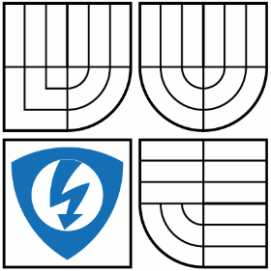


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

INDUKČNOSTNÍ SNÍMAČ

INDUCTIVE SENSOR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

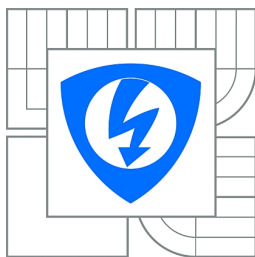
TOMÁŠ KOLEČEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. PETR BENEŠ, Ph.D.

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Automatizační a měřicí technika

Student: Tomáš Koleček

ID: 154768

Ročník: 3

Akademický rok: 2014/2015

NÁZEV TÉMATU:

Indukčnostní snímač

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je experimentální ověření vlastností indukčnostního snímače polohy a vodivosti.

1. Navrhněte a realizujte pracoviště pro automatizované měření impedance bezkontaktního parametrického indukčnostního snímače s otevřeným magnetickým obvodem
2. Změřte hodograpy indukčnostního snímače pro magneticky vodivý a magneticky nevodivý snímaný materiál a různou geometrii snímací cívky. Získané závislosti porovnejte s průběhy uváděnými v dostupné literatuře.
3. Proveďte citlivostní analýzu vlivu jednotlivých parametrů indukčnostního snímače a stanovte postup pro nalezení optimálního pracovního bodu snímače.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Kopec, B.: Nedestruktivní zkoušení materiálů. CERM, Brno, 2008

Termín zadání: 9.2.2015

Termín odevzdání: 25.5.2015

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá problematikou indukčnostního snímače s vnesenou impedancí, která je využívána pro nedestruktivní zkoušení materiálů. Popisuje a realizuje postup při měření metodou vířivých proudů s použitím příložné cívky. Práce obsahuje výsledné hodografy odpovídající literatuře pro magneticky vodivý a magneticky nevodivý měřený materiál. Poslední část práce se zabývá rozбором vhodné volby pracovního bodu snímače odvozeného od naměřených hodnot.

KLÍČOVÁ SLOVA

bezkontaktní měření, nedestruktivní testování, metoda vířivých proudů

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with indukčnostního-loaded impedance sensor, which is used for non-destructive materials testing. Describes a procedure for measuring the eddy current method using a straight coil. This thesis includes the final locus corresponding literature ferromagnetic and non-ferromagnetic for the measured material. The last part deals with the analysis of the appropriate choice of operating point derived from the sensor readings

KEYWORDS

contactless measurement, non-destructive testing, eddy current testing

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KOLEČEK, T. Indukčnostní snímač. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 36 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Indučnostní snímač“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení §11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Petru Benešovi, Ph.D. za vedení práce a za poskytnuté rady při řešení zadaných úkolů.

Brno

.....
(podpis autora)

OBSAH

Úvod.....	7
1 Teoretická část.....	8
1.1 Indukčnost.....	8
1.2 Permeabilita	8
1.3 Impedance	9
1.4 Metoda vířivých proudů.....	9
1.5 Princip metody vířivých proudů.....	10
1.5.1 Využití metody vířivých proudů	10
1.6 Teoretické základy zkoušení vířivými proudy.....	10
1.6.1 Metoda s průchozí cívkou	10
1.6.2 Metoda s příložnou cívkou.....	10
2 Měřicí soustava.....	14
2.1 HIOKI 3532-50 LCR HiTESTER.....	14
2.2 Základna s polohovacím zařízením pro měření cívek.....	15
2.3 Obslužný software pro HIOKI 3532-50 LCR HiTESTER	15
2.4 Zkušební cívky.....	15
3 Vlastní měření a zpracování	18
3.1 Odvození navrženého experimentu.....	18
3.2 Postup měření.....	18
3.3 Zpracování naměřených hodnot.....	19
3.4 Hodografy cívek 1 a 2 pro magneticky nevodivý a magneticky vodivý materiál.....	20
4 Stanovení pracovního bodu snímače pro měření vzdálenosti a vodivosti.....	27
4.1 Citlivostní analýza indukčnostního snímače při změně vodivosti	27
4.2 Citlivostní analýza indukčnostního snímače při změně vzdálenosti	28
4.3 Postup nastavení pracovního bodu indukčnostního snímače pro měření vodivosti a vzdálenosti	29
Závěr	31
Seznam obrázků	33
Seznam grafů.....	34
Seznam tabulek	35
Seznam příloh	36

ÚVOD

Tato práce se zabývá problematikou indukčnostního snímače s vnesenou impedancí. Jedná se o snímač z oblasti bezkontaktního nedestruktivního testování materiálů. Pro bezkontaktní měření testování materiálů lze využít mnoha fyzikálních principů.

Jeden z těchto principů využívá i snímač s příložnou cívkou. Metoda, kterou využívá tento snímač, se nazývá metoda vířivých proudů. Ta definuje, jak se bude měnit impedance cívky v závislosti na vodivosti a vzdálenosti přiloženého materiálu.

Průchodem střídavého budícího proudu vodičem cívky, vzniká v jejím okolí magnetické pole. Do tohoto pole je umístěn měřený objekt, který v závislosti na své vodivosti zpětně ovlivňuje magnetické pole cívky tím, že magnetické pole cívky do materiálu indukuje proud. Tento proud se nazývá vířivým proudem a působí proti původnímu budícímu poli.

Práce zahrnuje ověření tohoto fyzikálního jevu při různých podmínkách měření a následně určí, jak budící cívku navrhnout, aby jí bylo možné použít jako senzor vodivosti přikládáního objektu, nebo jako senzor polohy.

TEORETICKÁ ČÁST

Tato část práce se zaměřuje na popis běžně používaných metod využívajících vlastností indukčních snímačů. Dále je popsán princip metody vířivých proudů, jeho využití a rozbor fyzikálních závislostí, které souvisí s praktickou částí práce.

1.1 Indukčnost

Jedná se fyzikální veličinu popisující vznik a působení magnetického pole. To vzniká působením elektrického proudu I , který prochází elektrickým vodičem. Vyjadřuje schopnost elektrického vodiče vytvářet kolem sebe střídavé magnetické pole.

Indukčnost je jedna z charakteristických vlastností cívky a popisuje schopnost měnit energii elektrickou na energii magnetického pole. Indukčnost cívky je závislá na jejích geometrických rozměrech a tvarech, počtu a rozvržení závitů cívky a na magnetických vlastnostech prostředí, ve kterém se cívka nachází.

Vlastní indukčnost popisující indukčnost jedné cívky, je vyjadřována v jednotkách Henry [H] a značí se písmenem L . Je dána vztahem:

$$L = \frac{\Phi}{I} [H] \quad (1.1)$$

Kde Φ značí magnetický indukční tok a I protékající proud cívkou, který magnetický tok vyvolává. [4]

1.2 Permeabilita

Permeabilita vyjadřuje vliv určitého materiálu nebo prostředí na výsledné účinky působícího magnetického pole. Rozdělení těchto materiálů je provedeno na základě toho, zda dané prostředí tyto účinky zesiluje nebo zeslabuje.

Existují tři typy rozdělení materiálů:

- diamagnetické
- paramagnetické
- feromagnetické

Toto rozdělení je dáno relativní permeabilitou, která se označuje jako podíl permeability daného materiálu a permeability vakua. Vztah je tedy uváděn:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} [-] \quad (1.2)$$

Výsledkem je bezrozměrné číslo. U většiny materiálů je relativní permeabilita blízko $\mu_r=1$, což představuje slabou reakci na magnetické pole. Materiály s hodnotou relativní permeability $\mu_r>1$ jsou označovány jako paramagnetické, případně feromagnetické (při hodnotě $\mu_r \gg 1$). Tyto materiály se vyznačují daleko lepší magnetickou vodivostí. [4]

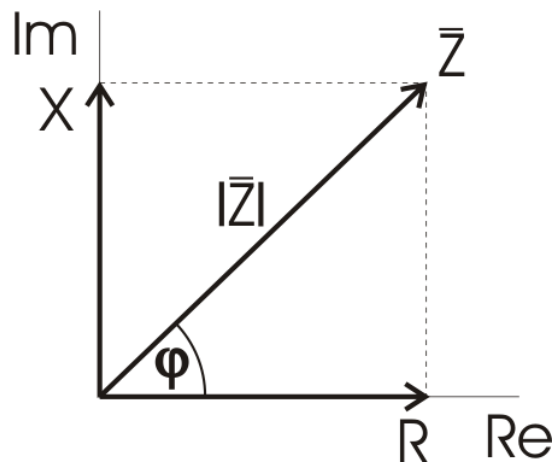
1.3 Impedance

Elektrická impedance Z je vyjadřována v jednotkách ohm $[\Omega]$ a charakterizuje vlastnosti prvku pro střídavý proud. Impedance popisuje zdánlivý odpor součástky a fázový posuv mezi napětím a proudem při průchodu střídavého proudu o dané frekvenci a skládá se z reálné a imaginární složky.

Na obrázku 1.1 je znázorněno rozložení v komplexní rovině, kde reálná složka impedance R je vynášena na reálnou osu a imaginární část impedance X je vynášena na imaginární osu. Úhel φ představuje fázový posuv mezi proudem a napětím. Z této charakteristiky vyplývají následující vztahy (1.1) a (1.2) [4]

$$Z = R + jX [\Omega] \quad (1.3)$$

$$Z = |Z|\cos\varphi + |Z|\sin\varphi[\Omega] \quad (1.4)$$



Obrázek 0.1: Rozložení imaginární a reálné složky impedance v komplexní rovině

1.4 Metoda vířivých proudů

Metoda vířivých proudů je jedna z několika metod nedestruktivního testování materiálů, které využívají elektromagnetických vlastností. Metoda vířivých proudů souvisí s objevem elektromagnetické indukce v roce 1831. Popisuje stav, kdy při změnách magnetického pole dochází ve vodičích, nacházejících se v tomto poli, k indukci elektrického napětí.

Elektrické napětí se nemusí indukovat pouze v elektrickém vodiči, ale v jakémkoliv elektricky vodivém prostředí, jež se nachází v oblasti měnícího se magnetického pole.

Jde-li o elektricky vodivé těleso, pak se v rovinách kolmých na vektor magnetické indukce indukují proudy, které nazýváme vířivými proudy. [3]

1.5 Princip metody vířivých proudů

Metoda je založena na tom, že zkoušený objekt, jenž má určitou elektrickou vodivost, magnetickou permeabilitu a určité rozměry je vystaven působení střídavého magnetického pole, vytvořeného budicí cívkou, napájenou střídavým proudem. V tomto objektu se následně indukují vířivé proudy, které zpětně působí svým magnetickým polem na původní (budicí) magnetické pole. Tyto dvě pole se následně skládají ve výsledné pole, jež bude záviset na elektrické vodivosti a magnetické permeabilitě zkoušeného objektu. Kromě toho závisí indukované napětí také na frekvenci budícího proudu (s rostoucí frekvencí se zvyšuje velikost vířivých proudů) a na tvaru objektu. [3]

1.5.1 Využití metody vířivých proudů

- Detekce materiálových diskontinuit např. trhlin, povrchových prasklin, přeložek, poruch svarů apod.
- Měření tloušťky stěn, měření naplátování feromagnetických i neferomagnetických vrstev na kovovém i nekovovém podkladu
- Kontrola povrchových vrstev kovů
- Kontrola záměn materiálů [3]

1.6 Teoretické základy zkoušení vířivými proudy

Nejčastěji používané případy uspořádání snímacích cívek vzhledem ke kontrolovanému objektu, dělíme podle uspořádání snímače na:

- průchozí
- příložné

Zkušební metody jsou pak označovány jako:

- metody s průchozí cívkou
- metody s příložnou cívkou [3]

1.6.1 Metoda s průchozí cívkou

Kontrolovaný materiál prochází snímačem s dvojitým vinutím magnetizačním N1 a měřicím N2. Primární magnetizační vinutí N1 je napájeno střídavým proudem, vytvářejícím střídavé magnetické pole. Rozložení tohoto magnetického pole ve zkoušeném tělese není vlivem skinefektu rovnoměrné. [3]

1.6.2 Metoda s příložnou cívkou

Cívka napájená střídavým proudem se radiálně přikládá k povrchu materiálu. Magnetické pole, vytvořené vířivými proudy zpětně ovlivňuje vlastnosti příložné cívky

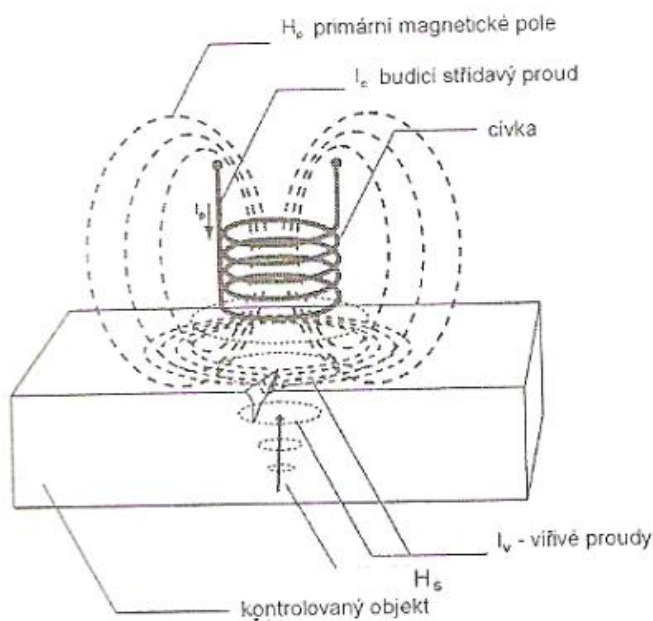
a způsobuje změnu její impedance. Poměry ukazuje obrázek 2.1, v němž H_p je primární magnetické pole od magnetizačního proud I_b , H_s je sekundární magnetické pole vířivých proudů I_v , indukovaných ve zkoušeném materiálu. Zpětné působení vířivých proudů v tomto případě bude opět souviset s elektrickými a magnetickými vlastnostmi zkoušeného materiálu jako u metody s průchozí cívkou, dále bude značně záviset na oddálení cívky od povrchu vzorku a na tloušťce měřeného vzorku. Oddalovací efekt lze v některých případech využít, např. při měření vrstev na vodivém podkladu.

Diagram na obrázku 2.3 udává poměrnou impedanci příložné cívky v závislosti na poměrných parametrech:

$$\alpha = \frac{2 \times h}{R} \quad (1.5)$$

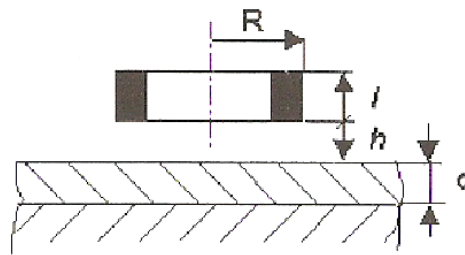
$$\beta = R \times \sqrt{\omega \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \sigma} \quad (1.6)$$

$$\xi = \frac{2d}{R} \quad (1.7)$$



Obrázek 0.2: Princip příložné cívky

Tyto proměnné parametry, jak je zřejmé z obrázku 1.3, zahrnují geometrii uspořádání příložné cívky a zkoušeného objektu, parametr β zahrnuje vlastnosti zkoušeného objektu a použitou frekvenci budícího proudu.

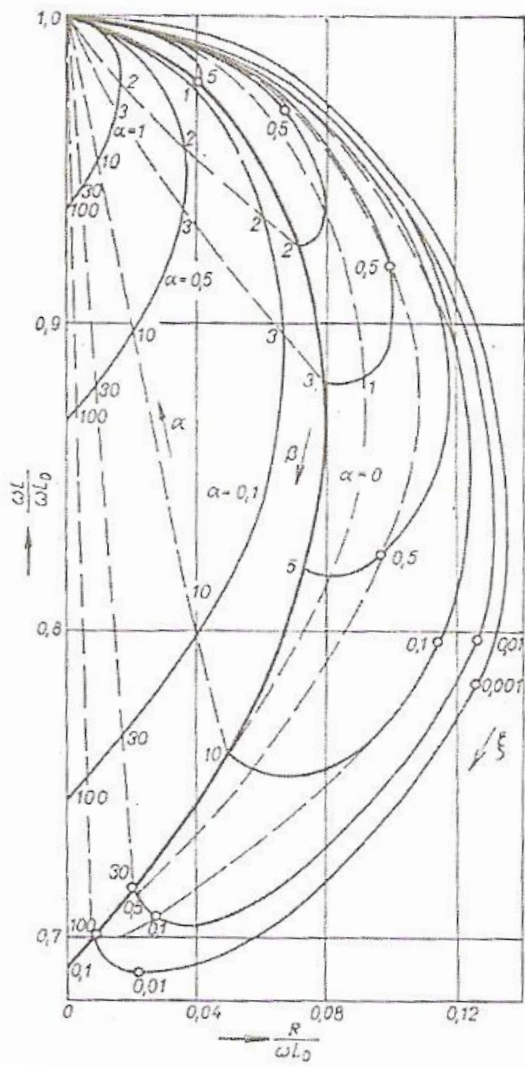


Obrázek 0.3: Geometrické uspořádání příložné cívky nad povrchem materiálu

Diagram na obrázku 1.4 platí pro magneticky nevodivý zkoušený objekt, jehož plochu vůči příložnému snímači považujeme za rovinnou.

Plná tlustá čára je geometrickým místem bodů impedance příložné cívky pro případ, že je snímač přímo na povrchu zkoušeného objektu dostatečné tloušťky ($\alpha = 0$) a mění se při tom hodnota parametru β , např. změnou vodivosti nebo změnou frekvence budícího proudu. Křivky vlevo od této trajektorie přísluší impedancím snímače nad povrchem v určité vzdálenosti ($\alpha = 0,1 ; 0,5 ; 1,0$). Čárkované linie nalevo vyznačují změny vyvolané změnou vzdálenosti cívky od povrchu při konstantních ostatních parametrech.

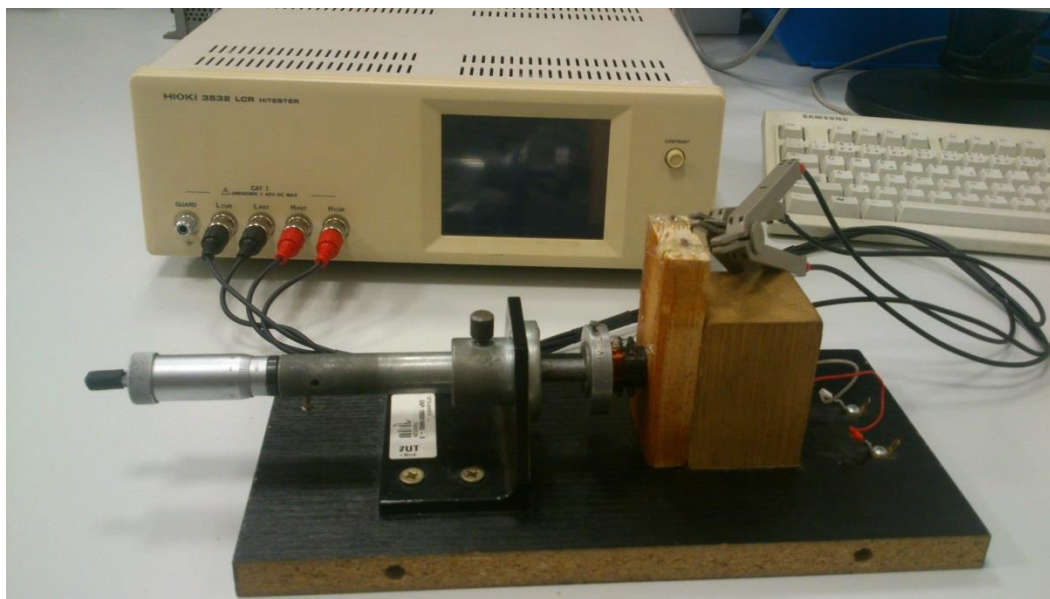
Plné křivky napravo od základní křivky jsou geometrickým místem koncových bodů impedance a platí pro případ, kdy tloušťka podkladového materiálu má konečnou hodnotu, vyjádřenou parametrem ξ . Směr ξ tedy zachycuje tloušťkový efekt vrstvy na vodivém základním podkladu, směr α zachycuje oddalovací efekt a směr parametru β vodivostní efekt. [1] [3]



Obrázek 0.4 Pracovní diagram příložné cívky

2 MĚŘICÍ SOUSTAVA

V této části práce jsou popsány součásti měřicí soustavy. Jsou zde uvedeny kritéria, podle kterých byly součásti vybírány a technické parametry jednotlivých bloků. Celkový náhled na pracoviště je na obrázku 2.1.



Obrázek 2.1 Celkový náhled měřicí soustavy

2.1 HIOKI 3532-50 LCR HiTESTER

Navržený experiment vyžaduje, aby byly měřené cívky napájeny střídavým proudem s různou frekvencí, proto byl vybrán HIOKI 3532-50 LCR HiTESTER. Tento měřicí přístroj slouží jako zdroj konstantního proudu a nabízí možnost měnit frekvenci tohoto proudu v rozsahu $f=50 \text{ Hz} - 5 \text{ MHz}$.

Jedná se o přístroj sloužící k měření impedancí. Na zobrazovacím panelu je možné v reálném čase zobrazovat až 4 veličiny. Jeho ovládání může být manuální, kdy se pro komunikaci s přístrojem používá dotykový displej. Možnost vzdáleného ovládání je pomocí rozhraní GPIB. Tato možnost je pro automatizaci měření vhodnější a to i v navržených experimentech zvolených v této práci.

Přístroj může měřit v reálném čase veličiny, které jsou uvedeny v následující tabulce 2.1. K jednotlivým veličinám jsou uvedeny i rozsahy měřených veličin.

Veličina	Rozsah
$ Z $, R, X	10,00 m Ω – 200,00 M Ω
L	16,000 nH – 750,00 kH
C	0,3200 pF – 370,00 mF
φ	-180,00 – +180,00
Q	0,01 – 999,99
$ Y $, G, B	5,0000 nS – 99,9999 S
Tan δ	0,00001 – 9,99999

Tabulka 2.1: Rozsah měřených veličin přístroje HIOKI

2.2 Základna s polohovacím zařízením pro měření cívek

Experiment zahrnuje změnu vzdálenosti mezi měřeným objektem a čelem cívky. Měřené cívky mají různé geometrické rozměry. Z tohoto důvodu je zvolena společná základna, kde může být uchycena jedna z měřených cívek a proti ní měřený objekt připevněný k manuálnímu posuvu. Pomocí posuvu je možné měnit vzdálenost mezi cívkou a měřeným objektem s přesností desetin milimetru.

Vývody cívky jsou připevněny na stranu základny, kde je možné připojit měřicí přístroj HIOKI. Rozložení celé základny přípravku je zobrazeno na obrázku 2.1.

2.3 Obslužný software pro HIOKI 3532-50 LCR HiTESTER

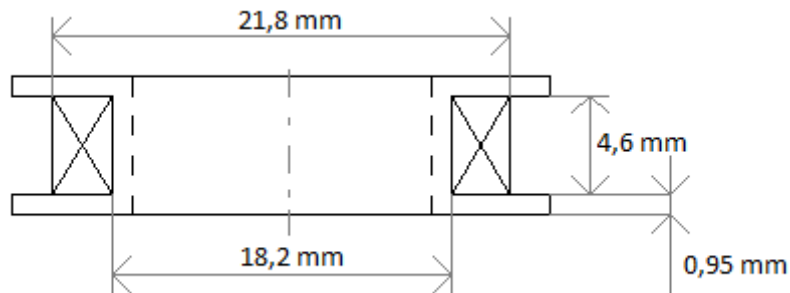
Jako obslužný software pro automatizaci měření cívek je vybrán obslužný software, který zajistí měření požadovaných veličin. Zároveň splňuje požadavek na změnu budící frekvence s určitým krokem. Další výhodou tohoto softwaru je uložení naměřených dat do textového souboru, které jsou následně zpracovávány graficky. Software umožňuje pomocí PC nastavovat požadované parametry přímo z jeho prostředí a není nutné manuálně zasahovat jiným způsobem do měřicího přístroje.

Během měření je využíváno zejména možnosti nastavení konstantní hodnoty proudu, dále nastavit počáteční hodnotu frekvence, konečnou hodnotu frekvence a také určení přesného kroku pro proměřování charakteristiky v požadovaném rozsahu. Další z používaných vlastností bylo nastavení času mezi nastavením hodnoty a po ustálení měřené hodnoty proběhne její odečtení.

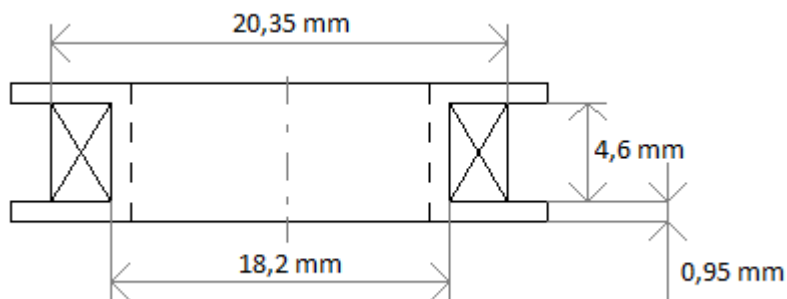
2.4 Zkušební cívky

Jelikož zadáním práce bylo porovnání cívek s různou geometrií, byly pro experiment zhotoveny dvě cívky s různým průměrem a různým počtem závitů. V práci budou dále označovány jako cívka 1 a cívka 2. Na obrázcích 2.2 a 2.3 jsou tyto cívky zobrazeny a

okótovány. V obou případech se jedná o vzduchové cívky, bez jádra namotané na PVC základnu.



Obrázek 2.2: Rozměry cívky 1



Obrázek 2.3: Rozměry cívky 2

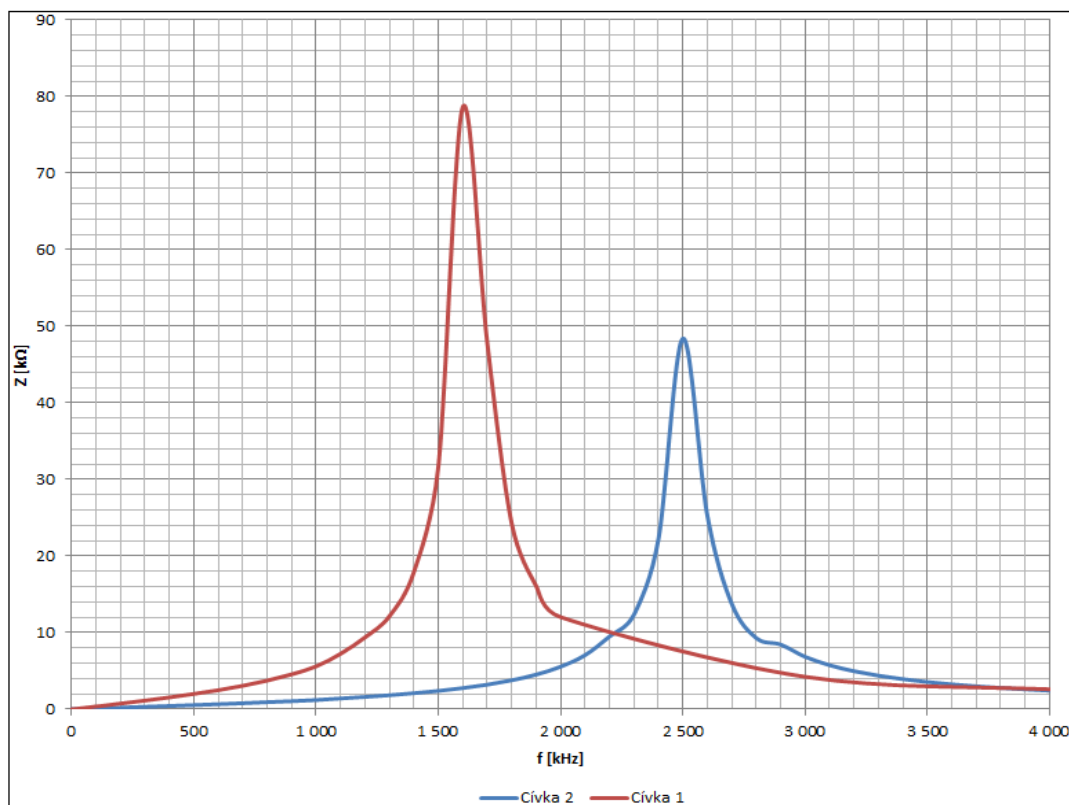
Aby bylo dosaženo správného přiložení měřeného objektu k čelu cívky, muselo být čelo souběžné a jeho šířka je zobrazena na obrázcích 2.2 a 2.3. V práci jsou uváděny výsledky i s touto započítanou hodnotou.

Jelikož má každá cívka různý počet závitů, tak se liší i jejich rezonanční frekvence. Ta ovlivňuje využitelný rozsah možných použitých budících frekvencí, jelikož při nízké rezonanční frekvenci se začne kapacitní složka cívky projevovat na nižším kmitočtu. Pro cívky pak již nemůžou platit dále uvedené vztahy a průběhy. Průběhy závislosti impedance na frekvenci cívky jsou uvedeny v grafu 2.1.

U těchto dvou cívek byly naměřeny různé hodnoty rezonanční frekvence f_r . Parametry cívek jsou uvedeny v tabulce 2.2.

	průměr cívky [mm]	poloměr cívky [mm]	počet závitů	Rezananční frekvence [MHz]
Cívka 1	20,35	10,175	150	1,627
Cívka 2	21,8	10,9	80	2,231

Tabulka 2.2: Parametry cívek 1 a 2



Graf 2.1: Závislost impedance cívky na budící frekvenci proudu

3 VLASTNÍ MĚŘENÍ A ZPRACOVÁNÍ

Tato kapitola je zaměřena na vlastní měření a ověřování výsledků s dostupnou literaturou. V první podkapitole je vysvětlen postup navrzení nejideálnějšího experimentu s ohledem na měřicí vybavení a závislosti příložných parametrických cívek. Následně jsou uvedeny použité vztahy pro vyjádření imaginární složky, reálné složky a vztahy pro normalizaci hodografů. Výsledné požadované průběhy jsou uvedeny v grafické podobě. V poslední části se práce zabývá slovním okomentováním naměřených hodnot v porovnání s průběhy uváděnými v literatuře.

3.1 Odvození navrženého experimentu

K dosažení požadovaných výsledků bylo potřeba navrhnout odpovídající experiment, umožňující dosažení výsledků, které jsou závislé pouze na požadovaných parametrech. Také bylo důležité z důvodů měření vysokého počtu hodnot co nejvíce experiment zefektivnit.

Měření požadovaných pracovních diagramů (hodografů) probíhá na základě rovnic (1.5) a (1.6) Z rovnice (1.5), je kromě poloměru cívky R , důležitá pro měření veličina h udávající vzdálenost mezi čelem cívky a měřeným objektem. Tato veličina bude ovlivňovat parametr α a ten se bude s narůstající vzdáleností zvyšovat. Tento jev je simulován pomocí polohovacího zařízení umístěného na základně. Nastavením dilatačního šroubu je možné měnit vzdálenost s dostatečnou citlivostí a v dostatečném rozsahu. Tímto způsobem bude parametr α proměnný a parametr β konstantní.

Druhý z nastavovaných parametrů vychází z rovnice (1.6). V této rovnici je nastavovanou veličinou ω . Její tvar je:

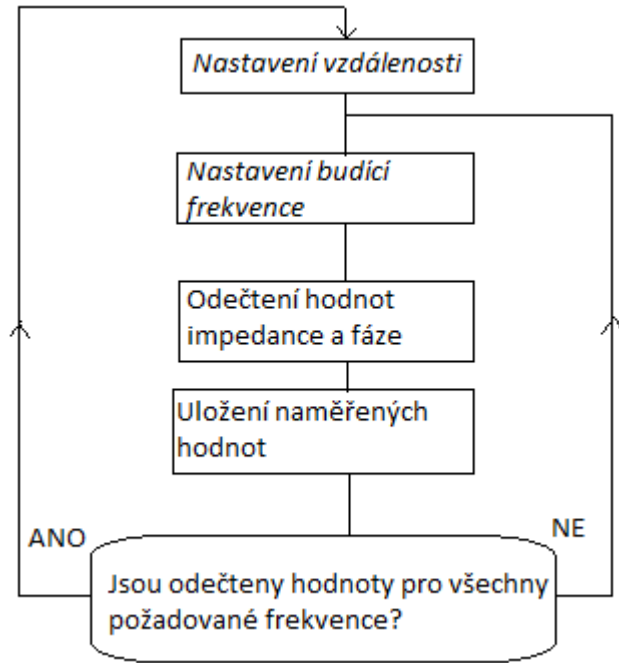
$$\omega = 2\pi f \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right] \quad (3.1)$$

Změnou frekvence f je ovlivňována ω , která poté přímo souvisí s parametrem β . Při změně frekvence se bude hodnota β pohybovat po křivce, která bude závislá na konstantních hodnotách α . Tímto způsobem bude parametr α konstantní a parametr β proměnný.

3.2 Postup měření

Postup měření jedné z cívek pro magneticky nevodivý nebo magneticky vodivý materiál je uveden diagramem na obrázku 3.1. Jako první bylo provedeno měření při podmínkách, kdy v okolí cívky nebyl umístěn žádný vodivý předmět. Toto měření bylo provedeno z důvodu normalizování hodnot vnesených impedancí a bude použito v následujících kapitolách. Následně byl pomocí polohovacího zařízení umístěn zvolený materiál do požadované vzdálenosti od čela snímače, nastavení se provádí dilatačním šroubem. Poté se za pomoci obslužného softwaru nastavila počáteční a konečná hodnota budící frekvence do cívky s požadovaným krokem. Z těchto hodnot lze již pomocí

vztahů uvedených v dalších kapitolách vynesť křivku odpovídající konstantní hodnotě α a proměnné hodnotě β v závislosti na budící frekvenci. Po odečtení a uložení všech měřených veličin bylo provedeno nastavení jiné vzdálenosti materiálu od čela snímače. Takto byly proměřeny všechny hodograpy cívek 1 a 2 pro oba materiály.



Obrázek 3.1: Postup měření

3.3 Zpracování naměřených hodnot

Z naměřených hodnot impedance Z a fáze φ lze pomocí vztahů (3.2) a (3.3) vypočítat reálnou složku impedance R_c a imaginární složku impedance X_c , které jsou stěžejní pro následné grafické zpracování. Níže jsou uvedeny vzorové výpočty imaginární a reálné složky pro cívku 1, při vzdálenosti $h=0$ mm a frekvenci $f=1$ kHz.

$$X_c = Z_c \cdot \sin(\varphi) = 5,724 \cdot \sin(32,59) = 3,083 \text{ } [\Omega] \quad (3.2)$$

$$R_c = Z_c \cdot \cos(\varphi) = 5,724 \cdot \cos(32,59) = 4,823 \text{ } [\Omega] \quad (3.3)$$

Takto byly vyjádřeny všechny naměřené hodnoty. Označení X_c , R_c odpovídá imaginární, respektive reálné složce impedance, která byla odečtena při měření, kdy byl před čelem snímače umístěn materiál.

Vynesení hodografu se provádí za pomoci normalizovaných hodnot. Pro normalizaci se využijí referenční složky impedance X_0 a R_0 vzpomínané dříve. Vzorové výpočty těchto složek jsou uvedeny níže za předpokladu měření cívky 1 při $f=1$ kHz bez materiálu v okolí cívky.

$$X_0 = Z_0 \cdot \sin(\varphi) = 5,826 \cdot \sin(39,84) = 3,733 \text{ } [\Omega] \quad (3.4)$$

$$R_0 = Z_0 \cdot \cos(\varphi) = 5,826 \cdot \cos(39,84) = 4,447 \text{ } [\Omega] \quad (3.5)$$

Za předpokladu znalosti těchto dvou složek je možné hodnoty normalizovat vztahem (3.6) pro normalizovanou hodnotu reálné složky a vztahem (3.7) pro normalizovanou hodnotu imaginární složky. Jedná se o bezrozměrné hodnoty. Jsou zde opět uvedeny i příklady výpočtu. Tyto hodnoty byly použity při vynášení hodografů.

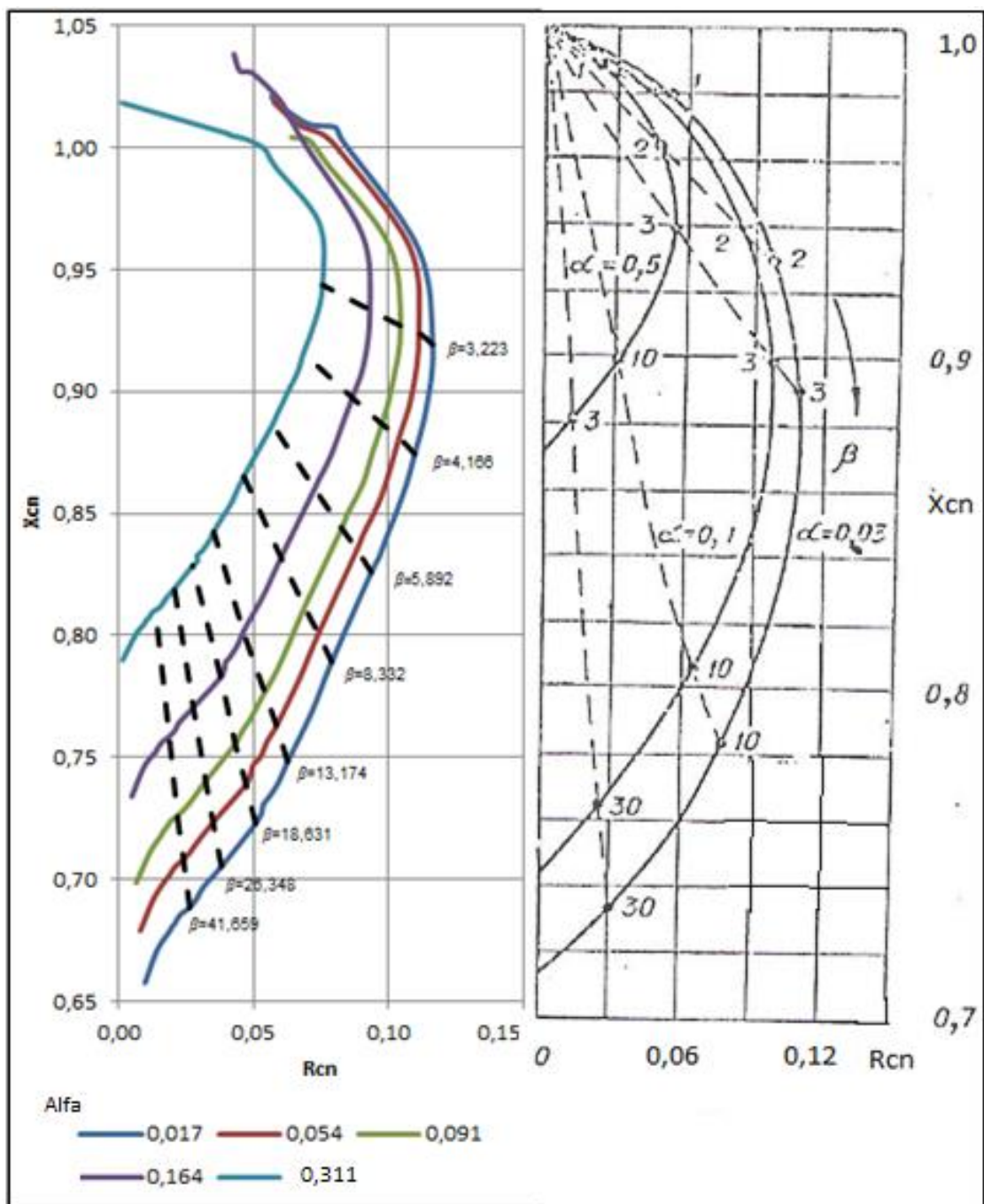
$$R_{cn} = \frac{R_c - R_0}{X_0} = \frac{4,823 - 4,447}{3,733} = 0,100 \text{ } [-] \quad (3.6)$$

$$X_{cn} = \frac{X_c}{X_0} = \frac{3,083}{4,823} = 0,639 \text{ } [-] \quad (3.7)$$

3.4 Hodografy cívek 1 a 2 pro magneticky nevodivý a magneticky vodivý materiál

Předmětem výzkumu bylo porovnání hodografů získaných z naměřených hodnot při různých geometriích cívek. Byly tedy zhotoveny dvě cívky s různým počtem závitů a s tím také souvisí rozdílný poloměr cívky.

Z normalizovaných hodnot byl vynesena hodograf 3.1 (vlevo) pro cívku 1 a 3.2 (vlevo) pro cívku 2. Plná tlustá křivka je geometrickým místem bodů impedance příložné cívky pro případ, že je snímač přímo na povrchu materiálu ($\alpha=0$) a mění se při tom hodnota parametru β , např. změnou vodivosti nebo změnou budící frekvence. Křivky vlevo odpovídají impedancím snímače nad materiálem v určité vzdálenosti. Čárkované čáry nalevo vyznačují změny vyvolané změnou vzdálenosti cívky od materiálu při konstantních ostatních parametrech.



Graf 3.1: Hodograf cívky 1 pro magneticky nevodivý materiál (hliník) (vlevo) a průběh hodografu převzatý z literatury (vpravo)

Každému konečnému bodu přerušované čáry odpovídá konstantní hodnota β . Tato hodnota bude pro každou vzdálenost materiálu od cívky stejná. Vynesení této čáry bylo provedeno vynesáním a následným spojením bodů v různých vzdálenostech, ale při stejném budícím proudu.

Pro porovnání s průběhem uvedeným v literatuře [2] byly vypočítány hodnoty α a β uvedené v tab. 3.1 a 3.2. Ve vztahu je uveden vzorový výpočet pro příložnou cívku

1, za předpokladu, že budící frekvence $f=1$ kHz a příkládaným materiálem je magneticky nevodivý materiál přiložený k čelu cívky.

$$\alpha = \frac{2 \times (h + h_s)}{R} = \frac{2 \cdot (0 + 0,095)}{10,900} = 0,017 \text{ [-]} \quad (3.8)$$

$$\beta = R \times \sqrt{\omega \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \sigma} =$$

$$= 10,900 \cdot \sqrt{2 \cdot \pi \cdot 1000 \cdot \mu_0 \cdot 1,000023 \cdot 37} = 3,227 \text{ [-]} \quad (3.9)$$

h [mm]	h0 [mm]	R [mm]	α [-]
0	0,095	10,9	0,017
0,2	0,095	10,9	0,054
0,4	0,095	10,9	0,091
0,8	0,095	10,9	0,164
1,6	0,095	10,9	0,311

Tabulka 3.1: Tabulka vypočtených hodnot α pro různé vzdálenosti, cívka 1

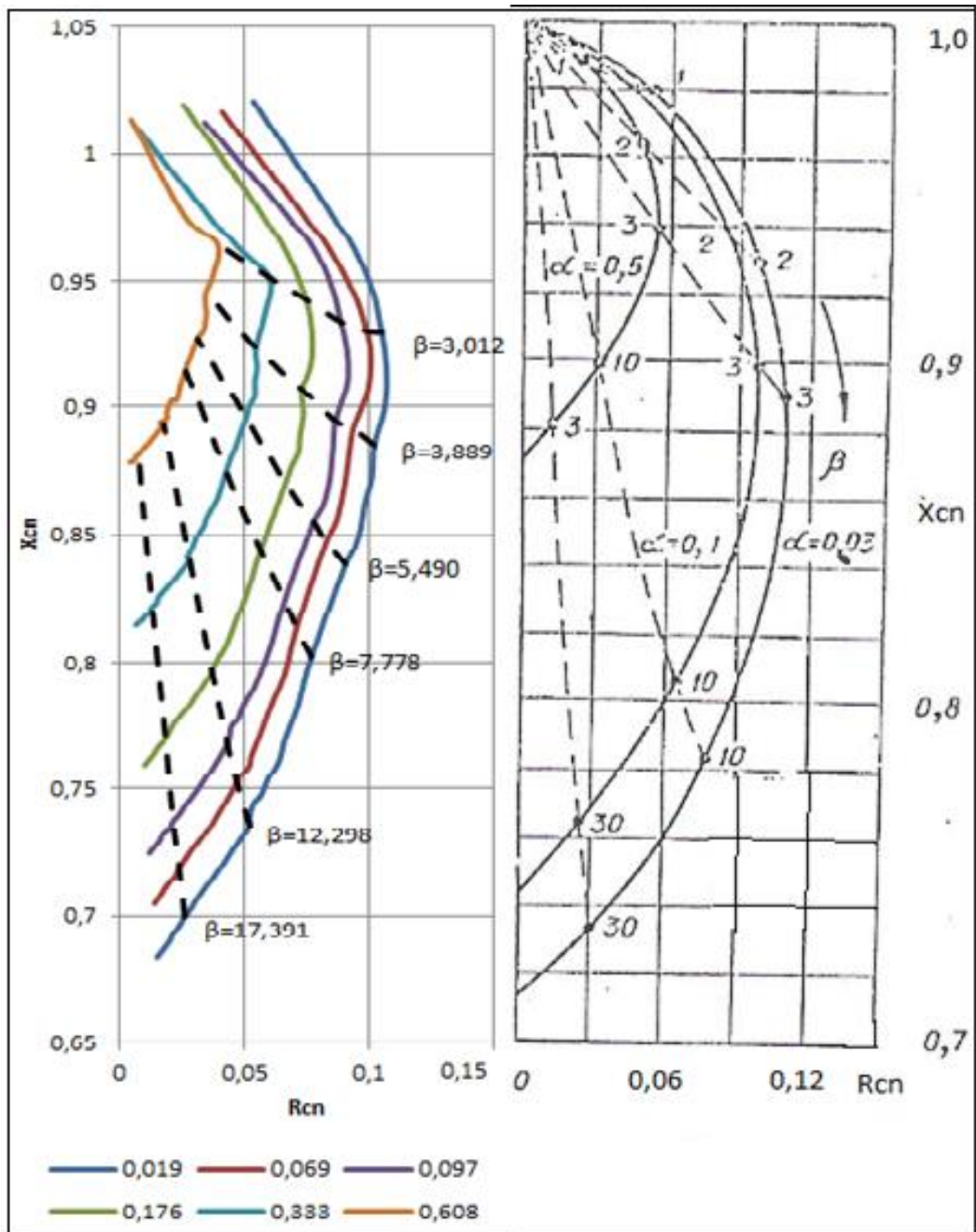
f [Hz]	R [mm]	σ [MS/m]	μ_r [-]	μ_0 [H/m]	β
300	10,9	37	1,000023	$1,26 \cdot 10^{-06}$	3,22
500	10,9	37	1,000023	$1,26 \cdot 10^{-06}$	4,16
1000	10,9	37	1,000023	$1,26 \cdot 10^{-06}$	5,89
2000	10,9	37	1,000023	$1,26 \cdot 10^{-06}$	8,33
5000	10,9	37	1,000023	$1,26 \cdot 10^{-06}$	13,17
10000	10,9	37	1,000023	$1,26 \cdot 10^{-06}$	18,63
20000	10,9	37	1,000023	$1,26 \cdot 10^{-06}$	26,34
50000	10,9	37	1,000023	$1,26 \cdot 10^{-06}$	41,65

Tabulka 3.2: Tabulka vypočtených hodnot β pro různé frekvence, cívka 1

Při porovnávání hodografů převzatých z literatury [2] pro cívku 1 v grafu 3.1 a pro cívku 2 v grafu 3.2 je patrné, že průběh cívky je posunut mírně nahoru ve směru osy y. Jelikož bylo možné nastavit budící frekvenci pouze na hodnotu $f=50$ Hz, není zřejmé, o jakou vzdálenost jsou hodnoty posunuty. Na první pohled jsou si však tvary a jednotlivé body podobné. Je možné potvrdit několik charakteristických vlastností, kterými se průběhy shodují. Maximální reálná vnesená impedance je při hodnotě kdy je parametr β přibližně roven hodnotě 3. Tato skutečnost platí i pro vnesený hodograf cívky 2. Jako další jsou porovnány přímky související se změnou vzdálenosti. Je zřejmé,

že při srovnání a vykompenzování posuvu osy y , se konečné body β umístěné na křivkách shodují s hodnotami na reálné i imaginární ose.

Měření bylo samozřejmě na rozdíl od teoretických hodnot ovlivněno chybou. Avšak při uvažování těchto skutečností se hodografy vynesené z naměřených hodnot shodují s teoretickými předpoklady a podařilo se je ověřit. Tato skutečnost platí pro cívku 1 i cívku 2.



Graf 3.2: Hodograf cívky 2 pro magneticky nevodivý materiál (hliník) (vlevo) a průběh hodografu převzatý z literatury (vpravo)

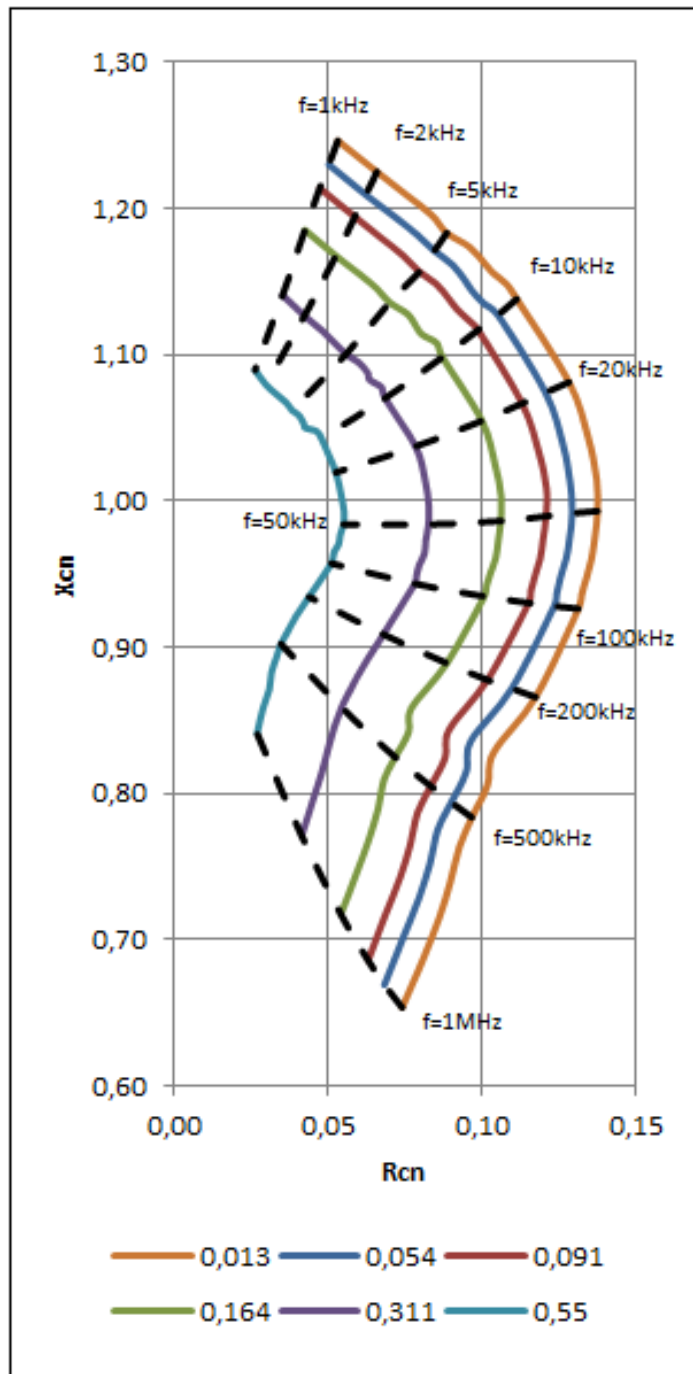
h [mm]	h0 [mm]	R [mm]	α_2 [-]
0	0,095	10,175	0,019
0,2	0,095	10,175	0,058
0,4	0,095	10,175	0,097
0,8	0,095	10,175	0,176
1,6	0,095	10,175	0,333
3	0,095	10,175	0,608

Tabulka 3.3: Tabulka vypočtených hodnot α pro různé vzdálenosti, cívka 2

f [Hz]	R [mm]	σ [MS/m]	μ_r [-]	μ_0 [H/m]	β
300	10,175	37	1,000023	$1,26 \cdot 10^{-6}$	3,012283
500	10,175	37	1,000023	$1,26 \cdot 10^{-6}$	3,888841
1000	10,175	37	1,000023	$1,26 \cdot 10^{-6}$	5,499651
2000	10,175	37	1,000023	$1,26 \cdot 10^{-6}$	7,777681
5000	10,175	37	1,000023	$1,26 \cdot 10^{-6}$	12,29759
10000	10,175	37	1,000023	$1,26 \cdot 10^{-6}$	17,39142
20000	10,175	37	1,000023	$1,26 \cdot 10^{-6}$	24,59519
50000	10,175	37	1,000023	$1,26 \cdot 10^{-6}$	38,88841

Tabulka 3.4: Tabulka vypočtených hodnot β pro různé frekvence, cívka 2

Další uvedený hodograp vychází ze stejných postupů měření. Příkládaným měřeným objektem je ale feromagnetický materiál. Jelikož se ale v žádné dostupné literatuře nepodařilo nalézt odpovídající hodograp, který by mohl být srovnávaný s naměřenými hodnotami provedeného experimentu, tak tato část nemohla být do práce zařazena. Jsou zde tedy pouze vyneseny hodograpy pro cívky 1 a 2.

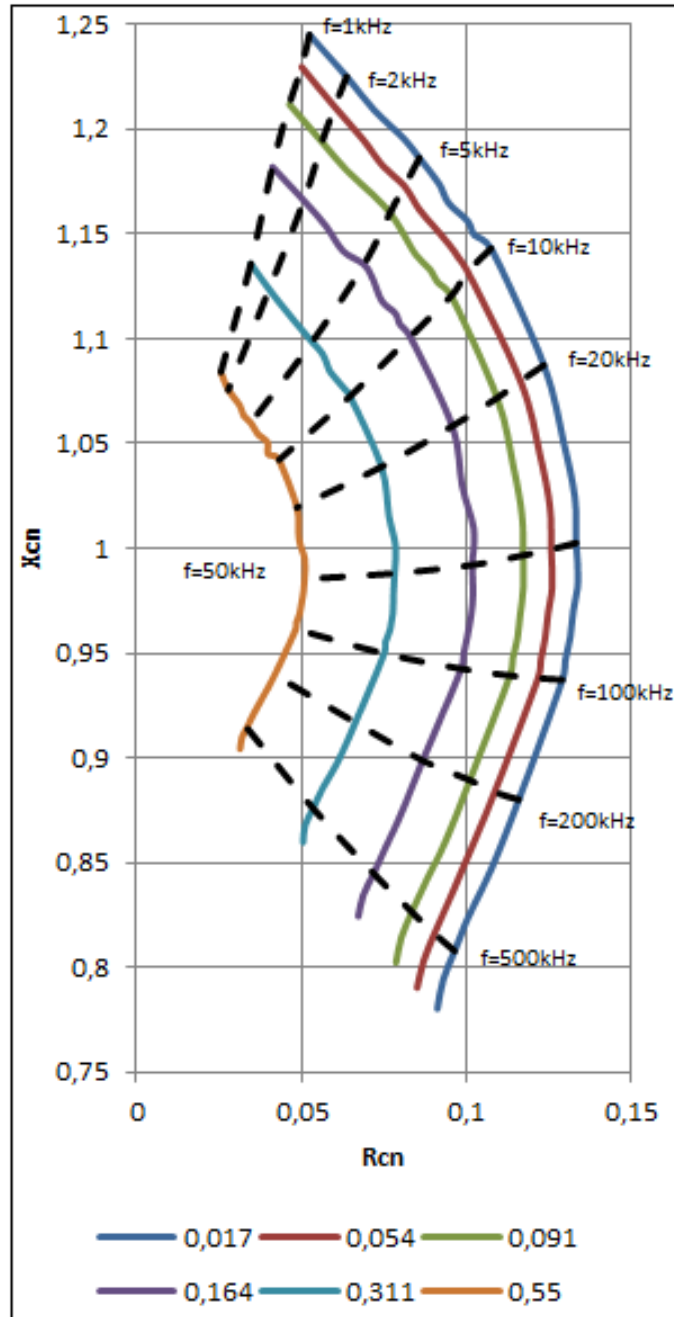


Graf 3.3: Hodograf příložné cívky 1 pro feromagnetický materiál (ocel)

V hodografu 3.3, který odpovídá cívce 1 i v hodografu 3.4 pro cívku 2 je zobrazen průběhy křivek, které jsou podobné křivkám při měření s magneticky nevodivým materiálem. Příkladaným feromagnetickým materiálem byla ocel. Jelikož nebylo možné stanovit její přesné parametry vodivosti, nemohla být spočítána hodnota β pro různá nastavení. V grafu jsou vyznačeny pouze konečné body odpovídající hodnotě frekvence.

Při konstantním parametru β a nastavované hodnotou vzdálenosti měřeného objektu od čela snímače se vynesené hodnoty pohybují téměř po přímkách směřujících do hodnoty $R_{cn}=0$ a $X_{cn}=1$.

Dále lze vyčíst, že nejvyšší hodnota vnesené reálné složky impedance je při kmitočtu $f=50$ kHz.



Graf 3.4: Hodograf příložné cívky 2 pro feromagnetický materiál (ocel)

4 STANOVENÍ PRACOVNÍHO BODU SNÍMAČE PRO MĚŘENÍ VZDÁLENOSTI A VODIVOSTI

V této kapitole se práce zaměřuje na stanovení pracovního bodu snímače. Na základě průběhu hodografů lze odvodit ideální nastavení parametrů snímače pro aplikaci měření, kde bude vyhodnocovanou veličinou elektrická vodivost, nebo bude stěžejní určit vzdálenost mezi měřeným objektem a čelem snímače.

4.1 Citlivostní analýza indukčnostního snímače při změně vodivosti

Pro vyhodnocování vodivosti je hlavním parametrem β . Bude-li měněna vodivost, frekvence, nebo průměr snímače, tak se bude hodnota pohybovat po křivce. Tvar křivky bude závislý na vzdálenosti snímače od zkoušeného objektu. Jedná se o křivku již dříve zobrazenou v hodogramech 3.1 a 3.2. Vyhodnocována tedy může být reálná složka impedance, nebo imaginární složka impedance. Bude záležet, která složka bude pro vyhodnocování vhodnější z hlediska realizace a především z pohledu citlivosti.

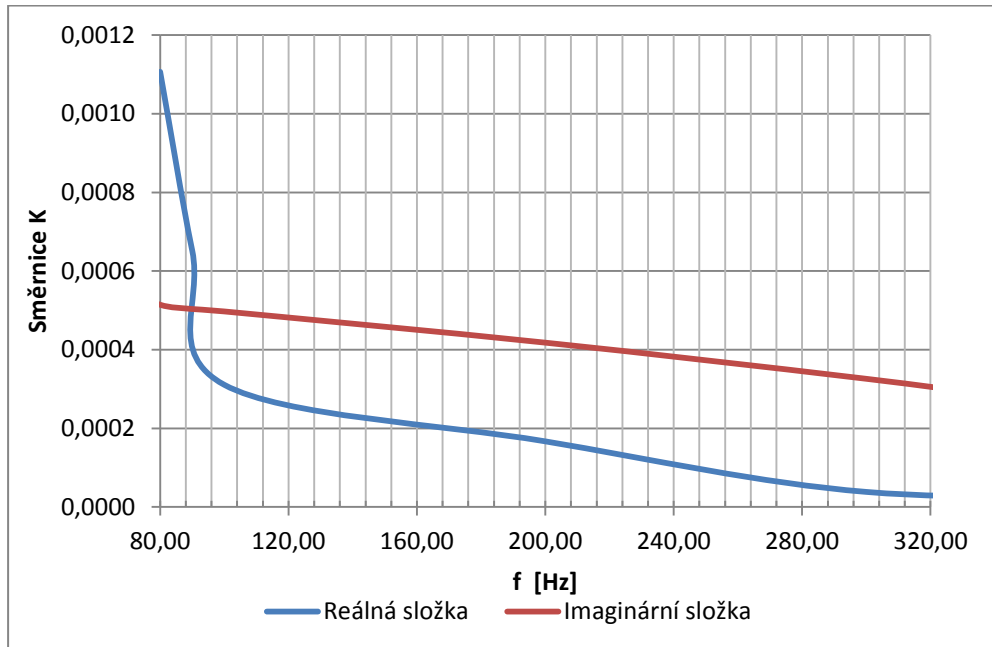
Vzhledem k tomu, že hodografy cívek 1 a 2 jsou souhlasné s hodografy z literatury [2]. V grafu 4.1 je vyneseno soubor hodnot, které odpovídají směrnici K v jednotlivých bodech budící frekvence. Postup a vzorový výpočet směrnice je uveden pomocí vztahů (4.1) a (4.2). Směrnice je počítána jako rozdíl imaginární, nebo reálné složky v závislosti k rozdílu frekvence v okolí požadovaného bodu. Následně jsou tyto směrnice průměrovány. Tento matematický postup není zcela korektní, ale vzhledem ke zvolenému postupu měření, kdy bylo proměřeno 10 hodnot na dekádu v logaritmických souřadnicích, byl zvolen tento postup. Vzorový výpočet je proveden pro cívku 1 při parametrech $\alpha=0,017$ a pro směrnici v bodě $f=1$ kHz. Výpočet je proveden pro normalizovanou reálnou impedance.

$$K1re = \frac{|Rcn1 - Xcn2|}{|f1 - f2|} = \frac{|0,0505 - 0,0568|}{|900 - 1000|} = 0,0000166 \quad [-] \quad (4.1)$$

$$K2re = \frac{|Rcn2 - Rcn3|}{|f2 - f3|} = \frac{|0,0568 - 0,0462|}{|1000 - 2000|} = 0,0000106 \quad [-] \quad (4.2)$$

$$Kre = \frac{K1 + K2}{2} = \frac{0,0000166 + 0,0000106}{2} = 0,00001363 \quad [-] \quad (4.3)$$

Kde K_{1re} představuje směrnici od nižší frekvence k hledané vyšší frekvenci. Tomu odpovídá R_{cn1} pro nižší hodnotu f_1 . Oproti tomu je hodnota R_{cn2} , která odpovídá reálná částí impedance na vyšším kmitočtu f_3 . Hledanou směrnici je poté algebraický průměr K_{r1re} a K_{r2re} .



Graf 4.1: Soubor směrnic pro jednotlivé frekvence

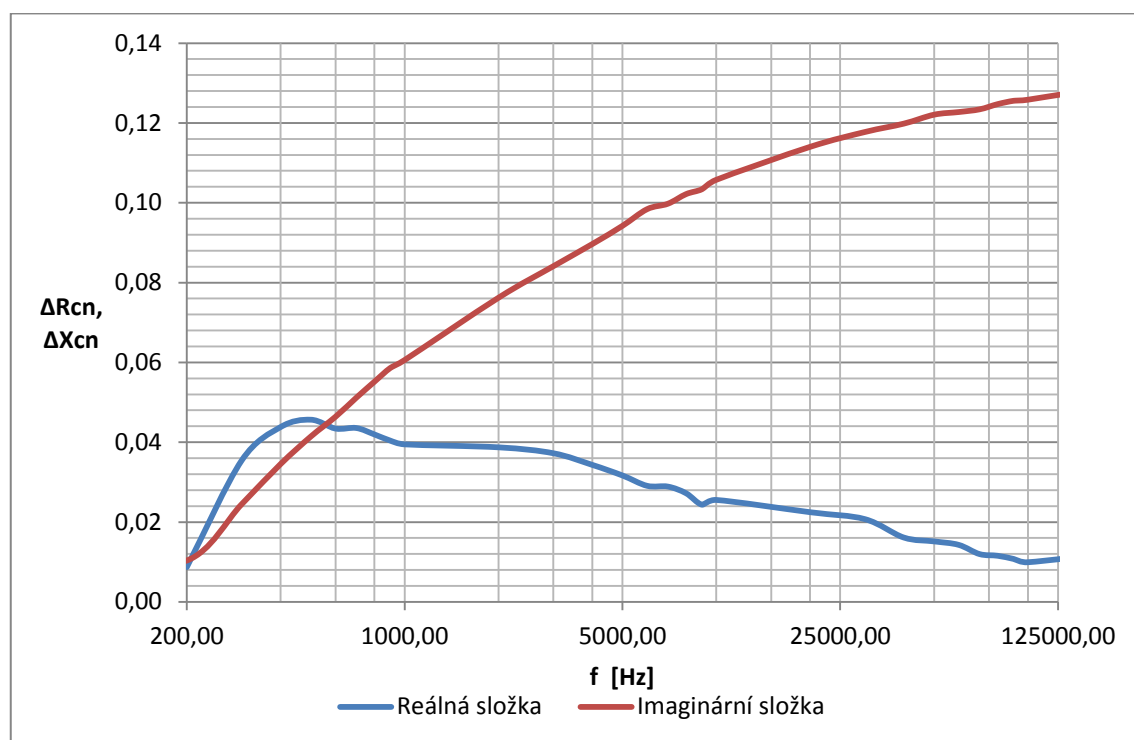
Z této závislosti lze vyčíst, že největší změna reálné složky, vzhledem ke změně hodnoty frekvence v okolí bodu, je na nejnižších kmitočtech budící frekvence. Jelikož změna frekvence i změna vodivosti mají na parametr stejný vliv, bylo usouzeno, že při vyhodnocování vodivosti je nejvyšší citlivost na změnu vodivosti právě na nízkých budících frekvencích. Imaginární složka je vzhledem k nižší citlivosti nevhodnou volbou.

4.2 Citlivostní analýza indukčnostního snímače při změně vzdálenosti

Pro vyhodnocování vzdálenosti je patrné, že změnou parametru α , konkrétně veličinou h při zachování konstantní hodnoty β , bude výsledný bod pohybovat téměř po přímce. Byl zvolen využitelný rozsah snímače od $h=0$ mm do $h=1,6$ mm. Použitelná měřená vzdálenost bývá obvykle udávána jako třetina průměru cívky. Analýza byla provedena pomocí vynášení hodnot rozdílu imaginární složky a reálné složky mezi zvolenými vzdálenostmi při několika frekvencích. Tyto body jsou vyneseny v grafu 4.2. Níže je uveden výpočet, který udává jaký je rozdíl imaginární složky vnesené impedance mezi

body pro vzdálenosti $h_1=0$ mm a $h_2=1,6$ mm. Reálná složka je vypočítána stejným způsobem

$$\Delta X_{cn} = |X_{cn1} - X_{cn2}| = |0,89 - 0,83| = 0,606 [-] \quad (4.4)$$



Graf 4.2: Rozdíl imaginární a reálné složky mezi křivkami pro $h_1=0$ mm a $h_2=1,6$ mm

Při nízkých frekvencích se nejprve projevuje vliv reálné složky, s narůstající frekvencí se dostává na své maximum a následně má pouze klesající charakter. Imaginární složka s narůstající frekvencí narůstá také a na vysokých hodnotách je rozdíl mezi imaginární složkou mezi vzdálenostmi $h=0$ mm a $h=1,6$ mm nejlépe využitelný. Bylo tedy odvozeno, že při měření vzdáleností mezi měřeným objektem a čelem snímače je nejvýhodnější volit co nejvyšší kmitočet. Omezením zde může být rezonanční kmitočet cívky, kdy se začne projevovat kapacitní složka a není již možné uvedené závislosti aplikovat.

4.3 Postup nastavení pracovního bodu indukčního snímače pro měření vodivosti a vzdálenosti

Jak bylo uvedeno v grafu 4.1 nejvyšší citlivosti snímače lze dosáhnout při nízkých kmitočtech, čemuž odpovídá přibližně první část křivky. Tato část se vyznačuje náhlým

růstem reálného vneseného odporu. Rozsah křivky přibližně odpovídá hodnotám $0,1 < \beta < 2$. Tato část je tedy nejlepší volbou pro vyhodnocování vodivosti.

Budící frekvence proudu co cívky musí být tedy nízká, z grafu 4.1 můžeme volit hodnotu $f=90$ Hz, při této frekvenci bude zajištěn požadavek na $0,1 < \beta < 2$. Toto tvrzení vychází z hodografu cívky. Při vyhodnocování bude v této oblasti křivky patrný největší rozdíl vneseného reálného odporu mezi různými hodnotami vodivosti.

Dalším parametrem ovlivňující nastavení snímače jsou geometrické rozměry cívky. Délku cívky je třeba volit co možná nejkratší, jelikož čím delší cívka je, tím menší je v ní vnesená impedance. Důvodem je, že závity umístěné daleko od měřeného objektu mají s tímto objektem malou vazbu. [2]

Poslední volbou je průměr snímače D . Tento parametr je třeba zvolit dostatečně velký, aby byl vliv vnesené reálné složky impedance do cívky co možná nejvyšší, na druhou stranu nesmí přesáhnout hodnotu, při níž parametr β překročí hranici hodnoty $\beta=2$. Umístění snímače od měřeného snímače je třeba zvolit co nejnižší.

Na rozdíl od měřicí aplikace, kdy je potřeba určit vodivost měřeného objektu před čelem snímače, je možné pomocí příložené cívky vyhodnocovat v jaké vzdálenosti se objekt nachází. Pro toto nastavení pracovního bodu je možné použít hodograf a znalost průběhu z grafu 4.2.

Při použití příložené cívky jako senzoru vzdálenosti je důležité potlačit vliv, který má na snímač vodivost měřeného objektu před snímačem. Toho lze docílit nastavením budící frekvence do vysokých hodnot, tímto se po křivce β snímač dostává do oblasti $\beta > 5$. Za touto oblastí se začne reálná složka impedance snižovat a imaginární složka roste společně s frekvencí. Z průběhu grafu 4.2 a z hodografu se nejlepším nastavením budící frekvence hodnota, která je v okolí bodu $\beta=40$. Při této hodnotě se nejlépe využije imaginární složka impedance, protože rozdíl mezi nastavenými body vzdálenosti je nejvyšší a tady snímač vykazuje nejvyšší citlivost na změnu vzdálenosti měřeného objektu od čela snímače.

Opět lze uvažovat vliv délky cívky. Ale jak již bylo zmíněno dříve, je třeba volit co nejkratší možnou cívku, která vykazuje vyšší vliv vnesené impedance. Nastavení průměru cívky je při měření vzdálenosti důležité z hlediska použitelného rozsahu měření vzdálenosti. Z rovnice (1.5) lze odvodit, že při větším průměru cívky R se bude zvyšovat i parametr α a s ním také vnesená imaginární složka impedance do snímače. S narůstajícím průměrem cívky se bude využitelný rozsah vzdálenosti zvyšovat.

Nastavením průměru cívky je možné nastavit také rozlišovací schopnost. V případě, že bude snímač použit pro měření například na výrobní lince, kde bude nutné vyhodnotit pouze vzdálenost měřeného objektu jako celku, je možné volit větší průměr cívky. Toto nastavení bude znamenat jednodušší vyhodnocování z hlediska rozlišení jednotlivých vzdáleností. Při nutnosti měřit pouze část objektu, je nutné zvolit menší průměr cívky, aby byla rozlišovací schopnost dostatečně vysoká. S tímto nastavením však snímač ztrácí svůj využitelný rozsah měřených vzdáleností.

ZÁVĚR

V práci se podařilo realizovat pracoviště pro měření příložných cívek. Toto pracoviště je možné použít k měření příložných cívek o různých geometrických rozměrech. Na polohovací zařízení lze připevnit libovolný měřený objekt. Automatizovaný RLC metr je možné za pomoci obslužného softwaru na PC ovládat a zadávat hodnoty požadovaných frekvencí.

Ve druhé části práce byly vyneseny hodografy z naměřených hodnot pro dvě cívky s různou geometrií. Měření bylo provedeno pro magneticky vodivý a magneticky nevodivý materiál. Z dostupné literatury byl převzat hodograf, který odpovídal navrženému experimentu s magneticky nevodivým materiálem. Bylo provedeno porovnání hodografů a bylo možné uvést, že naměřené hodnoty odpovídají hodnotám teoretickým. Pro magneticky vodivý materiál nebyly v dostupné literatuře nalezeny, a proto práce neobsahuje porovnání naměřených a teoretických průběhů hodografů.

V poslední části práce byla provedena analýza citlivosti z dosažených naměřených hodnot v návaznosti na průběhy hodografů. Byly určeny jasné pravidla pro určení pracovního bodu snímače pro měření vodivosti a vzdálenosti.

Literatura

- [1] GARCÍA-MARTÍN, Javier, Jaime GÓMEZ-GIL a Ernesto VÁZQUEZ-SÁNCHEZ. Non-Destructive Techniques Based on Eddy Current Testing - See more at: <http://www.mdpi.com/1424-8220/11/3/2525/htm#FD3>. In: [online]. [cit. 2015-02-02]. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1424-8220/11/3/2525/htm#FD3>
- [2] KANDRNÁL, Robert. *Bezdotykové měření ovality*. Brno, 1996. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D
- [3] KOPEC, Bernard. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí: (nauka o materiálu IV)*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008, 571 s. ISBN 978-80-7204-591-4.
- [4] VLČEK, Jiří. *Základy elektrotechniky*. 1. vyd. Praha: BEN-technická literatura, 2003. ISBN 859-40-1142-156-2

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1.1: Rozložení imaginární a reálné složky impedance v komplexní rovině	9
Obrázek 1.2: Princip příložné cívky.....	11
Obrázek 2.1 Celkový náhled měřicí soustavy	14
Obrázek 2.3: Rozměry cívky 1.....	16
Obrázek 2.4: Rozměry cívky 2.....	16
Obrázek 3.1: Postup měření	19

SEZNAM GRAFŮ

Graf 2.1: Závislost impedance cívky na budící frekvenci proudu	17
Graf 3.1: Hodograf cívky 1 pro magneticky nevodivý materiál (hliník)(vlevo) a průběh hodografu převzatý z literatury (vpravo)	21
Graf 3.2: Hodograf cívky 2 pro magneticky nevodivý materiál (hliník)(vlevo) a průběh hodografu převzatý z literatury (vpravo)	23
Graf 3.3: Hodograf příložné cívky 1 pro feromagnetický materiál (ocel)	25
Graf 3.4: Hodograf příložné cívky 2 pro feromagnetický materiál (ocel)	26
Graf 4.1: Soubor směrníc pro jednotlivé frekvence	28
Graf 4.2: Rozdíl imaginární a reálné složky mezi křivkami pro $h_1 = 0\text{mm}$ a $h_2 = 1,6\text{mm}$	29

SEZNAM TABULEK

Tabulka 2.1: Rozsah měřených veličin přístroje HIOKI.....	15
Tabulka 2.2: Parametry cívek 1 a 2.....	16
Tabulka 3.1: Tabulka vypočtených hodnot α pro různé vzdálenosti, cívka 1.....	22
Tabulka 3.2: Tabulka vypočtených hodnot β pro různé frekvence, cívka 1	22
Tabulka 3.3: Tabulka vypočtených hodnot α pro různé vzdálenosti, cívka 2.....	24
Tabulka 3.4: Tabulka vypočtených hodnot β pro různé frekvence, cívka 2	24

SEZNAM PŘÍLOH

Přílohy jsou uloženy v souboru „příloha.zip“ na přiloženém CD.

Příloha 1: Tabulky naměřených a zpracovaných hodnot