkowski. Superconducting quantum interferometers for nondestructive evaluation. *Sensors*, 17:2798, 2017.
- [7] Javier García-Martín, Jaime Gomez-Gil, and Ernesto Vázquez-Sánchez. Non-destructive techniques based on eddy current testing. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 11:2525–65, 2011.

-
- [8] I.N.Prassianakis. The non-destructive testing of ultrasound, an excellent too for solving fracture machanism problems. *Journal of Materials and Product Technology*, 26:71–88, 2006.
- [9] Albrecht Jander, Carl Smith, and Robert Schneider. Magneto-resistive sensors for nondestructive evaluation (invited paper). *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 5770, 2005.
- [10] H Kanai, K Noma, and J Hong. Advanced spin-valve gmr head. *Fujitsu Scientific and Technical Journal*, 37:174–182, 2001.
- [11] A. Khadersab and S. Shivakumar. Parametric vibration analysis of rotating machinery. *Materials Today: Proceedings*, 5(11, Part 3):25688 – 25696, 2018.
- [12] V.V. Kljuev. *NDT Techniques: Radiographic*. Elsevier, Oxford, 2001.
- [13] Kazusuke Maenaka. Hall sensors. *Sensors: A Comprehensive Survey*, pages 173 – 204, 03 2008.
- [14] M. Michniakova and L. Janousek. The impact of various waveform shapes on the response signal in pulsed eddy current nde. *2012 ELEKTRO*, pages 439–442, 2012.
- [15] 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.
- [16] K. Mirkhani, Ch. Chaggares, Ch. Masterson, M. Jastrzebski, T. Dusatko, A. Sinclair, R. J. Shapoorabadi, A. Konrad, and M. Papini. Theory of fluxgate sensor: Stability condition and critical resistance. *Sensors and Actuators A: Physical*, 233:522–531, 2015.
- [17] R. Nagendran, I. Mohanty, A. V. Thanikai Arasu, and R. Baskaran. Transient eddy current nde system based on fluxgate sensor for the detection of defects in multilayered conducting material. *Journal on Nondestructive Evaluation*, 37(52):1–6, 2018.
- [18] Damhuji Rifai, Ahmed Abdalla, Kharudin Ali, and Ramdan Razali. Giant magneto-resistance sensors: A review on structures and non-destructive eddy current testing applications. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 16:298–328, 2016.

- [19] David Rosenthal and James Trolinger. Holographic nondestructive testing. *Materials Evaluation*, 53, 1995.
- [20] R S Bhosale, P P Kumbhar, K S Mahajan, A K Yachkal, and Anil Katarkar. Study on leak testing methods. *IJSRD - International Journal for Scientific Research and Development*, pages 1618–1621, 2017.
- [21] Ramesh Singh. *Chapter 4 - Magnetic Particle Testing*. Butterworth-Heinemann, second edition edition, 2016.
- [22] Ramesh Singh. *Chapter 8 - Acoustic Emission Testing*. Butterworth-Heinemann, second edition edition, 2016.
- [23] A. Tamburrino and G. Rubinacci. Fast methods for quantitative eddy current tomography of conductive materials. *IEEE TRANSACTION ON MAGNETICS*, 42(8):2017–2028, 2006.
- [24] A. Tamburrino and G. Rubinacci. Fast methods for quantitative eddy current tomography of conductive materials. *IEEE TRANSACTION ON MAGNETICS*, 42(8):2017–2028, 2006.
- [25] F VACHER, C Gilles-Pascaud, Jean-Marc Decitre, C FERMON, and Myriam Pannetier-Lecoeur. Non destructive testing with gmr magnetic sensor arrays. *ECNDT*, pages 1–6, 2006.
- [26] Ioannis Valavanis and Dimitris Kosmopoulos. Multiclass defect detection and classification in weld radiographic images using geometric and texture features. *Expert Systems with Applications*, 37:7606–7614, 2010.
- [27] Z Wu, H Ma, and X Jia. Study on the surface defect of wc anvil by dye penetration inspection. *Superhard Material Engineering*, 19:12–14, 2007.
- [28] Xiaojie Xu, Ming Liu, Zhanbin Zhang, and Yueling Jia. A novel high sensitivity sensor for remote field eddy current non-destructive testing based on orthogonal magnetic field. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 14:24098–24115, 2014.
- [29] H.T. Zhou, K Hou, H.L. Pan, J.J. Chen, and Q.M. Wang. Study on the optimization of eddy current testing coil and the defect detection sensitivity. *Procedia Engineering*, 130:1649–1657, 2015.

Seznam obrázků

3.1	Dělení vad z hlediska místa výskytu	7
3.2	Princip vizuálního testování materiálu přímou metodou	8
3.3	Princip testování metodou akustických emisí	8
3.4	Princip vyšetřování pomocí laserového holografického měření	10
3.5	Princip laserové 3D profilometrie	11
3.6	Princip kapilární metody	11
3.7	Princip metody rozptylového magnetického toku	12
3.8	Přímá odrazová metoda s využitím dvojitého měniče	14
3.9	Úhlová odrazová metoda s úhlem 45°	15
3.10	Naklápění svazku vlnění pomocí fázového pole	15
3.11	Dvojice měničů vysílač-přijímač využívaná pro průchodnou metodu	16
3.12	Princip rozptylu akustické vlny na trhlině při difrakční metodě	17
3.13	Princip filmové radiografie	18
3.14	Princip Ukázka infračerveného testovacího řetězce	20
3.15	Exponenciální pokles elektromagnetické vlny ve směru průchodu materiálem	22
3.16	Princip průchozí sondy	26
3.17	Princip příložné sondy	26
3.18	Spirálová sonda	27
3.19	Podkovová sonda	27
3.20	Porovnání rastrování jednou sondou a použití pole cívkových sond	27
3.21	Výstupní signál absolutní sondy v okolí vady	28
3.22	Absolutní sonda s referenční cívkou	28
3.23	Princip diferenční sondy	29
3.24	Hallova sonda uložené mimo dosah magnetického pole	31
3.25	Hallova sonda v přítomnosti magnetického pole	31
3.26	Princip SQUID senzoru [4]	32
3.27	Ukázka průmyslově používaného Fluxgate senzoru [16]	33

3.28	Princip Fluxgate senzoru [16]	33
4.1	Základní princip a uspořádání defektoskopické sondy	34
4.2	Princip korelace signálu s referenčním pulzem	35
4.3	Princip měření referenčního pulzu	36
4.4	Příklady obdélníkových budících signálů a jejich příslušných frekvenčních spekter	37
5.1	Spínací obvod budící cívky	41
5.2	Zjednodušené náhradní schéma osciloskopické sondy	42
5.3	Využití rovinné symetrie	43
5.4	Rozložení velikosti magnetické indukce B v okolí měřicí sondy	43
6.1	Prototyp první sondy použitá pro ověření metody korelace	44
6.2	Měřicí sonda v blízkosti uměle vytvořené vady	45
6.3	Rozměry měřicí sondy včetně zdvihu	45
6.4	Měřicí stanoviště nedestruktivní defektoskopie	46
6.5	Pohyblivé zavěšení měřicí sondy	47
6.6	Konečná podoba měřicí sondy včetně zapouzdření a uchycení pro automatické měření	47
6.7	Budící a měřicí obvody sondy	48
7.1	Princip měření: nahoře – nárys, dole – půdorys	50
7.2	Schéma elektrického budícího obvodu	50
7.3	Referenční signál	51
7.4	Soubor naměřených dat	51
7.5	Detail naměřených dat v okolí hledané vady	52
7.6	Korelace naměřených dat s referenčním pulzem	53
7.7	Klíčovaná naměřená data	53
7.8	Korelace klíčovaných dat s referenčním pulzem	54
7.9	Ukázka odezvy systému na pulzní buzení	55
7.10	Suma diferenčních signálů – čas	56
7.11	Suma diferenčních signálů – vzorky	56
7.12	Korelace numerického řešení pro hloubku defektu 1 mm	57
7.13	Porovnání referenčních signálů	57
7.14	Soubor naměřených dat pro vadu o hloubce 0.5 mm	58
7.15	Soubor naměřených dat pro vadu o hloubce 1 mm	59
7.16	Soubor naměřených dat pro vadu o hloubce 2 mm	59
7.17	Soubor naměřených dat pro vadu o hloubce 3 mm	60

7.18	Výstupní funkce korelace pro všechny měřené hloubky vad . . .	60
7.19	Detail špičkových hodnot výstupních funkcí korelací	61
7.20	Porovnání referenčních pulzů pro materiál SUS316L	63
7.21	Ukázka vektoru naměřených dat v okolí podpovrchové vady . .	64
7.22	Korelační funkce naměřených dat s referenčním signálem	64
7.23	Porovnání korelačních funkcí pro povrchové vady vzorku č. 1 . .	65
7.24	Porovnání korelačních funkcí pro povrchové vady vzorku č. 1 - detail	65
7.25	Porovnání korelačních funkcí pro povrchové vady vzorku č. 2 . .	66
7.26	Porovnání korelačních funkcí pro povrchové vady vzorku č. 2 - detail	66
7.27	Porovnání korelačních funkcí pro podpovrchové vady vzorku č. 1	67
7.28	Porovnání korelačních funkcí pro podpovrchové vady vzorku č. 2	67
7.29	Blokový diagram automatického měřicího řetězce	69
7.30	Délky povrchový vad pro vzorek $h = 10$ mm	71
7.31	Délky povrchový vad pro vzorek $h = 30$ mm	71
7.32	Délky podpovrchový vad pro vzorek $h = 10$ mm	72
7.33	Délky podpovrchový vad pro vzorek $h = 30$ mm	73

Seznam tabulek

7.1	Sada povrchových vad	55
7.2	Sada povrchových vad ve vzorku č. 1	62
7.3	Sada povrchových vad ve vzorku č. 2	62
7.4	Sada podpovrchových vad ve vzorku č. 1	63
7.5	Sada podpovrchových vad ve vzorku č. 2	63
7.6	Tabulka výsledných hodnot pro povrchové vady vzorku č.1 . . .	70
7.7	Tabulka výsledných hodnot pro povrchové vady vzorku č.2 . . .	70
7.8	Tabulka výsledných hodnot pro podpovrchové vady vzorku č. 1	72
7.9	Tabulka výsledných hodnot pro podpovrchové vady vzorku č. 2	72