

**TECHNICKÁ UNIVERSITA V LIBERCI**

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Liberec 2009

**Martin Kniga**

**TECHNICKÁ UNIVERSITA V LIBERCI**  
Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

Studijní program: B 2612 – Elektronika a informatika  
Studijní obor: 2612R011 – Elektronické informační a řídicí systémy

**Zjišťování vlastností sond detektorů kovů**

**The survey probes the properties of metal detectors**

**Bakalářská práce**

Autor: **Martin Kniga**  
Vedoucí práce: Ing. Jiří Bažant  
Konzultant: Ing. Lubomír Slavík

V Liberci 19. 5 2009

Zde bude originální zadání práce

## Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé BP a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé bakalářské práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užít své bakalářské práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených universitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum:

Podpis:

## **Poděkování**

Touto cestou bych v první řadě velice rád poděkoval Váženému panu děkanovi Prof. Ing. Václavu Kopeckému, CSc a všem proděkanům za trpělivost a ochotu.

Rovněž bych chtěl poděkovat vedoucímu práce váženému panu Ing. Jiřímu Bažantovi za podněty, připomínky, cenné rady a ochotu v průběhu tvorby této bakalářské práce.

V neposlední řadě patří díky za podporu při studiu mým rodičům, kteří mě ve studiu a psaní této práce nemalou měrou podporovali.

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce se zabývá základními principy funkce detektorů kovů a jejich nejběžnějšími konstrukčními provedeními sond. Jsou zde probrány jednotlivé typy sond podrobněji a okrajově popsána funkce cívky v obvodu, vznik elektromagnetického pole a také principy zpracování vstupního signálu. U zpracování signálu jsem se zaměřil na funkci a vlastnosti Lock-in zesilovače.

Dále se práce zabývá praktickou částí, kde je popsáno a vysvětleno vlastní měření, které probíhalo v laboratoři školy na zakoupeném detektoru kovů. Také jsou zde rozebrány problémy při detekci kovů. Výsledky a závěry z praktické části jsou zhodnoceny v závěru a výsledné naměřené hodnoty se dají nalézt v příloze A.

## **Abstract**

This bachelor study is concerning about basic principles of metal detectors and their most common constructions of probes. There are singly described types of probes, marginally function of inductor in circuit, creation of electromagnetic field and principles of manipulation with input signal. I focused on function and characteristics of Lock-in intensifier.

Bachelor study is also including practical part where is described and explained own measurement, which was proceeding through the metal detectors bought by the University. There are also analysed problems during metal detecting procedure. Results and conclusions of practical part are reviewed in final conclusion and results of measured values can be found at section A.

# Obsah

Úvod.....	9
1 Cívka.....	10
1.1 Stavba cívky.....	10
1.2 Druhy cívek.....	10
1.3 Parametry cívky.....	10
1.4 Cívka v elektrickém obvodu.....	11
1.5 Použití cívky.....	12
2 Základní principy detekce kovů.....	13
2.1 Princip vyvažovaných cívek.....	13
2.2 Princip laděné cívky.....	14
2.3 Princip pulsní detekce.....	15
2.4 Metal free area.....	16
2.5 Produkt-effekt.....	17
2.6 Citlivost detektoru kovu.....	17
2.7 Amplitudová modulace.....	19
3 Lock-in zesilovač.....	21
3.1 Proč používat LIA.....	22
3.2 Režimy použití LIA.....	23
3.2.1 Detekce vstupního signálu.....	23
3.2.2 Měření vyšších harmonických.....	23
3.2.3 Měření šumových vlastností.....	23
3.3 Dynamická reserva.....	24
4 Praktická část.....	25
4.1 Seznámení s detektorem.....	25
4.2 Problémy při detekci.....	27
4.3 Vlastní měření.....	30
Závěr.....	32
Seznam použité literatury.....	33
Příloha A.....	34
Příloha B.....	36



# Úvod

Měření elektrických veličin je základním zdrojem informací o stavu průběhu technologického procesu nebo o vlastnostech a chování soustavy automatického řízení. Cílem měření je zjistit velikost dané fyzikální veličiny, takže výsledek měření má vždy kvantitativní charakter.

Toto měření stále častěji probíhá bez přímé účasti člověka a jeho výsledky neslouží pouze jako informace pro něho, ale využívají se bezprostředně k automatickému řízení.

V mnoha provozech mnoha průmyslových aplikací je nutné zajistit plně automatickou detekci kovových částic a předmětů, které tam nemají co dělat. K tomu slouží detektory kovů umožňující automaticky detekovat i malinký kovový předmět uprostřed zabaleného cukru.

V průmyslových aplikacích a mnoha průmyslových odvětvích, ať již těžkého nebo lehkého průmyslu, je nutné ve výrobní lince zajistit plně automatickou detekci nežádoucích kovových částic a předmětů. Takové detektory kovů se běžně objevují v elektrárnách, kde detekují velké kovové předměty v uhlí, nebo v potravinářském průmyslu, kde jsou nutné pro kontrolu případných malinkých kovových prvků v potravinách, kam se mohou dostat z některých strojů.

Kovodetektory, jak se jim také říká, se samozřejmě liší v provedení pro dopravní pás na uhlí nebo pro balící linku prášků do pečiva. Velkých výrobců takovýchto zařízení je celosvětově několik.

V této práci se nebudu zabývat velkými kovodetektory, ale menšími „ručními“ detektory kovů, které mají stejné principy detekce a vyhodnocení kovů, jako již zmiňované kovodetektory. V poslední praktické části je pak menší měření na již výše zmiňovaném detektoru kovů s výsledky měření.

# 1 Cívka

Cívka je elektrotechnická součástka používaná v elektrických obvodech k vytvoření magnetického pole, které se dále využívá k působení magnetickou silou. Cívka slouží jako elektromagnet a k indukci elektrického proudu proměnným magnetickým polem.

## 1.1 Stavba cívky

Cívka se skládá z vodiče navinutého na izolační nosnou kostru. Vinutí může být jednovrstvé nebo vícevrstvé. V případě vícevrstevných cívek je třeba použít tzv. křížové vinutí, aby se omezila vlastní elektrická kapacita cívky. Navinutý vodič může být i samonosný (bez kostry). Vodič v cívce má mít co nejmenší rezistivitu, aby v cívce nedocházelo k velkým tepelným ztrátám. Nejčastěji používaným materiálem je měď. Ke zvětšení magnetických vlastností se dovnitř cívky vkládá jádro z magneticky měkké oceli. Tzn. z feromagnetické látky s malou remanentní magnetizací. K omezení vzniku vířivých proudů v jádře se jádro skládá z několika vrstev oddělených izolantem nebo z jemných železných částíček spojených izolační hmotou (tzv. železové jádro).

## 1.2 Druhy cívek

Podle rozměrů a tvaru lze rozlišit obyčejnou cívku, solenoid (velmi dlouhá cívka) a toroid (cívka stočená do kruhu). Cívku lze rozdělit podle frekvence střídavého proudu, pro kterou je určena a to na nízkofrekvenční a vysokofrekvenční cívky.

## 1.3 Parametry cívky

Hlavní parametry cívky, které jsou viditelné a nemusí se měřit, jsou geometrické vlastnosti. K těmto vlastnostem patří počet závitů na jednotku délky, samotná délka vodiče navinutého na cívce a obsah průřezu vodiče cívky. Další z vlastností už patří mezi měřitelné pomocí přístrojů a nebo výpočtu. Je to indukčnost  $L$ , která vyjadřuje velikost magnetického indukčního toku  $\Phi$  při jednotkovém elektrickém proudu  $I$ .

$$L = \frac{\Phi}{I} \quad (1)$$

Tohoto vztahu lze také dosáhnout použitím geometrických vlastností cívky,

$$L = \frac{\mu n^2}{l} S \quad (2)$$

kde  $\mu$  je permeabilita prostředí,  $n$  je počet závitů cívky na jednotku délky,  $l$  je délka cívky,  $S$  je obsah průřezu cívky (vztah platí pro cívku, jejíž délka je mnohem větší než poloměr, při zanedbání rozptylu magnetického pole na krajích cívky). Další z parametrů je maximální zatížení, které udává největší možný výkon elektrického proudu, který ještě nepoškodí cívku. Z toho také vychází maximální proud, který udává největší proud, který může procházet cívku.

## 1.4 Cívka v elektrickém obvodu

Rozlišujeme dva druhy elektrického obvodu, obvod stejnosměrný a střídavý. V obvodu stálého stejnosměrného proudu se cívka projevuje pouze svým elektrickým odporem. Kolem cívky se vytváří stálé magnetické pole. Magnetický indukční tok závisí přímo úměrně na indukčnosti cívky a velikosti proudu.

$$\Phi = LI, \quad (3)$$

kde  $L$  označuje indukčnost cívky. Indukčnost cívky a tím i magnetické pole je možno zesílit vložením jádra do cívky.

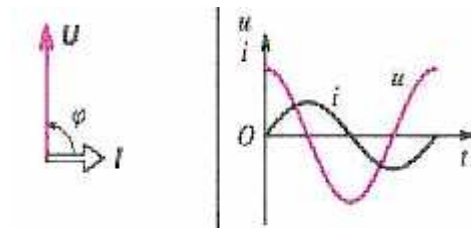
V obvodu střídavého proudu vzniká kolem cívky proměnné magnetické pole, které v cívce indukuje elektromotorické napětí. Indukované napětí působí vždy proti změnám, které je vyvolaly (Lenzův zákon), což má za následek vznik impedance, u cívky nazývané Induktance, tj. odpor cívky proti průchodu střídavého proudu. Induktance závisí přímo úměrně na indukčnosti cívky a frekvenci střídavého proudu,

$$X_L = \omega L \quad (4)$$

kde  $L$  je indukčnost cívky a  $\omega$  je úhlová frekvence,

$$\omega = 2\pi f \quad (5)$$

kde  $f$  je frekvence. Cívka rovněž způsobuje fázový posuv střídavého proudu oproti střídavému napětí o  $\frac{\pi}{2}$  neboli  $\frac{1}{4}$  periody.



Obr. 1: Fázový posuv proudu proti napětí

Proměnného magnetického pole kolem cívky se využívá také v transformátorech při transformaci střídavého elektrického proudu a napětí mezi dvěma obvody. Způsob a velikost transformace ovlivňuje poměr počtu závitů sekundární a primární cívky transformátoru.

## 1.5 Použití cívky

Cívku lze používat jako samostatnou součástku (elektromagnet, tlumivka) nebo jako součást složeného elektrického zařízení (elektromagnetické relé, transformátor, reproduktor). Cívka jako elektromagnet využívá magnetickou sílu magnetického pole kolem cívky v zařízeních jako např. elektromotor, zvonek, reproduktor, elektromagnetické relé, elektromagnetický jeřáb, vychylovací cívky v monitorech, zapisovací hlavičky v pevných discích, deprezské měřicí přístroje (galvanometr, ampérmetr, voltmetr, ad.) Výhodou elektromagnetu je to, že magnetické pole je dočasné, dá se snadno měnit jeho velikost, příp. směr.

Dále také lze cívku použít jako induktor, kde se využívá elektrické napětí indukované proměnným magnetickým polem kolem cívky. V obvodech může být použita jako tlumivka. Cívka působí proti prudkým změnám v elektrickém obvodu (např. zapnutí/vypnutí obvodu, elektrický výboj, ap.). Změny v elektrickém obvodu vyvolávají změnu magnetického pole kolem cívky a následně se v cívce indukuje elektromotorické napětí působící vždy proti změnám, které je vyvolaly. Dále jako transformátor, obsahuje dvě cívky na společném jádře. Změnou elektrického proudu (střídavým proudem) v jedné cívce se indukuje elektrický proud v druhé cívce, dochází k transformaci proudu a napětí. Také se používá v elektromagnetických oscilačních obvodech, cívka a kondenzátor jsou nezbytné součástky pro vznik elektromagnetických kmitů v obvodu (rezonanční LC obvody).

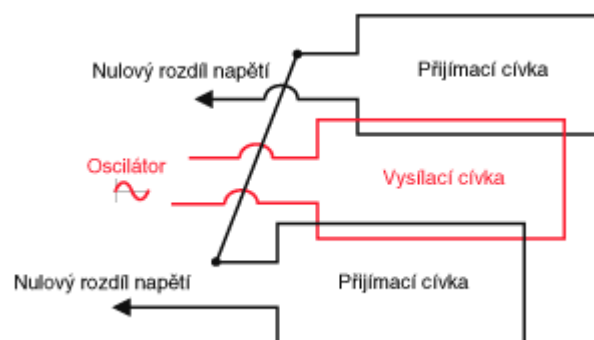
## **2 Základní principy detekce kovů**

### **2.1 Princip vyvažovaných cívek**

Princip vyvažovaných cívek je založen na principu ovlivňování siločar elektromagnetického pole kovem. Každý takový detekční systém obsahuje 3 cívky, které jsou umístěny ve snímacím senzoru vedle sebe. Prostor uvnitř cívek tvoří detekční otvor senzoru. Prostřední cívka je vysílač a krajní cívky fungují jako přijímače. Vysílač je buzen frekvencí s přesného oscilátoru, čímž vytváří elektromagnetické pole. Na přijímacích cívkách je v „klidovém“ stavu indukováno stejné napětí, avšak opačné polarity a součet tohoto napětí je roven nule. Tento stav přetrvává, pokud se v magnetickém poli cívek nenachází žádný kov. Jakmile je toto pole narušeno, narušení pole způsobuje kovová část nebo jakýkoliv vodivý materiál mající produkt efekt, dochází k deformaci pole a na přijímacích cívkách se objeví napětí, jehož výsledný vektor má amplitudu úměrnou velikosti kovu a fázi závislou na typu kovu, který tuto deformaci způsobil. Princip se někdy také označuje jako "2-kanálová detekce" a nastavením vyhodnocovací jednotky lze i určit, jaký druh kovu je detekován. Při průchodu kovu přes detekční senzor dojde k rozvážení stability mezi jednotlivými cívkami a vyhodnocovací jednotka tuto změnu vyhodnotí jako detekci kovu. Frekvence oscilátoru se volí s ohledem na produkt, ve kterém se má detekovat, a na požadovanou detekční citlivost. Obecně platí, že čím je větší frekvence, tím je vyšší citlivost.

Tento detekční princip dokáže vykompenzovat i produkt efekt. Standardně jsou cívky vyváženy tak, že mezi průběhy napětí na oscilátoru a na přijímačích je  $90^\circ$  fázový rozdíl. Tento stav je považován za základní nastavení a není zde zavedena žádná kompenzace produkt efektu. Při prvotní kalibraci senzoru se nechá detektorem procházet produkt ve kterém se má detekovat kov. Pokud tento produkt má produkt efekt, dojde opět podle výše uvedeného principu k vytvoření vektoru napětí s amplitudou a fází. Fázový posuv, který detektor v tomto případě vyhodnotí jako hodnotu při produkt efektu, se přičte nebo odečte od standardního fázového rozdílu. Tím dojde pomyslně k nastavení nového fázového posuvu mezi vysílačem a přijímači a tato hodnota je považována za nové pomyslné základní nastavení.

- Detekční princip, umožňující dosáhnout nejlepší citlivosti
- Kompenzuje produkt efekt
- Používají jej systémy DSP



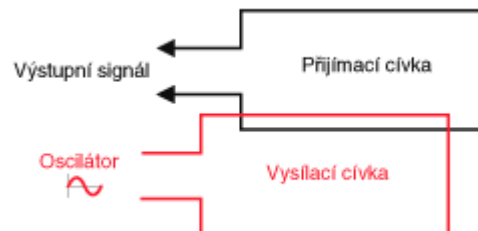
Obr. 2: Uspořádání cívek u principu vyvažovaných cívek

## 2.2 Princip laděné cívky

Princip laděné cívky je rovněž založen na principu ovlivňování elektromagnetického pole kovem. Každý takový systém obsahuje 2 cívky, které jsou umístěny ve snímacím senzoru vedle sebe. Jedna z cívek je vysílač, druhá funguje jako přijímač. Prostor uvnitř cívek tvoří detekční otvor senzoru. Vysílač je buzen konstantní frekvencí z přesného oscilátoru a vytváří elektromagnetické pole. Na přijímací cívce se v „klidovém“ stavu objeví naprosto stejný průběh jako na vysílači. Tento stav však platí pouze do chvíle, než se v elektromagnetickém poli objeví kov nebo jakýkoliv vodivý materiál mající

produkt efekt. V tomto případě se na přijímací cívkce objeví průběh napětí fázově posunutý, přičemž velikost fázového posuvu je úměrná velikosti a typu předmětu, který tuto změnu způsobil. Vyhodnocovací jednotka pak tyto posuvy vyhodnocuje jako detekci kovů. Frekvence oscilátoru se volí s ohledem na detekovaný materiál a na požadovanou citlivost. Princip laděné cívky neumožňuje vykompenzovat produkt efekt. Jeho použití je tedy možné pouze u těch materiálů, které produkt efekt nemají, např. plasty, dřevo, chemikálie, těstoviny aj..

- Detekční princip, umožňující dosáhnout velmi dobré citlivosti
- Nekompenzuje produkt efekt



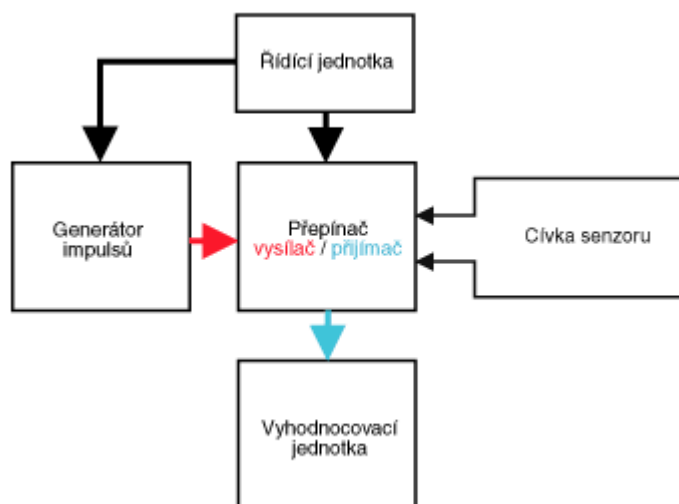
Obr. 3: Uspořádání cívek u principu laděné cívky

### 2.3 Princip pulsní indukce

Jedná se o velice progresivní metodu detekce kovů. Princip pulsní indukce je založen na principu analýzy odezvy elektromagnetických impulsů. Každý detekční systém, který pracuje na principu pulsní indukce, obsahuje minimálně 1 cívku, která funguje jako vysílač i jako přijímač. Hlavní rozdíl oproti jiným detekčním principům je ten, že cívka není buzena oscilátorem, ale je buzena stejnosměrným napětím. Nejprve cívka funguje jako vysílač, tj. na krátký časový okamžik se do ní přivede napětí, čímž se vygeneruje impuls elektromagnetického pole. Po uplynutí konstantního časového úseku se cívka přepne do režimu přijímače, tj. napětí se vypne a v tomto okamžiku se zkoumá doba přechodového děje na cívce. V případě, že se v elektromagnetickém poli cívky nevyskytne kov, je doba odezvy cívky velmi krátká. Jestliže se ale v něm kov nachází, je doba odezvy cívky delší a vyhodnocovací jednotka toto vyhodnotí jako přítomnost

kovu. Celý děj se periodicky opakuje. Řídící elektronika přepíná přijímač a vysílač 5000-krát za vteřinu. Tento detekční princip není ovlivňován produkt efektem. Díky této vlastnosti lze detektory pracující na tomto principu použít prakticky všude.

- Detekční princip, umožňující dosáhnout odpovídající citlivost v závislosti od aplikace
- Není ovlivňován produkt efektem
- Velmi malý požadavek na MFA



Obr. 4: Blokové schéma principu pulsní indukce

## 2.4 Metal Free Area

Aby detektor správně pracoval, musí se při jeho instalaci dodržet některé důležité zásady. Je třeba vybrat k instalaci takové místo, kde detektor nebude ovlivňován okolním kovem. Je zcela nepřijatelné, aby se uvnitř detekčního senzoru vyskytovaly jakékoliv kovy. Jelikož se elektromagnetické pole nešíří pouze do prostoru detektoru, ale i do prostoru okolo něj, je zapotřebí, aby se i v tomto okolí nenacházely žádné kovy, tj. existovala zóna bez kovu-MFA). Velikost této zóny je dána velikostí a typem detektoru. Pro každý detektor kovů je MFA jiná. Největší MFA potřebují systémy pracující na principu vyvažovaných cívek, nejmenší MFA pak systémy pracující na principu pulsní indukce.



## 2.5 Produkt efekt

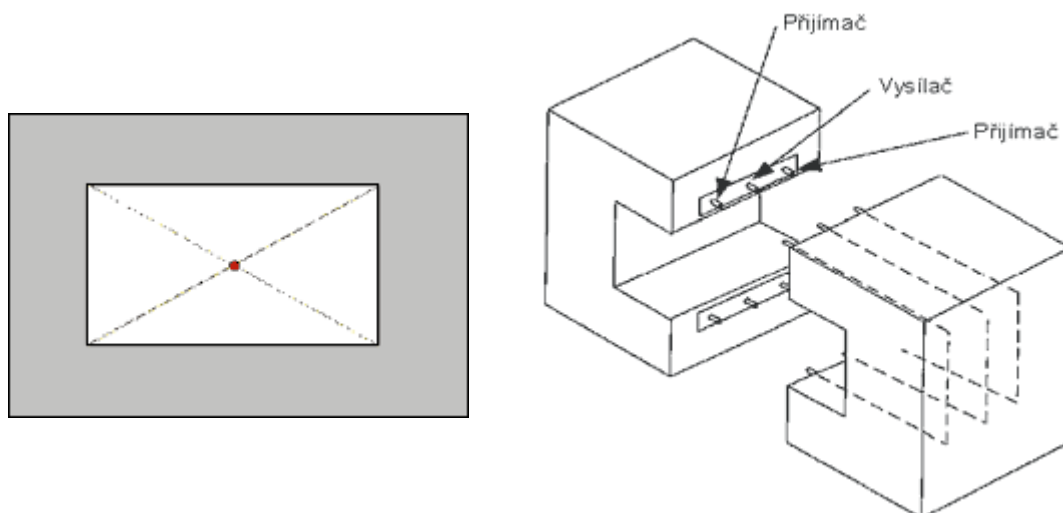
V některých produktech se detekce kovů provádí obtížně, což je způsobeno jejich složením. Jelikož všechny detekční principy jsou založeny na ovlivňování elektromagnetického pole a toto narušení může způsobit kromě kovové části také jakýkoliv vodivý materiál, je jasné, že může dojít k detekování kovu, když elektromagnetickým polem senzoru projde např. grafit nebo produkt s vysokým obsahem vody apod. Jestliže se v takovém produktu provádí detekce kovů, dochází k ovlivňování detektoru právě jeho složením a v extrémním případě, pokud je produkt-efekt příliš velký, není detekce vůbec možná. Detektor se v těchto případech chová tak, že signalizuje přítomnost kovu i když se v produktu žádný kov nevyskytuje.

Kompenzace produkt-efektu, jako nežádoucího jevu, je možná těmito způsoby:

- softwarovou úpravou signálu při jeho zpracování
- změnou pracovní frekvence vysílací cívky. Platí, že čím menší je pracovní frekvence, tím více se zvětšuje potlačení produkt-efektu a naopak.

## 2.6 Citlivost detektoru kovu

Citlivost se vždy udává v geometrické středu detekčního otvoru, což je nejslabší místo každého detektoru kovů. Každý detekční senzor si lze zjednodušeně představit jako 3 cívky řazené za sebou (z nichž prostřední pracuje jako vysílač a krajní jako přijímače) a prostor uvnitř cívek je detekční otvor, kterým prochází produkt. Směrem od geometrického středu detekčního otvoru k povrchu detektoru citlivost roste, dochází totiž k přibližování se k cívkám detektoru.



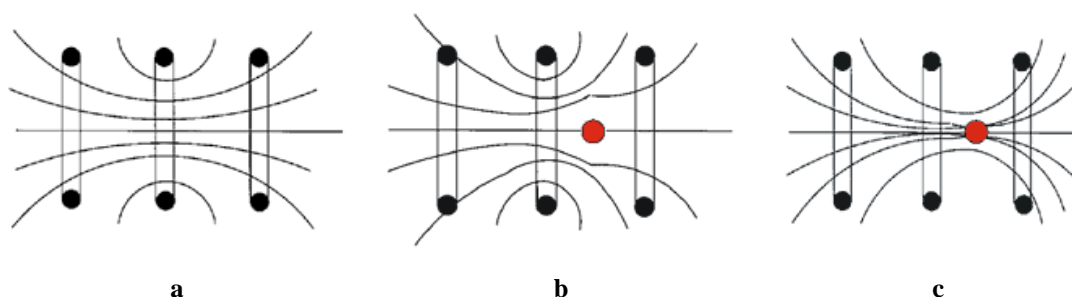
**Obr. 5: Určení nejslabšího místa detektoru**

Je také závislá na průřezu detekčního otvoru. Čím menší je průřez senzoru, tím lze dosáhnout větší citlivosti a naopak, čím větší je průřez senzoru, tím citlivost detektoru klesá. Neplatí však lineární závislost této změny!

Citlivost se udává ve jmenovitých velikostech (průměrech) kovové kuličky, kterou detektor „zachytí“ ve svém nejslabším místě. Kulička je v prostoru homogenní předmět, který při průchodu detektorem způsobí konstantní narušení elektromagnetického pole, nezávisle od svého natočení. Zatímco předmět jiného tvaru např. drátek, způsobí narušení pole jinou velikostí v závislosti na své vlastní poloze (natočení) při průchodu detektorem. V tomto případě by citlivost detektoru byla rovněž závislá od polohy (natočení) předmětu, který prochází detektorem. U kuličky, jako etalonu citlivosti, tato závislost není. Jakékoliv jiné udávání citlivosti, např. v gramech, je chybné a o skutečné citlivosti detektoru nic neříkající.

Musí být stanovena pro 3 druhy kovových předmětů - Fe, non-Fe, S/S. Jelikož každý detektor kovů pracuje na principu snímání odezvy magnetického pole, které je vytvořeno uvnitř detekčního senzoru, dochází průchodem kovového předmětu tímto polem k jeho deformaci. Jinak je pole deformováno feromagnetickým kovem (Fe), jinak neželezným kovem např.: hliníkem, mědí apod. (non-Fe) a jinak nemagnetickou nerezovou ocelí (S/S). Následující obrázky názorně ukazují deformaci siločar magnetického pole, uvnitř detekčního senzoru různým typem kovu. Největší citlivost je

dosažitelná pro železné kovy, pro neželezné kovy a nemagnetickou nerez je citlivost menší.



**Obr. 6: a) pole bez přítomnosti kovu, b) deformace feromagnetickým kovem, c) deformace neželezným kovem**

Je závislá na použité pracovní frekvenci detektoru. Platí, že čím větší je frekvence, tím lepší je detekční citlivost. Frekvence detektoru se volí dle charakteru testovaného produktu. Kompenzací „produkt-efektu“ dochází ke snižování citlivosti. Každý produkt procházející detekčním senzorem vyvolává tzv. „produkt efekt“. Jedná se o ovlivňování elektromagnetického pole senzoru samotným produktem a je tím větší, čím větší je v produktu např. obsah vody, solí, uhlíku apod. Nejlepších hodnot citlivostí lze dosáhnout u produktů jako jsou: čokoláda, sušenky, silně mražené zboží, textilní výrobky, farmaceutika a jiné, obecně suché či dehydrované produkty.

## 2.7 Amplitudová modulace

Amplitudová modulace se v technické diagnostice často vyskytuje, buď jako záměrné použitý princip při potlačování rušivých signálů nebo jako vlastnost některých signálů například ve vibrodiagnostice. Při amplitudové modulaci se mění amplituda nosného signálu podle časového průběhu signálu modulačního. V případě sinusového nosného signálu modulovaného opět sinusovým signálem vyjádříme jako

$$A = A_0(1 + a \cos(2\pi f_M t)), \quad (6)$$

kde  $a$  je hloubka modulace a  $f_M$  je kmitočet modulačního signálu,  $t$  e čas a  $A_0$  amplituda, má výsledný signál tvar

$$x(t) = A_0(1 + a \cos(2\pi f_M t)) \cos(2\pi f_N t), \quad (7)$$

kde  $f_N$  je kmitočet nosného signálu. Po úpravě obdržíme tvar

$$x(t) = A_0 \left[ \cos(2\pi f_N t) + \frac{a}{2} \cos(2\pi(f_N + f_M)) + \frac{a}{2} \cos(2\pi(f_N - f_M)) \right]. \quad (8)$$

Ze vztahu je zřejmé, že kromě frekvence nosné se ve spektru amplitudově modulovaného signálu objeví i dvě postraní frekvence vzdálené od nosné o frekvenci modulace na obě strany. V případě modulačního signálu, jehož spektrum leží mezi frekvencemi  $f_1$  a  $f_2$ , je výsledkem příslušné opakování tohoto spektra na obě strany kolem nosné frekvence. Pokud použijeme jako nosnou signál složený ze sinusovek různých frekvencí, obdržíme spektrum, které obsahuje spektra modulačního signálu kolem každé spektrální čáry nosného signálu. Amplitudová modulace je využívána pro potlačení rušivých signálů za pomoci fázově citlivé detekce (nebo-li také, jak je označována, koherentní detekce). Nejprve je užitečný signál amplitudově modulován, pak obvykle degradován šumem případně rušením a po snímání je opět modulován. Zařízení pro fázově citlivou detekci bývá označováno jako lock-in zesilovač. Jeho princip je založen na násobení vstupního signálu referenčním signálem a určování střední hodnoty tohoto součinu pomocí filtru typu dolní propust. Stejnoseměrná složka signálu vzniklého násobením referenčního signálu s jakoukoli složkou vstupního signálu, která má kmitočet odlišný (tj. rušení a šumy) od kmitočtu referenčního signálu, je nulová. Naopak stejnoseměrná složka výsledku násobení referenčního signálu a měřeného modulovaného signálu (který má stejný kmitočet jako referenční) je nenulová a je úměrná amplitudě měřeného signálu. Dolní propusti tedy poskytují na svém výstupu stejnoseměrnou složku úměrnou amplitudě měřeného signálu.

Pro určování možného fázového posuvu mezi vstupním a referenčním signálem je lock-in zesilovač vybaven druhou větví detekce s referenčním signálem posunutým o devadesát stupňů. Výsledek je obvykle k dispozici v komplexním tvaru v podobě reálné a imaginární části nebo častěji jako modul a fáze vstupního signálu. Signálový kanál lock-in zesilovače zahrnuje kmitočtové filtry mající za úkol potlačení šumu. Referenční kanál obvykle obsahuje samostatný oscilátor synchronizovaný vnějším signálem pomocí fázového závěsu.

### 3 Lock-in zesilovač

Lock-in zesilovač (LIA – z ang. Lock-In Amplifier) je měřicí přístroj, který je schopen měřit amplitudu velice malých střídavých napětí (řádově jednotky nV), které mohou být navíc pod úrovní šumu. Typické uspořádání LIA je naznačeno na obr. 7. LIA lze rozdělit na dvě základní části:

- a) signálový kanál – úprava vstupního signálu, filtrace rušivých „síťových kmitočtů“
- b) referenční kanál – obvod fázového závěsu, interní oscilátor a z něho odvozené dva referenční signály vzájemně fázově posunuté o  $\pi/2$ .

Předpokládejme, že na vstup LIA je připojen harmonický signál

$$U_{SIG} \sin(\omega_{SIG}t + \theta_{SIG}). \quad (9)$$

Vynásobením tohoto signálu referenčními signály

$$U_{REF} \sin(\omega_{REF}t + \theta_{REF}) \text{ a } U_{REF} \cos(\omega_{REF}t + \theta_{REF}) \quad (10)$$

dostaneme:

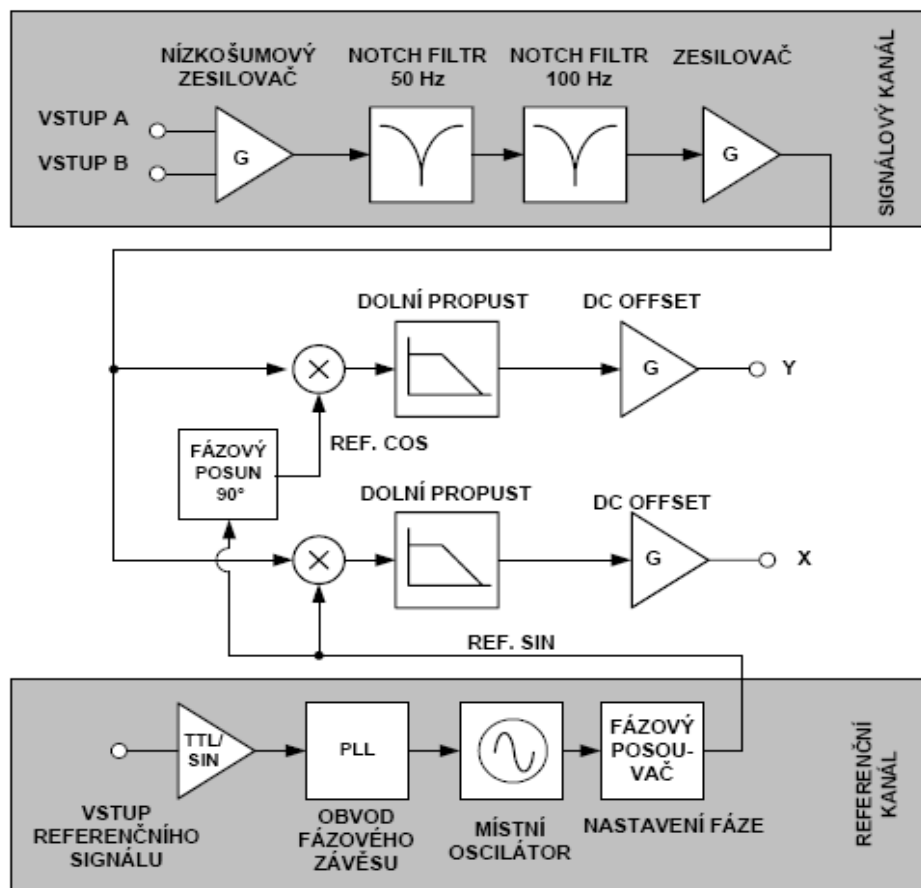
$$U_X = \frac{1}{2}U_{SIG}U_{REF} \cos[(\omega_{SIG} - \omega_{REF})t + \theta_{SIG} - \theta_{REF}] - \frac{1}{2}U_{SIG}U_{REF} \cos[(\omega_{SIG} + \omega_{REF})t + \theta_{SIG} + \theta_{REF}]$$

$$U_Y = \frac{1}{2}U_{SIG}U_{REF} \sin[(\omega_{SIG} + \omega_{REF})t + \theta_{SIG} + \theta_{REF}] + \frac{1}{2}U_{SIG}U_{REF} \sin[(\omega_{SIG} - \omega_{REF})t + \theta_{SIG} - \theta_{REF}]$$

Po filtraci součtové složky dolní propustí DP a pro  $\omega_{SIG} = \omega_{REF}$  se vztahy zjednoduší

$$U_X = \frac{1}{2}U_{SIG}U_{REF} \cos[\theta_{SIG} - \theta_{REF}]$$
$$U_Y = \frac{1}{2}U_{SIG}U_{REF} \sin[\theta_{SIG} - \theta_{REF}] \quad (11)$$

Je tedy zřejmé, že stejnosměrné napětí na výstupech obou DP odpovídá rozkladu vstupního vektoru napětí do kartézských souřadnic.



Obr. 7 vnitřní zapojení Lock-in zesilovače

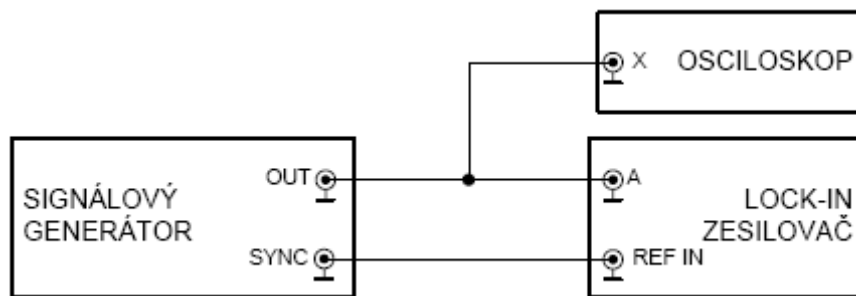
### 3.1 Proč použít LIA

Předpokládejme, že je nutné zesílit harmonický signál o frekvenci 10 kHz s amplitudou 10 nV. Uvažujeme nejprve případ, že bude pro zesílení tohoto signálu použit přesycený nízkošumový zesilovač, který má vstupní šum  $5\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ . Bude-li šířka pásma zesilovače 100 kHz a zesílení 1000, na výstupu zesilovače získáme tyto složky: zesílený vstupní signál o amplitudě  $10\text{ }\mu\text{V}$  ( $10\text{ nV} \times 1000$ ) a širokopásmový šum s amplitudou  $1,6\text{ mV}$  ( $5\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}} \times \sqrt{100\text{ kHz}} \times 1000$ ). Jiná situace bude v případě použití LIA. Předpokládejme, že výstupní filtr (DP) bude mít šířku pásma 0,01 Hz (což odpovídá přibližně časové konstantě 16 s). Při této šířce pásma bude šum dosahovat amplitudy jen  $0,5\text{ }\mu\text{V}$  ( $5\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}} \times \sqrt{0,01\text{ Hz}} \times 1000$ ), zatímco užitečný signál bude mít amplitudu stále  $10\text{ }\mu\text{V}$ .

## 3.2 Režimy použití LIA

### 3.2.1 Detekce vstupního signálu

V tomto režimu LIA slouží pro detekci signálů „utopených“ v šumu. Frekvence detekovaného signálu je shodná s frekvencí referenčního signálu. Amplituda detekovaného signálu závisí na velikosti dynamické rezervy LIA. Čím je dynamická rezerva větší, tím může být amplituda měřeného signálu menší



Obr. 8: Zapojení pro měření vstupního signálu

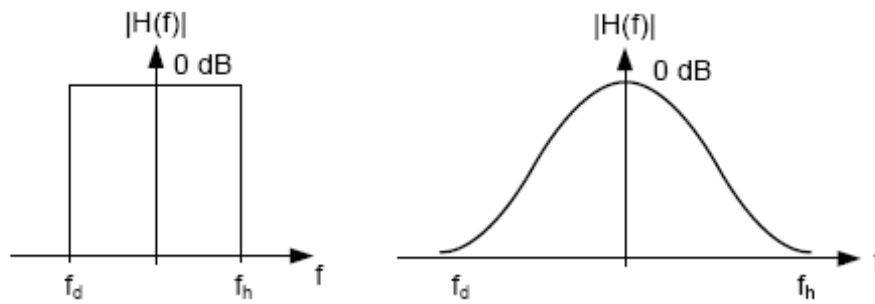
### 3.2.2 Měření vyšších harmonických

V tomto režimu LIA umožňuje díky obvodu PLL měřit amplitudu vyšších harmonických ve vstupním signálu. Pro měření  $n$ -té harmonické platí, že

$$f_{REF} = n \cdot f_{IN} \quad (12)$$

### 3.2.3 Měření šumových vlastností

V tomto režimu je použit vnitřní oscilátor LIA. Lze například měřit spektrální napěťovou hustotu, kterou lze definovat jako efektivní hodnotu šumového napětí vztáženou k frekvenčnímu pásmu o šířce 1 Hz. Vzhledem k tomu, že LIA se chová jako „selektivní voltmetr“ s nastavitelnou šířkou pásma (dáno použitým filtrem na výstupu násobiček), je nutné pro měření šumových vlastností zavést pojem tzv. ekvivalentní šířky šumového pásma (v angl. ENBW). V tab. 1 je uveden tento parametr ve vztahu pro daný typ dolní propusti LIA.



Graf 1: ENBW

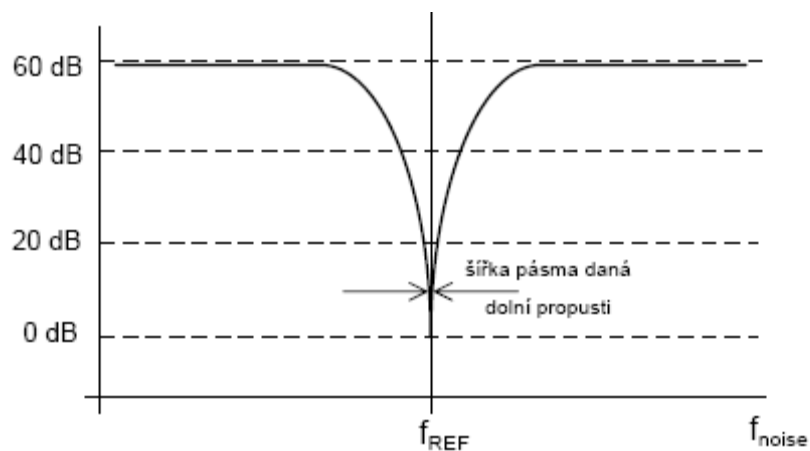
Tab. 1: Tabulka ENWB pro strmosti filtrů

Strmost filtru	ENBW	Doba ustálení
6 dB/oct	$1/(4T)$	$5T$
12 dB/oct	$1/(8T)$	$7T$
18 dB/oct	$3/(24T)$	$9T$
24 dB/oct	$5/(64T)$	$10T$

Jestliže použijeme například filtr se strmostí 6dB/oct s časovou konstantou  $T = 100$  ms, pak jeho ekvivalentní šířka pásma je 2.5 Hz.

### 3.3 Dynamická rezerva

Pojem dynamická rezerva je definován jako poměr vstupního šumu, při kterém ještě nedojde k překročení rozsahu, a použitého měřicího rozsahu. Například je-li dynamická rezerva 60 dB na rozsahu 1  $\mu$ V, znamená to, že maximální velikost (úroveň) šumu může být až 1 mV.



Graf 2: Dynamická rezerva



## 4 Praktická část

### 4.1 Seznámení se s detektorem

Hlavním úkolem bylo seznámit se s principy funkce detektorů kovu, které jsou v teoretické části popsány. Pro měření byl zakoupen detektor kovů TL-6001, s kterým se teď seznámíme. Vyznačuje se LCD displejem indikující šipkou pravděpodobný druh kovu, dále pak hloubku uložení vyhledaného předmětu. Dá se zde nastavovat i citlivost a provozní režim detektoru. Displej dále obsahuje stav použitých baterií pro napájení přístroje a specifikaci druhu hledaného kovu. Nalezneme zde akustickou indikaci vyjadřující druh kovu, ze kterého je vyhotoven vyhledávaný předmět a jeho přibližnou velikost. Výrobce také přístroj opatřil konektorem pro sluchátka. Samozřejmě k přístroji patří vodotěsná cívka, se kterou lze měřit i pod vodou.



Obr. 9: Sonda detektoru

Vyhledávací cívka a vyhodnocovací elektronika je dohromady propojena 6-ti pinovým standardním konektorem. Pro napájení detektoru jsou použity dvě destičkové baterie 9 V. Po se stavení a vložení baterií se začala testovat funkčnost detektoru v jednotlivých režimech. Jelikož kromě napájecího napětí, které by se mělo pohybovat kolem hodnoty 18 V, o parametrech nevíme nic. Proto bylo nutné změřit další parametry sondy (napětí, frekvence, fáze ...).

První problém je, jak změřit signál z řídicí elektroniky, který vede do cívky, aniž by se porušil kabel. Jelikož je pro připojení kabelu použit standardní 6-ti pinový konektor, je nutné vyrobit vlastní „prodlužovák“. Stačí si opatřit 2 konektory stejného typu a minimálně 15cm dlouhé vodiče na propojení jednotlivých pinů. Viz obr 10.



Obr. 10: „Prodlužovačka“

Části vodičů je potřeba odizolovat pro přiložení sond z osciloskopu a tím snadnější měření.

Poté je potřeba zjistit, které konektory jsou přes senzor propojeny a tvoří jednotlivé cívky. Pomocí multimetru se zjistí, že sonda obsahuje jednu cívku a to  $L = 6\Omega$ , vodiče této cívky je dobré si označit. Po tomto experimentu se detektor zapojí přes přípravek a zapne. Pomocí osciloskopu je nejsnazší zjistit parametry, bez detekování kovu:

$$U_{pp} = 16,8V$$
$$f = 6,579kHz$$

Naměřený signál byl sinusového charakteru. Viz. Příloha B.

Pro měření a zjišťování vlastností detektoru použijeme náhradního zapojení přístrojů, které odpovídá vnitřnímu zapojení ve vyhodnocovací elektronice. Jelikož detektor funguje na principu synchronní detekce a to tak, že umožňuje separovat i slabý signál v silném šumu např.:

- příjem signálu v radiotechnice
- zpracování signálu se silným rušením

Tato detekce, ale vyžaduje referenční signál s přesně danou frekvencí a fází. Synchronní detektor můžeme použít tam, kde přesně známe frekvenci a fázi signálu. Např. tam, kde je k dispozici budící signál experimentu, nebo tam, kde signál před zpracováním modulujeme přesně známou frekvencí. Proto pro detekci použijeme již výše zmiňovaný Lock-in zesilovač a jeho funkci synchronní detekce. Obr. 11.

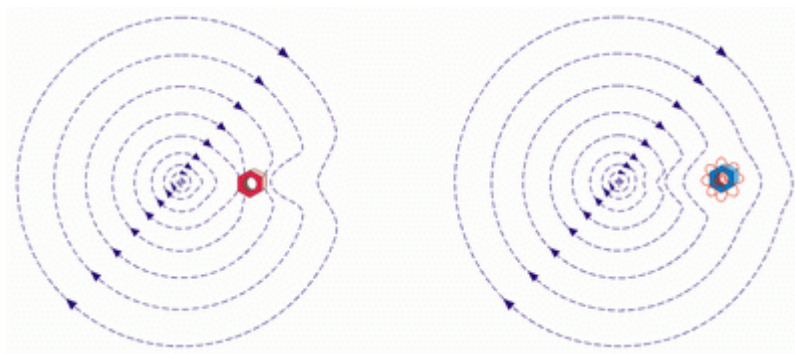


Obr. 11: Lock-in zesilovač (dole), digitální multimetr (nahore)

## 4.2 Problémy při detekci

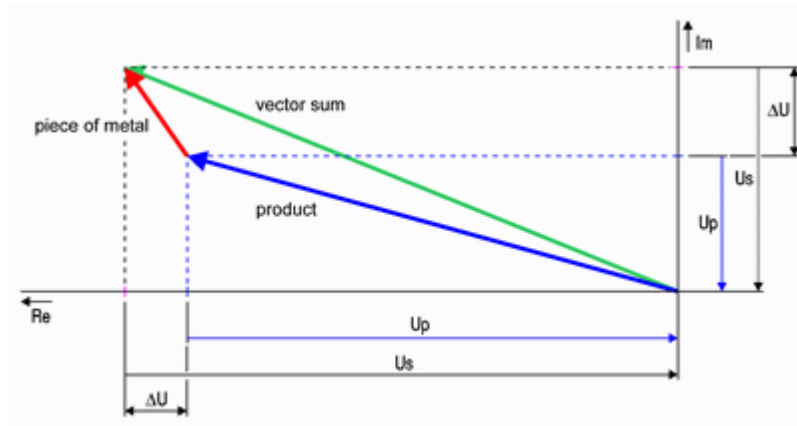
Železné předměty a jiné feromagnetické materiály (např. magnetická ocel VA 1.4034) deformují (do sebe koncentrují) siločáry magnetického pole v dutině cívky. Ve výsledku způsobují nehomogenity generovaného pole, což se projeví deformací

generovaného pole. Tento jev se označuje jako reaktivní. Naopak diamagnetické a paramagnetické kovy, jako například nerezová ocel jiné neferomagnetické materiály, odpuzují magnetické siločáry a naopak proměnné pole, vyvolané vysílací cívkou, v nich indukuje napětí. V závislosti na jeho elektrické vodivosti pak i elektrické proudy, tzv. vířivé proudy (eddy-current), které podle Lenzova pravidla generují vlastní magnetické pole. Každá taková kovová částice tak vytváří vlastní magnetické pole ve svém okolí, které se odpuzuje vnějším pole. To opět způsobuje nehomogenitu v místě výskytu kovu. Protože v tomto případě dochází k odběru energie z excitovaného systému, označuje se tento efekt jako rezistivní - viz obr. 12.



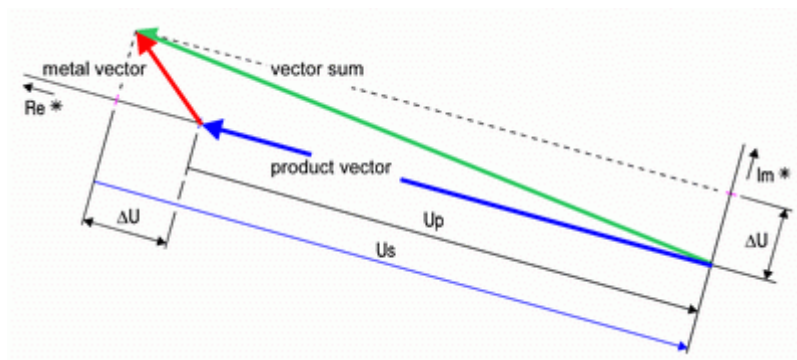
**Obr. 12: Ovlivňování siločar materiálem**

Na kontaktech vysílací cívky tak vzniká a měří se napětí - napěťový signál vzniklé deformací magnetického pole uvnitř dutiny cívky. Amplituda a fáze tohoto signálu je úměrná právě velikosti přítomného kovového prvku. Bohužel celkový fázor napětí (vector sum) fázorového diagramu neodpovídá jen samotnému detekovanému kovu, ale i tzv. efektu produktu. Různé nekovové materiály totiž nejsou úplně nevodivé a nemagnetické, ale více či méně vedou elektrický proud. Mezi nejznámější produkty s velkým efektem produktu například patří hořká čokoláda, guma, uhlí apod. I když je tato vlastnost mnohokrát nižší než u kovů, velké množství tohoto produktu může generovat stejně nebo větší signál na přijímací cívkce než samotné hledané "zrnko" kovu - viz obr. 13. Takový vliv testovaného produktu se pak označuje jako "velký efekt produktu".



**Obr. 13: Fázorový diagram při detekci product efektu**

Aby bylo možné i za tohoto stavu detekovat kov obsažený v produktu, je nutné provést fázovou kompenzaci efektu produktu - viz obr. 14. Ta se provádí postupnou změnou fáze na ovládacím rozhraní vyhodnocovací elektroniky během seřizování kovodetektoru na konkrétní druhy testovaných produktů. Nejlépe vyhovující hodnota fáze je pak uložena pro každý produkt do paměti přístroje. Dojde tak k eliminaci imaginární složky (Im) fázoru napětí produktu (product vector) ve fázorovém digramu - viz obr. 14. Zvýrazní se tak imagimární složka fázoru od hledaného kovu (metal vector) -  $\Delta U$  na ose Im, který je tak již možné detekovat.



**Obr. 14: Kompenzace produkt-efektu**

V případech, kdy je efekt produktu příliš velký a podobný efektu kovu, tzn. že se nedá již vykompenzovat, je možné situaci řešit jinou volbou frekvence napětí vysílací cívky nebo je nutné se spokojit s nižší citlivostí detektoru. Ve většině případech to není na překážku.

### 4.3 Vlastní měření

Pro praktické měření je použito různých tvarů a velikostí feromagnetických materiálů, jímž byly:

- desetikorunová mince: průměr 24,5 mm, váha 7,62 g a složení Fe/Cu-Cu.
- standardní kombinačky: délka 160 mm, složení Fe
- šroubky 5ks: 5x10 mm, materiál Fe
- profil tvaru L: rozměr 115x35x3 mm
- klubko cínu:  $\varnothing$  0,7 mm, váha 300g



**Obr. 15: Použité vzorky**

Jelikož Lock-in měří rozdíl naměřeného signálu od referenčního, v tabulce jsou rozdílové hodnoty. V měření je také zahrnut fakt, že při detekci kovů, nemusí být vždy prostor mezi materiálem vzduch a tak se může vložit před měřicí cívku dřevěnou desku s rozměry 600x600x30 mm a tím simulovat překážku v měřeném směru. Výsledky jsou opět zaznamenány do tabulky. Tabulka je přiložena v Příloze A.

Z naměřených výsledků lze vyvodit několik teorií ohledně měření. Jak je vidět tak detekce předmětu závisí i na jeho poloze viz. měření s klubkem drátu cínu navinutého na umělohmotném náboji. Zde jde o to, že při nejbližší možné vzdálenosti k cívce, je stále  $\frac{1}{2}$  předmětu nad detektorem a tím deformuje více magnetické pole. Z toho vyplývá, že magnetické pole není ve všech místech stejně rozvržené. Z naměřených hodnot lze zjistit, že nejlepší detekce byla při vzdálenosti předmětu 5 cm. Blíže k předmětu se už tolik elektromagnetické pole nedeformovalo a tím byla vyvolána i menší změna napětí. Se zvětšující se vzdáleností se síla elektromagnetického pole zmenšuje a tím také úbytky napětí viz tabulka 2. Dále také záleží na velikosti detekovaného materiálu a v neposlední řadě i na konkrétním druhu materiálu. Záleží na příměsi Fe. Velikost lze pozorovat na rozdílech mezi detekcí malých šroubků a poměrně větších kleští. Další hodnoty měření při přiložené překážce nám dokazují, že na výsledcích měření kromě materiálu záleží také na homogenitě prostředí. Pokud se v cestě elektromagnetického pole objeví neferomagnetický materiál, značně se zmenší detekční vzdálenost a materiál je hůře detekovatelný.

## Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo seznámit se s základními principy detektorů kovů, s principy vyhodnocování signálů v těchto přístrojích a s nejběžnějšími konstrukčními provedeními sond.

Důležitým težištěm bylo laboratorní měření a experimenty ověřující rozlišovací schopnosti, citlivost a další parametry sond. V první fázi bylo nutné se teoreticky seznámit s problematikou detektorů, s jejich nejběžnějšími zapojeními. To vedlo na pochopení funkce detektoru a tím se mohlo přistoupit k vyhodnocování signálu a jeho měření. Pro měření byl vybrán Lock-in zesilovač a jeho funkce synchronní detekce

Detekce materiálu je zatížena chybou, kterou způsobují neferomagnetické materiály, které deformují elektromagnetické pole a sonda detekuje tuto změnu jako vstup feromagnetického materiálu. Toto lze vykompenzovat zmenšením vysílané frekvence na budící cívce. Bohužel se i s tímto zmenší citlivost detektoru, která nám občas nevádí.

Indukční snímače se dají používat i v jiných jiných odvětvích než je potravinářství nebo lehký a těžký průmysl. Další a významné využití mají jako detektory aut před křižovatkou, která je světelně řízená. Pro toto řízení se používají detektory zabudované pod silnicí, které dodávají potřebné informace do vyhodnocovací elektroniky.

Je zde několik důvodů pro úspěch indukčních snímačů v budoucnu. Cívka jako základní prvek snímače je cenově příznivá a spolehlivá, snímače jsou extrémně odolné a snadno použitelné v různých průmyslových aplikacích. Znečištění a další nepříznivé okolní vlivy stěží někdy ovlivní jejich funkci. Tyto vlastnosti odlišují indukční snímače od jiných typů snímačů. Počet vyrobených a prodaných kusů každým rokem prudce stoupá. V zásadě to je pouze přeměna fyzikálních jevů na elektrické. Cívka jako základní prvek předurčuje indukční snímač jako dokonalé zařízení pro bezkontaktní snímání přiblížení a určení pozice. Dokud budou stroje a zařízení konstruovány převážně z kovových materiálů je pokračující úspěch indukčních snímačů zaručen.



## Seznam použité literatury

- [1] BESIER, A.: *Úvod do moderní fyziky*. Academia, Praha, 1978.
- [2] KEIDL, M. – ŠMÍD, R.: *Technická diagnostika*. Technická literatura – BEN, Praha 2006. ISBN 80-7300-158-6.
- [3] LÁNÍČEK, R.: *Elektronika, obvody součástky, děje*. BEN – Technická literatura, Praha, 1998.
- [4] NOVOTNÝ, K.: *Teorie elektromagnetického pole I*. Vydavatelství ČVUT, Praha 2000.
- [5] SINGULE, V. – NOSEK, J.: *Elektrické měření neelektrických veličin*. Ediční středisko VUT, Brno, 1989.
- [6] UHLÍŘ, I. A KOLEKTIV.: *Elektronika*. Vydavatelství ČVUT, Praha, 1997.
- [7] VLČEK, J.: *Základy elektrotechniky*. 3. opravné a doplňkové vydání, BEN – Technická literatura, Praha, 2006.
- [8] VOBECKÝ, J. – ZÁHLAVA, V.: *Elektronika – součástky a obvody, principy a příklady*. GRADA Publisting, Praha, 2001.
- [9] Detektory kovů, rentgenové systémy, kontrolní váhy [cit 2009-01-05] z URL: <http://www.adcontrols.cz/>>

## Příloha A

Tab. 2: Tabulka naměřených hodnot

Mince

l [cm]	18	16	14	12	10	8	6
U [mV]	2	2	3	4	6	8	9
l [cm]	5	4	3	2	1	0	
U [mV]	11	13	12	11	10	8	

Profil „L“

l [cm]	33	30	25	20	18	16	14
U [mV]	1	1	2	3	3	4	4
l [cm]	12	10	9	8	7	6	5
U [mV]	8	16	24	35	44	56	62
l [cm]	4	3	2	1	0		
U [mV]	66	58	55	50	42		

Kleště

l [cm]	20	18	16	14	12	10	8
U [mV]	1	1	2	4	7	11	13
l [cm]	7	6	5	4	2	1	0
U [mV]	15	17	22	21	20	20	20

Šroubky

l [cm]	14	12	10	8	6	5	4
U [mV]	1	1	2	2	3	5	5
l [cm]	3	2	1	0			
U [mV]	3	2	2	1			

Klubko - materiál se nacházel ve svislé poloze |

l [cm]	12	11	10	9	8	7	6
U [mV]	1	2	5	8	11	13	17
l [cm]	5	4	3	2	1		
U [mV]	19	19	20	21	22		

Klubko - materiál se nacházel ve vodorovné poloze -

l [cm]	11	10	9	8	7	6	5
U [mV]	1	5	8	11	11	12	13
l [cm]	4	3	2	1			
U [mV]	7	5	3	1			

Vzdálenost je určována od dřevěné desky

Měření s dřevěnou překážkou

Mince

l [cm]	10	8	6	4	2	1	0
U [mV]	1	1	2	3	3	2	2

Profil „L“

l [cm]	29	25	20	15	10	9	8
U [mV]	1	1	2	3	9	11	16
l [cm]	7	6	5	4	3	2	1
U [mV]	22	28	32	30	28	23	19

Kleště

l [cm]	17	15	12	10	9	8	7
U [mV]	1	2	3	4	5	7	12
l [cm]	6	5	4	3	2	1	
U [mV]	15	20	20	18	15	10	

Šroubky

l [cm]	10	8	6	4	2	1	0
U [mV]	1	1	2	3	2	1	1

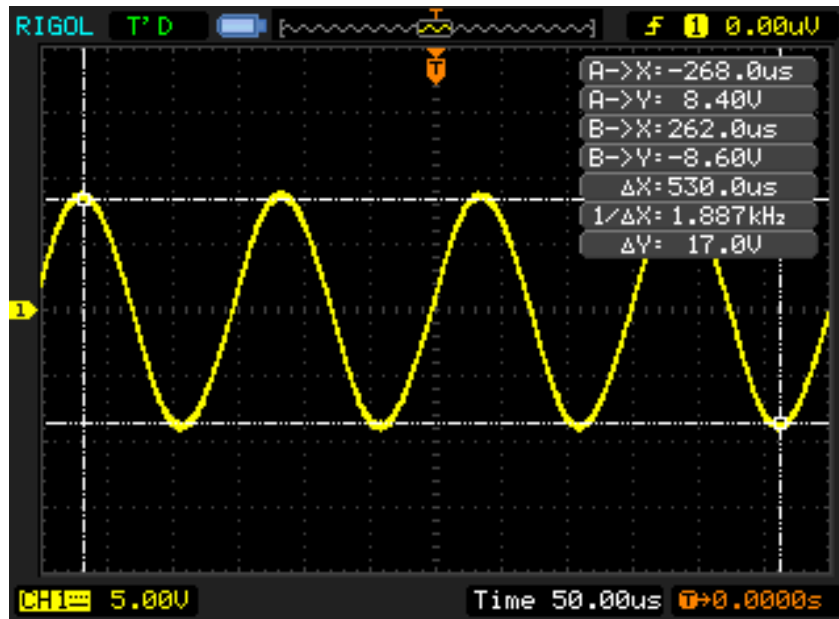
Klubko - materiál se nacházel ve svislé poloze |

l [cm]	10	9	8	7	6	5	4
U [mV]	1	3	5	9	12	18	19
l [cm]	3	2	1	0			
U [mV]	22	23	25	26			

Klubko - materiál se nacházel ve vodorovné poloze -

l [cm]	8	7	6	5	4	3	2
U [mV]	1	3	3	4	4	4	4
l [cm]	1	0					
U [mV]	5	5					

## Příloha B



Obr.16: Tvar a charakteristika vysílaného signálu