

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

## INDUKČNÍ SNÍMAČ POLOHY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

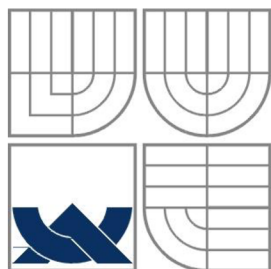
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

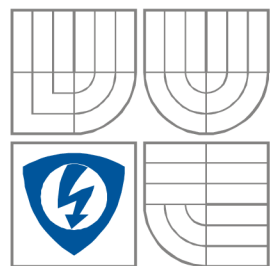
LUKÁŠ VOLF

BRNO 2010



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ**

**ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY  
A ELEKTRONIKY**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC  
ENGINEERING

## **Indukční snímač polohy**

**INDUCTIVE POSITION SENSOR**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

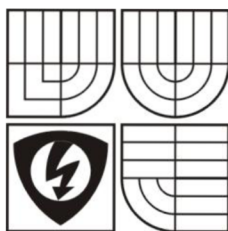
Lukáš Volf

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

Ing. Petr Huták, Ph.D.

BRNO, 2010



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

**Student:** Lukáš Volf

**Ročník:** 3

**ID:** 109743

**Akademický rok:** 2009/10

**NÁZEV TÉMATU:**

## Indukční snímač polohy

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

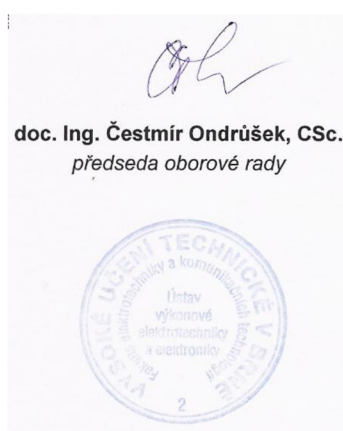
1. Navrhněte obvodové řešení oscilátoru indukčního snímače.
2. Ověřte jeho vlastnosti pro různé materiály.
3. Navrhněte vhodné vyhodnocovací obvody

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

**Termín zadání:** 1. 10. 2009

**Termín odevzdání:** 27. 5. 2010

**Vedoucí projektu:** Ing. Petr Huták, Ph.D.



**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 § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

## **Abstrakt**

Na začátku práce je uveden obecný přehled snímačů jejich dělení a vlastnosti. Tato práce se dále zabývá hlouběji indukčními snímači. V práci je navrhnout oscilátor s vyhodnocovacími obvody (dvupolohový indukční snímač), jeho praktická realizace, změření spínací vzdálenosti na různé druhy kovů a vyhodnocení měření. Pro zájemce je zde uveden seznam literatury.

## **Abstract**

In the beginning is given an overview of sensors and their separation and properties. This work also deals deeper with inductive sensors. The work is designed for evaluation of the oscillator circuit (binary inductive sensor), its practical implementation, measuring the sensing range of different metals and measurement evaluation. For those interested, here is a list of literature.

**Klíčová slova:**

Cívka, dvoupolohový indukční snímač, spínací vzdálenost.

**Keywords:**

Inductor, binary inductive sensor, operating distance.

## **Bibliografická citace**

Volf, L. Indukční snímač polohy. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 37 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Huták, Ph.D.

## Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma **Indukční snímač polohy** 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 § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne .....

Podpis autora .....

## Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Petru Hutákovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne .....

Podpis autora .....



## Obsah

<b>1 ÚVOD</b> .....	<b>12</b>
<b>1.1 VÝROBA SNÍMAČŮ</b> .....	<b>12</b>
<b>1.2 HLAVNÍ POŽADAVKY NA SNÍMAČE</b> .....	<b>13</b>
<b>1.3 ROZDĚLENÍ SNÍMAČŮ POLOHY</b> .....	<b>13</b>
<b>1.4 TECHNICKÉ PARAMETRY SNÍMAČŮ</b> .....	<b>15</b>
<b>1.4.1 STATICKÉ VLASTNOSTI SNÍMAČŮ</b> .....	<b>15</b>
<b>1.4.2 DYNAMICKÉ VLASTNOSTI SNÍMAČŮ</b> .....	<b>18</b>
<b>2 INDUKČNÍ SNÍMAČE POLOHY</b> .....	<b>19</b>
<b>2.1 HISTORIE A BUDOUCNOST INDUKČNÍCH SNÍMAČŮ</b> .....	<b>19</b>
<b>2.2 VÝROBCI INDUKČNÍCH SNÍMAČŮ</b> .....	<b>20</b>
<b>2.3 KONSTRUKČNÍ PŘÍMĚRY SENZORU</b> .....	<b>20</b>
<b>2.4 PRINCIP ČINNOSTI SENZORU</b> .....	<b>21</b>
<b>2.5 ROZDĚLENÍ INDUKČNÍCH SNÍMAČŮ</b> .....	<b>22</b>
<b>2.5.1 DVOUHODNOTOVÉ SNÍMAČE - (NESPOJITÉ)</b> .....	<b>22</b>
2.5.1.1 Blokové schéma dvouhodnotového senzoru .....	22
2.5.1.2 Rozdělení dvouhodnotových senzorů .....	22
A. Sensory s redukčním faktorem 1 .....	22
B. Zářezové senzory .....	23
C. Kruhové senzory .....	23
D. Sensory odolné vůči magnetickému poli .....	23
E. Selektivní senzory .....	23
F. Sensory se zabudovaným vyhodnocením otáček .....	23
2.5.1.3 Indukčnostní senzory na principu vířivých proudů (bezkontaktní) .....	24
2.5.1.4 Parametry indukčních bezkontaktních snímačů .....	24
<b>2.5.2 LINEÁRNÍ SENZORY – (SPOJITÉ)</b> .....	<b>26</b>
2.5.2.1 Blokové schéma lineárního senzoru.....	26
2.5.2.2 Analogové senzory .....	27
2.5.2.3 Indukční snímače pro bezdotykové měření vzdálenosti .....	28
<b>3 NÁVRH DVOUHODNOTOVÉHO INDUKČNÍHO SNÍMAČE POLOHY</b> .....	<b>29</b>
<b>3.1 NÁVRH A LADĚNÍ</b> .....	<b>29</b>
<b>3.2 NAVRŽENÉ SCHÉMA</b> .....	<b>30</b>
<b>3.3 OSCILÁTOR</b> .....	<b>30</b>
<b>3.4 KOMPARÁTOR</b> .....	<b>31</b>
<b>3.5 MONOSTABILNÍ KLOPNÝ OBVOD</b> .....	<b>32</b>
<b>3.6 NÁVRH A VÝROBA PLOŠNÉ DESKY SNÍMAČE</b> .....	<b>32</b>
<b>3.7 MĚŘENÍ SPÍNACÍ VZDÁLENOSTI SNÍMAČE PRO RŮZNÉ DRUHY KOVŮ</b> .....	<b>34</b>
<b>3.8 PRŮBĚHY NAMĚŘENÉ OSCILOSKOPEM NA SNÍMAČI</b> .....	<b>35</b>
<b>4 ZÁVĚR</b> .....	<b>36</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA</b> .....	<b>37</b>





## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1.1.1: Multiplikativní chyba</i> .....	17
<i>Obrázek 2.1.1: Ukázka indukčního snímače polohy</i> .....	19
<i>Obrázek 3.1.1: Ukázka ladění obvodů</i> .....	29
<i>Obrázek 3.2: Schéma navrženého dvouhodnotového indukčního snímače</i> .....	30
<i>Obrázek 3.3: Schéma oscilátoru</i> .....	31
<i>Obrázek 3.4: Schéma klopného obvodu</i> .....	31
<i>Obrázek 3.5: Schéma monostabilního klopného obvodu</i> .....	32
<i>Obrázek 3.6: Návrh plošné desky v EAGLU 5.0.0</i> .....	33
<i>Obrázek 3.7: Model indukčního snímače - spodní pohled</i> .....	33
<i>Obrázek 3.8: Model indukčního snímače - horní pohled</i> .....	33
<i>Obrázek 3.9: Měření spínací vzdálenosti</i> .....	34
<i>Obrázek 3.10: Průběhy naměřené na zhotoveném indukčním snímači</i> .....	35



**SEZNAM TABULEK:**

*Tabulka 2.1: Korekční činitel pro různé druhy materiálů ..... 25*

*Tabulka 3.1: Naměřené spínací vzdálenosti pro různé druhy kovů ..... 34*



## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Značka	Jednotka	Název
R	$\Omega$	Elektrický odpor
S	$\text{mm}^2$	Průřez
$\rho$	$\Omega\text{m}$	Měrný odpor
l	mm	Délka
K	V/mm	Citlivost
$\delta_s$	--	Relativní chyba snímače
$\Delta\psi$	--	Absolutní chyba
$\delta_y$	--	Relativní chyba měření
A	--	Modul frekvenčního přenosu
Q	--	Činitel jakosti
$\varphi$	$^\circ$	Fázový posuv
$\omega$	rad/s	Úhlová rychlost
$\tau$	s	Časová konstanta
u	V	Napětí
I	A	Proud
H	A/m	Intenzita magnetického pole
$H_v$	A/m	Intenzita elektromagnetického pole
$\Phi$	Wb	Magnetický tok
C	F	Kapacita



# 1 ÚVOD

Snímače v automatizovaných procesech slouží jako členy pro sběr informací. Pro konstrukci snímačů je využíváno mnoha fyzikálních principů. Je to zařízení, které měří fyzikální veličinu a převádí ji na signál (většinou elektrický), který může být dále využíván v měřicích a řídicích systémech. Pojem snímač je rovný pojmu senzor. Citlivá část snímače se označuje jako čidlo.

## 1.1 Výroba snímačů <sup>1</sup>

V dnešní době se k výrobě snímačů využívá takzvané SMT technologie. Dovoluje vysoký stupeň spolehlivosti a komplexnosti obvodového zapojení. Pro konstrukci snímačů se využívají integrované obvody, které umožňují, minimalizaci rozměrů snímačů. Velice důležité pro výrobce senzoru je zvládnout zalévání snímací hlavy. Ochrany před nežádoucími vlivy, jako jsou otřesy, teplotní změny se dosáhne vyplněním prostoru pouzdra senzoru zalévací hmotou.

*Základní požadavky na zalévací hmotu jsou:*

- Snadná zpracovatelnost
- Malé vyvíjené teplo a malá smrštitelnost při vytvrzování
- Mechanická odolnost
- Vysoká elasticita
- Splnění izolační třídy
- Samozhášecí vlastnosti
- Průchodnost světla při použití pro optoelektroniku
- Ochrana vůči vlhkosti a agresivním chemikáliím

Dále musí být splněna řada elektrických (měrný odpor, permeabilita...), chemických (elektrolytická odolnost, tropická odolnost...) a mechanických (tahová, tlaková...) vlastností.

Zalévání je časově velmi náročné a hodně se podílí na ceně senzoru. Pro různé senzory se technologie zalévání mění a každý výrobce si tuto specifickou technologii chrání.

---

<sup>1</sup> Ing. Martinek, Radislav. Senzory v průmyslové praxi. BEN-technická literatura, Praha2004. ISBN 80-7300-114-4



## 1.2 Hlavní požadavky na snímače

- jednoznačná závislost výstupní veličiny na veličině vstupní
- citlivost
- spolehlivost
- přesnost
- časová stálost čidla
- malá závislost čidla na parazitních vlivech
- malý zpětný vliv na měřený objekt
- požadovaný rozměr
- co nejmenší hmotnost
- nízké pořizovací náklady
- nízká spotřeba
- a další

## 1.3 Rozdělení snímačů polohy

### a) Odporové snímače polohy: <sup>2</sup>

- Spojité – plynulá změna odporu (potenciometry)
- Nespojitě- skoková změna odporu (kontaktní)

Měřená neelektrická veličina je snímačem převedena na změnu odporu. Odporové snímače se nejčastěji používají pro zajištění dálkového posunutí nebo úhlového natočení. K jejich konstrukci využíváme znalost vzorečku

$$R = \rho * \frac{l}{S} \quad (1.1)$$

Z tohoto vztahu vyplývá, že při změně délky  $l$  nebo průřezu vodiče se změní výsledný odpor. Proto můžeme délkové posunutí převést pomocí jezdce potenciometru na odpovídající změnu odporu. Existují potenciometry s rotačním (měření úhlového posunutí např. výšku hladiny v nádrži indukujeme pomocí plováku, který přes lanko natáčí jezdce potenciometru a tím mění odpor úměrně s výškou hladiny.), přímočarým (měření polohy nebo lineárního posunutí) a se spirálovým pohybem jezdce. Odporové snímače patří k nejstarším snímačům neelektrických veličin.

---

<sup>2</sup> Ing. Jager, Vladimír; Ing. Bobek, Antonín; Ing. Dvořáček, Jaroslav; et al.. Elektrotechnika pro střední průmyslové školy. SNTL-technická literatura, Praha 1969



**b) Indukční snímače polohy**

Dělí se na dvě skupiny:

- **dvouhodnotové (nespojité)**
- **lineární (spojité)**

Indukční snímače jsou podrobně popsány v dalších kapitolách. (2)

**c) Kapacitní snímače polohy**

Principem je změna vzdálenosti mezi elektrodami vzduchového kondenzátoru, nebo změna tloušťky dielektrika, což se projeví změnou kapacity. Využívají se k měření výšky hladiny, měření tlaků, ke kontrole rozměrů kalibrů a měrek (diferenciální kapacitní snímač) a všude tam kde potřebujeme měřit mechanické veličiny bez přímého spojení s objektem. Lze jej použít jako indikátor přiblížení pro vodivé i nevodivé materiály.

**d) Optické snímače polohy**

Princip optických snímačů polohy spočívá v modifikaci světelného toku mezi vysílačem a přijímačem změnou polohy snímaného předmětu a následném převodu na elektrickou veličinu.

**e) Ultrazvukové snímače polohy <sup>3</sup>**

Měří dobu, za jakou přijmou ozvěnu ultrazvukových pulzů generovaných vysílačem a odražených od měřeného předmětu.

---

<sup>3</sup> <http://www.snimace.xf.cz/snimace-polohy-opticke-ultrazvukove.php>



## 1.4 Technické parametry snímačů<sup>4</sup>

### 1.4.1 Statické vlastnosti snímačů

#### a) Statická převodní charakteristika

Je dána závislostí vstupní veličiny  $x$  a výstupní veličiny  $y$ . Tuto závislost lze popsat polynomem

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_n x^n \quad (1.2)$$

Ideální statická charakteristika je dána vztahem

$$y = K x \quad (1.3)$$

kde  $K$  je citlivost a zároveň konstanta přenosové funkce.

pro obecnou funkční závislost je citlivost definována přírůstkou  $\Delta y$ ,  $\Delta x$  dle vztahu

$$K = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{df(x)}{dx} \quad (1.4)$$

Vzhledem k působení parazitních veličin na senzor je lépe definovat  $K$  dle vztahu

$$K = \left( \frac{\partial f(x)}{\partial x} \right)_{z_1, z_2, \dots, z_n = \text{konst.}} \quad (1.5)$$

kde  $z_1, z_2, \dots, z_n$  jsou parazitní veličiny.

#### b) Práh citlivosti

Je dán hodnotou snímané veličiny, při níž je na výstupu senzoru signál odpovídající střední kvadratické odchylce šumu senzoru.

$$u_y = \sqrt{u_s^2} \quad (1.6)$$

---

<sup>4</sup> Prof. Ing. Ďaďo, Stanislav, DrSc.; Doc. Ing. Kreidl, Marcel, CSc.. Senzory a měřicí obvody. ČVUT, Praha 1996.  
ISBN 80-01-01500-9



**c) Dynamický rozsah**

Je dán hodnotami snímané fyzikální veličiny, ohraničené prahem citlivosti a maximální hodnotou měřené veličiny.

**d) Reprodukovatelnost snímače**

Je dána odchylkou naměřených hodnot při krátkodobém časovém sledu měření neměnné vstupní veličiny a neměnných rušivých vlivů okolí.

**e) Rozlišitelnost snímačem**

Je nejmenší měřená změna snímané veličiny odpovídající absolutní nebo relativní chybě snímače. Při analogové transformaci signálu je rozlišitelnost dána vztahem:

$$r_a = \frac{1}{\frac{y_{\max} - y_{\min}}{2(\Delta y)_{\max}} + 1} = 2\delta_s \quad (1.7)$$

kde  $(\Delta y)_{\max}$  je maximální hodnota absolutní chyby měření v rozsahu měření a  $\delta_s$  je relativní chyba snímače.

**f) Absolutní chyba měření**

$$\Delta y = y_N - y_S \quad (1.8)$$

kde  $y_N$  je naměřená hodnota a  $y_S$  je správná hodnota

**g) Relativní chyba měření**

$$\delta_y = \frac{\Delta y}{y_S} \quad (1.9)$$

**h) Relativní chyba snímače**

$$\delta_s = \frac{(\Delta y)_{\max}}{y_{\max} - y_{\min}} \quad (1.10)$$



**i) Aditivní a multiplikativní chyby**

Rozdělení chyb na aditivní a multiplikativní je podle závislosti (chyby aditivní) nebo nezávislosti (chyby multiplikativní) chyby měření  $\Delta x$  resp.  $\Delta y$  na hodnotě měřené veličiny.

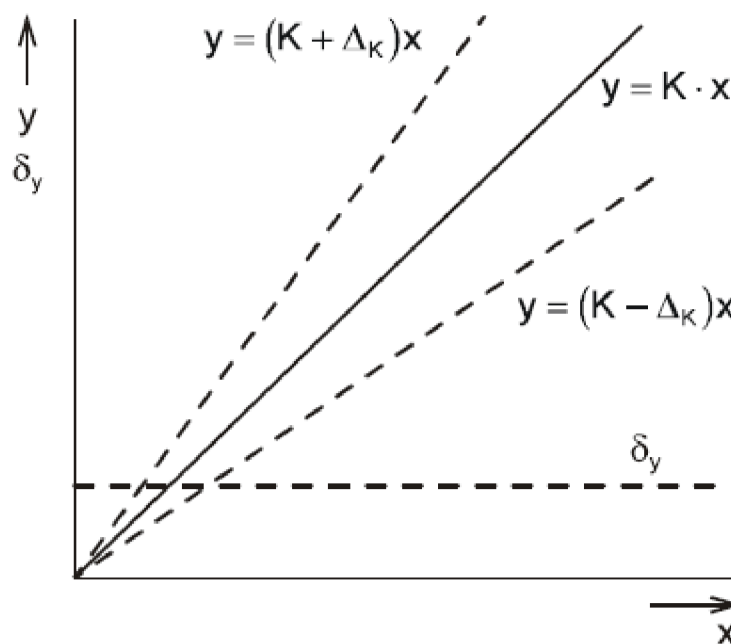
- **Aditivní chyba** je způsobena posunem jmenovité lineární charakteristiky.

Mezi definované aditivní chyby patří:

- relativní chyba snímače (přesnost nebo chyba z rozsahu),
- třída přesnosti,
- chyba linearity (nelinearita nebo linearita ebeny. integrální nelinearita),
- kvantovací chyba
- počet digitů (jednotek číslicově měřené veličiny na posledním místě).

- **Multiplikativní chyba** je způsobena změnou citlivosti snímače.

Absolutní multiplikativní chyba  $\Delta y$  je závislá na hodnotě měřené veličiny  $x$ .



Obrázek 1.1.1: Multiplikativní chyba

Platí vztahy:

$$\Delta_y = \Delta_K \cdot x \quad (1.11)$$

$$\delta_y = \frac{\Delta_y}{y} = \Delta_K \frac{x}{y} = \frac{\Delta_K}{K} = \delta_K = konst. \quad (1.12)$$



neboli chyba měření je konstantní ( $\Delta_K$  a  $K$  jsou konstanty). Multiplikační chyba je způsobena například změnou odporové sítě zesilovačů, vlivem parazitních veličin, třeba teploty. Výrobci tuto chybu označují jako relativní chybu z měřené hodnoty.

#### j) Chyba linearity

Je odchylka od ideální lineární (spojité analogové nebo kvantové) charakteristiky.

#### 1.4.2 Dynamické vlastnosti snímačů

Měřená hodnota fyzikální nebo jiné veličiny se mění neustále s časem. Snímače zařazené v regulačních smyčkách, nebo indukující mezní stavy procesu musí být navrženy tak, aby výstupní signál  $y(t)$  sledoval s minimálním zkreslením vstupní signál  $x(t)$ . Dynamické chování snímačů lze popsat lineárními diferenciálními rovnicemi s konstantními koeficienty. Pokud rovnice není lineární je potřeba ji po úsecích linearizovat a dynamické chování sledovat v daných úsecích.

Pro přenosovou funkci v Laplaceově transformaci platí vztah:

$$F(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_0}{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_0} \quad (1.13)$$

Tuto rovnici lze dále upravit na tvar:

$$F(p) = K \frac{(1 + pT_a)(1 + pT_b)\dots(1 + pT_m)}{(1 + pT_1)(1 + pT_2)\dots(1 + pT_n)} \quad (1.14)$$

Dosadíme-li  $j\omega$  do této rovnice za proměnou  $p$  ( $p=j\omega$ ), dostaneme vztah pro frekvenční přenos vyjadřující ustálenou složku přenosu

$$A(\omega) = P(\omega) + jQ(\omega) = A(j\omega)e^{j\varphi(\omega)} \quad (1.15)$$

Pro modul frekvenčního přenosu pak platí:

$$A(\omega) = |F(j\omega)| = \sqrt{P^2(\omega) + Q^2(\omega)} \quad (1.16)$$

Fáze tohoto přenosu je:

$$\varphi(\omega) = \arg F(j\omega) = \arctg \frac{Q(\omega)}{P(\omega)} \quad (1.17)$$

## 2 INDUKČNÍ SNÍMAČE POLOHY



5



Indukční snímač  
polohy E2A Omron

6

Obrázek 2.1.1: Ukázka indukčního snímače polohy

### 2.1 Historie a budoucnost indukčních snímačů <sup>7</sup>

Indukční snímače ze začátku sloužily pouze pro chemický průmysl. Jejich životnost však nebyla příliš velká, docházelo k problémům v mechanické části, oxidaci kontaktů a tím pádem k nízkým proudům při spínání! K velkému pokroku došlo v roce 1968 kdy pan Pepperl a Fuchs vynalezli mechanický koncový spínač s kladkou, který umožňoval pět různých pozic směru snímací plochy, problém byl v tom, že tehdejší doba neumožňovala měnit různé napěťové rozsahy elektronicky, tudíž bylo zapotřebí 60 druhů snímačů, což nebylo moc praktické. O deset let později, měl už uživatel možnost nastavit si pozici snímací plochy sám a elektronika s různým napěťovým rozsahem mohla být nahrazena novou, aniž by došlo k výměně snímací hlavy se samotnou cívkou. K dalšímu velkému pokroku došlo v 90. letech při nástupu integrovaných obvodů, zlepšily funkčnost a odolnost elektromagnetického rozhraní. Nové oscilátory umožnily výrobu snímačů zaručující stejnou snímací vzdálenost pro různé druhy kovů. V dnešní době je vyráběno hodně druhů snímačů, tak aby vyhověly nejmodernější průmyslové automatizaci. V budoucnu se dá očekávat další nárůst používání indukčních snímačů, pokud se tedy v průmyslové automatizaci bude využívat nadále kovových materiálů. Důležitou roli v tom hraje několik zajímavých faktorů:

- Cívka jako hlavní prvek snímače je na dnešní dobu levná a hlavně spolehlivá.
- Snímače jsou odolné a použitelné na různých místech v průmyslové automatizaci.
- Jsou ekologicky nezávadné oproti jiným snímačům.
- Jde o bezkontaktní určení pozic a přiblížení.

<sup>5</sup> [http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=25166](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=25166)

<sup>6</sup> [http://industrial.omron.cz/cs/products/catalogue/sensing/inductive\\_sensors/compact\\_cylindrical/e2a/default.html](http://industrial.omron.cz/cs/products/catalogue/sensing/inductive_sensors/compact_cylindrical/e2a/default.html)

<sup>7</sup> <http://www.automatizace.cz/article.php?a=2291>



## 2.2 Výrobci indukčních snímačů

Balluff CZ s.r.o. (Pelušková 1400 198 00 Praha 9) – [www.balluff.cz](http://www.balluff.cz)

Kotlín Sensory s.r.o. (Ke Křížku 791 272 03 Kladno) – [www.kotlinsenzory.cz](http://www.kotlinsenzory.cz)

Sick s.r.o. (Ukrajinská 2a 101 00 Praha 10 - Vršovice) – [www.sick.cz](http://www.sick.cz)

Ifm electronic, spol. s r.o. (U Křížku 571 252 43 Průhonice) – [www.ifm.cz](http://www.ifm.cz)

I&TS, spol. s r.o. (Havlíčková 215 280 02 Kolín) – [www.iats.cz](http://www.iats.cz)

Omron Electronics spol. s r.o. (Jankovcova 53 170 00 Praha 7) - [www.omron.cz](http://www.omron.cz)

Pepperl + Fuchs, s.r.o. (Sokolovská 192/79, 180 00 Praha-Karlín) –

- [www.pepperl-fuchs.cz](http://www.pepperl-fuchs.cz)

Turck s.r.o. (Hradecká 1151 500 03 Hradec Králové) - [www.turck.cz](http://www.turck.cz)

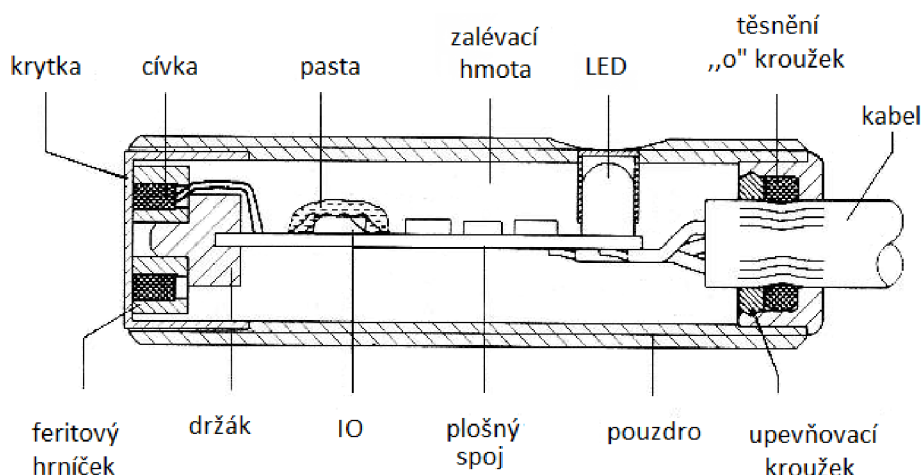
Datasensor SpA (via Lavino 265, 40050 Monte San Pietro, Bologna - Italy) –  
[www.datasensor.com](http://www.datasensor.com)

## 2.3 Konstrukční provedení senzoru <sup>8</sup>

Mají pouzdro z kovu nebo plastu. Rozlišují se na provedení hladké a provedení se závitem. Na aktivní ploše je cívkový systém, chráněný plastovou krytkou, dále je tam elektronický obvod umístěný na plošném spoji. Na konci plošného spoje bývá LED dioda pro indikaci stavu sepnutí. Vzadu je krytka s otvorem pro kabel. Celý vnitřní prostor je vyplněn zalévací hmotou. Druhou nejrozšířenější variantou je válcový tvar s konektorem a třetí variantou, která má tvar kvádrů, je provedení se šroubovací svorkovnicí.

---

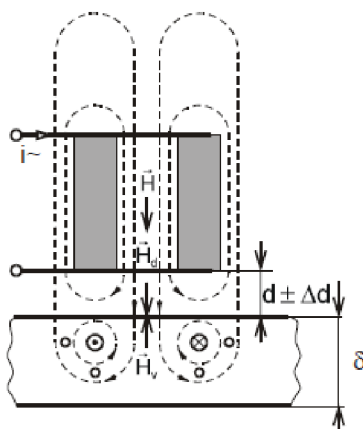
<sup>8</sup> Ing. Martinek, Radislav. Senzory v průmyslové praxi. BEN-technická literatura, Praha2004. ISBN 80-7300-114-4



Obrázek 2.2: Vnitřní uspořádání válcového senzoru

## 2.4 Princip činnosti senzoru<sup>9 10</sup>

Cívka je součástí LC oscilátoru, který po připojení napětí začne kmitat a vytvoří vysokofrekvenční magnetické pole  $H(j\omega)$ . Jestliže je kovový předmět před aktivní plochou senzoru, působením magnetického pole cívky v něm vzniknou vířivé proudy. Díky nim vznikne elektromagnetické pole o intenzitě  $H_v(j\omega)$ , které působí proti poli budící cívky (Lenzův zákon). Zmenšení pole má za následek zmenšení indukčnosti budící cívky (pokles toku  $\Phi$ ) a zvýšení jejich ztrát. Dojde ke změně její impedance. Změna impedance se projeví útlumem amplitudy oscilací. Pokud amplituda poklesne pod hodnotu prahu přepnutí, vyhodnotí komparátor tento stav jako přítomnost objektu a dá signál výstupnímu obvodu ke změně stavu.



Obrázek 2.3: Princip indukčního senzoru s vířivými proudy

<sup>9</sup> Ing. Martinek, Radislav. Senzory v průmyslové praxi. BEN-technická literatura, Praha2004. ISBN 80-7300-114-4

<sup>10</sup> [http://a4.webzdarma.cz/otazky\\_pdf/27a%20-%20Detekce%20polohy%20\(VN\).pdf](http://a4.webzdarma.cz/otazky_pdf/27a%20-%20Detekce%20polohy%20(VN).pdf)

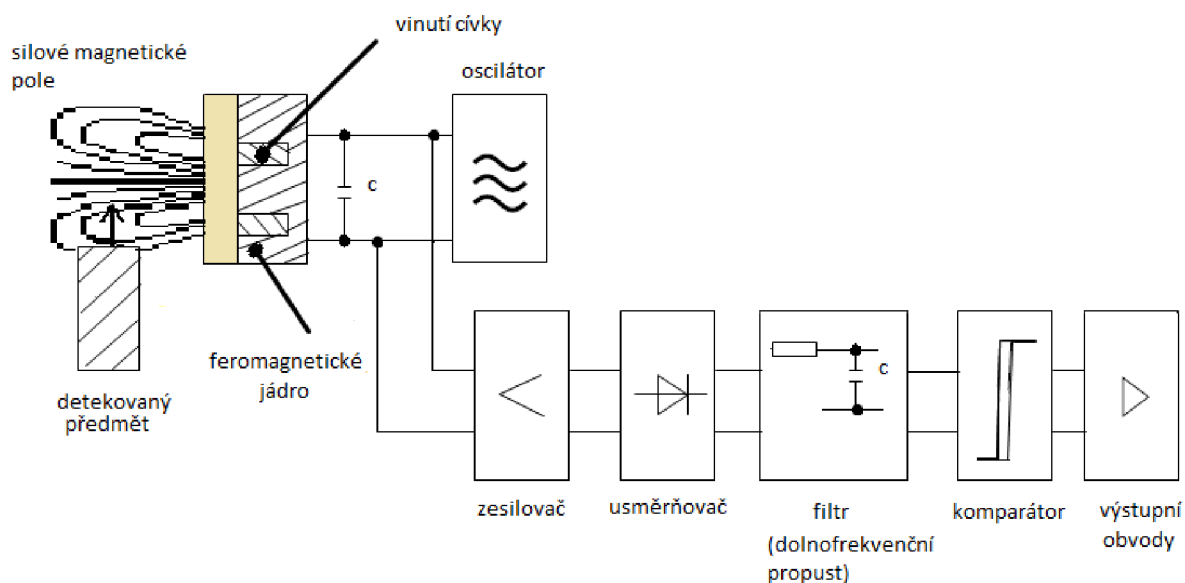
## 2.5 Rozdělení indukčních snímačů

### 2.5.1 Dvouhodnotové snímače - (nespojité)

Náhrada koncových mechanických spínačů – Jedná se o dvouhodnotové snímače (vypnuto, zapnuto).

Výstupní obvod je dán kolektorovým tranzistorem.

#### 2.5.1.1 Blokové schéma dvouhodnotového senzoru



Obrázek 2.4: Blokové schéma dvouhodnotového senzoru

#### 2.5.1.2 Rozdělení dvouhodnotových senzorů<sup>11</sup>

##### A. Senzory s redukčním faktorem 1

Mají místo jedné cívky na feritovém jádře tři vzduchové cívky. Je to tak proto, že v průmyslu se díky silnému magnetickému poli (blízko svářečky) nedají používat klasické indukční senzory, dochází totiž k přesycování feritu. Tím dochází k ovlivňování činitele jakosti cívky a tím poměru specifické vodivosti a permeability snímaného předmětu. Dochází ke zmenšování spínací vzdálenosti, proto výrobci začali inovovat a vyrobili senzory s redukčním faktorem 1. Prostřední cívka je součástí oscilátoru. Vyrábí magnetické pole definované siločárami, jejichž průběh je

<sup>11</sup> Ing. Martinek, Radislav. Senzory v průmyslové praxi. BEN-technická literatura, Praha2004. ISBN 80-7300-114-4



ovlivňován snímaným předmětem. Před a za vysílací cívku jsou cívky přijímací. V obou cívkách se indukují napětí, a jelikož mají různý počet závitů, indukují se v nich napětí různá. Cívky jsou zapojeny tak, že se napětí odečítají a výsledkem je zbytkové napětí u.

### **B. Zářezové senzory**

Dříve indukční závory. Mají proti sobě umístěny dva cívkové systémy, které tak vytváří transformátor s velkou vzduchovou mezerou a volnou vazbou. Každá cívka je jedno vinutí oscilátoru. V nezatlumeném stavu stačí vazba ještě obou cívek na to, aby oscilátor kmital. Jestliže však vznikne do zářezu kovová clonka, dojde opět k indikaci vířivých proudů a vzájemná vazba se sníží. Při určité hloubce vzniku dojde k podkročení kritické zpětné vazby natolik, že oscilátor přestane kmitat a senzor změni výstupní signál.

### **C. Kruhové senzory**

Místo poloviny hrníčku se používá feritový kroužek, který cívku po obvodě obepíná. Působí jako odstínění magnetického pole vně snímače, takže aktivní prostor leží uvnitř cívky. Jakmile se kovový předmět nachází uvnitř kroužku, oscilátor se zatluší. Snímají se jak feromagnetické tak neferomagnetické kovy, ale i zde se projevuje redukční faktor.

### **D. Senzory odolné vůči magnetickému poli**

Vyznačují se robustnější konstrukcí a bývají potaženy teflonem, aby odolávaly jiskrám a okujím.

### **E. Selektivní senzory**

Jsou konstruovány pro rozlišení feromagnetických a neferomagnetických materiálů. Na feritový hrníček je navléknut speciální kroužek, který vyvolá předtlumení a tím sníží činitele jakosti na polovičku. Když je cívka ovlivněna feromagnetický materiálem, bude s jeho přiblížováním neustále klesat činitel jakosti, ale už ne tak prudce. U neferomagnetického materiálu se bude činitel jakosti zvyšovat při snižování vzdálenosti. Toto chování lze vysvětlit závislostí hloubky vzniku elektromagnetického pole na permeabilitě objektu.

### **F. Senzory se zabudovaným vyhodnocením otáček**

Indukční senzory jsou dostatečně rychlé, aby dokázaly spolehlivě sejmout otáčky v rozsahu průmyslových aplikací. Snímaný předmět připevněný na hřídeli může být třeba hliníkový kotouč se zářezy. Nejčastější funkcí je hlídání podkročení otáček. Vyhodnocovací obvod má nastavené žádané hodnoty potenciometrem nebo tlačítkem. Jeho funkce spočívá v měření času mezi jednotlivými pulzy. Když bude tento čas delší, snímač přejde do stavu rozepnuto. Pokud senzor hlídá překročení otáček, musí se do tohoto stavu přepnout, aby byla výstupní vypínací funkce dodržena.



### 2.5.1.3 Indukčnostní senzory na principu vířivých proudů (bezkontaktní) <sup>12</sup>

Jsou to bezkontaktní snímače s vysokou životností, velkou rychlostí, přesností malým opotřebením a hlavně jsou velmi šetrné k životnímu prostředí. Používají se ke snímání polohy a přítomnosti kovových předmětů a zařízení. Přináší informaci o poloze nebo o pohyblivé části zařízení, mohou být zdrojem impulsů pro čítače, použité ve funkci počítání kusů, měření otáček, rychlosti, nebo odměřování polohy strojních zařízení.

### 2.5.1.4 Parametry indukčních bezkontaktních snímačů <sup>13 14</sup>

#### **Hystereze:**

Je rozdíl mezi polohou spínacího bodu při přibližování standardizovaného měřícího předmětu k aktivní ploše snímače a jeho polohou při oddalování.

#### **Spínací vzdálenost (S) :**

Ke spínací ploše spínače se můžeme přibližovat axiálně (ve směru osy snímače) nebo i radiálně (kolmo na osu snímače). Spínací vzdálenost je vzdálenost mezi akční plochou snímače a předmětem, při které dojde ke spínání, nebo rozepínání výstupu.

#### **Skutečná pracovní vzdálenost (Sr):**

Je pracovní vzdálenost, měřená při stanovené teplotě, napětí a podmínkách montáže.

#### **Užitečná pracovní vzdálenost (Su):**

Je pracovní vzdálenost, měřená při stanovených podmínkách.

#### **Zajištěná pracovní vzdálenost (Sa):**

Vzdálenost od snímací plochy, na níž je zajištěna správná funkce bezdotykového snímače při stanovených podmínkách.

#### **Jmenovitá pracovní vzdálenost (Sn):**

Je smluvená veličina používaná k označení pracovních vzdáleností. Nebere ohledy ani na výrobní tolerance, ani na změny vyvolané vnějšími podmínkami, jako je napětí a teplota.

#### **Opakovatelnost (R):**

Je opakovací přesnost skutečné pracovní vzdálenosti (Sr).

<sup>12</sup> [http://a4.webzdarma.cz/otazky\\_pdf/27a%20-%20Detekce%20polohy%20\(VN\).pdf](http://a4.webzdarma.cz/otazky_pdf/27a%20-%20Detekce%20polohy%20(VN).pdf)

<sup>13</sup> <http://www.kotlinsenzory.cz/cs/snimace/indukcni/technicke-udaje-indukcni.html>

<sup>14</sup> [http://www.balluff.cz/bes\\_principy-funkce-definice.asp](http://www.balluff.cz/bes_principy-funkce-definice.asp)



### Korekční činitel (K)

Udává snížení snímací vzdálenosti pro snímání předmět, který je vyroben z jiného materiálu, než je normalizovaný terčik.

Druh materiálu	Korekční činitel (K)
Ocel	1,0
Měď	0,25...0,45
Mosaz	0,35...0,50
Hliník	0,30...0,45
Nerez	0,60...1,00
Nikl	0,65...0,75
Litina	0,93...1,05

Tabulka 2.1: Korekční činitel pro různé druhy materiálů

### Normalizovaný terčik:

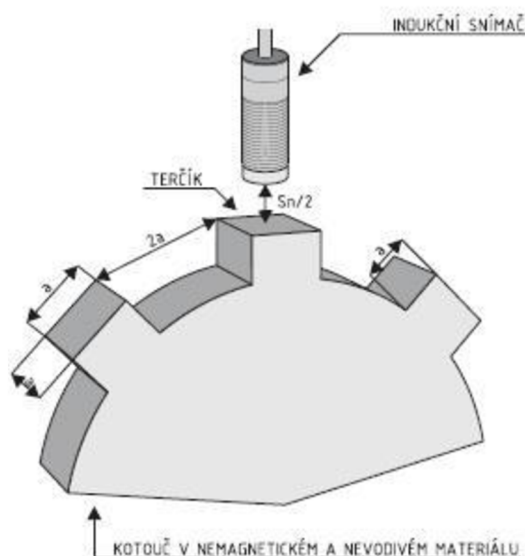
Má tvar čtverce tloušťku asi 1 mm a je vyroben z uhlíkové oceli například Fe 360.

### Referenční osa:

Osa kolmá ke snímací ploše a procházející jejím středem.

### Spínací frekvence (f):

Četnost pracovních cyklů je maximální počet sepnutí za vteřinu. Měření pracovního kmitočtu musí být realizováno podle následujícího obrázku.



Obrázek 2.5: Četnost pracovních cyklů

Měření se provádí dle ČSN EN 60947-5-2 ed.2. Terčíky se upevní na čele zubů rotujícího kotouče. Mezery mezi zuby jsou  $2a$  tak, aby mohly procházet před snímací plochou bezdotykového snímače ve vzdálenosti rovné polovině jmenovité pracovní vzdálenosti.

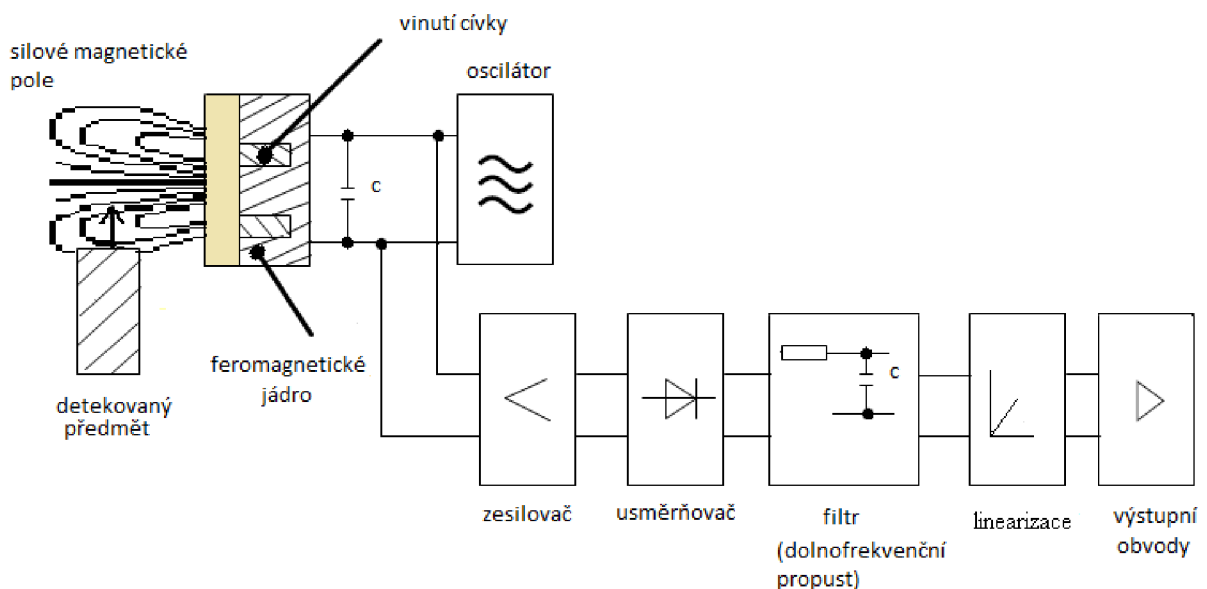
Nejdůležitější **elektrické parametry** indukčních snímačů jsou například:

- jmenovité napájecí napětí ( $U_b$ )
- úbytek napětí na koncovém stupni snímače ( $U_d$ )
- jmenovitý pracovní proud koncového stupně snímače ( $I_e$ )
- napájecí proud ( $I_o$ )

### 2.5.2 Lineární senzory – (spojité)

Snímají polohu kovového předmětu v celém měřicím rozsahu a převádějí ji na proporcionální (proudový 0-20mA, napěťový 0-10V nebo digitální) signál. Jedná se o měření vzdálenosti kovového předmětu.

#### 2.5.2.1 Blokové schéma lineárního senzoru



Obrázek 2.6: Blokové schéma lineárního senzoru

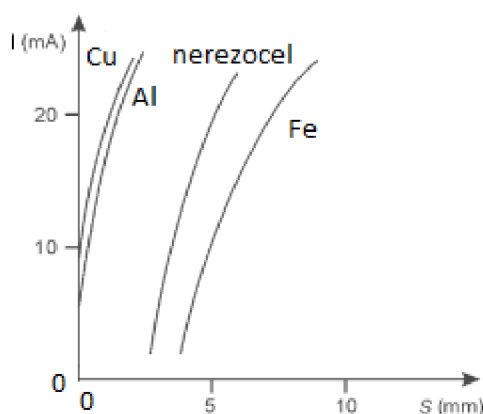
### 2.5.2.2 Analogové senzory <sup>15</sup>

Je to příklad typu senzoru patřícího do lineárních snímačů.

Nemají žádný spínací bod a jejich spínací signál není dvouhodnotový (skokový), ale je spojitý. Funkční vzdálenost tlumící clonky sahá téměř od čela snímače až k jmenovité hodnotě užitečné vzdálenosti. Definiuje tak jeho pracovní rozsah. Uvnitř platí přibližně lineární závislost mezi výstupním proudem nebo napětím a polohou clonky. Tvar pouzdra je válcový nebo kvádrový, systém snímání je jednocívkový. Oscilátor s konstantním proudovým výstupem napájí rezonanční obvod, jehož amplituda je stabilizována. Napětí rezonančního obvodu, které je mírou polohy clonky se dá vyjádřit přibližně jako

$$u \sim Q$$

Pro činitele  $Q$  větší jak 10 je napětí  $u$  přibližně proporcionální činiteli jakosti a tím i vzdálenosti clonky od snímače u některých typů se prodlužuje rozsah snímání nahoru pomocí linearizačního obvodu. Výstupní signál je třídrátový, tedy aktivní, a to buď napěťový 0...10V a nebo proudový 0...20mA.



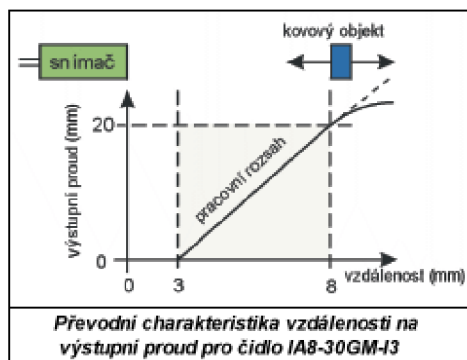
Obrázek 2.7: Charakteristiky analogového senzoru Bi10-M30-LiU pro různé materiály

S klesající permeabilitou clonky se posouvá měřicí rozsah směrem k senzoru a zároveň se snižuje měřicí rozpětí. Dochází tím k menšímu ovlivňování činitele jakosti, což je nežádoucí.

<sup>15</sup> Ing. Martinek, Radislav. Senzory v průmyslové praxi. BEN-technická literatura, Praha2004. ISBN 80-7300-114-4

### 2.5.2.3 Indukční snímače pro bezdotykové měření vzdálenosti<sup>16</sup>

Snímače s analogovým výstupem snímají polohu kovového předmětu v celém měřicím rozsahu a převádějí ji na proporcionální proudový signál 0 až 20 mA.



Obrázek 2.8: Převodní charakteristika vzdálenosti

Linearita uvnitř měřicího rozsahu se pohybuje kolem dvou procent. Platí to v případě, je-li plocha měřeného objektu obrácená k čidlu větší, než je aktivní plocha čidla. Je-li měřena vzdálenost menšího předmětu, mění se charakter magnetického pole a tím i linearita. Opakovatelnost měření se pohybuje v řádu mikrometrů. Protože se při měření vybuzuje elektromagnetické pole v měřeném objektu, závisí měřicí rozsah i na magnetické permeabilitě a elektrické vodivosti materiálu, ze kterého je předmět vyroben. Pro diamagnetické materiály (měď, hliník) se měřicí rozsah zmenšuje.

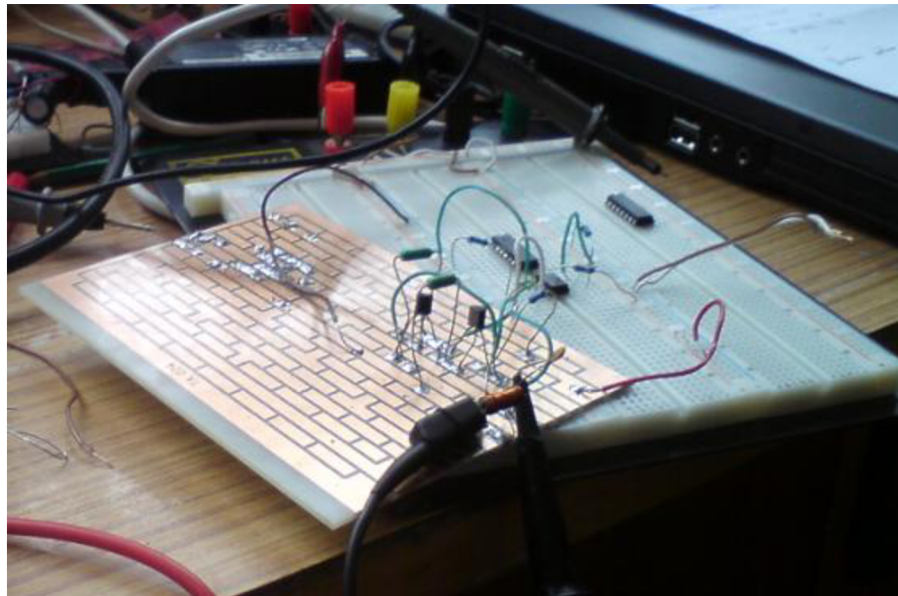
Použití snímačů s analogovým výstupem může být například polohování nástroje dřevobráběcího stroje. Tento indukční snímač nemusí být využit pouze k měření vzdáleností. Při konstantní vzdálenosti závisí výstupní proud na velikosti (a samozřejmě tvaru) sledovaného objektu, lze jej tedy použít i ke třídění kovových předmětů podle velikosti.

<sup>16</sup> [http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=25166](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=25166)

## 3 NÁVRH DVOUHODNOTOVÉHO INDUKČNÍHO SNÍMAČE POLOHY

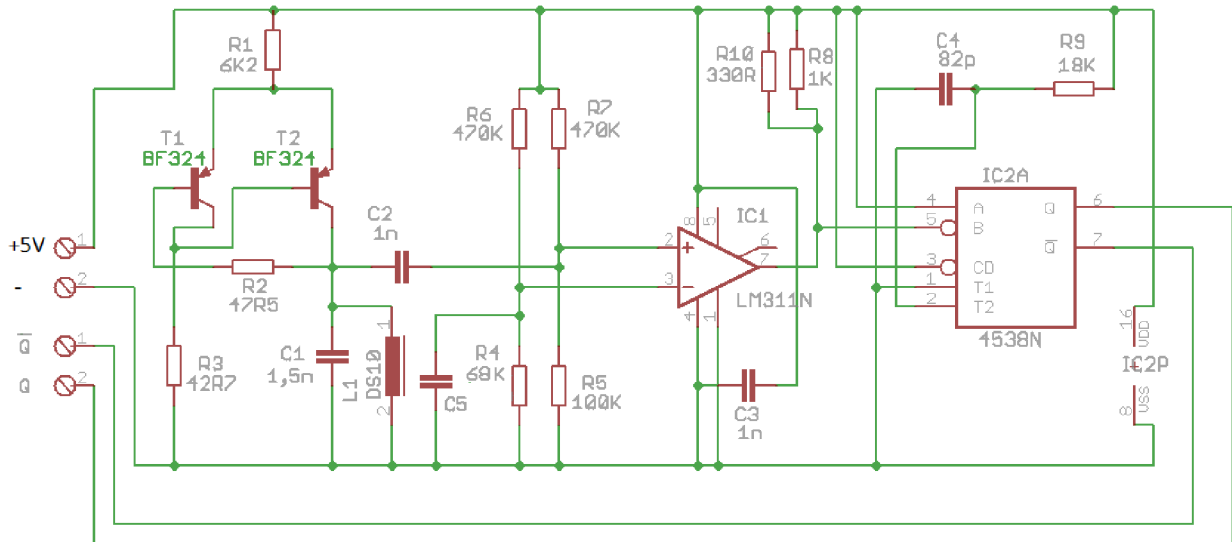
### 3.1 Návrh a ladění

Návrh a ladění obvodů pro oscilátor se uskutečnilo na univerzální plošné desce. Vyhodnocovací obvody (komparátor a monostabilní klopný obvod) byly sestaveny na nepájivém poli.



*Obrázek 3.1.1: Ukázka ladění obvodů*

### 3.2 Navržené schéma

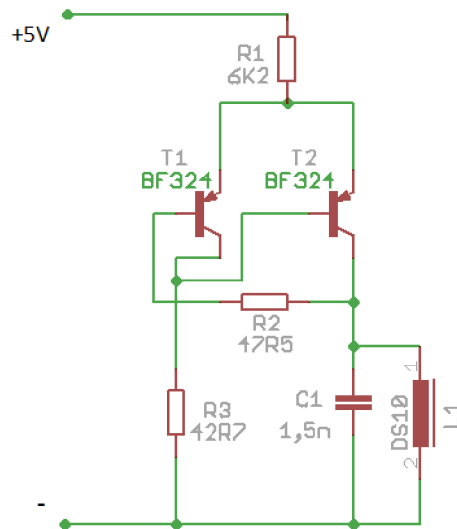


Obrázek 3.2: Schéma navrženého dvouhodnotového indukčního snímače

Dvoupolohový snímač je složen ze tří částí: oscilátoru, komparátoru a monostabilního klopného obvodu. Snímač je napájen stejnosměrným napětím 5V.

### 3.3 Oscilátor

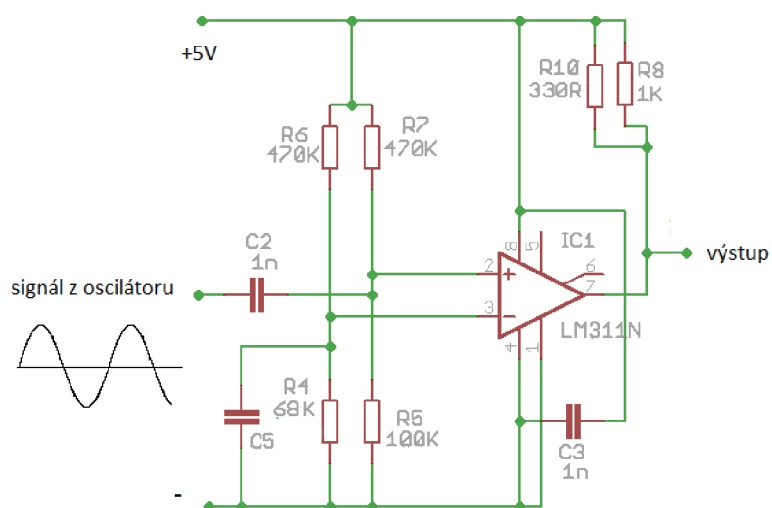
Kmitočet oscilátoru a jeho stabilita je především určena volbou součástek rezonančního obvodu LC. Pro tento návrh byla zhotovena cívka s 24 závity z měděného drátu o průměru 0,3mm s feritovým jádrem. Byly použity dva vysokofrekvenční tranzistory PNP typu BF324. Výstupem oscilátoru je sinusový signál o kmitočtu  $f = 1,9879\text{MHz}$  s amplitudou napětí 247mV. Po přiložení kovu (ocel) k cívce na spínací vzdálenost. Kmitočet oscilátoru vzroste na  $f = 2,013\text{MHz}$ . A amplituda napětí klesne na 127mV.



Obrázek 3.3: Schéma oscilátoru

### 3.4 Komparátor

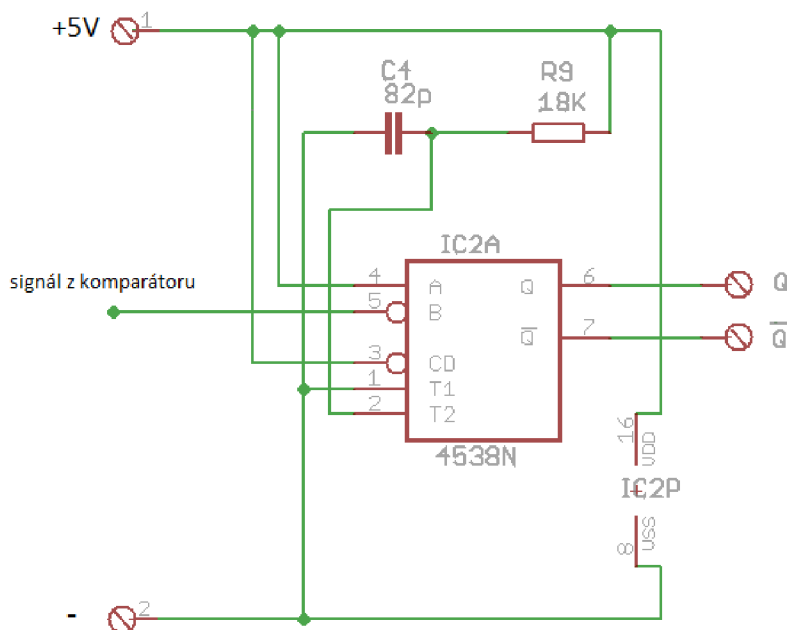
Komparátor je realizován obvodem LM311. Na neinvertující vstup komparátoru je přiveden signál z oscilátoru. Na jeho invertujícím vstupu je referenční napětí. Při přiblížení kovu k cívce snímače dojde k poklesu napětí. Pokud amplituda poklesne pod hodnotu referenčního napětí, vyhodnotí komparátor tento stav jako přítomnost objektu a dá signál výstupnímu obvodu ke změně stavu. Na výstupu se objeví jednička. Naopak je-li napětí (referenční) na invertujícím vstupu vyšší než na neinvertujícím pak na výstupu komparátoru je nula. Kondenzátory C3 a C5 jsou blokovací.



Obrázek 3.4: Schéma klopného obvodu

### 3.5 Monostabilní klopný obvod

Monostabilní klopný obvod je realizován retrigovatelným (znovunahoditelným) monostabilním CMOS obvodem HCT4538N. Obsahuje dva monostabilní klopné obvody, z nichž je použit pro naši potřebu pouze jeden. Monostabilní obvod reaguje na náběžné hrany vycházející z komparátoru. Šířka jeho výstupního signálu je dána volbou kondenzátoru C4 a R9 a je nastavena na jedna a půl násobek periody kmitů oscilátoru.

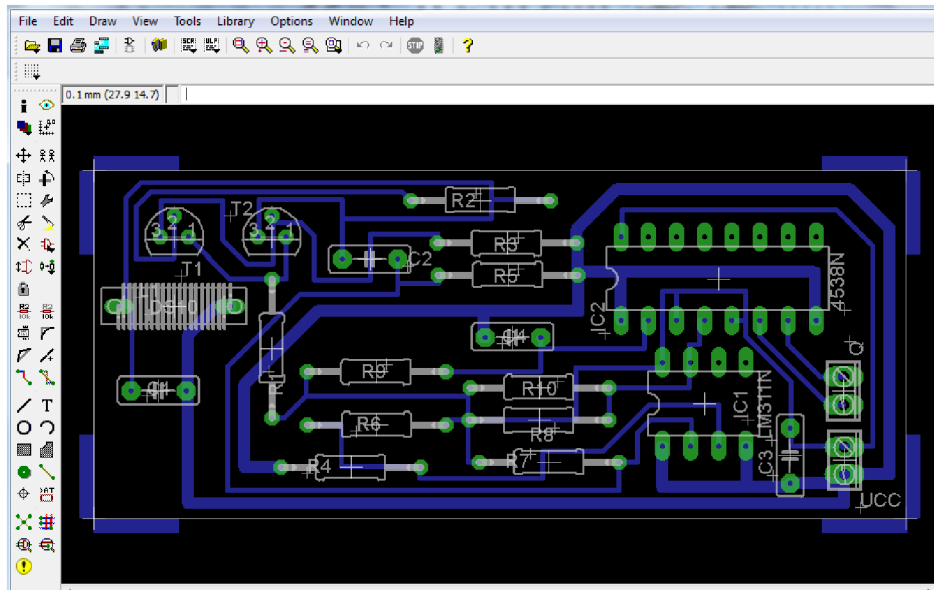


Obrázek 3.5: Schéma monostabilního klopného obvodu

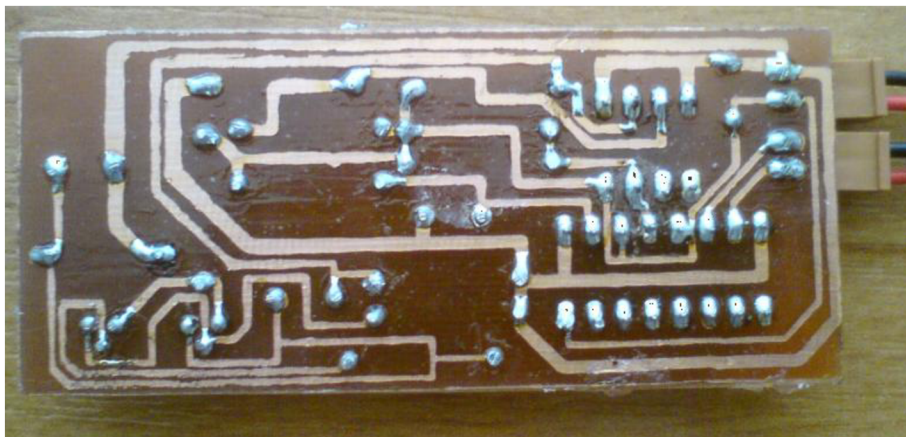
### 3.6 Návrh a výroba plošné desky snímače

Deska plošných spojů snímače byla navržena v programu EAGLE 5.0.0. Deska byla navržena jako jednostranná o rozměrech 73×32mm. Výroba byla provedena takzvanou “tonerovou” metodou (nažehlením toneru laserové tiskárny). Předloha se vytiskne laserovou tiskárnou na “lepivou” stranu barevného papíru. Papír se přiloží na dobře očištěnou stranu desky předlohy. Přehléhne se žehličkou a po chvíli začne papír na místech bez kresby sám odstávat. Deska se dá vyleptat do kyseliny chlorovodíkové, toner se z cest očistí nitroředidlem. Nakonec se deska převrtá a nalakuje. V návrhu desky chybí dodatečně přidáný kondenzátor C5 připojený paralelně k odporu R4.

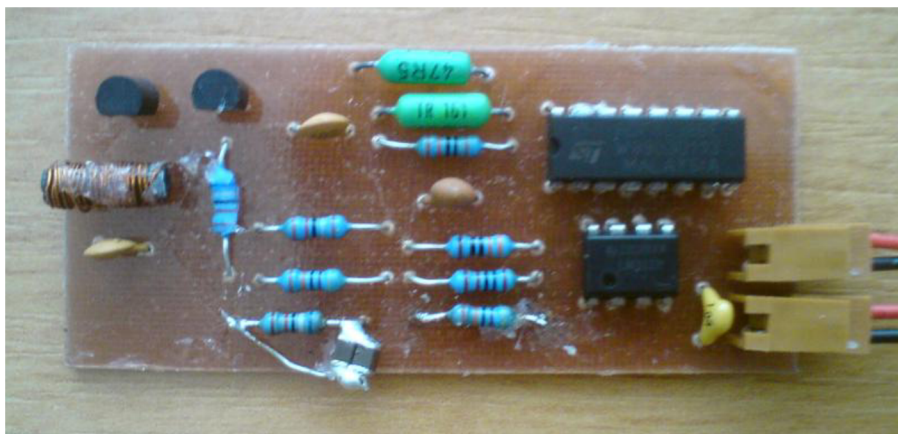




Obrázek 3.6: Návrh plošné desky v EAGLU 5.0.0



Obrázek 3.7: Model indukčního snímače - spodní pohled



Obrázek 3.8: Model indukčního snímače - horní pohled

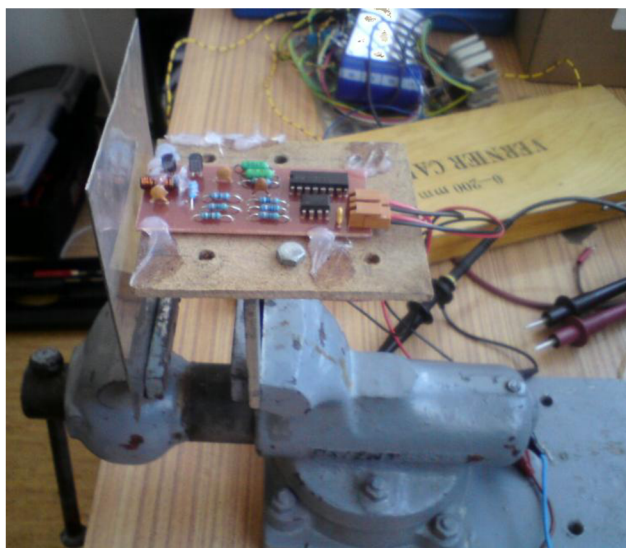
### 3.7 Měření spínací vzdálenosti snímače pro různé druhy kovů

Měření bylo prováděno pomocí svěráku. Na pohyblivém čele byl připevněn zkoumaný kov. Na pevném čele byl přichycen pomocí speciálně zhotoveného držáku snímač. Při přibližování kovu ke snímači došlo v určité vzdálenosti k jeho sepnutí. Byla změřena vzdálenost mezi aktivní plochou cívky a kovem pomocí posuvného měřítka.

Kov	spínací vzdálenost
	[mm]
šedá litina	0,52
nerezová ocel	0,47
ocel	0,43
zrezivělá ocel	0,38
Titan	0,32
měď	0,21
hliník	0,12
ferit	Nereaguje

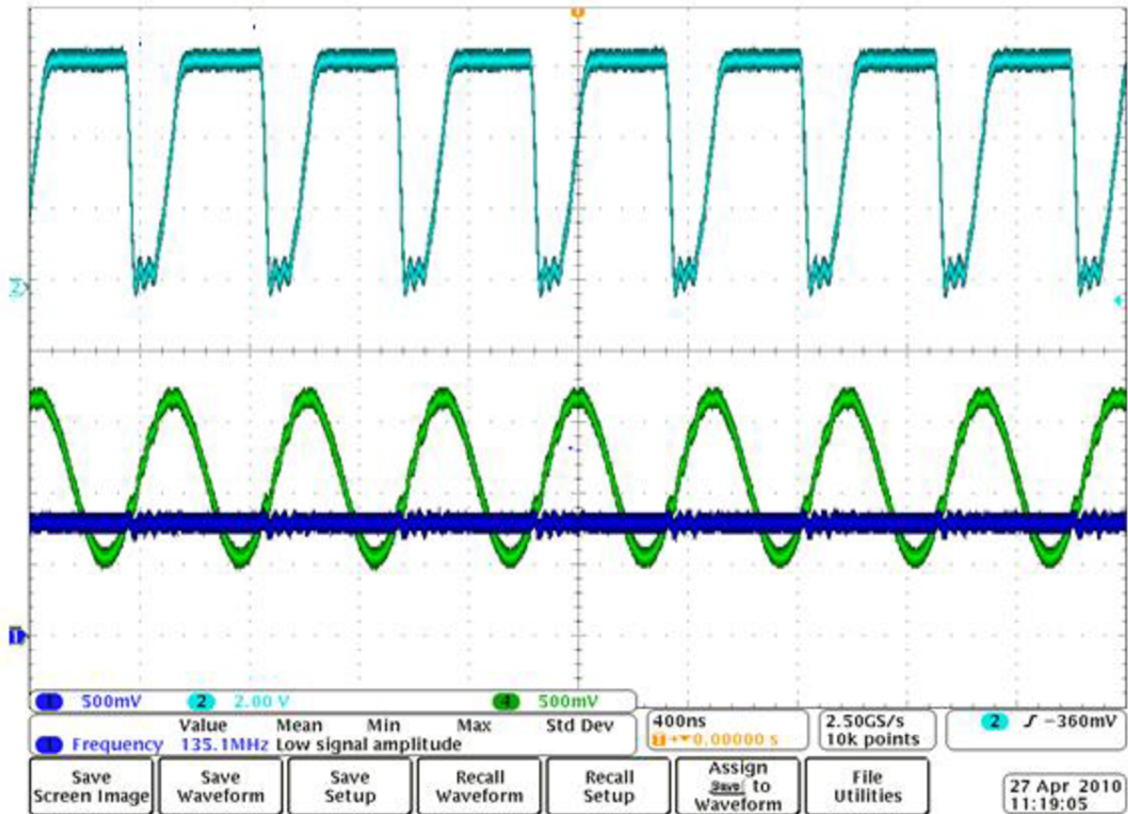
*Tabulka 3.1: Naměřené spínací vzdálenosti pro různé druhy kovů*

Z měření vyplývá, že největší spínací vzdálenost má šedá litina a nejmenší hliník. Spínací vzdálenost je v porovnání s komerčními snímači, například firmy Truck, dosti malá. To je dáno malými rozměry snímací cívky. Cílem návrhu bylo dosažení s co největší rychlostí, proto zde chybí filtr, usměrňovač... a je použit rychlostní komparátor LM311. Maximální spínací frekvenci se nepodařilo naměřit, protože pro toto měření nebylo k dispozici dostatečně rychlé zkušební zařízení (řádově stovky kilohertz).



*Obrázek 3.9: Měření spínací vzdálenosti*

### 3.8 Průběhy naměřené osciloskopem na snímači



Obrázek 3.10: Průběhy naměřené na zhotoveném indukčním snímači

Zelený sinusový průběh je výstup z oscilátoru na vstupu komparátoru. Je změřen na odporu R7. Modrý průběh je měřen na odporu R4. Jde o referenční napětí na vstupu komparátoru. Světle modrý průběh je výstup komparátoru. Na náběžné hrany reaguje monostabilní klopný obvod. V průbězích se objevuje rušení, které bylo při tomto měření způsobeno špatným připojením sond oscilátoru na záporné napětí.



## 4 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce zahrnuje obecný přehled o snímačích polohy. Hluběji se zabývá indukčními snímači. Jejich dělením a charakteristickými vlastnostmi. V této bakalářské práci se podařilo navrhnout dvouhodnotový indukční snímač polohy. Navrhnout jeho plošnou desku v programu EAGLE a model realizovat. Model je plně funkční. Dále byly změřeny spínací vzdálenosti pro různé druhy kovů. Bylo zjištěno, že spínací vzdálenosti jsou do 1mm. Pro zvětšení spínacích vzdáleností by bylo zapotřebí zvětšit rozměry spínací cívky. Výhodou zvolené koncepce je dosažení vysoké spínací frekvence snímače.

V této práci je také uveden přehled literatury, z níž lze čerpat pro zjištění dalších informací týkajících se snímačů polohy. Tato práce pro mě byla velikým přínosem. Naučil jsem se pracovat s programem EAGLE a konstruovat plošné desky.



## POUŽITÁ LITERATURA

Internetové stránky:

1. <http://www.automatizace.cz/article.php?a=2291>
2. <http://www.snimace.xf.cz/snimace-polohy-opticke-ultrazvukove.php>
3. [http://a4.webzdarma.cz/otazky\\_pdf/27a%20-%20Detekce%20polohy%20\(VN\).pdf](http://a4.webzdarma.cz/otazky_pdf/27a%20-%20Detekce%20polohy%20(VN).pdf)
4. [http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=25166](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=25166)
5. [http://industrial.omron.cz/cs/products/catalogue/sensing/inductive\\_sensors/compact\\_cylindrical/e2a/default.html](http://industrial.omron.cz/cs/products/catalogue/sensing/inductive_sensors/compact_cylindrical/e2a/default.html)
6. <http://www.kotlinsenzory.cz/cs/snimace/indukcni/technicke-udaje-indukcni.html>
7. [http://www.balluff.cz/bes\\_principy-funkce-definice.asp](http://www.balluff.cz/bes_principy-funkce-definice.asp)
8. <http://hw.cz/Teorie-a-praxe/Dokumentace/ART1286-Vyroba-DPS-nazehlenim-toneru.html>

Knihy a skripta:

1. Ing. Martinek, Radislav. Senzory v průmyslové praxi. BEN-technická literatura, Praha 2004. ISBN 80-7300-114-4
2. Ing. Jager, Vladimír; Ing. Bobek, Antonín; Ing. Dvořáček, Jaroslav; et al.. Elektrotechnika pro střední průmyslové školy. SNTL-technická literatura, Praha 1969
3. Prof. Ing. Ďaďo, Stanislav, DrSc.; Doc. Ing. Kreidl, Marcel, CSc. Senzory a měřicí obvody. ČVUT, Praha 1996. ISBN 80-01-01500-9