

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Detekce povrchových vad s využitím vířivých proudů**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2016/2017

**ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Viktor VACHUDA**  
Osobní číslo: **E13B0295P**  
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**  
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**  
Název tématu: **Detekce povrchových vad s využitím vířivých proudů**  
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Seznamte se s využitím vířivých proudů při detekci materiálových vad.
2. Navrhněte lineární řadu vířivoproudých sond a způsob vyhodnocení její odezvy.
3. Navrženou sensorovou řadu realizujte a proveďte experiment, při kterém detekujete umělou povrchovou nespojitost v laboratorním vzorku.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

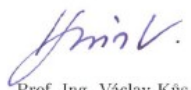
Vedoucí bakalářské práce: **Doc. Ing. Pavel Karban, Ph.D.**  
Katedra teoretické elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **14. října 2016**

Termín odevzdání bakalářské práce: **8. června 2017**

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



  
Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2016

## **Abstrakt**

Předložená práce se zabývá detekováním vad v materiálech pomocí vířivých proudů. Cílem práce bylo seznámit čtenářem s problematikou defektoskopického testování s využitím vířivých proudů a navrhnout sondy, které dokážou detekovat povrchové vady na laboratorním vzorku.

## **Klíčová slova**

Nedestruktivní defektoskopie, vířivé proudy, magnetické pole

## **Abstract**

The master thesis is focused on non destructive defektoskopy with use of eddy current. The goals of the thesis is to inform about the eddy current method and to build a defectoscopy probe which will be able to detect a defect in a testing materiál.

## **Key words**

Nondestructive defectoscopy, eddy currents, magnetic field

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 8.6.2017

Viktor Vachuda

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Pavlu Karbanovi, Ph.D. a Ing. Karlovi Slobodníkovi za konzultace a odborné rady při konstrukci defektoskopických sond.

Dále bych chtěl poděkovat Ing. Miloslavovi Procházkovi ze společnosti Tediko s.r.o., který mi poskytl odbornou konzultaci na téma defektoskopie a seznámil mě s tím, jak se tato metoda používá v praxi. A v neposlední řadě bych chtěl poděkovat i paní Ing. Vladislavě Sekerášové z Hlavního defektoskopického střediska kolejových vozidel Českých drah, za poskytnutí odborné literatury.

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>9</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>1 TEORETICKÝ ROZBOR</b> .....	<b>12</b>
1.1 PRINCIP VÍŘIVÝCH PROUDŮ.....	12
1.2 VZNIK VÍŘIVÝCH PROUDŮ.....	13
<b>2 DRUHY DEFEKTOSKOPICKÝCH SOND</b> .....	<b>16</b>
2.1 ABSOLUTNÍ SONDY .....	16
2.2 DIFERENČNÍ SONDY .....	16
<b>3 NÁVRH DEFEKTOSKOPICKÝCH SOND</b> .....	<b>17</b>
3.1 ÚVOD.....	17
3.2 ZPŮSOBY NAVRHOVÁNÍ .....	18
3.3 EXPERIMENTÁLNÍ NÁVRH.....	18
3.4 ANALYTICKÝ NÁVRH.....	19
3.5 NUMERICKÝ NÁVRH .....	20
<b>4 SAMOTNÝ NÁVRH</b> .....	<b>21</b>
4.1.1 <i>Návrh absolutní sondy</i> .....	21
4.1.2 <i>Návrh diferenční sondy</i> .....	22
<b>5 MĚŘENÍ</b> .....	<b>25</b>
5.1.1 <i>Způsob testování</i> .....	25
5.1.2 <i>Testovací vzorek</i> .....	26
5.1.3 <i>Postup měření</i> .....	26
5.1.4 <i>Bezporuchový stav</i> .....	27
5.1.5 <i>Měření maximální výchylky</i> .....	28
5.1.6 <i>Měření povrchové vady</i> .....	29
<b>6 ZÁVĚR</b> .....	<b>30</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>31</b>

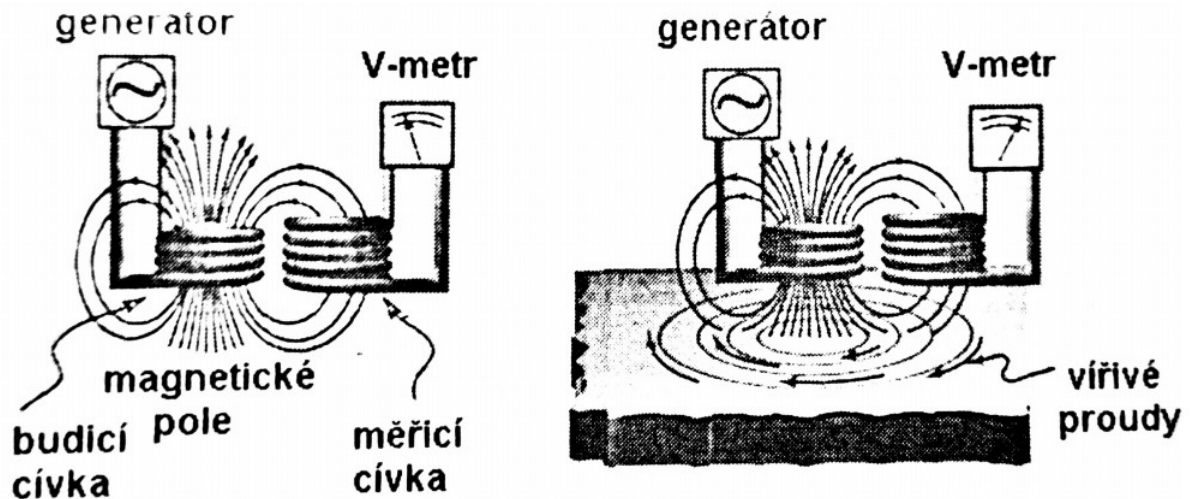


## Seznam symbolů a zkratek

$s$ .....	Hloubka vniku magnetické indukce [m]
$\omega$ .....	Úhlová rychlost [ $s^{-1}$ ]
$\mu_0$ .....	Permeabilita vakua [H/m]
$\mu_r$ .....	Permeabilita materiálu [H/m]
$\sigma$ .....	Měrná vodivost materiálu [ $Sm^{-1}$ ]
$f$ .....	Frekvence [Hz]
$\bar{Z}$ .....	Impedance [ $\Omega$ ]
$R$ .....	Elektrický odpor [ $\Omega$ ]
$L$ .....	Indukčnost [H]
$S$ .....	Průřez [ $m^2$ ]
$l$ .....	Délka vodiče [m]
$L$ .....	Indukčnost [H]
$\phi$ .....	Magnetický tok [Wb]
$B$ .....	Magnetická indukce [T]
$H$ .....	Intenzita magnetického pole [S]
$U$ .....	Elektrické napětí [V]

## Úvod

Předkládaná práce je zaměřena na detekci vad v materiálech pomocí vířivých proudů. Popisuje základní principy a dokumentuje návrh vířivoproudých sond.



Obrázek 1 Princip defektoskopie pomocí vířivých proudů [1]

Defektoskopie se zabývá zkoumáním vad v materiálech pokud možno nedestruktivní formou. Skládá se z mnoha metod a každá je vhodná pro určité aplikace. Výhoda defektoskopie pomocí vířivých proudů je její relativně nízká cena, možnost automatizace procesu vyhodnocování vad a jako jedna z mála defektoskopických metod umožňuje měřit i při vysokých teplotách [1].

Výhodou této metody je, že nám dovoluje měřit jak vady v materiálech, tak i další parametry mezi které patří: tloušťka materiálu, nebo tloušťka laku na měřeném materiálu. Dále mezi výhody patří možnost automatizace měření a jedná se o jednu z mála metod, která nám umožňuje měřit i při vysokých teplotách. [1].

### Využití metody vířivých proudů [1]:

- detekce materiálových diskontinuit např. trhlin, povrchových prasklin, přeložek, poruch svárů apod.
- měření tloušťky laků
- kontrola strukturního stavu kovů při tepelném zpracování
- kontrola mechanického napětí

**Výhody metody vířivých proudů [1]:**

- relativně levná kontrola vůči některým např. prozařovacím metodám
- možnost realizovat lehké přenosné přístroje pro nedestruktivní kontrolu
- možnost automatizace procesu
- není třeba před kontrolu speciálně upravovat povrch
- jde o bezkontaktní metodu
- jedná z mála metod umožňuje měření při vysokých teplotách (kontrola za tepla válcovaných materiálů)

**Nevýhody metody vířivých proudů [1]:**

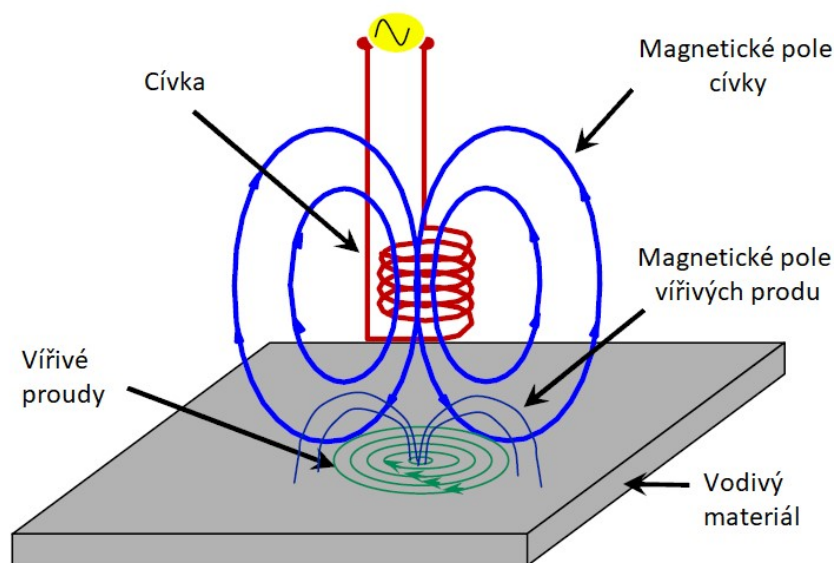
- nemožnost indikace vad hluboko pod povrchem
- značná citlivost na rozměru součásti, okrajový efekt.

# 1 Teoretický rozbor

Metoda je založena na elektromagnetické indukci. Základní úvahou je, že po přiložení budící cívky k materiálu, se materiál vystaví působení časově proměnného magnetického toku. Na základě toho se v materiálu začne indukovat napětí, které zapříčiní vznik vířivých proudů. To jestli a v jaké míře se v materiálu vyskytnou vířivé proudy, závisí na vlastnostech daného materiálu. Pokud se tedy v materiálu vyskytuje vada, která omezuje vznik těchto proudů, můžeme ji na tomto základě detekovat.

## 1.1 Princip vířivých proudů

Ke zkoumanému materiálu se přiloží budící cívka, která vystaví materiál působením magnetického pole o určité frekvenci a intenzitě. Díky tomuto časově střídavému magnetickému poli se v materiálu naindukují napětí, které zapříčiní vznik vířivého proudu. Velikost proudu závisí na síle budícího signálu, ale také na vlastnostech zkoumaného materiálu (elektrická vodivost, magnetická permeabilita, rozměry).



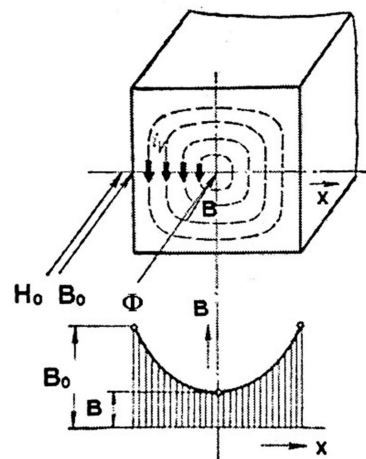
Obrázek 2 Princip vířivých proudů [5]

Výskytem vířivého proudu vzniká druhé magnetické pole, které působí v opačném směru než budící pole. Tato dvě magnetická pole se vektorově skládají ve výsledné pole, které závisí na vlastnostech zkoušeného materiálu [1].

Pokud se v materiálu nachází vada, má materiál v tomto místo jiné vlastnosti než v místech, kde byl materiál bez vad. To zapříčiní náhlou změnu výsledného magnetického pole. Tyto výchyly tak můžeme sledovat a určovat podle nich místa kde se nacházejí vady a podle velikosti výchyly můžeme i určit o jak velkou vadu se jedná.

## 1.2 Vznik vířivých proudů

Po přiložení budící cívky k testovanému materiálu, je materiál vystaven střídavém magnetickému toku  $\phi$ . Díky tomuto časově proměnnému toku se v materiálu indukuje elektrického pole, jehož siločáry jsou uzavřené křivky, obepínající tok  $\phi$  nebo jeho části a ležící v rovinách kolmých ke směru vektoru magnetické indukce. [2].



Obrázek 3 Vznik a účinek vířivých proudů ve feromagnetickém tělese [1]

Pro bližší pochopení této problematiky se musíme seznámit s Lenzovým zákonem, jehož znění je: „Indukovaný elektrický proud v uzavřeném obvodu má takový směr, že svým magnetickým polem působí proti změně magnetického indukčního toku, která je jeho příčinou.“ To v praxi znamená, že indukované proudy působí proti magnetickému toku a tím tento tok zeslabují. Tento jev je patrný z obrázku číslo 2, kde si můžeme všimnout, že největší zeslabení toku je ve střední části materiálu, protože střed je místem které obepínají všechny vlákna indukovaných vířivých proudů. Zde je tedy hodnota magnetické indukce  $B$  nejmenší. Pokud se posuneme dále od středu, je zde situace opačná. Magnetický indukce je zde vyšší a to z důvodu menšího množství smyček vířivých proudů. Pokud se dostaneme až na hranu tělesa, zjistíme, že se zde nenachází žádné smyčky vířivých proudů a proto je zde hodnota magnetické indukce srovnatelná s intenzitou magnetického pole  $H_0$  [2].

Tyto děje jsou ve skutečnosti složitější. Indukce v jednotlivých místech průřezu se liší nejen co do velikosti, ale i co do časového průběhu. Vířivé proudy nezpůsobí jen zeslabení magnetické indukce  $B$ , ale i časové posunutí oproti intenzitě magnetického pole  $H_0$  na povrchu tělesa. Vlivem nelineárnosti charakteristiky feromagnetických materiálů se liší průběhy indukce v různých místech průřezu i tvarem křivky [2].

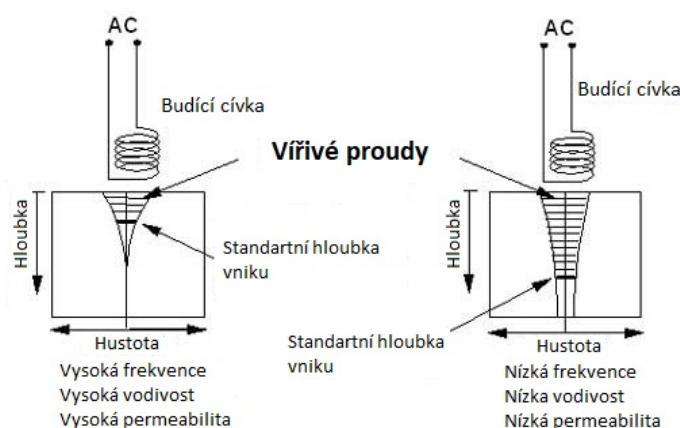
Ve střední části tělesa se tak setkáváme s tím, že vířivé proudy potlačují magnetickou indukci. K tomuto je však třeba přidat parametr zvaný hloubka vniku. Jedná se o vzdálenost pod povrchem, kde je indukce  $e$ -krát menší než na povrchu tělesa. Pro zjednodušení uvažujme rovný povrch s velkou tloušťkou, vystaveným magnetickou indukcí o sinusovém průběhu [2].

$$s = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_0 \mu_r \cdot \sigma}}$$

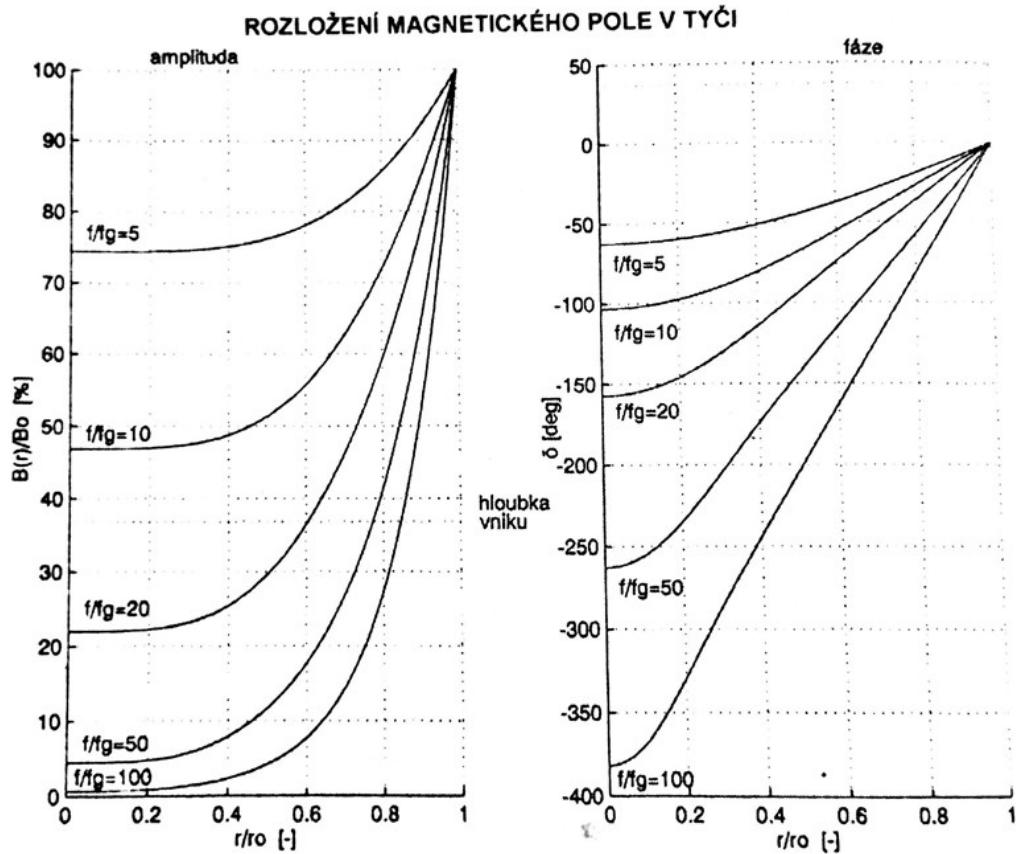
Rovnice 1 Vzorec pro výpočet hloubky vniku magnetické indukce [2]

Kde  $\omega$  je úhlová rychlost,  $\mu_0$  je permeabilita vakua ( $4\pi 10^{-7}$  H/m),  $\mu_r$  je relativní permeabilita a  $\sigma$  udává měrnou vodivost.

Z tohoto vztahu je patrné, že hloubka vniku závisí na vlastnostech zkoušeného materiálu. Přesněji řečeno na jeho vodivosti a relativní permeabilitě. Jelikož tyto parametry jsou v neferomagnetických materiálech konstantní, hloubku vniku tak můžeme měnit pouze frekvencí střídavého magnetizačního proudu. To znamená, že čím vyšší frekvence, tím menší hloubka vniku (viz obr. 4) [2].



Obrázek 4 Vliv frekvence na hloubku vniku [6]



Obrázek 5 Rozložení intenzity magnetického pole ve válcové tyči [1]

Z obr. 5 je patrné, jak magnetická indukce je magnetická indukce rozložena ve válcové tyči. Magnetické pole tedy směrem od středu k okraji tyče roste. Rozložení magnetického pole také ovlivňuje poměr mezi frekvencí budícího magnetického pole a charakteristickou frekvencí testovaného materiálu.

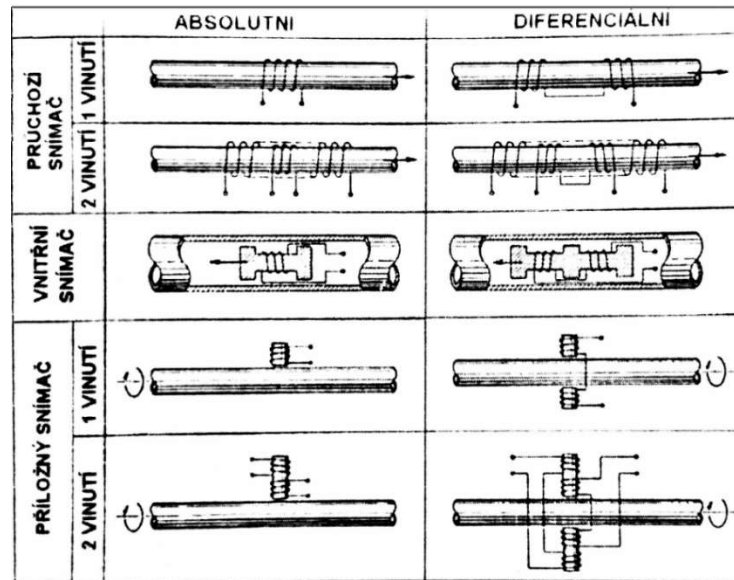
$$f_g = \frac{5066}{\sigma \mu_r d} \text{ [Hz, m}/\Omega\text{mm}^2, \text{cm}]$$

Rovnice 2 Výpočet charakteristické frekvence [1]

Charakteristická frekvence je daná vlastností testovaného materiálu. Jeho vodivostí  $\sigma$ , permeabilitou  $\mu_r$  a jeho průměrem  $d$ .

## 2 Druhy defektoskopických sond

Vířivoproudé sondy se rozlišují na určité typy. Hlavním rozdělení je na sondy absolutní a diferenční. Dále také sondy řadíme na sondy průchozí, vnitřní nebo příložné (viz obr. 6).



Obrázek 6 Základní uspořádání snímačů [1]

### 2.1 Absolutní sondy

Absolutní sondy mají pouze jedno vinutí, ze kterého získávají kontrolní informace. Při tom se může jednat pouze o jednu cívku, jež plní funkci cívky napájecí i měřicí. Vady jsou pak detekovány pomocí změny impedance cívky. Změna impedance závisí na permeabilitě materiálu, proto se sonda na každém druhu materiálu chová jinak. V praxi tak můžeme najít sondy přímo určené na daný typ materiálu.

Za absolutní cívku můžeme považovat i sondu se dvěma geometrickými oddělenými cívkami. Kde je jedna určená k napájení a druhé k měření. Výhodou tohoto řešení je, že je galvanicky oddělen budící a měřicí signál.

### 2.2 Diferenční sondy

Diferenční sondy mají vždy dvě cívky, z nichž získáváme požadované kontrolní informace. Na rozdíl od absolutních se zde pracuje s porovnáváním těchto dvou měřených cívek a na základě rozdílného napětí, které se na nich indukuje, můžeme určit, kde se vada v materiálu nachází.



## 3 Návrh defektoskopických sond

### 3.1 Úvod

Vířivoproudé sondy pro defektoskopie jsou založeny na relativně jednoduchém principu. Sondy se skládají z jedné, nebo více cívek v závislosti na daném typu sondy. Tvar cívek a jejich geometrické uspořádání se může lišit dle typu využití. Sondy se tak mohou tvořit cívky o průměrech menších než 2,5 mm, až o průměrech větších než 300 mm. Platí zde pravidlo, že čím menší je sonda, tím přesněji dokáže detekovat vadu. Samotná délka sond je také parametr, který při návrhu musíme brát v úvahu. V praxi se objevují sondy krátké i dlouhé, hranaté či oválné, magnetický jádrem, nebo bez něho [3].

Všechny tyto parametry ovlivňují [3]:

1. *Indukčnost cívky*
2. *Odpor cívky*
3. *Rozprostření magnetického pole v prostoru*
4. *Odezva cívky na změny vlastností v testovaném materiálu*
5. *Lift-off charakteristiky*
6. *Odezvy na zářezy, díry a další simulované vady*

Dále také může být design cívek omezen druhem testováním (specifické tvary, nebo velikosti), nebo technikou testování (sílu zdroje, impedančním přizpůsobením, atd.) [3].

Díky těmto komplikacím, musíme dbát na tyto parametry:

1. *Vlastnosti zdroje (výkon, frekvence a typ zdroje)*
2. *Minimální/maximální požadované, nebo dovolené magnetické pole*
3. *Požadovaná impedance sondy*
4. *Tvar výsledného magnetického pole*

Některé z těchto požadavků mohou být protichůdné. Z tohoto důvodu by měl být návrh založen na opakovaném upravování jednotlivých parametrů k dosažení požadovaných vlastností[3].

## 3.2 Způsoby navrhování

Existují tři základní metody pro navrhování defektoskopických sond. Ačkoliv se jedná o rozdílné metody, nejlepším způsobem navrhování je použití kombinace jednotlivých metod [3].

Metody mohou být rozděleny na:

1. *Experimentální, nebo empirický návrh*
2. *Analytický návrh*
3. *Numerický návrh*

Návrh cívky tak můžeme navrhnout zcela experimentálně a poté použít analýzu, nebo numerický model pro výpočet parametrů. Více praktické by bylo začít s analytickým vyjádřením (část analytického návrhu), navrhnout sondu dle vnitřních požadavků na užití a vyhodnotit sondu experimentálním měřením. Pokud je to nezbytné, může být proces opakován, dokud se výsledné parametry nesesetkají s požadovanými. V každém případě není možné docílit přesného analytického výpočtu. Výjimka může nastat u opravdu jednoduchého návrhu s jednodušší geometrií, ale i zde se musí brát v úvahu určitá zjednodušení při výpočtech a tak vznikající chyby. Numerické řešení má v tomto ohledu několik výhod [3].

Mezi tyto výhody patří:

1. *Všechny součásti sondy (cívka, jádro, pouzdro, atd.) jsou analyzovány*
2. *Schopnost přesnějšího návrhu. Využitím numerické metody jsme schopni získat celkem přesné výsledné parametry ještě dřív než je daná sonda sestavena.*
3. *Numerický návrh je používán v situacích, kde není možnost užití experimentální, nebo analytické metody (podpovrchové vady, vrstvení materiálu atd.)*

## 3.3 Experimentální návrh

Jak je možné pochopit ze samotného názvu, jedná se o způsob návrhu, který není založen na žádných předem definovaných vztazích. Jakkoliv se na tuto metodu podíváme, vždycky se více či méně jedná a proces pokusů a omylů. Se základní znalostí Maxwellových rovnic tak může navrhnout sondu, kterou sestavení podrobíme testování, ze kterého můžeme určit kvalitu dané sondy. Pro testování je potřeba provést měření na materiálu se vzorovými vadami, abychom byli schopni sledovat chování sondy na daných typech vad [3].

### 3.4 Analytický návrh

Analytický návrh se skládá z výpočtu impedance cívky danou její velikostí a počtem závitů. V případě že máme danou impedanci, které chceme docílit, můžeme tak výpočet obrátit a získat tak zbylé parametry. Během návrhu musíme počítat se vzájemnou závislostí určitých parametrů. Jako například vliv frekvence na impedanci [3].

#### Výpočet rezistence

$$\bar{Z} = R + j2\pi fL$$

*Rovnice 3 Vztah pro výpočet celkové impedance [3]*

Impedance je dána reálnou a imaginární složkou. Reálnou část představuje rezistivita vodiče, který tvoří cívku. Imaginární složka je tvořena samotnou indukčností cívky a frekvencí napájecího signálu.

$$R = \frac{l}{\sigma S}$$

*Rovnice 4 Výpočet odporu [3]*

Kde  $\sigma$  je elektrická vodivost,  $l$  je celková délka vodiče a  $S$  určuje průřez vodiče.

Tyto jednoduché výpočty reálné části impedance můžeme použít jenom v případě, že se jedná o cívku se vzduchovým jádrem. Pokud se jedná o cívku s magnetickým jádrem, nebo pokud je impedance vzduchové cívky v okolí s vodivými nebo magnetickými tělesy. V případě, že se tak stane, musíme při výpočtech uvažovat i ztráty v jádře, nebo testovaném objektu. Neexistuje žádné jednoduché obecné řešení pro výpočet těchto ztrát. Obzvláště ztráty ve feritových materiálech jsou velmi těžko určovány, kde musíme spoléhat na výrobci, že nám poskytnou dané výpočty [3].

## Výpočet reaktance

Reaktance může být jednoduše vypočítána, pokud uvažujeme návrh, kde sami určujeme parametry cívky, pokud se jedná o návrh, kde se snažíme docílit určité indukčnosti, musíme zanedbat vzájemné indukčnosti. Poté je indukčnost cívky ve vzduchu počítána přes následující vzorce [3].

Uvažujeme indukčnost dlouhého oválu, který je tvořen vodivým pásem

$$L = \frac{4\pi S}{l} \cdot 10^{-7}$$

*Rovnice 5 Výpočet indukčnosti [3]*

## 3.5 Numerický návrh

Cílem při vzniku této metody bylo zpřesnit samotný návrh tak, aby se co nejvíce blížil skutečnosti. Na rozdíl od analytické metody, ve které se počítá každý parametr podle odvozených vzorců, čistě numerická metoda hledá řešení v Maxwellových rovnicích uvažovaných v limitním prostoru [3].

Co se týče návrhu defektoskopických sond, numerická metoda nabízí určité výhody oproti ostatním metodám. Výsledné odezvy v sondách jsou počítány ze skutečného fyzikálního popisu reakcí materiálu na elektromagnetické pole. Vlastnosti materiálu, parametry cívek a případné vady jsou tedy zahrnuty v tomto matematickém modelu [3].

Sonda je tedy provede simulací, kde se zkoumá odezva cívky po přiložení sondy k vadě. Toto je velice důležitý krok. Protože výsledné charakteristiky jsou srovnatelné s očekávanými charakteristiky skutečné sondy [3].

Numerický návrh nám také navrhnout sondy o různých tvarech, na rozdíl od analytické metody, které je určena jenom na určité předem definované tvary (cívky s oválnými vodiči). V numerickém návrhu se tak můžeme setkat i s modelací cívky, kterou tvoří vodič o trojúhelníkovém průřezu [3].

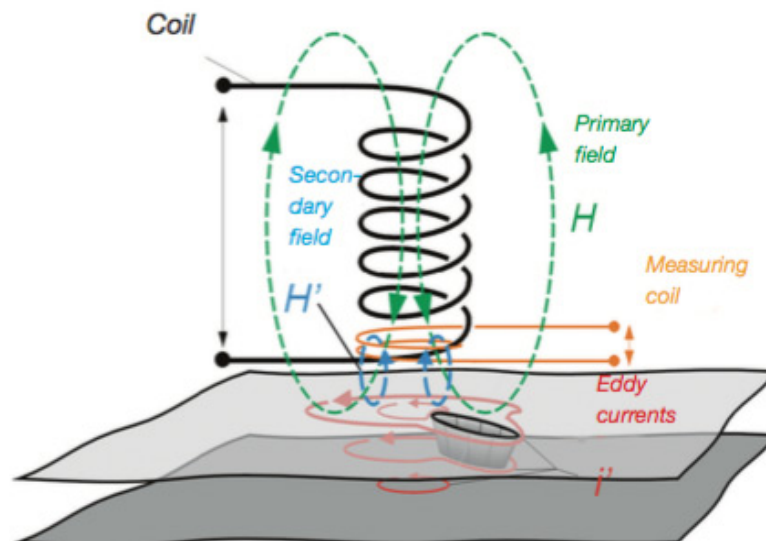
V dnešní době můžeme najít několik počítačových programů, které se zabývají numerickým návrhem. Za zmínku stojí například Agros2D, QuickField, nebo GetDP.

## 4 Samotný návrh

Tato práce byla zaměřená především na experimentální návrh defektoskopických sond, které budou schopny detekovat povrchové vady na laboratorním vzorku.

### 4.1.1 Návrh absolutní sondy

První experimenty, které jsem provedl, byly s absolutními sondami, které se skládají z jedné napájecí cívky a druhé cívky určené pro detekci změn magnetické indukce.



Obrázek 7 Absolutní sonda [4]

Problém u této sondy nastal s tím jak vady v materiálech detekovat. Přiložením sondy k místu, kde se nachází vada, dochází vlivem vířivých proudů k poklesu naindukovaného napětí na snímací cívce. Tyto změny jsou v řádech  $\mu\text{V}$  až  $\text{mV}$ . Tyto změny napětí nezpůsobují jenom vady v materiálu, ale také změny ve tvaru a tloušťce měřeného materiálu. Můžeme tedy říct, že daný typ se hodí jenom pro měření na objektech s jednoduchou geometrií.

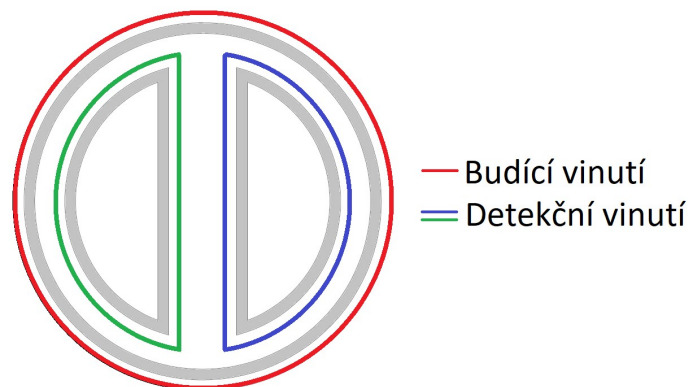
Po přiložení sondy k testovanému materiálu, si musíme definovat jak se má sonda chovat v bezporuchovém stavu. Tedy ve stavu, kdy nejsou vířivé proudy nijak omežovány a

potlačení magnetické indukce je tak největší. Tento krok je velice důležitý, bez něj bychom neměli naměřené hodnoty s čím porovnávat a měření by tak bylo zbytečné.

Pro přesné měření bychom potřebovali nějakou formu etanolu, který by nám pomohl určit, k jak velkému potlačení magnetické indukce dochází, když se v materiálu nenachází žádná vada. Při měření záleží na vlastnostech testovaného materiálu, zejména na jeho vodivosti a permeabilitě. Každý materiál tak vykazuje jiné hodnoty potlačení magnetické indukce, a proto se v praxi můžeme setkat se sondami, které jsou navrženy k měření jenom pro určité materiály.

#### 4.1.2 Návrh diferenční sondy

Rozdíl mezi absolutní a diferenční sondou je v tom, že diferenční se skládá z jedné napájecí cívky a dvěma detekčními. Díky tomu, že máme k dispozici dvě detekční cívky, je zde vyhodnocování chyb jednodušší.

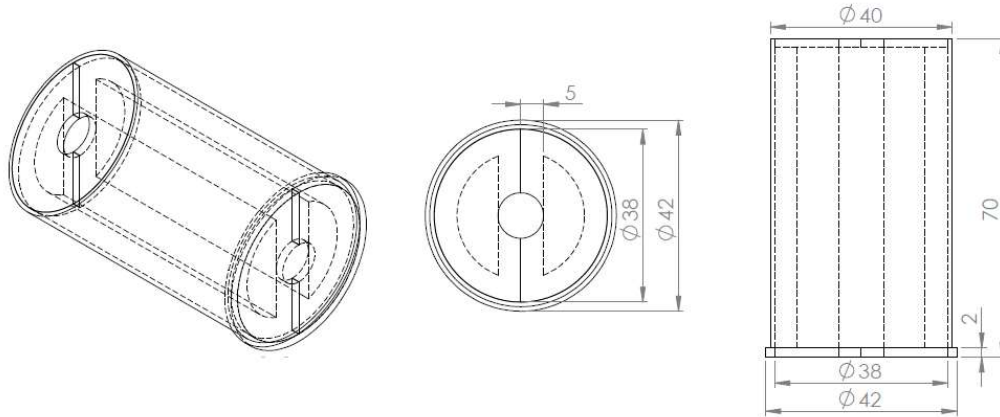


Obrázek 8 Návrh detekční cívky

Když sondu přiložíme k materiálu, který neobsahuje žádnou vadu, můžeme říct, že se do obou cívek bude indukovat stejné hodnoty napětí. Pokud se pod jednou z cívek objeví materiálová vada, dojde k lokálnímu omezení vířivých proudů, což má za následek menší potlačení magnetické indukce. Na cívce pod kterou se nachází vada, se tedy naindukuje vyšší napětí.

Pokud tedy během měření porovnáваме průběhy napětí těchto dvou cívek, můžeme tak celkem jednoduše určit, kde se nachází vada. Rozdíl těchto napětí může být velice malý (mV,  $\mu$ V).

Při návrhu bylo nalezeno řešení, které vidět na obr. č. 8. Jedná se o diferenční cívku, kterou tvoří oválná napájecí cívka a dvě detekční cívky ve tvaru D. V rámci této práce byly vyrobeny dvě sondy o různých průmětech.

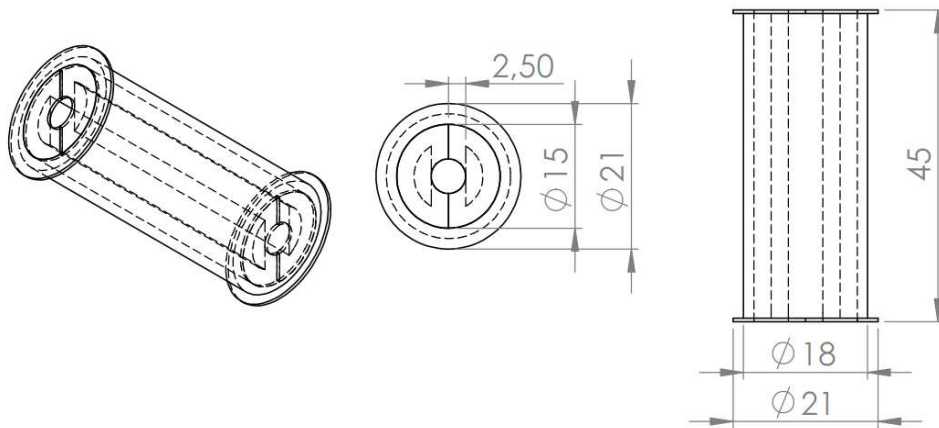


Obrázek 9 Návrh větší diferenční sondy

První sestavená sonda sloužila hlavně k potvrzení teoretických předpokladů. Sonda je se svým průměrem 38mm příliš velká pro detekci materiálových vad menších. Budící cívka má 80 závitů a je vytvořena vodičem o průřezu 1mm. Detekční cívky jsou navinuty vodičem o průřezu 0,2mm a počtem závitů navýšených na 100.



Obrázek 10 Fotografie větší sondy



Obrázek 11 Návrh menší diferenční sondy

Druhá sonda už byla sestrojena k samotné detekci vad na laboratorním vzorku. Důležité bylo sestrojít mnohem menší sond, která by na materiálové vady reagovala mnohem lépe. Průměr vyrobené sondy byl snížen na 18mm. Budící byla vyrobena z vodiče o průměru 0,2mm a počtem závitů 200. Detekční cívky se skládají ze stejného vodiče, ale počet závitů byl snížen na 100.



Obrázek 12 Fotografie menší sondy



## 5 Měření

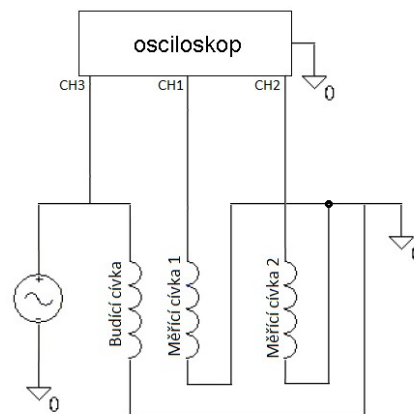
Všechny vyrobené byly podrobeny měření. Jako první tak proběhlo měření na absolutních a pak na diferenčních sondách. Jelikož výsledky diferenčních sond předčili svou přesností sondy absolutní. Je daná kapitola zaměřena na měření diferenčních sond.

### 5.1.1 Způsob testování

Sondy byly napájeny z harmonického zdroje Tektronix AFG3021 a průběhy napětí budící i detekčních cívek byly sledovány pomocí osciloskopu Tektronix TDS 2014B.

Výsledné detekování vady jsme prováděli pomocí osciloskopu. Sledováním napěťových průběhu na detekčních cívkách, jsme byli schopni určit, kde se v materiálu nachází vada.

Pokud se v materiálu objevila vada, došlo v daném místě k částečnému omezení vířivých proudů, což mělo za následek menší omezení elektromagnetické indukce od budící cívky. Pokud se tedy vada objevila pod jednou z detekčních cívek, naindukovala se na této cívce vyšší hodnota napětí než na cívce druhé.

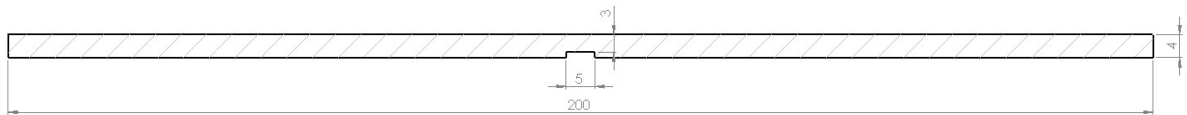


Obrázek 13 Schéma měření

Během našeho laboratorního měření, byla snaha o zesílení rozdílu napětí na detekčních cívkách, ale problém nastal při změnách budícího signálu. Každý užitý zesilovač byl více či méně frekvenčně závislý a vnášel do měření nechtěné rušení. Jelikož jsme během měření měnili hloubku vniku magnetické indukce, měnili jsme tak frekvenci budícího signálu, se kterou se měnila i výsledná hodnota zesílení. To mělo za následek nekonzistentní výsledky měření, které komplikovali detekování vad. Pokud bychom budící frekvenci neměnili, bylo by vhodné použít přístrojový zesilovač, který by zesílil napěťový rozdíl na detekčních cívkách.

### 5.1.2 Testovací vzorek

Měření bylo prováděno na testovacím vzorku, vyrobeném z feromagnetického materiálu o tloušťce 4mm. Na jedné straně byla vytvořena umělá vada o hloubce 1mm a šířce 5mm.



Obrázek 14 Testovací vzorek

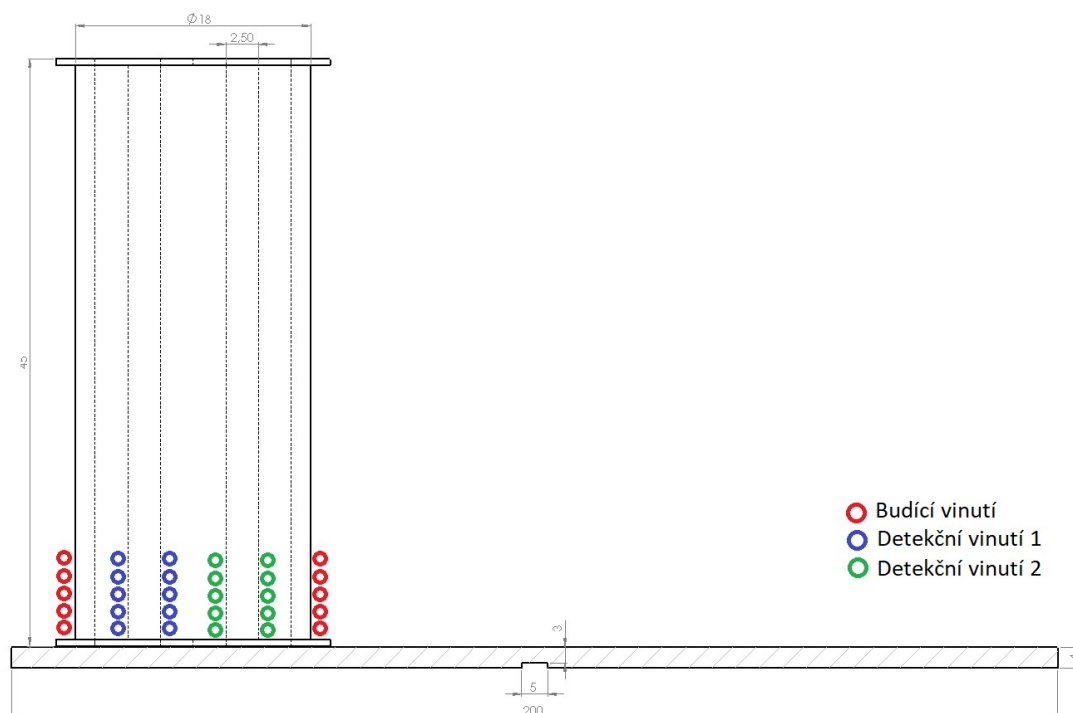
### 5.1.3 Postup měření

Po přiložení sondy k testovanému materiálu, jsme se nejprve museli ujistit, že se do obou detekčních cívek indukují stejné hodnoty napětí. Vzhledem k tomu, že cívky byly natáčeny ručně, jsou zde patrné drobné nerovnosti. Princip této metody je postaven na tom, že cívky jsou zcela identické. Drobné odchylky, které vznikly při výrobě, musíme při laboratorním měření zanedbat.

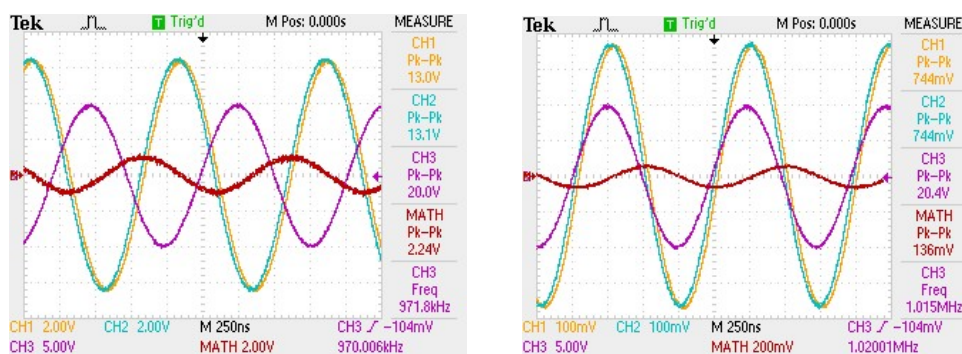
Měření jsme provedli třikrát. Poprvé jsme měřili průběhy naindukovaných napětí na detekčních cívkách, při položení sondy na místo bez materiálových vad. Druhým měřením jsme zjišťovali maximální odchylky napětí, pokud je sonda umístěna na hranu testovacího vzorku. A jako poslední jsme sondu přiložili na místo, kde byla umístěna materiálová vada.

Detekční cívky byly připojeny na první a druhý kanál. Třetí kanál byl určen pro sledování napájecího napětí. Osciloskop disponuje funkcí, která dokáže porovnávat dva průběhy. Bohužel nám výsledky této funkce nevycházeli s námi naměřenými hodnotami a tak jsme vady detekovali sledováním napětíových průběhů na obou detekčních cívkách a v případě rozdílu těchto průběhů, jsme byli schopni určit, kde se vada nachází.

### 5.1.4 Bezporuchový stav



Obrázek 15 umístění sondy pro zajištění rovnovážného stavu

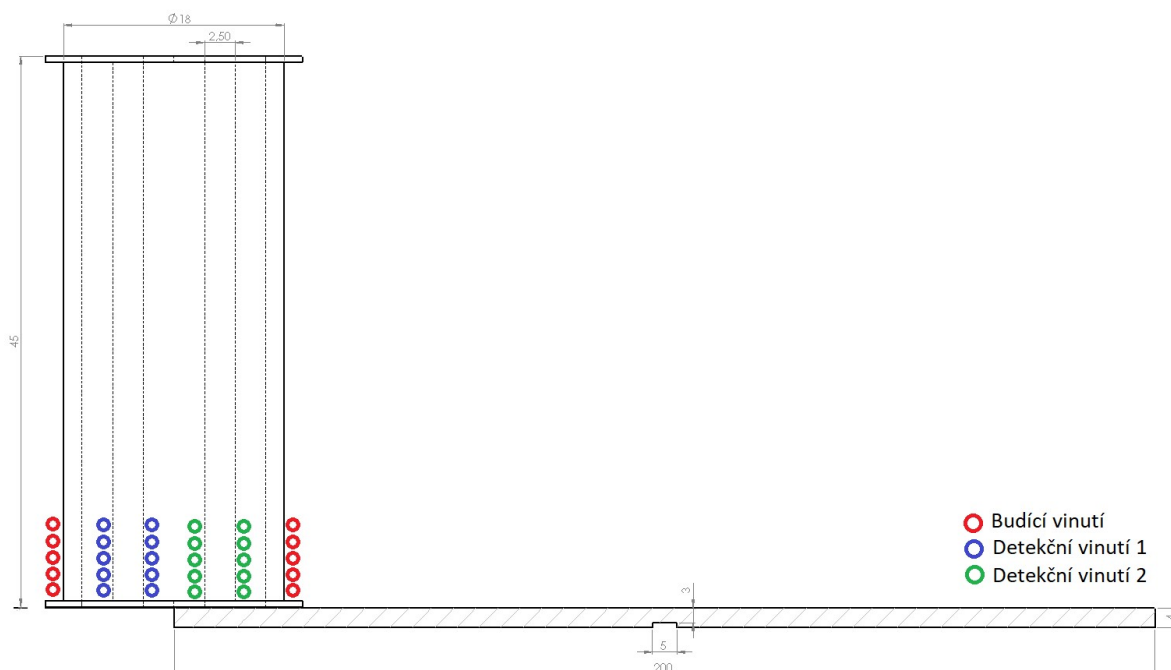


Obrázek 16 Vytvářený stav na měřicích cívkách (nalevo větší sonda, napravo menší sonda)

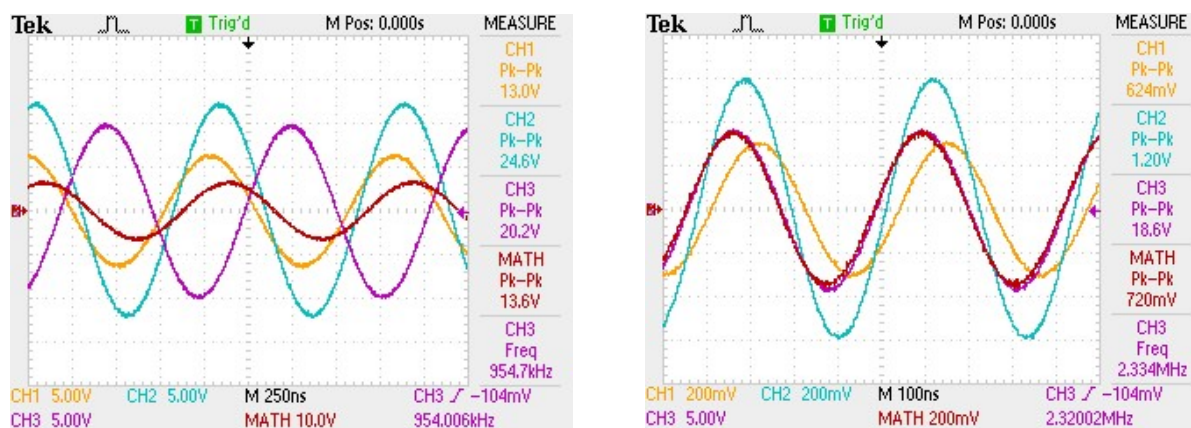
Zde můžeme vidět průběhy napětí v situaci, kdy je sonda přiložena k materiálu, který neobsahuje žádnou vadu. Vířivé proudy tedy nic neomezuje a jsou tak rovnoměrně rozloženy v okolí sondy. Do obou měřicích cívek se tak indukují stejné hodnoty napětí (CH1 a CH2).

Napětíové průběhy na měřicích cívkách jsou u větší sondy posunuty o 180°. Je to způsobeno tím, že na rozdíl od menší sondy jsou zde detekční cívky navinuty opačně oproti budícímu vinutí.

### 5.1.5 Měření maximální výchylky



Obrázek 17 Umístění sondy pro zajištění maximální výchylky

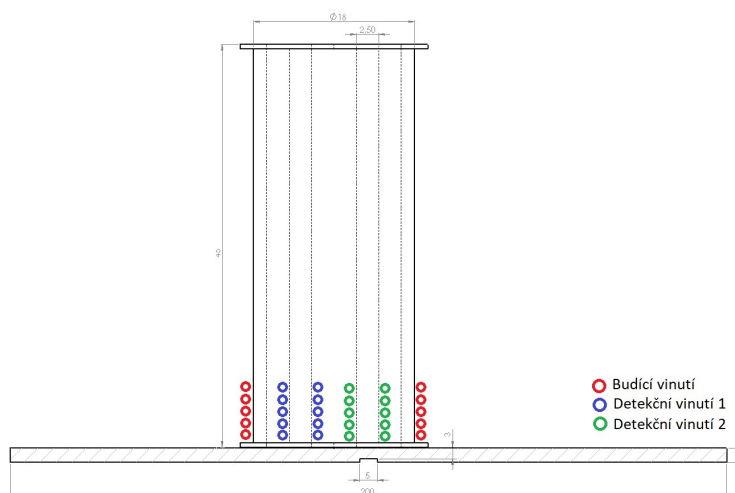


Obrázek 18 Maximální výchylka napětí na měřících cívkách (nalevo větší sonda, napravo menší sonda)

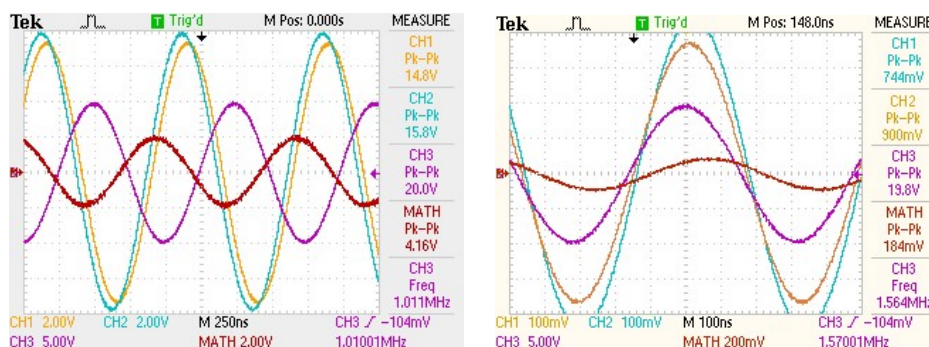
Během tohoto měření jsme byli schopni určit, jaké největší odchylky napětí můžeme u sond dosáhnout. Sonda je umístěna na hranu testovacího vzorku. Vířivé proudy tak omezují jenom jednu detekční cívku (CH1), na druhé cívice se tak indukují větší hodnoty napětí (CH2).

U větší sondy tento rozdíl dosáhl hodnoty 11,6V a u menší sondy 576mV. U obou sond je tedy napětí na detekční cívce, která je ovlivňována vířivými proudy bez mála poloviční.

### 5.1.6 Měření povrchové vady



Obrázek 19 Umístění sondy pro zjištění defektu



Obrázek 20 Výchylka napětí na měřících cívkách vzniklá vadou v materiálu (nalevo větší sonda, napravo menší sonda)

Poslední měření bylo vyhrazeno k samotné detekci vady. Sondu jsme přiložili tak, aby střed jedné z detekčních cívek byl umístěn přímo nad materiálovou vadou. Toto umístění je pro detekci dané vady nejpříhodnější. Vířivé proudy jsou v místě materiálové vady částečně omezeny a tak se do přiložené detekční cívky indukuje menší hodnota napětí (CH1) než do cívky druhé (CH2).

Větší sonda na tuto vadu reagovala rozdílem v napětí na detekčních cívkách o 1V, na rozdíl od sondy menší, na které jsme mohli pozorovat rozdíl v hodnotě 166mV. Nejedná se ovšem o rozdílovou hodnotu napětí, ale o poměr mezi hodnotami napětí na cívkách. Na velké sondě byl zaznamenán pokles napětí o necelých 7% na rozdíl od menší sondy, kde byl tento rozdíl necelých 18%. Z výsledků je patrné, že menší sonda je díky svému menšímu průměru daleko citlivější a tak i vhodnější pro detekci malých povrchových vad.

## 6 Závěr

Ačkoliv byl návrh založen na experimentální metodě, můžeme říct, že v laboratorním testu uspěli.

Úkolem bylo sestavit lineární řadu defektoskopických sond. Po nahlédnutí do problematiky defektoskopie jsem došel k závěru, že by sonda měla být tak velká jako je očekávaná vada v materiálu. Čím větší je sonda, tím větší je i plocha působení vířivých proudů. Pokud je tato plocha několikanásobně větší než samotná vada, nedojde zde k dostatečnému omezení vířivých proudů a tak nevznikne dostatečně velký napěťový rozdíl mezi detekčními cívkami. K přesné detekci materiálových vady tedy potřebujeme sondu, jejíž poloměr by byl přibližně stejný jako velikost vady samotné. V takovém případě by byl rozdíl v naindukovaných napětích největší a detekování by tak bylo nejsnadnější. V praxi ovšem velikost vady předem nevíme, ale i tak by sondy neměly mít průměr větší než 3cm.

U vytvořených prototypů je prostor k vylepšení. Snímací cívky mohly být navinuty tak, aby byly vzájemně otočené. Do každé cívky by se indukovalo napětí s obrácenou polaritou, což by mělo za následek jednodušší zpracování výchylek. Pro účely pochopení této problematiky však zvolené řešení bylo dostačující a výsledná detekce chyby byla úspěšná.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] KOPEC, Bernard. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí: (nauka o materiálu IV)*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008. ISBN 978-80-7204-591-4.
- [2] MÍŠEK, Bohumil a Luděk PTÁČEK. *Zkoušení materiálu a výrobků bez porušení. 2., rozš. vyd.* Praha: SNTL, 1973. Řada strojírenské literatury
- [3] MCMASTER, Robert C. *Nondestructive testing handbook*. New York: Ronald Press Co., 1986.
- [4] What are eddy currents. Dostupné z: <http://deltatest.de/about/what-are-eddy-currents/>
- [5] Eddy current. Dostupné z: <http://acndt.com/services/eddycurrent.asp>
- [6] Depth of Penetration and Current Density. Dostupné z: <https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/EddyCurrents/Physics/depthcurrentdensity.htm>

OBRÁZEK 1 PRINCIP DEFEKTSKOPIE POMOCÍ VÍŘIVÝCH PROUDŮ [1] .....	10
OBRÁZEK 2 PRINCIP VÍŘIVÝCH PROUDŮ [5] .....	12
OBRÁZEK 3 VZNIK A ÚČINEK VÍŘIVÝCH PROUDŮ VE FEROMAGNETICKÉM TĚLESE [1] .....	13
OBRÁZEK 4 VLIV FREKVENCE NA HLOUBKU VNIKU [6] .....	14
OBRÁZEK 5 ROZLOŽENÍ INTENZITY MAGNETICKÉHO POLE VE VÁLCOVÉ TYČI [1] .....	15
OBRÁZEK 6 ZÁKLADNÍ USPOŘÁDÁNÍ SNÍMAČŮ [1] .....	16
OBRÁZEK 7 ABSOLUTNÍ SONDA [4] .....	21
OBRÁZEK 8 NÁVRH DETEKČNÍ CÍVKY .....	22
OBRÁZEK 9 NÁVRH VĚTŠÍ DIFERENČNÍ SONDY .....	23
OBRÁZEK 10 FOTOGRAFIE VĚTŠÍ SONDY .....	23
OBRÁZEK 11 NÁVRH MENŠÍ DIFERENČNÍ SONDY .....	24
OBRÁZEK 12 FOTOGRAFIE MENŠÍ SONDY .....	24
OBRÁZEK 13 SCHÉMA MĚŘENÍ .....	25
OBRÁZEK 14 TESTOVACÍ VZOREK .....	26
OBRÁZEK 15 UMÍSTĚNÍ SONDY PRO ZAJIŠTĚNÍ ROVNOVÁŽNÉHO STAVU .....	27
OBRÁZEK 16 VYVÁŽENÝ STAV NA MĚŘÍCÍCH CÍVKÁCH (NALEVO VĚTŠÍ SONDA, NAPRAVO MENŠÍ SONDA) .....	27
OBRÁZEK 17 UMÍSTĚNÍ SONDY PRO ZAJIŠTĚNÍ MAXIMÁLNÍ VÝCHYLKY .....	28
OBRÁZEK 18 MAXIMÁLNÍ VÝCHYLKA NAPĚTÍ NA MĚŘÍCÍCH CÍVKÁCH (NALEVO VĚTŠÍ SONDA, NAPRAVO MENŠÍ SONDA) .....	28
OBRÁZEK 19 UMÍSTĚNÍ SONDY PRO ZJIŠTĚNÍ DEFektU .....	29
OBRÁZEK 20 VÝCHYLKA NAPĚTÍ NA MĚŘÍCÍCH CÍVKÁCH VZNIKLÁ VADOU V MATERIÁLU (NALEVO VĚTŠÍ SONDA, NAPRAVO MENŠÍ SONDA) .....	29
ROVNICE 1 VZOREC PRO VÝPOČET HLOUBKY VNIKU MAGNETICKÉ INDUKCE [2] .....	14
ROVNICE 2 VÝPOČET CHARAKTERISTICKÉ FREKVENCE [1] .....	15
ROVNICE 3 VZTAH PRO VÝPOČET CELKOVÉ IMPEDANCE [3] .....	19
ROVNICE 4 VÝPOČET ODPORU [3] .....	19
ROVNICE 5 VÝPOČET INDUKČNOSTI [3] .....	20

