

# 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

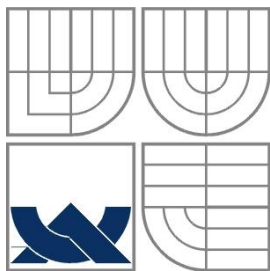
## MĚŘENÍ POLOHY INDUKČNÍMI SNÍMAČI

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

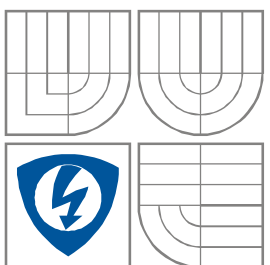
**PETR KOŘISTKA**

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

## **MĚŘENÍ POLOHY INDUKČNÍMI SNÍMAČI**

POSITION INDUCTIVE SENZOR

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

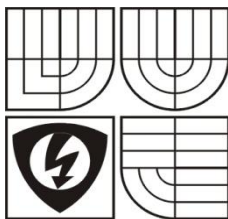
**PETR KOŘISTKA**

**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:** Kořistka Petr

**Ročník:** 3

**ID:** 98605

**Akademický rok:** 2009/10

**NÁZEV TÉMATU:**

## Měření polohy indukčními snímači

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Navrhnete obvodové řešení indukčního snímače.
2. Ověřte jeho vlastnosti pro různé materiály.
3. Změřte jeho dynamické parametry.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle doporučení vedoucího

**Termín zadání:** 1.10.2009

**Termín odevzdání:** 27.5.2010

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

**doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.**  
*předseda oborové rady*

### UPOZORNĚNÍ:

Autor semestrální práce nesmí při vytváření semestrální 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.

# LICENČNÍ SMLOUVA POSKYTOVÁNA K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

## 1. Pan/paní

Jméno a příjmení **Petr Kořistka**

Bytem: **Bezuchov 38, Přerov**

Narozen/a (datum a místo): **22.10.1986, Přerov**

(Dále jen „autor“)

a

## 2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00

Jejíž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:

Doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc., předseda oborové rady Silnoproudá  
elektrotechnika a elektroenergetika

(dále jen „nabyvatel“)

### Čl. 1

#### Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP)

- **Bakalářská práce**  
(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název: Měření polohy indukčními snímači

Vedoucí/školicel VŠKP: Ing. Petr Huták, Ph.D

Ústav: Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Datum obhajoby VŠKP:

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v:

- **Tištěné formě** – počet exemplářů 1
- **Elektronické formě** – počet exemplářů 1

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími, a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

## **Článek 2**

### **Udělení licenčního oprávnění**

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti:
  - ihned po uzavření této smlouvy
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

## **Článek 3**

### **Závěrečná ustanovení**

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

**V Brně dne:** .....

**Petr Kořistka**

.....  
**Nabyvatel**

.....  
**Autor**

## **Abstrakt**

Bakalářská práce se zabývá návrhem a konstrukcí indukčního snímače. V práci je v krátkosti popsána jejich historie, výhody a nevýhody. Dále je rozpracován princip základních snímačů pracujících na základě změny indukčnosti a vlastností snímaných materiálů. Hlavní částí práce byl návrh jednotlivých obvodů snímače nezbytných pro jeho správnou funkci. Jedná se o oscilátor, usměrňovač, PI regulátor, zdroj napětí a vyhodnocovací obvody. V praktické části práce byla navržena deska plošného spoje pro jednotlivé části snímače. Bylo provedeno měření a zpracování výsledků.

## **Abstract**

Bachelor thesis deals with desing and construction of the inductive sensor. It shortly describes the history, advantages and disadvantages. Next there is developed principle of basic sensors working on the basis changes of inductivity and qualities of scanned materials. Major part of work was desing of individual parts of sensor essential to its correct function. It includes oscillator, rectifier, PI regulator, supply of tension and evaluation circuits. In the practical part was suggested PCB for individual parts of sensor. Measurement and processing of results were done.

## **Klíčová slova**

Snímač; indukční; oscilátor; poloha; cívka; spojitý;

## **Keywords**

Sensor; inductive; oscillator; location; coil; continuous;

## **Bibliografická citace**

KOŘISTKA, P. *Měření polohy indukčními snímači*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 41 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Huták, Ph.D.



## **Prohlášení**

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Měření polohy indukčními snímači 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 .....

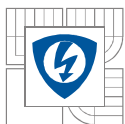
Podpis autora .....

## **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 .....

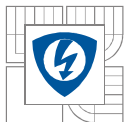


## Obsah

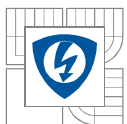
|                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------|----|
| Úvod.....                                                    | 15 |
| 1 Teoretický rozbor .....                                    | 16 |
| Požadavky na výběr snímače .....                             | 17 |
| 1.1 Princip indukčního snímače polohy .....                  | 17 |
| 1.2 Rozdělení indukčních snímačů .....                       | 18 |
| 1.3 Náhradní schéma indukčního snímače .....                 | 21 |
| 1.4 Snímané materiály .....                                  | 22 |
| 2 Návrh indukčního snímače .....                             | 24 |
| 2.1 Blokového schéma indukčního snímače .....                | 24 |
| 2.2 Návrh LC oscilátoru .....                                | 24 |
| 2.3 Návrh usměrňovače .....                                  | 27 |
| 2.4 Návrh zdroje napětí .....                                | 29 |
| 2.5 Návrh PI regulátoru .....                                | 30 |
| 2.6 Návrh vyhodnocovacích obvodů .....                       | 31 |
| 2.7 Návrh celkového schématu indukčního snímače polohy ..... | 32 |
| 3 Konstrukce indukčního snímače .....                        | 34 |
| 3.1 Praktické měření a zpracování výsledků .....             | 36 |
| 4 Závěr .....                                                | 40 |

## SEZNAM OBRÁZKŮ

|                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Obrázek č. 1</b> Měřicí řetězec .....                                                  | 16 |
| <b>Obrázek č. 2</b> a) Princip indukčního snímače s malou vzduchovou mezerou.....         | 18 |
| b) Charakteristika indukčního snímače polohy.....                                         | 17 |
| <b>Obrázek č. 3</b> a) Princip indukčního snímače s otevřeným magnetickým obvodem .....   | 19 |
| b) Charakteristika indukčního snímače polohy.....                                         | 19 |
| <b>Obrázek č. 4</b> a) Princip indukčního snímače se změnou plochy vzduchové mezery ..... | 19 |
| b) Charakteristika indukčního snímače.....                                                | 18 |
| <b>Obrázek č. 5</b> a) Princip transformátorového snímače polohy.....                     | 20 |
| b) Charakteristika indukčního snímače.....                                                | 19 |
| <b>Obrázek č. 6</b> a) Princip snímače polohy s potlačeným magnetickým polem .....        | 21 |
| b) Charakteristika snímače polohy s potlačeným magnetickým polem.....                     | 20 |
| <b>Obrázek č. 7</b> Náhradní schéma indukčního snímače s vedením.....                     | 22 |
| <b>Obrázek č. 8</b> Návrh blokového schéma indukčního snímače .....                       | 24 |
| <b>Obrázek č. 9</b> Návrh LC oscilátoru .....                                             | 26 |
| <b>Obrázek č. 10</b> Kmity navrhovaného LC oscilátoru .....                               | 27 |
| <b>Obrázek č. 11</b> a) Návrh stejnosměrného usměrňovače.....                             | 28 |
| b) Průběh usměrněného napětí.....                                                         | 27 |
| <b>Obrázek č. 12</b> Návrh zdroje napětí .....                                            | 29 |
| <b>Obrázek č. 13</b> Realizace PI regulátoru pomocí operačního zesilovače .....           | 30 |
| <b>Obrázek č. 14</b> Přechodová charakteristika PI regulátoru.....                        | 31 |
| <b>Obrázek č. 15</b> Návrh vyhodnocovacího ústrojí.....                                   | 31 |
| <b>Obrázek č. 16</b> Celkové schéma indukčního snímače polohy.....                        | 33 |
| <b>Obrázek č. 17</b> Osazení desky plošného spoje .....                                   | 34 |
| <b>Obrázek č. 18</b> Schéma desky plošného spoje .....                                    | 35 |
| <b>Obrázek č. 19</b> Schéma měřícího pracoviště.....                                      | 36 |

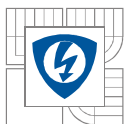


|                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Obrázek č. 20</b> Grafická závislost výstupního napětí na vzdálenosti železa od čela snímací cívky .....         | 37 |
| <b>Obrázek č. 21</b> Grafická závislost výstupního napětí na vzdálenosti měděného plechu od čela snímací cívky..... | 38 |
| <b>Obrázek č. 22</b> Grafická závislost výstupního napětí na vzdálenosti hliníku od čela snímací cívky .....        | 39 |



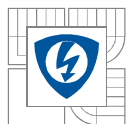
## SEZNAM TABULEK

|                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabulka č. 1</b> Korekční faktor snímače.....                                   | 10 |
| <b>Tabulka č. 2</b> Závislost vzdálenosti železa na výstupním napětí.....          | 36 |
| <b>Tabulka č. 3</b> Závislost vzdálenosti měděného plechu na výstupním napětí..... | 37 |
| <b>Tabulka č. 4</b> Závislost vzdálenosti hliníku na výstupním napětí.....         | 38 |



## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

| Značka          | Jednotka            | Význam                      |
|-----------------|---------------------|-----------------------------|
| $C_{SN}$        | [F]                 | kapacita snímače            |
| $C_V$           | [F]                 | kapacita vedení             |
| $d$             | [mm]                | změna vzdálenosti           |
| $f_0$           | [Hz]                | rezonanční kmitočet         |
| $H$             | [Am <sup>-1</sup> ] | intenzita magnetického pole |
| $I_C$           | [A]                 | proud kondenzátorem         |
| $I_R$           | [A]                 | proud odporem               |
| $K$             | [-]                 | zesílení P členu            |
| $l$             | [mm]                | vzdálenost od cívky         |
| $L$             | [H]                 | indukčnost cívky            |
| $L_{SN}$        | [H]                 | indukčnost snímače          |
| $L_V$           | [H]                 | indukčnost vedení           |
| $M$             | [H]                 | vzájemná indukčnost         |
| $R_{IZ}$        | [Ω]                 | izolační odpor              |
| $R_{SN}$        | [Ω]                 | odpor snímače               |
| $R_V$           | [Ω]                 | odpor snímače               |
| $S$             | [mm <sup>2</sup> ]  | průřez jádra                |
| $U_{Výst}$      | [V]                 | velikost výstupního napětí  |
| $U$             | [V]                 | vstupní napětí              |
| $U_D$           | [V]                 | usměrněné napětí            |
| $X$             | [mm]                | vzdálenost jádra cívky      |
| $\delta$        | [mm]                | vzduchová mezera            |
| $\tau_p$        | [ms]                | časová konstanta            |
| $\mu$           | [Am <sup>-1</sup> ] | permeabilita                |
| $\mu_r$         | [-]                 | relativní permeabilita      |
| $\omega L_{SN}$ | [Ω]                 | reaktance cívky             |
| $\omega C_{SN}$ | [Ω]                 | reaktance kondenzátoru      |
| $\rho$          | [Ωm]                | rezistivita                 |



## ÚVOD

Měření délek a vzdáleností je standardní úlohou při řešení mnoha aplikací ve všech průmyslech. Snímače polohy tvoří velkou a velmi důležitou skupinu v technických prostředcích automatizace. V obvodech samočinného řízení potřebujeme skoro vždy znát okamžitou polohu např. klapky, šoupátka, otočné nebo posuvné části regulačního orgánu, vozu na kolejích apod. Mnohdy se stává, že není možné použít běžné dotykové metody, kdy se vzdálenost převádí na mechanický posuv měřidla. Pak musí nastoupit některá z bezdotykových metod měření vzdálenosti.[8]

Pro úspěch indukčních snímačů hovoří několik argumentů. Cívka, jako základní prvek snímače, má příznivou cenu a je spolehlivá, snímače jsou velmi odolné a snadno použitelné v různých průmyslových projektech. Znečištění a další nepříznivé okolní vlivy sťezí kdy ovlivní jejich funkci. Tyto vlastnosti odlišují indukční snímače od jiných typů snímačů. Počet vyrobených a prodaných kusů každým rokem prudce roste.[6]

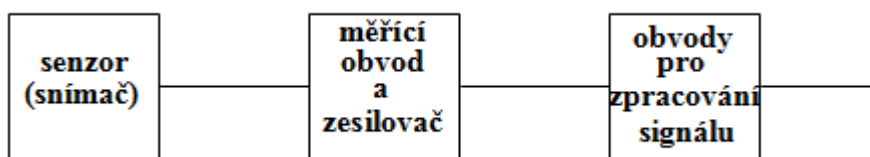
I dnes existují zajímavé úlohy, v nich lze využít základní principy indukčního snímání, které poskytuje četné výhody. Dobrým příkladem je např. analogové odměřování polohy. Pomocí několik cívek umístěných v řadě za sebou, kde se přesně měří vodorovný posun kovového předmětu s přesností desetin milimetru. Výsledek měření je závislý na precizním provedení a vzdálenosti snímaného objektu. Tento příklad pěkně demonstruje, jak může být na principu starém padesát let s využitím moderní elektroniky postaveno spolehlivé a jednoduché zařízení.[6]

Různé senzory a snímače jsou „smysly“ strojů nepostradatelné pro jejich automatizaci. V zásadě pouze přeměňují fyzikální jevy na elektrické. Cívka jako základní prvek propůjčuje indukčnímu snímači schopnost měřit dokonale přiblížení a polohu. Dokud budou stroje a zařízení konstruovány převážně z kovových materiálů, je úspěch indukčních snímačů zaručen.[6]

Nevýhodou indukčních snímačů v porovnání s ostatními druhy snímačů (kapacitní, odporové apod.) je, že jejich princip funkce jim umožňuje zjišťovat pouze přítomnost elektricky vodivých materiálů.

# 1 TEORETICKÝ ROZBOR

Senzor (snímač) je funkční prvek, který je v přímém styku s měřeným prostředím. Je to primární zdroj informace, který snímá fyzikální, chemické nebo biologické hodnoty a převádí je na nám známé elektrické signály (např. napětí, proud, kapacita, atd.), tyto hodnoty se pak dalšími obvody vyhodnocují. Měřicí řetězec je uveden na obrázku č. 1. Sensory se dnes nejvíce používají v automatizaci v řídicích a měřicích počítačových systémech a programovatelných automatech. [7]



Obrázek č. 1 Měřicí řetězec [7]

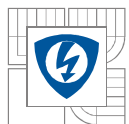
## Historie indukčních snímačů

První indukční snímač byl vyroben před padesáti lety Walterem Pepperlem a Wilfriedem Gehlem společností BASF jako alternativa mechanického koncového spínače. Jejich úkolem bylo vyvinout odolné zařízení, které bude spolehlivě fungovat po několik tisíc spínacích cyklů a to při malých spínacích proudech, které jsou vhodné pro velmi agresivní a výbušné provozy v chemickém průmyslu. Z počátku vzniku indukčních snímačů bylo jejich použití zaměřeno právě na tento průmysl. Walter Pepperl a Wilfried Gehl měli k dispozici bipolární tranzistor, který vynalezl již o deset let dříve William B. Shockley, a dále využívali kompaktní zařízení, které zatlumením oscilačního obvodu snadno vyhodnotí a převede spínací signál. Myšlenka bezkontaktního snímání přiblížení představovala důležitý krok ve vývoji průmyslové automatizace. K dalšímu podstatnému vývoji došlo počátkem devadesátých let, kdy došlo k použití integrovaných obvodů. Ty rozšířily funkčnost a zlepšily elektromagnetickou kompatibilitu. [6]

## Výhody indukčních snímačů [7]

- robustní provedení pouzdra zaručuje vysokou mechanickou odolnost
- bezdotykové snímání
- odolnost proti zkratování
- vysoká životnost
- snímač je schopen pracovat i v extrémních podmínkách





### Nevýhody indukčních snímačů[7]

- snímá pouze elektricky vodivé materiály
- malý rozsah snímání (maximálně desítky mm)
- různá citlivost snímače pro různé kovové materiály

### Požadavky na výběr snímače [7]

Při výběru snímače klademe hlavní nároky na následující základní požadavky

- jednoznačná závislost výstupní veličiny na veličině vstupní
- vhodný tvar základní přenosové charakteristiky
- potřebná citlivost snímače
- požadovaná přesnost
- velká časová stálost snímače
- vhodná frekvenční charakteristika
- co nejmenší závislost na parazitních vlivech
- minimální zpětný vliv na měřený objekt
- velká spolehlivost snímače
- jednoduchá konstrukce a údržba
- nízká cena

## 1.1 Princip indukčního snímače polohy [1] [7] [5]

Vlastní indukční snímač je tvořen cívkou (nebo systémem cívek) bez feromagnetického jádra nebo s feromagnetickým popř. neferomagnetickým elektricky vodivým jádrem. Působením neelektrické veličiny dochází k vzájemnému posunutí těchto částí nebo ke změně jejich elektrických vlastností. To vyvolá změnu indukčnosti cívky  $L$  [H] (tlumivkové snímače) případně vzájemné indukčnosti  $M$  [H] dvou cívek (transformátorové snímače), která vyvolá změnu proudu protékajícího obvodem. Snímací prvky mohou být v provedení jednoduchém nebo diferenciálním, s výstupním signálem spojitým nebo nespojitým. Indukční snímač se spojitým výstupem nemusí být použit pouze k měření vzdáleností. Při konstantní vzdálenosti závisí výstupní proud na velikosti a tvaru sledovaného objektu, lze jej tedy použít ke třídění kovových předmětů podle velikosti.

Protože se při měření budí elektromagnetické pole v měřeném objektu, závisí měřicí rozsah na magnetické permeabilitě a elektrické vodivosti materiálu, ze kterého je předmět vyroben. Pro diamagnetické materiály (měď, hliník) se měřicí rozsah zmenšuje.

Cívka, jejíž parametry závisí na počtu závitů, elektrických a magnetických vlastnostech jádra a na rozměrech, je ovlivňována měřenou neelektrickou veličinou. Indukční snímače vykazují i odporové a kapacitní parazitní vlastnosti.

## 1.2 Rozdělení indukčních snímačů

Indukční snímače dělíme podle toho, na kterou část působí vstupní měřená veličina:

- Cívka
- Jádrem

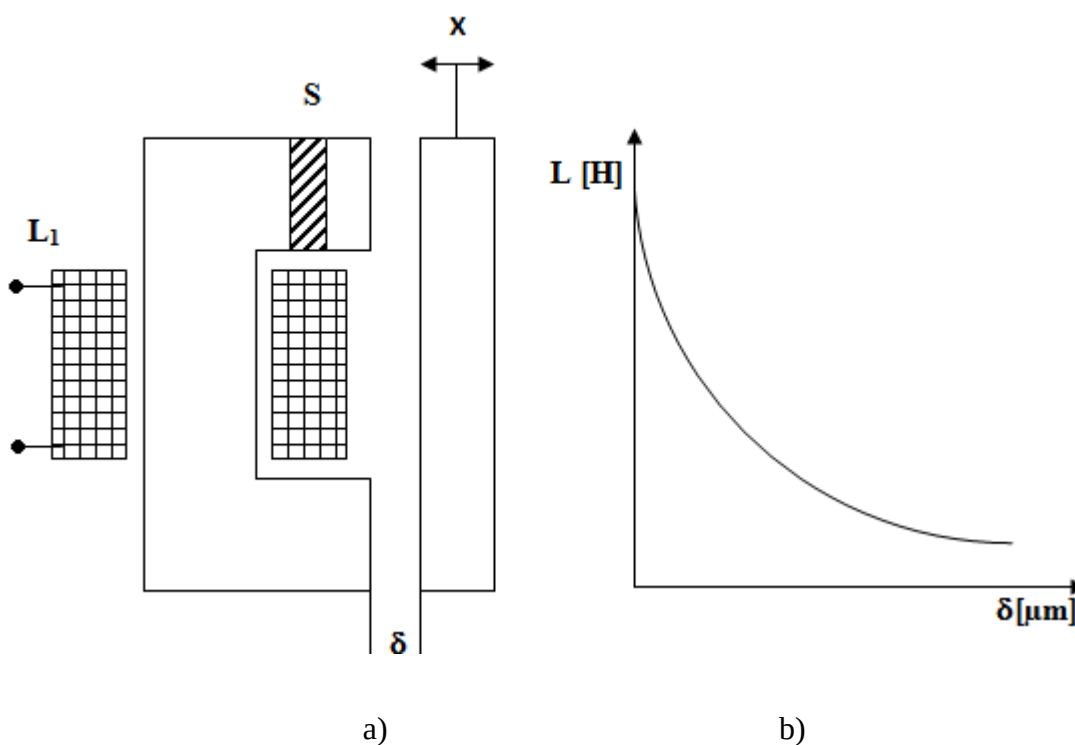
Podle druhu cívky:

- S jádrem
- Bez jádra

Podle uspořádání cívky, popř. magnetického obvodu:

- S malou vzduchovou mezerou

Rozsah měření je dán přípustnou změnou vzduchové mezery magnetického obvodu většinou o  $d = 3 \mu\text{m}$  až  $5 \mu\text{m}$ . Nelineární závislost snímače se dá z části linearizovat použitím diferenčního uspořádání dvou indukčních snímačů. Princip popisuje obrázek č. 2.[1]

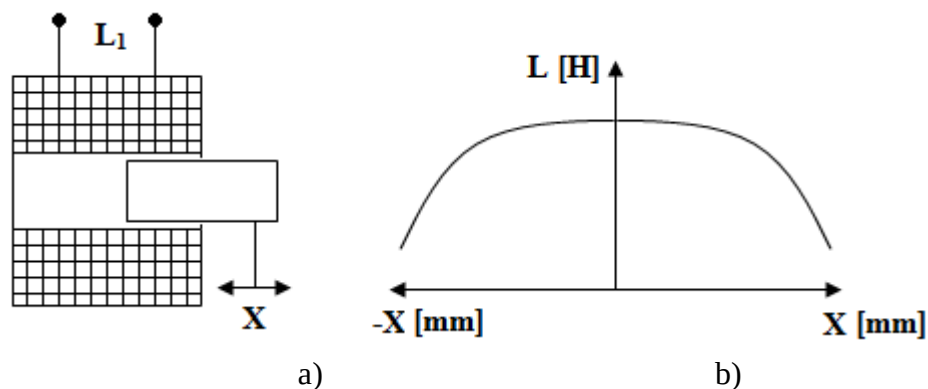


**Obrázek č. 2** a) Princip indukčního snímače s malou vzduchovou mezerou [7]

b) Charakteristika indukčního snímače polohy [7]

- S otevřeným magnetickým obvodem

Snímač je složen obvykle z cívky, do níž se zasouvá feromagnetické jádro. Většinou bývá cívka umístěna ve feromagnetickém krytu, který je v podélném směru rozdělen, aby nevytvářel závit nakrátko. Rozsah měření je 3  $\mu\text{m}$  – 100mm. Princip popisuje obrázek č. 3.[1]

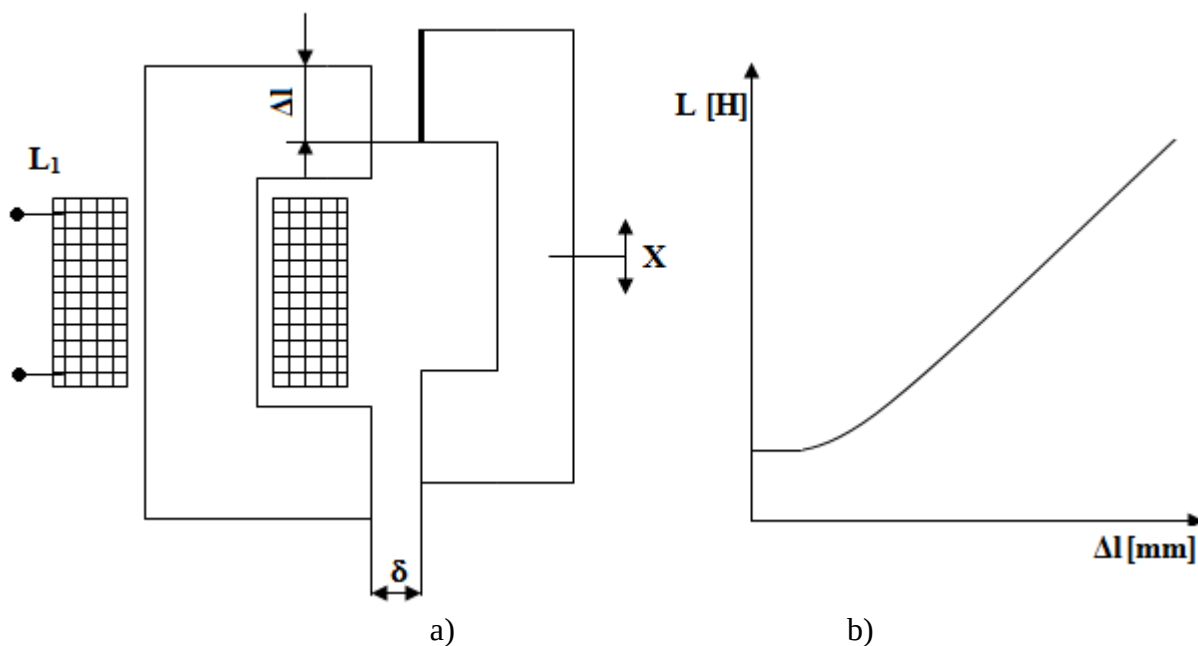


**Obrázek č. 3** a) Princip indukčního snímače s otevřeným magnetickým obvodem [7]

b) Charakteristika indukčního snímače [7]

- Se změnou plochy vzduchové mezery

Používá se pro měření středně velkých posuvů. Princip snímače popisuje obrázek č. 4 [1]

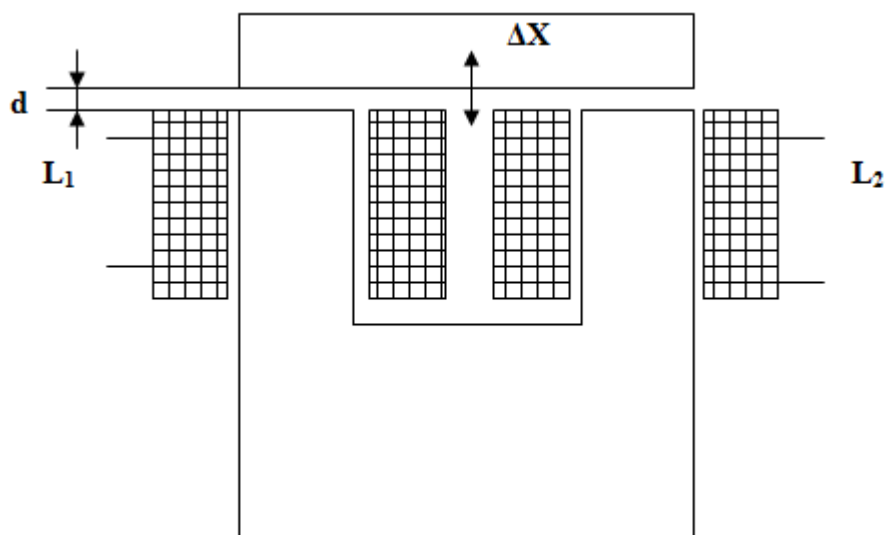


**Obrázek č. 4** a) Princip indukčního snímače se změnou plochy vzduchové mezery [7]

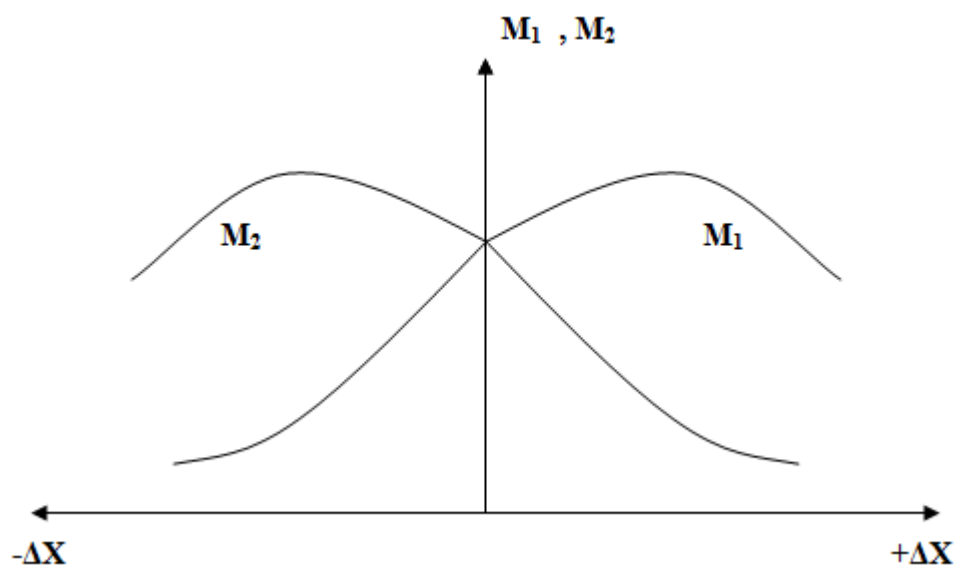
b) Charakteristika indukčního snímače [7]

– Transformátorové snímače

Jsou snímače, u nichž se měřená veličina vyhodnocuje prostřednictvím vzájemné indukčnosti  $M$  [H] dvou cívek. Z důvodů potlačení vlivu teploty na odpor vinutí a vlivu rozptylového pole se transformátorové snímače navrhují převážně jako diferenční. Princip snímače popisuje obrázek č. 5 [1]



a)



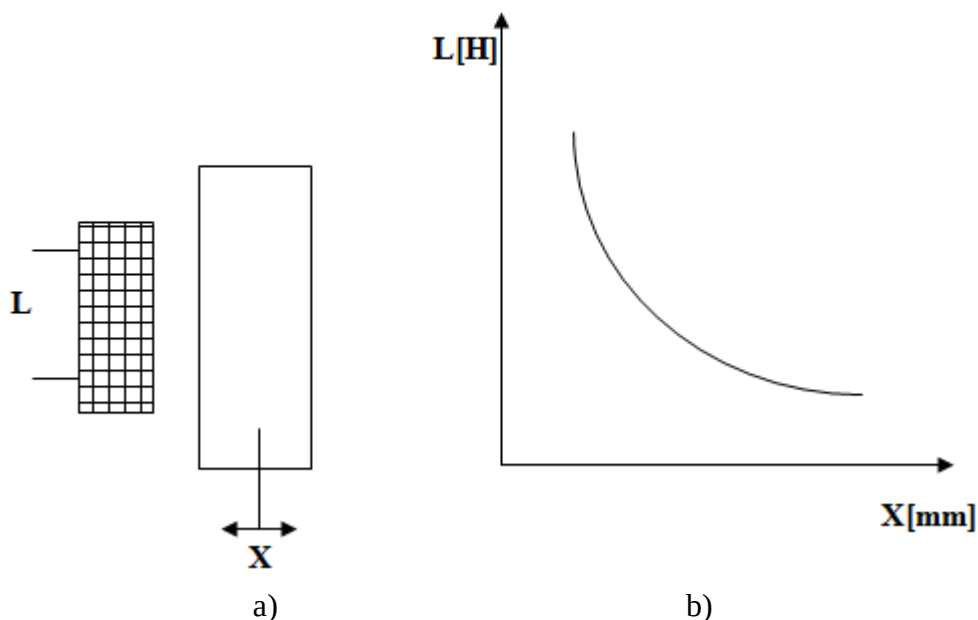
b)

**Obrázek č. 5** a) Princip transformátorového snímače polohy [7]

b) Charakteristika transformátorového indukčního snímače polohy [7]

- S potlačeným magnetickým polem (s vířivými proudy)

Vložením elektricky vodivého materiálu do vysokofrekvenčního magnetického pole snímače s intenzitou  $H_{SN}$  [ $A\cdot m^{-1}$ ] se v něm indukují vířivé proudy, které budí magnetické pole s intenzitou  $H_{VIR}$ , které podle Lenzova zákona působí proti poli, které jej vyvolalo (odtud název potlačené pole). Rozsah měření je 3  $\mu m$  až 5 mm.



**Obrázek č. 6** a) Princip snímače polohy s potlačeným magnetickým polem [7]  
b) Charakteristika snímače polohy s potlačeným magnetickým polem [7]

### 1.3 Náhradní schéma indukčního snímače [1]

Vlastnosti spojovacího vedení mohou výrazně ovlivnit parametry snímače a přesnost měření. Indukčnost  $L_{SN}$  [H] a odpor  $R_{SN}$  [ $\Omega$ ] představují snímací cívku, kapacita  $C_{SN}$  [F] představuje kapacitu mezi závitů cívky. Odpor cívky  $R_{SN}$  [ $\Omega$ ] vedle činné složky představuje ztráty vířivými proudy a ztráty magnetickou hysterezi jádra. Ideální indukční snímač má mít velkou reaktanci  $\omega L$  [ $\Omega$ ] v porovnání s  $R_{SN}$  [ $\Omega$ ]. Při běžných kmitočtech (5 – 50 kHz) není možné tento požadavek splnit, lze však dosáhnout:

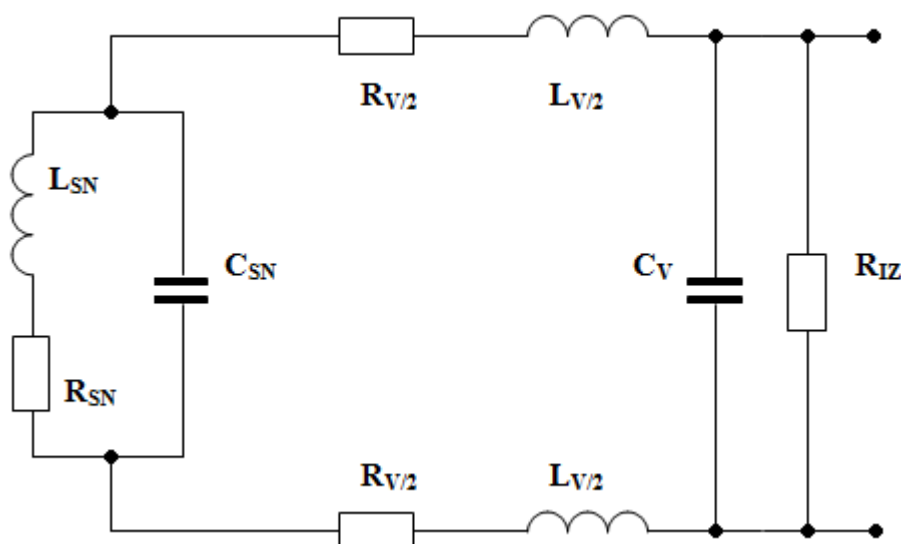
$$\omega L_{SN} \sim (1 - 10) R_{SN} \quad (1)$$

Následkem toho je silná kmitočtová závislost snímače, jelikož  $\omega L$  [ $\Omega$ ] závisí na kmitočtu daleko více než  $R_{SN}$  [ $\Omega$ ], který je však výrazně závislý na teplotě. Kapacita  $C_{SN}$  [F] nezpůsobuje velkou chybu měření, její reaktance je podstatně menší než reaktance indukčnosti  $L_{SN}$  [H] při stejném kmitočtu.

Z náhradního schématu je také patrný vliv přívodního vedení. U přívodů se musí uvažovat odpor  $R_V$  [ $\Omega$ ], indukčnost  $L_V$  [ $\Omega$ ], kapacita mezi vodiči (popř. proti zemi)  $C_V$  [F] a izolační odpor  $R_{IZ}$  [ $\Omega$ ]. Protože tyto veličiny působí na citlivost snímače a jejich hodnoty se mění s teplotou, vlhkostí, časem (stárnutí), musí pro velikost reaktance snímače  $\omega L_{SN}$  [ $\Omega$ ] platit:

$$R_V, \omega L_V \ll \omega L_{SN} \ll R_{IZ}, \frac{1}{C_V} \quad (2)$$

V případě, že nelze tuto podmínku splnit, je třeba vyhodnotit parazitní vliv. Elektrické náhradní schéma obvodu s indukčním snímačem je na obrázku č. 7.



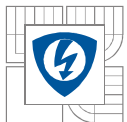
Obrázek č. 7 Náhradní schéma indukčního snímače s vedením [7]

## 1.4 Snímané materiály

Měřicí rozsah závisí na magnetické permeabilitě a elektrické vodivosti materiálu, ze kterého je předmět vyroben. Snímače mají různou citlivost pro různé materiály. Látky se dělí do třech základních skupin podle velikosti relativní permeability  $\mu_r$ .

### – Diamagnetismus

Vykazují jej všechny látky. Je tak slabý, že je překryt, když látka vyjadřuje paramagnetismus nebo feromagnetismus. Umístíme-li tuto látku do vnějšího magnetického pole, indukují se v jejích atomech slabé magnetické dipólové momenty orientované proti vnějšímu magnetickému poli. Výsledné působení všech indukovaných dipólů je ale zdrojem slabého



magnetického pole. Dipólové momenty zmizí po odstranění vnějšího magnetického pole. Látky, které vykazují pouze diamagnetismus se nazývají diamagnetické látky. Mezi diamagnetické látky patří zlato, měď, rtuť. Jejich relativní permeabilita je nepatrně menší než 1 tj.  $\mu_r = 0,99$ . [2]

– Paramagnetismus

Každý atom této látky má i bez vnějšího magnetického pole svůj magnetický dipól. Vnější magnetické pole, může částečně uspořádat atomové magnetické dipóly souhlasně s vnějším magnetickým polem a tím se vytvoří magnetické pole. Mezi paramagnetické materiály patří např. draslík, sodík, hliník. Jejich relativní permeabilita je nepatrně větší než 1 tj.  $\mu_r > 1$ . [2]

– Feromagnetismus

Některé elektrony těchto materiálů seřadí souhlasně své výsledné magnetické dipóly a vytvoří oblasti se silnými výslednými magnetickými dipóly. Vnější magnetické pole vytvoří silné magnetické pole látky jako celku. Toto pole se částečně udrží, i když je vnější magnetické pole odstraněno. Mezi feromagnetické látky patří např. železo a nikl. [2]

### Standardní snímaný předmět

Jedná se o čtvercovou destičku z oceli Fe 360 (ISO 630:1980). Její tloušťka je  $d = 1$  mm. Délka strany odpovídá průměru aktivní plochy snímače.[5]

### Korekční faktor

Udává nutné snížení snímací vzdálenosti pro materiál, který není vyroben z Fe 360.[5]

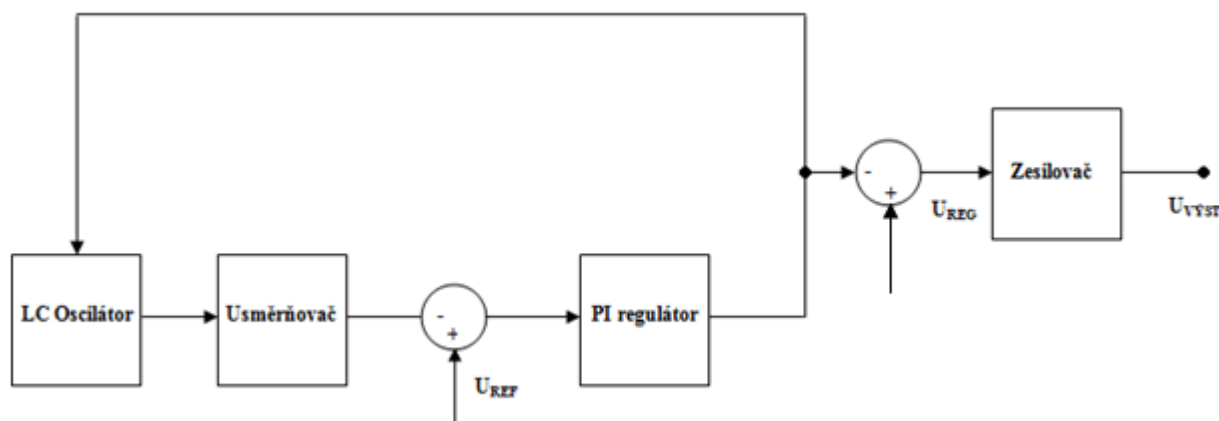
| Materiál | Faktor      |
|----------|-------------|
| Ocel     | 1,00        |
| Měď      | 0,25 - 0,45 |
| Mosaz    | 0,35 - 0,50 |
| Hliník   | 0,30 - 0,45 |
| Nerez    | 0,60 - 1,00 |
| Nikl     | 0,65 - 0,75 |
| Litina   | 0,93 - 1,05 |

**Tabulka č. 1** Korekční faktor snímače [5]

## 2 NÁVRH INDUKČNÍHO SNÍMAČE

Následující část se zabývá popisem funkce a návrhem jednotlivých částí indukčního snímače polohy.

### 2.1 Blokového schéma indukčního snímače



Obrázek č. 8 Návrh blokového schéma indukčního snímače

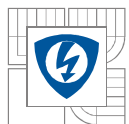
#### Princip činnosti

Obvod se skládá z vysokofrekvenčního oscilátoru, ke kterému je připojen rezonanční obvod, tyto dvě části tvoří dohromady LC oscilátor. Napětí z rezonačního obvodu se přivádí do usměrňovače, na jehož výstupu je vyfiltrované napětí, které vstupuje do PI regulátoru. Na druhý vstup regulátoru je přivedeno referenční napětí. Z výstupu PI regulátoru je přes snímací odpor napájen LC oscilátor. Regulátor udržuje konstantní napětí oscilátoru v celém pracovním rozsahu snímače. Při přiblížení kovového předmětu v něm vzniknou vířivé proudy. To se projeví „odčerpáním“ části energie z rezonačního obvodu a tím dojde ke zvýšení proudu odebíraného oscilátorem. Napětí úměrné tomuto proudu je dále pomocí operačních zesilovačů převedeno do vhodného rozsahu.

### 2.2 Návrh LC oscilátoru [5] [3] [2]

Obecně jsou oscilátory všechna zařízení, která vytvářejí periodicky proměnné průběhy fyzikálních veličin. Jsou to zařízení, která umí generovat napětí sinusového průběhu. LC oscilátory nachází uplatnění ve vysokofrekvenční elektronice, radiotechnice, ale také



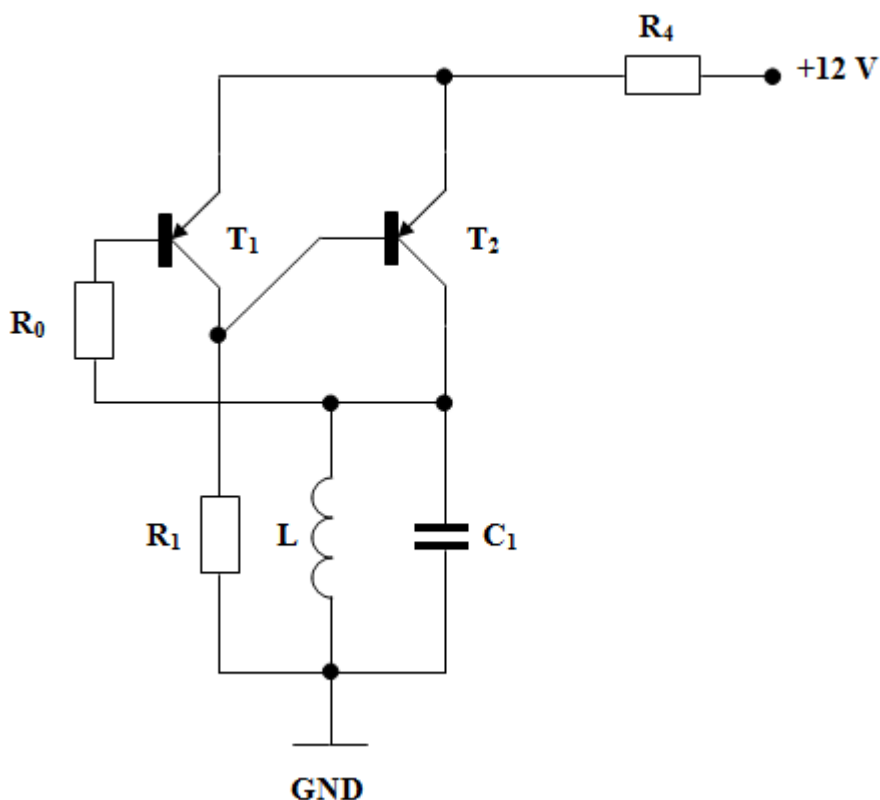


v průmyslových aplikacích (např. indukční snímače vzdálenosti nebo polohy). Oscilátor kmitá na rezonančním kmitočtu LC obvodu. Pokud by byly součástky ideální, pak by tyto kmity byly netlumené a kondenzátor s cívkou by si neustále předávaly svou energii. Protože se však jedná o reálné součástky, které vykazují určité ztráty, kmitají kmity tlumenými. K udržení oscilací je proto zapotřebí zajistit stálou dodávku energie, která bude kmity udržovat. K tomu slouží aktivní součástka připojená k obvodu LC. Rezonanční frekvence LC oscilátoru se vypočítá podle Thompsonova vztahu

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3)$$

Po nabití kondenzátoru  $C_1$  se mezi jeho deskami vytvoří elektrické pole, jehož energie představuje počáteční energii oscilátoru. Po připojení kondenzátoru k cívce začne oscilačním obvodem procházet proud, kondenzátor se vybíjí a energie elektrického pole se zmenšuje. Současně se zvětšuje proud procházející cívkou a kolem ní vytváří magnetické pole. Energie elektrického pole kondenzátoru se mění na energii magnetického pole cívky. Proud dosáhne maximální hodnoty a celková energie kmitání je daná energií magnetického pole cívky. Kondenzátor je vybit a proud se začíná zmenšovat. To vede ke vzniku indukovaného napětí, obvodem prochází indukovaný proud a kondenzátor se opět nabíjí.

Při přiblížení kovového předmětu ke snímací cívce LC oscilátoru, dojde k utlumení kmitů v oscilátoru, a následné deformaci magnetického pole této cívky. Vlivem deformace magnetického pole dojde k indukci vířivých proudů. Vířivé proudy jsou způsobeny střídavým magnetickým polem cívky  $H$  [ $\text{Am}^{-1}$ ] a vyvolávají v materiálu s rezistivitou  $\rho$  [ $\Omega\text{m}$ ] a permeabilitou  $\mu$  [ $\text{Hm}^{-1}$ ] sekundární magnetické pole o intenzitě  $H_v$  [ $\text{Am}^{-1}$ ] působící proti magnetickému poli, které jej vyvolalo (Lenzův zákon). Zmenšuje se tak intenzita původního pole, což má za následek zvýšení ztrát, čímž dojde k podstatnému zvýšení odebíraného proudu. Toto zvýšení odebíraného proudu je pak následně vyhodnocováno. Navrhovaný LC oscilátor je na obrázku č. 9.



**Obrázek č. 9** Návrh LC oscilátoru

Při navrhování oscilátoru byly zvoleny následující hodnoty a typy součástek:

$$R_0 = 33 \text{ } [\Omega]$$

$$R_1 = 33 \text{ } [\Omega]$$

$$R_4 = 5600 \text{ } [\Omega]$$

$$T_1 \text{ typ C32 740}$$

$$T_2 \text{ typ C32 740}$$

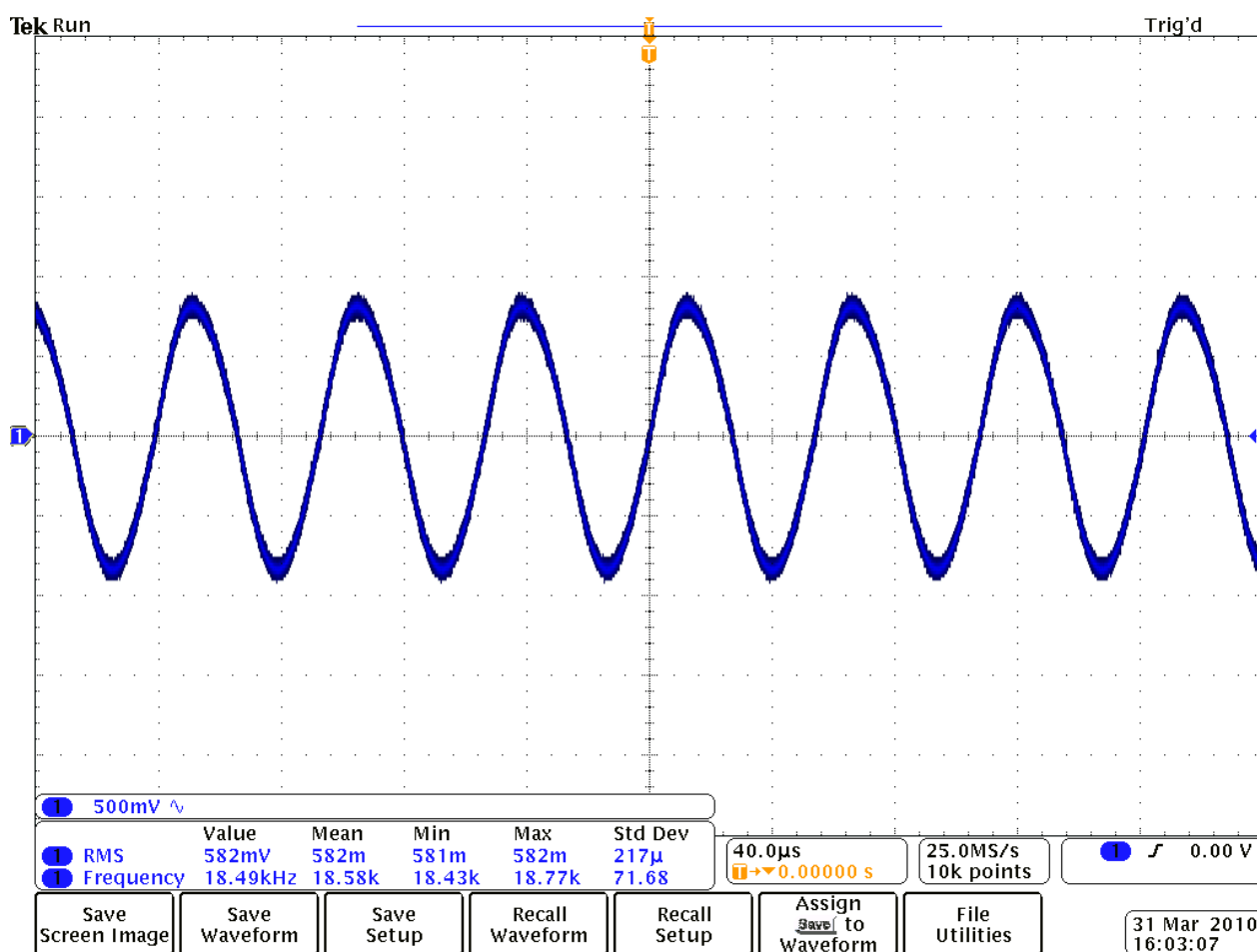
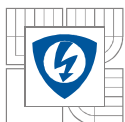
$$C_1 = 470 \text{ } [\text{nF}]$$

$$L = 0,15 \text{ } [\text{mH}]$$

Rezonanční kmitočet navrhovaného LC oscilátoru se vypočítá dle vztahu [3]

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{470 \cdot 10^{-9} \cdot 0,15 \cdot 10^{-3}}} = 18\,964,69 \text{ Hz}$$

Průběh kmitů navrhovaného LC oscilátoru je zobrazen na obrázku č. 10



Obrázek č. 10 Kmity navrhovaného LC oscilátoru

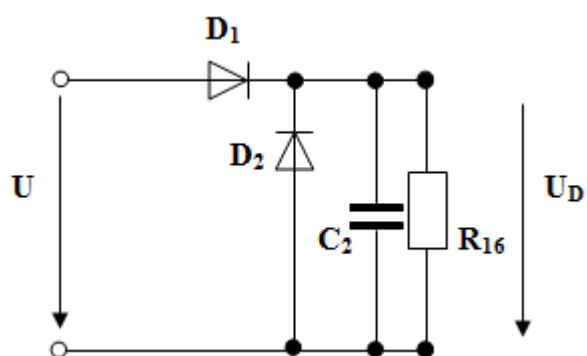
## 2.3 Návrh usměrňovače

Usměrňovač je polovodičový měnič, který vhodným spínáním polovodičových prvků provádí přeměnu střídavé elektrické energie na stejnosměrnou elektrickou energii. K vyhlazení pulzujícího průběhu usměrněného napětí se používá kondenzátor  $C_2$ , který je zapojen na výstupní straně usměrňovače.

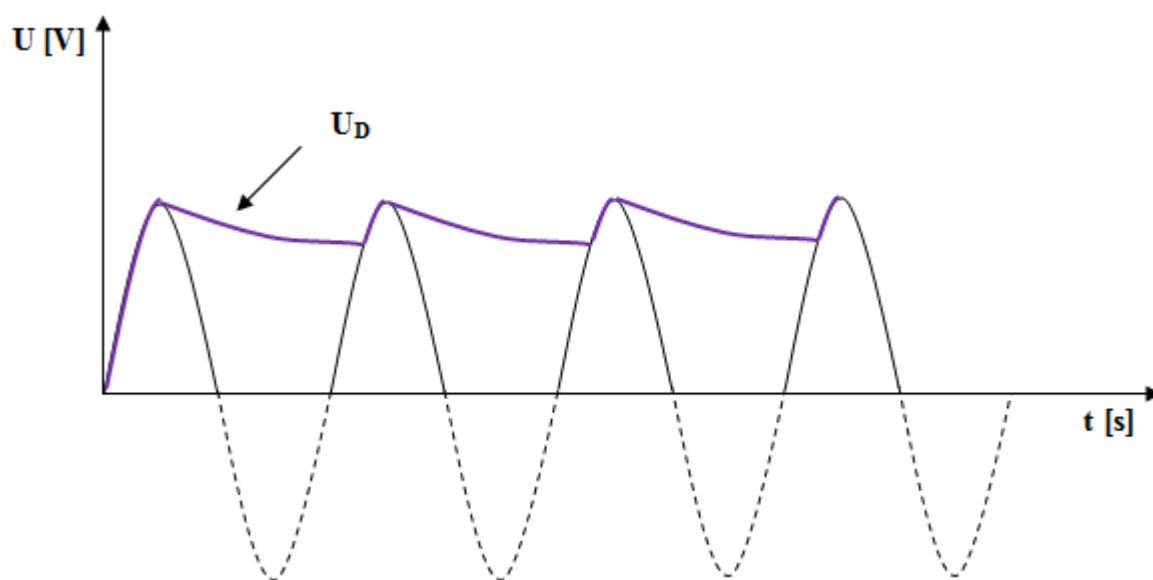
Do usměrňovače vstupuje střídavé napětí z vysokofrekvenčního LC oscilátoru. Dioda  $D_1$  je polarizována v propustném směru, je-li okamžitá hodnota napětí  $u$  [V]  $> u_D$  [V]. Za vrcholem kladné půlvlny je napětí  $u$  [V]  $> u_D$  [V], kondenzátor  $C_2$  se začne vybíjet do odporu  $R_{16}$ . V okamžiku, kdy kondenzátor dodává celý proud do odporu  $R_{16}$   $I_C$  [A] =  $I_R$  [A], dioda  $D_1$  je polarizována v závěrném směru. Při opětovném nárůstu napětí do kladných hodnot dojde ke splnění  $u$  [V]  $> u_D$  [V] a dioda  $D_1$  je polarizována v propustném směru. Vyhlazení průběhu usměrněného napětí bude tím lepší, čím větší bude časová konstanta  $\tau$ . Časová konstanta je dána následujícím vztahem. [4]

$$\tau = R * C \quad (4)$$

Návrh usměrňovače a průběh usměrněného napětí je na obrázku č 11.



a)



b)

**Obrázek č. 11** a) Návrh stejnosměrného usměrňovače

b) Průběh usměrněného napětí

Navrhovaný usměrňovač se skládá ze součástek s následujícími hodnotami:

$D_1$  typ BAT 44

$D_2$  typ BAT 44

$C_2 = 33 \text{ [ nF ]}$

$R_{16} = 56 \text{ [ k}\Omega \text{ ]}$

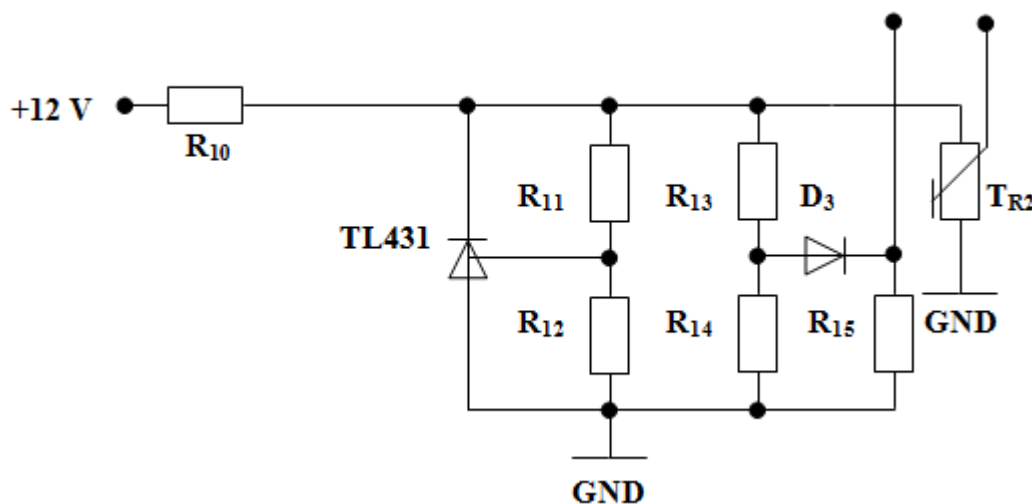
Z výstupu usměrňovače přivádíme do PI regulátoru usměrněné napětí o velikosti 580 mV. Časová konstanta navrhovaného usměrňovače se vypočítá dle vztahu[4].

$$\tau = R * C = 56 * 10^3 * 33 * 10^{-9} = 1,848 \text{ ms}$$

## 2.4 Návrh zdroje napětí [4]

Stabilizátory jsou obecně obvody, které vyrovnávají proudové nebo napěťové změny na zátěži. Požívají se všude tam, kde požadujeme konstantní hodnotu napětí popř. proudu na zátěži při kolísajícím napětí nebo proudu zdroje.

Referenční zdroj napětí obsahuje integrovaný paralelní stabilizátor TL 431, který se používá jako zdroj referenčního napětí 5V. Toto napětí se dále upravuje děličem R13, R14, D3, R15 na velikost  $U_1 = 0,5 \text{ V}$ , které vstupuje do PI regulátoru. Dioda D3 slouží ke kompenzaci teplotní závislosti diody D1 v usměrňovači. Napětí 5 V se využívá pro nulování offsetu výstupního napětí snímače.



**Obrázek č. 12** Návrh zdroje napětí

Navrhovaný zdroj se skládá z následujících součástí:

D<sub>3</sub> typ BAT 44

R<sub>10</sub> = 1 [ kΩ ]

R<sub>11</sub> = 4,7 [ kΩ ]

R<sub>12</sub> = 4,7 [ kΩ ]

R<sub>13</sub> = 800 [ Ω ]

R<sub>14</sub> = 470 [ Ω ]

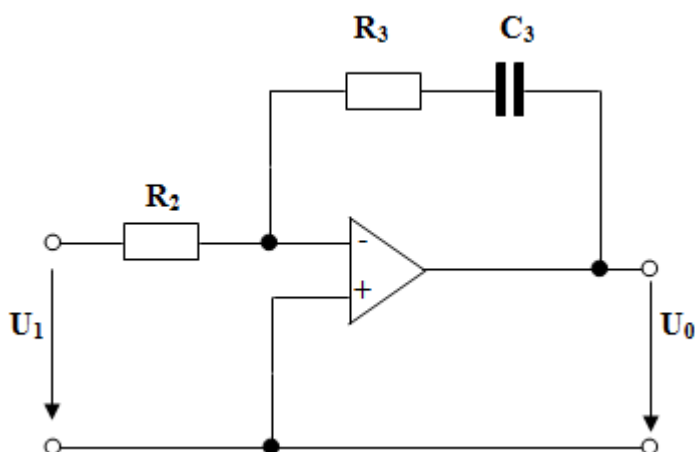
R<sub>15</sub> = 200 [ Ω ]

T<sub>R2</sub> = 4,7 [ kΩ ]

## 2.5 Návrh PI regulátoru

PI regulátor, který vznikne spojením 2 základních regulátorů P (proporcionálního) a I (integračního) zabezpečuje v ustáleném stavu nulovou regulační odchylku a zlepšuje stabilitu vzhledem k použití čistě I-regulátoru.[3]

Pro určitá nastavení stavitelných parametrů regulátoru vyhovuje z hlediska stability i pro astatické regulované soustavy. Jedná se o nejrozšířenější spojitý regulátor. PI regulátor je tvořen integrovaným obvodem TLC274CN, který obsahuje 4 operační zesilovače. Do PI regulátoru na invertující vstup připojíme aktuální hodnotu usměrněného napětí na oscilátoru, do neinvertujícího vstupu přivádíme žádanou hodnotu ze zdroje napětí.



Obrázek č. 13 Realizace PI regulátoru pomocí operačního zesilovače

Přenos PI regulátoru je dán následujícím vztahem:

$$\frac{U_0}{U_1} = -\frac{R_3 C_3 p + 1}{R_2 C_3 p} = -\frac{R_3}{R_2} \frac{R_3 C_3 p + 1}{R_3 C_3 p} = -K \frac{\tau p + 1}{\tau p} = -K \left( 1 + \frac{1}{\tau p} \right) \quad (5)$$

Zvolené součástky:

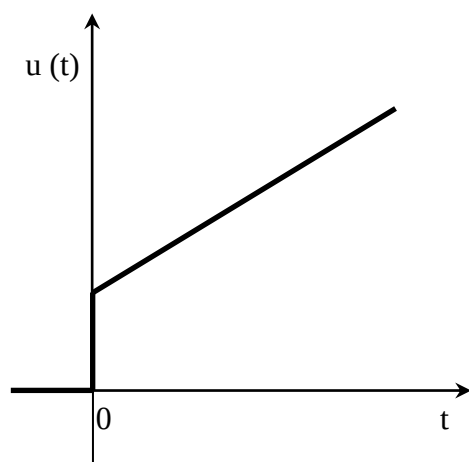
$$R_2 = 15 \text{ [ k}\Omega \text{ ]}$$

$$R_3 = 27 \text{ [ k}\Omega \text{ ]}$$

$$C_3 = 33 \text{ [ nF ]}$$

### Přechodová charakteristika PI regulátoru

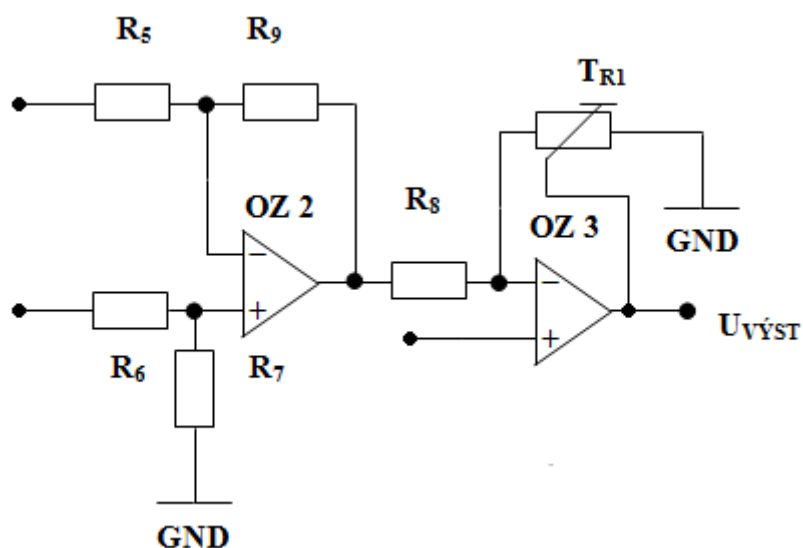
Je grafickým znázorněním výstupní veličiny při skokové změně vstupní veličiny. V počátku regulačního pochodu převládá vliv proporcionální složky, s narůstajícím časem převládá vliv integrační složky. Přechodová charakteristika je zobrazena na obrázku č. 14.



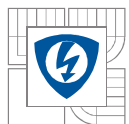
Obrázek č. 14 Přechodová charakteristika PI regulátoru

## 2.6 Návrh vyhodnocovacích obvodů

Na vstupu do operačního zesilovače 2 označeného jako OZ 2 vstupuje snímaná hodnota proudu z odporu  $R_4$ . OZ 2 plní funkci diferenciálního zesilovače s jednotkovým zesílením. Operační zesilovač OZ 3 slouží k nastavení konečného výstupního napětí, kde pomocí potenciometru  $T_{R1}$  nastavíme požadovanou citlivost snímače. Návrh vyhodnocovacích obvodů je na obrázku č. 15.



Obrázek č. 15 Návrh vyhodnocovacího ústrojí



Zvolené součástky:

$$R_5 = 12 \text{ [ k}\Omega \text{ ]}$$

$$R_6 = 12 \text{ [ k}\Omega \text{ ]}$$

$$R_7 = 12 \text{ [ k}\Omega \text{ ]}$$

$$R_8 = 2 \text{ [ k}\Omega \text{ ]}$$

$$R_9 = 12 \text{ [ k}\Omega \text{ ]}$$

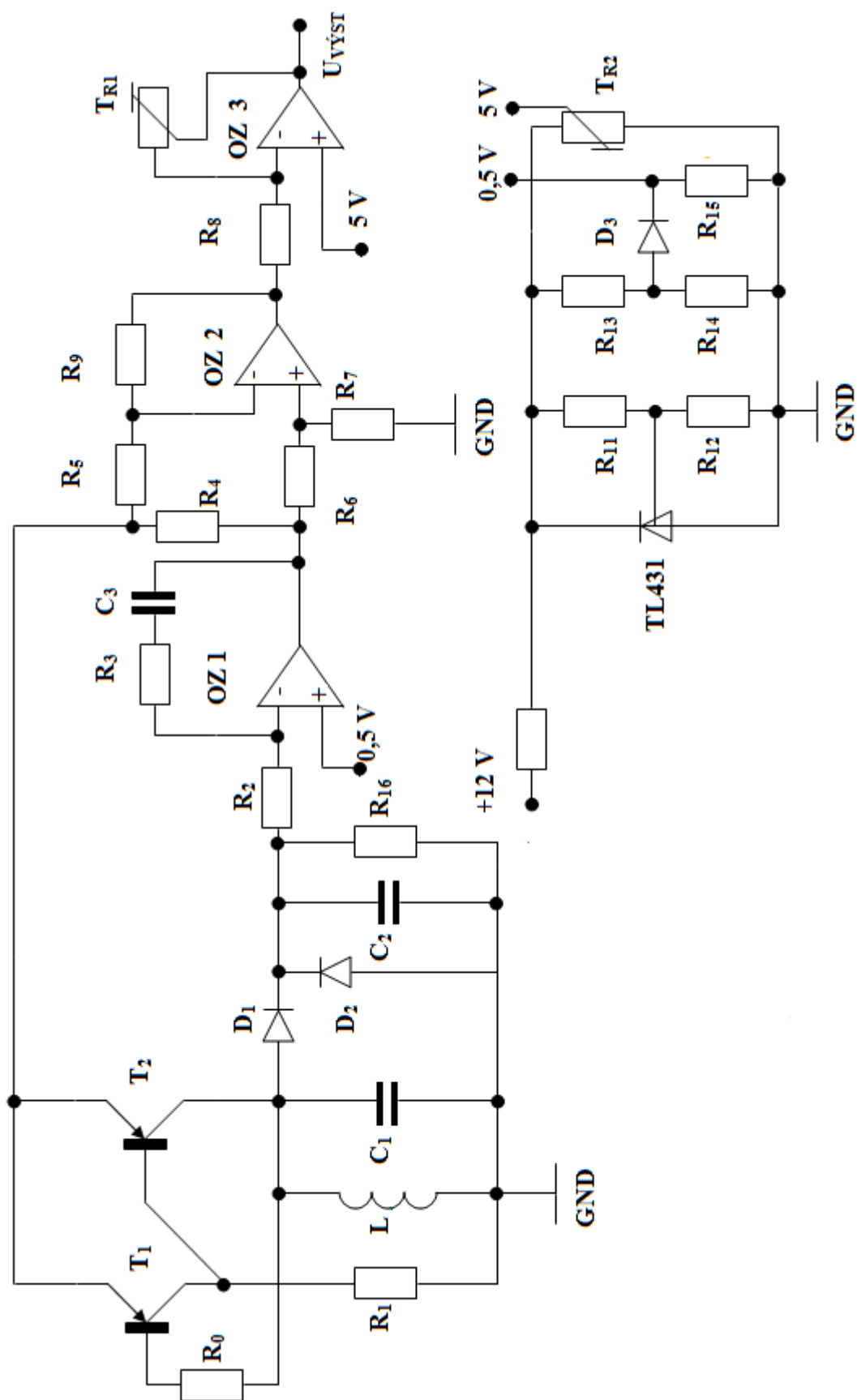
$$T_{R1} = 4,7 \text{ [ k}\Omega \text{ ]}$$

## 2.7 Návrh celkového schématu indukčního snímače polohy

Na rezonančním obvodu LC oscilátoru, který je tvořen snímací cívkou  $L$  a kondenzátorem  $C_1$  vzniká vysokofrekvenční napětí o kmitočtu  $f_0 = 18\,965 \text{ Hz}$  a velikosti  $U = 580 \text{ mV}$ . Toto napětí je usměrněno pomocí diody  $D_1$  a vyfiltrováno kondenzátorem  $C_2$ , který vyhladí pulzující průběh stejnosměrného napětí. Usměrněné napětí vstupuje do operačního zesilovače, který s odpory  $R_2$  a  $R_3$  a kondenzátorem  $C_3$  tvoří PI regulátor. Z výstupu PI regulátoru je přes snímací odpor  $R_4$  napájen LC oscilátor. Referenční hodnota napětí  $U_1 = 0,5 \text{ V}$  je získána ze zdroje napětí děličem  $R_{13}, R_{14}, D_3, R_{15}$ . PI regulátor udržuje konstantní napětí na rezonančním obvodu.

Při přiblížení kovového předmětu, dochází ke vzniku vířivých proudů a tím ke zvýšení energie v obvodu, kterou je nutno uhradit. Tato energie je úměrná hodnotě snímaného proudu na odporu  $R_4$ . Na výstupu z PI regulátoru dojde ke zvětšení odebíraného proudu. Snímaný proud se přivádí do diferenciálního zesilovače OZ 2. Na výstupu OZ 3 je celkové výstupní napětí snímače. Jeho velikost je dána snímaným materiálem a nastavenou hodnotou proměnného odporu  $T_{R2}$ . Proměnný odpor  $T_{R2}$  slouží k nastavení “nulové hodnoty” výstupního napětí a proměnný odpor  $T_{R1}$  slouží k nastavení citlivosti.



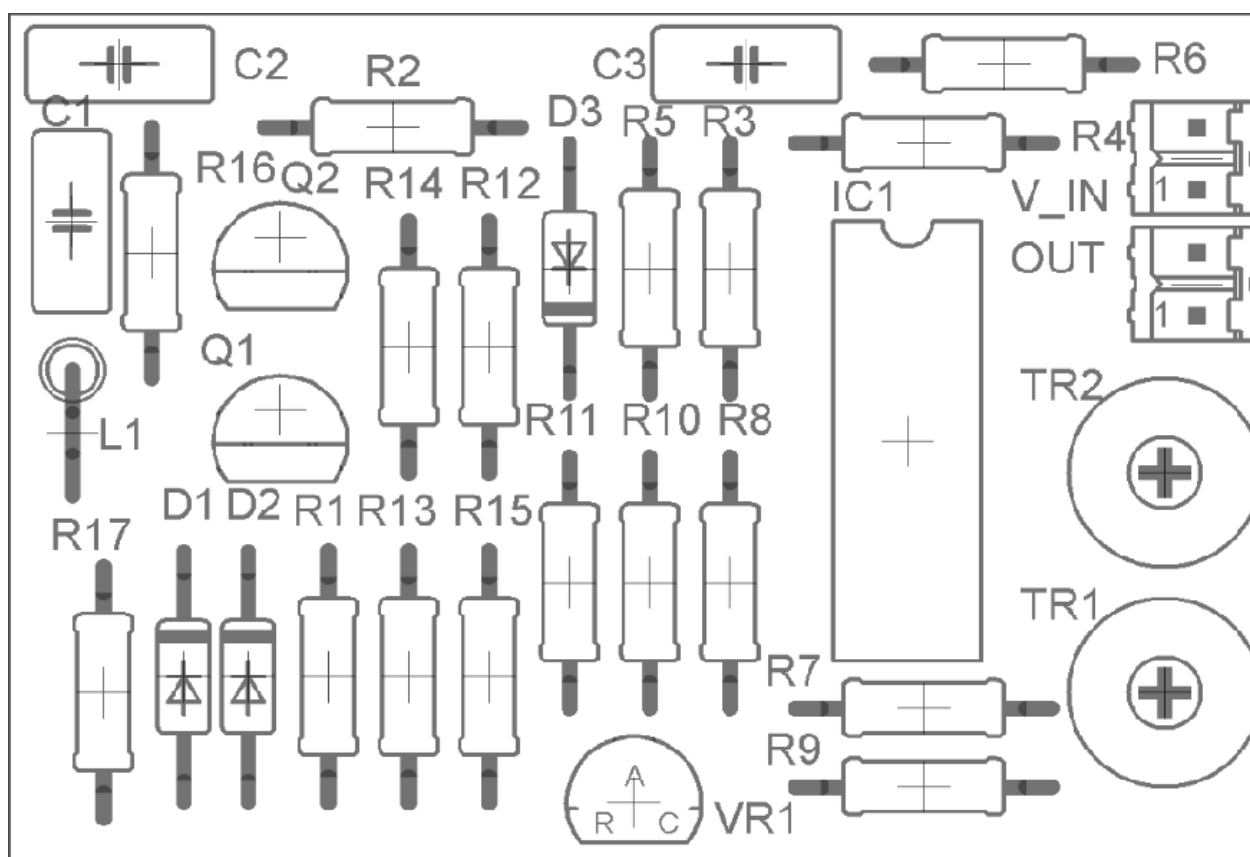


Obrázek č. 16 Celkové schéma indukčního snímače polohy

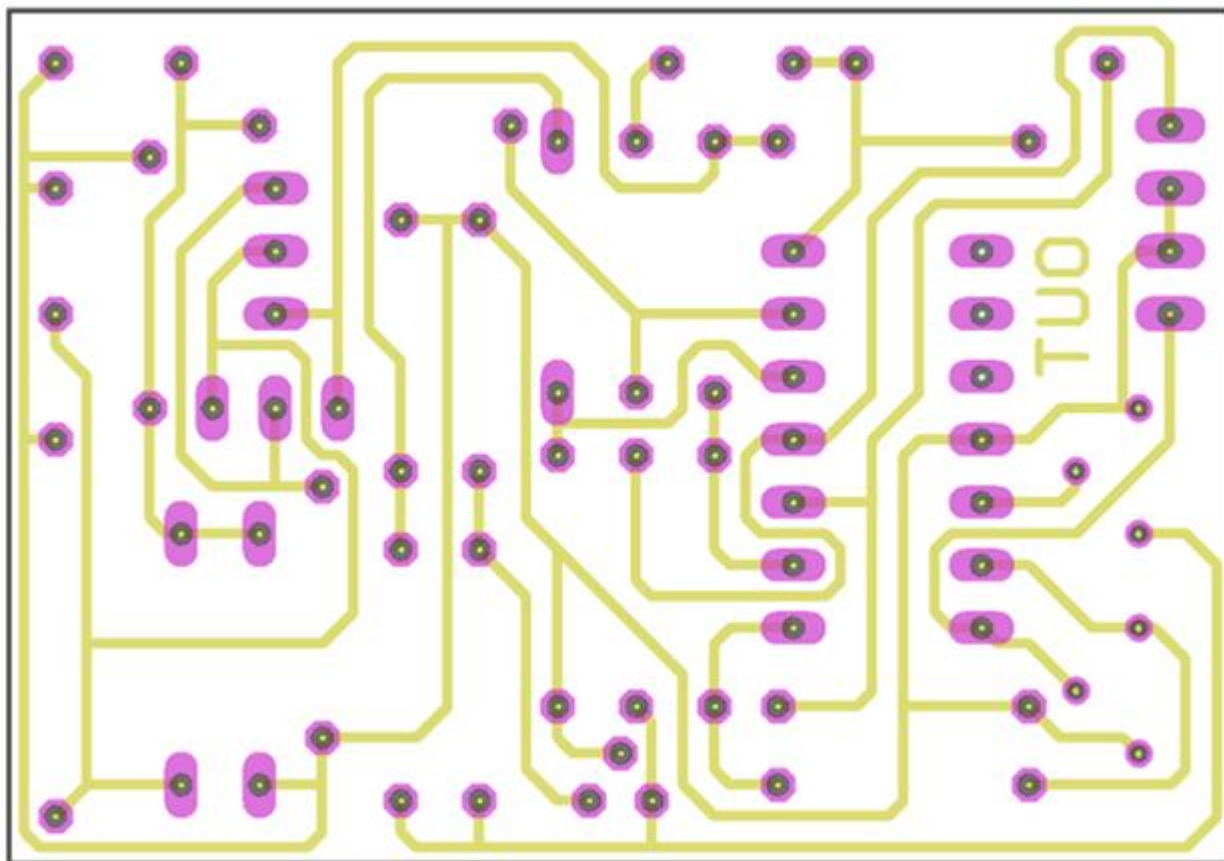
### 3 KONSTRUKCE INDUKČNÍHO SNÍMAČE

Návrh desky plošného spoje je dalším krokem při konstrukci indukčního snímače polohy. Kompletní návrh desky plošného spoje byl proveden v programu Eagle v 5.0.0. Jedná se o freeware program, který nám umožní navrhout desku o maximálních rozměrech 80x10 mm.

#### Schéma osazení plošného spoje součástkami



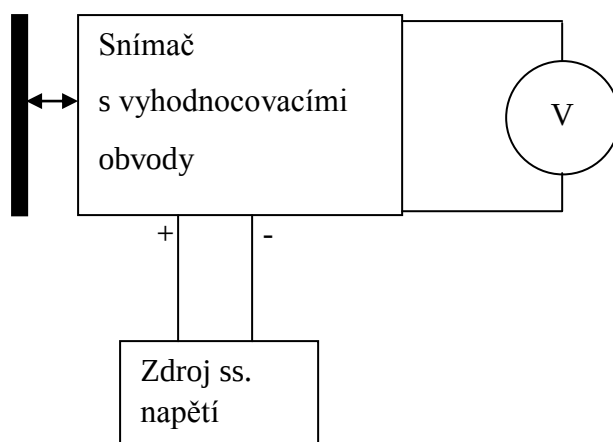
Obrázek č. 17 Osazení desky plošného spoje



**Obrázek č. 18** Schéma desky plošného spoje

### 3.1 Praktické měření a zpracování výsledků

Pro praktické měření byly zvoleny 3 materiály, a to železo, měděný plech a hliník. Pro všechny materiály bylo provedeno měření, kde se měřený materiál nejprve přiblíží ke snímací cívice na vzdálenost  $l = 0$  mm. Poté pomocí proměnného odporu  $T_{R2}$  nastavíme velikost výstupního napětí  $U_{\text{výst}} = 0$  V. Po kroku 0,5 mm posouváme měřený materiál od čela snímací cívky a měříme velikost výstupního napětí. Vzdálenost mezi měřeným materiálem a snímací cívkou byla měřena posuvným měřidlem. Stejným postupem změříme i ostatní materiály. S naměřených hodnot a sestavených charakteristik je zřejmé že se měřicí rozsah pro různé materiály mění. Měřicí pracoviště je naznačeno na obrázku č. 19.



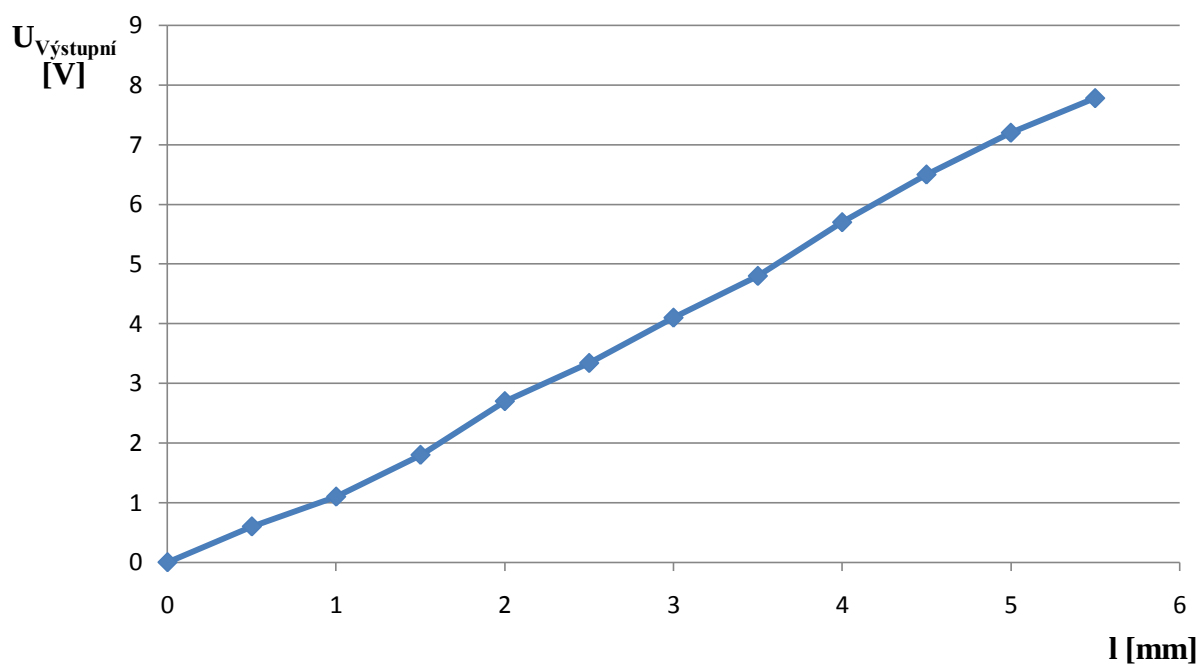
**Obrázek č. 19** Schéma měřicího pracoviště

### Železo

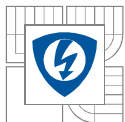
| $l$<br>[mm] | $U_{\text{výstupní}}$<br>[V] |
|-------------|------------------------------|
| 0           | 0                            |
| 0,5         | 0,6                          |
| 1           | 1,1                          |
| 1,5         | 1,8                          |
| 2           | 2,7                          |
| 2,5         | 3,34                         |
| 3           | 4,1                          |
| 3,5         | 4,8                          |
| 4           | 5,7                          |
| 4,5         | 6,5                          |
| 5           | 7,2                          |
| 5,5         | 7,78                         |

**Tabulka č. 2** Závislost vzdálenosti železa na výstupním napětí

### Železo



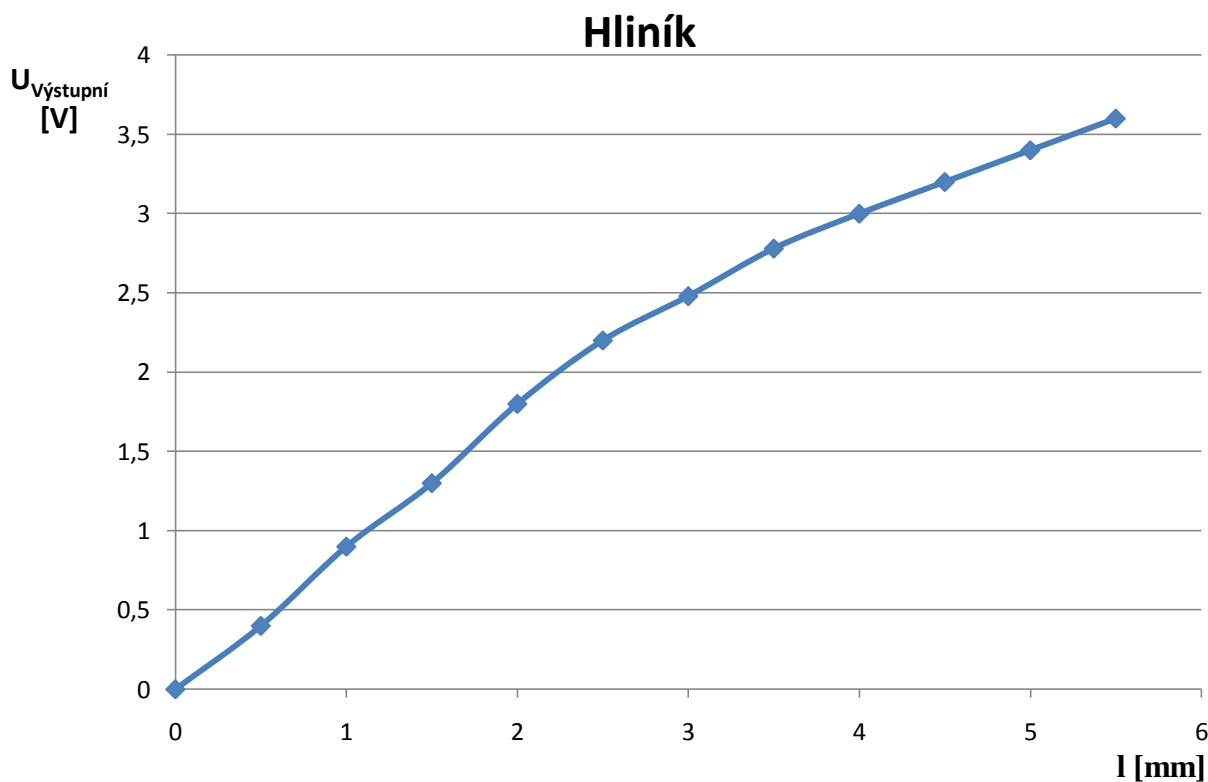
**Obrázek č. 20** Grafická závislost výstupního napětí na vzdálenosti železa od čela snímací cívky



Hliník

| $l$<br>[mm] | $U_{\text{výstupní}}$<br>[V] |
|-------------|------------------------------|
| 0           | 0                            |
| 0,5         | 0,4                          |
| 1           | 0,7                          |
| 1,5         | 1,3                          |
| 2           | 1,9                          |
| 2,5         | 2,3                          |
| 3           | 2,68                         |
| 3,5         | 2,84                         |
| 4           | 3                            |
| 4,5         | 3,2                          |
| 5           | 3,4                          |
| 5,5         | 3,6                          |

**Tabulka č. 3** Závislost vzdálenosti měděného plechu od čela snímací cívky na výstupním napětí

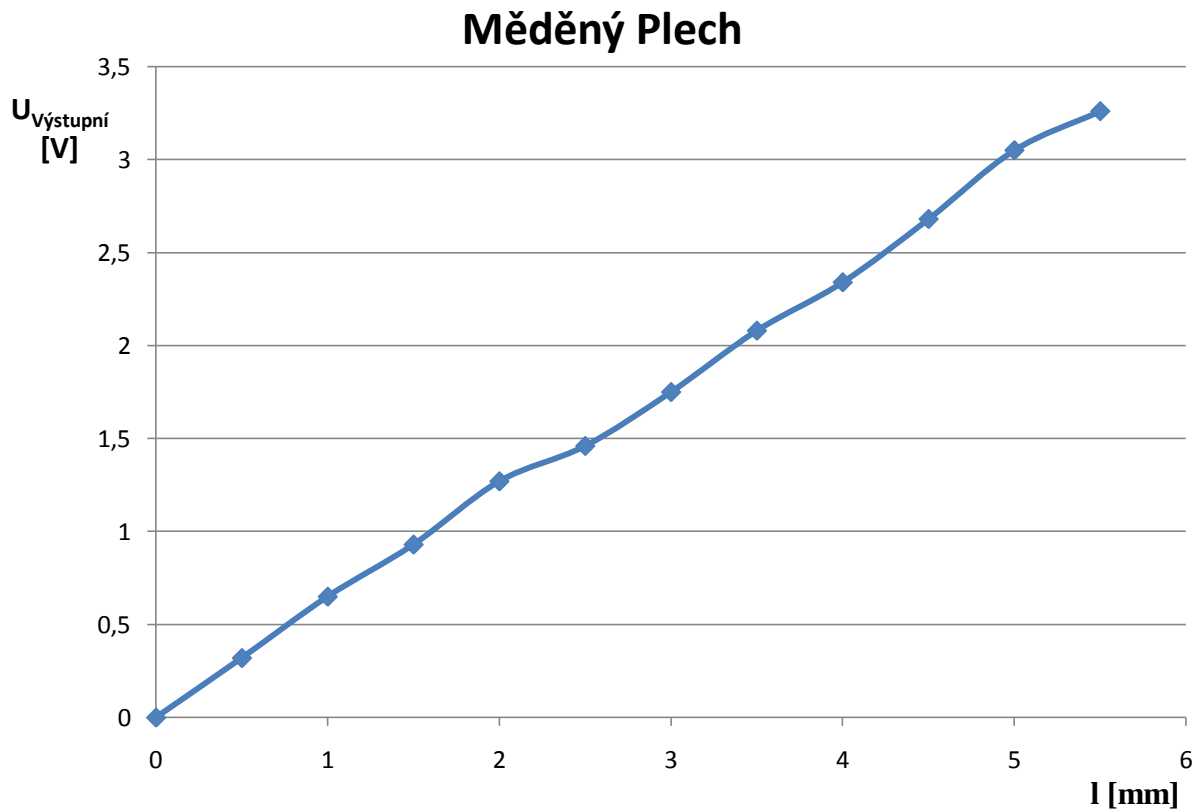


**Obrázek č. 21** Grafická závislost výstupního napětí na vzdálenosti měděného plechu od čela snímací cívky

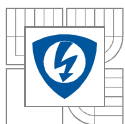
### Měděný plech

| $l$<br>[mm] | $U_{\text{výstupní}}$<br>[V] |
|-------------|------------------------------|
| 0           | 0                            |
| 0,5         | 0,32                         |
| 1           | 0,65                         |
| 1,5         | 0,93                         |
| 2           | 1,27                         |
| 2,5         | 1,46                         |
| 3           | 1,75                         |
| 3,5         | 2,08                         |
| 4           | 2,34                         |
| 4,5         | 2,68                         |
| 5           | 3,05                         |
| 5,5         | 3,26                         |

**Tabulka č. 4** Závislost vzdálenosti hliníku od čela snímací cívky na výstupním napětí



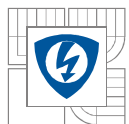
**Obrázek č. 22** Grafická závislost výstupního napětí na vzdálenosti hliníku od čela snímací cívky



## 4 ZÁVĚR

Bakalářská práce se zabývá návrhem indukčního snímače polohy. V práci je popsán princip základních indukčních snímačů polohy, jejich výhody a nevýhody, historie, vlastnosti snímáných materiálů a vliv vedení na parametry snímače. V další části práce je popisován návrh jednotlivých částí indukčního snímače polohy. Oscilátor byl navržen s rezonančním kmitočtem  $f_0 = 18\,490\text{ Hz}$ , amplituda napětí netlumeného oscilátoru je  $U = 580\text{ mV}$ . Mezi další navrhované části patří usměrňovač, zdroj napětí a vyhodnocovací koncové stupně. V programu Eagle, byla navrhována deska plošného spoje. Pro praktické měření byly zvoleny 3 materiály: železo, měď a hliník. V případě železa jako feromagnetického materiálu mělo výstupní napětí  $U_{\text{výst}}$  rozsah  $0 - 7,8\text{ V}$ , pro hliník jako paramagnetický materiál byl rozsah výstupního napětí v rozmezí  $0 - 3,6\text{ V}$ . Měď jako diamagnetický měla měřicí rozsah nejmenší výstupní napětí snímače pro vzdálenost  $0 - 5,5\text{ mm}$  bylo v rozmezí  $0 - 3,3\text{ V}$ . Naměřené a sestavené grafické závislosti vzdálenosti materiálu od čela snímací cívky na výstupním napětí měly lineární průběh.





## Literatura

- [1] Doc. Ing. Ludvík Bejček, *Senzory neelektrických veličin*. Elektronické skriptum FEKT VUT Brno. 2009
- [2] HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. *Fyzika : Elektřina a magnetismus*. Brno : VITIUM , 2006. 310 s. ISBN 80-214-1868-0.
- [3] Doc. Ing. Pavel Vorel, Ph.D. , Doc. Dr. Ing. Miroslav Patočka, *Průmyslová elektronika*. Elektronické skriptum FEKT VUT Brno. 2004.
- [4] KREJČÍŘÍK, Alexandr. *Lineární napájecí zdroje*. Praha : BEN, 2001. 144 s. ISBN 80-7300-002-4.
- [5] Indukční snímače - principy. [cit.2010-23-03]  
URL:<[http://www.balluff.cz/Download/katalogy/haupt/S10\\_0703\\_cz.pdf](http://www.balluff.cz/Download/katalogy/haupt/S10_0703_cz.pdf)>
- [6] Indukční snímače slaví 50 let od svého vzniku, Pepperl+Fuchs s. r. o.[cit.2010-23-03]  
URL:<[http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=37779](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=37779) >
- [7] Doc. Ing. Ludvík Bejček, *Měření fyzikálních veličin*. Elektronické skriptum FEKT VUT Brno. 2009
- [8] Senzory pro měření ve strojírenství [cit.2010-23-03]  
URL:<<http://www.automatizace.cz/article.php?a=268>>