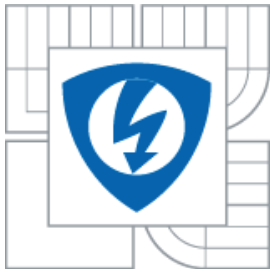




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**
ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

PRACOVNÍŠTĚ PRO AUTOMATIZOVANÉ MĚŘENÍ VODIVOSTI KAPALIN

WORKPLACE FOR AUTOMATED CONDUCTIVITY MEASUREMENT OF LIQUIDS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

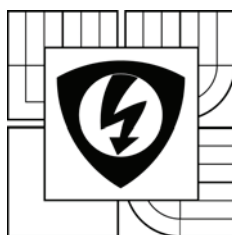
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MARTIN RAJM

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. ZDENĚK HAVRÁNEK, PH.D.

BRNO 2010



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: Martin Rajm

Ročník: 3

ID: 72918

Akademický rok: 2009/10

NÁZEV TÉMATU:

Pracoviště pro automatizované měření vodivosti kapalin

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

- 1) V návaznosti na semestrální projekt se podrobněji seznámte s vývojovým prostředím LabVIEW, programovým ovládáním LCR metru HIOKI HiTester 3532-50 a zpracujte přehled metod měření měrné elektrické vodivosti kapalin kontaktními metodami.
- 2) Realizujte měřicí software pro ovládání RLC metru pro sběr, zpracování a vyhodnocení vodivosti kapalin pomocí čtyřelektrodové vodivostní sondy WTW TetraCon 325.
- 3) Experimentálně ověřte správnost měření vodivosti kapalin porovnáním s předpokládanou hodnotou (dle předpisu pro přípravu roztoku s danou vodivostí).
- 4) Rozšiřte měřicí systém o automatizované měření teploty roztoku s využitím zabudovaného snímače teploty v měřicí sondě. Vyhodnoťte vliv měřicího kmitočtu, velikosti měřicího proudu, teploty roztoku a převládajícího chemického složení na výslednou měrnou elektrickou vodivost roztoku.
- 5) Zpracujte dokumentaci k vytvořenému měřicímu software s doporučeními pro nastavení volitelných parametrů dle typu měřených roztoků.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Kadlec, K. Snímače elektrolytické vodivosti kapalin. Automatizace, 42 (1999), č. 11, s. 823–825. ISSN 0005-125X.

[2] 3522-50/3532-50 LCR HiTESTER [online]. Hioki, 2006, 2006-01-25 [cit. 2010-01-10]. Dostupný z WWW: <http://www.hioki.com/product/pdf/3522-50E4-5ZE-03P_web.pdf>.

Termín zadání: 8.2.2010

Termín odevzdání: 31.5.2010

Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Havránek, Ph.D.

Konzultanti bakalářské práce:

prof. Ing. Pavel Jura, CSc.

předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

Pracoviště pro automatizované měření vodivosti kapalin

Bakalářská práce

Obor: Automatizační a měřicí technika

Student: Martin Rajm

Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Havránek, Ph.D.

Abstrakt:

Tato práce pojednává o měření vodivosti kapalin. Jejím cílem je vytvořit pracoviště pro automatizované měření vodivosti kapalin. V teoretické části jsou popsány principy a metody měření vodivosti kapalin a také měření teploty roztoků. Následně je čtenář seznámen s programovým a vývojovým prostředím LabVIEW, ve kterém je rovněž vytvořen měřicí software. Tím je ovládán LCR metr HIOKI 3532-50, jehož charakteristické vlastnosti, způsob ovládání a možnosti měření jsou stručně charakterizovány dále. Současně je zde také zmínka o sběrnici GP-IB, díky které je LCR metr schopen komunikovat s PC. Samotná kapalina, jež chceme analyzovat, však přichází do styku pouze se čtyřelektrodovou vodivostní sondou WTW TetraCon 325, která je zde taktéž představena. Teoretickou část uzavírá seznámení s multifunkční kartou NI USB-6008, s jejíž pomocí je stanovena teplota analyzovaného roztoku. V praktické části je popsáno zapojení a vysvětlena funkce měřicího systému jako celku. Dále je představen samotný měřicí software určený k měření vodivosti. Popsána je jak jeho struktura, tak i funkce. Nechybí informace o ovládání a uživatelském rozhraní. V této části práce jsou také zjišťovány hodnoty prvků náhradního obvodu vodivostní sondy a vliv měřicích parametrů na výsledné hodnoty měření.

Klíčová slova:

měření vodivosti, měření teploty, vodivostní sonda, LCR metr, LabVIEW, měřicí software, měřicí systém, GP-IB, PC

Brno University of technology
Faculty of electrical engineering and communication
Department of control and instrumentation

Workplace for automated conductivity measurement of liquids

Bachelor's thesis

Branch: Automation and measurement
Author: Martin Rajm
Supervisor: Ing. Zdeněk Havránek, Ph.D.

Abstract:

Its aim the present Dissertation is to create a workplace for automated measurement of conductivity of liquids. Theoretical part describes principles and methods of measurement of conductivity of liquids and also measurement of temperatures of solutions. The reader is then made familiar with the program and development environment known as LabVIEW in which the measurement software has been created as well. This software serves also for the control of the LCR meter "HIOKI 3532-50" whose characteristic properties, control method and possibilities of measurement are briefly characterized in subsequent parts. The text includes also a mention about the GP-IB bus, thanks to which the LCR meter is able to communicate with PC. The actual liquid which is to be analyzed comes into contact, however, only with the four-electrode conductivity cell "WTW TetraCon 325" which is described in the Dissertation as well. The theoretical part is concluded with presentation of the multifunction card "NI USB-6008", with the help of which the temperature of the solution analyzed is determined. In the practical part is description of the connection and explanation of the function of the measurement system as a whole. This is followed by a presentation of the actual measurement software intended for conductivity measurement. Both its structure, functions and some information about control are described there. This part of the Dissertation deals also with determination of the values of the elements of the conductivity probe replacement circuit and with the impact of measurement parameters on resulting measurement values.

Keywords:

Measurement of conductivity, measurement of temperature, conductivity cell, LCR meter, LabVIEW, measurement software, measurement system, GP-IB, PC

Bibliografická citace

RAJM, M. *Pracoviště pro automatizované měření vodivosti kapalin*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 78 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Zdeněk Havránek, Ph.D.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Pracoviště pro automatizované měření vodivosti kapalin“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.“

V Brně dne:

.....
podpis autora

Poděkování

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

V Brně dne:

.....
podpis autora

Obsah

1. ÚVOD.....	12
2. MĚŘENÍ VODIVOST.....	13
2.1 DEFINICE.....	13
2.2 PRINCIP MĚŘENÍ.....	13
2.3 KONDUKTOMETRIE.....	15
2.3.1 Nízkofrekvenční konduktometrie.....	15
2.3.1.1 Základní pojmy.....	15
2.3.1.2 Teplotní závislost.....	17
2.3.1.3 Způsoby měření.....	18
2.3.1.4 Použití nízkofrekvenční konduktometrie.....	20
2.3.2 Vysokofrekvenční konduktometrie.....	21
2.3.2.1 Princip měření.....	21
2.3.2.2 Použití vysokofrekvenční konduktometrie.....	22
3. MĚŘENÍ TEPLoty ROZTOKŮ.....	24
3.1 DEFINICE.....	24
3.2 DĚLENÍ SENZORŮ TEPLoty.....	24
3.3 TERMISTORY.....	25
3.3.1 NTC termistory.....	25
3.3.2 PTC termistory.....	26
3.4 MĚŘICÍ OBVOD.....	26
4. LCR METR HIOKI.....	28
4.1 SEZNÁMENÍ S PŘÍSTROJEM.....	28
4.2 CHYBA MĚŘENÍ.....	29
4.3 DALŠÍ FUNKCE.....	29
4.3.1 Standard GP-IB (IEEE 488.2).....	30
5. WTW TETRACON 325.....	32
6. NI USB-6008.....	34
7. LABVIEW.....	36
7.1 SEZNÁMENÍ S PŘÍSTROJEM.....	36
7.2 UŽIVATELSKÉ ROZHRANÍ.....	36

7.2.1 Čelní panel.....	37
8. POPIS MĚŘICÍHO SYSTÉMU.....	39
9. MĚŘICÍ SOFTWARE - KONDUKTOMETR.....	42
9.1 BLOKOVÝ DIAGRAM.....	42
9.1.1 Příprava na měření.....	43
9.1.2 Samotné měření.....	43
9.2 ČELNÍ PANEL.....	46
10. ZJIŠŤOVÁNÍ PRVKŮ NÁHRADNÍHO OBVODU VODIVOSTNÍ SONDY.....	49
10.1 STANOVENÍ HODNOTY KAPACITY KABELU C_K	49
10.2 STANOVENÍ HODNOTY POLARIZAČNÍ KAPACITY C_P	49
10.3 STANOVENÍ HODNOTY GEOMETRICKÉ KAPACITY C_G	51
11. ZÁVISLOST VODIVOSTI ROZTOKU NA JEHO TEPLOTĚ.....	54
11.1 DESTILOVANÁ VODA.....	54
11.2 VODNÝ ROZTOK CHLORIDU SODNÉHO.....	55
11.3 VODNÝ ROZTOK CHLORIDU DRASELNÉO.....	56
12. VLIV PARAMETRŮ NAPÁJECÍHO SIGNÁLU NA VÝSLEDNOU VODIVOST.....	58
12.1 CHLORID DRASELNÝ O KONCENTRACI 0,01 mol/l.....	58
12.2 CHLORID DRASELNÝ O KONCENTRACI 0,1 mol/l.....	60
12.3 CHLORID DRASELNÝ O KONCENTRACI 1 mol/l.....	61
12.4 ZHODNOCENÍ TOHOTO MĚŘENÍ.....	63
13. ZÁVĚR.....	64
14. LITERATURA.....	66

Seznam obrázků

Obrázek 2.1: Princip měření vodivosti roztoku.....	13
Obrázek 2.2: Náhradní obvod skutečné vodivostní sondy.....	14
Obrázek 2.3: Příklady konstrukčních uspořádání vodivostních sond (A průtoková, B ponorná).....	18
Obrázek 2.4: Schéma dvouelektrodové (A) a čtyřelektrodové (B) vodivostní sondy.....	19
Obrázek 2.5: Princip bezelektrodového měření vodivosti.....	20
Obrázek 2.6: Indukčnostní (A) a kapacitní (B) vodivostní sonda.....	21
Obrázek 2.7: Příklad zapojení vf-konduktometru.....	22
Obrázek 2.8: Závislost odezvy vysokofrekvenčního konduktometru na koncentraci kyseliny sírové.....	22
Obrázek 3.1: Teplotní závislost odporových senzorů teploty.....	25
Obrázek 3.2: Teplotně závislý dělič napětí.....	27
Obrázek 4.1: LCR metr HIOKI HiTester 3532-50.....	28
Obrázek 4.2: Konektor GP-IB AMPHENOL 24.....	30
Obrázek 4.3: Zapojení systému GP-IB.....	31
Obrázek 5.1: Popis sondy.....	33
Obrázek 6.1: Multifunkční karta NI USB-6008.....	34
Obrázek 6.2: Blokové schéma multifunkční karty.....	35
Obrázek 7.1: Příklad čelního panelu virtuálního přístroje.....	37
Obrázek 7.2: Příklad blokového diagramu virtuálního přístroje.....	38
Obrázek 8.1: Zapojení systému pro měření vodivosti kapalin.....	39
Obrázek 8.2: Převodník GP-IB/USB od firmy National Instruments.....	40
Obrázek 8.3: Skutečné zapojení pracoviště.....	41
Obrázek 9.1: Princip činnosti programu.....	43
Obrázek 9.2: Vývojový diagram průběhu měření vodivosti.....	45
Obrázek 9.3: Čelní panel programu při probíhajícím měření.....	46
Obrázek 9.4 Okno pokročilého nastavení LCR metru.....	47
Obrázek 10.1: Stanovení kapacity kabelu C_K	49

Obrázek 10.2: Frekvenční charakteristika impedance NaCl s vodivostí 200 mS při 24 °C, 5 kHz.....	50
Obrázek 10.3: Stanovení polarizační kapacity C_P	50
Obrázek 10.4: Frekvenční charakteristika impedance NaCl s vodivostí 1mS při 24 °C, 5 kHz.....	52
Obrázek 10.5: Stanovení geometrické kapacity C_G	52
Obrázek 11.1: Frekvenční závislost vodivosti destilované vody na její teplotě.....	54
Obrázek 11.2: Frekvenční závislost vodivosti vodného roztoku NaCl na jeho teplotě.....	55
Obrázek 11.3: Frekvenční závislost vodivosti vodného roztoku KCl na jeho teplotě.....	56
Obrázek 12.1: Vodný roztok KCl o koncentraci 0,01 mol/l napájený konstantním napětím.....	58
Obrázek 12.2: Vodný roztok KCl o koncentraci 0,01 mol/l napájený napětím.....	59
Obrázek 12.3 Vodný roztok KCl o koncentraci 0,01 mol/l napájený konstantním proudem.....	59
Obrázek 12.4: Vodný roztok KCl o koncentraci 0,1 mol/l napájený konstantním napětím.....	60
Obrázek 12.5: Vodný roztok KCl o koncentraci 0,1 mol/l napájený napětím.....	60
Obrázek 12.6: Vodný roztok KCl o koncentraci 0,1 mol/l napájený konstantním proudem.....	61
Obrázek 12.7: Vodný roztok KCl o koncentraci 1 mol/l napájený konstantním napětím.....	61
Obrázek 12.8: Vodný roztok KCl o koncentraci 1 mol/l napájený napětím.....	62
Obrázek 12.9: Vodný roztok KCl o koncentraci 1 mol/l metodou napájený konstantním proudem.....	62

Seznam tabulek

Tabulka 2.1: Měrné vodivosti některých roztoků při 25°C v S*cm ⁻¹	16
Tabulka 2.2: Standardní roztoky KCL pro zjišťování konstant vodivostních sond.....	16
Tabulka 2.3: Teplotní koeficienty elektrolytů.....	17
Tabulka 4.1: Přehled rozsahů měřitelných veličin.....	29
Tabulka 5.1: Technická data sondy.....	32
Tabulka 5.2: Jednotlivé části sondy.....	33

1. ÚVOD

Tato práce si klade za cíl vytvořit automatizované pracoviště pro měření vodivosti kapalin. Současně poukazuje na jedno z mnoha možných řešení dané problematiky.

V teoretické části se nejprve seznámíme s principy a metodami měření elektrické vodivosti kapalin a současně určováním jejich teplot. Dále je v této části představeno několik moderních automatizovaných měřicích přístrojů. Jedním z těchto zařízení je i LCR metr HIOKI HiTester 3532-50, jehož možnosti měření, ovládání a způsob komunikace jsou zde taktéž stručně popsány. Mezi další vyspělé hardwarové články tohoto systému patří multifunkční měřicí karta NI USB-6008, s jejíž pomocí je stanovována teplota analyzovaného roztoku.

Dále práce seznamuje s programovým a vývojovým prostředím LabVIEW, jímž je realizován měřicí software pro ovládání již zmíněného LCR metru. Stručná charakteristika tohoto softwaru jej představuje jak po stránce jeho funkce a principu činnosti, tak i z uživatelského hlediska. Je vytvořen za účelem sběru, zpracování a vyhodnocení vodivosti kapalin, jež je snímána čtyřelektrodovou vodivostní sondou WTW TetraCon 325. Je zde také zmínka o komunikačním standardu GP-IB, s jehož pomocí komunikují LCR metr a uživatelův počítač, na němž je samotný měřicí software provozován.

Praktická funkčnost nejen měřicího softwaru, ale i celého měřicího pracoviště je ověřena několika soubory naměřených dat. První měření si klade za cíl stanovit hodnoty jednotlivých prvků náhradního obvodu vodivostní sondy. Úkolem další sady měření je ověřit teplotní závislosti vodivosti roztoků. Poslední soubor naměřených hodnot má stanovit vliv jednotlivých parametrů napájecího signálu sondy na výslednou hodnotu naměřené vodivosti a určit optimální nastavení měřicího softwaru pro stanovení nejlepšího výsledku.

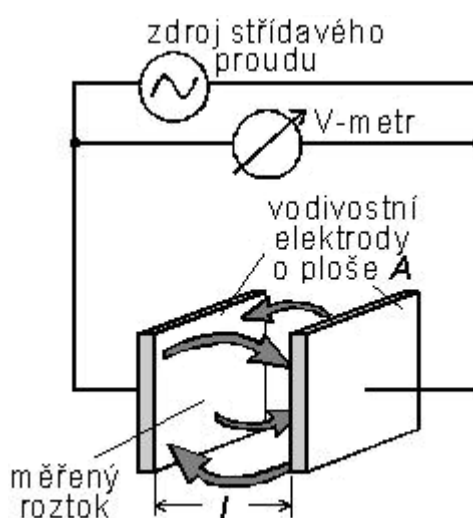
2. MĚŘENÍ VODIVOSTI

2.1 DEFINICE

Konduktometrie je metoda, při níž se na základě měření elektrické vodivosti stanovuje schopnost analyzovaného roztoku vést elektrický proud. Na této vlastnosti se různou měrou podílejí všechny látky v analyzovaném roztoku, přičemž příspěvky jednotlivých látek nelze rozlišit. Kromě toho má na tuto vlastnost značný vliv také teplota analyzovaného roztoku. Přístroje pro měření vodivosti roztoků se nazývají konduktometry. Výhodou měření elektrické vodivosti je velká citlivost, která umožňuje měřit například i stopové koncentrace elektrolytů ve vodě.

2.2 PRINCIP MĚŘENÍ

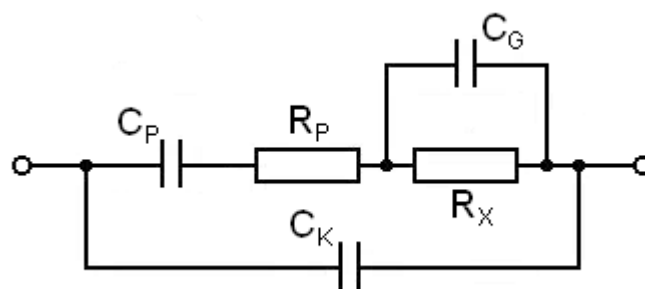
Principiální schéma zapojení obvodu pro měření vodivosti roztoku je na obrázku 2.1. Měření vodivosti roztoků se provádí za pomoci tzv. vodivostní sondy, v níž je analyzovaný roztok. V sondě jsou umístěny dvě elektrody, jimiž prochází konstantní proud I .



Obrázek 2.1: Princip měření vodivosti roztoku [1]

Ideální vodivostní sondu lze popsat jediným prvkem a to odporem měřeného roztoku R_x . V tomto případě by zjištění odporu roztoku bylo velmi jednoduché a to z napětí naměřeného voltmetrem a použitím Ohmova zákona $U = I * R_x$ (1), z něhož lze hledanou hodnotu R_x snadno vypočítat. [1]

Skutečná vodivostní sonda má však náhradní obvod podstatně složitější, viz obrázek 2.2.



Obrázek 2.2: Náhradní obvod skutečné vodivostní sondy

(R_x – odpor elektrolytu, C_G – geometrická kapacita sondy, C_p – polarizační kapacita, R_p – polarizační odpor, C_K – kapacita kabelu) [2]

Přiložením střídavého napětí na elektrody (při stejnosměrném napětí dochází k elektrolýze) ponořené v elektrolytu vznikne na vnitřní straně elektrod dvojvrstva nábojů. Tato dvojvrstva je způsobena řadou jevů, které jsou souhrnně nazývány jako polarizace elektrod. V náhradním obvodu sondy (obrázek 2.2) je polarizace elektrod vyjádřena jako sériová kombinace odporu R_p a kapacity C_p .

Polarizační jev se nejvíce uplatňuje u roztoků s velmi vysokou vodivostí a při napájení nízkým kmitočtem. Obě složky polarizační impedance jsou však frekvenčně závislé. Všeobecně platí, že při kmitočtu napájení do 5 kHz se hodnota C_p pohybuje od 10 μF do 100 μF (reaktance 0,3 Ω až 3 Ω). Hodnoty R_p se pohybují mezi 10 m Ω a 10 Ω . Obvyklá hodnota geometrické kapacity je mezi 10 pF až 100 pF (reaktance 2*10⁷ Ω až 2*10⁸ Ω).

Abyste nebylo vyhodnocení odporu R_x zatíženo systematickou chybou způsobenou parazitními prvky dle náhradního schématu (tj. aby výsledná impedance sondy $Z = R_x$), je nutné zvolit dle konduktivity roztoku geometrii, materiál sondy

(zajistí výrobce sondy) a amplitudu a kmitočet napájecího signálu sondy. Hodnota odporu R_x se obvykle pohybuje v rozmezí $10^2 < R_x < 10^5 \Omega$. Pro jeho vyhodnocení obvykle bývá měřicí řetězec založen na klasickém Wheatstoneově můstku, nebo transformátorovém můstku. Kompenzace teplotní závislosti konduktivity je řešena u mikroprocesorem řízených přístrojů numericky. [2]

2.3 KONDUKTOMETRIE

Dle použitých hodnot měřicího kmitočtu se konduktometrie dělí na nízkofrekvenční a vysokofrekvenční.

2.3.1 Nízkofrekvenční konduktometrie

Pro tuto metodu je měření vodivostí roztoků optimalizováno volbou amplitudy střídavého proudu, jeho frekvencí a konstrukcí vodivostní sondy. Jejím cílem je dosažení co největší dominance ohmického odporu R_x v celkové impedanci obvodu Z . K vlastnímu měření se používá střídavý proud o kmitočtu 50 Hz až 5 000 Hz. Nízké frekvence jsou vhodné pro měření roztoků s malou vodivostí, protože vzhledem k velkému odporu mezi elektrodami je polarizace elektrod zanedbatelná. Naproti tomu vyšší frekvence zmenšují vliv polarizace na povrchu elektrod v případech, kdy vodivost roztoku je velká. [2]

2.3.1.1 Základní pojmy

Hodnota odporu R_x (Ω) ve vodivostní sondě mezi elektrodami ve vzdálenosti l o ploše A (viz obrázek 2.1) je rovna:

$$R_x = \rho \frac{l}{A} \quad (2)$$

kde ρ je měrný odpor ($\Omega \cdot \text{cm}$). Jelikož odpor mezi elektrodami je nepřímo úměrný koncentraci iontů, je z analytického hlediska výhodnější měřit vodivost, G (S). [1]

$$G = \frac{1}{R} = \gamma \frac{A}{l} \quad (3)$$

kde γ je měrná vodivost (S cm^{-1}), která charakterizuje analyzovaný roztok. Podíl A/l charakterizuje vodivostní sondu.

ROZTOK	γ [S*cm]
Superčistá voda	$5 \cdot 10^{-8} - 10^{-7}$
Destilovaná voda (na vzduchu)	10^{-6}
Přírodní voda	$3 \cdot 10^{-5} - 10^{-3}$
2% NaOH ($0,5 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$)	0,1
20% HCl ($6 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$)	1

Tabulka 2.1: Měrné vodivosti některých roztoků při 25°C v S*cm⁻¹ [1]

Ze vztahu (3) pro měrnou vodivost platí:

$$\gamma = G \frac{l}{A} = GK \quad (4)$$

kde K je tzv. konstanta vodivostní sondy. Aby bylo možno určit měrnou vodivost analyzovaného roztoku ze změřené vodivosti G , musí být tato konstanta K známa. Jak je patrné ze vztahu (4), se změnou rozměrů vodivostní sondy se mění i hodnota této konstanty K . Pro roztoky o malé vodivosti (od 0,05 do 200 mS*cm⁻¹) jsou elektrody blízko u sebe a konstanta nabývá hodnot 0,1 až 0,01 cm⁻¹. Analogicky pro roztoky s větší vodivostí (od 10 do 20 000 S*cm⁻¹) se užívá snímačů s větší vzdáleností elektrod a konstanta nabývá hodnot 1 až 10, výjimečně 100 cm⁻¹. [6]

Vzhledem k existenci okrajových jevů v rozložení elektrického pole není možné konstantu vodivostní sondy určit z geometrických rozměrů. Proto se danou sondou změří vodivost standardního roztoku o známé měrné vodivosti. Konstanta K se následně vypočítá z rovnice (4). [2]

Přibližná koncentrace ($\text{mol} \cdot \text{l}^{-1}$)	Složení roztoku g KCl/dm ³ , 20 °C	Měrná vodivost při 25 °C ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)
1	74,2460	111 342
0,1	7,4365	12 856
0,01	0,7440	1408,8
0,001	100 ml 0,01-M KCl/dm ³	146,93

Tabulka 2.2: Standardní roztoky KCL pro zjišťování konstant vodivostních sond [1]

Při řádně optimalizovaném měření vodivosti se s frekvencí střídavého proudu nesmí konstanta vodivostní sondy měnit. Její vhodné geometrické uspořádání obvykle zajistí výrobce. Frekvenci a amplitudu střídavého proudu je nutné nastavit při analýze. Tyto parametry jsou u moderních konduktometrů optimalizovány automaticky.

2.3.1.2 Teplotní závislost

Měrná elektrická vodivost γ je funkcí teploty. Tuto vlastnost je možné pro roztoky s nižšími koncentracemi vyjádřit vztahem:

$$\gamma_t = \gamma_{t_0} [1 + \beta_1(t - t_0) + \beta_2(t - t_0)^2] \quad (5)$$

kde jsou β_1, β_2 teplotní koeficienty vodivosti a γ_t, γ_{t_0} měrné vodivosti při teplotě t , popř. t_0 . Například pro vodný roztok NaCl mají teplotní koeficienty hodnoty rovny: $\beta_1 = 0,0226 \text{ K}^{-1}$, $\beta_2 = 0,085 \cdot 10^{-2} \text{ K}^{-1}$. Protože je člen druhého řádu při menších teplotních intervalech nevýrazný, teplotní závislost se vyjadřuje jednodušším vztahem:

$$\gamma_t = \gamma_{t_0} [1 + \beta_1(t - t_0)] \quad (6)$$

Teplotní koeficienty β_1 se u různých skupin elektrolytů příliš neliší.

Typy elektrolytu	Teplotní koeficient β_1 [K^{-1}] pro $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$
kyseliny	0,016
zásady	0,019
solí	0,024

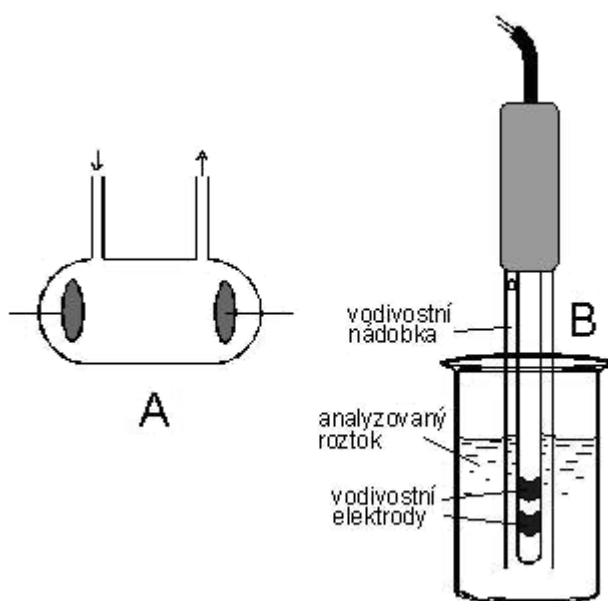
Tabulka 2.3: Teplotní koeficienty elektrolytů [6]

Se vzrůstající teplotou hodnota teplotního koeficientu β_1 rychle klesá. Ve zředěných vodných roztocích vodivost s teplotou vzrůstá o 2 až 2,5 % na Kelvin. [6]

2.3.1.3 Způsoby měření

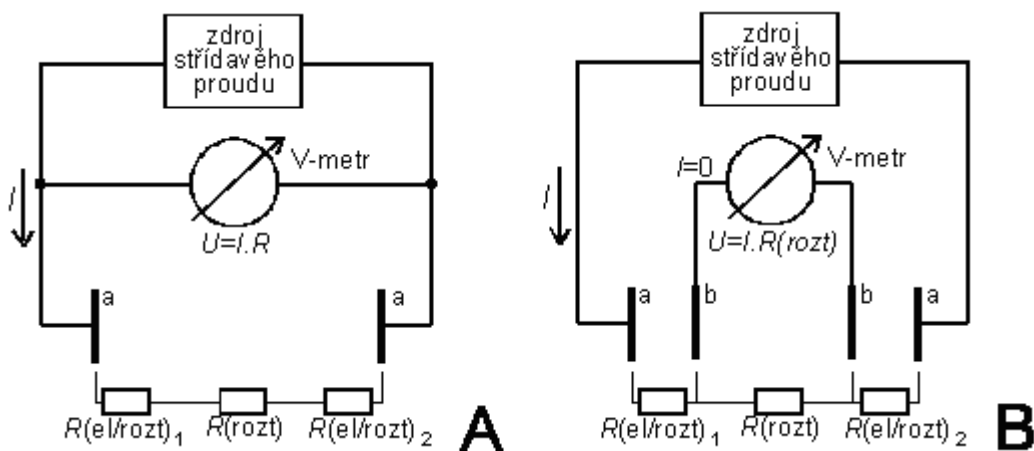
Podle účelu, ke kterému mají vodivostní sondy sloužit, existuje několik různých konstrukcí. Pro spojitě monitorování se používají sondy průtokové, pro jednorázová měření vodivosti sondy ponorné. Elektrody jsou nejčastěji vyrobeny

z korozivzdorné oceli, titanopaladiové slitiny nebo grafitu. Kromě toho jsou za účelem snížení polarizace zpravidla elektrolyticky pokrývány platinovou černí. Jak již bylo řečeno, je vodivost výrazně závislá na teplotě. Z toho důvodu se používají pro přesná měření sondy termostatované. U moderních konduktometrů je teplota roztoku měřena čidlem často integrovaným ve vodivostní sondě. Teplotní změny vodivosti analyzovaného roztoku jsou následně v těchto přístrojích korigovány automaticky. [1]



Obrázek 2.3: Příklady konstrukčních uspořádání vodivostních sond (A průtoková, B ponorná) [1]

Další možností volby je použití buď dvouelektrodového uspořádání vodivostní sondy, nebo výhodnějšího uspořádání čtyřelektrodového. Jak ukazuje obrázek 2.4, u dvouelektrodového uspořádání se mohou vlivem procházejícího proudu na elektrodách vytvářet různé povlaky, jež přispívají k celkovému odporu sondy.



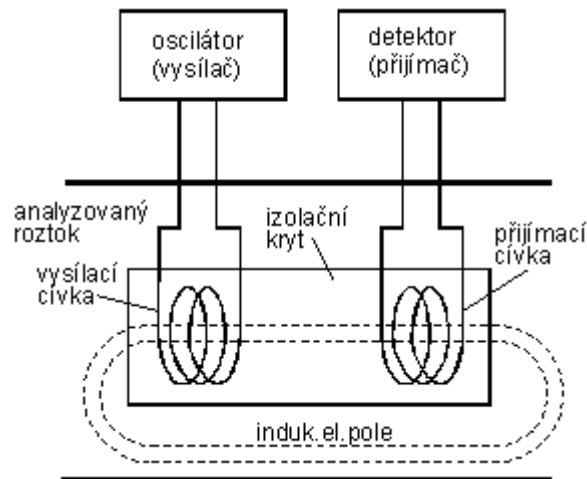
Obrázek 2.4: Schéma dvouelektrodové (A) a čtyřelektrodové (B) vodivostní sondy [1]

Velikost měřeného napětí pak nezávisí jen na odporu analyzovaného roztoku, ale na celkovém odporu v sondě. Ve čtyřelektrodovém uspořádání je mezi dvojicí elektrod, jimiž prochází střídavý proud, vložena další dvojice elektrod, na nichž je měřeno napětí za bezproudého stavu. Takto změřené napětí pak závisí pouze na odporu analyzovaného roztoku, protože není ovlivňováno jevy, ke kterým dochází na elektrodách, jimiž prochází proud. [1]

Napětí na měřicích elektrodách je snímáno zesilovačem s velkou vstupní impedancí minimalizující procházející proud, a tím i polarizaci elektrod (C_p a R_p). Polarizace, ke které dochází na proudových elektrodách, měření neovlivňuje. Jestliže je napájecí proud regulován, pak při znečištění proudových elektrod napětí na nich vzrůstá, čehož je možné využít pro diagnostické účely (např. signalizace potřeby čištění elektrod). [6]

Poslední možností je použití bezelektrodového indukčnostního měření vodivosti, čímž úplně zamezíme kontaktu vodivostních elektrod s analyzovaným roztokem. Jak ukazuje obrázek 2.5, jsou v analyzovaném roztoku ponořeny dvě cívky, zcela izolované od roztoku elektricky nevodivým materiálem (plast). Na tzv. vysílací cívku je přiveden z oscilátoru střídavý proud o frekvenci řádově desítek kHz. Měřidlo, které je naopak připojeno k tzv. cívice přijímací, měří proud v této cívice indukovaný. Jeho velikost je přímo úměrná vodivosti analyzovaného roztoku.

V principu jde o transformátor, v němž je vysílací cívka primárním vinutím, přijímací cívka vinutím sekundárním a jádrem je analyzovaný roztok. [1]



Obrázek 2.5: Princip bezelektrodového měření vodivosti [1]

2.3.1.4 Použití nízkofrekvenční konduktometrie

Pomocí konduktometrie lze určovat koncentraci látek v roztoku. Toho lze docílit dvěma metodami. Metoda přímé konduktometrie se zabývá stanovením látek ze změřené vodivosti. Pokud je konduktometricky zjišťována pouze změna vodivosti v průběhu titrace a koncentrace látky je určována ze spotřeby odměrného roztoku, jde o tzv. konduktometrickou titraci.

V praxi se používá především přímá konduktometrie, která nachází využití v mnoha oblastech. V laboratořích se většinou používají konduktometry, jejichž elektrody jsou přímo ponořeny do analyzovaného roztoku. Jejich náročnější údržba je však kompenzována nižší pořizovací cenou. V průmyslových aplikacích je na prvním místě spolehlivost, proto je dáována přednost bezelektrodovému měření vodivosti. Tyto přístroje jsou však podstatně složitější a tudíž i dražší.

Přímá konduktometrie nachází využití především v indikaci čistoty destilované či deionizované vody, v určování obsahu minerálních látek v roztocích neelektrolytů, v laboratořích k určování řady fyzikálně-chemických konstant a další.

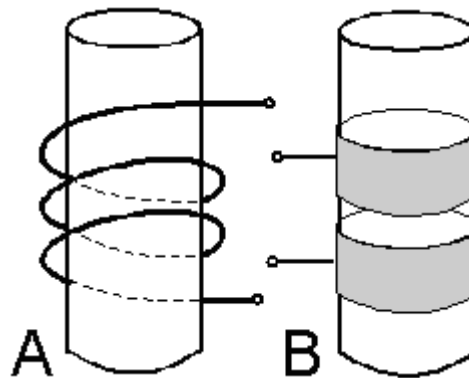
[1]

2.3.2 Vysokofrekvenční konduktometrie

Při vysokofrekvenční konduktometrii se používá také střídavého proudu, avšak o podstatně větší frekvenci. Jedná se o jednotky až stovky MHz, což odpovídá oblasti radiových vln. Při takto vysoké frekvenci prochází elektromagnetická energie stěnami sondy, proto mohou být vodivostní elektrody umístěny vně sondy, kde nejsou v přímém kontaktu s analyzovaným roztokem. To je považováno za hlavní přednost oproti konduktometrii nízkofrekvenční. [1]

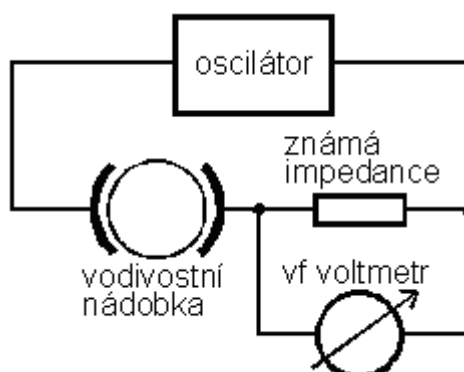
2.3.2.1 Princip měření

Zdrojem vysokofrekvenčního proudu o konstantní frekvenci je elektronický oscilátor, k němuž je připojena vodivostní sonda. Nejčastěji se používají kapacitní sondy, méně často pak sondy indukčnostní, viz obrázek 2.6. Obě sondy jsou vyrobeny z tenkého skla a liší se pouze v provedení vodivostních elektrod. Většinou jsou vodivostní sondy dodávány příslušným výrobcem konduktometru, jako nedílná součást přístroje. [1]



Obrázek 2.6: Indukčnostní (A) a kapacitní (B) vodivostní sonda [1]

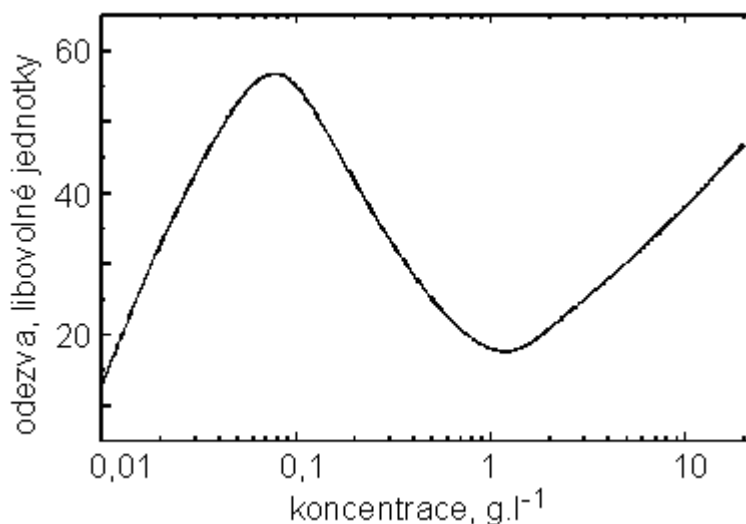
Princip měření je založen na změně impedance sondy v důsledku změny chemického složení roztoku. To způsobí změnu proudu procházejícího obvodem a tím i úbytek napětí na známé impedanci zařazené v sérii s vodivostní sondou. Tento úbytek je následně snímán vysokofrekvenčním voltmetrem a je přímo úměrný vodivosti roztoku. [1]



Obrázek 2.7: Příklad zapojení vf-konduktometru [1]

2.3.2.2 Použití vysokofrekvenční konduktometrie

Vysokofrekvenční vodivost má komplexní charakter, což se projevuje značnou nelinearitou závislosti vodivosti na koncentraci analytu. Příklad měření pomocí vf-konduktometru je na obrázku 2.8. Z něho vyplývá, že konduktometr lze použít pouze ve třech oblastech vodivosti, v nichž je odezva lineární funkcí vodivosti. [1]



Obrázek 2.8: Závislost odezvy vysokofrekvenčního konduktometru na koncentraci kyseliny sírové [1]

Podobně jako nf-konduktometrie se i vf-konduktometrie používá pro přímé stanovení složení roztoku ze změřených vodivostí. Při aplikacích v průmyslu, kde se

užívá snímačů vodivosti pro stanovení obsahu kyselin, louhů a solí se tohoto dosáhne na základě kalibračních křivek.

Protože se vodivostní elektrody nacházejí vně vodivostní sondy, lze měřit vodivost látek i v uzavřených soustavách, např. v potrubí, zatavených ampulích a také v agresivních, či jinak pro kontaktní konduktometrii nepříznivých prostředích, např. vodivost tavenin. Je patrné, že hlavní využití vf-konduktometrie je v oblasti průmyslového měření. [1]

3. MĚŘENÍ TEPLoty ROZTOKŮ

3.1 DEFINICE

Protože je teplota nejčastěji měřenou veličinou, existuje pro její určování mnoho principů, typů přístrojů a aplikací. Teplotní stupnice je definována na základě trojného bodu vody (rovnovážný stav tří skupenství vody – led, voda, sytá vodní pára), jehož hodnota byla pevně stanovena na 273,16 K. Základní jednotkou teploty je Kelvin [K]. Další jednotkou teploty je stupeň Celsia [°C], který je definován vztahem:

$$\vartheta = T - T_0, \quad (7)$$

kde $T_0 = 273,15$ K.

Teplota se v průmyslových aplikacích nejčastěji měří kontaktními metodami. Pokud pomineme klasické rtuťové a kovové teploměry, uplatňují se obvykle měřicí řetězce sestavené ze snímače, převodníku a vyhodnocovací jednotky. Samotné měření teploty zajišťuje snímač, který je v bezprostředním styku s měřeným médiem. Signál ze snímače následně přechází do převodníku, v němž je zesílen, upraven a většinou také digitalizován. Nakonec jej vyhodnocovací jednotka ve vhodném tvaru zobrazuje a dále zpracovává. Převodník a vyhodnocovací jednotka zpravidla tvoří jeden celek, který se v poslední době často nabízí jako tzv. inteligentní převodník teploty. [2]

3.2 DĚLENÍ SENZORŮ TEPLoty

Senzory teploty dělíme podle kontaktu s měřenou látkou na:

1. Senzory pro dotykové měření teploty:

- elektrické (odporové kovové, odporové polovodičové, polovodičové s PN přechodem, termoelektrické, krystalové)
- dilatační (kapalinové, plynové, parní, bimetalové)
- speciální (akustické, šumové, magnetické, tekuté krystaly, teploměrné barvy, aj)

2. Senzory pro bezdotykové měření teploty:

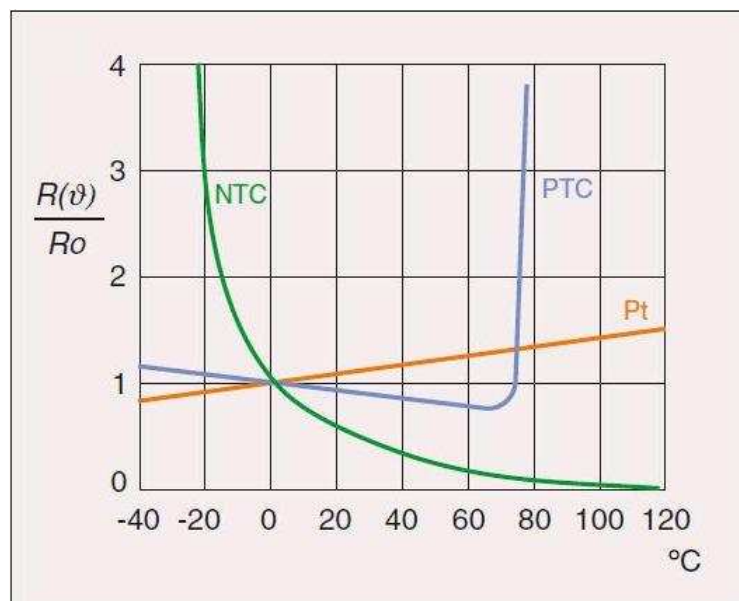
- tepelné
- kvantové
- akustické (ultrazvukové)

3.3 TERMISTORY

Termistory jsou kontaktní polovodičové senzory, jejichž elektrický odpor se mění s teplotou. Jsou mnohem citlivější oproti kovovým odporovým čidlům, ale jejich nevýhodou je menší časová stabilita, nižší teplotní rozsah a značná nelinearita. Podle struktury se dělí na amorfnní a polykrystalické. Jejich teplotní rozsah je rozdílný dle použitého materiálu. Vyrábějí se ve dvou variantách:

3.3.1 NTC termistory

NTC termistory mají záporný teplotní součinitel odporu. Jsou vyráběny práškovou technologií ze směsi oxidů kovů. Teplotní rozsahy běžných termistorů se pohybují v oblasti od $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $150\text{ }^{\circ}\text{C}$. Avšak lze se setkat i s termistory s extrémními rozsahy v oblasti nízkých teplot od $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$ a vysokých teplot do $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Teplotní závislost odporu NTC termistorů v porovnání s kovovými senzory je na obrázku 3.1.



Obrázek 3.1: Teplotní závislost odporových senzorů teploty [7]

Závislost odporu NTC termistoru na teplotě je dána přibližným vztahem:

$$R = A * e^{\frac{B}{T}} \quad (8)$$

Úpravou předchozího vztahu (8) pro dvě teploty dostaneme vztah:

$$R_1 = R_r * e^{B * \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_r} \right)} \quad (9)$$

kde R_1 je odpor termistoru při teplotě T_1 ,

R_r odpor termistoru při teplotě T_r (obvykle 25 °C),

B [K] teplotní konstanta (závislá na materiálu),

A [Ω] konstanta závislá na geometrickém tvaru a materiálu.

Hodnoty teplotních konstant se u vyráběných termistorů pohybují v rozsahu 1500 K < B < 7000 K a hodnoty jejich odporů $1 \Omega < R_r < 1 M\Omega$.

Pro stanovení teplotní konstanty B se měření provádí při teplotách $T_1 = 291,15$ K a $T_2 = 358,15$ K. Teplotní konstanta je pro tyto hodnoty následně vypočtena ze vztahu (9). Pro takto zvolené teploty umožňuje konstanta B měření teploty v rozsahu od 0 °C do 100 °C s chybou ± 1 K. [2]

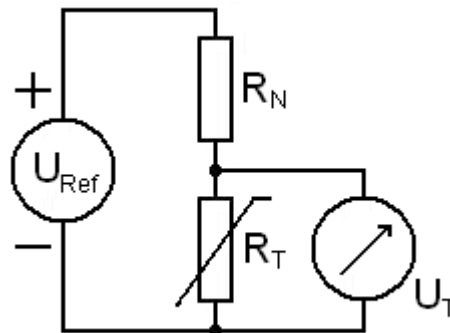
3.3.2 PTC termistory

PTC termistory (pozistory) jsou termistory, které mají kladný teplotní součinitel odporu. Jsou vyráběny z polykrystalické feroelektrické keramiky (např. titaničitan barnatý). Odpor pozistoru se stoupající teplotou nejprve mírně klesá. Po překročení *Curieovy teploty* ϑ_j se u něj projeví exponenciální nárůst rezistivity materiálu v závislosti na teplotě, viz obrázek 3.1. Jakmile však vystoupá o cca 3 řády, začne jeho hodnota odporu opět mírně klesat.

Hodnotu ϑ_j je možné nastavit chemickým složením při výrobě od 60 °C do 180 °C. Pozistory se obvykle využívají jako dvoustavové senzory např. pro indikaci překročení maximálně přípustné teploty. [2]

3.4 MĚŘICÍ OBVOD

Nejjednodušším obvodem, kterým je možné vyhodnotit závislost odporu termistoru na teplotě je bezesporu napěťový dělič, jehož zapojení je na obrázku 3.2.



Obrázek 3.2: Teplotně závislý dělič napětí

Jedná se o dva rezistory zapojené do série a připojené na konstantní zdroj stejnosměrného napětí U_{Ref} . Rezistor R_N , jehož hodnotu odporu známe, je teplotně nezávislý. Naopak termistor R_T je část napěťového děliče teplotně závislá. Vlivem teploty se mění jeho hodnota odporu a tím i dělicí poměr obou rezistorů. Pro úbytek napětí na termistoru R_T platí

$$U_T = \frac{R_T}{R_N + R_T} U_{Ref} \quad (10)$$

Jelikož se jedná o nezátížený dělič napětí, je nutné vyhodnocovat úbytek napětí U_T měřicím přístrojem s podstatně větším vstupním odporem, než je hodnota termistoru R_T aby nedocházelo k dodatečné změně dělicího poměru po přepojení tohoto přístroje.

4. LCR METR HIOKI



Obrázek 4.1: LCR metr HIOKI HiTester 3532-50 [13]

4.1 SEZNÁMENÍ S PŘÍSTROJEM

LCR metr HIOKI HiTester 3532-50 je přístroj určený k měření impedance. Jeho snadné ovládání je zajištěno dotykovým displejem v přední části, s jehož pomocí lze přístroj nastavovat a současně zobrazovat až čtyři měřené veličiny. Na výběr máme ze čtrnácti veličin, které je schopen LCR metr změřit. Jsou jimi: $|Z|$, $|Y|$, θ , C_s , C_p , D , L_s , L_p , Q , R_s , R_p , G , X a B .

Veličina	Rozsah přístroje
$ Z , R, X$	10,00 m Ω – 200,00 M Ω
θ	-180 ° - 180 °
Y, G, B	99,999 S – 5,0000 nS
L	32,000 nH – 750,00 kH
C	0,3200 pF – 370,00 mF
D	0,00001 – 9,9999
Q	0,01 – 999,99

Tabulka 4.1: Přehled rozsahů měřitelných veličin [9]

Měřicí frekvence lze u tohoto modelu nastavit v rozsahu od 42 Hz do 5 MHz ve vysokém rozlišení. Další předností je možnost nastavení jednoho ze tří testovacích signálů, jimiž jsou: napětí (V), konstantní napětí (CV) a konstantní proud (CC). Rychlost, se kterou je možno jednotlivé veličiny změřit je taktéž možno nastavit v několika úrovních. Avšak je velmi závislá na frekvenci použité k měření, počtu zjišťovaných parametrů a přesnosti, s jakou chceme dané výsledky mít. V nejrychlejších případech je hodnota zjištěna přibližně za 5 ms (FAST mode). Co se týče přesnosti měření, výrobce udává nejlepší dosažitelnou jako $\pm 0,08\%$ měřené veličiny.

4.2 CHYBA MĚŘENÍ

Chyba měření se počítá z chyby základní, která je založena na přesnosti měření impedance Z (%) a fázového úhlu θ ($^\circ$), a z následujících koeficientů:

$$\text{Chyba měření} = \text{Základní chyba} * C * D + E \quad (9)$$

Kde:

Základní chyba – vypočítává se ze dvou parametrů A a B, uvedených v tabulce koeficientů přesnosti. Jak tyto tabulky, tak vzorce pro její výpočet lze najít v manuálu k tomuto přístroji, viz [9].

C – koeficient rychlosti měření, jehož hodnota klesá s nižší rychlostí měření (FAST – 5, SLOW2 – 1)

D – koeficient délky přírodních vodičů – je závislý na měřicí frekvenci (pro $0m = 1$)

E – teplotní koeficient – vypočítává se ze základní chyby v závislosti na teplotě okolí (pro $23^\circ = 0$)

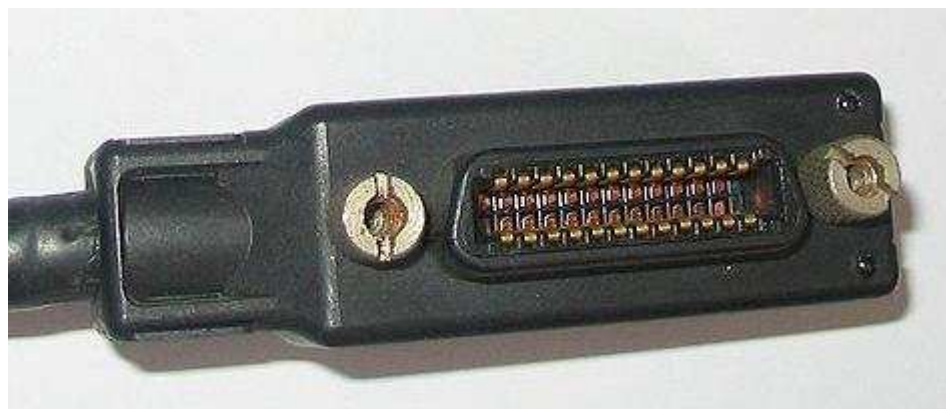
4.3 DALŠÍ FUNKCE

Mezi další užitečné funkce, které jsou v tomto přístroji implementovány, patří například kompenzace přírodních vodičů, monitorování napětí a proudu obvodem, uzamykání kláves, nebo porovnávací obvod. Těchto funkcí společně s parametry zobrazovanými na displeji může být uloženo do paměti a následně vyvoláno až 30.

Pro implementaci přístroje do měřicího systému je možno osadit kartou s rozhraním RS 232-C, jehož výhodou je použití ve většině počítačů. Nebo, jako v našem případě, kartou s rozhraním GP-IB (IEEE 488.2), což je v současné době nejrozšířenější soustava pro automatizaci měřicích a testovacích procesů.

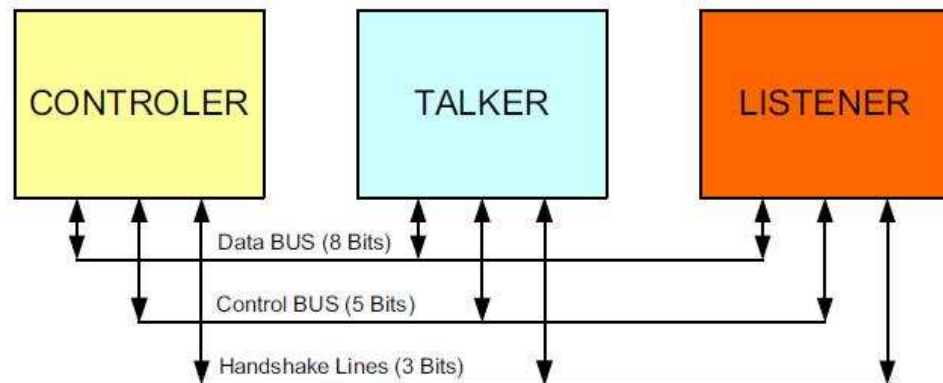
4.3.1 Standard GP-IB (IEEE 488.2)

Standard GP-IB (General Purpose Interface Bus), někdy též nazývaný IEEE 488.2 je univerzální měřicí systém, který umožňuje přenos dat mezi dvěma, či více přístroji. Vznikl na základě firemní propojovací soustavy firmy Hewlett-Packard již v roce 1972. I když se na první pohled zdá tato propojovací soustava již zastaralá, její hlavní výhodou je stále celosvětová rozšířenost. Mezi její negativní vlastnosti patří omezení vzdálenosti, rychlost výměny dat a hlavně mnohavodičové propojovací cesty a tím i poměrně velká cena jednotlivých komponent.



Obrázek 4.2: Konektor GP-IB AMPHENOL 24 [14]

GP-IB je soustava určená pro sestavení flexibilních měřicích systémů v rozsahu jedné či několika laboratoří. Skládá se z autonomních přístrojů, které jsou vzájemně propojeny sběrnici liniového typu s PC, které zastává úlohu tzv. řídiče (Controller). K vlastnímu řízení celé soustavy slouží systém přenášení zpráv. Tyto zprávy se přenášejí sérioparalelně po bytech. Maximální rychlost přenosu je 1 MB (v pozdějším rozšíření až 8MB), přičemž rychlost se přizpůsobí nejpomalejšímu příjemci. Samotná komunikace probíhá tak, že v určitém okamžiku je v soustavě vždy pouze jeden mluvčí (Talker). Příjemců může však být i více (Listener).



Obrázek 4.3: Zapojení systému GP-IB [11]

Mezi další charakteristické znaky GP-IB patří možnost připojení až patnácti měřicích přístrojů. Vzdálenost mezi nimi by pak neměla přesáhnout 4 m. Maximální délka sběrnice má být 20 m, avšak použitím tzv. extendrů ji lze zvýšit až na cca. 1000 m. Sběrnice má celkem 24 vodičů, z nichž osm slouží k přenosu dat, tři pro řízení přenosu dat, pět k celkovému řízení rozhraní a zbylých osm má funkci zemnicích vodičů. Na sběrnici se používá negativní logika, tj. vysoká úroveň odpovídá log. 0, nízká log. 1.

5. WTW TETRACON 325

TetraCon 325 od německé firmy WTW je čtyřelektrodová měřicí sonda určená k měření vodivosti kapalin. Je vyrobena z epoxidu, čímž je dosaženo velké odolnosti vůči mechanickému poškození. Samotné elektrody jsou vyrobeny z proti oděru odolného grafitu. Tím je zajištěna dlouhodobá stálost konstanty elektrody. Její velkou předností je, že obsahuje vestavěné teplotní čidlo (NTC 30) a dále svou konstrukcí automaticky kompenzuje přechodové odpory na plochách elektrod při jejich znečištění.

Jak uvádí výrobce, je použití této měřicí sondy velmi široké. Např. v měření vodivosti podzemních a odpadních vod, při kontrole kvality pitné vody, v chovu ryb a v chemickém průmyslu pro měření pod velkým tlakem, zejména v kyselém prostředí atd.

Materiál elektrod	Grafit
Materiál těla cely	Epoxid
Celková délka	162,5 mm
Průměr těla	15,3 mm
Konstanta cely	$K = 0,475 \text{ cm}^{-1}$
Délka kabelu	1,5 m
Měřicí rozsah	1 $\mu\text{S/cm}$... 2 S/cm
Teplotní rozsah	-5 ... 80 °C
Max. povolený přetlak	200 kPa
Odpor teplotního čidla	30 k Ω / 25 °C
Přesnost teplotního čidla	$\pm 0,2 \text{ K}$

Tabulka 5.1: Technická data sondy [10]



Obrázek 5.1: Popis sondy [10]

1	Napět'ové elektrody (vnitřek, 2x)
2	Proudové elektrody (vnější kroužek, 2x)
3	Teplotní čidlo v grafitovém pouzdře
4	Tělo
5	Připojovací hlavice

Tabulka 5.2: Jednotlivé části sondy [10]

6. NI USB-6008

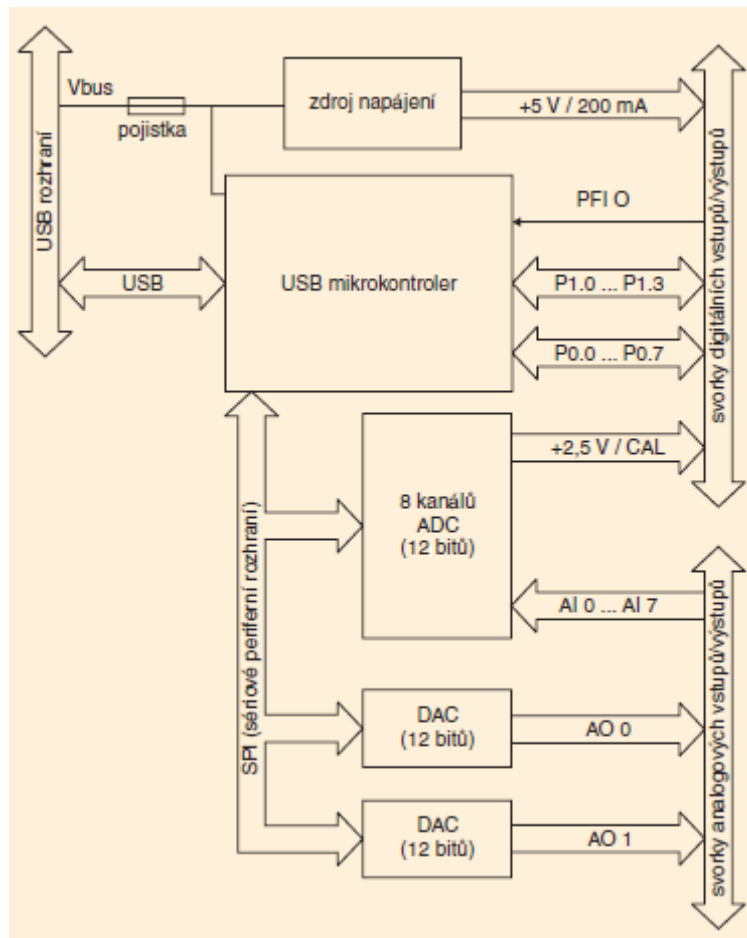
NI USB-6008 (obrázek 6.1) je multifunkční karta určená ke sběru dat (DAQ) v grafickém prostředí LabVIEW. Jedná se patrně o nejmenší a současně nejlevnější profesionální zařízení s touto funkcí od firmy National Instruments. Karta se připojuje k počítači kabelem USB přes stejnojmenné komunikační rozhraní, ze kterého je také napájena.



Obrázek 6.1: Multifunkční karta NI USB-6008 [14]

Karta je vybavena osmi analogovými vstupy (AI 0 až AI7), dvěma analogovými výstupy (AO 0 a AO 1), dvanácti obousměrnými digitálními linkami (P0.0 až P1.3) a jedním 32bitovým čítačem (vstup PFI 0) využitelným také jako vstup pro spouštění (trigger). Frekvence zpracování vstupních vzorků je až 10 000 za sekundu.

Analogové vstupy AI lze zapojit buď jako 8 nesymetrických (proti společné zemi) nebo jako čtyři diferenciální (symetrické) kanály. Na jejich vstupy lze připojit maximální napětí ± 20 V. Analogové výstupy jsou vzájemně nezávislé a každý, z nichž obsahuje 12bitový D/A převodník (0 až 5 V) Na vnější konektor je také vyvedeno napětí +5 V (získané z USB) a referenční napětí +2,5 V ze stabilizátoru pro A/D převodník. [8]



Obrázek 6.2: Blokové schéma multifunkční karty [8]

Na CD dodávaném s kartou USB-6008 se nachází instalace NI-DAQmx pro OS Windows a také knihovna souborů podpory velkého množství zařízení DAQ pro prostředí LabVIEW. Instalaci je nutné provést dříve, než je karta připojena k počítači. Po úspěšné instalaci podpůrného softwaru lze kartu připojit kabelem USB k počítači a po automatickém doinstalování příslušného ovladače je zařízení připraveno k použití. [8]

7. LABVIEW

7.1 SEZNÁMENÍ S PROSTŘEDÍM

Programovací a vývojové prostředí LabVIEW je produktem americké firmy National Instruments, která je největším výrobcem v oblasti virtuální instrumentace. Jedná se o komplexní systém sloužící nejen k programování systémů pro měření a analýzu signálů, ale také k řízení a vizualizaci technologických procesů různé složitosti a mnoha dalších.

LabVIEW je založeno na myšlence tzv. virtuálních přístrojů, protože svým vzhledem a funkcí jsou velice podobné skutečným měřicím přístrojům. Jejich hlavním cílem je dočasné, nebo i trvalé nahrazení technických prostředků, které jsou finančně, prostorově a mnohdy i časově náročné.

Pojem virtuální instrumentace se promítl i do souborů, se kterými se v LabVIEW pracuje. Nazývají se virtuální instrumenty (přístroje) a toto označení se taktéž objevuje i v jejich příponě názvu souboru – např. Measure.vi.

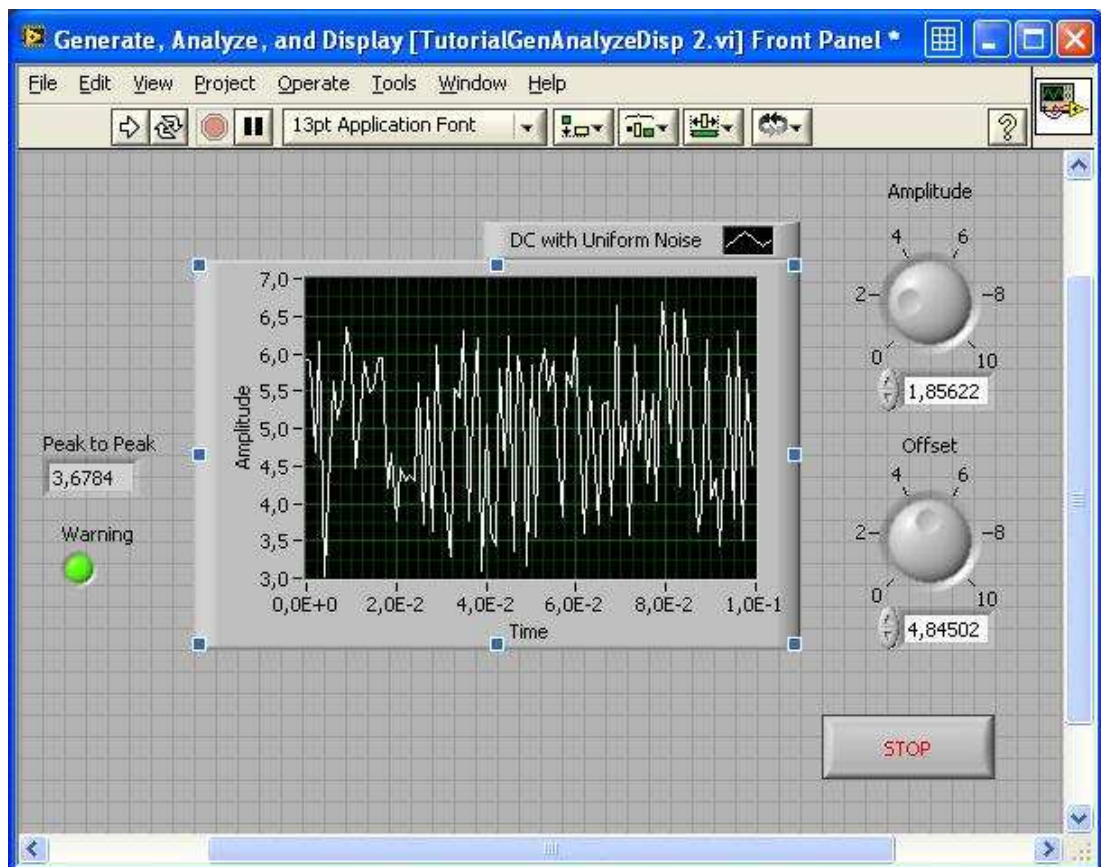
Systém LabVIEW je celý orientován graficky, a to jak na úrovni ovládání prostředí, tak samotné tvorby programů. Proto je někdy označován, jako G-jazyk („grafický jazyk“). Programování v jazyce G je oproti textově orientovaným jazykům dosti odlišné, protože je program řízen tokem dat a nikoliv tokem příkazů. Avšak po jeho spuštění je rychlost řešení úkolu srovnatelná s rychlostí jazyka C. Na druhou stranu je nutné mít pro běh již hotového programu buď nainstalováno celé prostředí LabVIEW, nebo alespoň Run-Time modul, který zajistí jeho funkci. K vytváření těchto programů obsahuje LabVIEW širokou paletu nástrojů pro čtení, analýzu, ukládání a zobrazení dat, ale také nástroje pro vyhledávání a odstraňování chyb v programu.

7.2 UŽIVATELSKÉ ROZHŘANÍ

Každý virtuální přístroj se skládá ze dvou sdužených oken. Z uživatelského rozhraní, které se nazývá čelní panel přístroje a z blokového diagramu, který je zdrojovým kódem přístroje.

7.2.1 Čelní panel

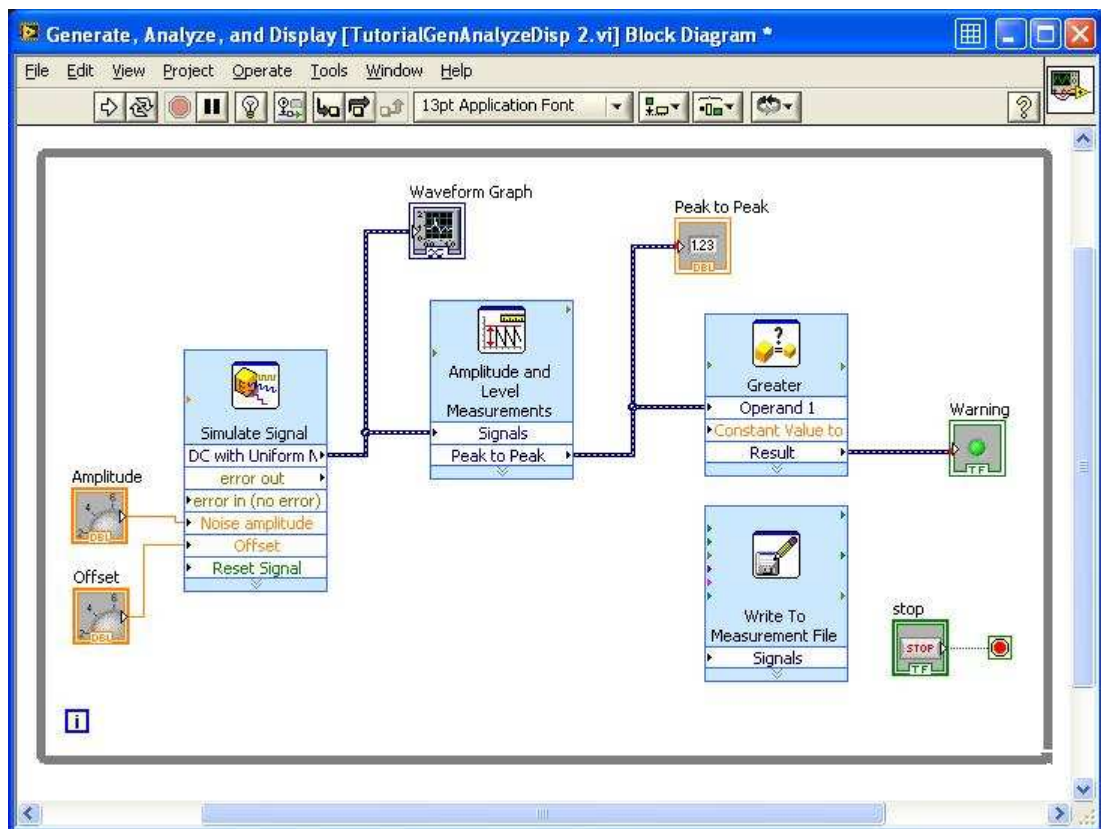
Čelní panel určuje vzhled a chování dané aplikace. Přes jeho ovládací a indikační prvky lze řídit běh této aplikace, zadávat parametry a získávat informace o zpracovaných výsledcích. Na ploše čelního panelu lze pracovat se širokou škálou vizualizačních prvků, které se dělí na dvě základní skupiny: vstupy a výstupy. Vstupy mohou mít různé podoby ovladačů, jako např. tlačítko, otočný knoflík, textový nebo číselný ovladač a další. Výstupy mohou mít zase různé podoby zobrazovačů, jako je např. kontrolka, ručkové měřidlo, textový nebo číselný zobrazovač, různé typy grafů a další.



Obrázek 7.1: Příklad čelního panelu virtuálního přístroje

7.2.2 Blokový diagram

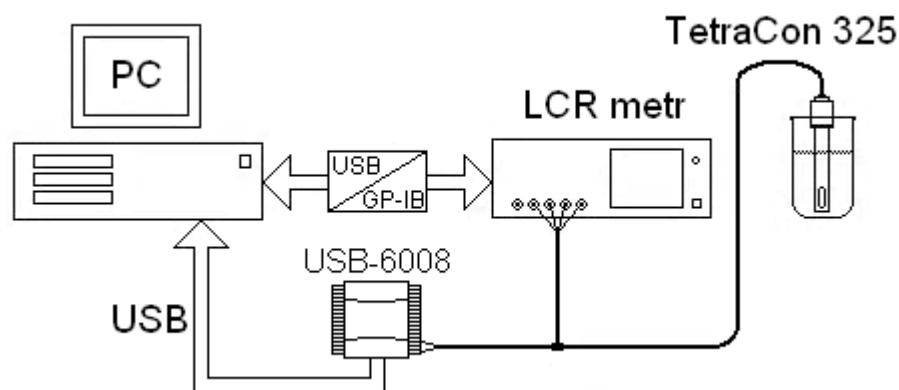
Blokový diagram je tvořen vzájemně propojenými objekty, které vykonávají určitou funkci. Na jeho ploše je uživatelem definován vlastní algoritmus programu. Ten se vytváří z prvků palety knihovnických prvků *Functions*, které jsou svázány s prvky čelního panelu, s konstantami zadanými z knihovny *Functions* nebo s lokálními či globálními proměnnými. Ve skutečnosti je blokový diagram přímo spustitelným kódem, který je překládán během psaní s možností okamžité zpětné vazby, při vzniku chyby, jako například při připojení neslučitelných datových typů. [4]



Obrázek 7.2: Příklad blokového diagramu virtuálního přístroje

8. POPIS MĚŘICÍHO SYSTÉMU

Zapojení celého měřicího systému je názorné z obrázku 8.1.



Obrázek 8.1: Zapojení systému pro měření vodivosti kapalin

V nádobě, jež obsahuje analyzovaný roztok, je umístěna vodivostní sonda. Ta je připojena pomocí redukce čtyřmi stíněnými kabely s oddělenými napěťovými a proudovými svorkami k LCR metru za účelem měření vodivosti roztoku a dvěma vodiči k multifunkční kartě USB-6008 kvůli měření teploty roztoku.

Protože nelze připojit termistor vodivostní sondy přímo na multifunkční kartu, je využito referenčního napětí +2,5 V k napájení napěťového děliče (viz kapitola 3.4). S jeho pomocí je změna odporu termistoru převáděna na úbytek napětí, který je následně přiveden na analogový vstup AI 1 multifunkční karty. Uvnitř je analogová hodnota napětí 12bitovým A/D převodníkem převedena na číslicovou informaci ve formátu dat a následně poslána po sběrnici USB do PC, kde je nainstalováno prostředí LabVIEW se spuštěným uživatelským programem. To za pomoci ovladačů od výrobce přečte informaci o měřené teplotě a umožní uživateli její další zpracování.

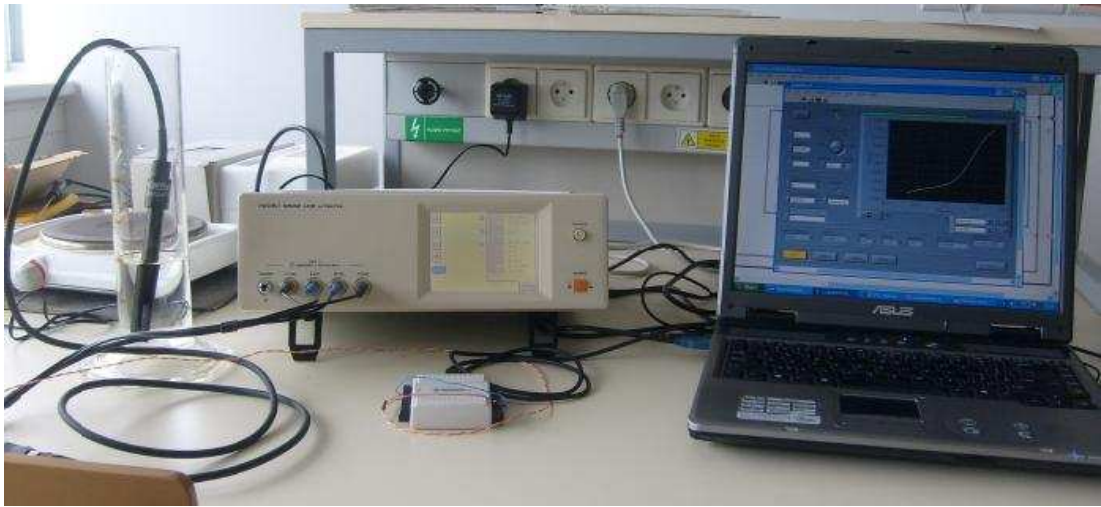
LCR metr je ovládán pomocí uvnitř osazené karty, zajišťující komunikaci s rozhraním GP-IB. Karta je dále propojena přes GP-IB/USB převodník s počítačem. Použití tohoto převodníku je velmi výhodné hned z několika důvodů. Především není zapotřebí instalace žádné komunikační karty do PC a také převodník nevyžaduje žádnou instalaci, nastavení, ani externí napájení.



Obrázek 8.2: Převodník GP-IB/USB od firmy National Instruments [14]

Na počítači, ke kterému je opět přes sběrnici USB převodník připojen, je nainstalováno již zmíněné prostředí LabVIEW a v něm spuštěn uživatelský program. Zde si veškerou komunikaci spojenou s řízením sběrnice, ovládáním LCR metru a získáváním naměřených dat musí vytvořit uživatel. Avšak aplikace komunikuje po sběrnici GP-IB za pomoci ovladačů, které vytvořil výrobce LCR metru ke svému produktu a jsou volně ke stažení na jeho webu [9]. Tyto ovladače jsou postaveny na několika předdefinovaných blocích, určených pro čtení a zápis přístrojových funkcí, které jsou dílem průmyslového standardu VISA.

VISA (Virtual Instrument Software Architecture) je, jak již bylo řečeno, průmyslový standard definovaný VXI plug&play Systems Alliance. Tento standard umožňuje jednotnou komunikaci mezi PC a měřicími přístroji různých výrobců. To má za následek snížení nákladů a času nutného pro realizaci měřicího systému.



Obrázek 8.3: Skutečné zapojení pracoviště

9. MĚŘICÍ SOFTWARE - KONDUKTOMETR

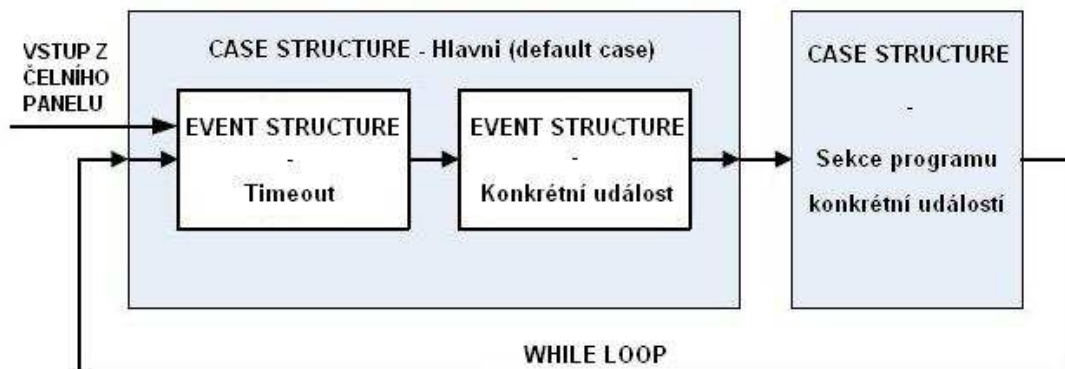
Aby mohl uživatel LCR metr pohodlně ovládat, analyzovat z něj naměřená data a tyto data dále zpracovávat, je pro tento účel vytvořen v programovacím a vývojovém prostředí LabVIEW měřicí software s názvem Konduktometr.vi, který v sobě tyto schopnosti slučuje v jeden celek. Software je naprogramován za účelem měření vodivosti kapalin, avšak po provedení několika menších úprav jej lze použít podle možností přístroje i k měření dalších veličin.

Hlavní funkce měřicího softwaru jsou:

1. navazovat a udržovat komunikaci s LCR metrem
2. nastavovat a zobrazovat parametry nutné k měření (např. frekvence a velikost napájecího signálu)
3. zobrazovat naměřené hodnoty a podle možností je i dále zpracovávat

9.1 BLOKOVÝ DIAGRAM

Program je navržen na principu stavového automatu, jehož funkcí je přecházet do předem definovaných stavů na základě informace přivedené na jeho vstup. Naším vstupem je čelní panel, ze kterého přicházejí jednotlivé události, na jejichž základě se jednotlivé části programu provádějí, viz obrázek 9.1. Jádrem celé aplikace je struktura *CASE STRUCTURE*, která zároveň plní dvě funkce. Odděluje od sebe jednotlivé sekce programu, ale především v sobě ukrývá část zvanou *Hlavní*, která obsahuje strukturu *EVENT STRUCTURE*. Ta po spuštění programu čeká ve svém výchozím stavu *Timeout* na příchozí událost z čelního panelu. Na základě informace, o jakou událost se jedná, následně uvolní příslušnou sekci programu k provedení. Po jejím dokončení se program vrací opět do stavu *Timeout*, v němž čeká na další událost. Aby bylo možno tento cyklus neustále opakovat, jsou obě struktury umístěny ve smyčce *WHILE LOOP*, jejíž ukončení se děje pouze skončením běhu programu.



Obrázek 9.1: Princip činnosti programu

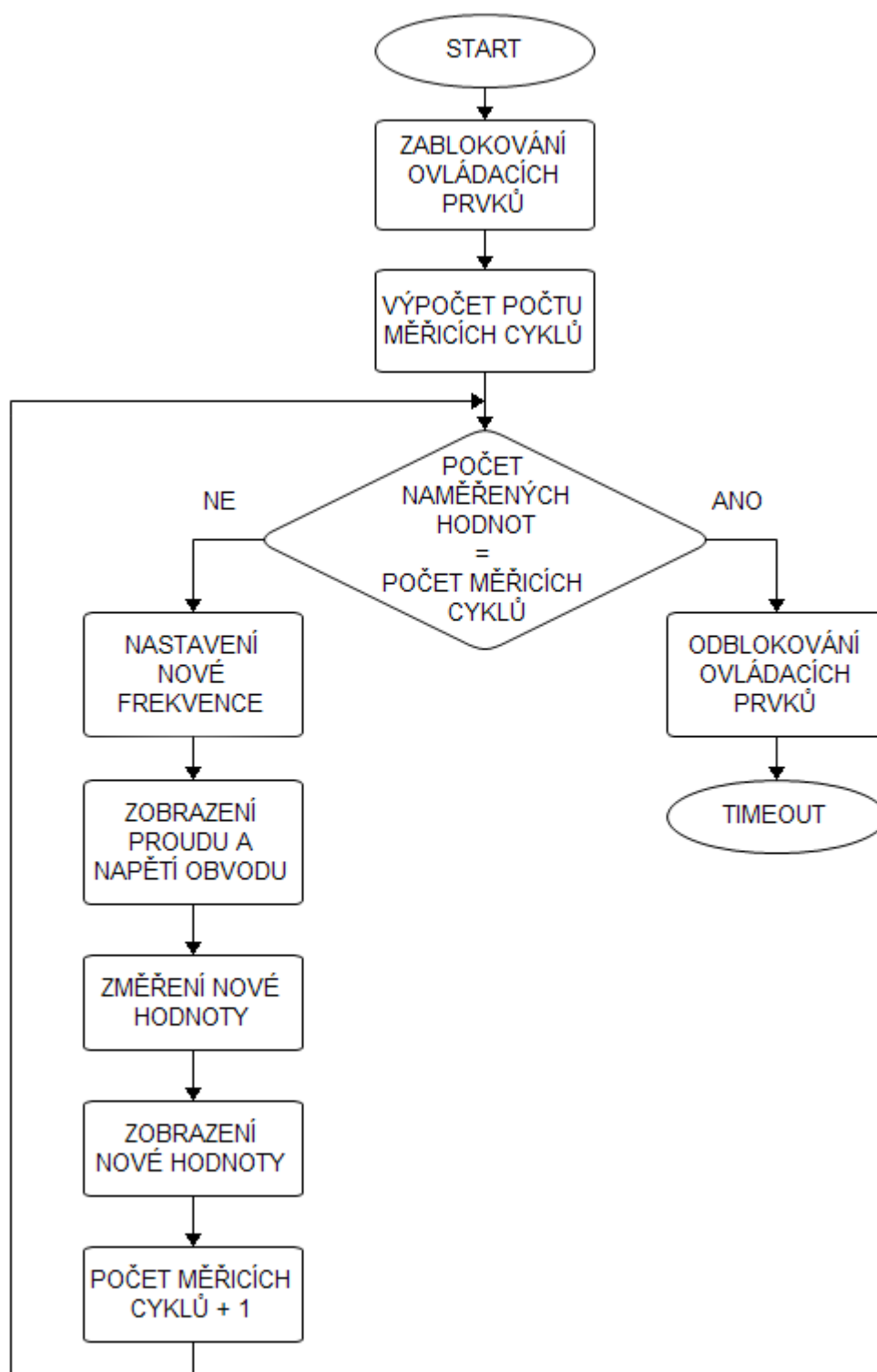
9.1.1 Příprava na měření

Pro dosažení kýženého výsledku, je nutné před spuštěním měření provést několik nutných kroků, jimiž se vyhneme pozdějším problémům s aplikací. Před tím, než je spuštěn samotný program, je nutné mít propojen LCR metr s PC pomocí sběrnice GP-IB, nebo jako v našem případě za pomoci GP-IB/USB převodníku, dále mít připojenu měřicí kartu USB-6008 pomocí sběrnice USB s PC a všechny přístroje spuštěny. V opačném případě by nedošlo k navázání spojení. Po spuštění programu se spustí inicializační blok *Init*, který má za úkol nejdříve navázat komunikaci s LCR metrem, což je indikováno zelenou kontrolkou *Připojeno*. Pokud tomu tak není, program po spuštění zahlásí chybu v komunikaci a ihned se vypne. Po úspěšném navázání spojení se v tomto bloku dále provádějí další úkony spojené s počátečním nastavením. Jedná se například o vynulování proměnných, nastavení prvotních hodnot a limitních hodnot ovladačů atd. Zároveň se také ihned ověří funkčnost komunikace načtením hodnot všech ovládacích prvků, jež zůstaly nastaveny v LCR metru z minulého měření. Nakonec je ještě přístroji řečeno, které veličiny budeme chtít měřit a poté přejde program do již zmíněného výchozího stavu *Timeout*, kde vyčkává na naše další pokyny.

9.1.2 Samotné měření

Po stisku tlačítka *ZMĚŘ* na čelním panelu je následně vyvolána nejdůležitější událost z celého programu „*Měření*“, která v sobě ukrývá kompletní posloupnost

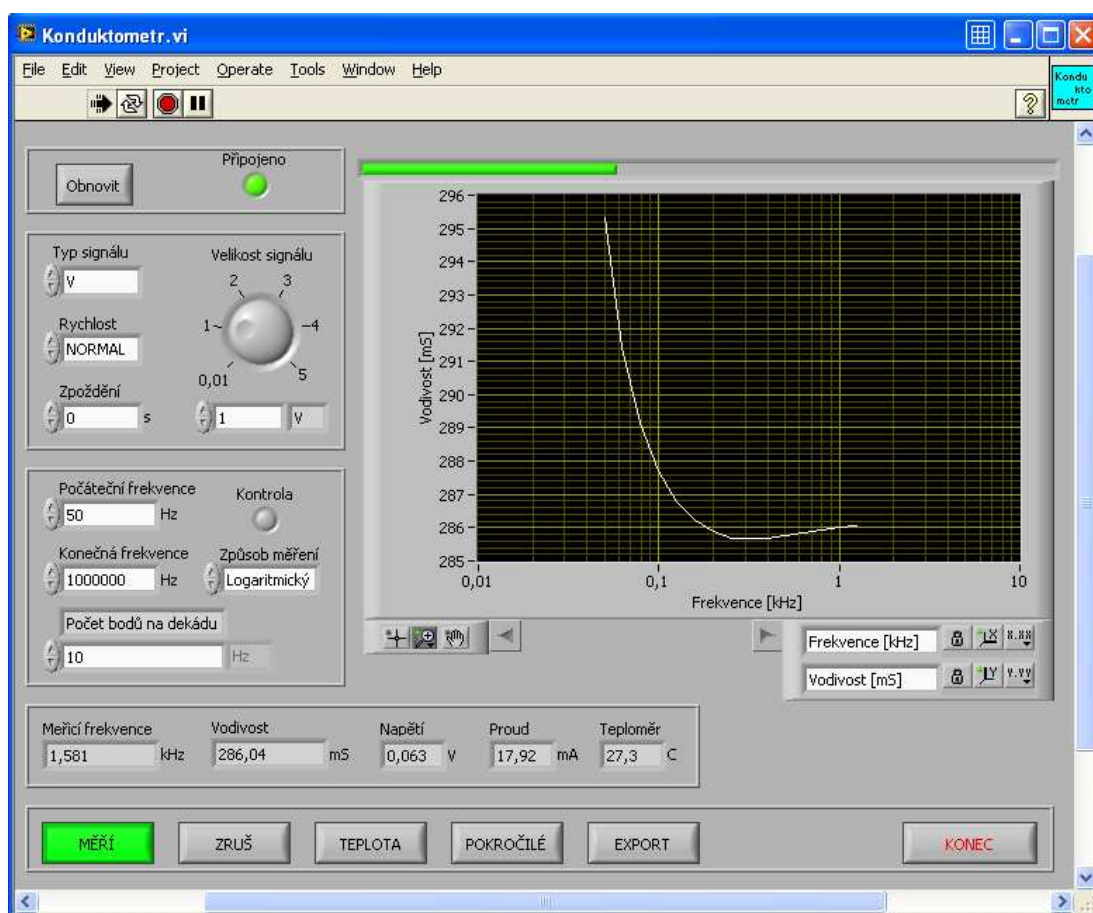
úkonů pro vytvoření výsledné závislosti. Nejprve se zablokuje možnost použití veškerých ovládacích prvků na čelním panelu programu, aby nemohl uživatel měnit nastavení přístroje v průběhu měření (výjimkou je tlačítko *ZRUŠ*). V dalším kroku je z počáteční a konečné frekvence určující rozsah měření, a z počtu bodů na dekádu (nebo z kroku, s jakým bude měření prováděno) vypočítán počet měřicích cyklů, což odpovídá i počtu hodnot zanesených do výsledného grafu. Následně je aktivována smyčka, ve které je posloupnost úkolů zajišťujících samotné měření neustále opakována, dokud není dosaženo kýženého počtu měření. Těmito úkoly se rozumí nastavení nové frekvence, změření nové hodnoty a její vynesení do grafu. Současně se s každým měření ještě provede zobrazení aktuálního proudu tekoucího měřicím obvodem a napětí na něm. Po ukončeném měření se opět aktivují ovládací prvky čelního panelu a program se vrací do výchozího stavu *Timeout*. Celý tento proces je zpracován do vývojového diagramu na obrázku 9.2



Obrázek 9.2: Vývojový diagram průběhu měření vodivosti

9.2 ČELNÍ PANEL

Čelní panel je, jak bylo již uvedeno dříve, uživatelským rozhraním umožňujícím uživateli pohodlně ovládat celý software. Při pohledu na čelní panel, viz obrázek 9.3 naší aplikace, jsou jeho ovládací prvky rozděleny funkčně do šesti částí.



Obrázek 9.3: Čelní panel programu při probíhající měření

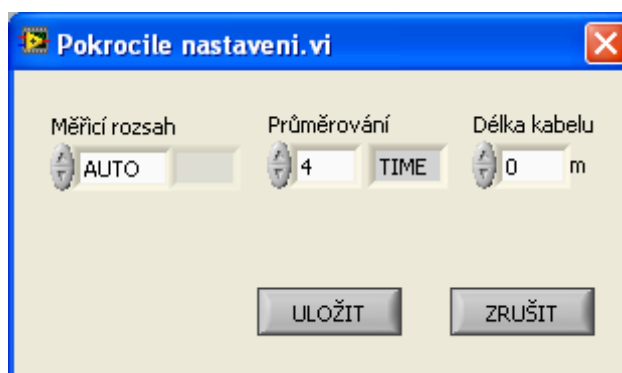
První část představuje pár prvků týkajících se komunikace LCR metru s PC. Po úspěšném navázání komunikace se rozsvítí zelená kontrolka *Připojeno*. Pokud za běhu programu dojde z nějakého důvodu k přerušení komunikace, pomocí tlačítka *Obnovit* bude komunikace s PC opětovně navázána.

Ve druhé části jsou soustředěny ovládací prvky týkající se nastavování parametrů LCR metru, jimiž jsou typ a velikost napájecího signálu, rychlost měření a zpoždění měření.

Další část se týká frekvenčního rozsahu a počtu naměřených hodnot. Nastavují se zde počáteční a konečná frekvence měření, způsob, s jakým se bude měření provádět (logaritmické/ lineární) a počet bodů na měřenou dekádu, příp. krok se kterým se bude měření provádět. Navíc je zde umístěna kontrolka, která má za úkol hlídat dodržování rozsahů měření, které je LCR metr schopen akceptovat. Pokud se jej nějakým nedopatřením podaří překročit, kontrolka se rozsvítí, objeví se dialogové okno informující o problému a zabrání se spuštění měření.

Čtvrtá část je pouze informativní a říká uživateli, jak velká je aktuálně nastavená měřicí frekvence, jakou velikost vodivosti má právě změřená hodnota. Dále informuje o napětí na obvodu a proudu, který jím protéká a o teplotě analyzovaného roztoku.

Ve spodní části čelního panelu se nachází skupinka tlačítek, jimiž se celý program ovládá. Pomocí tlačítka *ZMĚŘ* se spustí samotné měření. Tím se aktivuje tlačítko *ZRUŠ*, jímž je naopak možno probíhající měření ukončit. Dalším tlačítkem s názvem *TEPLOTA* je možno kdykoliv mimo měření zjistit teplotu analyzovaného roztoku. Pomocí tlačítka *POKROČILÉ* se vyvolá malé dialogové okno (viz obrázek 9.4), na němž se nachází pokročilejší nastavení LCR metru. K tomuto patří měřicí rozsah přístroje, průměrování naměřených hodnot a nastavení délky měřicího vedení. Nové nastavení se uloží pomocí tlačítka *ULOŽIT* do LCR metru, nebo se dialogové okno uzavře bez uložení nového nastavení tlačítkem *ZRUŠIT*.



Obrázek 9.4 Okno pokročilého nastavení LCR metru

Tlačítkem *EXPORT*, opět z čelní strany panelu programu, je možné po zadání cesty uložit naměřené hodnoty vodivosti do tabulkového formátu *.xls (např. Excel).

Samozřejmostí je také tlačítko *KONEC*, jímž se celý program ukončí a naměřené hodnoty, které nebyly uloženy, budou ztraceny.

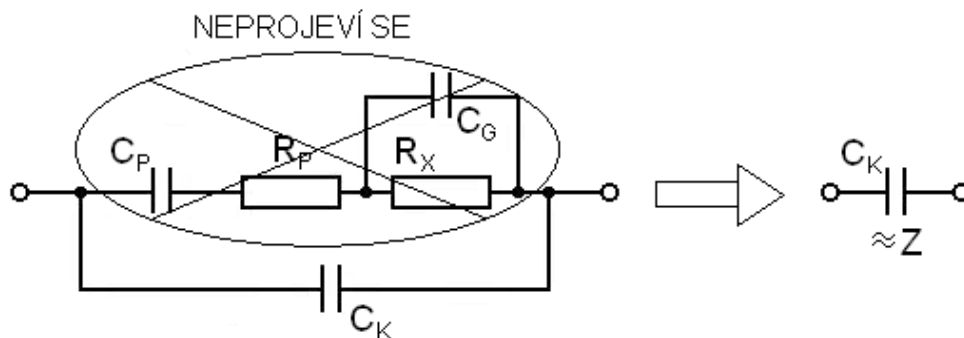
Poslední a neméně důležitou částí čelního panelu je samotný graf, na kterém je v průběhu a po skončení měření zobrazována výsledná závislost elektrické vodivosti na frekvenci napájecího signálu. Pod ním se nachází několik jemu náležících ovládacích prvků, určených k nastavení obou os, rolování, přibližování atp.

10. ZJIŠŤOVÁNÍ PRVKŮ NÁHRADNÍHO OBVODU VODIVOSTNÍ SONDY

To, že je známo zapojení náhradního obvodu vodivostní sondy (viz obrázek 2.2) jistě vede k otázce, zdali není možné nějakým způsobem hodnoty jednotlivých prvků tohoto náhradního obvodu určit. Při důkladné analýze obvodu docházíme k závěru, že to možné je, avšak pouze pro některé části zapojení. Také díky frekvenční závislosti většiny prvků náhradního obvodu jsou stanovené hodnoty pouze přibližné, a tudíž je nutné brát následné výpočty a výsledky s jistou mírou nadsázky.

10.1 STANOVENÍ KAPACITY KABELU C_K

Připojíme-li na LCR metr vodivostní sondu, aniž by byla ponořena v jakémkoli roztoku, neprochází přes její elektrody neměřitelný proud, a tudíž se prvky náhradního obvodu samotné sondy nijak neprojeví. Z tohoto následně vyplývá, že přístrojem měřená impedance v tomto případě odpovídá pouze kapacitě přívodního kabelu C_K (obrázek 10.1), jejíž hodnotu je LCR metr schopen přímo změřit.

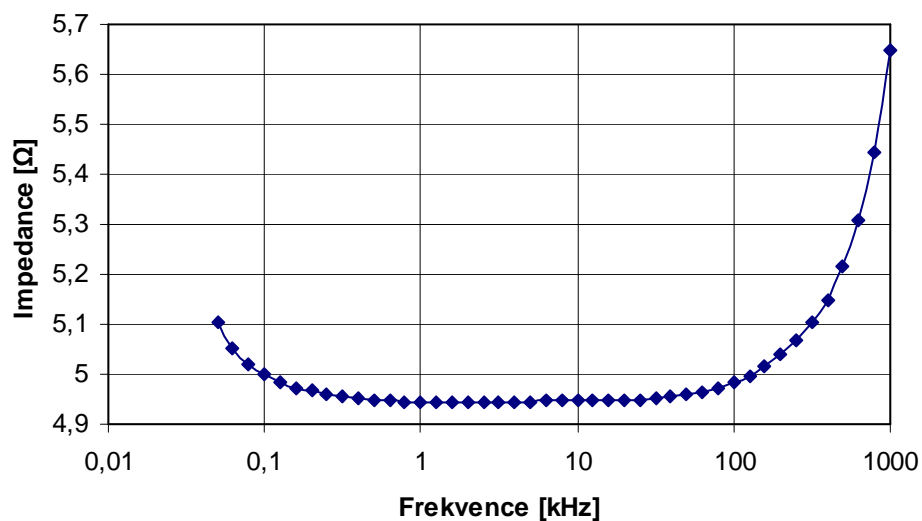


Obrázek 10.1: Stanovení kapacity kabelu C_K

LCR metrem je následně změřena hodnota kapacity kabelu $C_K = 60$ pF.

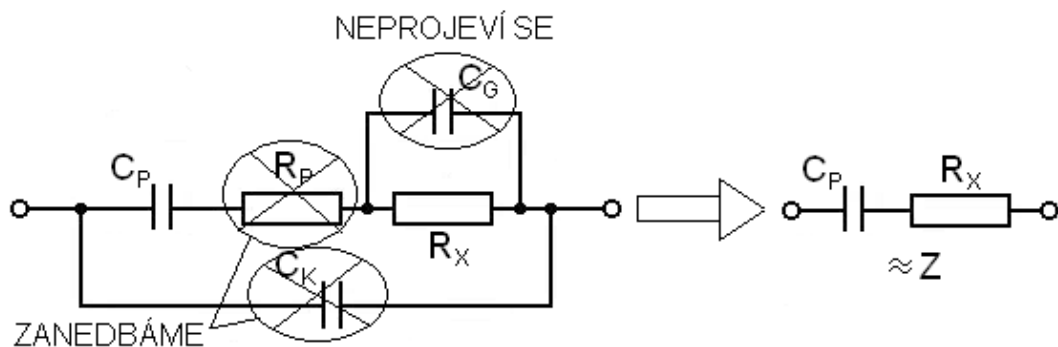
10.2 STANOVENÍ HODNOTY POLARIZAČNÍ KAPACITY C_P

V tomto případě vyjdeme z tvrzení, že polarizační jev se nejvíce uplatní u roztoků s velmi vysokou vodivostí a při napájení nízkým kmitočtem. Z toho plyne, že ke stanovení polarizační kapacity C_P je možno využít například frekvenční závislost impedance chloridu sodného NaCl s vodivostí 200mS, viz obrázek 10.2, jejíž část tyto podmínky splňuje.



Obrázek 10.2: Frekvenční charakteristika impedance NaCl s vodivostí 200 mS při 24 °C, 5 kHz

Jelikož v tomto případě převládá v obvodu polarizační kapacita C_P , kapacita kabelu C_K a polarizační rezistor R_P se zanedbají a geometrická kapacita vodivostní sondy C_G bude mít na výsledek pouze minimální vliv.



Obrázek 10.3: Stanovení polarizační kapacity C_P

Celý obvod se tím minimalizuje pouze na sériovou kombinaci odporu roztoku R_X a polarizační kapacity C_P , viz obrázek 10.3.

Jeho řešením s hodnotami použitými z výše uvedené charakteristiky NaCl o vysoké vodivosti z oblastí nízkých kmitočtů lze velikost kapacity C_P jednoduše vypočítat.

Pro celkovou impedanci sériového obvodu platí

$$Z = \sqrt{R_X^2 + \left(\frac{1}{2\pi f C_P}\right)^2} \quad (12)$$

Za účelem zjištění kapacity C_P je vytvořena soustava rovnic

$$Z_1^2 = R_X^2 + \frac{1}{4\pi^2 f_1^2 C_P^2} \quad (13)$$

$$Z_2^2 = R_X^2 + \frac{1}{4\pi^2 f_2^2 C_P^2} \quad (14)$$

Jejich řešením pro hledanou kapacitu C_P platí

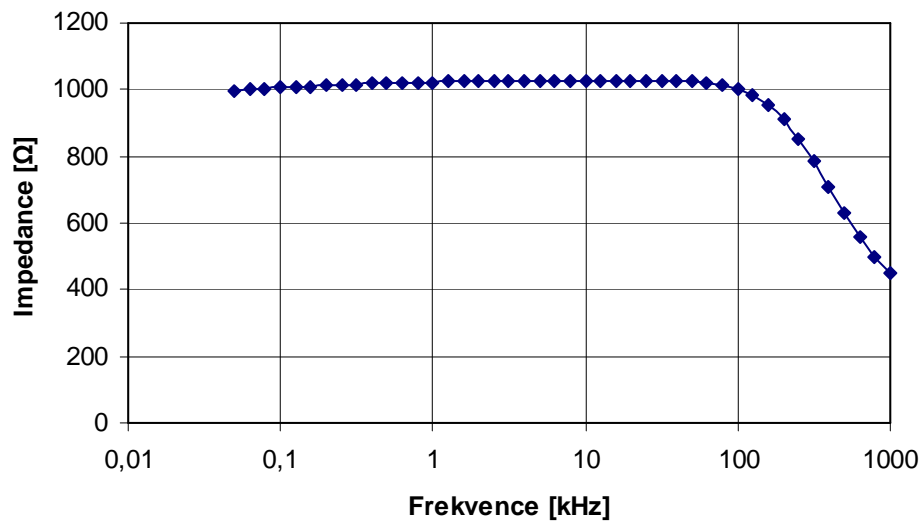
$$C_P = \sqrt{\frac{-f_2^2 - f_1^2}{(Z_2^2 - Z_1^2)4\pi^2 f_1^2 f_2^2}} \quad (15)$$

Dosazením naměřených hodnot $Z_1 = 5,102 \Omega$ při $f_1 = 50 \text{ Hz}$ a $Z_2 = 4,944 \Omega$ při $f_2 = 1000 \text{ Hz}$ uvedených v příloze č. 1, odpovídajícím obrázku 10.2 do předchozího vztahu, je stanovena hodnota polarizační kapacity

$$C_P = \sqrt{\frac{-1000^2 - 50^2}{(4,944^2 - 5,102^2)4\pi^2 50^2 1000^2}} = 2,526 \text{ mF} \quad (16)$$

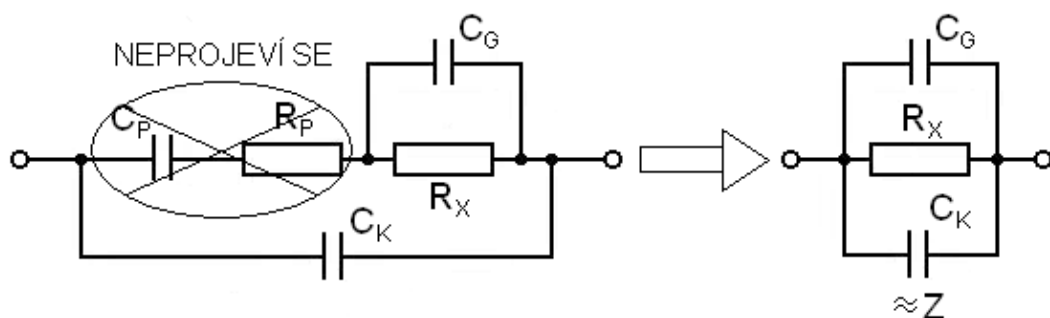
10.3 STANOVENÍ HODNOTY GEOMETRICKÉ KAPACITY C_G

Aby se v tomto případě co nejvíce zvětšil vliv geometrické kapacity C_G , je nutno co nejvíce minimalizovat polarizační jev. Tohoto se dosáhne použitím roztoku o velmi nízké vodivosti a napájení velmi vysokým kmitočtem. Z toho plyne, že ke stanovení geometrické kapacity C_G je možno využít například frekvenční závislost impedance chloridu sodného NaCl s vodivostí 1 mS , viz obrázek 10.4.



Obrázek 10.4: Frekvenční charakteristika impedance NaCl s vodivostí 1mS při 24 °C, 5 kHz

Jelikož v tomto případě převládá v obvodu geometrická kapacita C_G , kapacita kabelu C_K je známá a polarizační kapacita C_P a polarizační rezistor R_P nebudou mít na výsledek žádný vliv. Celý obvod se tím minimalizuje pouze na paralelní kombinaci odporu roztoku R_X a výsledné kapacity C rovny součtu C_G a C_K .



Obrázek 10.5: Stanovení geometrické kapacity C_G

Jeho řešením s hodnotami použitými z výše uvedené charakteristiky NaCl o nízké vodivosti z oblasti vysokých kmitočtů lze velikost kapacity C_G jednoduše vypočítat.

Pro celkovou impedanci Z paralelního obvodu platí

$$\left(\frac{1}{Z}\right) = \sqrt{\left(\frac{1}{R_x}\right)^2 + (2\pi f C)^2} \quad (17)$$

Užitím těchto substitucí

$$\frac{1}{Z} = A, \quad \frac{1}{R_x} = G \quad (18)$$

Dostáváme vztah

$$A^2 = G^2 + (2\pi f C)^2 \quad (19)$$

Za účelem zjištění celkové kapacity C je vytvořena soustava rovnic

$$A_1^2 = G^2 + 4\pi^2 f_1^2 C^2 \quad (20)$$

$$A_2^2 = G^2 + 4\pi^2 f_2^2 C^2 \quad (21)$$

Jelich řešením a zpětným dosazením ze substituce dostáváme pro kapacitu C vztah

$$C = \sqrt{\frac{A_2^2 - A_1^2}{4\pi^2 f_2^2 - 4\pi^2 f_1^2}} = \sqrt{\frac{\left(\frac{1}{Z_2}\right)^2 - \left(\frac{1}{Z_1}\right)^2}{4\pi^2 f_2^2 - 4\pi^2 f_1^2}} \quad (22)$$

Dosazením naměřených hodnot $Z_1 = 1003 \Omega$ při $f_1 = 10 \text{ kHz}$ a $Z_2 = 448,12 \Omega$ při $f_2 = 1 \text{ MHz}$ uvedených v příloze č. 1, odpovídajícím obrázku 10.4 do předchozího vztahu, je stanovena hodnota celkové kapacity

$$C = \sqrt{\frac{\left(\frac{1}{448,12}\right)^2 - \left(\frac{1}{1003}\right)^2}{4\pi^2 1000000^2 - 4\pi^2 10000^2}} = 317,76 \text{ pF} \quad (23)$$

Jelikož je celková kapacita C součtem kapacit kabelu C_K a geometrické C_G , pro geometrickou kapacitu platí

$$C = C_K + C_G \Rightarrow C_G = C - C_K = (317,76 - 56) \cdot 10^{-12} = 261,76 \text{ pF} \quad (24)$$

11. ZÁVISLOST VODIVOSTI ROZTOKU NA JEHO TEPLITĚ

Jak již bylo uvedeno v kapitole 2.3.1.2, jsou hodnoty vodivosti roztoků závislé na jejich teplotě. Pro menší teplotní intervaly lze pro popis těchto závislostí užít vztah (6), jehož pro tento vztah potřebné teplotní koeficienty β_1 vodivosti jsou uvedeny v tabulce 2.3. V této kapitole se pokusíme ověřit platnost některých z uvedených teplotních koeficientů za pomoci naměřených charakteristik vodivosti odlišných roztoků pro různé teploty.

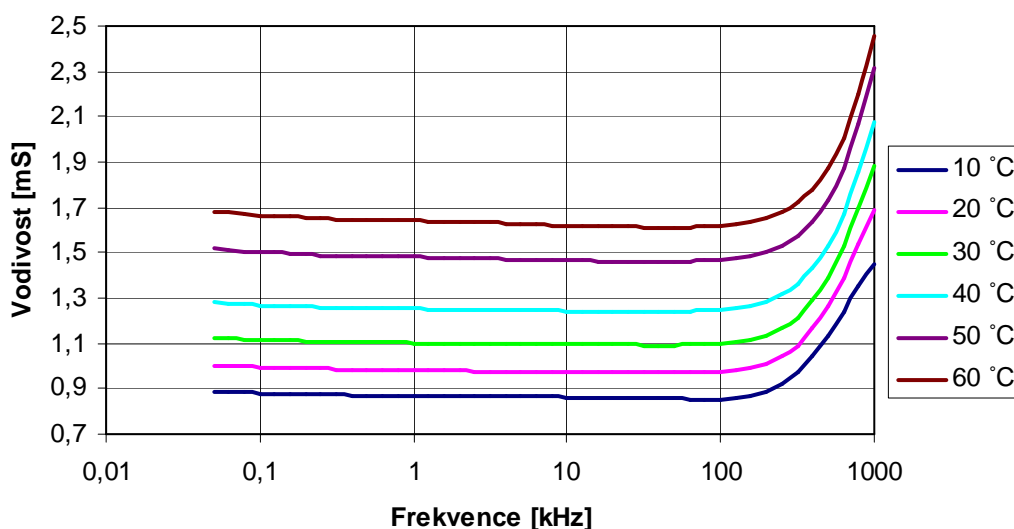
Za tímto účelem se upraví vztah (6) do následujícího tvaru

$$\beta_1 = \frac{\frac{G_t}{G_{t_0}} - 1}{t - t_0} \quad (25)$$

kde G_t a G_{t_0} jsou naměřené vodivosti roztoku (viz příloha 2) při teplotě t , příp. t_0 .

11.1 DESTILOVANÁ VODA

Pro tuto potřebu byla změřena logaritmická frekvenční závislost vodivosti destilované vody pro různé teploty v rozmezí 10 – 60 °C o četnosti deseti měřených bodů na dekádu, viz obrázek 11.1.



Obrázek 11.1: Frekvenční závislost vodivosti destilované vody na její teplotě

Pro výpočet teplotního koeficientu vodivosti β_1 se použije vztah (25), přičemž jako vztažná hodnota vodivosti G_{t_0} je použita hodnota při teplotě $t_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ a frekvenci 1 kHz. Tím se docílí pěti vypočítaných teplotních koeficientů o různé velikosti, jejichž průměrná hodnota bude kýžený teplotní koeficient vodivosti β_1 .

Příklad výpočtu teplotního koeficientu vodivosti $\beta_{1,1}$ pro teplotu $t = 10 \text{ }^\circ\text{C}$

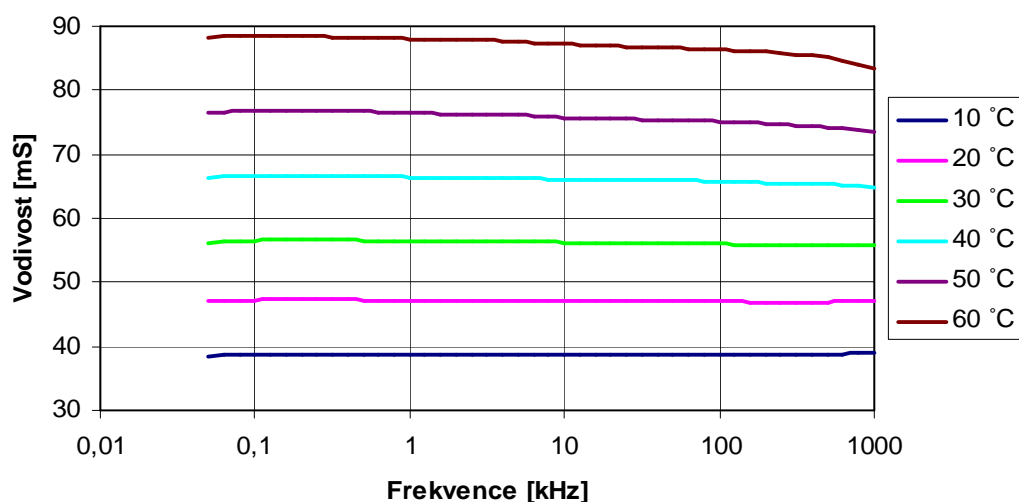
$$\beta_{1,1} = \frac{\frac{0,868}{0,981} - 1}{10 - 20} = 0,0115 \text{K}^{-1} \quad (26)$$

$$\beta_1 = \frac{\sum \beta_{1,i}}{5} = \frac{0,0115 + 0,0123 + 0,0138 + 0,017 + 0,0168}{5} = 0,0143 \text{K}^{-1} \quad (27)$$

Vypočtená hodnota teplotního koeficientu vodivosti pro destilovanou vodu je $\beta_1 = 0,0143 \text{ K}^{-1}$. Jelikož neznáme tabulkovou hodnotu, nemůžeme ji s čímkoliv porovnávat.

11.2 VODNÝ ROZTOK CHLORIDU SODNÉHO

Pro tuto potřebu byl namíchan vodný roztok NaCl o vodivosti $G = 50 \text{ mS}$, při teplotě $t = 24 \text{ }^\circ\text{C}$, frekvenci $f = 5 \text{ kHz}$. Na něm byla následně změřena logaritmická frekvenční závislost vodivosti NaCl pro různé teploty v rozmezí $10 - 60 \text{ }^\circ\text{C}$, o četnosti deseti měřených bodů na dekádu, viz obrázek 11.2.



Obrázek 11.2: Frekvenční závislost vodivosti vodného roztoku NaCl na jeho teplotě

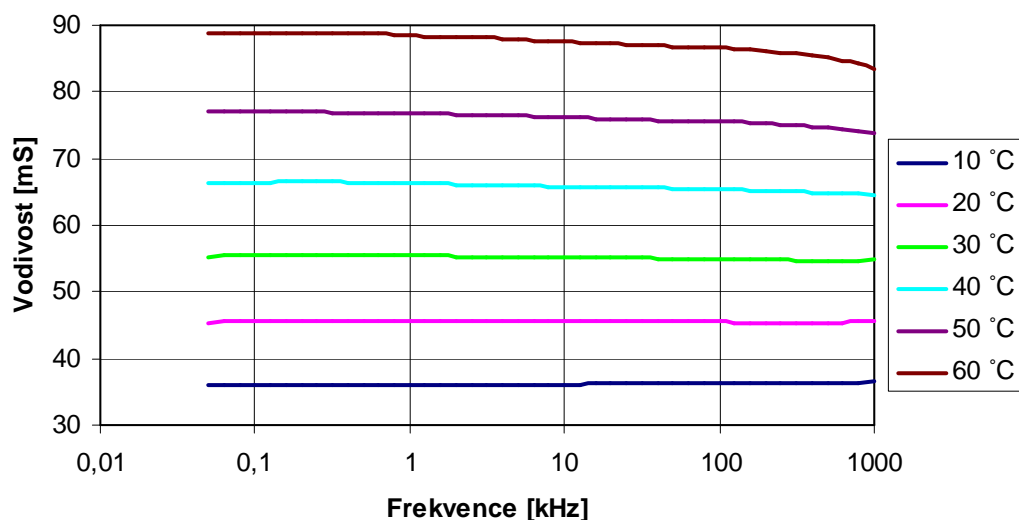
Pro výpočet hledaného teplotního koeficientu vodivosti β_1 se použije opět vztah (25), přičemž jako vztažná hodnota vodivosti G_{t0} je použita taktéž hodnota při teplotě $t_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ a frekvenci 1 kHz. Tím se docílí pěti vypočítaných teplotních koeficientů o různé velikosti, jejichž průměrná hodnota bude kýžený teplotní koeficient vodivosti β_1 .

$$\beta_1 = \frac{\sum \beta_{1,i}}{5} = \frac{0,0209 + 0,0216 + 0,0227 + 0,0228 + 0,0235}{5} = 0,0223 \text{K}^{-1} \quad (28)$$

Vypočtená hodnota teplotního koeficientu vodivosti pro vodný roztok chloridu sodného je $\beta_1 = 0,0223 \text{ K}^{-1}$. Jelikož se jedná o sůl, jejíž tabulková hodnota $\beta_1 = 0,024 \text{ K}^{-1}$, můžeme konstatovat, že jsme se při tomto měření dopustili pouze minimální chyby ($0,0017 \text{ K}^{-1}$).

11.3 VODNÝ ROZTOK CHLORIDU DRASELNÉHO

Pro tuto potřebu byl namíchán vodný roztok KCl o vodivosti $G = 50 \text{ mS}$, při teplotě $t = 24 \text{ }^\circ\text{C}$, frekvenci $f = 5 \text{ kHz}$. Na něm byla opět změřena logaritmická frekvenční závislost vodivosti KCl pro různé teploty v rozmezí $10 - 60 \text{ }^\circ\text{C}$, o četnosti deseti měřených bodů na dekádu, viz obrázek 11.3.



Obrázek 11.3: Frekvenční závislost vodivosti vodného roztoku KCl na jeho teplotě

Pro výpočet hledaného teplotního koeficientu vodivosti β_1 se použije opět vztah (25), přičemž jako vztažná hodnota vodivosti G_{t_0} je použita taktéž hodnota při teplotě $t_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ a frekvenci 1 kHz. Tím se též docílí pěti vypočítaných teplotních koeficientů o různé velikosti, jejichž průměrná hodnota bude kýžený teplotní koeficient vodivosti β_1 .

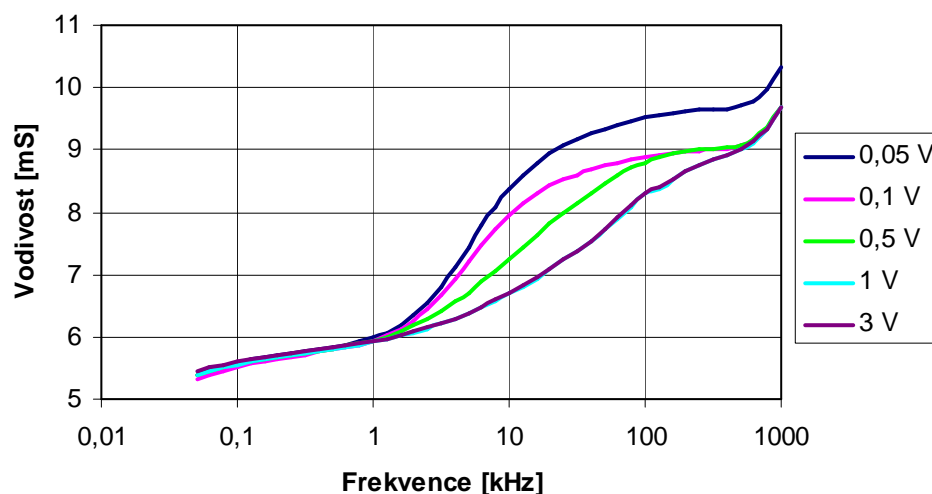
$$\beta_1 = \frac{\sum \beta_{1,i}}{5} = \frac{0,0179 + 0,0197 + 0,0204 + 0,0207 + 0,0216}{5} = 0,0200 \text{K}^{-1} \quad (29)$$

Vypočtená hodnota teplotního koeficientu vodivosti pro vodný roztok chloridu draselného je $\beta_1 = 0,02 \text{ K}^{-1}$. Jelikož se také jedná o sůl, jejíž tabulková hodnota $\beta_1 = 0,024 \text{ K}^{-1}$, můžeme konstatovat, že jsme se při tomto měření dopustili poněkud větší chyby oproti NaCl ($0,004 \text{ K}^{-1}$).

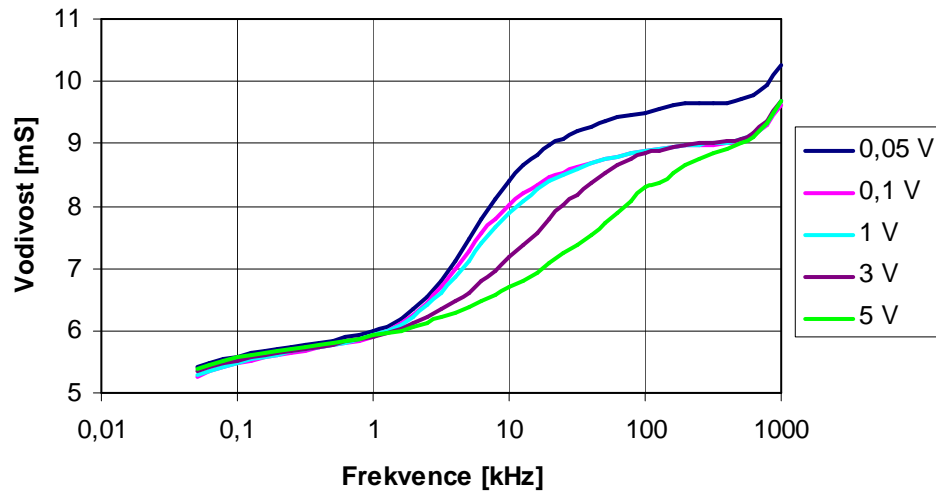
12. VLIV PARAMETRŮ NAPÁJECÍHO SIGNÁLU NA VÝSLEDNOU VODIVOST

Cílem této kapitoly je zjistit, jakým způsobem a do jaké míry ovlivňují zvolené parametry napájecího signálu výsledné frekvenční závislosti vodivosti a stanovit optimální parametry určené pro tato měření. Za tímto účelem byly připraveny tři standardní roztoky KCl o různých koncentracích (0,01 mol/l, 0,1 mol/l a 1 mol/l) jejichž hodnoty měrné vodivosti známe (viz tabulka 2.2). S každým z nich byly změřeny tři frekvenční závislosti vodivosti pro různé typy napájecího signálu (konstantní napětí, napětí, konstantní proud). Jejich nastavované hodnoty byly voleny tak, aby pokryly co nejširší možné spektrum, přičemž byly zároveň limitovány vodivostmi uvedených roztoků. Aby bylo možno jednotlivé charakteristiky mezi sebou porovnávat, byl zvolen logaritmický způsob měření s jednotným počtem deseti měřených bodů na dekádu a frekvenčním rozsahem 50 Hz až 1 MHz. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v příloze 3.

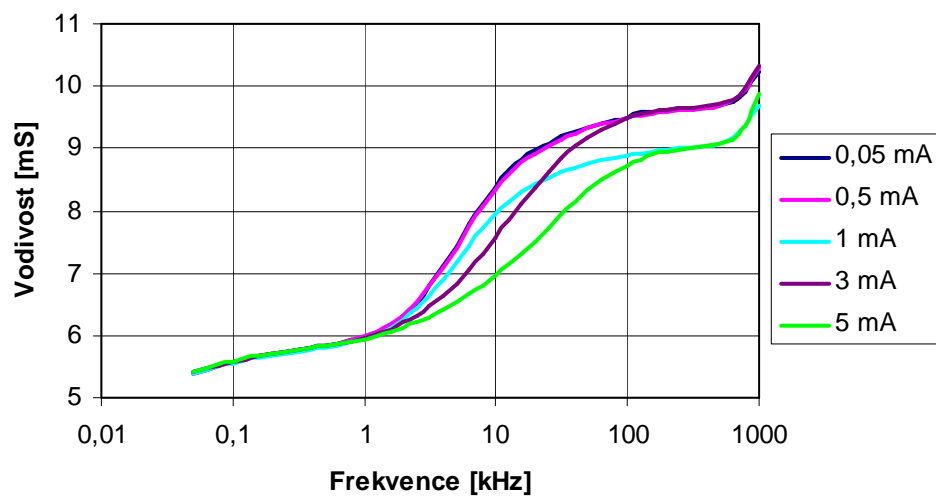
12.1 CHLORI DRASELNÝ O KONCENTRACI 0,01 MOL/L



Obrázek 12.1: Vodný roztok KCl o koncentraci 0,01 mol/l napájený konstantním napětím



Obrázek 12.2: Vodný roztok KCl o koncentraci 0,01 mol/l napájený napětím

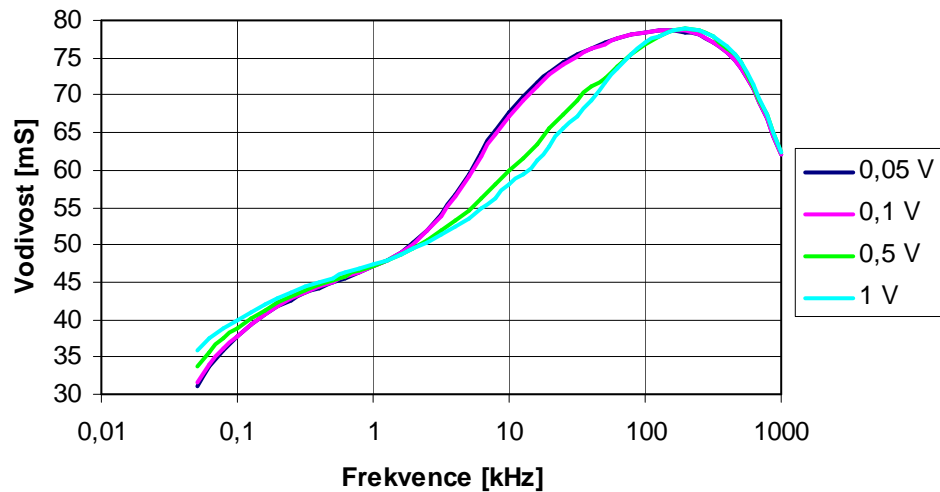


Obrázek 12.3 Vodný roztok KCl o koncentraci 0,01 mol/l napájený konstantním proudem

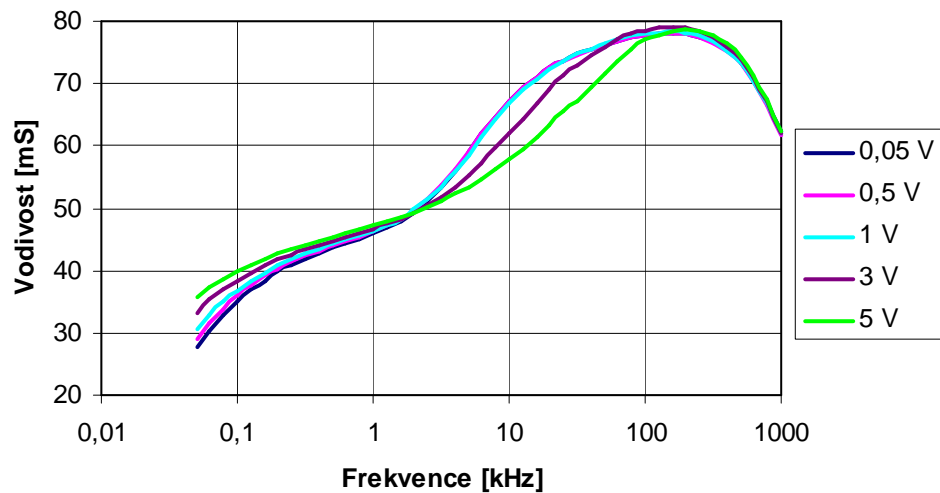
Výpočet vodivosti pro tuto koncentraci

$$G = \frac{\gamma}{K} = \frac{1408,8}{0,475} = 2,965 \text{ mS}$$

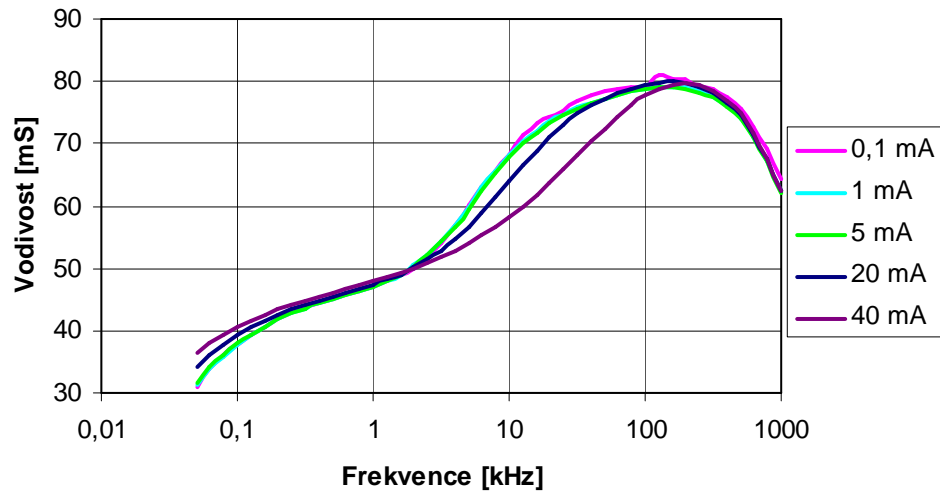
12.2 CHLORID DRASELNÝ O KONCENTRACI 0,1 MOL/L



Obrázek 12.4: Vodný roztok KCl o koncentraci 0,1 mol/l napájený konstantním napětím



Obrázek 12.5: Vodný roztok KCl o koncentraci 0,1 mol/l napájený napětím

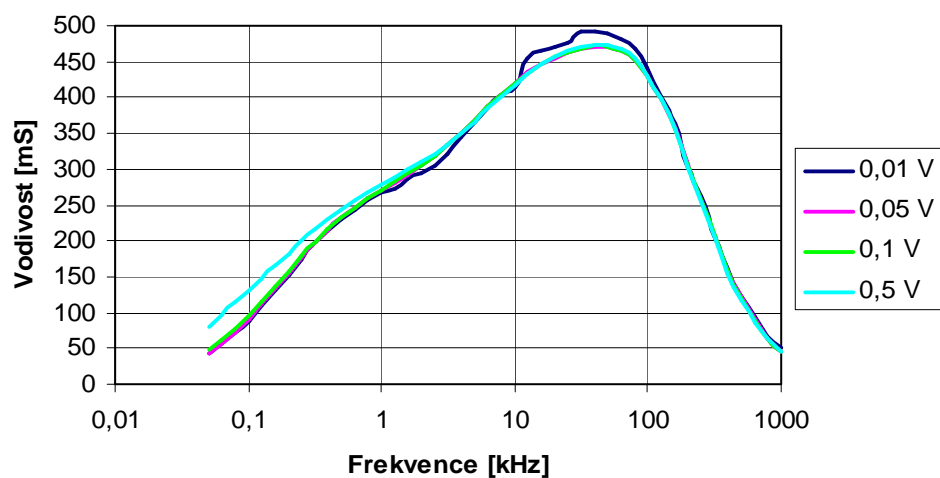


Obrázek 12.6: Vodný roztok KCl o koncentraci 0,1 mol/l napájený konstantním proudem

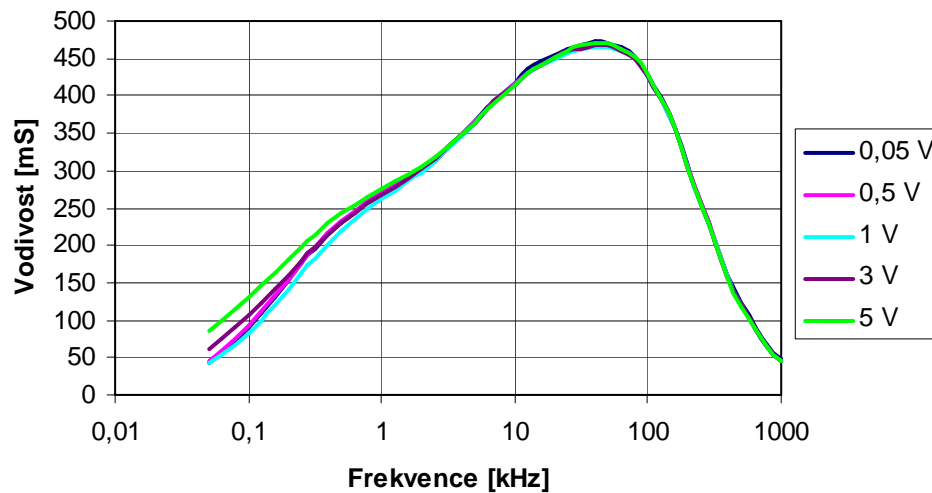
Výpočet vodivosti pro tuto koncentraci

$$G = \frac{\gamma}{K} = \frac{12856}{0,475} = 27,065 mS$$

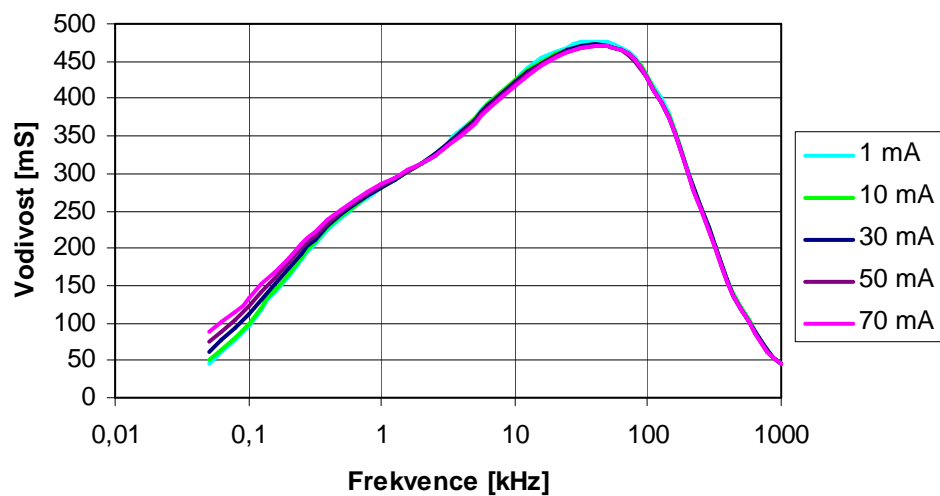
12.3 CHLORID DRASELNÝ O KONCENTRACI 1 MOL/L



Obrázek 12.7: Vodný roztok KCl o koncentraci 1 mol/l napájený konstantním napětím



Obrázek 12.8: Vodný roztok KCl o koncentraci 1 mol/l napájený napětím



Obrázek 12.9: Vodný roztok KCl o koncentraci 1 mol/l napájený konstantním proudem

Výpočet vodivosti pro tuto koncentraci

$$G = \frac{\gamma}{K} = \frac{111342}{0,475} = 234,404 \text{ mS}$$

12.4 ZHODNOCENÍ TOHOTO MĚŘENÍ

1. Vodný roztok KCl o koncentraci 0,01 mol/l

Jelikož se jedná o velmi malou koncentraci, je toto měření zatíženou chybou nečistot, které ulpěly v nádobách sloužících k přípravě tohoto roztoku. Jistý vliv měla také poměrně nízká kvalita destilované vody (cca 1 mS), s jejíž pomocí byl roztok připravován. Roztok KCl o této koncentraci má mít dle tabulkové hodnoty vodivost 2,965 mS. Naším měřením (obrázek 12.1 až 12.3) bylo však kvůli již zmíněným příčinám dosaženo hodnoty přibližně 5,5 mS pro frekvenci asi 500 Hz. Optimální nastavení pro měření malých vodivostí je nejlépe volit v rozsahu 50Hz až 1 kHz, kdy jsou dosažené výsledky všech napájecích parametrů totožné. Nejlepší je však volit pro veškerá měření jako napájecí signál vodivostní sondy samotné napětí, kdy kvůli neznalosti vodivosti roztoku nedochází omylem k přetěžování obvodu špatným rozsahem (přizpůsobí se).

2. Vodný roztok KCl o koncentraci 0,1 mol/l

Jelikož se jedná o stále poměrně malou koncentraci, je toto měření taktéž částečně zatíženo chybou již zmíněných nečistot. Roztok KCl o této koncentraci má mít dle tabulkové hodnoty vodivost 27,065 mS. Naším měřením (obrázek 12.4 až 12.6) bylo však kvůli opětovným odchylkám dosaženo hodnoty přibližně 45 mS pro frekvenci asi 500 Hz. Optimální nastavení pro měření těchto vodivostí je nejlépe volit v rozsahu 500Hz až 2 kHz, kdy jsou dosažené výsledky všech napájecích parametrů přibližně totožné.

3. Vodný roztok KCl o koncentraci 1 mol/l

Jelikož se jedná o poměrně velkou koncentraci, není toto měření zatíženo chybami, jako předešlé koncentrace. Roztok KCl o této koncentraci má mít dle tabulkové hodnoty vodivost 234,404 mS. Naším měřením (obrázek 12.4 až 12.6) bylo této hodnoty dosaženo pro frekvenci asi 500 Hz u všech tří typů napájecích signálů. Optimální nastavení frekvence pro měření větších vodivostí je o nejlépe volit v rozsahu 100Hz až 1 kHz, avšak dosažené výsledky jednotlivých napájecích signálů se pro velmi nízké frekvence značně liší.

13. ZÁVĚR

Cílem této práce bylo realizovat měřicí systém a software pro ovládání LCR metru HIOKI HiTester 3532-50, který by měl sloužit pro sběr, zpracování a vyhodnocení vodivosti kapalin pomocí čtyřelektrodové vodivostní sondy WTW TetraCon 325. Zároveň je stanovována jejich teplota měřicí kartou NI USB-6008.

V teoretické části byla rozebrána problematika týkající se principů a metod měření vodivosti, která je důležitá k pochopení činnosti v této práci popsaného měřicího softwaru. Dále také popsány principy měření teploty roztoků a seznámení s veškerým hardwarovým vybavením měřicího systému.

Vlastní měřicí software obsahuje jak základní nastavení RLC metru nutné k měření, tak i pokročilejší možnosti zpracování dat tímto přístrojem. Stěžejními parametry jsou však typ a velikost napájecího signálu, způsob měření a rozsah frekvencí, ve kterých se má výsledná závislost pohybovat. Po nastavení těchto veličin pak stačí pouze spustit měření a zbytek vykoná software sám. Integrovaný měřicí cyklus zajistí jak postupné nastavení měřicích frekvencí, tak i změření jim náležících hodnot vodivosti, které následně vynáší do grafu. Z takto vytvořeného grafu je možné za pomoci funkce generující tabulkové sobory vytvořit soubor dat spustitelných například v Excelu, který umožňuje nepřeberné množství možností, jak naměřená data dále zpracovávat.

V praktické části byla funkčnost měřicího systému ověřena nejprve v části, jejímž cílem bylo zjistit jednotlivé parametry náhradního obvodu vodivostní sondy. Hodnoty těchto parametrů byly stanoveny následovně: velikost kapacity kabelu $C_K = 60$ pF, velikost polarizační kapacity $C_P = 2,526$ mF a velikost geometrické kapacity $C_G = 261,76$ pF. Dalším úkolem bylo ověřit teplotní závislost roztoků dle vztahu (6) a porovnat vypočtené teplotní koeficienty vodivosti β_1 s tabulkovými hodnotami. Pro roztoky KCl a NaCl byly tyto koeficienty téměř totožné. Cílem poslední sady měření bylo určit, jak velký vliv mají na naměřené hodnoty vodivosti roztoků různé metody a velikosti napájecího signálu sondy a jeho frekvence. Bylo zjištěno, že různé metody napájení mají na výsledek minimální vliv. Optimální frekvence je pro malé koncentrace roztoků do 1 kHz, pro vyšší od 1 kHz do 10 kHz. Zároveň bylo stanoven

jako nejvhodnější napájecí signál vodivostní sondy samotné napětí, při kterém kvůli neznalosti vodivosti roztoku nedochází omylem k přetěžování obvodu špatným rozsahem.

Výsledný měřicí systém a software, jež byl za účelem automatizovaného měření vodivosti naprogramován jako jedno z mnoha možných řešení, podmínky zadání splňuje. Je realizován jako velmi jednoduchá aplikace sloužící k měření vodivosti kapalin, bez složitého sestavování měřicí aparatury, nastavování měření a vyhodnocování výsledků.

14. LITERATURA

- [1] Barek, J. - Opekar, F. - Štulík, K. *Elektroanalytická chemie*. Učební text Univerzity Karlovy v Praze. 1. vyd. Praha: Karolinum, 2005. ISBN 80-246-1146-5.
- [2] Ripka, P.-Ďaďo, S.-Kreidl, M.-Novák, J. *Senzory a převodníky*. Skriptum ČVUT Praha. 1. vyd. Praha: Česká technika, 2005. ISBN 80-01-03123-3.
- [3] Čejka, M. *Použití počítačů v měřicí technice*. Skriptum VUT Brno, 2002.
- [4] Čejka, M. *Elektronické měřicí systémy*. Skriptum VUT Brno, 2002.
- [5] Vlach, J. - Havlíček, J. - Vlach, M. *Začínáme s LabVIEW*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2008. ISBN 978-80-7300-245-9.
- [6] Kadlec, K. Snímače elektrolytické vodivosti kapalin. *Automatizace*, listopad 1999, roč. 42, č 11, s. 823 - 825.
- [7] Kabeš, K. Snímače pro dotykové měření teploty - přehled trhu. *Automatizace*, červenec - srpen 2006, roč. 49, č 7 - 8, s. 486 - 491.
- [8] Vlach, J. Multifunkční karta a její aplikace. *Automatizace*, prosinec 2008, roč. 51, č 12, s. 784 - 786.
- [9] HIOKI 3532-50 LCR HiTESTER. *Instruction manual*. HIOKI E.E. CORPORATION. 3rd ed., July 2004.
- [10] TetraCon 325. *Operating manual*. WTW GmbH. Weilheim, 2005.
- [11] Slovák, M. *Obslužný SW pro RLC metr HIOKI 3532*. Brno, 2008. Bakalářská práce na Vysokém Učení Technickém, na Fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií, na Ústavu automatizace a měřicí techniky. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Kepřt.
- [12] IEEE-488. *Wikipedia - otevřená encyklopedie*. [online]. [cit. 2009-12-10]. Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/IEEE-488>.
- [13] LCR HITESTER 3532-50. *HIOKI E.E. CORPORATION*. [online]. [cit. 2009-12-11]. Dostupné z: <http://www.hioki.com/product/353250/index.html>.
- [14] GPIB Controller for Hi-Speed USB. *National Instruments Corporation*. [online]. [cit. 2009-12-11]. Dostupné z: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en/nid/201586>.

Seznam symbolů, zkratek

Symbol/zkratka	Jednotka	Popis
ρ	$\Omega \cdot \text{cm}$	Měrný odpor
l	cm	Vzdálenost
A	cm^2	Plocha
γ	$\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$	Měrná vodivost
K	cm^{-1}	Konstanta vodivostní sondy
β	K^{-1}	Teplotní koeficient vodivosti
ϑ	$^{\circ}\text{C}$	Teplota
$ Z $	Ω	Modul impedance
$ Y $	S	Modul admitance
Θ	$^{\circ}$	Fázový úhel
C_S	F	Ekvivalentní sériová kapacita
C_P	F	Ekvivalentní paralelní kapacita
D	-	Ztrátový činitel
L_S	H	Ekvivalentní sériová indukčnost
L_P	H	Ekvivalentní paralelní indukčnost
Q	-	Činitel jakosti
R_S	Ω	Ekvivalentní sériový odpor
R_P	Ω	Ekvivalentní paralelní odpor
G	S	Vodivost
X	S	Reaktance
B	S	Susceptance
CV		Konstantní napětí
V		Napětí
CC		Konstantní proud
DAQ		Pořizování dat
D/A		Digitálně/analogový
A/D		Analogově/digitální
vf		Vysokofrekvenční

Seznam příloh

- Příloha 1 Frekvenční charakteristiky impedance NaCl
- Příloha 2 Závislosti vodivosti roztoků na jejich teplotě
- Příloha 3 Vliv parametrů napájecího signálu vodivostní sondy
- Příloha 4 Obsah přiloženého CD

Příloha 1

Tabulka naměřených hodnot frekvenční charakteristiky impedance NaCl o vodivosti $Z1 = 200$ mS a $Z2 = 1$ ms. Obě tyto vodivosti byly měřeny při teplotě $t = 24$ °C a frekvenci 5 kHz.

f [kHz]	Z1 [Ω]	Z2 [Ω]
0,05	5,1023	997,99
0,0629	5,0528	1001
0,0792	5,0203	1004,5
0,0998	4,9989	1006,2
0,1256	4,9839	1007,6
0,1581	4,9736	1009,5
0,1991	4,9662	1011,6
0,2506	4,9606	1013,4
0,3155	4,9561	1015,5
0,3972	4,9525	1017,1
0,5	4,9495	1018,4
0,6295	4,947	1019,7
0,7924	4,9451	1020,8
0,9976	4,9438	1021,7
1,256	4,9435	1023,2
1,581	4,9435	1024,2
1,991	4,9439	1025
2,506	4,9445	1025,8
3,155	4,9438	1026,1
3,972	4,945	1026,7
5	4,946	1027,1
6,295	4,947	1027,3
7,924	4,9475	1027,4
9,976	4,9474	1027,4
12,56	4,9468	1027,6
15,81	4,9475	1027,6
19,91	4,9484	1027,4
25,06	4,9498	1027
31,55	4,9538	1027,3
39,72	4,9557	1026,2
50	4,9589	1024,1
62,95	4,9639	1020,5
79,24	4,9714	1014,2
99,76	4,9825	1003
125,6	4,998	984,68
158,1	5,0161	954,93
199,1	5,0385	910,45
250,6	5,0675	850,8
315,5	5,1033	784,21
397,2	5,1499	706,29
500	5,2143	628,85
629,5	5,3082	558,48
792,4	5,4455	498,16
997,6	5,6481	448,12

Příloha 2

Tabulky naměřených hodnot frekvenčních závislostí vodivosti odlišných roztoků pro jejich různé teploty.

Destilovaná voda						
f	Teplota [°C]					
	10	20	30	40	50	60
kHz	G [mS]	G [mS]	G [mS]	G [mS]	G [mS]	G [mS]
0,050	0,888	1,001	1,123	1,280	1,517	1,683
0,063	0,885	0,999	1,121	1,276	1,510	1,678
0,079	0,883	0,996	1,118	1,273	1,506	1,671
0,100	0,881	0,994	1,116	1,269	1,503	1,665
0,126	0,879	0,992	1,113	1,266	1,499	1,661
0,158	0,877	0,990	1,112	1,264	1,496	1,658
0,199	0,876	0,989	1,110	1,262	1,492	1,654
0,251	0,874	0,987	1,108	1,260	1,489	1,651
0,316	0,873	0,986	1,107	1,258	1,487	1,648
0,397	0,872	0,984	1,105	1,257	1,485	1,645
0,500	0,871	0,983	1,104	1,255	1,484	1,644
0,630	0,870	0,982	1,103	1,254	1,483	1,644
0,792	0,869	0,982	1,102	1,253	1,482	1,643
0,998	0,868	0,981	1,101	1,252	1,481	1,642
1,256	0,867	0,980	1,100	1,251	1,480	1,639
1,581	0,866	0,979	1,099	1,250	1,479	1,637
1,991	0,866	0,978	1,099	1,249	1,477	1,635
2,506	0,865	0,978	1,098	1,248	1,476	1,633
3,155	0,865	0,978	1,098	1,248	1,473	1,632
3,972	0,865	0,977	1,097	1,246	1,471	1,629
5,000	0,864	0,977	1,096	1,245	1,470	1,628
6,295	0,864	0,976	1,095	1,244	1,469	1,624
7,924	0,863	0,976	1,095	1,243	1,467	1,622
9,976	0,863	0,976	1,094	1,243	1,466	1,621
12,560	0,863	0,975	1,094	1,242	1,464	1,619
15,810	0,862	0,975	1,093	1,241	1,462	1,618
19,910	0,862	0,975	1,093	1,240	1,461	1,616
25,060	0,861	0,974	1,093	1,240	1,460	1,613
31,550	0,859	0,973	1,092	1,239	1,459	1,609
39,720	0,858	0,973	1,092	1,239	1,460	1,610
50,000	0,856	0,973	1,093	1,240	1,461	1,611
62,950	0,854	0,973	1,094	1,241	1,462	1,613
79,240	0,852	0,974	1,096	1,244	1,464	1,616
99,760	0,852	0,977	1,099	1,248	1,468	1,620
125,600	0,856	0,982	1,104	1,253	1,473	1,626
158,100	0,866	0,993	1,116	1,265	1,485	1,636
199,100	0,887	1,013	1,135	1,284	1,503	1,653
250,600	0,923	1,047	1,166	1,314	1,530	1,679
315,500	0,977	1,090	1,215	1,360	1,573	1,720
397,200	1,041	1,164	1,288	1,429	1,638	1,780
500,000	1,135	1,265	1,392	1,531	1,735	1,872
629,500	1,242	1,392	1,529	1,672	1,874	2,006
792,400	1,353	1,536	1,698	1,857	2,066	2,198
997,600	1,454	1,685	1,884	2,080	2,317	2,454

NaCl						
	Teplota [°C]					
f	10	20	30	40	50	60
kHz	G [mS]	G [mS]	G [mS]	G [mS]	G [mS]	G [mS]
0,050	35,931	45,439	55,254	66,191	76,97	88,923
0,063	36,007	45,527	55,352	66,318	77,027	88,893
0,079	36,05	45,588	55,423	66,352	77,116	88,894
0,100	36,08	45,629	55,45	66,402	77,113	88,84
0,126	36,099	45,659	55,496	66,426	77,128	88,869
0,158	36,104	45,672	55,523	66,464	77,126	88,91
0,199	36,102	45,672	55,535	66,486	77,054	88,892
0,251	36,093	45,664	55,536	66,482	76,964	88,866
0,316	36,081	45,65	55,524	66,459	76,908	88,799
0,397	36,068	45,632	55,508	66,425	76,891	88,771
0,500	36,054	45,612	55,485	66,383	76,875	88,738
0,630	36,039	45,592	55,458	66,339	76,847	88,668
0,792	36,026	45,572	55,431	66,293	76,807	88,581
0,998	36,011	45,553	55,402	66,248	76,764	88,446
1,256	35,998	45,532	55,374	66,203	76,718	88,344
1,581	35,988	45,517	55,352	66,167	76,681	88,276
1,991	35,978	45,506	55,332	66,135	76,643	88,21
2,506	35,971	45,493	55,314	66,108	76,613	88,148
3,155	35,973	45,492	55,3	66,075	76,584	88,051
3,972	35,972	45,486	55,271	66,02	76,508	88,022
5,000	35,97	45,486	55,24	65,958	76,385	87,924
6,295	35,969	45,501	55,209	65,9	76,296	87,719
7,924	35,973	45,545	55,178	65,849	76,243	87,571
9,976	35,997	45,596	55,153	65,799	76,204	87,501
12,560	36,077	45,605	55,145	65,754	76,098	87,376
15,810	36,25	45,579	55,129	65,721	76	87,278
19,910	36,426	45,557	55,114	65,702	75,966	87,19
25,060	36,445	45,541	55,099	65,641	75,855	87,024
31,550	36,383	45,504	55,056	65,568	75,769	87,012
39,720	36,366	45,501	55,049	65,552	75,746	86,933
50,000	36,348	45,497	55,04	65,529	75,727	86,785
62,950	36,329	45,488	55,026	65,501	75,696	86,708
79,240	36,306	45,475	55,004	65,458	75,657	86,654
99,760	36,279	45,452	54,97	65,389	75,593	86,623
125,600	36,224	45,388	54,884	65,266	75,466	86,519
158,100	36,199	45,366	54,846	65,198	75,381	86,286
199,100	36,178	45,347	54,808	65,134	75,27	86,052
250,600	36,163	45,327	54,767	65,067	75,13	85,877
315,500	36,158	45,316	54,731	65,002	74,972	85,692
397,200	36,17	45,319	54,708	64,943	74,808	85,45
500,000	36,212	45,348	54,704	64,886	74,646	85,147
629,500	36,278	45,393	54,703	64,805	74,44	84,732
792,400	36,394	45,475	54,719	64,705	74,162	84,159
997,600	36,583	45,615	54,755	64,556	73,749	83,33

KCI						
f	Teplota [°C]					
	10	20	30	40	50	60
kHz	G [mS]	G [mS]	G [mS]	G [mS]	G [mS]	G [mS]
0,050	38,521	46,962	56,204	66,413	76,467	88,258
0,063	38,637	47,079	56,341	66,543	76,604	88,440
0,079	38,710	47,163	56,426	66,597	76,677	88,356
0,100	38,758	47,219	56,510	66,646	76,772	88,452
0,126	38,792	47,261	56,559	66,678	76,827	88,474
0,158	38,806	47,283	56,585	66,672	76,797	88,454
0,199	38,810	47,291	56,597	66,673	76,762	88,447
0,251	38,805	47,287	56,598	66,657	76,719	88,354
0,316	38,794	47,276	56,586	66,632	76,726	88,276
0,397	38,782	47,263	56,569	66,601	76,731	88,139
0,500	38,766	47,244	56,548	66,560	76,705	88,102
0,630	38,752	47,224	56,524	66,514	76,648	88,091
0,792	38,738	47,205	56,497	66,470	76,563	88,069
0,998	38,724	47,185	56,472	66,433	76,480	88,037
1,256	38,708	47,165	56,445	66,398	76,400	87,973
1,581	38,699	47,151	56,423	66,372	76,338	87,921
1,991	38,689	47,138	56,405	66,350	76,286	87,872
2,506	38,681	47,127	56,389	66,332	76,243	87,833
3,155	38,685	47,127	56,378	66,326	76,199	87,764
3,972	38,684	47,117	56,341	66,279	76,150	87,530
5,000	38,684	47,107	56,312	66,209	76,105	87,459
6,295	38,685	47,100	56,286	66,151	75,994	87,347
7,924	38,689	47,095	56,252	66,106	75,755	87,215
9,976	38,699	47,095	56,221	66,070	75,684	87,158
12,560	38,714	47,103	56,201	66,099	75,622	87,135
15,810	38,722	47,102	56,172	66,130	75,514	87,041
19,910	38,728	47,100	56,151	66,104	75,458	86,918
25,060	38,735	47,098	56,136	66,013	75,493	86,815
31,550	38,713	47,069	56,094	65,948	75,431	86,693
39,720	38,715	47,067	56,089	65,930	75,406	86,687
50,000	38,715	47,065	56,081	65,914	75,368	86,580
62,950	38,714	47,058	56,070	65,884	75,307	86,513
79,240	38,707	47,045	56,046	65,845	75,223	86,442
99,760	38,693	47,022	56,009	65,787	75,137	86,351
125,600	38,649	46,957	55,921	65,672	75,006	86,229
158,100	38,640	46,937	55,882	65,606	74,918	86,119
199,100	38,634	46,916	55,841	65,537	74,806	85,961
250,600	38,629	46,898	55,799	65,468	74,660	85,742
315,500	38,631	46,885	55,765	65,413	74,513	85,564
397,200	38,650	46,890	55,744	65,352	74,378	85,351
500,000	38,693	46,919	55,748	65,296	74,250	85,071
629,500	38,759	46,966	55,754	65,216	74,072	84,662
792,400	38,868	47,047	55,772	65,103	73,810	84,085
997,600	39,046	47,181	55,803	64,935	73,393	83,305

Příloha 3

Tabulky naměřených hodnot frekvenčních závislostí vodivosti odlišných roztoků pro různé parametry napájecího signálu vodivostní sondy.

Vodný roztok KCl o koncentraci 0,01 mol/l										
	CV [V]	CV [V]	CV [V]	CV [V]	CV [V]	V [V]	V [V]	V [V]	V [V]	V [V]
f	0,05	0,1	0,5	1	3	0,05	0,1	1	3	5
kHz	G [mS]	G [mS]	G [mS]	G [mS]	G [mS]	G [mS]	G [mS]	G [mS]	G [mS]	G [mS]
0,050	5,401	5,328	5,398	5,392	5,443	5,417	5,265	5,289	5,341	5,401
0,063	5,469	5,400	5,460	5,454	5,501	5,480	5,344	5,364	5,410	5,463
0,079	5,529	5,463	5,516	5,508	5,551	5,539	5,411	5,428	5,468	5,516
0,100	5,582	5,518	5,565	5,556	5,596	5,590	5,471	5,486	5,520	5,563
0,126	5,629	5,568	5,610	5,599	5,637	5,637	5,523	5,537	5,566	5,605
0,158	5,670	5,611	5,650	5,638	5,674	5,679	5,569	5,582	5,607	5,643
0,199	5,708	5,651	5,686	5,674	5,707	5,716	5,612	5,623	5,646	5,679
0,251	5,742	5,687	5,720	5,707	5,738	5,749	5,650	5,661	5,681	5,711
0,316	5,775	5,721	5,750	5,739	5,769	5,785	5,688	5,697	5,715	5,743
0,397	5,809	5,755	5,782	5,770	5,799	5,814	5,722	5,732	5,748	5,774
0,500	5,843	5,791	5,815	5,802	5,830	5,848	5,760	5,769	5,783	5,806
0,630	5,880	5,829	5,851	5,836	5,862	5,885	5,800	5,810	5,820	5,839
0,792	5,927	5,876	5,893	5,873	5,897	5,931	5,849	5,857	5,862	5,876
0,998	5,986	5,934	5,943	5,915	5,935	5,989	5,911	5,917	5,911	5,916
1,256	6,068	6,013	6,006	5,962	5,978	6,072	5,995	5,995	5,969	5,959
1,581	6,179	6,118	6,083	6,015	6,028	6,181	6,107	6,097	6,039	6,010
1,991	6,332	6,260	6,176	6,074	6,083	6,333	6,258	6,231	6,121	6,066
2,506	6,535	6,443	6,285	6,137	6,143	6,532	6,453	6,401	6,215	6,127
3,155	6,797	6,671	6,404	6,218	6,220	6,793	6,697	6,608	6,346	6,211
3,972	7,103	6,931	6,557	6,298	6,298	7,120	6,981	6,857	6,465	6,284
5,000	7,439	7,208	6,716	6,368	6,385	7,462	7,272	7,123	6,615	6,372
6,295	7,777	7,485	6,888	6,466	6,481	7,802	7,552	7,397	6,782	6,470
7,924	8,092	7,740	7,069	6,575	6,590	8,115	7,801	7,660	6,970	6,579
9,976	8,370	7,962	7,256	6,699	6,713	8,387	8,013	7,899	7,181	6,703
12,560	8,608	8,151	7,443	6,801	6,814	8,644	8,201	8,096	7,359	6,805
15,810	8,797	8,304	7,632	6,937	6,948	8,828	8,341	8,264	7,578	6,939
19,910	8,950	8,427	7,816	7,085	7,095	8,974	8,454	8,401	7,799	7,086
25,060	9,074	8,527	7,993	7,248	7,256	9,090	8,544	8,513	8,019	7,249
31,550	9,175	8,608	8,135	7,370	7,378	9,202	8,622	8,600	8,177	7,371
39,720	9,263	8,678	8,311	7,538	7,546	9,282	8,688	8,677	8,359	7,538
50,000	9,339	8,741	8,464	7,715	7,722	9,356	8,746	8,743	8,516	7,716
62,950	9,406	8,795	8,598	7,902	7,909	9,415	8,795	8,801	8,648	7,902
79,240	9,464	8,841	8,711	8,095	8,102	9,465	8,837	8,849	8,759	8,096
99,760	9,514	8,881	8,801	8,294	8,302	9,504	8,871	8,889	8,845	8,295
125,600	9,556	8,912	8,875	8,378	8,386	9,562	8,912	8,923	8,892	8,379
158,100	9,591	8,943	8,931	8,527	8,535	9,612	8,937	8,954	8,942	8,527
199,100	9,623	8,966	8,971	8,653	8,663	9,637	8,970	8,978	8,977	8,653
250,600	9,641	8,985	8,996	8,756	8,766	9,659	8,981	8,994	9,000	8,757
315,500	9,651	9,000	9,014	8,839	8,849	9,649	8,989	9,007	9,016	8,839
397,200	9,666	9,017	9,036	8,911	8,921	9,664	9,008	9,023	9,035	8,912
500,000	9,703	9,061	9,080	8,995	9,004	9,705	9,048	9,065	9,078	8,995
629,500	9,788	9,150	9,172	9,118	9,128	9,766	9,133	9,155	9,171	9,118
792,400	9,973	9,337	9,358	9,327	9,337	9,937	9,310	9,338	9,358	9,328
997,600	10,320	9,672	9,694	9,683	9,693	10,267	9,635	9,674	9,694	9,683

	Vodný roztok KCl o koncentraci 0,01 mol/l					Vodný roztok KCl o koncentraci 0,1 mol/l			
	CC [mA]	CC [mA]	CC [mA]	CC [mA]	CC [mA]	CV [V]	CV [V]	CV [V]	CV [V]
f	0,05	0,5	1	3	5	0,05	0,1	0,5	1
kHz	G [mS]	G [mS]	G [mS]	G [mS]	G [mS]	G [mS]	G [mS]	G [mS]	G [mS]
0,050	5,389	5,397	5,370	5,410	5,424	31,186	31,511	33,687	35,882
0,063	5,465	5,464	5,439	5,473	5,485	33,676	33,945	35,697	37,454
0,079	5,525	5,523	5,498	5,529	5,537	35,837	36,047	37,426	38,781
0,100	5,577	5,575	5,551	5,578	5,584	37,682	37,856	38,915	39,982
0,126	5,625	5,622	5,598	5,622	5,626	39,240	39,378	40,208	41,050
0,158	5,666	5,663	5,639	5,662	5,664	40,563	40,679	41,324	42,006
0,199	5,703	5,700	5,677	5,699	5,699	41,696	41,788	42,306	42,862
0,251	5,737	5,735	5,712	5,731	5,731	42,660	42,744	43,164	43,628
0,316	5,771	5,767	5,744	5,763	5,762	43,510	43,582	43,928	44,358
0,397	5,803	5,800	5,777	5,795	5,793	44,270	44,332	44,623	45,012
0,500	5,835	5,834	5,811	5,829	5,824	44,963	45,014	45,265	45,617
0,630	5,874	5,873	5,848	5,865	5,858	45,614	45,667	45,881	46,201
0,792	5,917	5,919	5,894	5,908	5,896	46,282	46,320	46,497	46,780
0,998	5,976	5,979	5,950	5,960	5,939	46,997	47,027	47,142	47,376
1,256	6,059	6,061	6,024	6,025	5,991	47,835	47,854	47,863	48,031
1,581	6,168	6,172	6,125	6,106	6,052	48,876	48,868	48,684	48,736
1,991	6,318	6,324	6,260	6,207	6,124	50,211	50,160	49,608	49,503
2,506	6,514	6,527	6,435	6,329	6,206	51,923	51,822	50,658	50,339
3,155	6,793	6,785	6,651	6,475	6,299	54,107	53,895	51,793	51,319
3,972	7,109	7,086	6,903	6,641	6,406	56,668	56,339	53,234	52,366
5,000	7,450	7,420	7,178	6,839	6,526	59,505	59,060	54,711	53,530
6,295	7,797	7,756	7,454	7,059	6,659	62,415	61,891	56,305	54,832
7,924	8,106	8,071	7,715	7,303	6,805	65,196	64,642	58,025	56,288
9,976	8,375	8,349	7,947	7,566	6,965	67,684	67,173	59,839	57,946
12,560	8,644	8,586	8,143	7,841	7,141	69,865	69,404	61,653	59,406
15,810	8,825	8,774	8,303	8,117	7,324	71,647	71,270	63,543	61,257
19,910	8,978	8,929	8,432	8,380	7,517	73,124	72,838	65,444	63,277
25,060	9,080	9,053	8,537	8,621	7,712	74,332	74,130	67,321	65,454
31,550	9,194	9,153	8,619	8,861	7,953	75,334	75,201	69,402	67,216
39,720	9,277	9,241	8,692	9,035	8,142	76,206	76,125	71,187	69,403
50,000	9,346	9,318	8,756	9,187	8,322	76,949	76,907	72,154	71,578
62,950	9,400	9,384	8,810	9,309	8,483	77,571	77,564	73,949	73,651
79,240	9,450	9,441	8,858	9,408	8,621	78,076	78,092	75,539	75,540
99,760	9,481	9,490	8,898	9,487	8,733	78,438	78,482	76,887	77,142
125,600	9,573	9,533	8,927	9,547	8,833	78,640	78,701	77,986	77,861
158,100	9,601	9,570	8,958	9,594	8,902	78,692	78,761	78,628	78,611
199,100	9,623	9,599	8,982	9,627	8,953	78,520	78,567	78,834	78,901
250,600	9,654	9,617	9,001	9,646	8,985	78,043	78,049	78,555	78,684
315,500	9,639	9,628	9,014	9,657	9,008	77,172	77,135	77,766	77,925
397,200	9,644	9,643	9,032	9,670	9,035	75,769	75,718	76,365	76,548
500,000	9,685	9,680	9,074	9,706	9,083	73,710	73,661	74,273	74,468
629,500	9,738	9,767	9,165	9,793	9,145	70,852	70,789	71,306	71,507
792,400	9,908	9,952	9,348	9,976	9,369	67,018	66,971	67,337	67,523
997,600	10,230	10,298	9,685	10,323	9,879	62,122	62,081	62,281	62,410

Vodný roztok KCl o koncentraci 0,1 mol/l										
	V [V]	V [V]	V [V]	V [V]	V [V]	CC [mA]	CC [mA]	CC [mA]	CC [mA]	CC [mA]
f	0,05	0,5	1	3	5	0,1	1	5	20	40
kHz	G [mS]	G [mS]	G [mS]	G [mS]	G [mS]	G [mS]	G [mS]	G [mS]	G [mS]	G [mS]
0,050	27,718	28,961	30,503	33,291	35,609	30,982	31,242	31,665	34,325	36,491
0,063	30,389	31,594	32,851	35,247	37,27	33,838	33,754	34,038	36,179	38,069
0,079	32,861	33,909	34,928	36,892	38,626	36,007	35,925	36,108	37,796	39,402
0,100	35,01	35,919	36,751	38,342	39,842	37,846	37,775	37,889	39,223	40,598
0,126	36,857	37,64	38,323	39,605	40,914	39,427	39,342	39,408	40,468	41,659
0,158	38,429	39,11	39,678	40,721	41,866	40,722	40,671	40,699	41,56	42,602
0,199	39,766	40,372	40,85	41,707	42,719	41,869	41,805	41,814	42,52	43,445
0,251	40,902	41,452	41,863	42,576	43,482	42,841	42,78	42,775	43,369	44,197
0,316	41,852	42,405	42,76	43,378	44,199	43,677	43,628	43,616	44,126	44,885
0,397	42,787	43,24	43,559	44,088	44,845	44,404	44,39	44,37	44,821	45,521
0,500	43,584	44,003	44,291	44,756	45,45	45,064	45,079	45,062	45,464	46,112
0,630	44,328	44,724	44,986	45,395	46,036	45,699	45,738	45,722	46,084	46,668
0,792	45,068	45,445	45,687	46,038	46,62	46,346	46,405	46,386	46,712	47,241
0,998	45,851	46,221	46,44	46,721	47,228	47,003	47,128	47,116	47,388	47,833
1,256	46,801	47,123	47,312	47,479	47,879	47,847	47,994	47,965	48,149	48,454
1,581	47,872	48,225	48,375	48,345	48,584	48,785	49,048	49,019	49,042	49,138
1,991	49,278	49,622	49,706	49,349	49,358	50,001	50,401	50,361	50,109	49,886
2,506	51,03	51,398	51,38	50,506	50,198	51,584	52,15	52,076	51,392	50,706
3,155	53,495	53,592	53,449	51,86	51,246	54,127	54,421	54,241	52,9	51,695
3,972	56,079	56,21	55,908	53,509	52,264	57,024	57,057	56,784	54,669	52,783
5,000	59,003	59,049	58,62	55,321	53,448	60,135	59,969	59,602	56,694	53,952
6,295	61,906	61,943	61,458	57,362	54,767	63,116	62,922	62,512	58,961	55,259
7,924	64,651	64,691	64,22	59,641	56,241	65,739	65,695	65,297	61,416	56,68
9,976	67,036	67,153	66,779	62,137	57,925	68,023	68,149	67,823	63,969	58,352
12,560	69,414	69,275	68,958	64,331	59,389	71,488	70,406	69,997	66,526	59,828
15,810	71,117	71,023	70,827	66,782	61,255	73,159	72,1	71,804	68,945	61,688
19,910	72,515	72,472	72,385	69,15	63,291	74,372	73,537	73,282	71,17	63,721
25,060	73,639	73,668	73,68	71,319	65,485	75,324	74,701	74,513	73,11	65,914
31,550	74,758	74,654	74,738	73,031	67,26	76,908	75,742	75,52	74,834	68,228
39,720	75,653	75,531	75,641	74,609	69,425	77,773	76,61	76,394	76,195	70,35
50,000	76,304	76,274	76,424	75,956	71,578	78,311	77,306	77,144	77,313	72,45
62,950	76,89	76,902	77,083	77,061	73,631	78,839	77,921	77,772	78,227	74,428
79,240	77,366	77,417	77,618	77,921	75,498	79,039	78,396	78,295	78,924	76,124
99,760	77,68	77,798	78,011	78,541	77,081	79,018	78,756	78,661	79,447	77,727
125,6	78,105	78,011	78,214	78,913	77,765	80,871	79,087	78,936	79,793	78,752
158,1	78,156	78,099	78,283	79,063	78,489	80,332	79,181	78,979	79,901	79,412
199,1	78,027	77,923	78,112	78,914	78,77	80,223	79,011	78,805	79,698	79,627
250,6	77,412	77,463	77,606	78,384	78,531	79,164	78,416	78,258	79,142	79,315
315,5	76,655	76,609	76,706	77,449	77,777	78,691	77,537	77,349	78,159	78,453
397,2	75,442	75,238	75,314	75,987	76,405	77,607	76,202	75,926	76,662	76,977
500,	73,382	73,219	73,3	73,902	74,334	75,461	74,097	73,874	74,505	74,794
629,5	70,662	70,426	70,483	71,013	71,39	72,791	71,168	70,987	71,53	71,685
792,4	67,015	66,68	66,721	67,141	67,44	69,23	67,35	67,154	67,569	67,629
997,6	62,289	61,866	61,892	62,187	62,363	64,375	62,428	62,225	62,526	62,433

Vodný roztok KCl o koncentraci 1 mol/l									
	CV	CV	CV	CV	V [V]	V [V]	V [V]	V [V]	V [V]
f	0,01	0,05	0,1	0,5	0,05	0,5	1	3	5
kHz	G [mS]	G [mS]	G [mS]	G [mS]	G [mS]	G [mS]	G [mS]	G [mS]	G [mS]
0,050	43,049	44,06	46,84	81,084	43,154	46,45	41,647	62,579	85,797
0,063	55,822	57,181	60,446	96,709	55,926	59,478	53,035	75,776	100,13
0,079	71,421	72,951	76,684	114,01	71,513	75,013	66,455	89,904	114,41
0,100	89,522	91,29	95,17	130,03	89,71	92,98	82,2	105,93	130,29
0,126	109,81	111,5	115,47	146,96	109,99	112,94	100,16	123,28	147,08
0,158	131,24	133,08	136,84	164,59	131,65	134,22	119,89	141,72	164,41
0,199	153,53	155,08	158,44	182,25	153,77	155,99	140,75	160,66	181,8
0,251	175,07	176,52	179,42	199,27	175,17	177,16	161,85	179,33	198,49
0,316	197,83	196,71	199,06	215,87	194,65	197,34	182,44	197,66	214,72
0,397	213,55	215,12	217,07	230,81	214,03	215,44	201,82	214,44	229,18
0,500	229,26	231,53	233,09	244,33	230,43	231,68	219,4	229,73	242,41
0,630	243,91	245,98	247,25	256,55	244,87	245,94	235,09	243,51	254,34
0,792	255,93	258,75	259,86	267,62	257,38	258,53	249,04	255,92	265,16
0,998	266,61	270,35	271,33	277,9	268,7	269,9	261,66	267,32	275,23
1,256	273,14	281,4	282,29	288,04	280,23	280,61	273,6	278,37	285,21
1,581	286,01	292,47	293,37	298,24	289,98	291,27	285,4	289,49	295,2
1,991	294,96	304,43	305,2	309,13	301,15	302,65	297,97	301,33	305,88
2,506	303,8	317,83	318,59	321,2	313,52	315,45	311,9	314,56	317,82
3,155	321,56	333,51	333,97	334,97	330,42	330,04	328,33	330,59	331
3,972	345,2	350,99	351,1	350,41	347,16	347,09	345,65	346,54	346,91
5,000	366,68	369,43	369,19	367,07	365,6	364,98	364,2	364,46	363,63
6,295	385,91	387,63	387,39	384,44	383,72	383,09	382,57	382,53	381,06
7,924	402,87	405	404,64	401,77	401,02	400,35	399,83	399,82	398,39
9,976	415,42	420,61	420,42	418,2	415,85	416,11	415,39	415,63	414,79
12,560	454,91	434,55	434,45	432,8	435,31	430,51	429,31	429,51	429,34
15,810	464,74	446,06	446,3	445,68	446,17	442,18	440,78	441,39	442,11
19,910	471,5	455,57	456,05	456,47	455,39	451,86	450,33	451,27	452,78
25,060	475,8	463,27	463,86	464,94	461,94	459,42	457,83	459,01	461,15
31,550	490,92	468,53	469,17	470,84	468,53	464,79	463,46	463,88	466,77
39,720	492,06	471,15	472	473,94	472,39	467,62	466,11	467,42	470,12
50,000	490,29	470,24	471,08	473,27	470,8	466,88	465,51	466,76	469,53
62,950	480,94	464,38	465,06	467,22	465,5	461,23	460,05	461,04	463,75
79,240	468,59	451,57	452,17	454,04	452,64	448,9	447,95	448,56	450,93
99,760	441,44	430,25	430,43	431,66	430,08	427,85	427,11	427,34	429,16
125,600	401,06	398,67	398,42	398,79	397,21	396,29	395,96	395,81	396,75
158,100	362,49	357,59	356,88	356,2	355,56	356,08	355,05	354,44	354,83
199,100	304,72	308,97	308,28	306,1	309,84	308,15	306,95	305,65	305,44
250,600	262,26	257,14	256,25	253,47	256,89	256,7	255,1	253,61	253,11
315,500	204,47	206,61	205,58	202,31	204,43	205,27	204,6	203	202,34
397,200	163,27	160,87	159,74	155,45	160,77	159,12	159,23	157,63	156,91
500,000	123,79	121,84	120,89	117,49	122,38	120,17	120,77	119,27	118,48
629,500	92,256	89,996	89,219	86,785	90,519	88,876	89,464	88,169	87,472
792,400	67,185	64,54	64,85	62,909	65,866	64,346	64,949	63,884	63,27
997,600	49,782	45,978	46,241	44,973	47,53	45,915	46,45	45,618	45,121

Vodný roztok KCl o koncentraci 1 mol/l					
	CC [mA]	CC [mA]	CC [mA]	CC [mA]	CC [mA]
f	1	10	30	50	70
kHz	G [mS]	G [mS]	G [mS]	G [mS]	G [mS]
0,050	46,318	50,79	62,807	74,739	87,309
0,063	60,21	64,552	76,914	88,7	100,8
0,079	76,935	80,977	93,111	104,59	116,06
0,100	96,359	100,01	111,43	122,46	133,12
0,126	117,71	120,93	131,11	141,36	151,12
0,158	140,43	143,1	152	161	169,66
0,199	163,33	165,59	172,89	180,57	188,07
0,251	185,46	187,3	193,21	199,62	205,79
0,316	206,17	207,65	212,29	217,46	222,35
0,397	224,88	226,12	229,7	233,78	237,59
0,500	241,42	242,47	245,23	248,44	251,43
0,630	255,85	256,81	258,86	261,42	263,73
0,792	268,51	269,42	271,01	273,02	274,65
0,998	279,92	280,76	281,96	283,49	284,76
1,256	290,46	291,43	292,24	293,33	294,24
1,581	300,81	301,99	302,42	303,07	303,62
1,991	312,14	313,24	313,09	313,31	313,58
2,506	323,98	325,73	325,05	324,76	324,51
3,155	340,53	340,44	338,89	337,92	337,06
3,972	357,38	356,85	354,53	352,74	351,31
5,000	375,12	374,44	371,56	369,21	367,16
6,295	392,64	392,13	389,19	386,45	383,93
7,924	409,16	408,9	405,97	403,42	400,84
9,976	423,58	424,2	421,68	419,34	416,99
12,560	442,24	438,08	435,68	433,72	431,81
15,810	453,21	449,3	447,37	445,9	444,46
19,910	461,86	458,62	457,14	455,94	454,97
25,060	468,07	465,84	464,73	463,83	463,24
31,550	474,68	470,84	469,87	469,09	468,79
39,720	476,96	473,18	472,24	471,73	471,62
50,000	475,26	471,76	470,97	470,48	470,56
62,950	468,18	465,31	464,45	464,03	464,14
79,240	454,91	451,82	450,96	450,49	450,62
99,760	431,6	429,47	428,64	428,07	428,12
125,600	400,04	397	396,04	395,37	395,12
158,100	354,67	355,14	354,08	353,25	352,92
199,100	307,18	305,78	304,92	304,14	303,62
250,600	253,7	253,66	252,92	252,09	251,39
315,500	202,97	203,22	202,38	201,64	200,99
397,200	157,46	157,9	157,07	156,34	155,72
500,000	119,95	119,42	118,54	117,85	117,33
629,500	88,778	88,19	87,235	86,773	86,375
792,400	64,363	63,671	62,988	62,485	62,198
997,600	46,559	45,343	44,771	44,405	44,165

Příloha 4

Na přiloženém CD se nachází 3 adresáře:

1. adresář s názvem Dokument obsahuje samotný text práce ve formátech pdf a doc.
2. adresář s názvem Měřicí software obsahuje veškeré programové vybavení nutné ke spuštění měření vodivosti v programu LabVIEW 8.5 (ovladače, vlastní program).
3. adresář s názvem Data obsahuje veškeré naměřené hodnoty uvedené v předchozích přílohách ve formátu xls.