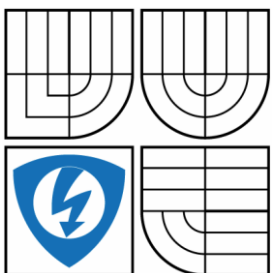


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

## KONTINUÁLNE MERANIE VODIVOSTI VYRÁBANÉHO MEDENÉHO VODIČA

CONTINUOUS MEASUREMENT OF CONDUCTIVITY PRODUCED COOPER WIRE

BAKALÁRSKA PRÁCA

*BACHELOR'S THESIS*

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Peter Kozáček

VEDÚCI PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Stanislav Klusáček, Ph.D.

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
Automatizační a měřicí technika

**Student:** Peter Kozáček  
**Ročník:** 3

**ID:** 136548  
**Akademický rok:** 2012/13

**NÁZEV TÉMATU:**

## Kontinuální měření konduktivity vyráběného měděného vodiče

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Proveďte rešerši metod měření konduktivity vodičů s ohledem na možné využití pro kontinuální měření při provlékání vodiče. Vyberte/navrhněte vhodné metody a rozpracujte je tak, aby byly využitelné pro měření konduktivity vodičů vyráběných provlékáním. Následně navrhněte postup/metodu, která upozorní na nedodržení zadané meze minimální přípustné konduktivity vodiče. Vybrané metody experimentálně ověřte a porovnejte výsledky. Práce bude realizována ve spolupráci s UTEE VUT v Brně.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Senzory v průmyslové praxi, Radislav Martinek : BEN - technická literatura, 2004. 199 s. ISBN 9788073001148.  
[2] Elektronika, M.Frohn a kol. : BEN - technická literatura, 2006. 479 s. ISBN 8073001233.

Dle zadání vedoucího a konzultanta práce.

**Termín zadání:** 11.2.2013

**Termín odevzdání:** 27.5.2013

**Vedoucí práce:** Ing. Stanislav Klusáček, Ph.D.

**Konzultanti bakalářské práce:** Ing. Martin Friedl

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.  
předseda oborové rady



### UPOZORNĚNÍ:

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

## **Abstrakt**

Moja práca pojednáva o možnostiach merania vodivosti medeného vodiča. Rozoberám v nej základné spôsoby merania vodivosti a ich možnosti využitia pre kontinuálne meranie. V ďalšej časti práce sa zmeriavam na navrhnutie metódy, ktorá by bola najvhodnejšia pre kontinuálne meranie vodivosti. Jednotlivé metódy vychádzajú zo základných fyzikálnych princípov. Dané metódy merania v závere porovnávam z rôznych aspektov dôležitých v priemysle.

## **Klíúčové slová**

Vodivosť, odpor, magnetická indukcia, vírivé prúdy

## **Abstract**

My project is about possibilities of conductivity measurement of copper wire. I focus on basic principles of conductivity measurement and their applicability for continuous measurement. Also I focus on proposing methods which would be the most appropriate for continuing measurement of conductivity. Each individual method is based on basic physics principles. I compare these measurement methods from different important industrial points of view in this project.

## **Key words**

Conductivity, resistance, magnetic induction, eddy currents

### **Bibliografická citácia:**

Kozáček P., Kontinuálne meranie vodivosti vyrábaného medeného vodiča. Brno: Vysoké učení technické v Brne, Fakulta elektrotechniky a komunikačných technológií, 2013. 39s.  
Vedúci bakalárskej práce bol Ing. Stanislav Klusáček, Ph.D.

## **Prohlášení**

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Kontinuálne meranie vodivosti vyrábaného medeného vodiča jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 25. května 2013

.....  
podpis autora

# Obsah

|   |    |
|---|----|
| 1. Úvod.....  | 7  |
| 2. Teoretický rozbor .....  | 8  |
| 2.1 Elektrický odpor, vodivosť.....                               | 8  |
| 2.2 Základné pojmy merania .....                                  | 10 |
| 2.3 Meranie odporu .....  | 12 |
| 2.4 Meď .....   | 14 |
| 2.5 Cievka .....  | 15 |
| 2.5.1 Impedancia .....  | 15 |
| 3. Návrh meracej metódy .....                                     | 17 |
| 3.1 Kelvinova metóda.....   | 17 |
| 3.2 Synchronna detekcia .....                                     | 17 |
| 3.3 Využitie magnetickej indukcie.....                            | 19 |
| 3.4 Heydweillerov most .....                                      | 21 |
| 3.5 Metóda vírivých prúdov .....                                  | 22 |
| 3.5.1 Metóda s prechádzajúcou cievkou.....                        | 23 |
| 3.5.2 Metóda s príložnou cievkou .....                            | 24 |
| 3.6 Zariadenie pre bezkontaktné meranie elektrického odporu ..... | 25 |
| 3.6.1 Výpočet Q faktora.....                                      | 26 |
| 3.7 Ultrazvuková metóda .....                                     | 27 |
| 4. Realizácia meracej metódy.....                                 | 28 |
| 4.1 Použitie Kelvinovej metódy.....                               | 28 |
| 4.2 Testovanie vírivými prúdmi.....                               | 31 |
| 4.2.1 Výpočet cievok.....   | 33 |
| 4.2.1 Meranie.....  | 34 |
| 4.3 Vplyv teploty .....   | 37 |
| 5. Záver.....   | 38 |
| Príloha A – Agilent 34420A .....                                  | 40 |
| Príloha B – Rýchlosti ultrazvuku.....                             | 41 |

|                                    |    |
|------------------------------------|----|
| Príloha C – Zapojenie s AD630..... | 42 |
| Príloha D – NI USB 6008.....       | 43 |
| Použitá literatúra .....           | 45 |



# 1. Úvod

Pri výrobe medeného vodiča sa najväčším problémom stáva určenie a dodržanie danej (stanovenej) vodivosti pre danú hrúbku. Metódy, ktoré sa vo väčšine závodov používajú, sú buď nepresné alebo spomaľujú výrobu. Napríklad potreba prerušenia výroby na určitý čas kvôli získaniu vzorky vodiča a jeho následné meranie. Aj keď je zistená veľká odchýlka voči požadovanej hodnote, už je v podstate neskoro. Našou úlohou je vytvorenie metódy (systému) merania, pomocou ktorej by sme danú výrobu zefektívnila a zautomatizovali.

Požiadavky firmy sú nasledovné :

- čo najpresnejšie meranie
- Merať kontinuálne (ak to bude možné)
- Automatizované meranie
- Vizualizačný výstup

Daný projekt je robený pre firmu Draka Kably, s.r.o. v spolupráci s ústavom Teoretickej a experimentálnej elektrotechniky v Brně , FEKT VUT.

## 2. Teoretický rozbor

### 2.1 Elektrický odpor, vodivosť

Odpor  $R$  je vlastnosť elektrickej súčiastky, rezistora, ktorá obmedzuje tok elektrického prúdu. Energia využitá ako elektrické napätie, ktoré spôsobuje, že súčiastkou preteká elektrický prúd, sa prejaví vo forme tepla, ktoré v nej vzniká. Odpor meriame v ohmoch, značkou jednotky je grécke písmeno omega ( $\Omega$ ). [3]

Elektrický odpor je fyzikálna veličina, ktorá vyjadruje schopnosť materiálu zabraňovať prechodu elektricky nabitých častíc. Je definovaný ako podiel napätia a prúdu prechádzajúceho predmetom následkom tohto napätia.

$$R = \frac{U}{I} \quad [\Omega] \quad (1.0)$$

Ohmov zákon pre časť elektrického vodiča: elektrický prúd pretekajúci vodičom je priamo úmerný rozdielu elektrických napätí na koncoch vodiča a nepriamo úmerný elektrickému odporu vodiča:

$$I = \frac{U}{R} \quad [A] \quad (1.1)$$

Merný elektrický odpor  $\rho$  alebo rezistivita alebo špecifický elektrický odpor je fyzikálna veličina, vyjadrujúca elektrický odpor vodiča dĺžky 1 m o priereze 1 m<sup>2</sup>. Merný elektrický odpor je materiálová konštanta, charakterizujúca elektrickú vodivosť látky. Čím väčší je merný elektrický odpor, tým menšia je vodivosť danej látky. [3]

Základná jednotka merného elektrického odporu je [ $\Omega \cdot \text{m}^2 \cdot \text{m}^{-1}$ ] (ohmmeter štvorcový/meter), po vykrátení [ $\Omega \cdot \text{m}$ ] a určuje ho vzťah:

$$\rho = \frac{RS}{l} \quad [\Omega/\text{m}] \quad (1.2)$$

kde  $R$  je elektrický odpor vodiča [ $\Omega$ ],  $S$  je obsah kolmého prierezu [ $\text{m}^2$ ] a  $l$  je dĺžka vodiča [ $\text{m}$ ].

Závislosť merného elektrického odporu na teplote určuje vzťah:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha\Delta t) \quad [\Omega/\text{m}] \quad (1.3)$$

kde  $\rho_0$  je počiatočný merný odpor,  $\Delta t$  je rozdiel teplôt a  $\alpha$  je teplotný súčiniteľ elektrického odporu.

Prevrátená hodnota merného elektrického odporu je merná elektrická vodivosť (konduktivita):

$$\gamma = \frac{1}{\rho} \quad [\text{S/m}] \quad (1.4)$$

AK poznáme dĺžku, prierez a merný elektrický odpor vodiča z homogénneho materiálu, jeho odpor vypočítame zo vzťahu:

$$R = \rho \frac{l}{s} \quad [\Omega] \quad (1.5)$$

$l$  – dĺžka vodiča (m)

$s$  – prierez vodiča ( $\text{m}^2$ )

$\rho$  – merná vodivosť ( $\Omega/\text{m}^2$ )

## 2.2 Základné pojmy merania

Meraním rozumieme súbor činností, ktorých je cieľom stanoviť hodnotu danej veličiny. Do merania zahrňame experimentálne postupy a rôzne výpočty.

Meracia metóda je logická postupnosť všeobecne opísaných operácii použitých pri uskutočňovaní merania[3].

Rozdelenie meracích metód[3]:

1. Priame a nepriame :

- **priame** - vychádzajú z definície meranej fyzikálnej veličiny
- **nepriame** – sa hodnota meranej veličiny sa získa meraním iných veličín funkčne viazaných na danú veličinu

2. Absolútne a relatívne :

- **absolútne** - poskytujú priamo meranú číselnú hodnotu meranej veličiny
- **relatívne** - udávajú podiel dvoch veličín toho istého druhu, pričom hodnota jednej z porovnávaných veličín musí byť známa

3. Kontaktné a bezkontaktné :

- **kontaktné** - s meranou veličinou(objektom) máme priamy kontakt
- **bezkontaktné** - s meranou veličinou(objektom) nemáme priamy kontakt

Hodnotu meranej veličiny získanej pri meraní nemôžeme určiť s absolútnou presnosťou. Nameraná hodnota je buď menšia alebo väčšia, ako skutočná hodnota - hovoríme o chybe merania.

Podľa spôsobu výskytu rozdeľujeme chyby na[3]:

- **Systematické (Sústavné) chyby** - sú zapríčinené nepresnosťou meracieho prístroja a použitej meracej metódy. Ich veľkosť je zvyčajne známa. Preto sa dajú účinne eliminovať korekciou výsledku.
- **Náhodné chyby** - vznikajú z náhodných príčin, občas - nepravidelne. Sú zvyčajne zapríčinené vonkajšími vplyvmi, napr. vplyvom zmeny teploty a pod.
- **Hrubé chyby** - vznikajú nepozornosťou - nesprávnym odčítaním z prístroja, zlým zápisom do tabuľky hodnôt a pod.

Podľa spôsobu vyjadrenia sa chyby rozdeľujú na:

- Absolútne chyby
- Relatívne chyby

Absolútna chyba merania - je algebrický rozdiel medzi výsledkom merania a konvenčne pravou hodnotou meranej veličiny. Má rovnakú jednotku ako meraná veličina, môže mať aj zápornú hodnotu.

Relatívna chyba merania - je podiel absolútnej chyby merania a konvenčne pravej hodnoty meranej veličiny. Je to len číslo resp. hodnota v percentách, má kladnú hodnotu.

Chyby meracích prístrojov - patria medzi sústavné chyby. Pôvod majú v konštrukcii prístrojov alebo v konečnom delení stupnice. Určujeme pri nich presnosť meracieho prístroja (maximálna dovolená odchýlka meracieho zariadenia).

Chyby meracích prístrojov :

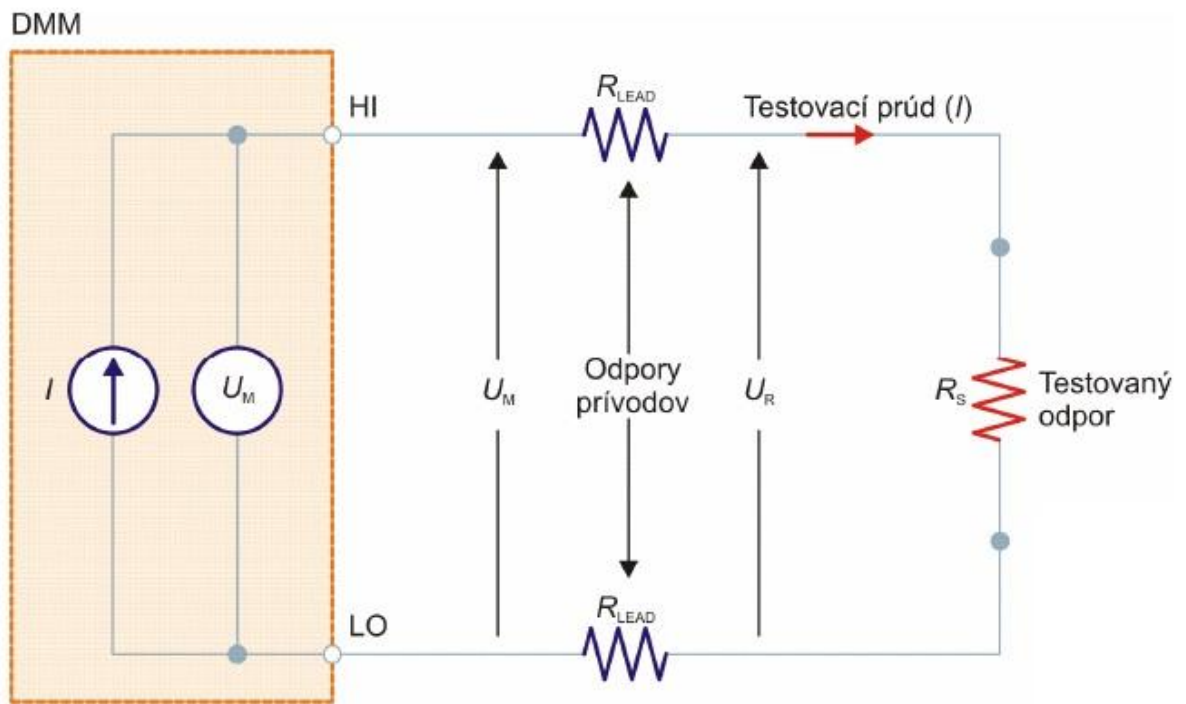
a) z triedy presnosti - je číselná hodnota, ktorá udáva, že chyba (neistota) merania je menšia ako  $p$  (%) hodnoty zodpovedajúcej celej stupnici v danom rozsahu prístroja

b) z hodnoty najmenšieho dielika - pri chybe merania vznikajúcej z konečného delenia stupnice prístroja

## 2.3 Meranie odporu

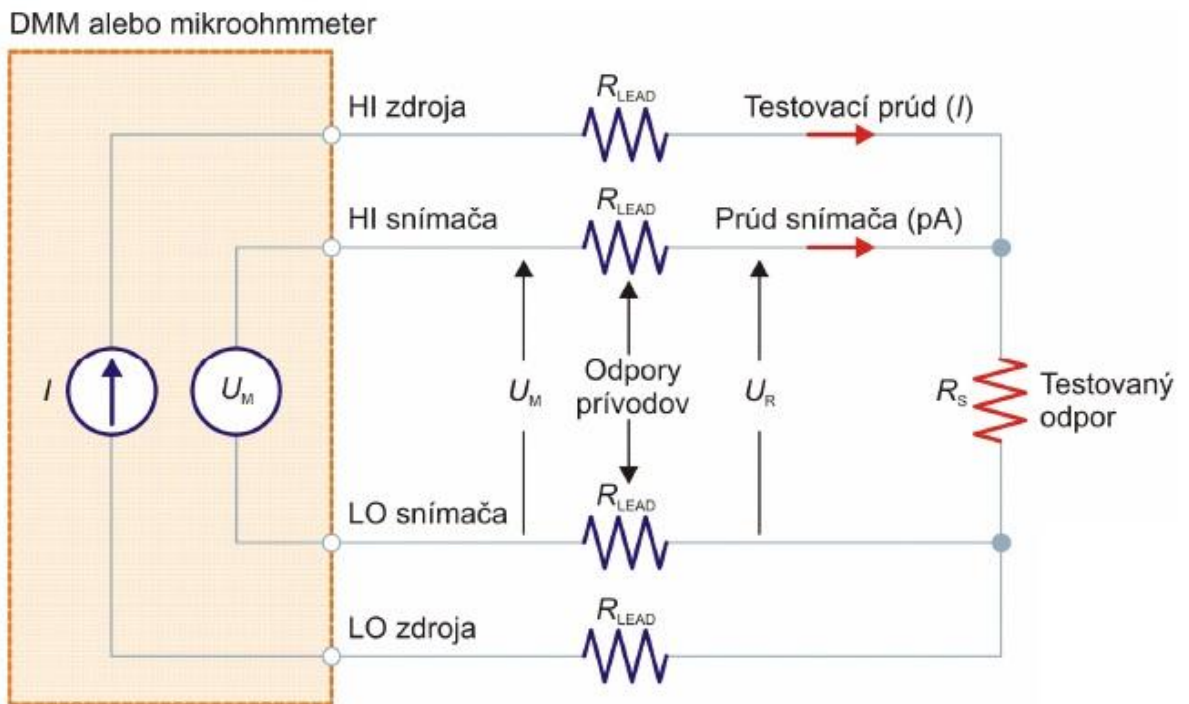
Na meranie hodnôt elektrických odporov sa používajú ohmmetre. Využívajú elektromechanické princípy (elektrostatické, elektrodynamické, elektromagnetické a elektrotermálne ohmmetre) prípadne elektronické princípy.

Na merania odporu v obvyklom rozsahu  $>10 \Omega$  sa všeobecne používa dvojvodičová metóda (obr. 1). Testovací prúd preteká zo zdroja cez testovacie prívody a testovaný rezistor  $R_s$ . Číslcový multimeter meria napätie  $U_M$  vznikajúce na rezistore  $R_s$  a na dvoch prívodoch  $R_{LEAD}$ . Pretože testovací prúd  $I$  spôsobuje síce malý, ale na presné meranie dostatočne významný napäťový úbytok na prívodných vodičoch, merané napätie  $U_M$  sa nezhoduje s napätím  $U_R$  na testovanom rezistore. Typické hodnoty odporu prívodov bývajú v rozsahu od  $1 \text{ m}\Omega$  až do  $10 \text{ m}\Omega$ .



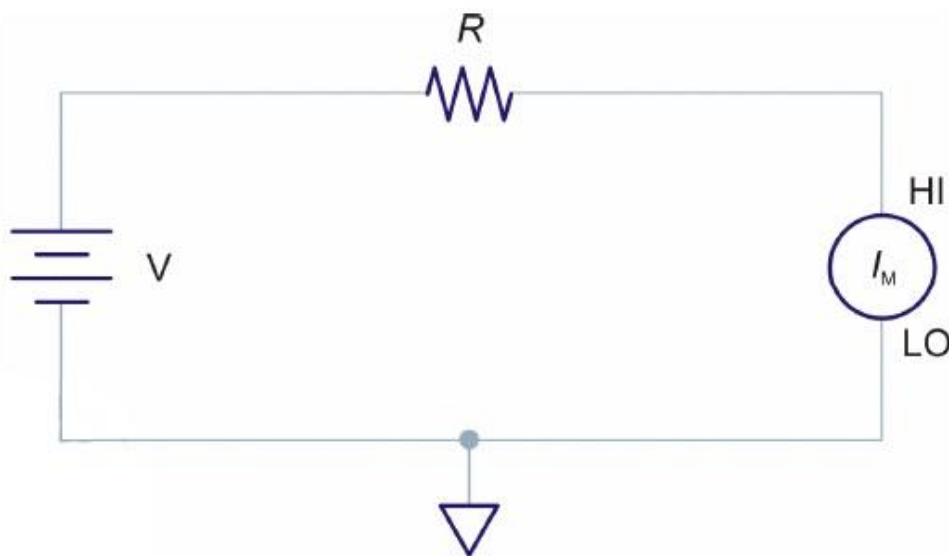
Obrázok 1: Dvojvodičová metóda merania odporu [3]

Pri presnejších meraniach odporu sa všeobecne dáva prednosť používaniu štvorvodičovej Kelvinovej metódy (obr. 2). Testovací prúd  $I$  tečie cez testovaný rezistor  $R_s$  a prívody od zdroja prúdu. Napätie  $U_M$  na testovanom rezistore sa meria cez meracie prívody. V dôsledku vysokej hodnoty vstupného odporu číslcového multimetra je merané napätie  $U_M$  prakticky identické s napätím  $U_R$  na testovanom rezistore  $R_s$ .



Obrázok 2:Štvorvodičová metóda merania odporu [3]

Ak sa majú merať hodnoty odporu rezistorov  $>10^9 \Omega$ , merania sa obvykle vykonávajú pomocou metódy konštantného napätia a elektrometrických ampérmetrov. Zdroj konštantného napätia  $U$  je zapojený v sérii s testovaným rezistorom  $R$  a elektrometrickým ampérmetrom  $I_M$  (obr. 3). Pretože úbytok napätia na elektrometrickom ampérmetri je zanedbateľný, prakticky celá hodnota napätia je na odpore  $R$ . Výsledný prúd sa meria ampérmetrom a hodnota odporu sa vypočíta podľa Ohmovho zákona  $R = U / I$ .



Obrázok 3:Zapojenie pre meranie veľkých odporov [3]

## 2.4 Med'

Med' (cuprum) je chemický prvok v Periodickej tabuľke prvkov, ktorý má značku *Cu* a protónové číslo 29. Med' je ušľachtilý nealotropický kov s kockovou, plošne stredenou kryštálovou sústavou červenej farby. Má vysokú tepelnú vodivosť, tvárnosť za tepla aj studena a dobrú odolnosť proti korózii.

Med' sa na technické účely využíva ako čistý kov (asi 55 % produkcie), aj ako zliatina s rôznymi prvkami (zvyšok). Až 75 % medených výrobkov sa použije v elektrotechnike, ďalej nasleduje strojárstvo, potravinárstvo a chemický priemysel. Používa sa napríklad pri výrobe drôtov, plechov, potrubia a mincí, v poľnohospodárstve pri ošetrovaní chorôb plodín, na ochranu dreva, kože a tkanív. Z dôvodu jej vysokej elektrickej a tepelnej vodivosti sa tiež používa ako metabolit. Bežná medná soľ ako sulfát, uhličitan, kyanid, oxid a sulfid sa používa ako fungicíd, zložka v keramike a pyrotechnike, pre pokovovanie elektrolytov ako aj ďalšie aplikácie v priemysle. Zliatiny medi, bronz a mosadz, sa používajú na výrobu prístrojov a náradia v rozličných odvetviach.

### Technická med'

- surová hutnícka med' obsahuje len 94 až 97 % *Cu*,
- hutnícka med' môže dosiahnuť čistotu až 99,85 % *Cu*, vyrába sa pyrometalurgickou rafináciou surovej hutníckej medi,
- elektrovodná med' alebo katódová med' dosahujú až 99,95 % *Cu*, vyrába sa elektrolytickou rafináciou,
- najčistejšia med' s obsahom až 99,999 % *Cu* sa vyrába rafináciou vo vákuu z katódovej medi,
- špeciálne na zváranie sa využíva bezkyslíková med', odolná proti vodíkovej chorobe.

### Parametre medi:

Merný odpor :  $1.75\mu\Omega/\text{cm}$

Teplotní koeficient odporu :  $0.0068\text{ K}^{-1}$

Relatívna permeabilita : 0.999 990 (cca 1)



## 2.5 Cievka

Je pasívny prvok elektronického obvodu, ktorého vlastnosťou je indukčnosť. Indukčnosť cievky  $L$  je schopnosť, pri ktorej sa časovou zmenou elektrického prúdu prechádzajúceho cievkou indukuje na jej svorkách napätie. Výpočet indukčnosti cievok sa vykonáva podľa vzorcov ktoré vychádzajú zo základného vzťahu.

$$L = N^2 \lambda \quad [H] \quad (1.6)$$

$N$  - počet závitov cievky

$\lambda$  - magnetická vodivosť - súvisí s vyhotovením a tvorom cievky

$$\lambda = \mu_0 \mu_r \frac{S}{l} \quad [-] \quad (1.7)$$

$\mu_0$  –permeabilita vákua

$\mu_r$  - relatívna permeabilita

$S$  - prierez jadra cievky

$l$  - dĺžka cievky

Charakteristické vlastnosti cievky sú:

- indukčnosť
- činiteľ akosti; vyjadruje straty vzniknuté v cievke

Cievka môže byť:

- bez magnetického jadra
- s magnetickým jadrom

### 2.5.1 Impedancia

Impedancia je zdanlivý odpor elektrotechnickej súčiastky a fázový posun napätia oproti prúdu pri prechode harmonického striedavého elektrického prúdu danej frekvencie. Impedancia je základná vlastnosť, ktorú potrebujeme vedieť pre analýzu striedavých elektrických obvodov.

**Značka:**  $Z$

**Základná jednotka:** ohm [  $\Omega$  ]

**Výpočet:**  $Z = R + jX \quad (1.8)$

kde  $R$  je rezistencia ( el. odpor),  $X$  je reaktancia prvku.

**Polárny zápis:**  $Z = |Z|e^{j\varphi}$  (1.9)

, kde  $|Z|$  je veľkosť a  $\varphi$  je fáza.

### **Impedancia odporu**

$$Z = R \quad (2.0)$$

kde  $R$  je rezistencia tzv. ideálneho odporu (rezistora).

### **Impedancia cievky**

$$Z = j\omega L \quad (2.1)$$

,kde  $L$  je indukčnosť tzv. ideálnej cievky (induktora) a  $\omega$  je uhlová rýchlosť.

## 3. Návrh meracej metódy

Pri meraní vodivosti vychádzame zo vzťahu 1.4, kde medzi vodivosťou a odporom je priama úmera. Preto ďalej sa budeme zameriavať na meranie odporu (prepočtom získame vodivosť). Pre meranie odporov sa v praxi používajú hlavne dve metódy. Meranie pomocou ohmometra, kde získame priamo hodnotu, alebo meranie pomocou volt-ampérovej charakteristiky (nepriama). Pri nepriamej metóde môžeme rozlišovať meranie dvojvodičové a štvorvodičové (existujú však aj trojvodičové, päťvodičové). Vzhľadom k tomu, že štvorvodičové meranie je presnejšie a najviac používané, tak sa budeme zaoberať ním. Jedná sa o kontaktnú alebo tiež označovanú ako deštruktívnu metódu.

### 3.1 Kelvinova metóda

Pre meranie Kelvinovou metódou použijeme zapojenie na Obrázok 2. Ako merací prístroj použijeme Agilent 34420A, ktorý má možnosť prepojenia s PC cez zbernicu GPIB. Vzhľadom k tomu, že sa nám vodič bude pohybovať, musíme si danú metódu trochu upraviť. Ako prípojný body použijeme kladky. Sústavu kladiiek musíme navrhnuť tak, aby bol čo najlepší kontakt s vodičom a zároveň nebola príliš znížená rýchlosť, aby nemohlo nastať poškodenie vodiča.

Pre návrh kladiiek máme dve možnosti :

1. Použiť pohybujúcu sa kladku na ktorú pomocou uhlíkových kefiiek budeme prenášať kontakt s meraným vodičom.
2. Použiť pevnú kladku. Prináša to však väčšie požiadavky na vlastnosti kladky (minimálne trenie, veľmi malý odpor v oblasti styku).

### 3.2 Synchronná detekcia

Ďalšou metódou ktorá sa radí medzi kontaktné metódy je synchronná detekcia. Táto metóda sa využíva pre meranie veľmi malých odporov. Synchronná detekcia je jednoduchá a spoľahlivá metóda, ktorá môže byť použitá na získanie malých signálov z okolitého šumu (príjem signálov v rádiatechnike, spracovanie signálov so silným rušením). Vyžaduje referenčný signál s presne danou frekvenciou a fázou.

Blok synchronnej detekcie pozostáva z niekoľkých hlavných častí:

- Detekcia
- Zosilnenie
- Demodulácia

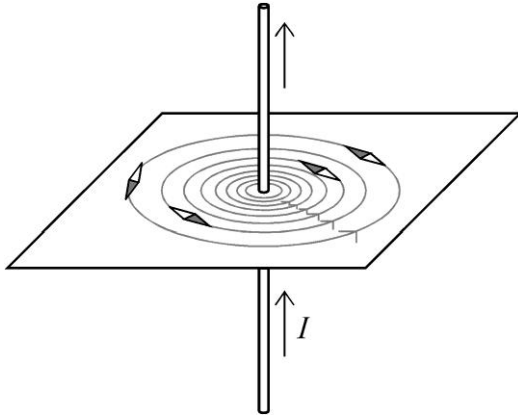
- DP filtrácia

Pre synchronnú detekciu sa využíva zapojenie(Príloha C – Zapojenie s AD630) s integrovaným obvodom AD630 od Analog Devices.

Nevýhodou Kelvinovej metódy a synchronnej detekcie je že k meraniu potrebujeme kontakt(kontaktné metódy). Týmto kontaktom nám pribúda ďalší odpor a tým sa stáva meranie nepresnejšie. Na druhej strane po technickej realizácii sú jednoduché a ľahko obsluhovateľné. Mernú vodivosť získavame priamo bez žiadnych ďalších väčších prepočtov. Vzhľadom k tomu, že chceme dosiahnuť čo najoptimálnejšie meranie budeme sa ďalej zaoberať metódami bezkontaktnými(nedeštruktívnymi).

### 3.3 Využitie magnetickej indukcie

Magnetická indukcia  $B$  je vektorová veličina charakterizujúca magnetické pole. Jednotkou magnetickej indukcie je Tesla ( $T$ ). Číselne sa táto jednotka rovná sile  $F=1N$ , ktorá pôsobí na jednotku dĺžky priameho vodiča s pretekajúcim prúdom  $I=1A$  a orientovaného kolmo k smeru  $B$ .



Pre výpočet magnetickej indukcie vychádzame z Ampérovho zákona.

Ampérov zákon:

$$\oint B dl = \mu I_c \quad [11] \quad (2.2)$$

Obrázok 4 :Magnetická indukcia [11]

V našom prípade je krivka obvod kružnice, teda  $l=2\pi r$ . Prúd  $I_c$  poznáme a permeabilitu tiež. Vzťah teda upravíme :

$$B = \frac{\mu I_c}{2\pi r} \quad [T] \quad (2.3)$$

$\mu_0 * \mu_r = \mu$  - permeabilita

Permeabilita (z lat. priepustnosť) je fyzikálna veličina udávajúca mieru magnetizácie prostredia (materiálu) v dôsledku pôsobiaceho magnetického poľa.

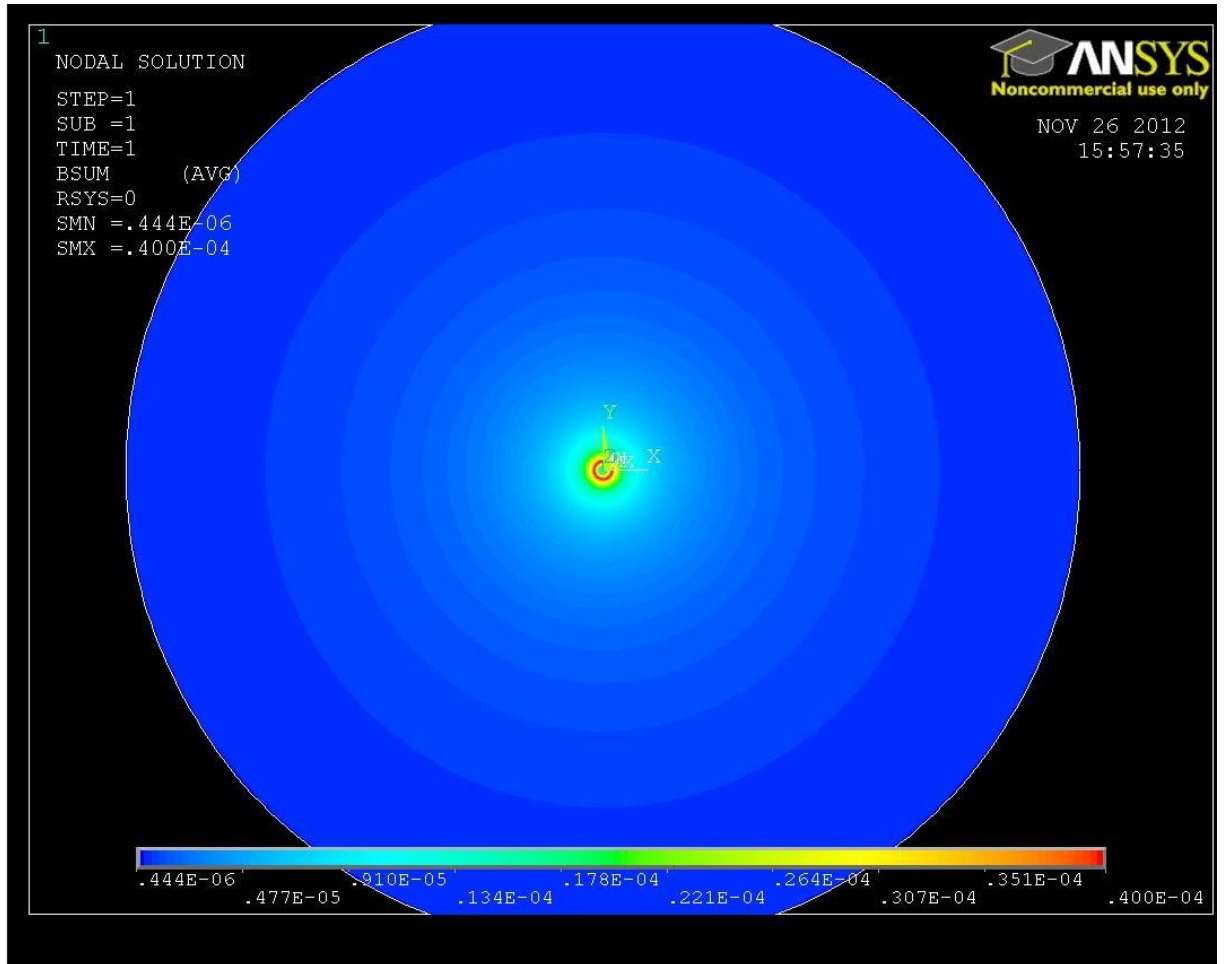
Permeabilita vákua ( $\mu_0$ ) je prírodná konštanta, ktorej hodnota je  $\mu_0=4\pi*10^{-7}$ .

Relatívna permeabilita ( $\mu_r$ ) je číslo udávajúce koľkokrát je dané prostredie z magnetického hľadiska odlišné od vákua. (Med' - 0,999 990)

Pre náš prípad budú všetko konštanty okrem prúdu prechádzajúceho vodičom, ktorý sa bude meniť s mernou vodivosťou vodiča. Závisí na čistote materiálu. Čím čistejší je materiál, tým vyššia vodivosť. Ak budeme voliť pretekajúci prúd rádovo v jednotkách ampérov a vzdialenosť od vodiča čo možno najmenšiu, tak výsledná magnetická indukcia bude v oblasti  $\mu T$ .

Pre overenie našich teoretických predpokladov si vytvoríme model vodiča, kde budeme môcť odsimulovať závislosť mernej vodivosti a magnetickej indukcie. Pre túto simuláciu použijeme software Ansys.

Teoreticky sme si vypočítali hodnotu magnetickej indukcie pre konkrétny typ vodiča. Priemer nášho vodiča je 15mm púšťame ním prúd 1,5A. Magnetická indukcia  $B=4 \cdot 10^{-5} \text{T}$ .



Obrázok 5: Magnetická indukcia v okolí vodiča

Naša teoreticky vypočítaná hodnota magnetickej indukcie sa zhoduje so našim modelom v Ansyse. Daný vzťah si upravíme tak, aby v ňom vystupovala merná rezistivita vodiča.

$$B = \mu \frac{U}{2\pi r} = \mu \frac{\frac{U}{l}}{2\pi r} \quad [\text{T}] \quad (2.4)$$

$l$  – dĺžka daného vodiča (úseku) na ktoré sa vzťahuje meranie

$s$  – prierez daného vodiča

$\rho$  – merná rezistivita vodiča (medi)

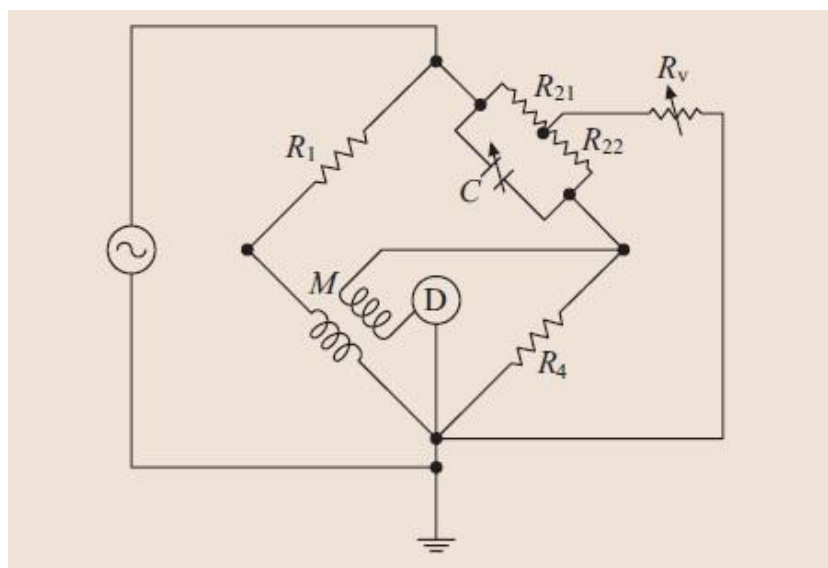
### 3.4 Heydweillerov most

V zásade metódy merania elektrickej vodivosti môžeme rozdeliť do dvoch častí[5]. Pomocou merania jednosmerného (DC) alebo striedavého prúdu (AC). Aplikácie sa nachádzajú v niekoľkých oblastiach. ako napr. skúšanie materiálu či tam sú vzduchové medzery, meranie čistoty kovu (napr. meď, hliník).

Striedavé elektromagnetické polia môžu preniknúť do kovových materiálov a tak vznikajú vírivé prúdy v materiáli. V prípade že testovaný materiál považujeme za ideálny induktor, vírivé prúdy spôsobujú že induktor nie je ideálny ale dochádza k magnetickým stratám. Tieto straty môžu byť merateľné ako rezistívna časť induktora, a z rezistivity môže vypočítať vodivosť . Z dvojdimenzionálnej teórie táto rezistencia  $R_m$  môže byť odvodená ako nie reálna rezistencia, ale ako energetická strata predstavovaná rezistivitou.

Táto meracia metóda sa nazýva Heydweillerov most[5]. Zapojenie pozostáva zo vzájomná indukčnosti  $M$  s vinutiami  $N$ , dva pevné odpory  $R_1$  a  $R_4$ , a vyrovnávací obvod  $R_{21}$ ,  $R_{22}$ ,  $C$ , a  $R_v$ . induktor je toroidného tvaru. Môže byť otvorený, prstencového tvaru šírky  $b = 80$  mm, hrúbka  $d = 10$  mm, a centrálne obvod  $l = 320\pi$ mm. Od zmeny odporu  $R_v$  treba vyvážiť most,  $R_m$  je určená a vodivosť môže byť vypočítaná podľa vzťahu :

$$\sigma = \frac{2\omega(b+d)^2\mu_0 N^4}{R_m^2 l^2} \quad [s] \quad (2.5)$$



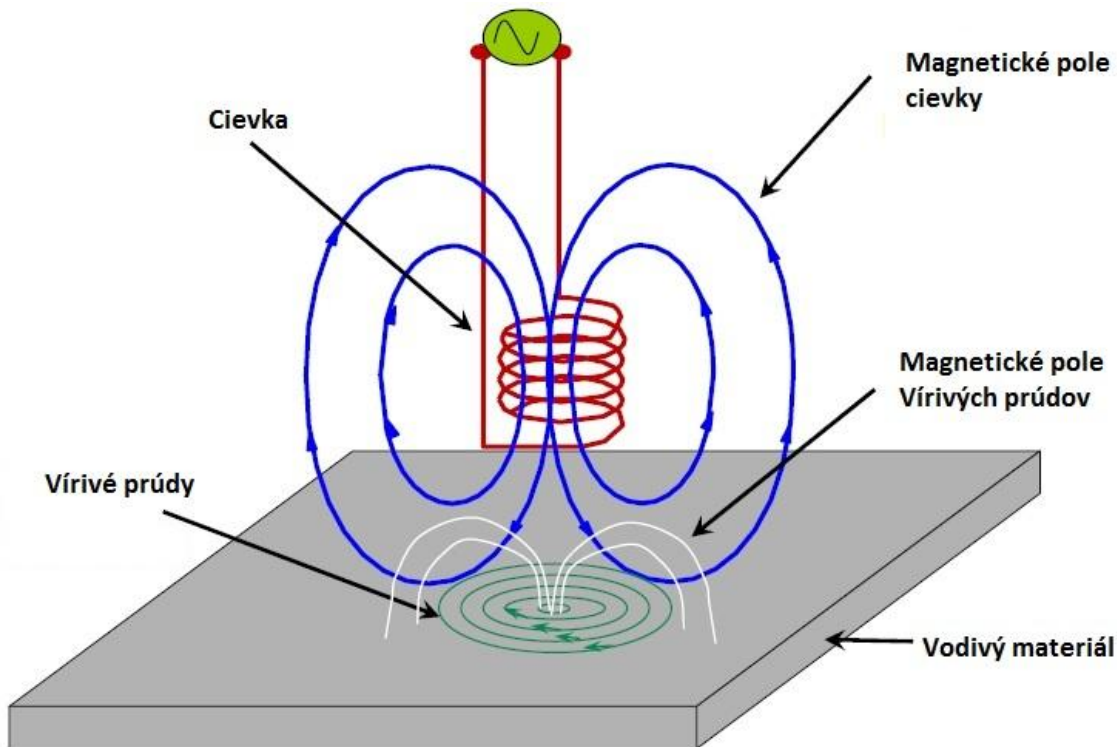
Obrázok 6: Heydweillerov most [5]

### 3.5 Metóda vírivých prúdov

Metóda vírivých prúdov je založená na stanovení fyzikálnych vlastností materiálu pomocou striedavého magnetického poľa. Ak prechádza striedavý magnetický tok telesom, indukuje sa v ňom elektromagnetická sila a vznikajú prúdy, ktoré nazývame vírivými prúdmi.

Základom metódy je, že hustota a rozloženie indukovaných vírivých prúdov v skúšanom telese závisí od fyzikálnych vlastností a geometrii magnetovaného telesa. Vírivé prúdy v skúšanom telese sú indikované striedavým magnetickým poľom cievky, ktorou preteká striedavý prúd.

Pomocou magnetoinduktívnej metódy môžeme nedeštruktívne a veľmi rýchlo kontrolovať také vlastnosti materiálu ako je chemické zloženie, tvrdosť, pevnosť, štruktúra, elektrická vodivosť alebo permeabilita.



Obrázok 7: Vírivé prúdy -Príložná cievka



## Typy sond[4]

Sondy delíme: a) podľa orientácie k materiálu

- Príložné
- Prechádzajúce

b) podľa usporiadanie vinutia

- absolútne
- diferenčné
- absolútne reflexné
- diferenčné reflexné
- špeciálne

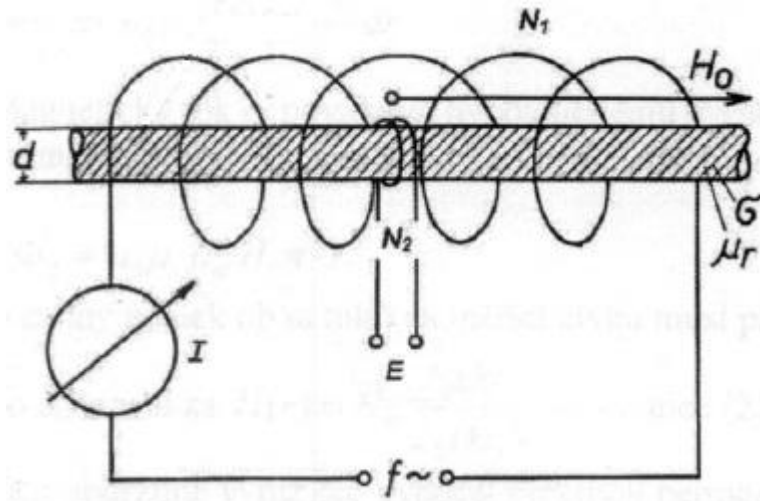
Vzhľadom k tomu, že diferenciálne zapojenie cievok sa používa kvôli potlačeniu vplyvu nehomogénnych vlastností materiálu (konduktivita a permeabilita), použijeme pre naše meranie absolútne sondy (popr. odrazové sondy). Pri našom meraní budeme tiež potrebovať sondu, ktorá bude merať vzdialenosť od sondy, rýchlosť ťahaného drôtu a teplota prostredia.

Vzhľadom k typu sond môžeme metódu vírivých prúdov rozdeliť na dve skupiny :

- a. Metóda s prechádzajúcou cievkou
- b. Metóda s príložnou cievkou

### **3.5.1 Metóda s prechádzajúcou cievkou**

Kontrolovaný materiál prechádza meracou cievkou s dvojitém vinutím – magnetizačným  $N_1$  a snímaným  $N_2$ . Primárne magnetizačné vinutie  $N_1$  je napájané striedavým prúdom, vytvárajúcim striedavé magnetické pole. Spätným pôsobením magnetického pole vírivých prúdov na pôvodne pole, vzniká magnetické pole výsledné, ktoré indukuje v snímacej cievke napätie, ktorého veľkosť je daná fyzikálnymi vlastnosťami materiálu, geometrickým tvarom cievok a budiacou frekvenciou.



Obrázok 8: Metóda vírivých prúdov -Prechádzajúcou cievkou [9]

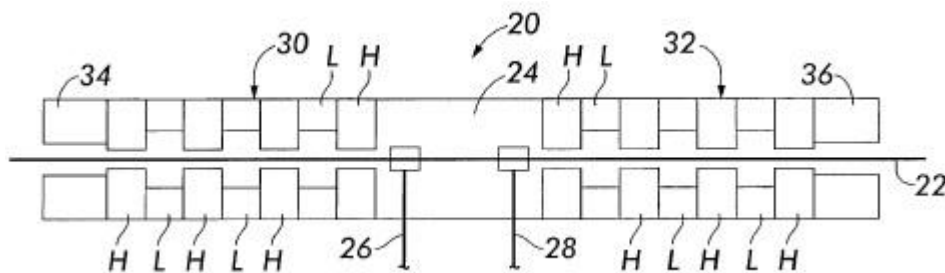
### 3.5.2 Metóda s príložnou cievkou

S rastúcim priemerom skúšaného materiálu klesá u prechádzajúcej cievky citlivosť na trhliny. Požiadavok lokálnej indikácie defektu na obvode skúšaného telesa vedie k ďalšej metóde v oboru vírivých prúdov - metóda s príložnou cievkou. V tomto prípade cievka napájaná striedavým prúdom sa radiálne prikladá k povrchu skúšaného telesa. Magnetické pole od vírivých prúdov spätne ovplyvňuje vlastnosti príložnej cievky - spôsobuje zmenu jej impedancie.

### 3.6 Zariadenie pre bezkontaktné meranie elektrického odporu

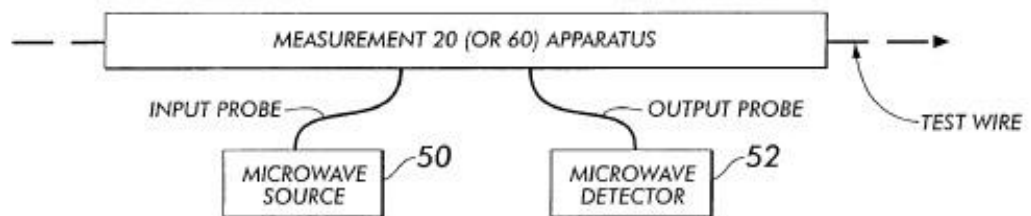
Ďalšia metóda, ktorá bude popisovaná v americkom patente US5923175 (A) — 1999-07-13. Daný patent popisuje možnosť bezkontaktného merania vodivosti, ktoré sa využíva v rôznych zariadeniach.

Na obr. 9 je zobrazený prístroj pre bezdotykové meranie elektrického odporu[10] na jednotku dĺžky vodiča(označený 22), napr. drôtu alebo kábla. Skúšobný vodič je usporiadaný ako stredný vodič koaxiálnej dutiny( konštrukcie 20). Dané usporiadanie je určené na meranie elektrického odporu na jednotku dĺžky a malého odporu v rozmedzí 1-100 $\Omega$ /m. Okrem vstupnej sondy (26) a výstupnej sondy (28) sa tu nachádza impedančný transformátor (30, 32) , na opačných stranách sa nachádza feritová pasca (34, 36).



Obrázok 9 :Mechanické prevedenie [10]

Feritové pasce a impedančné transformátory slúži k minimalizácii poškodeniu elektrických meraní odporu v dôsledku elektrických alebo fyzikálnych javov, ktoré sa môžu nachádzať v prostredí mimo zariadenia.



Obrázok 10: Blokové zapojenie [10]

Na obr. 10 je schematický blokový diagram znázorňujúci zariadenie pre meranie elektrického odporu na jednotku dĺžky. Bloková schéma obsahuje mikrovlnný zdroj (50) a mikrovlnný detektor(52), ktorý meria (vyhodnocuje)  $Q$  faktor(útlm vlny). Elektrický odpor na jednotku dĺžky skúšobného vodiča vo zvolenej frekvencii merania možno určiť z meraného  $Q$  faktoru(útlmu vlnou). Daná frekvencia by sa mala pohybovať v rozmedzí od 800MHz až 2GHz.

### 3.6.1 Výpočet $Q$ faktora

Výpočet  $Q$  pre ideálny sériový RLC obvod

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{\omega_0 L}{R} \quad (2.6)$$

Výpočet  $Q$  pre ideálny paralelný RLC obvod

$$Q = R \sqrt{\frac{C}{L}} = \frac{R}{\omega_0 L} \quad (2.7)$$

$R$  - rezistancia (odpor) [ $\Omega$ ]

$L$  – indukčnosť [H]

$C$  – kapacita [F]

$\omega_0$  - uhlová rýchlosť [r/s]

Činiteľ akosti alebo  $Q$  faktor je bezrozmerný parameter, ktorý opisuje, ako nedostatočne tlmený oscilátor alebo rezonátor je.

### 3.7 Ultrazvuková metóda

Využíva schopnosť ultrazvuku priamočiaro prenikať aj veľmi hrubými vrstvami materiálu a schopnosť odrážať sa na rozhraní dvoch prostredí s rozdielnou špecifickou hustotou, čo sa prejaví aj zmenou rýchlosti šírenia pozdĺžnych (longitudinal) alebo priečnych (transverse) ultrazvukových vln.[4]

V predchádzajúcej kapitole boli predstavená metóda merania ktorá využíva mikrovlny. V prenesenom význame môžeme spraviť to isté aj s ultrazvukom (alebo aj iným signálom), dokonca aj s optickými signálmi. Daný vodič z „čistej“ medi má vodivosť  $\gamma$ , energia jednotlivých vln  $E$  a rýchlosť ktorou prechádza materiálom  $v$  (Príloha B – Rýchlosti ultrazvuku). Ak však bude pridaná prímes do tohto vodiča ovplyvníme tým vodivosť  $\gamma$ , rýchlosť  $v$  a tiež energiu vln. Na základe tejto úmery budeme môcť vyhodnocovať vodivosť daného vodiča.

Zvukové vlny sa šíria určitou rýchlosťou, podmienenou akustickými vlastnosťami média. Všeobecný vzťah pre rýchlosť vlny má tvar[4]:

$$c^2 = \frac{K}{\rho} \quad [\text{m/s}] \quad (2.8)$$

$c$  - je rýchlosť vlny

$K$  - je objemový modul pružnosti

$\rho$  - je hustota média

Aby sme mohli takto určiť vodivosť vodiča potrebujeme veľmi presné zdroje signálu a samozrejme tiež prímače. Ku každému vysielaču (zdroje) budú potrebné aspoň dva prímače, aby mohli snímať odrazený signál a signál ktorý prešiel materiálom.

## 4. Realizácia meracej metódy

Pred samotným meraním si musíme stanoviť maximálnu odchýlku od meranej hodnoty. Pri výpočtoch uvažujeme technickú meď s merným odporom  $1.75\mu\Omega/\text{cm}$ . Vypočítané hodnoty porovnáme s normou EN60228 pre vybrané priemery, a dopočítame absolútnu a relatívnu chybu (Tabuľka 1).

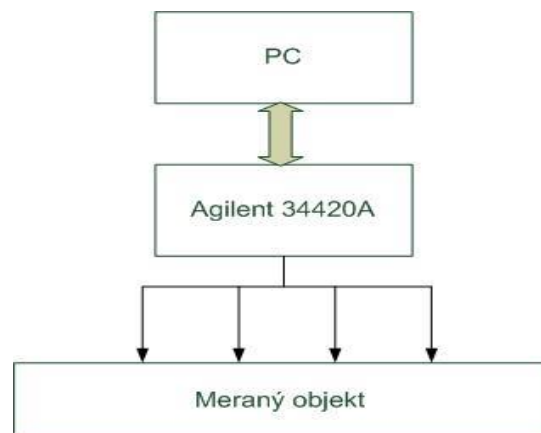
| Holá meď (kruhový prierez) |   |                                |              |              |
|----------------------------|---|--------------------------------|--------------|--------------|
| Priemer                    | Teoretický odpor [ $\Omega/\text{km}$ ] | EN60228 [ $\Omega/\text{km}$ ] | $\Delta$ [-] | $\delta$ [%] |
| 0,5                        | 35,00                                   | 36,00                          | 1,00         | 2,78         |
| 1                          | 17,50                                   | 18,10                          | 0,60         | 3,31         |
| 1,5                        | 11,67                                   | 12,10                          | 0,43         | 3,58         |
| 2,5                        | 7,00                                    | 7,41                           | 0,41         | 5,53         |
| 4                          | 4,38                                    | 4,61                           | 0,24         | 5,10         |
| 6                          | 2,92                                    | 3,08                           | 0,16         | 5,30         |
| 10                         | 1,75                                    | 1,83                           | 0,08         | 4,37         |

Tabuľka 1 : Odchýlky odporu pre daný prierez

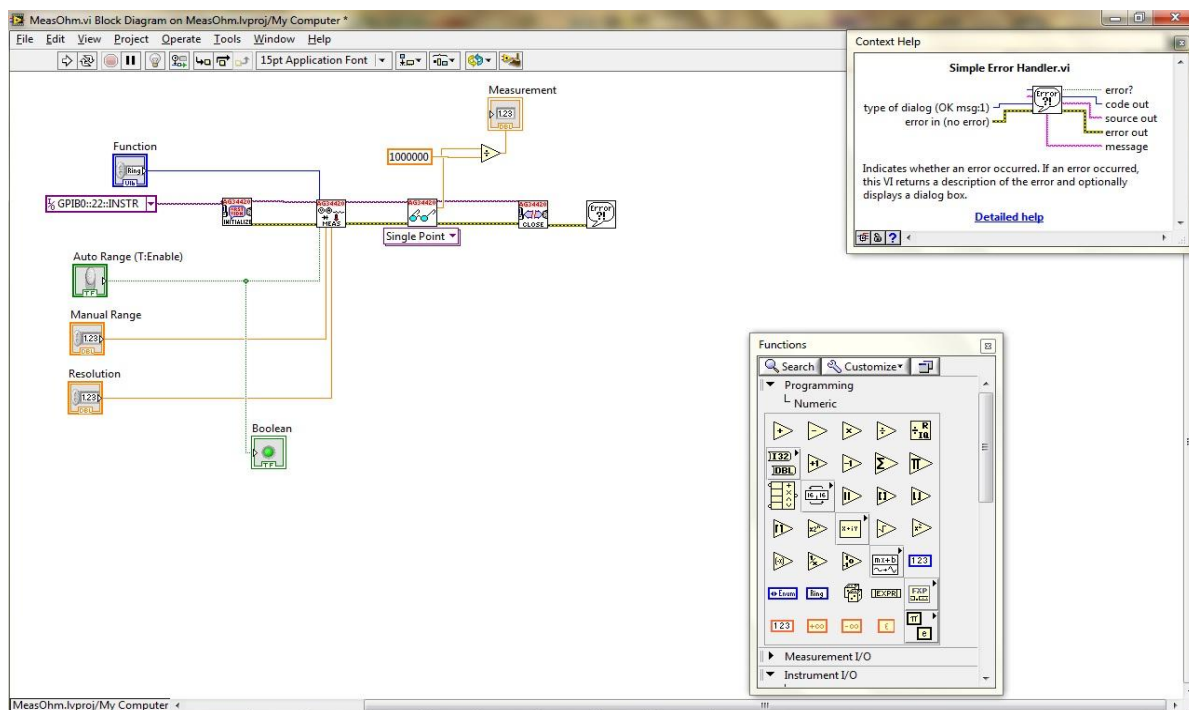
### 4.1 Použitie Kelvinovej metódy

Keďže štvorvodičové meranie patrí medzi najpoužívanejšie merania tak sa zamerám naň ohľadom kontaktných metód. V predchádzajúcej kapitole som vytýčil ako môžeme vytvoriť kontakt medzi meraným drôtom a meracou stanicou. Na to aby sme mohli danú metódu testovať, vytvoríme si program. Program je vytváraný v prostredí LabView 2011.

Po prepojení PC s meracou stanicou, začneme vytvárať program. Pre zber dát zo stanice používame rozhranie GPIB. Preto si najskôr vytvoríme jednoduchú aplikáciu, ktorá spustí meranie odporu a vypíše nám namerané hodnoty.



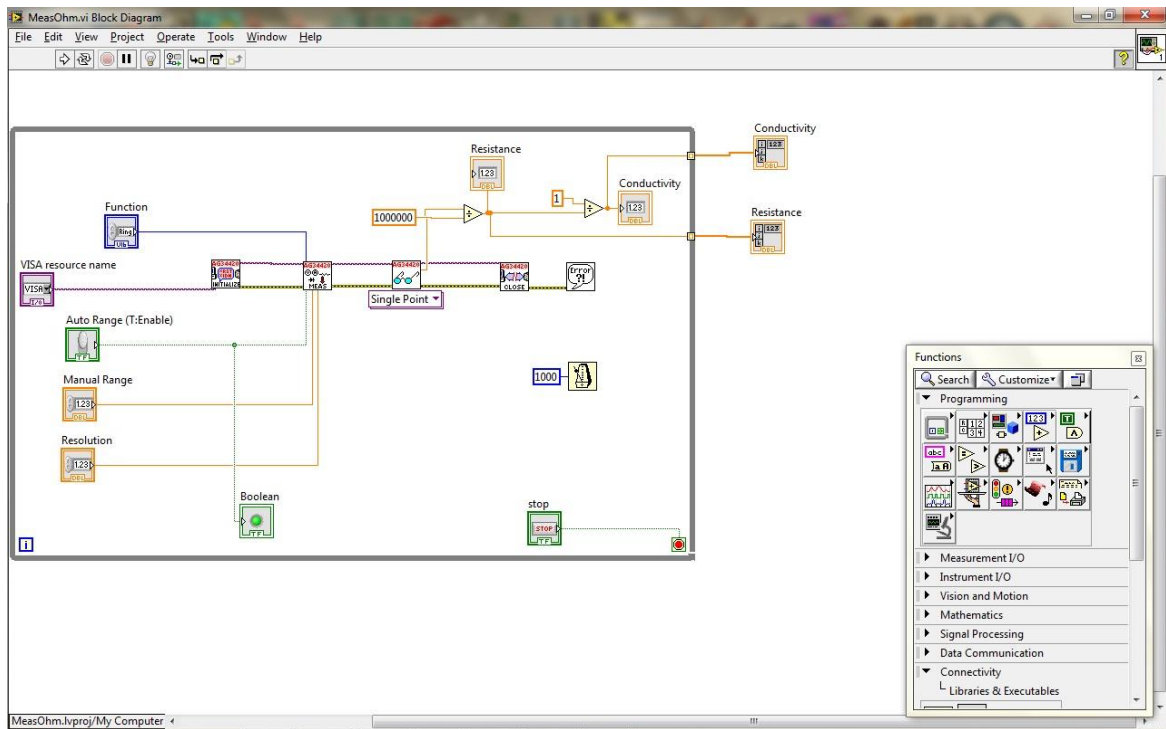
Obrázok 11: Blokový diagram



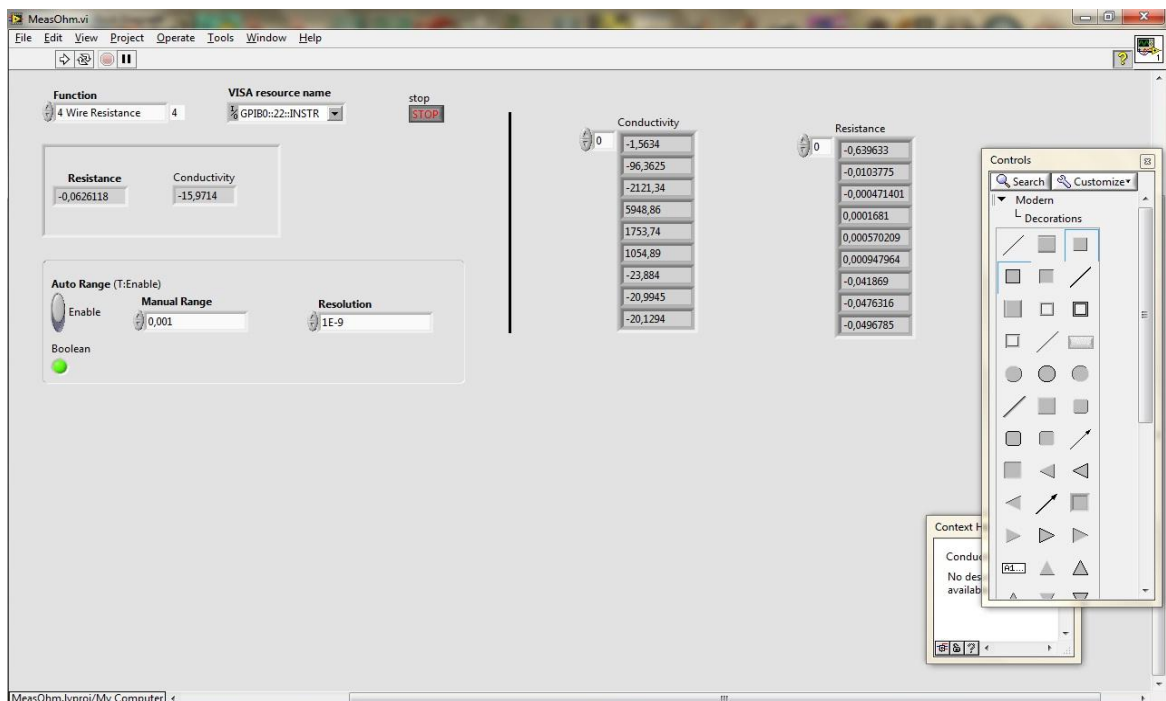
Obrázok 12: Blokový diagram aplikácie v LabView 1

Po odskúšaní program doplníme „cyklom“, aby meranie stále prebiehalo. Vytvoríme zároveň tabuľku, kde vidíme posledné namerané hodnoty odporov (ktoré sú potom prepočítavané na vodivosť). Meranie odporu prebieha v približne sekundových intervaloch.

Vzhľadom k problematike mechanického vyhotovenia navrhutej metódy, daný program bol otestovaný na nepohybujúcom (v zmysle kontinuálneho pohybu) sa vodiči. Avšak podľa meraní môžeme usúdiť, že pri menších rýchlostiach pohybu vodiča by táto metóda fungovala. Je však potrebné kladky vyhotoviť tak aby nedochádzalo k mechanickému opotrebovaniu (poškodeniu) vodiča a zároveň dosiahli veľmi dobrý kontakt s vodičom.



Obrázok 13: Blokový diagram aplikácie v LabView 2



Obrázok 14: Panel aplikácie 1



## 4.2 Testovanie vírivými prúdmi

(ET – Eddy Current Testing[9]) je vhodné najmä na lokalizáciu povrchových, tesne podpovrchových a tiež plošných chýb. Ak na skúšaný, elektricky vodivý predmet pôsobíme striedavým magnetickým poľom cievky, indukuje sa v ňom striedavé napätie. Nakoľko skúšaný predmet je uzavretým vodičom, vznikajú v ňom tzv. vírivé prúdy, ktoré vytvárajú svoje vlastné magnetické pole s opačnou fázou ako pole budiace. Necelistvosti v skúšanom materiáli spôsobujú nerovnováhu oboch polí, a tým na obrazovke prístroja vytvárajú chybový signál. Amplitúda a fáza chybového poľa pritom vyjadrujú informáciu o stave skúšaného materiálu. Aplikácia metódy je vhodná iba pre elektricky vodivé materiály. Nevýhodou metódy je relatívne veľký počet premenných ovplyvňujúcich výsledný signál, čo môže spôsobiť falošné indikácie.

Faktory ktoré ovplyvňujú vírivé prúdy :

- konduktivita  $s$
- permeabilita  $\mu$
- frekvencia  $f$
- blízkosť (Lift off/fill factor)
- geometria
- umiestnenie sondy
- prerušenia (defekty)

Frekvencia je jedna z mála premenných ktoré môžeme ovplyvňovať. Pomocou frekvencie riadime hĺbku prieniku(vniku) , hustotu a fázu indukovaných vírivých prúdov. Vo všeobecnosti sú vyššie kmitočty používané na detekciu povrchu, a nižšie frekvencie pre pod povrchové testovanie.

Pre náš merací systém (zariadenie) bude uvažovať tieto dané veličiny ako konštanty :

- permeabilita
- geometria - kruhový vodič bude mať stále rovnaký prierez
- umiestnenie sondy

### Absolútne a diferenčné meranie

Najzákladnejším rozdielom medzi sondami môžu byť princíp práce.

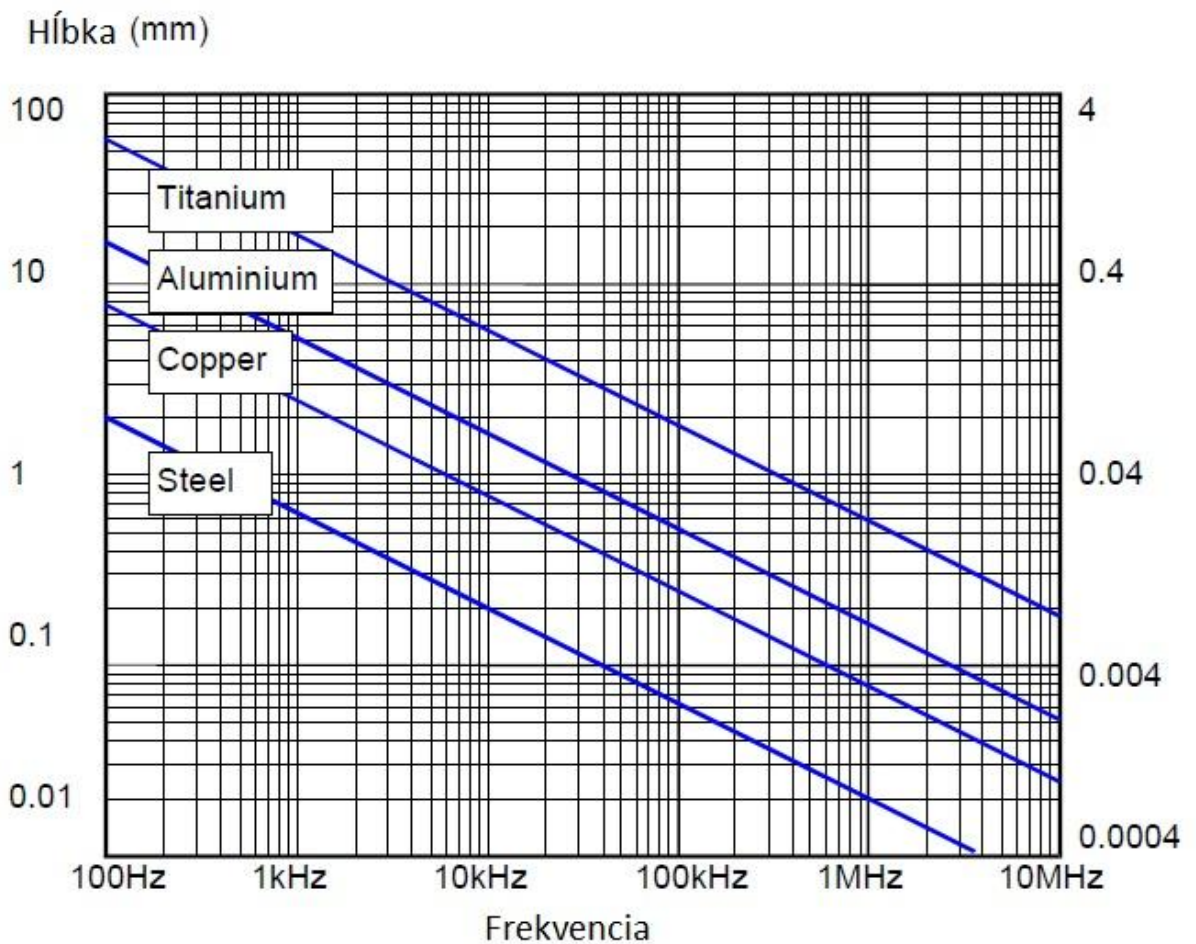
- a) Absolútna vírivé sondy.
- b) Diferenciálny vírivé sondy.

## Hĺbka prieniku

Hustota vírivých prúdov, a spätná odpoveď na defekt, je najväčšia na povrchu kovu a s hĺbkou klesá. Matematicky to môžeme definovať ako "štandardná hĺbka prieniku"[8], kde prúd je 1 / e (37%), z jeho povrchu hodnoty. Štandardná hĺbka prieniku je daná :

$$\delta = 50 \sqrt{\frac{\rho}{f \mu_r}} \quad (2.9)$$

Hlavnou veličinou, ktorá nám ovplyvňuje hĺbku prieniku je frekvencia ( $f$ ). Závislosť hĺbky prieniku pre rôzne materiály od frekvencie je znázornená na obrázku.



Obrázok 15: Závislosť hĺbky vniku od frekvencie [8]

### 4.2.1 Výpočet cievok

Aby sme mohli použiť metódu testovanie vírivými prúdmi musíme si najprv vypočítať parametre pre naše cievky. Vzhľadom k tomu, že vodič sa nám bude pohybovať volíme možnosť s prechádzajúcimi cievkami. Indukované napätie  $U_i$  budeme chcieť na výstupe dosiahnuť 100mV.

Vychádzame zo vzťahu :

$$U_i = 4,44\phi f N \quad [11] \quad (3.0)$$

$U_i$  – indukované napätie na cievke

$N$  – počet závitov cievky

$\Phi$  – indukčný tok

$f$  – frekvencia

$$NI = Hl \quad (3.1)$$

Magnetický tok [11] :

$$\phi = BS \quad [\text{wb}] \quad (3.2)$$

Magnetická indukcia [11] :

$$B = \mu_0 \mu_r H \quad [\text{T}] \quad (3.3)$$

$\mu_r$  – relatívna permeabilita(=1)

$\mu_0$  – permeabilita vákua( $4\pi 10^{-7}$ )

$H$  – intenzita magnetického cievky

Indukčnosť cievky(solenoid) [11] :

$$L = \frac{N\phi}{I} = \frac{N\mu HS}{I} \quad [\text{H}] \quad (3.4)$$

$$L = \frac{N^2 \mu_0 I S}{l} \quad [\text{H}] \quad (3.5)$$

$L$  – indukčnosť cievky

$I$  – prúd pretekajúci cievkou

$N$  – počet závitov cievky

$S$  – prierez cievky

Vyjadríme si  $H$

$$H = \frac{U_i}{4,44 \mu_0 f N S} = \frac{0.1}{4,44 \mu_0 \frac{\pi 1.5 \cdot 10^{-3}}{4} 10^3 \cdot 10 \cdot 1000} \quad (3.6)$$

$$H = 2282 \text{ A/m}$$

Vypočítame počet závitov pre sekundárne vinutie (pre primárne vedenie sme si zvolili 1000 závitov) :

$$N_2 = \frac{Hl}{I} = \frac{22828 \cdot 0,2}{1} = 460 \text{ závitov} \quad (3.7)$$

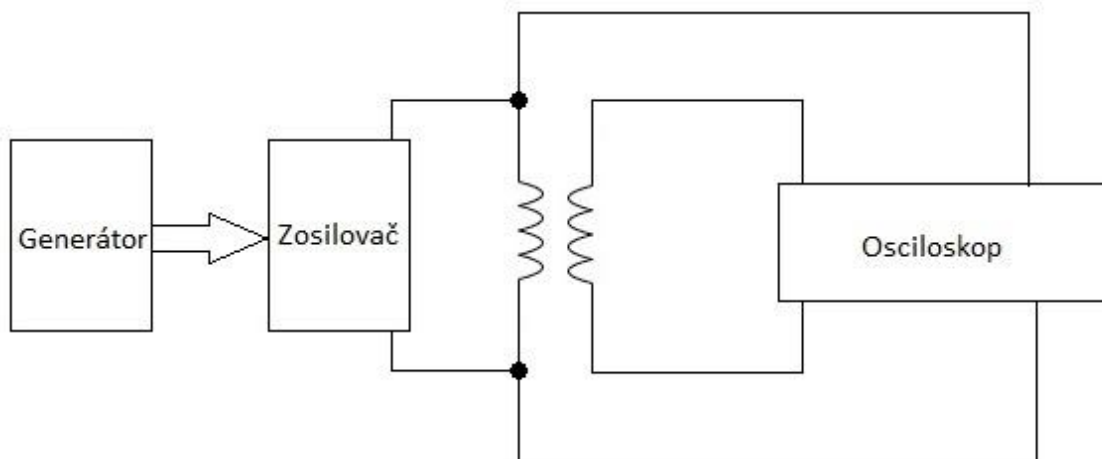
Hodnoty :

$N_1=1000$  závitov  $D_1=0,1\text{mm}$

$N_2=460$  závitov  $D_2=0,3\text{mm}$

#### 4.2.1 Meranie

Najprv si navinieme cievky a zmeriame ich odpor. Primárne vinutie má  $460\text{k}\Omega$  a sekundárne vinutie  $360\text{k}\Omega$ . Pri vstupnom sínusovom signále  $10\text{V}$  s frekvenciou  $10\text{kHz}$  sa nám na výstupe sekundárnej cievky objaví  $68\text{mV}$  s rovnakou frekvenciou. Z toho nám vyplýva, že na budenie primárnej cievky budeme potrebovať zosilňovač.



Obrázok 16: Blokový diagram merania

Vzhľadom k tomu, že naša trubička má 300mm spôsobuje jej nerovnosť. Aby sme sa zbavili problémov s vonkajším rušením a nepriaznivým natáčaním tak namotanú cievku vložíme do väčšej drevenej trubičky, kde zabezpečíme vyrovnanosť. Aby sme zabránili prenikaniu rušenia z generátora, je vhodné použiť pásmovú zadrž alebo priepust.



Obrázok 17: Meracia cievka 1



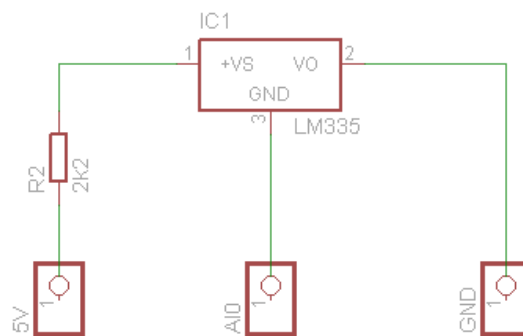
Obrázok 18: Meracia cievka 2

Keď už máme cievku hotovú zvolíme si vstupný budiaci signál do primárnej cievky. Signál bude harmonický. Veľkosť a frekvenciu volíme tak aby sme vybudili dostatočné veľké pole a aby vírivé prúdi prenikli celým vodičom (viď. 4.2 Testovanie vírivými prúdmi). Signály z primárnej a sekundárnej cievky vzájomne porovnáme. Na základe rozdielu amplitúdy a fáze medzi jednotlivými signálmi môžeme vyhodnocovať odpor vodiča.

Pri automatizovanom meraní by sme pre krajné hodnoty odporu daného prierezu (Tabuľka 1) stanovili hodnoty amplitúdy a fáze. Na základe týchto hodnôt by sme mohli veľmi efektívne zistiť či vodič spĺňa dané požiadavky. Zabezpečili by sme tým dostatočnú veľkú rýchlosť merania a vyhodnocovania. Zároveň to kladie väčšie nároky na výpočtovú a hardvérovú techniku.

### 4.3 Vplyv teploty

Ako už bolo v teoretickej časti spomenuté, tak teplota nám tiež ovplyvňuje hodnotu odporu medeného drôtu.(vzťah 1.3) Teplotný súčiniteľ elektrického odporu medi je  $\alpha = 0.0068 \text{ K}^{-1}$ . Ak budeme používať uzavretú konštrukciu pre naše meranie tak môžeme použiť jeden zo základných snímačov na meranie teploty, napríklad LM335 alebo nejaký termočlánok s vhodnou charakteristikou. Prevodová charakteristika LM335 je 10mV na 1K(1°C). Keďže používame meraciu kartu NI USB 6008, ktoré má maximálne rozlíšenie 12bit, tak prevodová konštanta je vhodná. Vzhľadom k tomu, že vodič nie je extrémne zahrievaný a v podstate jeho teplota je hlavne závislá na teplote prostredia je táto možnosť(metóda) postačujúca. Ak by sme však chceli merať teplotu konkrétne len vodiča a precízne, musíme použiť infračervený snímač teploty.



Obrázok 19: Zapojenie LM335

Napájanie snímača môžeme priamo odoberať z meracej karty. AI0 je analógový vstup na NI USB 6008 (Príloha D – NI USB 6008). Ak uvážime prevodnú konštantu snímača (10mV/K), tak s použitím rozlíšenia 11b (9.7mV) získame presnosť 1K. AK by sme chceli dosiahnuť väčšieho rozlíšenie musíme použiť diferenciálne analógové vstupy(12b – 5mV). Väčšie rozlíšenie môžeme tiež zaistiť zmenou rozsahu A/D prevodníka. Nemá však význam merať teplotu s vysokou presnosťou, keď metóda má ďaleko väčšiu chybu (nepresnosť merania).

## 5. Záver

V danej práci boli prebrané jednotlivé možnosti merania vodivosti vyrábaného vodiča. Pri návrhu metód sa vychádza zo základných fyzikálnych princípov. Zamerali sme sa na metódy kontaktné a aj bezkontaktné. Ďalej by sme metódy mohli rozdeliť podľa ich použiteľnosti, rýchlosti a presnosti.

Pre požadované meranie vodivosti môžeme využiť metódy, ktoré boli popísané v danej práci. Po principiálnej stránke by sme ich mohli rozdeliť na metódy kontaktné (Kelvinova metóda, synchronná detekcia), ktoré sa bežne používajú. Ďalej by to boli metódy ktoré využívajú elektromagnetizmus a základné fyzikálne vlastnosti signálov. Výber konkrétnej metódy závisí od rôznych aspektov.

Kelvinova metóda (štvorvodičová) a synchronná detekcia sú kontaktné metódy, čo spôsobuje, že mechanické prevedenie týchto metód je zložité. Pri experimente využívame aplikáciu vytvorenú v LabView 2011. Daný experiment je robený za pomoci kladiek a pomalého posúvania vodiča. Počas merania nastávali problémy s dostatočne dobrým kontaktom, ktorý spôsoboval veľmi rôznorodé hodnoty. Preto sa musí zabezpečiť dobrý kontakt s vodičom a zároveň musíme dbať na to aby sa vodič mechanicky nepoškodil. Na druhej strane pri štvorvodičovej metóde hodnotu odporu získavame priamo z meracej stanice. Pri synchronnej detekcii sa musí vykonávať moduláciu a demoduláciu, ktorá merací proces bude spomaľovať.

Ďalšie metódy využívajú pri meraní vírivé prúdy. Konkrétne sa jedná o Heydweillerov most a testovanie vírivými prúdmi. Jednou z najpoužívanejších metód je testovanie vírivými prúdmi. Pomocou tejto metódy môžeme zabezpečiť rýchle meranie a dostatočnú presnosť. Používajú sa dva spôsoby merania. Prvý je s príložitou cievkou, druhý s prechádzajúcou cievkou. Vzhľadom k možnému „kmitaniu“ vodiča sme pre meranie použili druhú metódu, kde pomocou dvoch cievok je tento pohyb eliminovaný a nemá tak veľký vplyv na meranie. Zmenu vodivosti vodiča vyhodnocujeme na základe zmeny amplitúdy a fáze. Bežný generátor nedokáže vybudíť dostatočne primárnu cievku, preto musíme použiť zosilňovač. Nepříjemný faktom je, že do merania preniká veľmi veľké rušenie o frekvencii 50Hz. Preto by bolo vhodné pri danej metóde použiť pásmovú zadrž. Z toho nám vyplýva, že daná metóda je náročná po finančnej stránke. K danému meraniu je zapotreba generátor, zosilňovač, pásmová prepust' a meracia karta (alebo osciloskop). Potrebný je aj vhodný program, ktorý by porovnával amplitúdy a fáze signálov, a priamo by nás upozorňoval na prekročenie stanovených hodnôt.

Heydweillerov most využíva tiež vírivých prúdov, avšak praxi sa takmer vôbec nevyužíva. Jeho uplatnenie sa skôr nachádza v špecializovaných laboratóriách (National Physics Laboratory Teddington, UK).



Posledné dve metódy ktoré sú v práci rozoberané využívajú vlastnosti vln (signálov). Na základe ako sa vyslaná vlna vráti, alebo ako rýchlosťou prejde materiálom, vyhodnocujeme odpor daného vodiča. Na to aby sme takto mohli merať odpor vodiča potrebujeme veľmi presné zdroje(vysielače) a prímače. Tieto metódy sú zložité ako po konštrukčnej stránke, tak aj vyhodnocovacej.

# Príloha A – Agilent 34420A

## Specifications 34420A Nano Volt/Micro Ohm Meter

### ACCURACY SPECIFICATIONS ± (% of reading + % of range) <sup>[1]</sup>

| Function                                     | Range <sup>[2]</sup>        | Test Current | 24 Hour<br>23°C ± 1°C  | 90 Day<br>23°C ± 5°C | 1 Year<br>23°C ± 5°C | Temperature Coefficient<br>0°C - 18°C<br>28°C - 55°C | Maximum Per Lead Resistance |
|--|-----------------------------|--------------|--|----------------------|----------------------|--|-----------------------------|
| DC Voltage                                   | 1,0000000 mV <sup>[3]</sup> |              | 0.0025 + .0020   | 0.0040 + .0020       | 0.0050 + .0020       | 0.0004 + .0001                                       |                             |
|  | 10,000000 mV <sup>[3]</sup> |              | 0.0025 + .0002   | 0.0040 + .0002       | 0.0050 + .0003       | 0.0004 + .00002                                      |                             |
|  | 100,00000 mV                |              | 0.0015 + .0003   | 0.0030 + .0004       | 0.0040 + .0004       | 0.0004 + .00005                                      |                             |
|  | 1,0000000 V                 |              | 0.0010 + .0003   | 0.0025 + .0004       | 0.0035 + .0004       | 0.0004 + .00004                                      |                             |
|  | 10,000000 V <sup>[4]</sup>  |              | 0.0002 + .0001   | 0.0020 + .0004       | 0.0030 + .0004       | 0.0001 + .00002                                      |                             |
|  | 100,00000 V                 |              | 0.0010 + .0004   | 0.0025 + .0005       | 0.0035 + .0005       | 0.0004 + .00005                                      |                             |
| Resistance <sup>[5]</sup>                    | 1,0000000 Ω                 | 10 mA        | 0.0015 + .0002   | 0.0050 + .0002       | 0.0070 + .0002       | 0.0005 + .00002                                      | 1 Ω                         |
|  | 10,000000 Ω                 | 10 mA        | 0.0015 + .0002   | 0.0040 + .0002       | 0.0060 + .0002       | 0.0005 + .00001                                      | 1 Ω                         |
|  | 100,00000 Ω                 | 10 mA        | 0.0015 + .0002   | 0.0040 + .0002       | 0.0060 + .0002       | 0.0005 + .00001                                      | 10 Ω                        |
|  | 1,0000000 KΩ                | 1 mA         | 0.0015 + .0002   | 0.0040 + .0002       | 0.0060 + .0002       | 0.0005 + .00001                                      | 100 Ω                       |
|  | 10,000000 KΩ                | 100 μA       | 0.0015 + .0002   | 0.0040 + .0002       | 0.0060 + .0002       | 0.0005 + .00001                                      | 1 KΩ                        |
|  | 100,00000 KΩ                | 10 μA        | 0.0015 + .0003   | 0.0040 + .0004       | 0.0060 + .0004       | 0.0005 + .00002                                      | 1 KΩ                        |
|  | 1,0000000 MΩ                | 5 μA         | 0.0020 + .0003   | 0.0050 + .0004       | 0.0070 + .0004       | 0.0006 + .00003                                      | 1 KΩ                        |
| Low Power Resistance <sup>[4]</sup>          | 1,0000000 Ω                 | 10 mA        | 0.0015 + .0002   | 0.0050 + .0002       | 0.0070 + .0002       | 0.0005 + .00002                                      | 1 Ω                         |
|  | 10,000000 Ω                 | 10 mA        | 0.0015 + .0002   | 0.0040 + .0002       | 0.0060 + .0002       | 0.0005 + .00001                                      | 1 Ω                         |
|  | 100,00000 Ω                 | 1 mA         | 0.0015 + .0002   | 0.0040 + .0002       | 0.0060 + .0002       | 0.0005 + .00001                                      | 10 Ω                        |
|  | 1,0000000 KΩ                | 100 μA       | 0.0015 + .0002   | 0.0040 + .0002       | 0.0060 + .0002       | 0.0005 + .00001                                      | 100 Ω                       |
|  | 10,000000 KΩ                | 10 μA        | 0.0015 + .0004   | 0.0040 + .0004       | 0.0060 + .0004       | 0.0005 + .00003                                      | 1 KΩ                        |
|  | 100,00000 KΩ                | 5 μA         | 0.0015 + .0012   | 0.0040 + .0015       | 0.0060 + .0015       | 0.0005 + .00003                                      | 1 KΩ                        |
|  | 1,0000000 MΩ                | 5 μA         | 0.0020 + .0003   | 0.0050 + .0004       | 0.0070 + .0004       | 0.0006 + .00003                                      | 1 KΩ                        |
| Voltage Limited Resistance <sup>[5][6]</sup> | 10,000000 Ω                 | 1 mA         | 0.0020 + .0002   | 0.0050 + .0002       | 0.0070 + .0002       | 0.0005 + .00002                                      | 1 Ω                         |
|  | 100,00000 Ω                 | 100 μA       | 0.0025 + .0002   | 0.0050 + .0002       | 0.0070 + .0002       | 0.0005 + .00002                                      | 5 Ω                         |
| Channel 1 / Channel 2 (DCV Ratio)            |                             |              | Ratio Error % = Channel 1 accuracy in % + Channel 2 accuracy in %                                |                      |                      |  |                             |
| Channel 1 - Channel 2 (DCV Difference)       |                             |              | Difference Error = Channel 1 (% of reading + % of range) + Channel 2 (% of reading + % of range) |                      |                      |  |                             |
| Temperature (resolution = 0.001° C)          |                             |              |  |                      |                      |  |                             |
| Thermocouple <sup>[7]</sup>                  |                             |              | Thermocouple probe accuracy + 0.2° C   |                      |                      |  |                             |
| Thermistor                                   |                             |              | Thermistor probe accuracy + 0.1° C   |                      |                      |  |                             |
| RTD  |                             |              | RTD probe accuracy + 0.05° C   |                      |                      |  |                             |

[1] Specifications are for Channel 1 or Channel 2, after 2-hour warm-up, resolution at 7.5 digits (100 NPLC), with FILTERS off. RESISTANCE specifications are for 4-wire ohms or 2-wire ohms using Null. Without Null, add 0.2 Ω additional error in 2-wire ohms function. With Analog Filter ON, add 0.002% of reading to listed specifications.

[2] 20% overrange on all ranges except 5% on Voltage Limited Resistance.

[3] After using Null. If Null is not used add 100 nanovolts.

[4] Channel 1 only.

[5] Channel 1 only. Resistance measurements, for NPLC < 1, add 160 μΩ RMS noise.

[6] Voltage limit can be set to 20 mV (default), 100 mV, or 500 mV. Measured resistance plus Channel 1 HI and LO lead resistance is limited to 10.5 Ω on the 10 Ω range and 105 Ω on the 100 Ω range.

[7] For fixed reference junction, Add 0.3° C for external reference junction, add 2° C for internal reference junction.

## Príloha B – Rýchlosti ultrazvuku

| Pevné látky | Látka         | Teplota [°C] | Rýchlosť [m/s] |
|-------------|---------------|--------------|----------------|
|             | Olovo         | -            | 1960           |
|             | Meď           | -            | 5010           |
|             | Sklo          | -            | 5640           |
|             | Oceľ          | -            | 5960           |
| Plyny       |               |              |                |
|             | Oxid Uhličitý | 0            | 259            |
|             | Kyslík        | 0            | 613            |
|             | Vzduch        | 0            | 331            |
|             | Vzduch        | 20           | 343            |
|             | Hélium        | 0            | 965            |

Tabuľka 2 (rýchlosť ultrazvuku v rôznych médiách)

| materiál      | $c_L$ [m/s] | $c_T$ [m/s] | $c_R$ [m/s] |
|---------------|-------------|-------------|-------------|
| oceľ          | 5950        | 3250        | 3010        |
| hliník        | 6320        | 3130        | 2870        |
| meď           | 4700        | 2260        | 2110        |
| motorový olej | 1920        |             |             |
| voda          | 1843        |             |             |

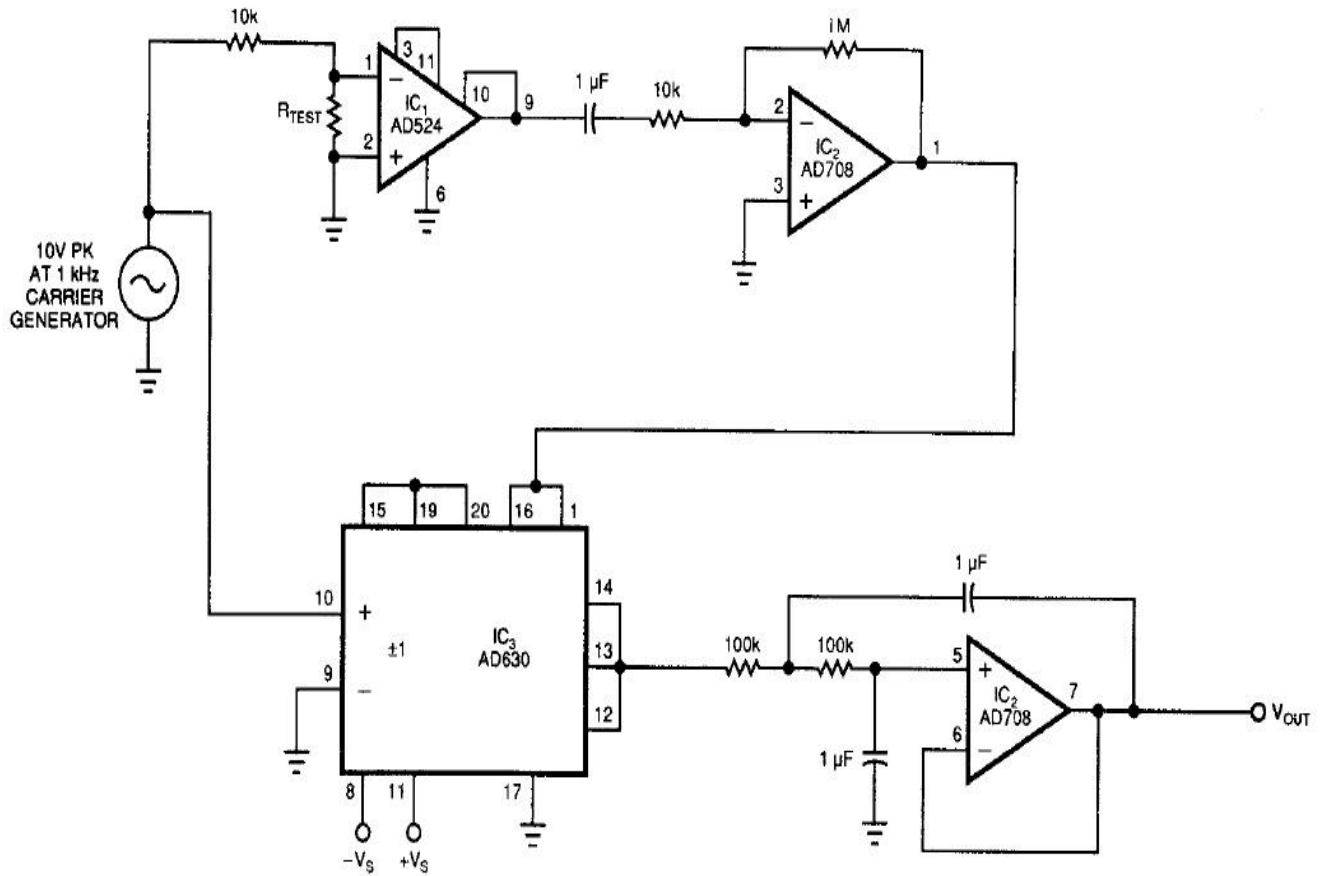
Tabuľka 3 (rýchlosti rôznych vln ultrazvuku)

$c_L$  – pozdĺžne vlny (longitudinálne)

$c_T$  – priečne vlny (transverzálne)

$c_R$  – povrchové vlny (Rayleighove)

## Príloha C – Zapojenie s AD630



Zapojenie s AD630

Zdroj: datasheet AD630, Analog Devices

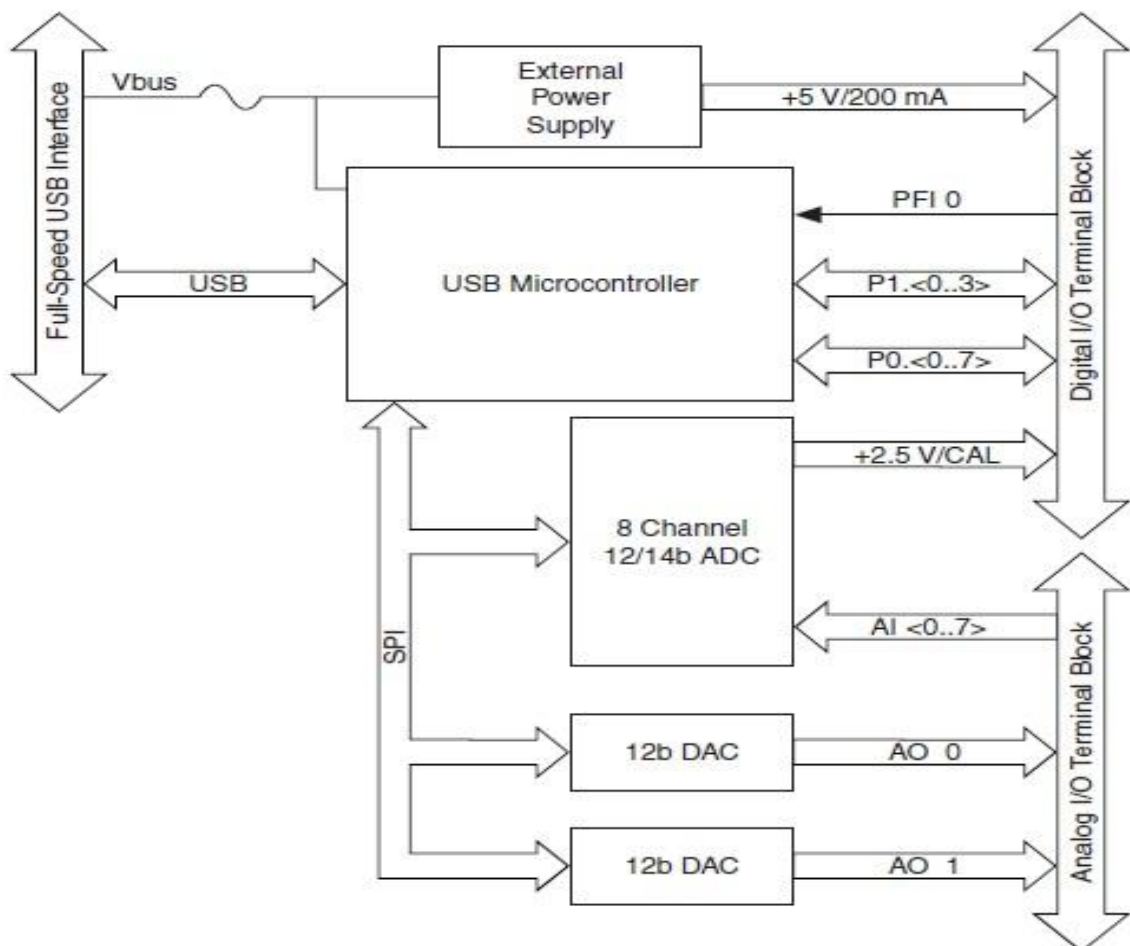
## Príloha D – NI USB 6008

Rozlíšenie : 12 bitov diferenciálne

11 bitov oddelene (single-ended)

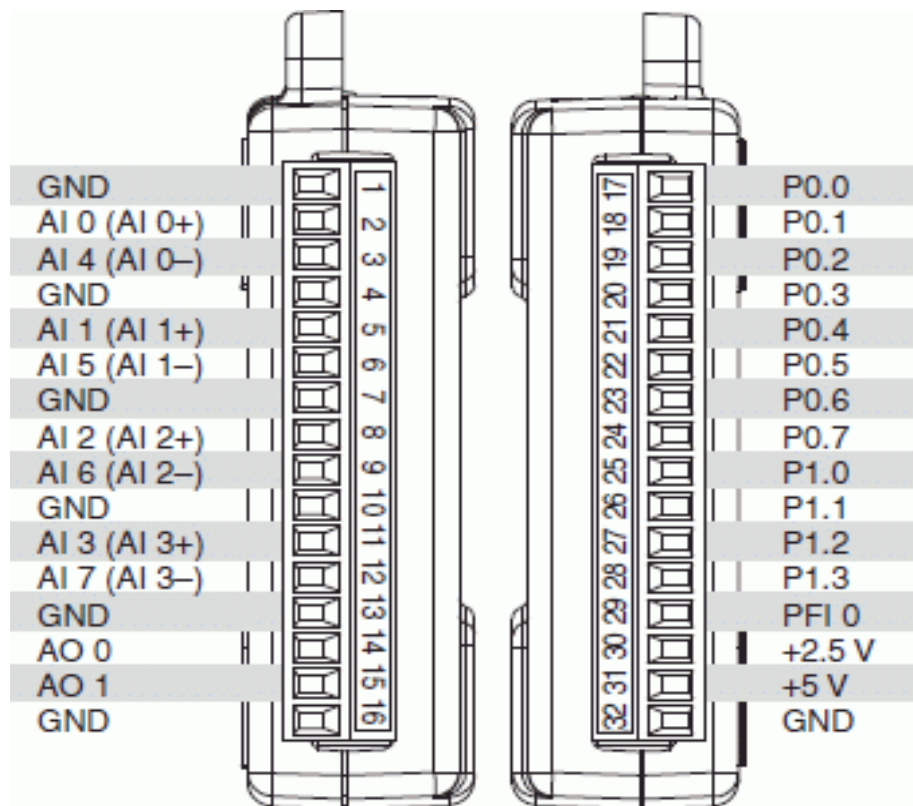
Maximálna počet vzoriek (pre jeden kanál):10kS/s

Maximálna počet vzoriek (pre viac kanálov):10kS/s



USB 6008 (Blokové zapojenie)

## Popis pinov



USB 6008 (Popis pinov)

GND – zem

AI0..7 – analógový vstup

AO – analógový výstup

P – digitálne v/v

Zdroj: datasheet NI USB6008(6009)

## Použitá literatura

[1] Senzory v průmyslové praxi, Radislav Martinek : BEN - technická literatura, 2004. 199 s. ISBN 9788073001148.

[2] Elektronika, M.Frohn a kol. : BEN - technická literatura, 2006. 479 s. ISBN 8073001233.

[3] Elektrické merania I, V.Antošovský :Alfa, 1989. 456 s. ISBN 8005001754.

[4] Technická diagnostika, Marcel Kreidl a Radislav Šmíd: BEN - technická literatura,2006.408s. ISBN 8073001586.

[5] Springer Handbook of Materials Measurement Methods, Horst Czichos, Tetsuya Saito, Leslie Smith:Springer,2006.1234s. ISBN 3540207856.

[6] Počítačové modelování elektrotechnických zařízení a komponentů, Doc. Ing. Pavel Fiala, Ph.D.,Ing. Tibor Bachorec, Ph.D., Ing. Tomáš Kříž,2012.100s. ISBN 9788021444027.

[7] LabVIEW Graphical Programming Gary Johnson, Richard Jennings,2006.752s. ISBN 9780071451468.

[8] NDT Handbook 2nd Edition Volume 4 b, Electromagnetic Testing, Ed. Paul McIntyre/Mike Mester, ASNT, 1986.ISBN 0-931403-01-04

[9] Nondestructive testing handbook, Robert C. McMaster, the Ronald Press Company, 1959.1093s. ISBN 978-0318215020

[10] Espacenet : PROCESS FOR CONTACTLESS MEASUREMENT OF THE ELECTRICAL RESISTANCE OF A TEST MATERIAL . In: *Worldwide Database*. [online]. Marec 2013 [cit. 2013-12-05]. Dostupné na internete: <[http://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?CC=US&NR=5210500A&KC=A&FT=D&ND=3&date=19930511&DB=worldwide.espacenet.com&locale=en\\_EP](http://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?CC=US&NR=5210500A&KC=A&FT=D&ND=3&date=19930511&DB=worldwide.espacenet.com&locale=en_EP) >

[11] Metody řešení elektrických a magnetických polí, Prof.Ing.Daniel Mayer, DrSc., RNDr.Josef Polák,CSc.,SNTL/Alfa,1983.456s.