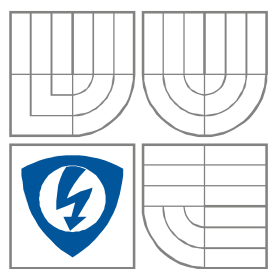


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

INDUKČNOSTNÍ SNÍMAČE

INDUCTIVE SENSORS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

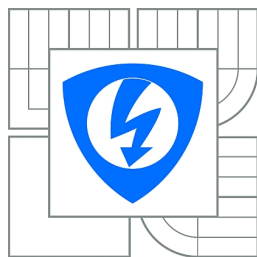
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MICHAL ŠIMBERSKÝ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. LUDVÍK BEJČEK ,CSc.

BRNO 2011



**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: Michal Šimberský

ID: 119626

Ročník: 3

Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Indukčnostní snímače

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Navrhněte a realizujte výukový laboratorní přípravek umožňující jednoznačnou demonstraci všech charakteristických parametrů (vlastností, rozdílů) těchto indukčnostních snímačů
 - a) na principu vířivých proudů (s potlačeným magnet. polem) a
 - b) oscilátorového.
2. Přípravek řešte jako otevřený systém včetně vyhodnocování a zpracování výsledků (pomocí PC).

DOPORUČENÁ LITERATURA:

ZEHNULA, K.: Převodníky fyzikálních veličin. VUT FEI Brno, 1990

ĎAĎO, S.-KREIDL, M.: Senzory a měřicí obvody. ČVUT 1996

KULIKOVSKIJ, L.F.: Induktivnyje izmeriteli peremeščenij. Moskva, Gostenergoizdat 1961

Termín zadání: 7.2.2011

Termín odevzdání: 23.8.2011

Vedoucí práce: doc. Ing. Ludvík Bejček, CSc.

prof. Ing. Pavel Jura, 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

Bakalářská práce se zabývá indukčnostními snímači. V práci je uvedena historie snímačů, jejich výhody a nevýhody oproti jiným typům snímačů. Jsou zde popsány různé typy indukčnostních snímačů. Každý typ snímače je pak detailně popsán po stránce fyzikálního principu. V práci jsou uvedeny i příklady použití jednotlivých typů v praxi. K demonstraci vlastností a rozdílů indukčnostních snímačů s potlačeným magnetickým polem a indukčnostními snímači oscilátorovými je sestaven laboratorní přípravek.

Klíčová slova

Senzory, čidla, indukčnost, bezkontaktní měření, měření vzdálenosti, měření posuvu, indukčnostní čidla, indukčnostní senzory, koncové spínače

Abstract

Bachelor thesis deals with inductive sensors. The thesis introduced the history of sensors, their advantages and disadvantages over other types of sensors. There are described different types of inductive sensors. Each type of sensor is described in terms of physical principles. In thesis there are listed examples of using different types of practice. Preparation was constructed to demonstration the characteristics and differences between eddy currents sensors and inductive oscillator sensors.

Keywords

Sensors, inductance, non-contact measurement, distance measurement, displacement measurement, inductive sensors, inductive sensors, limit switches.

Bibliografická citace:

ŠIMBERSKÝ, M. *Indukčnostní snímače*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 52 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Ludvík Bejček, CSc.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Indukčnostní snímače 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 jsem si 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.

V Brně dne: **30. července 2011**

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Ludvíku Bejčkovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: **30. července 2011**

.....
podpis autora

Obsah

1	Úvod	10
2	Veličiny u indukčnostních snímačů.....	12
2.1	Indukčnost.....	12
2.2	Magnetické pole	12
2.3	Magnetická indukce	13
2.4	Magnetický indukční tok.....	13
2.5	Permeabilita	13
2.6	Používané názvosloví pro indukčnostní snímače.....	14
2.6.1	Normovaná zkušební deska.....	15
2.6.2	Spínací vzdálenost.....	15
2.6.3	Jmenovitá spínací vzdálenost.....	15
2.6.4	Reálná spínací vzdálenost	15
2.6.5	Provozní spínací vzdálenost.....	15
2.6.6	Pracovní spínací vzdálenost	15
2.6.7	Hystereze.....	16
2.6.8	Reprodukovatelnost.....	16
2.6.9	Korekční faktor	17
3	Typy indukčnostních snímačů.....	18
3.1	Indukčnostní snímače s malou vzduchovou mezerou	19
3.2	Indukčnostní snímač s otevřeným magnetickým polem	20
3.3	Indukčnostní snímače bez feromagnetika	23
3.4	Indukčnostní snímače s potlačeným magnetickým polem.....	24
3.5	Indukčnostní snímače oscilátorové	26
4	Vyhodnocení signálů ze senzorů	28
4.1	Můstkové metody pro měření indukčnosti.....	28
4.2	Přímá metoda měření indukčnosti –VA metoda	29
4.3	Rezonanční metody měření indukčnosti	30
5	Vlastní měření	31
5.1	Naměřené hodnoty s indukčnostním snímačem s potlačeným magnetickým polem ..	32
5.2	Naměřené hodnoty se snímačem 871U-X5A18.....	35
5.3	Naměřené hodnoty se snímačem IA5-18GM-I3	36
5.4	Naměřené hodnoty s LC oscilátorem.....	39
6	Měřicí přístroje a pomůcky	44

7	Závěr.....	45
8	Seznam obrázků	48
9	Seznam grafů.....	49
10	Seznam tabulek.....	50
11	Použité značky a symboly	51

1 ÚVOD

Tato bakalářská práce se zabývá indukčnostními snímači. Indukčnostní snímače, v praxi a na českém trhu mylně označovány jako indukční, byly vybrány z důvodu jejich praktičnosti, velké podpory od výrobců a jejich univerzálního využití ve spoustě aplikací, kde je potřeba snímat měřený objekt nebo rozeznat materiál, ze kterého je měřený objekt vyroben.

Cílem práce je udělat ucelený přehled o hlavních typech indukčnostních snímačů a možnostech jejich použití. Práce je zaměřena především na vlastnosti a rozdíly mezi indukčnostními snímači s potlačeným magnetickým polem a indukčnostními snímači oscilátorovými.

Měření vzdálenosti nebo polohy je v praxi častá záležitost. Snímače pro měření vzdálenosti tvoří velkou a důležitou část snímačů v oblasti automatického měření. S indukčnostními snímači lze měřit dotykově nebo bezdotykově v závislosti fyzikálním principu.

Vznik indukčnostních snímačů jako náhrada za mechanické koncové spínače se datuje k roku 1958 kdy byly sestrojeny pány Waltrem Pepperlem a Wilfriedem Gehlem. Indukčnostní snímače byly zpočátku navrženy jako koncové spínače pouze pro chemické procesy. Postupem času se indukčnostní snímače dostávají do popředí i v dalších průmyslových procesech a aplikacích. Do popředí se dostávají díky svým vlastnostem – velmi vysoké odolnosti vůči opotřebení, vysoké spolehlivosti a snadné údržbě a manipulaci. Vznikem indukčnostních snímačů však jejich vývoj nekončí. Zásadní krokem v jejich vývoji byla skutečnost, že se podařilo navrhnout elektroniku, která dokázala nahradit stávající elektroniku s různým napěťovým rozsahem, za elektroniku, která umožnila použít jeden snímač pro více napěťových rozsahů. Dalším důležitým mezníkem ve vývoji těchto snímačů, přesněji jejich elektroniky, bylo použití nové technologie – integrovaných obvodů, které rozšířily a zpřesnily funkci indukčnostních snímačů. [8]

Během vývoje se stal nejrozšířenější snímač ve válcovitém pouzdru se závitem, jehož konstrukce umožňuje velmi snadnou a nenáročnou montáž na velké množství strojů a zařízení. Tato konstrukce poskytuje pro samostatnou cívku i vyhodnocovací elektroniku dostatečnou mechanickou i elektromagnetickou ochranu.

V dnešní době jsou indukčnostní snímače velmi rozšířené a nabízí uplatnění ve velkém počtu aplikací. Není tedy náhodou, že se o jejich neustálý vývoj a výrobu zajímá velké množství výrobců. Z hlavních výrobců jsou to například firmy Balluff, Allen-Bradley, IFM electronics, Selet, Lanbao nebo Turck. Nutno dodat, že výše zmíněné firmy se nezabývají pouze indukčnostními snímači, ale i jinými typy snímačů. Různé typy aplikací vyžadují různé typy provedení indukčnostních snímačů. Výrobci těchto snímačů nenabízejí pouze výše zmiňovaný snímač ve válcovitém pouzdru se závitem, ale i spousty dalších snímačů v různém provedení.

Výhody indukčnostních snímačů proti snímačům pracujícím na jiném principu jsou následující. Základním stavebním prvkem indukčnostního snímače je cívka, která je jako součástka spolehlivá a levná. Další výhodou je možnost nasazení snímače do prostor znečištěných prachem nebo do prostor, kde jsou nepříznivé klimatické podmínky. Nevýhodou indukčnostních snímačů, v porovnání s jinými typy snímačů, je dán jejich fyzikálním principem a to, že je lze použít jen k detekci vodivých předmětů.

2 VELIČINY U INDUKČNOSTNÍCH SNÍMAČŮ

Před samotným představením typů indukčnostních snímačů je dobré osvojit si pár základních pojmů a definic z oblasti elektrotechniky, které povedou k snadnějšímu a rychlejšímu pochopení principů a činností.

2.1 Indukčnost

Indukčnost je fyzikální veličina, která vyjadřuje velikost magnetického indukčního toku kolem cívky při jednotkovém elektrickém proudu, jehož velikost je jeden ampér (1 A), procházejícím cívkou.

Indukčnost je jedna ze základních charakteristik cívek. Vyjadřuje schopnost cívky měnit elektrickou energii na energii magnetického pole. Indukčnost cívek závisí na jejich geometrickém uspořádání, tj. počtu závitů, rozměrech a tvarech, na magnetických vlastnostech prostředí, které cívky obklopují a na magnetických vlastnostech prostředí, které cívky obklopuje. Rozlišujeme indukčnost jedné cívky a indukčnost, kterou na sebe působí dvě cívky. Indukčnost jedné cívky nazýváme indukčností vlastní, indukčnost dvou na sebe působících cívek nazýváme indukčností vzájemnou. Vlastní indukčnost značíme L , vzájemnou indukčnost M . Jednotkou indukčnosti v soustavě SI je henry, značí se H . Indukčnost je dána vztahem

$$L = \frac{\Phi}{I} \quad [H; Wb, A], \quad (1)$$

kde Φ je magnetický indukční tok, I je elektrický proud, který uvedený tok vyvolal.

2.2 Magnetické pole

Magnetické pole je druh silového pole, jehož zdrojem je pohybující se elektrický náboj, tedy elektrický proud, zmagnetizované těleso nebo může být vyvoláno i změnami pole elektrického. Magnetické pole je zvláštní případ pole elektromagnetického.

2.3 Magnetická indukce

Magnetická indukce je síla, kterou magnetické pole působí na pohybující se elektrický náboj. Magnetická indukce je dána vztahem

$$B = \frac{F_{\max}}{Qv} [T; N, C],$$

kde B je magnetická indukce, $F_{\max}$ je maximální síla působící na náboj Q a v je rychlost pohybujícího se náboje. Vektorově lze napsat magnetickou indukci jako

$$\vec{B} = \vec{v} \times \frac{1}{c^2} \vec{E} [T; m^{-1}, Vm^{-1}, m^{-1}], \quad (2)$$

kde v je rychlost pohybující se částice s nábojem, E je intenzita jeho elektrického pole a c je rychlost světla.

2.4 Magnetický indukční tok

Magnetický indukční tok slouží k popisu elektromagnetické indukce. Vyjadřuje celkový tok magnetické indukce procházející určitou plochou a je definován jako součin magnetické indukce B a kolmého plošného obsahu i . Je-li plocha S , jejíž magnetický tok počítáme, rovinná a magnetické pole homogenní, pak platí

$$\Phi = BS \cos \alpha, \quad (3)$$

kde B je velikost indukce magnetického pole, S je obsah plochy a α je úhel, který svírá normálový vektor plochy s vektorem magnetické indukce.

2.5 Permeabilita

Permeabilita materiálu nebo prostředí je fyzikální veličina udávající míru magnetizace v důsledku působení magnetického pole. Nebo-li permeabilita vyjadřuje reakci určitého prostředí či materiálu na silové účinky magnetického pole. Permeabilitu materiálu nebo prostředí lze určit ze vztahu

$$\mu = \frac{B}{H} [Hm^{-1}; T, Am^{-1}], \quad (4)$$

kde B je magnetická indukce a H intenzita magnetického pole.

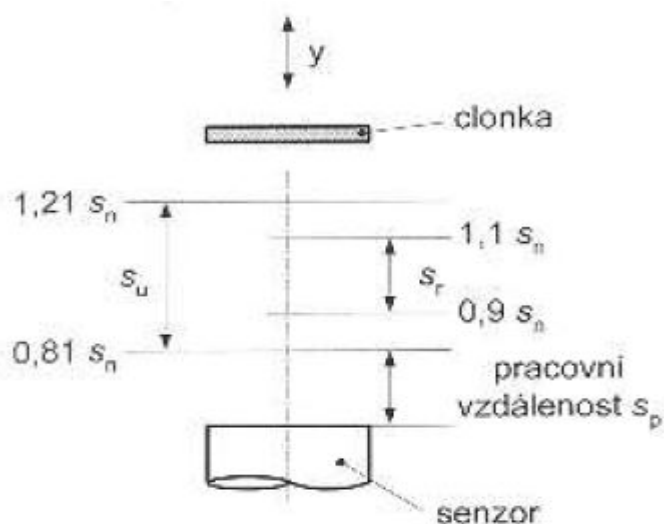
Pomocí permeability vakua, značenou jako μ_0 , a permeability materiálu nebo prostředí získáme relativní permeabilitu μ_r , která je dána vztahem

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}. \quad (5)$$

Relativní permeabilita je materiálová konstanta a je bezrozměrná. Materiály nebo prostředí vykazující relativní permeabilitu o něco větší než jedna mírně zesilují magnetické pole. Jsou to látky paramagnetické (např. draslík, sodík, hliník). Materiály nebo prostředí vykazující relativní permeabilitu mnohem větší než jedna výrazně zesilují magnetické pole. Jsou to látky feromagnetické (např. železo, kobalt, nikl). Materiály nebo prostředí vykazující relativní permeabilitu menší než jedna mírně zeslabují magnetické pole (patří sem inertní plyny, zlato, měď, rtuť, ...). Jsou to látky diamagnetické.

2.6 Používané názvosloví pro indukčnostní snímače

Pro klasifikaci a specifikaci bezkontaktních indukčnostních snímačů z hlediska vzdáleností, na které jsou schopny detekovat měřený objekt, byly zavedeny a definovány následující pojmy. Definované pojmy jsou ilustrovány na Obr.2.1. Definice se týkají spínací vzdálenosti a platí pro axiální posuv normované zkušební desky.



Obr. 2.1 Definice spínacích vzdáleností [4]

2.6.1 Normovaná zkušební deska

Normovaná zkušební deska, často nazývaná clonka, je dána normou ISO 630:1980. Clonka má být podle normy z měkké oceli třídy 37 o tloušťce 1 mm. Délka strany clonky závisí na jmenovité spínací vzdálenosti a měla by být trojnásobkem této vzdálenosti.

2.6.2 Spínací vzdálenost

Spínací vzdálenost je vzdálenost mezi clonkou a čelem senzoru, při které dojde ke změně výstupního signálu. [4]

2.6.3 Jmenovitá spínací vzdálenost

Jmenovitá spínací vzdálenost s_n je teoretická vzdálenost udávaná výrobcem bez ohledu na tolerance. [4]

2.6.4 Reálná spínací vzdálenost

Reálná spínací vzdálenost s_r musí být splněna při jmenovitém napájecím napětí a při teplotě okolí 20 °C. Od s_n se smí odchýlit maximálně o +10 %. [4]

2.6.5 Provozní spínací vzdálenost

Provozní spínací vzdálenost s_u je ta, která musí být splněna v celém rozpětí napájecího napětí a okolní teploty. Od s_r se smí odchýlit maximálně o +10 %. [4]

2.6.6 Pracovní spínací vzdálenost

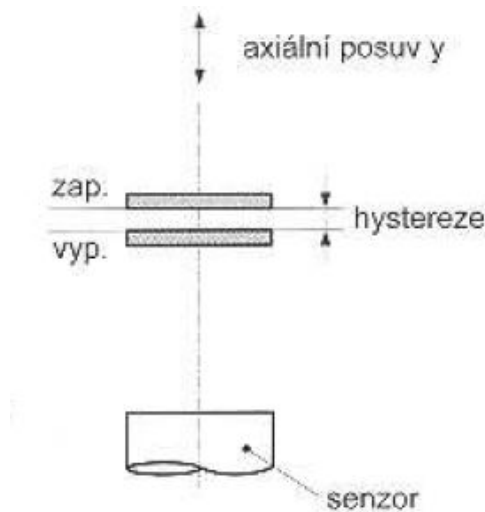
Pracovní spínací vzdálenost s_p je ta, ve které je snímač bezpečně aktivován. [4]

2.6.7 Hystereze

Hystereze je rozdíl dvou bodů při axiálním pohybu clonky v jednom a druhém směru, ve kterých došlo k sepnutí nebo rozepnutí výstupu senzoru. Hystereze je znázorněna na Obr.2.2. [4]

Výpočet hystereze se provede podle následující vzorce

$$\text{hystereze} = \frac{\text{rozpínací vzdálenost} - \text{spínací vzdálenost}}{\text{spínací vzdálenost}} * 100 [\%; \text{m}, \text{m}, \text{m}] \quad (6)$$



Obr. 2.2 Definice hystereze [4]

Rozpínací vzdálenost je vzdálenost, kdy dojde k tomu, že měřený předmět již není snímačem indikován při zvětšující se vzdálenosti mezi snímačem a měřeným předmětem. Spínací vzdálenost je vzdálenost, kdy dojde k detekci měřeného předmětu při zmenšující se vzdálenosti mezi snímačem a měřeným materiálem.

2.6.8 Reprodukovatelnost

Reprodukovatelnost je definována jako přesnost minimálně dvou měření v časovém úseku osmi hodin, při okolní teplotě 15 až 30 °C a napětí jmenovité hodnoty. Obvyklá hodnota je maximálně 2 %. [4]

2.6.9 Korekční faktor

Korekční faktor je poměr spínací vzdálenosti daného materiálu k spínací vzdálenosti konstrukční oceli. Popisuje, na jakou hodnotu klesne spínací vzdálenost pro různé materiály. Hodnoty korekčních faktorů často užívaných materiálů jsou uvedeny v *Tab.1*.

Výpočet korekčního faktoru se provede podle vztahu

$$\text{kor. faktor} = \frac{\text{spínací vzdálenost materiálu}}{\text{spínací vzdálenost oceli}} \quad [-] \quad (7)$$

Tab. 1 Příklady korekčních faktorů

Materiál	Konstrukční ocel	Nerezová ocel	Olovo	Mosaz	Hliník	Měď
Korekční faktor	1,00	0,70	0,60	0,45	0,40	0,30

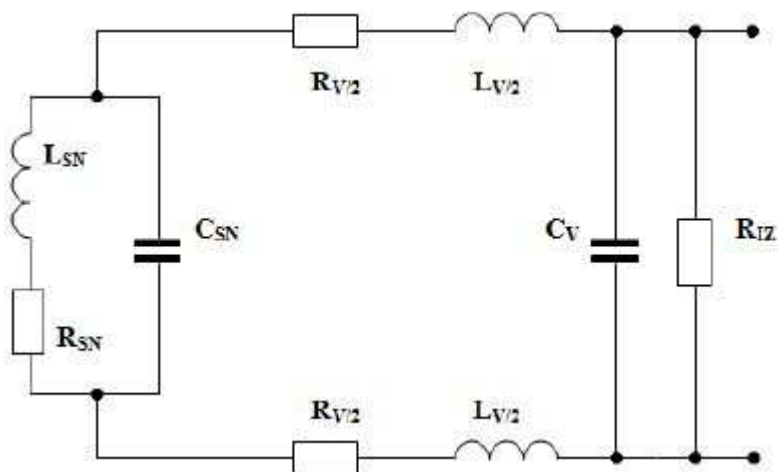
3 TYPY INDUKČNOSTNÍCH SNÍMAČŮ

Indukčnostní snímače představují rozsáhlou skupinu snímačů. Principem jejich činnosti je přeměna neelektrické veličiny na změnu vlastní nebo vzájemné indukčnosti. Do obvodu bývají zapojeny s pomocným střídavým napětím v uspořádání můstkovém nebo rezonančním. [3]

Indukčnostní snímače mají široké uplatnění v průmyslové praxi. Využívají se například pro určování polohy, měření rychlosti, k identifikaci látek, k identifikaci přítomnosti či nepřítomnosti objektu a další. Velkou výhodou indukčnostních snímačů je, že mohou pracovat bezdotykově a nepodléhat tak opotřebení.

Na obrázku *Obr. 3.1* je znázorněno náhradní elektrické schéma indukčnostního snímače. L_{SN} představuje indukčnost snímače, R_{SN} představuje ztrátový odpor snímače a C_{SN} představuje parazitní kapacitu mezi závity snímače. R_v je odpor přívodních kabelů, L_v je indukčnost přívodních kabelů, C_v je kapacity mezi přívodními vodiči a R_{iz} je izolační odpor.

Ideální indukčnostní snímač má mít velkou reaktanci ωL v porovnání s R . Při běžných kmitočtech $5 \div 50 \text{ kHz}$ platí $\omega L \sim R \div 10R$. Z toho plyne velká kmitočtová závislost. [3]



Obr. 3.1 Náhradní elektrické schéma indukčnostního snímače [2]

3.1 Indukčnostní snímače s malou vzduchovou mezerou

Principem snímače s malou vzduchovou mezerou je ovlivňování vzduchové mezery mezi dvěma feromagnetickými částmi. Snímaný předmět ovlivňuje svojí pozicí buď velikost, nebo plochu vzduchové mezery a tím dochází ke snímání předmětu.

Snímač je tvořen cívkou navinutou na feromagnetickém jádře, které je složeno ze dvou částí, případně třech, jehož magnetický obvod se uzavírá přes vzduchovou mezeru, přesněji přes dvě vzduchové mezery. Snímač může být zapojen v jednoduchém (Obr. 3.2) nebo diferenčním zapojení (Obr. 3.3). V případě jednoduchého zapojení je jádro tvořeno pevnou částí ve tvaru písmene C a pohyblivou částí ve tvaru písmene I mezi kterými je vzduchová mezera o velikosti d . Diferenčním zapojení tvoří dvě cívky na dvou pevných částech ve tvaru písmene C mezi nimiž je pohyblivá část ve tvaru písmene I. Při pohybu pohyblivé části jádra dochází ke změně impedance Z cívky a tím se mění i proud procházející cívkou, který můžeme měřit.

Pro impedanci cívky platí

$$Z = R + j\omega L, \quad (8)$$

kde R je odpor cívky pro stejnosměrný proud, L je indukčnost cívky a ω je úhlový kmitočet.

Pro indukčnost cívky můžeme psát

$$L = \frac{N_z^2}{R_M} [H], \quad (9)$$

kde N_z je počet závitů a R_M je magnetický odpor.

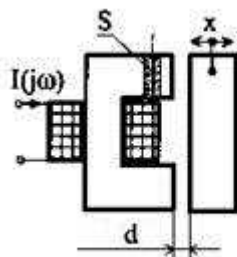
$$R_M = \frac{1}{\mu} \frac{l}{S} = \frac{1}{\mu_M} \frac{l-2d}{S} + \frac{1}{\mu_V} \frac{2d}{S} [\Omega], \quad (10)$$

kde l je délka střední siločáry, S je plocha magnetického obvodu, d je velikost vzduchové mezery, μ_M je permeabilita magnetického materiálu, μ_V je permeabilita vzduchové mezery. A jelikož odpor magnetické části je daleko menší než odpor vzduchových mezer můžeme ho zanedbat a dostáváme

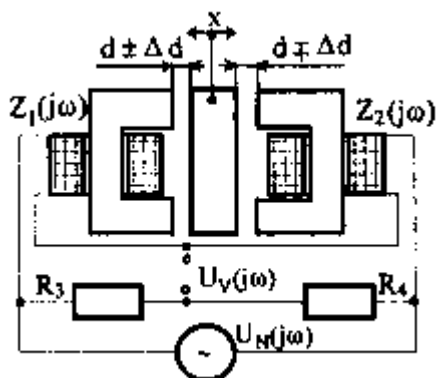
$$R_M = \frac{1}{\mu_V} \frac{2d}{S} [\Omega] \quad (11)$$

Dosažením (11) do (9) a následně do (8) a zanedbáním odporu cívky pro stejnosměrný proud dostáváme vztah pro impedanci cívky

$$Z = \frac{j\omega N_z^2}{R_M} = j\omega \frac{\mu_v S N_z^2}{2d} \quad [\Omega] \quad (12)$$



Obr. 3.2 Indukčnostní snímač s malou vzduchovou mezerou v jednoduchém uspořádání [2]



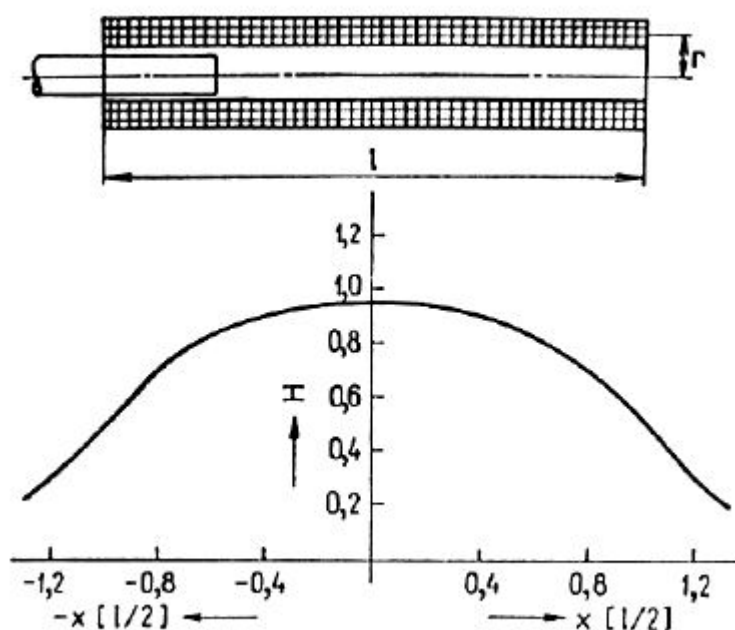
Obr. 3.3 Indukčnostní snímač s malou vzduchovou mezerou v diferenčním uspořádání [2]

3.2 Indukčnostní snímač s otevřeným magnetickým polem

Indukčnostní snímač s otevřeným magnetickým polem je elektromechanické zařízení složené z primární cívky, sekundární cívky nebo cívek a feromagnetického jádra.

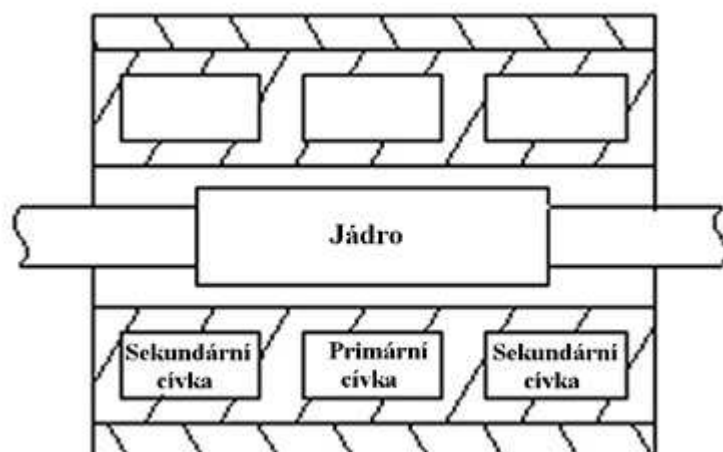
Princip činnosti snímače s otevřeným magnetickým polem spočívá ve změně vzájemné vazby mezi cívkou primární a cívkami sekundárními v závislosti na poloze feromagnetického jádra. Primární cívka je napájena zdrojem střídavého napětí a do sekundárních cívek se indukuje napětí úměrné poloze jádra.

Při měření polohy indukčnostními snímači s otevřeným magnetickým polem v jednoduchém uspořádání (Obr. 3.4) je feromagnetické jádro v cívce pevně spojeno s měřeným objektem. Jádro se v závislosti na poloze měřeného objektu zasouvá nebo vysouvá, čímž se mění vzájemná vazba mezi cívkami. Pro toto jednoduché zapojení se indukčnost mění od hodnoty L_{max} , kdy je jádro přesně uprostřed cívky, po hodnoty L_{min} , kdy je jádro v krajních polohách cívky. Nevýhodou tohoto zapojení je malá citlivost a nelineární změna indukčnosti.

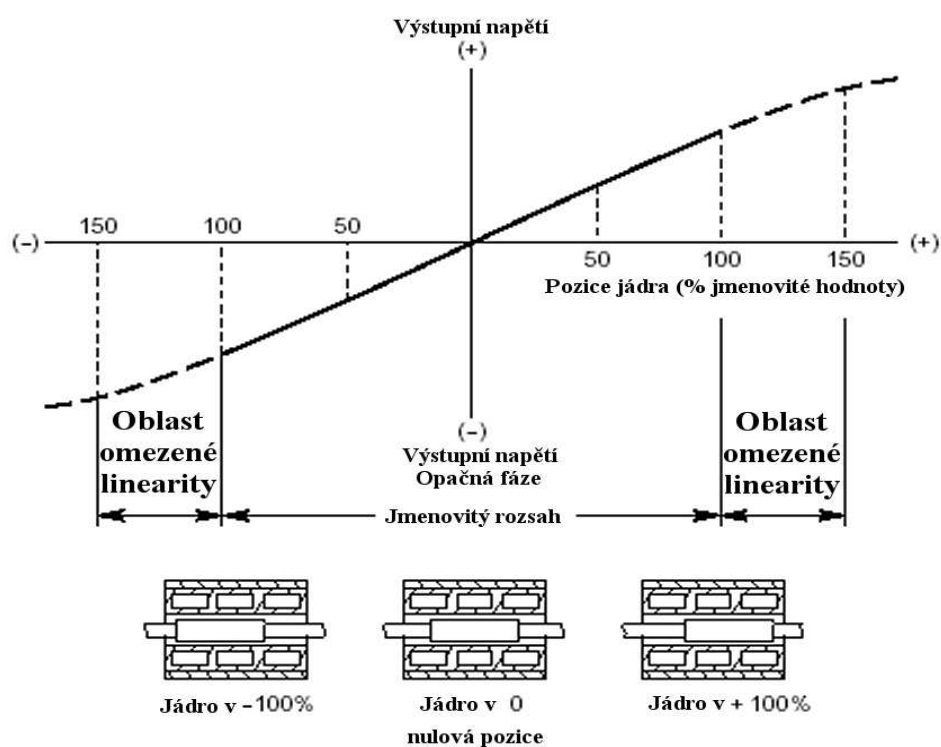


Obr. 3.4 schéma indukčnostního snímače s otevřeným magnetickým obvodem [5]

V praxi se většinou používá zapojení diferenční, označované zkratkou LVDT z anglického popisu Linear Variable Differential Transducer, kde jsou dvě sekundární cívky zapojeny proti sobě. Toto zapojení je na obrázku Obr. 3.5. V rovnovážné poloze zasahuje jádro cívky do obou sekundárních cívek rovným dílem a to tak, že do poloviny každé cívky. Výstupní napětí v tomto rovnovážném stavu je rovno nule. Při posuvu jádra se napětí na cívkách mění. Na jedné cívce napětí poroste, na druhé cívce napětí poklesne. [7]



Obr. 3.5 Principiální schéma indukčního snímače s otevřeným magnetickým obvodem v diferenčním zapojení [7]



Obr. 3.6 Výstupní charakteristika LVDT snímače [7]

3.3 Indukčnostní snímače bez feromagnetika

Indukčnostní snímač bez feromagnetika je tvořen alespoň dvěma cívkami umožňující vzájemné posunutí. K činnosti je využit transformátorový jev, kdy na sebe vzájemně působí cívky magnetickou vazbou a indukují napětí. Jelikož se jedná o snímač, kde cívka nemá feromagnetické jádro, odpadají parazitní jevy a snímač se dá dobře navrhnout dle výpočtů. Pro indukčnost válcové cívky platí. [3]

$$L = \frac{2,03a^2 N_z^2}{6a + 9b + 10c}, \quad (13)$$

kde N_z je počet závitů, a je střední poloměr cívky, b je šířka cívky a c je výška mezikružích cívky.

Pro dvě navzájem se ovlivňující válcové cívky platí vztah pro vzájemnou indukčnost M následující vztah

$$M = \frac{N_{z1}N_{z2}}{3}(M_{02} + M_{03} + M_{04} + M_{05} - M_{01}), \quad (14)$$

kde $N_{z1}N_{z2}$ jsou počty závitů na jednotlivých cívkách a $M_{01} \div M_{05}$ jsou vzájemné indukčnosti sousedních kruhů.

Pro výpočet $M_{01} \div M_{05}$ slouží vzorec

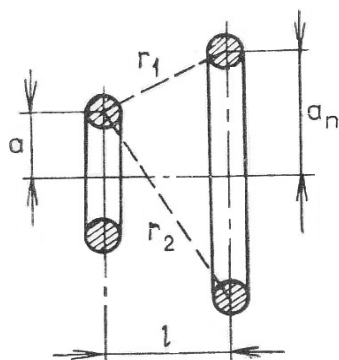
$$M_{0i} = k\sqrt{aa_n}, \quad (15)$$

kde k je součinitel daný rozměry a a a_n na Obr. 3.7 a a, a_n jsou poloměry prstenců.

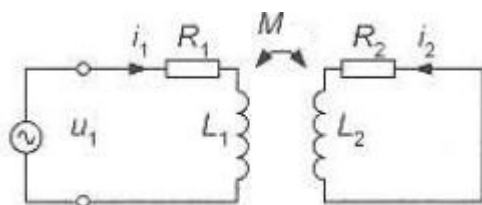
Pro určení polohy je důležité určit napětí na sekundárním vinutí. To se provede překreslením schématu pro dvě cívky podle Obr. 3.8 a použitím Kirchhoffových zákonů.

$$U_2 = U_1 \chi \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} \text{ [V]}, \quad (16)$$

kde U_2 je napětí na sekundární cívce, U_1 je napětí na primární cívce, χ je činitel vazby závislý na poloze cívek, L_1 je indukčnost primární cívky a L_2 je indukčnost sekundární cívky.



Obr. 3.7 Schematické znázornění pro výpočty indukčnosti dvou prstenců [3]



Obr. 3.8 Náhradní schéma dvou cívek [4]

3.4 Indukčnostní snímače s potlačeným magnetickým polem

Indukčnostní snímač s potlačeným magnetickým polem je tvořen válcovou cívkou, která je při průchodu střídavým elektrickým proudem obklopena magnetickým polem, které působí na své okolí, tedy na měřené objekty. Princip činnosti je znázorněn na následujícím obrázku Obr.3.9. Umístíme-li do blízkosti snímače elektricky vodivý a předmět s rezistivitou ρ a permeabilitou μ tak, aby magnetické siločáry vycházející z cívky procházely měřeným objektem, začnou se v tomto objektu indukovat vířivé proudy, které vybudí magnetické pole v měřeném objektu. Toto nově vzniklé magnetické pole má svoji intenzitu, která má směr podle Lenzova zákona opačný než směr intenzity magnetického pole budící cívky. Působením magnetického pole vyvolaným vířivými proudy dochází ke zmenšování intenzity původního magnetického pole. Cívka, jejíž magnetické pole je takto potlačeno, mění svou impedanci. Tento jev nazýváme “vnesená impedance”. [3]

Pro popis si můžeme představit měřený objekt jako sekundární vinutí cívky, která je zatížena odporem R_Z a indukčností L_Z . Pro sekundární obvod zavedeme ekvivalentní odpor R_e a reaktanci X_e . Jelikož detekovaný předmět může být i nehomogenní, tak

celkový odpor složek je roven součtu odporů jednotlivých nehomogenních částí a platí vztah

$$R_e = \sum \rho_k \frac{l_k}{S_k} [\Omega], \quad (17)$$

$$X_e = \omega \sum \frac{1}{\mu_k} \frac{l_k}{S_k} [\Omega], \quad (18)$$

kde ρ_k je měrný odpor materiálu, l_k je délka toku v materiálu a S_k je plocha toku v materiálu a ω je uhlová frekvence.

Pro proud procházející primární cívkou můžeme psát vztah

$$I_1 = \frac{U_1}{\left(R_1 + \frac{\omega^2 M^2}{R_e^2 + X_e^2} R_e \right) + \left(X_1 + \frac{\omega^2 M^2}{R_e^2 + X_e^2} X_e \right)} [A; U; \Omega], \quad (19)$$

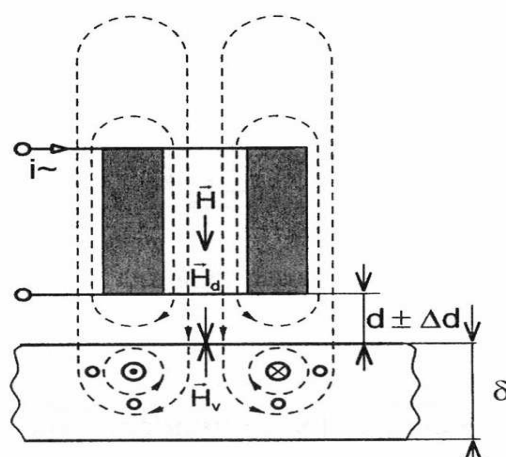
kde U_1 je napájení primární cívky, R_1 je činný odpor primární cívky, R_e je činný odpor sekundární cívky, X_1 je reaktanční odpor primární cívky, X_e je reaktanční odpor sekundární cívky a M je vzájemná indukčnost mezi primární cívkou a měřeným objektem. [3]

Pro dokonalejší představu o principu a fungování indukčnostních snímačů s aplikací vířivých proudů je zaveden pojem hloubka vniku h_v .

$$h_v = \sqrt{\frac{2\rho_k}{\omega\mu_k}} \quad (20)$$

Ze vztahu pro hloubku vniku h_v je patrné, že snímači s potlačeným magnetickým polem nemusíme měřit pouze vzdálenost detekovaného předmětu, ale můžeme s nimi měřit i všechny vlastnosti detekovaného objektu, které mají vliv na velikost indukovaných proudů a tím i na velikosti magnetického pole, které vytvářejí. To jsou vlastnosti, které jsou ovlivňovány rezistivitou nebo permeabilitou. Těmito vlastnostmi může být například složení povrchu objektu, zjišťování vad materiálu, detekce přítomnosti vodivé vrstvy a další. [1]

Indukčnostní snímače s potlačeným magnetickým polem jsou vhodné pro bezdotykové měření vzdálenosti, tloušťky elektricky vodivých vrstev a detekci elektricky vodivých objektů z toho důvodu, že intenzita pole H pronikající do měřeného objektu je závislá na vzdálenosti cívky od měřeného objektu.

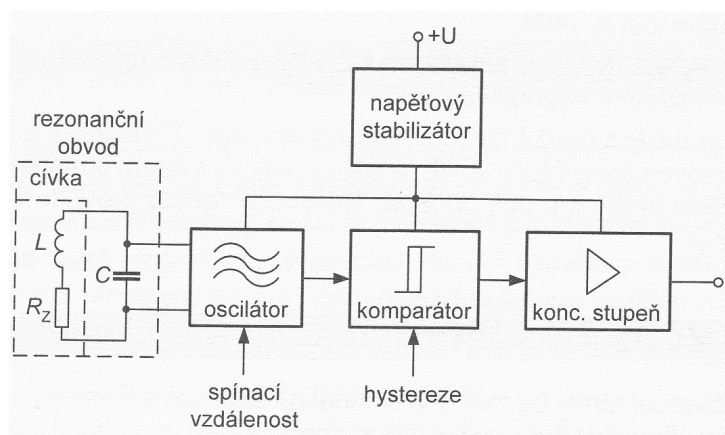


Obr. 3.9 Principiální schéma indukčnostního snímače s potlačeným magnetickým polem [1]

3.5 Indukčnostní snímače oscilátorové

Snímače je realizován jako oscilátor s rezonančním obvodem, který se zatlumí při přiblížení elektricky vodivého měřeného předmětu. Druhou variantou je, že oscilátor má indukční zpětnou vazbu, která se mění elektricky vodivým měřeným předmětem. Samotný oscilátor může pracovat ve dvou režimech změny amplitudy kmitů. Prvním režimem je plynulá změna velikosti amplitudy. Druhým režimem je změna velikosti amplitudy kmitů skokově - oscilátor kmitá nebo nekmitá. Snímače, které využívají změnu amplitudy kmitů skokově, nazýváme limitní. [3]

Oscilátorové indukčnostní snímače se skládají ze tří hlavních bloků (Obr. 3.10). Z oscilátoru, komparátoru (vyhodnocovací jednotka) a koncového stupně (výstupní obvody).

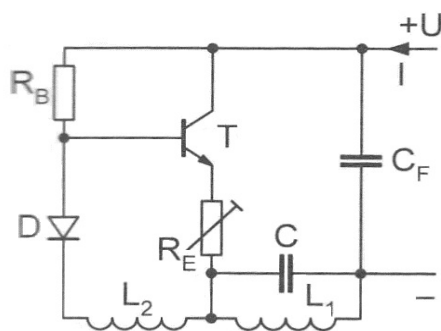


Obr. 3.10 Blokové schéma oscilátorového indukčnostního snímače [4]

Podle blokového schématu na *Obr. 3.10* je rezonanční obvod součástí oscilátoru. Rezonanční obvod je tvořen bezztrátovým kondenzátorem a cívku. Indukčnost cívky ve schématu představuje L a její ztrátový odpor R_Z . R_Z je funkcí vzdálenosti měřeného objektu a jako jediný ovlivňuje činitel jakosti cívky Q , tedy i celého rezonančního obvodu. Činitel jakosti cívky Q určuje velikost amplitudy kmitů oscilátoru.

Velikost amplitudy kmitů oscilátoru je důležitá pro detekci měřeného objektu. Je-li elektricky vodivý předmět v blízkosti cívky, indukují se v něm vířivé proudy, což se projeví zvýšením reálné části impedance cívky $R_e = R_Z$. Zvýšení reálné části impedance cívky klesá činitel jakosti cívky. Klesáním činitele jakosti klesá i velikost amplitudy kmitů oscilátoru. Poklesne-li velikost amplitudy kmitů pod nastavenou hodnotu, zareagují výstupní obvody a přepnou výstup do stavu sepnuto nebo rozepnuto v závislosti na provedení snímače. [4]

Jednoduché schéma zapojení oscilátoru je na *Obr. 3.11*. Rezonanční obvod tvoří cívka L_1 a kondenzátor C . Tranzistor T je zapojen jako emitorový sledovač. Jeho napěťové zesílení je menší než jedna, je proto nutné použití zpětné vazby, která se realizuje odbočkou na cívce nebo samostatnou cívku L_2 . Odpojem báze R_B a diodou D se nastavuje pracovní bod tranzistoru T , podmínka kmitání a spínací vzdálenost je nastavena emitorovým odporem R_E . Toto zapojení vykazuje teplotní nestabilitu, proto se dioda D nahrazuje přechodem báze-emitor dalšího tranzistoru. Působí-li na oba tranzistory stejná okolní teplota, jejich teplotní nestabilita se vzájemně kompenzuje. [4]



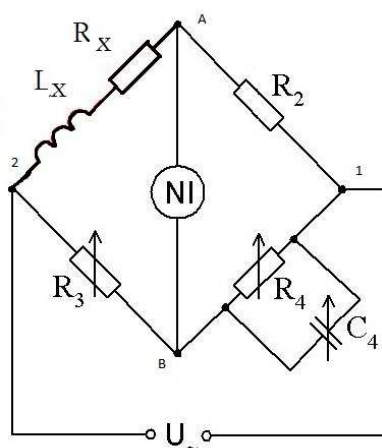
Obr. 3.11 Principiální schéma oscilátoru [4]

4 VYHODNOCENÍ SIGNÁLŮ ZE SENZORŮ

Neméně důležitou součástí měřicího procesu je vyhodnocení získaných hodnot ze snímačů. K tomuto procesu je senzor jako celek tvořen nejen cívkou, ale také podpůrnými obvody, které převedou naměřenou hodnotu na unifikovaný signál, se kterým se dá nadále pracovat a prezentovat. Metody vyhodnocování a převodu na unifikovaný signál dělíme v závislosti na výstupním signálu z podpůrných obvodů. První metodou je metoda spojitá a druhá metoda je nespojitá. Pro spojitou metodu může být unifikovaný signál napětí $U = 0 \div 10 \text{ V}$ nebo elektrický proud $I = 4 \div 20 \text{ mA}$. Pro nespojitou metodu vyhodnocování je typické, že se vyhodnocují pouze dva stavy, sepnuto nebo rozepnuto. Unifikovaným výstupním signálem může být například $U = 0 \text{ V}$ pro rozepnuto a $U = 5 \text{ V}$ pro sepnuto.

4.1 Můstkové metody pro měření indukčnosti

Obecně je můstek složen ze čtyř větví, přičemž v každé z větví je obecně impedance Z . Můstek je napájen pomocným střídavým napětím, které je přivedeno na protilehlé uzly (1 a 2). Mezi zbylými protilehlými uzly (A a B) je v případě rovnovážného stavu můstku nulové výstupní napětí. Na Obr. 4.1 je zobrazen typický zástupce můstků - Maxwell-Wienův můstek



Obr. 4.1 Maxwell-Wienův můstek

Pro impedance jednotlivých větví platí:

$$Z_X = R_X + j\omega L_X$$

$$Z_2 = R_2$$

$$Z_3 = R_3$$

$$Z_4 = R_4 + \frac{1}{j\omega C_4}$$

Pro rovnovážný stav platí:

$$Z_X Z_4 = Z_2 Z_3$$

$$Z_X = \frac{R_2 R_3}{R_4} + j\omega C_4 R_2 R_3$$

$$R_X = \frac{R_2 R_3}{R_4}$$

$$L_X = C_4 R_2 R_3$$

4.2 Přímá metoda měření indukčnosti –VA metoda

Principem přímé metody měření indukčnosti je zapojení cívky do obvodu, který je napájen střídavým napětím, společně s ampérmetrem a voltmetrem. Ze známé hodnoty reálného odporu cívky a naměřených hodnot lze určit impedanci podle vztahu

$$Z = \frac{U_{ef}}{I_{ef}} = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2} \quad (21)$$

$$L = \frac{\sqrt{\frac{U_{ef}^2}{I_{ef}^2} - R^2}}{2\pi f} \quad [H], \quad (22)$$

kde U_{ef} je efektivní napětí, I_{ef} je efektivní proud, R je činný odpor cívky a L je indukčnost cívky.

4.3 Rezonanční metody měření indukčnosti

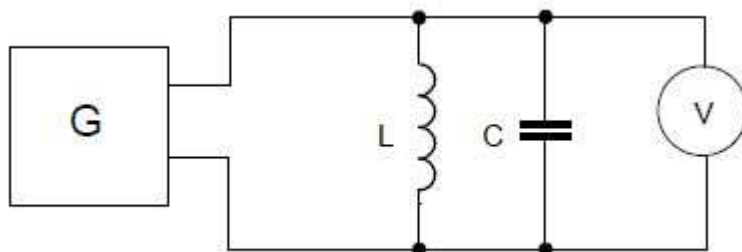
Pro měření indukčnosti rezonanční metodou se používá tzv. normálový kondenzátor. Normálový kondenzátor je kondenzátor, u kterého předem známe jeho kapacitu. Měřicí obvod je složen z laditelného generátoru, voltmetru a paralelní kombinace normálového kondenzátoru a cívky. Na generátoru se nastaví rezonanční frekvence. Rezonanční frekvence je taková, kdy napětí na voltmetru je největší. Ze schématu na *Obr.4.2* plyne, že napětí na cívce i kondenzátoru je shodné. Z tohoto poznatku lze určit vztah pro výpočet indukčnosti.

$$U_L = U_C$$

$$X_L I = X_C I$$

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}$$

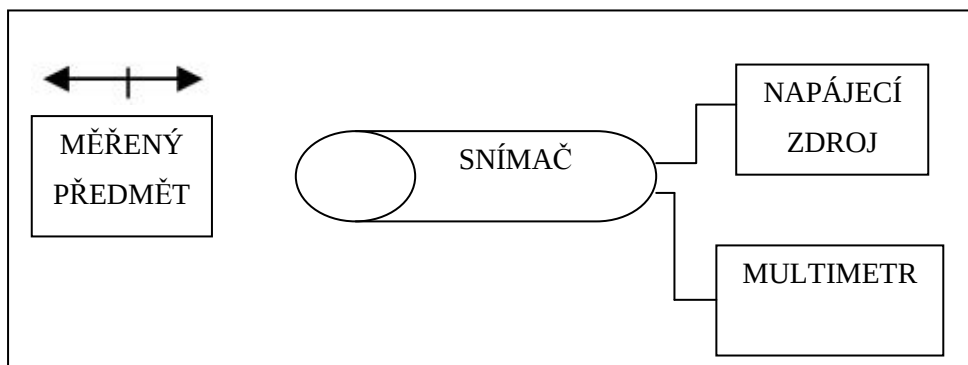
$$L = \frac{1}{\omega^2 C}$$



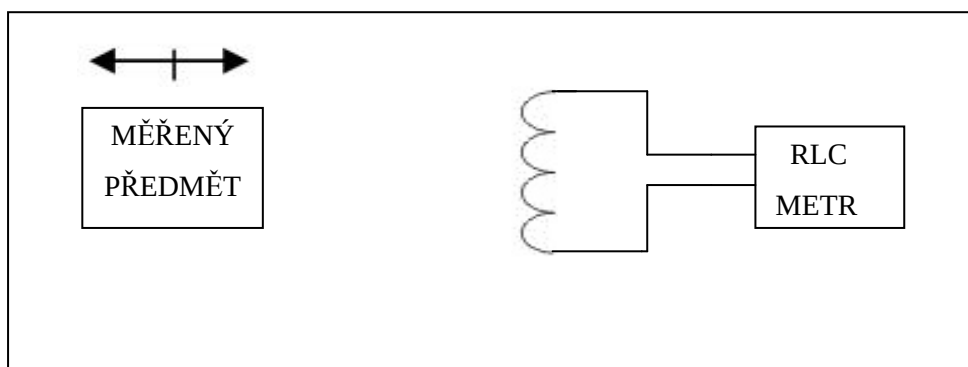
Obr. 4.2 Schéma zapojení pro rezonanční metodu měření indukčnosti

5 VLASTNÍ MĚŘENÍ

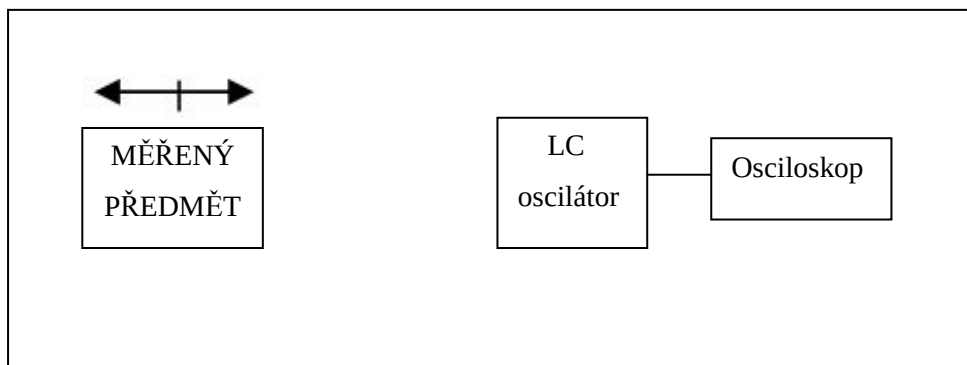
Měření s indukčnostními snímači probíhalo podle následujících kroků. Prvním krokem je zapojení měřicího pracoviště podle měřených veličin a použitého snímače. Dále je potřeba nastavit měřicí přístroje. Poté jsem připevnil měřené vzorky na přípravek a nastavil nulovou pozici pomocí ocejchovaného aretačního šroubu. S oddalováním měřeného materiálu od snímače jsem zaznamenával změnu měřené veličiny. Po změření jednoho vzorku se měření opakovalo pro ostatní vzorky.



Obr. 5.1 Blokové schéma měřicího pracoviště s oscilátorovým snímačem



Obr. 5.2 Blokové schéma měřicího pracoviště pro indukčnostní snímač s potlačeným mag. polem



Obr. 5.3 Blokové schéma měřicího pracoviště pro měření s LC oscilátorem

5.1 Naměřené hodnoty s indukčností snímačem s potlačeným magnetickým polem

Pro měření s indukčností snímačem s potlačeným magnetickým polem byla použita cívka s vlastní indukčností $L=40,75$ mH při frekvenci $f=100$ kHz. Změna indukčnosti cívky v závislosti na přiblížení měřeného objektu z různých materiálů je uvedena v Tab. 2 až Tab. 7. Před vlastním měřením je potřeba zapojit měřící pracoviště podle blokového schématu na Obr.5.2.

Tab. 2 Závislost změny indukčnosti cívky na vzdálenosti detekovaného objektu z oceli, $f=100$ kHz

l [mm]	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	5
$ Z $ [k Ω]	36,040	33,990	33,860	33,870	33,970	34,090	34,220	34,730
L_s [mH]	47,045	49,235	50,727	51,860	52,670	53,277	53,750	55,020
R_s [k Ω]	20,631	14,066	11,410	9,304	7,715	6,480	5,520	3,310

Tab. 3 Závislost změny indukčnosti cívky na vzdálenosti detekovaného objektu z oceli, $f=5$ MHz

l [mm]	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	5
$ Z $ [k Ω]	1,512	1,576	1,566	1,560	1,554	1,505	1,503	1,510
L_s [μ H]	45,733	49,283	49,007	48,829	48,649	47,153	47,078	47,522
R_s [Ω]	285,130	290,890	287,060	285,820	283,570	267,850	266,730	263,940

Tab. 4 Závislost změny indukčnosti cívky na vzdálenosti detekovaného objektu z hliníku, $f=100$ kHz

l [mm]	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	5
 Z [kΩ]	15,240	17,322	19,871	22,130	24,124	25,824	27,301	31,366
Ls [mH]	24,920	27,507	31,569	35,168	38,349	41,042	43,412	49,870
Rs [kΩ]	1,172	1,178	1,185	1,190	1,193	1,201	1,206	1,221

Tab. 5 Závislost změny indukčnosti cívky na vzdálenosti detekovaného objektu z hliníku, $f=5$ MHz

l [mm]	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	5
 Z [kΩ]	1,449	1,561	1,557	1,553	1,510	1,507	1,501	1,495
Ls [μH]	45,020	48,730	48,605	48,507	47,270	47,190	47,014	46,818
Rs [Ω]	311,500	307,390	303,700	300,940	270,950	269,330	268,610	265,910

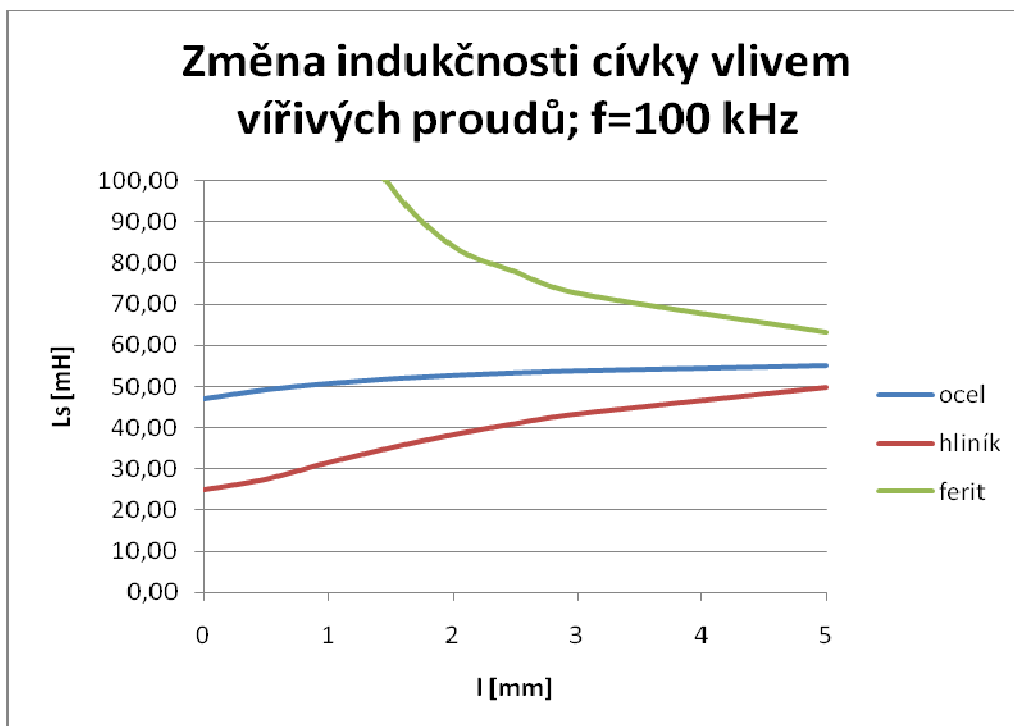
Tab. 6 Závislost změny indukčnosti cívky na vzdálenosti detekovaného objektu z feritu, $f=100$ kHz

l [mm]	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	5
 Z [kΩ]	604,190	121,020	77,946	62,082	52,928	48,776	45,708	39,710
Ls [mH]	681,550	193,280	123,810	98,612	84,110	77,895	72,653	63,152
Rs [kΩ]	474,070	15,549	6,311	3,912	3,194	2,673	2,255	1,682

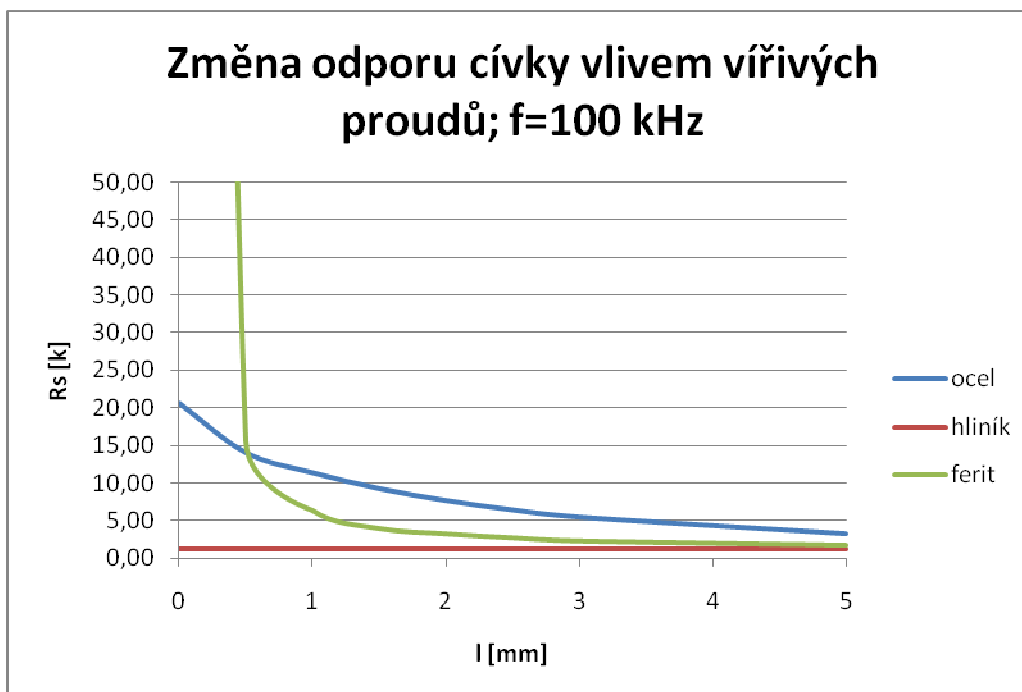
Tab. 7 Závislost změny indukčnosti cívky na vzdálenosti detekovaného objektu z feritu, $f=5$ MHz

l [mm]	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	5
 Z [kΩ]	1,509	1,543	1,540	1,539	1,537	1,528	1,492	1,489
Ls [μH]	48,121	47,955	47,590	47,007	46,845	46,317	46,150	45,752
Rs [Ω]	0,297	0,294	0,287	0,283	0,277	0,271	0,267	0,262

Graf 1 Změna indukčnosti cívky vlivem vířivých proudů; $f=100\text{ kHz}$



Graf 2 Změna odporu cívky vlivem vířivých proudů; $f=100\text{ kHz}$



5.2 Naměřené hodnoty se snímačem 871U-X5A18

Indukčnostní snímač 871U-X5A18 je snímač s dvoustavovým výstupem zobrazující jestli detekovaný předmět je či není přítomen. Tento typ snímače s dvoustavovým výstupem je označován jako limitní.

Tab. 8 Spínací a rozpínací vzdálenosti snímače 871U-X5A18 pro U=24 V

materiál	vzdálenost		hystereze [%]	korekční faktor
	spínací [mm]	rozpínací [mm]		
železo	4,80	5,10	6,25	0,96
měď	1,10	1,80	63,64	0,22
hliník	1,30	1,80	38,46	0,26
ferit	-	-	-	-

Výpočet hystereze jsem provedl podle vztahu (6).

Příklad výpočtu hystereze pro železo:

$$hystereze = \frac{\text{rozpínací vzdálenost} - \text{spínací vzdálenost}}{\text{spínací vzdálenost}} * 100 = \frac{5,1 - 4,8}{4,8} * 100 = 6,25 \%$$

Výpočet korekčního faktoru jsem provedl podle vztahu (7), jako spínací vzdálenost pro ocel jsem použil výrobcem udanou spínací vzdálenost 5 mm.

Příklad výpočtu korekčního faktoru pro železo:

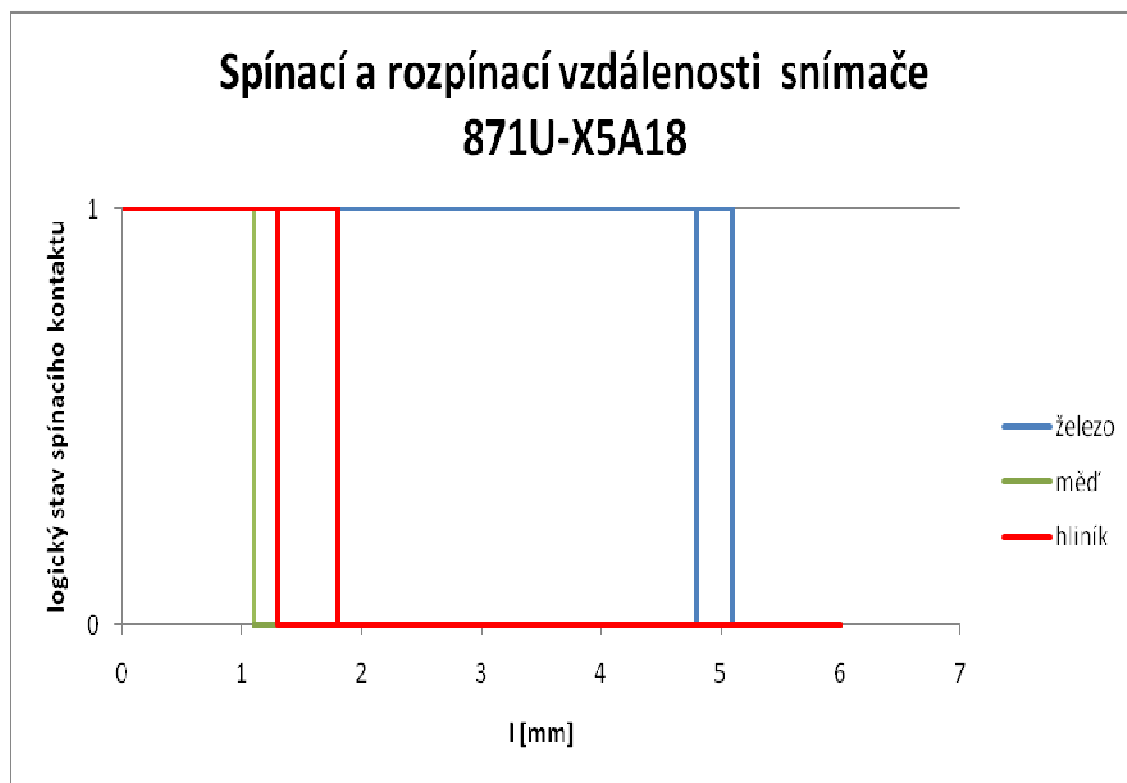
$$\text{kor. faktor} = \frac{\text{spínací vzdálenost materiálu}}{\text{spínací vzdálenost oceli}} = \frac{4,80}{5,00} = 0,96$$

Tab. 9 Korekční faktory materiálů pro 871U- X5A18 podle výrobce

ocel	1
nerez ocel	0,35-0,65
mosaz	0,3
hliník	0,25
měď	0,3

Porovnáním vypočtených korekčních faktorů vypočtených a udaných výrobcem vycházejí faktory velmi podobně akorát u mědi se liší. Je to způsobeno nečistotami a příměsemi v měřeném měděném materiálu.

Graf 3 Spínací a rozpínací vzdálenosti snímače 871U-X5A18 pro $U=24\text{ V}$



5.3 Naměřené hodnoty se snímačem IA5-18GM-I3

Měření s indukčnostním oscilátorovým snímačem bylo měřeno podle blokového schématu na Obr.5.1. Měření probíhalo na zakoupeném snímači IA5-18GM-I3. Indukčnostní snímač IA5-18GM-I3 je snímač s analogovým výstupem. Jedná se o typ snímače, který nemá pouze dvoustavový výstup, ale má výstup spojitý. Tyto typy snímačů jsou schopny snímat téměř od samotného čela cívky až k hodnotě jmenovité užité vzdálenosti, která tak vymezuje pracovní oblast snímače. Výstupní závislost mezi polohou snímaného předmětu a napětím nebo proudem, je v této oblasti přibližně lineární.

Tab. 10 Závislost výstupního signálu na vzdálenosti detekovaného předmětu z oceli

l	[mm]	2,00	2,25	2,50	2,75	3,00	3,25	3,50
výchylka	[díllek]	6,50	10,50	14,50	20,50	31,00	38,00	46,00
I	[mA]	1,30	2,10	2,90	4,10	6,20	7,60	9,20
I_{LIN}	[mA]	-0,69	0,74	2,16	3,59	5,01	6,43	7,86

3,75	4,00	4,25	4,50	4,75	5,00	5,25	5,50
54,00	62,00	70,00	76,00	84,00	89,00	94,00	99,00
10,80	12,40	14,00	15,20	16,80	17,80	18,80	19,80
9,28	10,70	12,13	13,55	14,97	16,40	17,82	19,24

Tab. 11 Závislost výstupního signálu na vzdálenosti detekovaného předmětu z hliníku

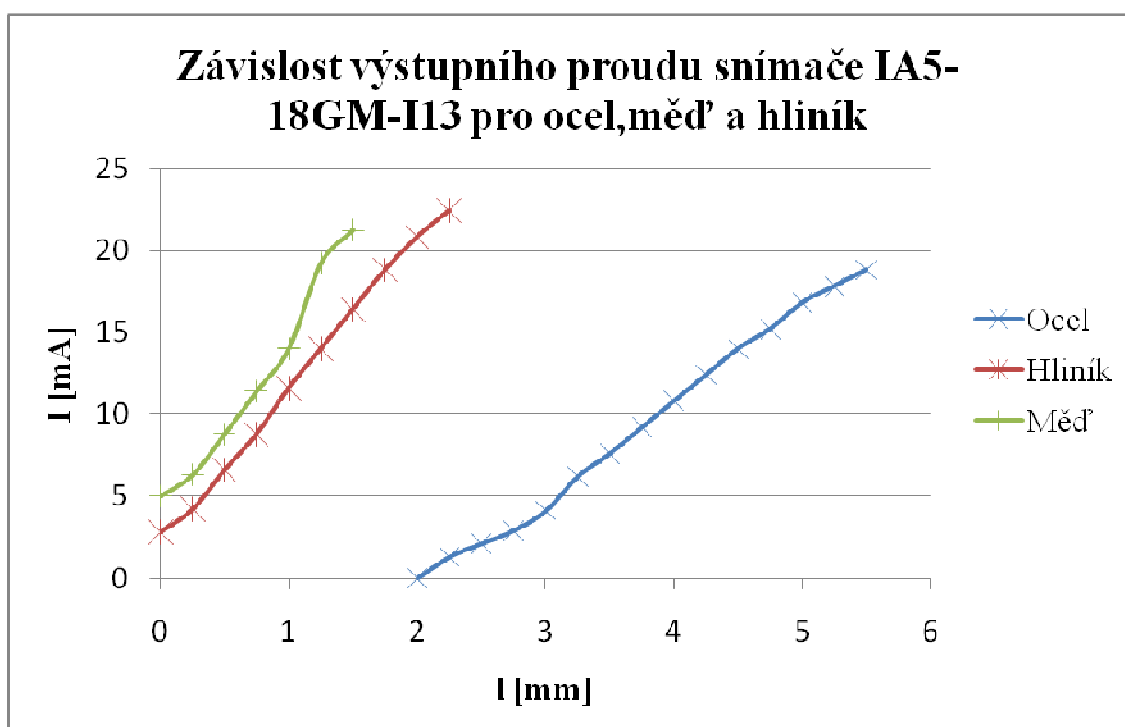
l	[mm]	0,00	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50
výchylka	[díllek]	14,00	21,00	33,00	44,00	58,00	70,00	82,00
I	[mA]	2,80	4,20	6,60	8,80	11,60	14,00	16,40
I_{LIN}	[mA]	2,31	4,60	6,90	9,20	11,49	13,79	16,08

1,75	2,00	2,25
94,00	104,00	112,00
18,80	20,80	22,40
18,38	20,68	22,97

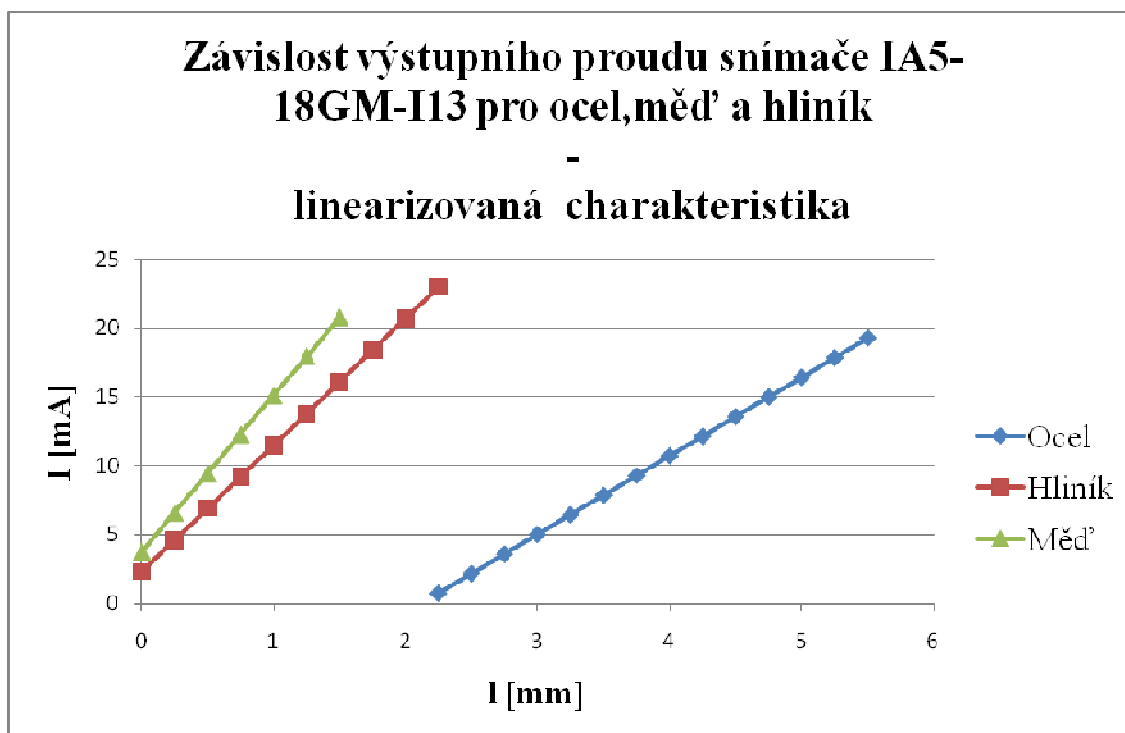
Tab. 12 Závislost výstupního signálu na vzdálenosti detekovaného předmětu z mědi

l	[mm]	0,00	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50
výchylka	[díllek]	25,00	31,50	44,00	57,00	70,00	96,00	106,00
I	[mA]	5,00	6,30	8,80	11,40	14,00	19,20	21,20
I_{LIN}	[mA]	3,74	6,59	9,43	12,27	15,11	17,96	20,80

Graf 4 Závislost výstupního signálu snímače IA5-18GM-I13 na vzdálenosti od měřeného materiálu

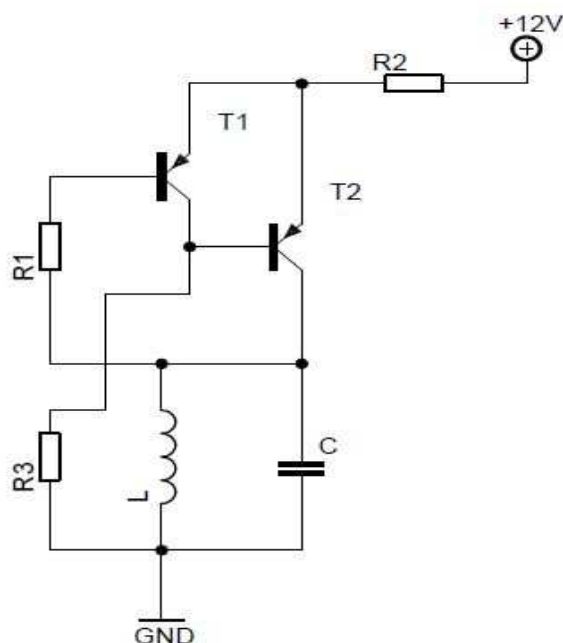


Graf 5 Linearizovaná závislost výstupního signálu snímače IA5-18GM-I13 na vzdálenosti od měřeného materiálu



5.4 Naměřené hodnoty s LC oscilátorem

Na snímači IA5-18GM-I13 nebylo možné měřit frekvenci a amplitudu kmitů oscilátoru při detekci měřených objektů. Byl pro to sestaven LC obvod v nepájivém poli, na kterém bylo možno pomocí osciloskopu měřit výše uvedené veličiny kmitů. Schéma zapojení LC oscilátoru je na *Obr.5.4*, blokové schéma zapojení pracoviště pro měření na LC oscilátoru je na *Obr.5.3*.



Obr. 5.4 Schéma zapojení LC oscilátoru

Naměřené hodnoty v tabulkách *Tab. 13* až *Tab. 16* jsou pro hodnoty cívky $L=40,75$ mH a kondenzátoru $C=2,2$ nF.

Tab. 13 Změna frekvence a amplitudy kmitů LC oscilátoru při detekci objektu z oceli

l [mm]	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5
f [kHz]	0,32	1,83	2,29	2,62	2,84	3,02	3,15	3,26
U [V]	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,60	1,60

4	4,5	5	5,5	6	6,5	10
3,35	3,41	3,46	3,49	3,52	3,55	3,66
1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60

Tab. 14 Změna frekvence a amplitudy kmitů LC oscilátoru při detekci objektu z hliníku

l [mm]	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5
f [kHz]	5,61	5,14	4,83	4,68	4,42	4,29	4,18	4,10
U [V]	1,60	1,60	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58

4	4,5	5	5,5	6	6,5	10
4,03	3,99	3,93	3,91	3,87	3,85	3,73
1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58

Tab. 15 Změna frekvence a amplitudy kmitů LC oscilátoru při detekci objektu z mědi

l [mm]	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5
f [kHz]	6,17	5,61	5,14	4,85	4,61	4,44	4,31	4,20
U [V]	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58

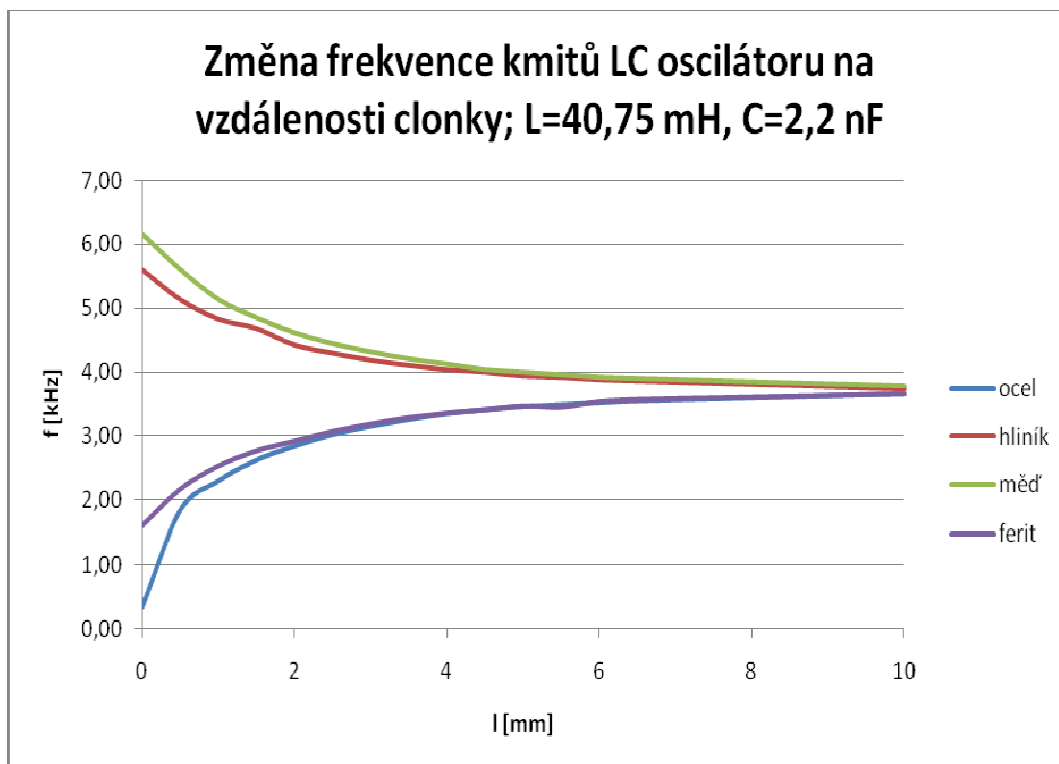
4	4,5	5	5,5	6	6,5	10
4,12	4,03	3,99	3,95	3,91	3,89	3,77
1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58

Tab. 16 Změna frekvence a amplitudy kmitů LC oscilátoru při detekci objektu z feritu

l [mm]	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5
f [kHz]	1,60	2,17	2,53	2,77	2,92	3,07	3,19	3,29
U [V]	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58

4	4,5	5	5,5	6	6,5	10
3,36	3,41	3,47	3,45	3,54	3,57	3,66
1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58

Graf 6 Změna frekvence kmitů LC oscilátoru na vzdálenosti clonky; L=40,75 mH, C=2,2 nF



Naměřené hodnoty v tabulkách *Tab. 17* až *Tab. 20* jsou pro hodnoty cívky L=40,75 mH a kondenzátoru C=470 nF.

Tab. 17 Změna frekvence a amplitudy kmitů LC oscilátoru při detekci objektu z oceli

l [mm]	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5
f [kHz]	0,36	0,59	0,71	0,79	0,84	0,88	0,91	0,94
U [V]	1,56	1,56	1,52	1,50	1,50	1,48	1,48	1,46

4	4,5	5	5,5	6	6,5	10
0,95	0,97	0,98	0,99	1,00	1,01	1,02
1,46	1,46	1,46	1,46	1,46	1,46	1,46

Tab. 18 Změna frekvence a amplitudy kmitů LC oscilátoru při detekci objektu z hliníku

l [mm]	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5
f [kHz]	1,12	1,13	1,12	1,11	1,10	1,09	1,08	1,08
U [V]	1,04	1,15	1,21	1,26	1,30	1,33	1,36	1,37

4	4,5	5	5,5	6	6,5	10
1,07	1,07	1,06	1,06	1,06	1,06	1,05
1,38	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40

Tab. 19 Změna frekvence a amplitudy kmitů LC oscilátoru při detekci objektu z mědi

l [mm]	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5
f [kHz]	1,14	1,16	1,15	1,13	1,12	1,11	1,10	1,09
U [V]	0,98	1,10	1,20	1,26	1,29	1,31	1,34	1,35

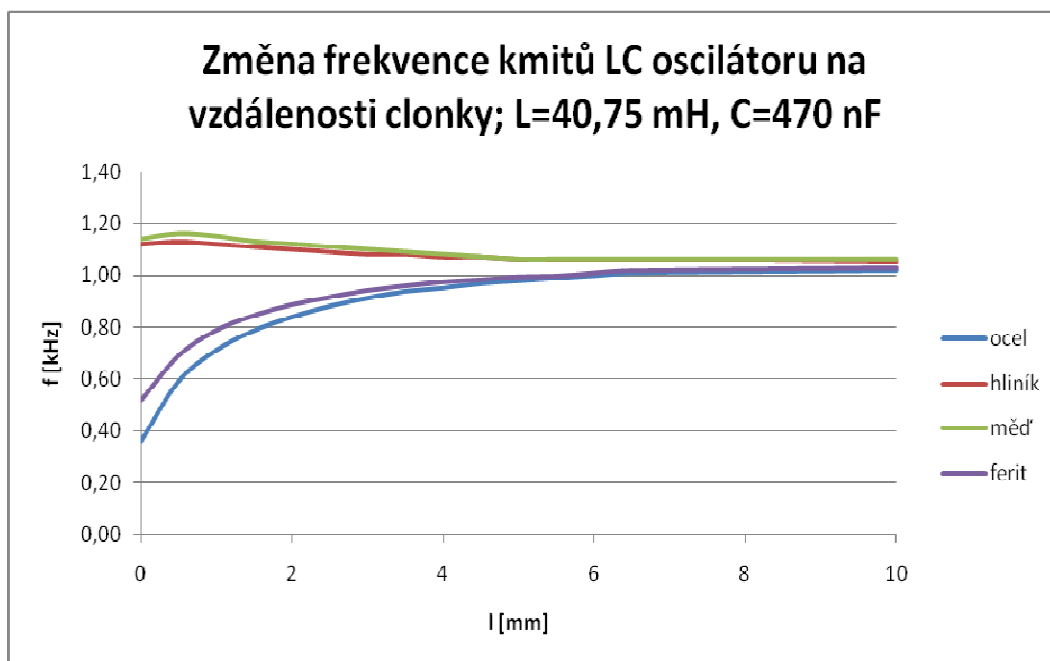
4	4,5	5	5,5	6	6,5	10
1,08	1,07	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06
1,38	1,38	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40

Tab. 20 Změna frekvence a amplitudy kmitů LC oscilátoru při detekci objektu z feritu

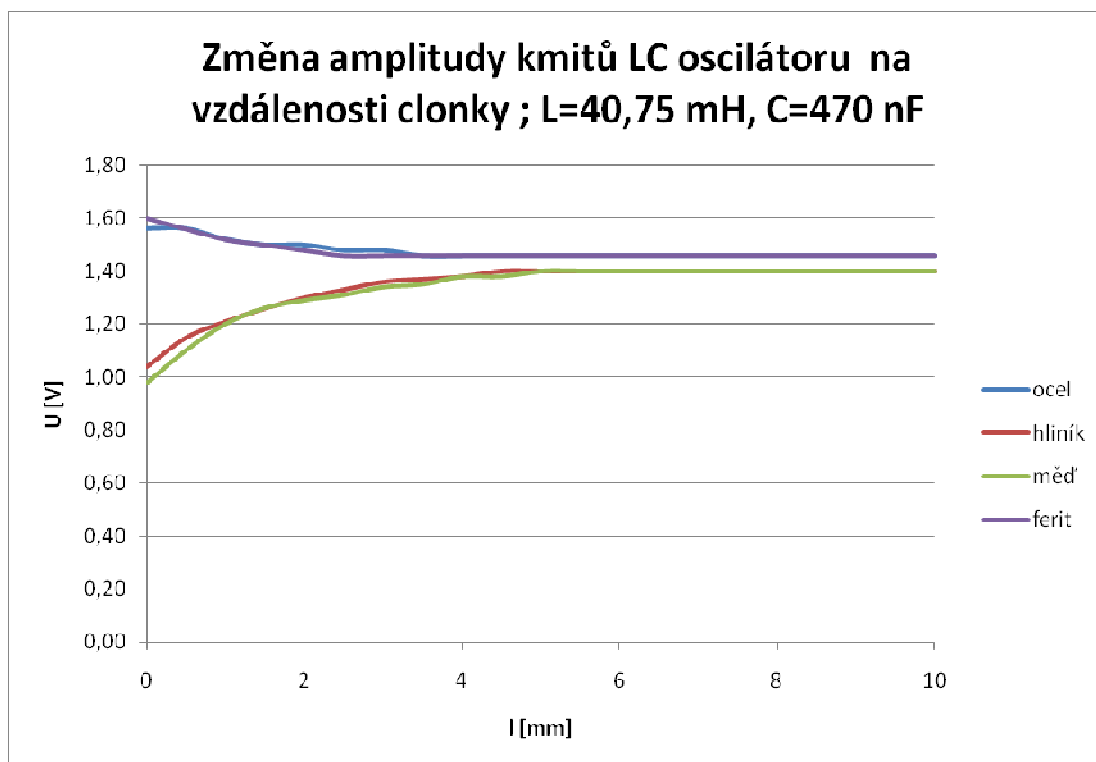
l [mm]	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5
f [kHz]	0,52	0,69	0,79	0,85	0,89	0,92	0,94	0,96
U [V]	1,60	1,56	1,52	1,50	1,48	1,46	1,46	1,46

4	4,5	5	5,5	6	6,5	10
0,98	0,99	1,00	1,00	1,01	1,02	1,03
1,46	1,46	1,46	1,46	1,46	1,46	1,46

Graf 7 Změna frekvence kmitů LC oscilátoru na vzdálenosti clonky; $L=40,75 \text{ mH}$, $C=470 \text{ nF}$



Graf 8 Změna amplitudy kmitů LC oscilátoru na vzdálenosti clonky; $L=40,75 \text{ mH}$, $C=470 \text{ nF}$



6 MĚŘÍCÍ PŘÍSTROJE A POMŮCKY

RLC metr HIOKY HiTester 3532

Osciloskop UNI-T UTD 2025C

e.č. 2110005634

Stabilizovaný zdroj Zlatník AUL 310

e.č. 881348

Miliampermetr METRA

Snímač IA5-18GM-I13

Snímač 871U-X5A18

LC oscilátor

Cívka

Vzorky materiálů

7 ZÁVĚR

V první části práce jsem popsal základní veličiny a definované pojmy, které je vhodné znát při práci s indukčnostními snímači. Dále jsem popsal základní typy indukčnostních snímačů a vysvětlil jejich princip.

Z naměřených hodnot na oscilátorovém snímači IA5-18GM-I3 s analogovým výstupem jsem ověřil velikosti výstupního signálu v závislosti na vzdálenosti měřené clonky z různých materiálů. Naměřené hodnoty jsem zpracoval tabelárně a následně graficky. Z grafu je patrné, že snímací vzdálenost se prodlužuje nebo zkracuje podle měřeného materiálu. Největší snímací vzdálenost vykazuje snímač pro ocel, menší pro hliník a nejmenší snímací vzdálenost pro měď. Tento poznatek koresponduje s tabulkou uvedenou v teoretické části. V naměřených hodnotách a grafech nejsou uvedeny hodnoty výstupního signálu pro feritový materiál. Důvodem je, že snímač elektricky nevodivý materiál nedetekuje a výstupní signál se drží na konstantní hodnotě 28 mA.

Další měření jsem provedl s limitním indukčnostním snímačem 871U-X5A18. Naměřil jsem spínací a rozpínací vzdálenosti pro různé materiály a výsledky zpracoval tabelárně i graficky. Největší spínací vzdálenost je pro železo, nejmenší pro měď. Při přibližování feritového materiálu nedošlo k sepnutí snímače. Vypočítal jsem hystereze a korekční faktory měřených materiálů.

Měřením indukčnosti cívky jako snímače s potlačeným magnetickým polem jsem změřil vliv vířivých proudů, které se vytvářejí v elektricky vodivém předmětu, na změnu indukčnosti cívky při přibližování materiálů k cívce. Pro čistě elektricky vodivé materiály indukčnost cívky klesá s přiblížením materiálu. Pro feromagnetické a elektricky vodivé materiály indukčnost cívky s přiblížováním materiálu k cívce klesá. Čistě feromagnetický materiál indukčnost zvyšuje. Tyto závislosti jsem zpracoval tabelárně a následně graficky.

Poslední měření jsem provedl s LC oscilátorem, kde jsem měřil změnu frekvence kmitání a amplitudu kmitání v závislosti na přiblížení měřeného objektu z různých materiálů. Frekvence kmitání závisí na parametrech cívky a kondenzátoru tvořících LC obvod. S přibližujícím se feromagnetickým materiálem roste indukčnost cívky. Zvětšení indukčnosti má za následek pokles frekvence kmitání oscilátoru.

Naopak při přiblížení elektricky vodivého materiálu indukčnost klesá a frekvence kmitů roste. Tyto závislosti jsou také zpracovány graficky i tabelárně.

Literatura

- [1] ĎAĎO, Stanislav; KREIDL, Marcel. *Senzory a měřicí obvody*. Vydání první. Praha: ČVUT, 1996. 315 s. ISBN 80-01-01500-9.
- [2] BENEŠ, Pavel, et al. *Automatizace a automatizační technika 3 : Prostředky automatizační techniky*. Vydání druhé. Brno : CP Books, 2005. 280 s. ISBN 80-251-0795-7.
- [3] ZEHNULA, Karel. *Snímače neelektrických veličin*. Druhé, upravené a doplněné vydání. Praha : SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1983. 372 s.
- [4] MARTINEK, Radislav. *Senzory : V průmyslové praxi*. 1. vydání. Praha : BEN-technická literatura, 2004. 199 s. ISBN 80-7300-114-4.
- [5] BEJČEK, Ludvík. *Senzory neelektrických veličin*. Elektronické skriptum FEKT VUT Brno. 2009. 212 s.
- [6] A
- [7] BENEŠ, Petr, et al. *Měření fyzikálních veličin : návody do laboratorních cvičení* [online]. Brno : [s.n.], 7.2.2010 [cit. 2010-11-23]. Dostupné z WWW: <www.vutbr.cz>.
- [8] Pepperl+Fuchs s. r. o. Indukční snímače slaví 50 let od svého vzniku. *Automa : časopis pro automatizační techniku*. 2008, 9, 8-9, s. 46. Dostupný také z WWW: <<http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/37779.pdf>>.

8 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1 Definice spínacích vzdáleností [4].....	14
Obr. 2.2 Definice hystereze [4]	16
Obr. 3.1 Náhradní elektrické schéma indukčnostního snímače [2].....	18
Obr. 3.2 Indukčnostní snímač s malou vzduchovou mezerou v jednoduchém uspořádání [2] ...	20
Obr. 3.3 Indukčnostní snímač s malou vzduchovou mezerou v diferenčním uspořádání [2]	20
Obr. 3.4 schéma indukčnostního snímače s otevřeným magnetickým obvodem [5]	21
Obr. 3.5 Principiální schéma indukčnostního snímače s otevřeným magnetickým obvodem v diferenčním zapojení [7]	22
Obr. 3.6 Výstupní charakteristika LVDT snímače [7]	22
Obr. 3.7 Schematické znázornění pro výpočty indukčnosti dvou prstenců [3].....	24
Obr. 3.8 Náhradní schéma dvou cívek [4]	24
Obr. 3.9 Principiální schéma indukčnostního snímače s potlačeným magnetickým polem [1]..	26
Obr. 3.10 Blokové schéma oscilátorového indukčnostního snímače [4]	26
Obr. 3.11 Principiální schéma oscilátoru [4].....	27
Obr. 4.1 Maxwell-Wienův můstek.....	28
Obr. 4.2 Schéma zapojení pro rezonanční metodu měření indukčnosti.....	30
Obr. 5.1 Blokové schéma měřícího pracoviště s oscilátorovým snímačem.....	31
Obr. 5.2 Blokové schéma měřícího pracoviště pro indukčnostní snímač s potlačeným mag. polem.....	31
Obr. 5.3 Blokové schéma měřícího pracoviště pro měření s LC oscilátorem.....	32
Obr. 5.4 Schéma zapojení LC oscilátoru	39

9 SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 Změna indukčnosti cívky vlivem vířivých proudů; $f=100\text{ kHz}$	34
Graf 2 Změna odporu cívky vlivem vířivých proudů; $f=100\text{ kHz}$	34
Graf 3 Spínací a rozpínací vzdálenosti snímače 871U-X5A18 pro $U=24\text{ V}$	36
Graf 4 Závislost výstupního signálu snímače IA5-18GM-I13 na vzdálenosti od měřeného materiálu.....	38
Graf 5 Linearizovaná závislost výstupního signálu snímače IA5-18GM-I13 na vzdálenosti od xměřeného materiálu.....	38
Graf 6 Změna frekvence kmitů LC oscilátoru na vzdálenosti clonky; L=40,75 mH, C=2,2 nF	41
Graf 7 Změna frekvence kmitů LC oscilátoru na vzdálenosti clonky; L=40,75 mH, C=470 nF	43
Graf 8 Změna amplitudy kmitů LC oscilátoru na vzdálenosti clonky; L=40,75 mH, C=470 nF	43

10 SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Příklady korekčních faktorů.....	17
Tab. 2 Závislost změny indukčnosti cívky na vzdálenosti detekovaného objektu z oceli, f=100 kHz	32
Tab. 3 Závislost změny indukčnosti cívky na vzdálenosti detekovaného objektu z oceli, f=5 MHz.....	32
Tab. 4 Závislost změny indukčnosti cívky na vzdálenosti detekovaného objektu z hliníku, f=100 kHz	33
Tab. 5 Závislost změny indukčnosti cívky na vzdálenosti detekovaného objektu z hliníku, f=5 MHz.....	33
Tab. 6 Závislost změny indukčnosti cívky na vzdálenosti detekovaného objektu z feritu, f=100 kHz	33
Tab. 7 Závislost změny indukčnosti cívky na vzdálenosti detekovaného objektu z feritu, f=5 MHz.....	33
Tab. 8 Spínací a rozpínací vzdálenosti snímače 871U-X5A18 pro U=24 V	35
Tab. 9 Korekční faktory materiálů pro 871U- X5A18 podle výrobce	35
Tab. 10 Závislost výstupního signálu na vzdálenosti detekovaného předmětu z oceli	37
Tab. 11 Závislost výstupního signálu na vzdálenosti detekovaného předmětu z hliníku	37
Tab. 12 Závislost výstupního signálu na vzdálenosti detekovaného předmětu z mědi.....	37
Tab. 13 Změna frekvence a amplitudy kmitů LC oscilátoru při detekci objektu z oceli	39
Tab. 14 Změna frekvence a amplitudy kmitů LC oscilátoru při detekci objektu z hliníku.....	40
Tab. 15 Změna frekvence a amplitudy kmitů LC oscilátoru při detekci objektu z mědi	40
Tab. 16 Změna frekvence a amplitudy kmitů LC oscilátoru při detekci objektu z feritu	40
Tab. 17 Změna frekvence a amplitudy kmitů LC oscilátoru při detekci objektu z oceli	41
Tab. 18 Změna frekvence a amplitudy kmitů LC oscilátoru při detekci objektu z hliníku.....	42
Tab. 19 Změna frekvence a amplitudy kmitů LC oscilátoru při detekci objektu z mědi	42
Tab. 20 Změna frekvence a amplitudy kmitů LC oscilátoru při detekci objektu z feritu	42
Tab. 21 Tabulka použitých značek a symbolů	51

11 POUŽITÉ ZNAČKY A SYMBOLY

Tab. 21 Tabulka použitých značek a symbolů

Značka	Jednotka	Význam
L	[H]	Indukčnost
Φ	[Wb]	mag. indukční tok
I	[A]	elektrický proud
B	[T]	mag. indukce
$F_{\max}$	[N]	max. síla působící na náboj
Q	[C]	náboj
E	[V*m ⁻¹]	intenzita elektrického pole
v	[m ⁻¹]	rychlost
c	[m ⁻¹]	rychlost světla
S	[m ²]	obsah
α	[°]	úhel
μ	[H*m ⁻¹]	permeabilita
H	[A*m ⁻¹]	intenzita magnetického pole
μ_r	[-]	relativní permeabilita
μ_0	[H*m ⁻¹]	permeabilita vakua
sn	[m]	jmenovitá spínací vzdálenost
sr	[m]	reálná spínací vzdálenost
su	[m]	provozní spínací vzdálenost
sp	[m]	pracovní spínací vzdálenost
R	[Ω]	elektrický odpor
C	[F]	kapacita kondenzátoru
R_v	[Ω]	odpor přívodních kabelů
L_v	[H]	indukčnost přívodních kabelů
C_v	[F]	kapacita mezi přívodními kabely
R_{iz}	[Ω]	izolační odpor
d	[m]	velikost vzduchové mezery
Z	[Ω]	impedance jednobranu
N_z	[-]	počet závitů
R_M	[H ⁻¹]	magnetický odpor
μ_M	[H*m ⁻¹]	permeabilita magnetického materiálu
μ_v	[H*m ⁻¹]	permeabilita vzduchové mezery

Značka	Jednotka	Význam
M	[H]	vzájemná indukčnost
U	[V]	napětí
ρ	[$\Omega \cdot m$]	rezistivita
R_z	[Ω]	odpor zátěže
L_z	[H]	indukčnost zátěže
R_e	[Ω]	ekvivalentní odpor
X_e	[Ω]	ekvivalentní reaktance
ρ_k	[$\Omega \cdot m$]	rezistivita materiálu
I	[A]	elektrický proud
h ν	[m]	hloubka vniku
U_{ef}	[V]	efektivní napětí
I_{ef}	[A]	efektivní proud
f	[Hz]	frekvence
X_L	[Ω]	reaktance
X_C	[Ω]	kapacitance