



Bakalářská práce

Studium roztoků pro nanomateriály v biomedicině

Studijní program:

B0914P360007 Biomedicínská technika

Autor práce:

Ondřej Mrázek

Vedoucí práce:

Ing. Štěpán Kunc, Ph.D.

Katedra fyziky

Liberec 2023



Zadání bakalářské práce

Studium roztoků pro nanomateriály v biomedicině

<i>Jméno a příjmení:</i>	Ondřej Mrázek
<i>Osobní číslo:</i>	D20000141
<i>Studijní program:</i>	B0914P360007 Biomedicínská technika
<i>Zadávající katedra:</i>	Fakulta zdravotnických studií
<i>Akademický rok:</i>	2022/2023

Zásady pro vypracování:

Cíle práce :

Cílem práce je vytvořit metodiku pro vyhodnocování roztoků k přípravě nanovláken pro biomedicínské aplikace.

Teoretická východiska :

Metoda střídavého zvlákňování z roztoku zatím není zcela prozkoumána. Jeden z možných faktorů ovlivňující tento proces je elektrická charakteristika samotného roztoku. Budou provedeny základní elektrická měření roztoků. Cílem je zhodnotit vliv těchto měření na přípravu nanovláken pro biomedicínské aplikace.

Výzkumné předpoklady/výzkumné otázky :

1. Předpokládá se spojitost vlastností roztoků s možností přípravy nanovláken metodou střídavého zvlákňování

Metoda:

Analýza a syntéza dostupných zdrojů

Technika práce, vyhodnocení dat :

Teoretická práce – zpracována v editoru Microsoft Office Word a Microsoft Office Excel

Místo a čas realizace výzkumu :

Bakalářská práce zahrnuje laboratorní měření vybraných typů roztoků a kapalin v laboratořích KFY.

Vzorek :

Roztoky vhodné i nevhodné pro střídavé zvlákňování

Rozsah práce :

Rozsah bakalářské práce činí 40-50 stran (tzn. 1/3 teoretická část, 2/3 výzkumná část)

<i>Rozsah grafických prací:</i>	5
<i>Rozsah pracovní zprávy:</i>	50 – 70
<i>Forma zpracování práce:</i>	tištěná/elektronická
<i>Jazyk práce:</i>	Čeština

Seznam odborné literatury:

- [1] A. K. Arof, S. Amirudin, S. Z. Yusof, a I. M. Noor, "A method based on impedance spectroscopy to determine transport properties of polymer electrolytes", *Phys. Chem. Chem. Phys.*, roč. 16, č. 5, s. 1856-1867, led. 2014, doi: 10.1039/C3CP53830C.
- [2] R. Dersch, M. Steinhart, U. Boudriot, A. Greiner, a J. H. Wendorff, "Nanoprocessing of polymers: applications in medicine, sensors, catalysis, photonics", *Polym. Adv. Technol.*, roč. 16, č. 2-3, s. 276-282, 2005, doi: 10.1002/pat.568.
- [3] Y. Zhang, C. T. Lim, S. Ramakrishna, a Z.-M. Huang, "Recent Development of Polymer Nanofibers for Biomedical and Biotechnological Applications", *J. Mater. Sci. Mater. Med.*, roč. 16, s. 933-46, lis. 2005, doi: 10.1007/s10856-005-4428-x.
- [4] M. A. Careem, I. S. M. Noor, a A. K. Arof, "Impedance Spectroscopy in Polymer Electrolyte Characterization", in *Polymer Electrolytes*, John Wiley & Sons, Ltd, 2020, s. 23-64. doi: 10.1002/9783527805457.ch2.
- [5] S. Wang, J. Zhang, O. Gharbi, V. Vivier, M. Gao, a M. E. Orazem, "Electrochemical impedance spectroscopy", *Nat. Rev. Methods Primer*, roč. 1, č. 1, s. 41, čer. 2021, doi: 10.1038/s43586-021-00039-w.
- [6] L. R. Manea, L. Hristian, A. L. Leon, a A. Popa, "Recent advances of basic materials to obtain electrospun polymeric nanofibers for medical applications", *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, roč. 145, s. 032006, srp. 2016, doi: 10.1088/1757-899X/145/3/032006.
- [7] J. Lepšík, "Analýza vybraných parametrů při zvláknování ligninu", srp. 2021, Viděno: 20. listopad 2021. [Online]. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/160897>
- [8] X. Li a Y. Wang, "Complex impedance study on polymer-derived amorphous silicon carbonitride", *Ceram. Int.*, roč. 43, č. 16, s. 13560-13564, lis. 2017, doi: 10.1016/j.ceramint.2017.07.062.
- [9] A. Straka, "Vliv struktury povrchu zvláknovací jednotky na odstředivé zvláknování", lis. 2019, Viděno: 20. listopad 2021. [Online]. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/154143>
- [10] M. Badošek, "Využití přírodních polymerů pro řízené uvolňování léčiv", *The use of biopolymers for controlled release of drugs*, 2018, Viděno: 20. listopad 2021. [Online]. Dostupné z: <https://dk.upce.cz/handle/10195/71729>

Vedoucí práce: Ing. Štěpán Kunc, Ph.D.
Katedra fyziky

Datum zadání práce: 26. října 2022
Předpokládaný termín odevzdání: 5. května 2023

L.S.

prof. MUDr. Karel Cvachovec, CSc.,
MBA
děkan

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu práce panu Ing. Štěpánu Kuncovi, Ph.D. za odborné vedení, důležité rady a připomínky a také za trpělivost během vypracování této bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval všem respondentům za jejich skvělou spolupráci, vstřícnost a upřímnost během prováděného výzkumu. Jmenovitě jsou to pan doc. Ing. Petr Mikeš, Ph.D. a kolegyně Ondřej Hradecký, Dana Paličková a Bc. Aleš Vidrich. Dále bych chtěl poděkovat rodičům za podporu v průběhu vypracování práce a celého studia.

Anotace

Název práce: Studium roztoků pro nanomateriály v biomedicině

Abstrakt:

Studovanou veličinou v návaznosti na tvorbu nanovláken bude chování impedance roztoků při určitých frekvencích. Impedanční charakterizace kapalin, polymerních roztoků a suspenzí v oblasti nízkých frekvencí může výrazně přispět k porozumění elektrostatického zvlákňování pomocí střídavých zdrojů. Zvlákňování polymerů pomáhá při tvorbě nanovláken, které lze použít pro umělé nervy, šlachy nebo chrupavky. V této práci bude zprovozněna nová aparatura pro impedanční spektroskopii umožňující měření kapalných vzorků ve frekvenčním rozsahu od 0.1 Hz do 5 MHz. Práce se bude zabývat zejména zprovozněním měření, analýzou známých vzorků a vyhodnocením parazitních vlivů na samotné měření kapalin. Cílem práce je vytvořit metodiku práce pro měření impedanční spektroskopie kapalin určených pro tvorbu nanovláken pro biomedicínské účely.

Klíčová slova: spektroskopie, polymery, elektrostatické zvlákňování, komplexní permitivita, polarizovatelnost polymerů

Annotation

Title: Study of solutions for nanomaterials in biomedicine

Abstract:

The studied quantity in relation to the formation of nanofibers will be the behaviour of the impedance of solutions at certain frequencies. Impedance characterization, of liquids, polymer solutions and suspensions in the low frequency region can contribute significantly to the understanding of electrostatic softening using AC sources. The softening of polymers helps in the formation of nanofibers that can be used for artificial nerves, tendons or cartilage. In this work, a new impedance spectroscopy apparatus will be commissioned to measure liquid samples in the frequency range from 0.1 Hz to 5 MHz. In particular, the work will deal with the commissioning of the measurements, the analysis of known samples and the evaluation of parasitic effects on the liquid measurement itself. The aim of this work is to develop a methodology for the measurement of impedance spectroscopy of liquids intended for nanofiber formation for biomedical purposes.

Keywords: spectroscopy, polymers, electrostatic softening, complex permittivity, polarisability of polymers

Obsah

Obsah	8
Seznam použitých zkratk	10
1 Úvod.....	11
2 Teoretická část	12
2.1 Impedance	12
2.2 Vodivost	13
2.3 Komplexní permitivita	13
2.4 Spektroskopie pomocí střídavého napětí	15
2.4.1 Tvorba grafů z výsledků EIS	17
2.4.2 Obvodové modely	20
2.5 Polymery	26
2.5.1 Základní definice	26
2.5.2 Polymerizace.....	27
2.6 Zvláknování v medicíně.....	27
3 Výzkumná část.....	29
3.1 Princip měření	29
3.2 Základní popis měření.....	29
3.3 Použité přístroje	32
3.3.1 Zesilovač MFLI	32
3.3.2 Dvouelektrodový držák vzorků 12962A.....	33
3.4 Ovládání softwaru měření	36
3.5 Testovací vzorky	40
3.5.1 Měření vzduchu	40
3.5.2 Měření kohoutkové vody	44
3.5.3 Měření destilované vody.....	47
3.6 Měření polymerních roztoků.....	51
3.6.1 Želatina	51
3.6.2 PVA	54
4 Diskuze	57
5 Závěr	59
Seznam zdrojů.....	60
Seznam tabulek	64
Seznam obrázků	64

Seznam grafů	65
Seznam příloh	66

Seznam použitých zkratek

EIS	Elektrochemická impedanční spektroskopie
PVA	Polyvinylalkohol
PVB	Polyvinyl butyral
R	Odpor/Rezistor
Z	Impedance
X	Reaktance
G	Vodivost
ϵ	Permitivita
U	Napětí
DC	Stojnosměrný proud
AC	Střídavý proud
$i(t)$	Střídavý harmonický proud závislý na čase
ω	Úhlová frekvence
φ	Fázový posun
Z_r	Reálná část impedance
Z_i	Imaginární část impedance
C	Kapacita/Kondenzátor
L	Cívka/Indukčnost/Indukce
Q	Neideální kondenzátor
W	Wargburgův prvek
R_s	Odpor roztoku
R_{ct}	Odpor při přenosu náboje
C_{dl}	Kapacita dvojvrstvy
IA	Impedanční analyzátor

1 Úvod

Cílem práce je zprovoznění měření a vytvoření metodiky pro měření impedančního spektra kapalin, která se bude používat v budoucnu pro další experimenty na kapalných a pevných látkách na fakultě fyziky Technické univerzity v Liberci. Experimenty budou probíhat na zesilovači MFLI od firmy Zurich Instrument, který slouží jako impedanční analyzátor. Jako další pomůcky využijeme dvouelektrodový držák na vzorky od firmy Ametek a fakultní notebook na analýzu a zpracování dat pomocí programu Matlabu do vhodné podoby pro další analýzu a vyhodnocení. Látky, které budeme potřebovat na ověření funkčnosti aparatury, jsou voda, destilovaná voda. Další měření se bude týkat želatiny a roztoku PVA, které jsou v lékařství užívané na tvorbu umělých tkání, šlach, atd. Vzorky jsou vybrány s ohledem na jejich dostupnou znalost a zároveň pro dobrou reprezentaci těch, které bude třeba analyzovat. V biomedicínské praxi tato metoda může pomoci k rozšíření znalostí o kapalných polymerních látkách používaných k elektrickému zvlákňování. Vyhodnocení impedančního chování vzorků napomůže lepšímu pochopení samotného procesu zvlákňování. Zatím není zcela jasné, které látky budou dobře zvlákňovat a které nikoliv. Motivací práce je vytvoření metodiky pro budoucí měření. Tedy popis použitých přístrojů a měřícího softwaru přístroje, následné zpracování výsledků do grafů a jejich analýza. V jednom z měření budeme zkoumat impedanční spektra látek, která se už uplatňují při zvlákňování pomocí stejnosměrného proudu, přičemž velmi zajímavé bude chování těchto látek při působení střídavého pole.

2 Teoretická část

V této části práce se věnujeme základním veličinám potřebným k pochopení a popisu vlastností experimentů. Dále také k popisu prováděného měření a informacím potřebným k jeho pochopení.

2.1 Impedance

Impedance je odpor, který elektronická součástka, obvod nebo systém klade proudu vyjádřený jako Z . Impedance je vektorová veličina složená z odporu a reaktance.

Odpor se označuje R a je mírou pohybu elektronů mezi atomy v materiálu. Čím snadnější je pro atom pohyb elektronů, tím menší je odpor, který je vyjádřený jako reálné číslo ohmů. Odpor se vyjadřuje ve střídavém a stejnosměrném proudu. Příklady látek s nízkým odporem neboli vodičů jsou měď ($16,78 \text{ n}\Omega/\text{m}$), stříbro ($15,87 \text{ n}\Omega/\text{m}$) a hliník ($28 \text{ n}\Omega/\text{m}$). (Semmlow, 2018; Dvořák, 2016)

Látky s vysokým odporem se označují jako izolanty nebo dielektrika. Příkladem mohou být materiály jako teflon ($1023 \text{ }\Omega/\text{m}$), parafín ($1016 \text{ }\Omega/\text{m}$) a sklo ($1012 \text{ }\Omega/\text{m}$). (Dvořák, 2016)

Látky se středním odporem jsou klasifikovány jako polovodiče. Příkladem je křemík ($2300 \text{ }\Omega/\text{m}$), germanium ($0,5 \text{ }\Omega/\text{m}$) a arsenid galia ($0,5298 \text{ }\Omega/\text{m}$). (Dvořák, 2016)

Reaktance, označovaná X , představuje rychlost, jakou elektronická součástka, obvod nebo systém ukládá a uvolňuje energii při změně proudu a napětí během každého cyklu střídavého proudu. Reaktance se vyjadřuje jako imaginární číslo ohmů. Vzniká při průchodu proudu cívkou nebo kondenzátorem. Při zapojení prvků do obvodu stejnosměrného proudu na kondenzátoru nevzniká žádná reaktance, protože jím stejnosměrný proud neprochází. Prochází-li střídavý proud prvkem s reaktancí, může se energie ukládat a uvolňovat ve formě magnetického nebo elektrického pole. V případě magnetického pole se jedná o indukční reaktanci ($+jXL$), neboli průchod proudu cívkou, v případě elektrického pole o kapacitní reaktanci ($-jXC$), neboli průchod proudu kondenzátorem. Vynásobením této reaktance kladnou odmocninou z^{-1} , jednotkovým imaginárním číslem nazývaným operátor j (i), se Z obvykle vyjadřuje jako komplexní

číslo ve tvaru $R+jXL$ (induktivní reaktance) nebo $R-jXC$ (kapacitní reaktance). (Bard, Faulkner a White, 2022; GAMRY INSTRUMENTS, 2023)

2.2 Vodivost

Konduktivita (nebo elektrická vodivost) je schopnost látky přenášet elektrickou energii. Je to jedna z charakteristických hodnot, které popisují elektromagnetické vlastnosti látky. Kvantifikuje vliv látky na tok elektrického proudu v reakci na elektrické pole. Lze ji také považovat za vlastnost látky, která určuje hustotu vodivého proudu v reakci na elektrické pole. Vodivost vodiče závisí na několika faktorech, včetně jeho tvaru, rozměrů a vlastnosti materiálu zvané vodivost. Vodivost je reciproká hodnota elektrického odporu vyjádřená jako $1/R$. Vodivost součástky určuje, jak rychle jí může protékat proud. Vodivost se měří v jednotkách siemens (S). Z upraveného Ohmova zákona [rovnice 1] je vidět výpočet vodivosti,

$$G = \frac{i}{U} [S] \quad (1)$$

kde U je napětí a i je proud. (Zola, 2019; Muthukrishnan, 2020)

2.3 Komplexní permitivita

Stejně jako může materiálem procházet elektrický proud, může jím procházet i vnější elektrické pole. Elektrická permitivita (ϵ) popisuje, jak snadno může vnější elektrické pole procházet daným materiálem nebo látkou. Pokud je u materiálu pozorována vysoká elektrická permitivita, znamená to lepší odolnost vůči vnějšímu elektrickému poli. Konstanta permitivity volného prostoru (ϵ_0) je mírou elektrické permitivity ve vakuu a má hodnotu $\epsilon_0=8.85 \times 10^{-12}$ F/m. Experimentálně lze k měření elektrické permitivity použít kondenzátor. (Roylennigan, 2021; Krupka, 2003)

Kondenzátor se skládá ze dvou nabitých vodivých desek oddělených od sebe určitou vzdáleností, protože jsou desky nabité, vzniká mezi nimi elektrické pole. Pokud je mezi desky umístěn materiál, tak materiál a elektrické pole na sebe vzájemně působí a intenzita

pole se mění. Na základě této změny intenzity pole lze vypočítat elektrickou permitivitu vloženého materiálu. (Barthel a Buchner, 2003)

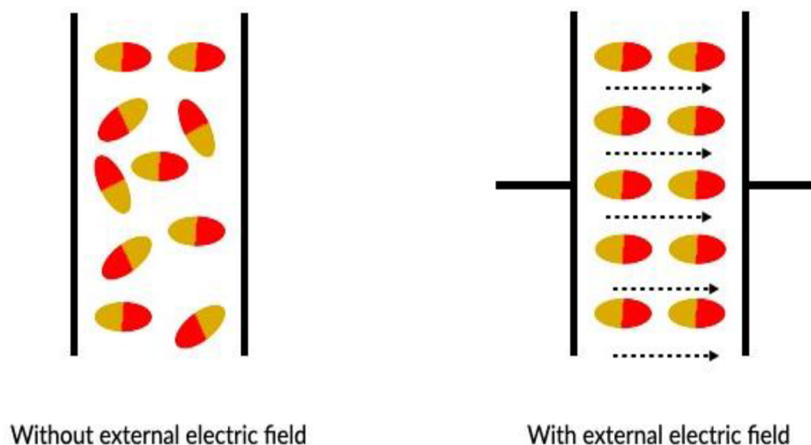
Materiál vložený mezi desky se skládá z molekul, které mohou vykazovat malé dipólové momenty. Molekula, která vykazuje dipólový moment, se na jednom konci jeví jako částečně kladná a na druhém jako částečně záporná [viz obr. 1]. (Grimnes a Martinsen, 2015; Gaurav, 2020)



Electric Dipole

Obrázek 1 Molekula a její elektrické dipóly (Gaurav 2020)

Pokud není přítomno žádné vnější pole, molekuly v materiálu spolu interagují náhodně. Při působení vnějšího elektrického pole se však molekuly v materiálu vyrovnají proti směru pole. [obr. 2]



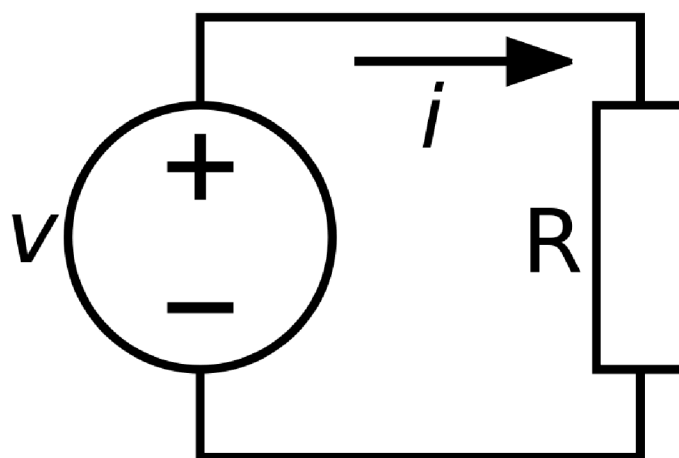
Obrázek 2 Působení vnějšího elektrického pole na molekuly v materiálu (Gaurav 2020)

Protože dipóly samy o sobě vytvářejí elektrické pole, protichůdné uspořádání mnoha dipólů s vnějším polem způsobí snížení celkové intenzity tohoto vnějšího pole. (Sebastian, 2008)

2.4 Spektroskopie pomocí střídavého napětí

Elektrochemická impedanční spektroskopie (EIS) je v elektroanalytické chemii velmi komplexní téma. Vzhledem k tomu, že budeme měřit zejména kapaliny, lze naše měření považovat za EIS. Pro pochopení elektrochemické impedanční spektroskopii, je důležité zavedení pojmu elektrický odpor pomocí Ohmova zákona [rovnice 2], kde U je napětí mezi body (a) a (b), i je proud, který protéká mezi body (a) a (b), a R je elektrický odpor, symbolicky znázorněný rezistorem na obrázku 3. Konceptně R představuje odpor proti proudu protékajícímu elektrickým obvodem. Čím větší je R , tím menší proud protéká rezistorem při daném napětí. (Peroff, 2022)

$$R = \frac{U}{i} [\Omega] \quad (2)$$



Obrázek 3 Elektrický obvod zázorňující Ohmův zákon (Pohořelský, 2022)

Tento popis odporu pomocí Ohmova zákona platí konkrétně pro stejnosměrný proud (DC), kdy je na rezistor přivedeno statické napětí nebo proud. Naproti tomu impedance je měřítkem odporu, který obvod vykazuje v souvislosti s průchodem střídavého

elektrického proudu (AC). Ve střídavém systému již není přiváděný signál statický, ale kmitá zpravidla jako sinusová vlna o dané frekvenci. Rovnice pro impedanci je analogická Ohmovu zákonu, avšak místo R pro odpor používáme Z pro impedanci [viz rovnice 3].

$$Z = \frac{U(\omega)}{i(\omega)} [\Omega] \quad (3)$$

Impedance Z je úměrná frekvenčně závislému napětí a frekvenčně závislému proudu, kde ω je úhlová frekvence oscilující sinusovky. (Macdonald et al., 2018)

Po pochopení impedance se můžeme na elektrochemickou impedanční spektroskopii dívat jako na elektroanalytickou techniku. Při experimentu EIS se pomocí potenciostatu přivádí do elektrochemického systému sinusový napěťový (nebo proudový) signál a výsledný proudový (nebo napěťový) signál se zaznamenává a analyzuje z pohledu jeho amplitudy, frekvence a periody.

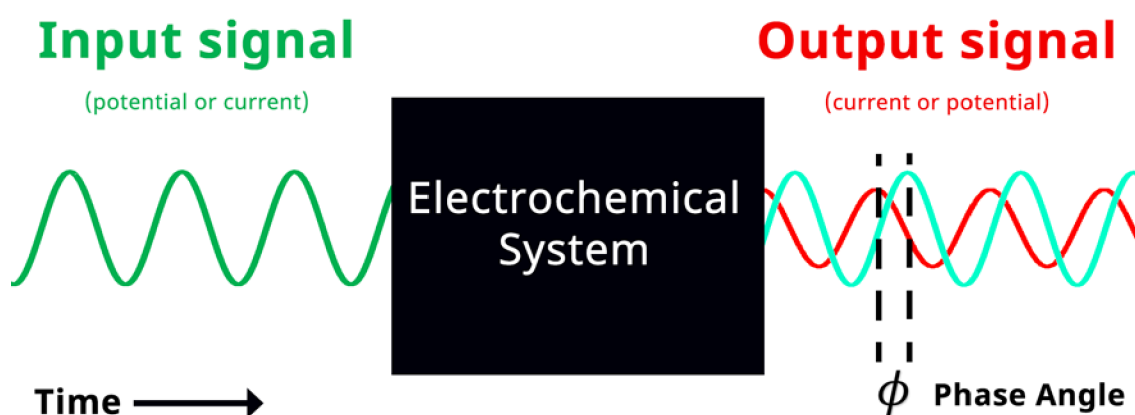
Pokud je přiložený signál napěťový a měřený signál proudem, označuje se jako "potenciostatická EIS". Pokud je přiváděný signál proudový a měřený signál je potenciálový, označuje se jako "galvanostatická EIS". V případě potenciostatické EIS se aplikuje potenciál ve tvaru uvedeném v rovnici 4,

$$U(t) = U_0 * \cos(\omega t) [V] \quad (4)$$

kde U_0 je amplituda sinusového průběhu napětí, ω je úhlová frekvence, t je čas a člen ωt představuje fázi průběhu. Úhlová frekvence ω je mírou toho, kolik cyklů za jednotku času signál vykoná. Amplituda U_0 je mírou velikosti napěťového nebo proudového signálu. Uživatel řídí frekvenci a amplitudu vstupního potenciálního signálu pomocí potenciostatu nebo analyzátoru frekvenční odezvy (FRA). Měřený výstupní proudový signál, $i(t)$ (rovnice 5), má stejnou frekvenci jako vstupní signál, ale jeho fáze může být posunuta o konečnou hodnotu, známou jako fázový posun nebo fázový úhel φ .

Naměřená amplituda výstupního proudu i_0 se při dané frekvenci mění v závislosti na impedanci elektrochemického systému. (Peroff, 2022)

$$i(t) = i_0 * \cos(\omega t - \varphi) [A] \quad (5)$$



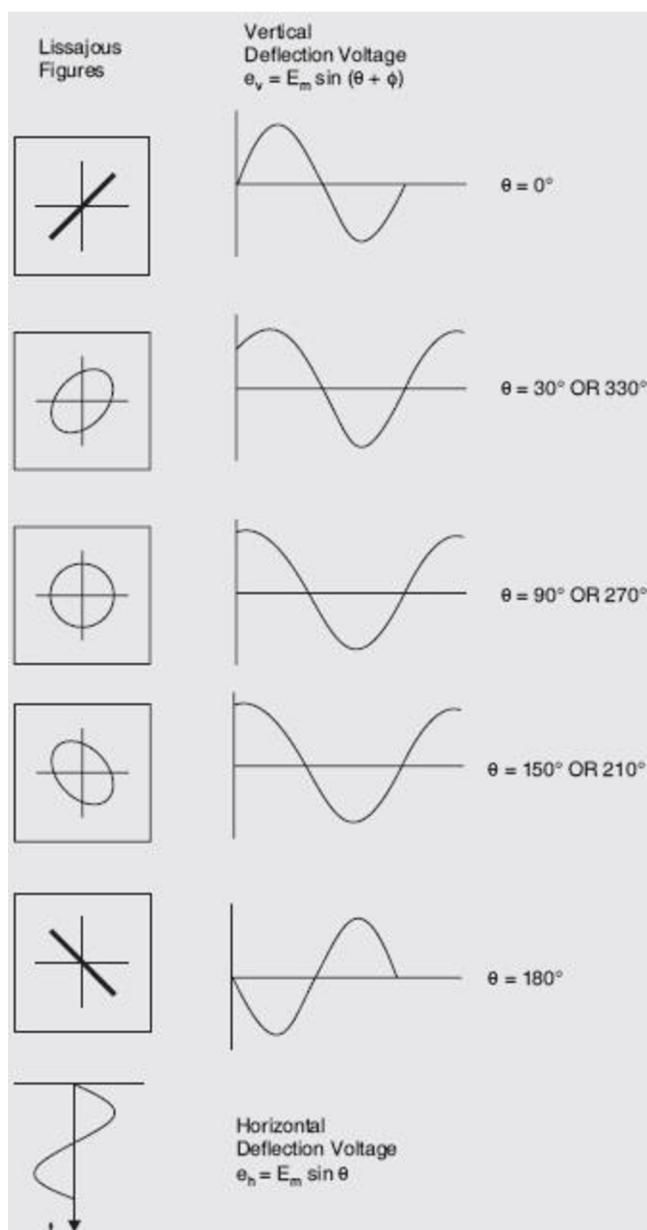
Obrázek 4 Zjednodušený diagram elektrochemické impedanční spektroskopie s fázovým úhlem (Peroff 2022)

2.4.1 Tvorba grafů z výsledků EIS

Kompletní experiment EIS se skládá ze sekvence sinusových napěťových signálů soustředěných kolem žádané hodnoty napětí. Amplituda každého sinusového signálu zůstává konstantní, ale frekvence vstupního signálu se mění. Obvykle jsou frekvence každého vstupního signálu rozloženy na sestupné logaritmické stupnici od ~10 kHz - 1 MHz až po spodní hranici ~10 mHz - 1 Hz. Pro každé vstupní napětí se při dané frekvenci měří odpovídající výstupní proud.

Výsledek vynesení vstupního a výstupního signálu do jednoho grafu závislosti proudu na potenciálu se nazývá Lissajousův graf [viz obr. 5]. Tvar Lissajousova grafu závislosti proudu na napětí je přímka, pokud jsou vstupní a výstupní signály ve fázi nebo pokud je $\varphi = 0$. Pokud jsou vstupní a výstupní signály mimo fázi, tvar Lissajousova grafu se

zobrazí jako nakloněný ovál [obr. 5]. Šířka oválu udává fázový úhel výstupního signálu. Pokud například Lissajousův graf vypadá jako dokonalý kruh, znamená to, že výstupní signál je zcela mimo fázi (tj. $\pm 90^\circ$) vzhledem ke vstupnímu signálu. (Brett a Brett, 1993)

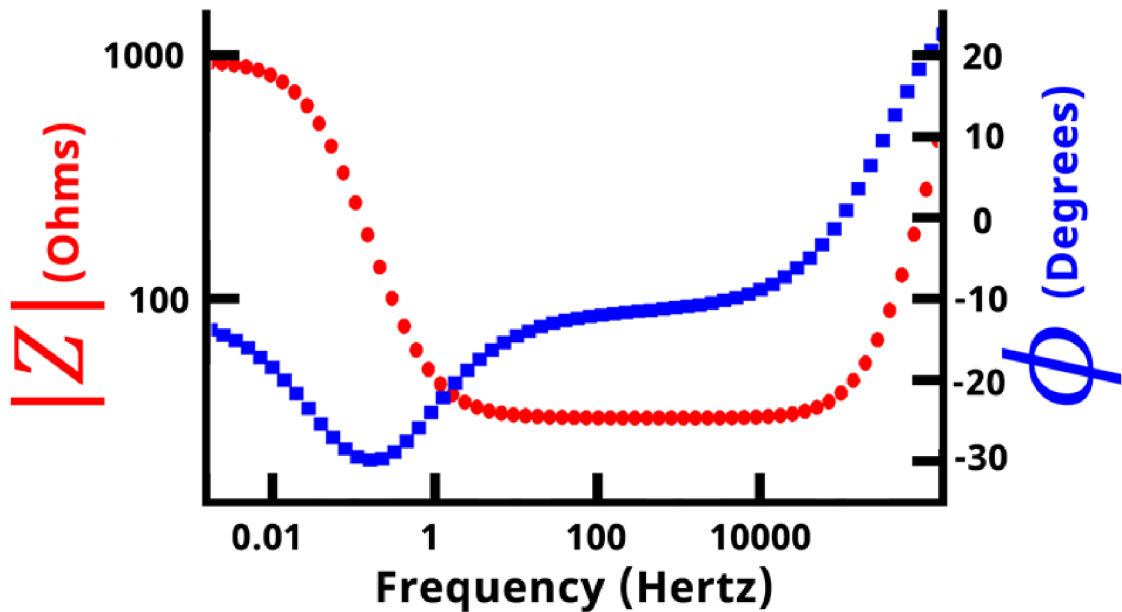


Obrázek 5 Příklady Lissajousových grafů s různým fázovým posunutím (Dubey, 2021)

Absolutní hodnota impedance je rovna amplitudě napětí U_0 dělené amplitudou proudu i_0 , jak ukazuje rovnice 6.

$$|Z| = \frac{U_0}{i_0} \quad [\Omega] \quad (6)$$

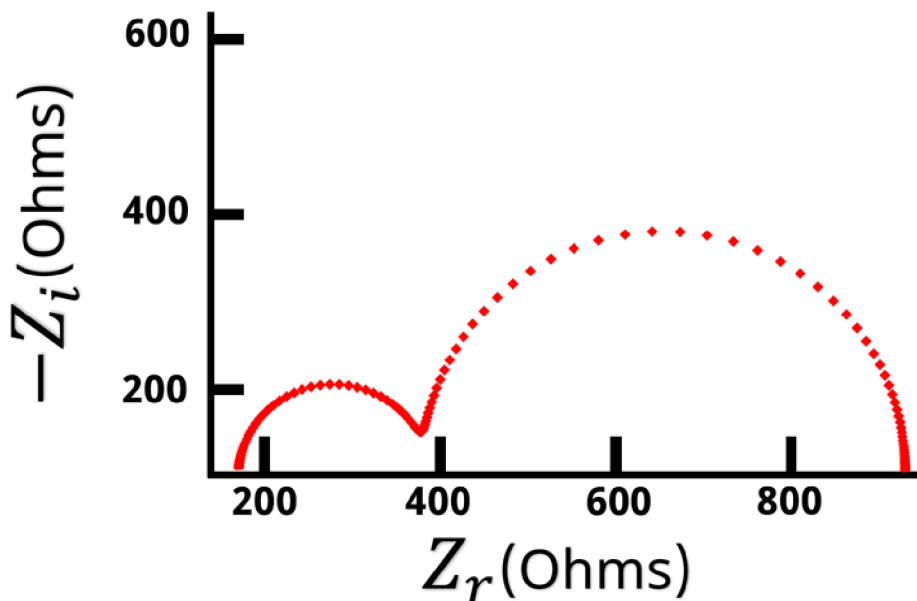
Vyneseme-li absolutní hodnotu impedance $|Z|$ nebo fázový posun jako funkci frekvence na dvouosý graf, dostaneme tzv. Bodeho graf [obr. 6].



Obrázek 6 Příklad Bodeho grafu (Peroff, 2022)

Frekvence a absolutní hodnota impedance se obvykle vykreslují v logaritmickém měřítku, zatímco fázový úhel se zobrazuje lineárně.

Pokud na osu x vyneseme reálnou část impedanci Z_r a na osu y zápornou imaginární část impedanci $-Z_i$, získáme Nyquistův graf [obr. 7].



Obrázek 7 Příklad Nyquistova grafu (Peroff 2022)

Hodnoty imaginární impedance na Nyquistově grafu se běžně převracejí, jak ukazuje graf 3. Alternativně se osa Z_i někdy zobrazuje v obráceném číselném pořadí vzhledem k tomu, že téměř všechny hodnoty Z_i jsou obvykle menší než nula a na kartézském grafu je pohodlnější zobrazovat tvary a obrazce především v prvním kvadrantu (viz obrázek 7). Další konvencí uplatňovanou u Nyquistových grafů je ortogonalita neboli pravoúhlost.



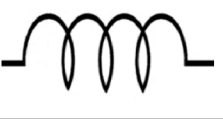
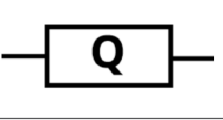
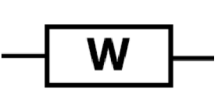
Nyquistovy grafy jsou nejběžnější formou zobrazení impedančních dat, následované Bodeho grafy. Bodeho grafy umožňují snadné určení hodnot frekvence ve srovnání s Nyquistovými grafy, kde se hodnoty frekvence nezobrazují. Obecně platí, že body vlevo dole na Nyquistově grafu odpovídají nejvyšším frekvencím a po stopě doprava se postupuje od vysokých k nízkým frekvencím. Výsledkem experimentu elektrochemické impedanční spektroskopie je celkem pět sloupců dat: frekvence f , reálná část impedance Z_r , imaginární část impedance Z_i , absolutní hodnota impedance $|Z|$ a fázový posun φ . (Peroff, 2022a)

2.4.2 Obvodové modely

Elektrochemickou impedanční spektroskopií lze použít k získání užitečných informací o složitých elektrochemických systémech. Různé části elektrochemického systému lze modelovat pomocí známých obvodových prvků, jejichž impedance je dobře

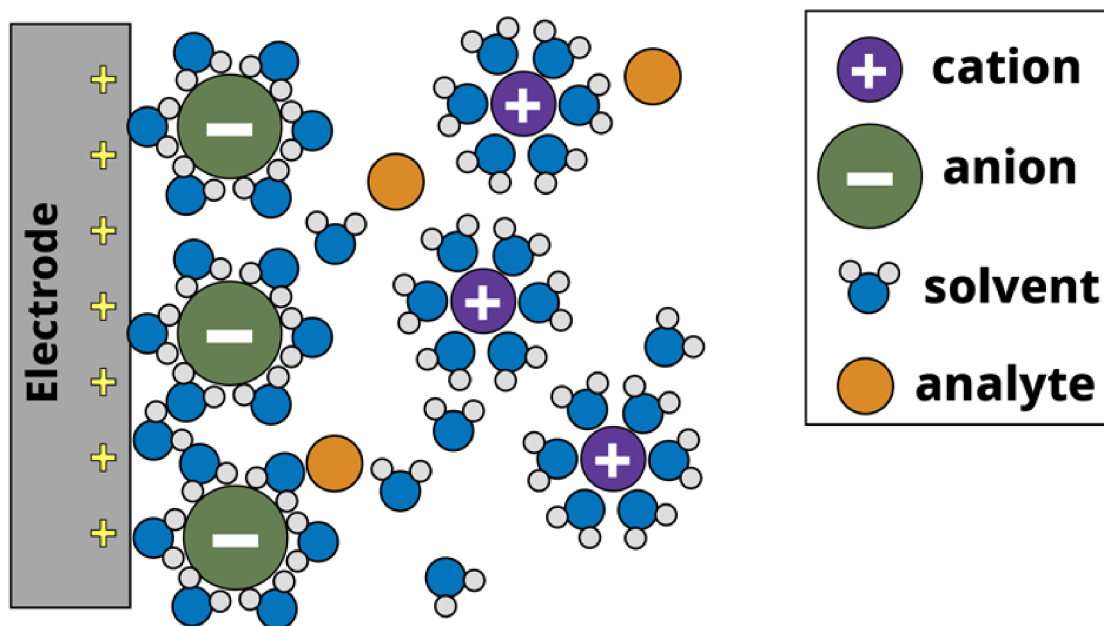
charakterizována. Níže je uvedena tabulka [tabulka 1] známých obvodových prvků a rovnic, které popisují jejich příslušné impedance,

Tabulka 1 Obvodové prvky a výpočet jejich impedance (Peroff 2022)

R		$Z_R = R$
C		$Z_C = \frac{1}{j\omega C} = \frac{-j}{\omega C}$
L		$Z_L = j\omega L$
Q		$Z_Q = \frac{1}{(j\omega)^\alpha Q}$
W		$Z_W = \frac{W}{(j\omega)^{0.5}}$

kde R představuje rezistor, C kondenzátor, L cívku, Q neideální (reálný) kondenzátor, W Wargburgův prvek, který představuje pohyb/difúzi elektronů/iontů v pevné nebo kapalné fázi. (Huang, 2018)

Pro pochopení, jak funguje modelování elektrochemického systému, uvažujme konfiguraci se třemi elektrodami, kde je vodivá pracovní elektroda ponořena do vodného elektrolytu s redoxně aktivní molekulou (ztrácí nebo získává elektrony) jako analytem [obr. 8]. Ačkoli to není na obrázku 5 znázorněno, v systému je zahrnuta protielektroda (pomocná elektroda), která udržuje rovnováhu náboje a referenční elektroda, která slouží jako stabilní referenční bod. Pracovní, protielektroda a referenční elektroda jsou připojeny k potenciostatu. (Magar, Hassan a Mulchandani, 2021)



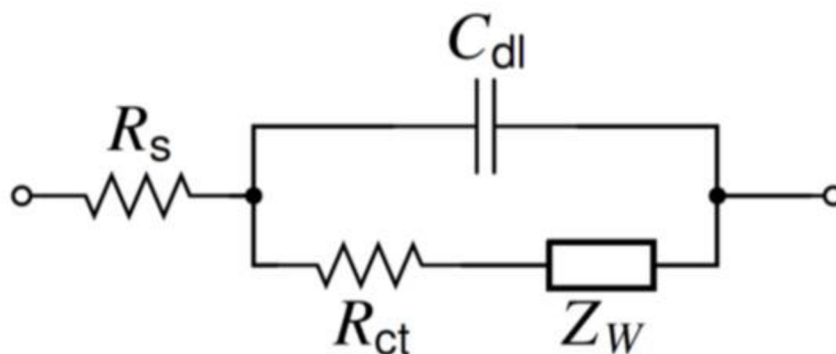
Obrázek 8 Model povrchu elektrody ve vodním systému se třemi elektrodami (Peroff 2022)

Na šedé pracovní elektrodě je kladné napětí, které přitahuje záporně nabitě anionty k povrchu a vytváří elektrochemickou dvojvrstvu. (Brett a Brett, 1993)

V elektrochemickém systému potenciostat přivádí kladné předpětí na pracovní elektrodu vzhledem k referenční elektrodě. Kladný náboj pracovní elektrody přitahuje záporně nabitě anionty k povrchu pracovní elektrody. Anionty jsou solvatovány molekulami rozpouštědla, a když aniont dosáhne povrchu elektrody, molekuly rozpouštědla obklopující aniont se dostanou do kontaktu s povrchem elektrody. Tím se na povrchu elektrody vytvoří druh kondenzátoru. Kondenzátor se skládá ze dvou opačně nabitých desek oddělených dielektrikem. V našem elektrochemickém systému tvoří jednu desku kladný náboj z povrchu elektrody, molekuly rozpouštědla tvoří dielektrikum a druhou desku tvoří záporně nabitě anionty. Tento jev je znám jako elektrochemická dvojvrstva. Elektrochemický systém se také skládá z molekul analytu, které difundují kolem povrchu elektrody. Pokud na pracovní elektrodu přivedeme dostatečně velké napětí, můžeme vyvolat přenos elektronů (oxidaci) z analytu na povrch elektrody. Podobně jako Ohmův zákon lze proces přenosu elektronů mezi analytem a elektrodou modelovat jako odpor. Za povrchem elektrody se nachází objemový roztok, kde jsou umístěny protielektrody a referenční elektrody, které mají konstantní napětí a slouží pro měření napětí na zbylých elektrodách. Roztok elektrolytu není dokonalým vodičem náboje, proto existuje odpor

roztoku i mezi elektrodami, který lze modelovat jako další samostatný rezistor. (Peroff, 2022)

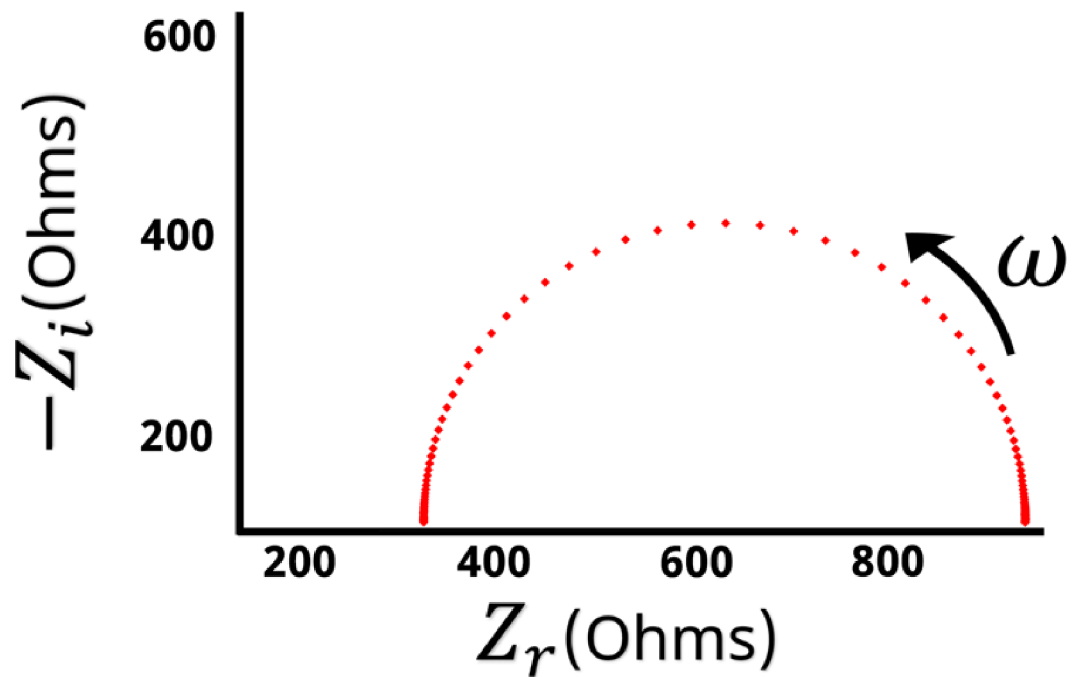
Díky tomuto můžeme sestavit jednoduchý obvod pro popis elektrochemického systému. Tento obvod se běžně používá při modelování obvodů a označuje se jako Randlesův obvod [obr. 9],



Obrázek 9 Randlesův obvod (Torrent-Burgués, 2021)

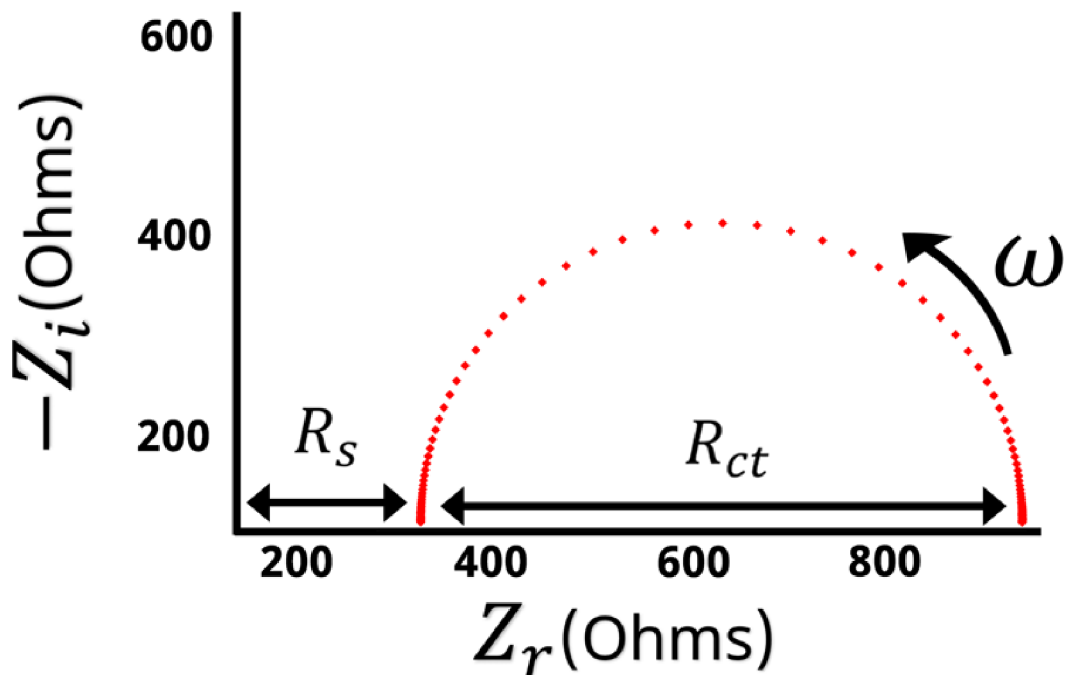
kde R_s je odpor roztoku, R_{ct} je odpor při přenosu náboje a C_{dl} kapacita dvojvrstvy. Protilehlé konce tohoto obvodu si můžeme představit jako pracovní a protilehlou elektrodu, kde proud teče z protilehlé elektrody (levá strana) na pracovní elektrodu (pravá strana) nebo naopak. Vizuálně je vidět, že proud musí nejprve projít přes odpor roztoku R_s . Po průchodu přes R_s však existují dvě možné cesty, kterými proud teče. Buď může procházet kondenzátorem spojeným s elektrochemickou dvojvrstvou C_{dl} nebo může procházet odporem spojeným s přenosem náboje R_{ct} . Proud si vždy zvolí cestu nejmenšího odporu neboli nejnižší impedance. V tomto případě se impedance C_{dl} a R_{ct} mění jako funkce frekvence. (Peroff, 2022)

Nyquistův graf Randlesova obvodu je uveden níže [obr. 10]. Když jsou rezistor a kondenzátor paralelně, tvoří na Nyquistově grafu půlkruh.



Obrázek 10 Nyquistův graf Randlesova obvodu (Peroff 2022)

Pokud víme, jak se impedance chová při vysokých a nízkých frekvencích, můžeme při pohledu na Nyquistův graf [obr. 11] přiřadit hodnoty pro R_{ct} a R_s .



Obrázek 11 Nyquistův graf Randlesova obvodu shodnotami R_s a R_{ct} (Peroff 2022)

Oběcně platí, že když je ω velká, impedance se rovná R_s . Levá strana Nyquistova grafu představuje vysokofrekvenční impedanci a vzdálenost od počátku k vysokofrekvenčním datovým bodům je rovná R_s . Naopak na opačné straně půlkruhu jsou data nízkofrekvenční impedance. Když je hodnota ω velmi nízká nebo blízká nule, impedance se rovná hodnotě $R_s + R_{ct}$. Na základě vysokofrekvenčních údajů víme, že R_s je vzdálenost od počátku k levé straně půlkruhu. To znamená, že šířka půlkruhu je rovna R_{ct} . Při pohledu na Nyquistův graf můžeme určit hodnotu R_s a R_{ct} . Když známe R_s a R_{ct} , můžeme použít rovnici 7 k výpočtu C_{dl} . (Benavente, 2005)

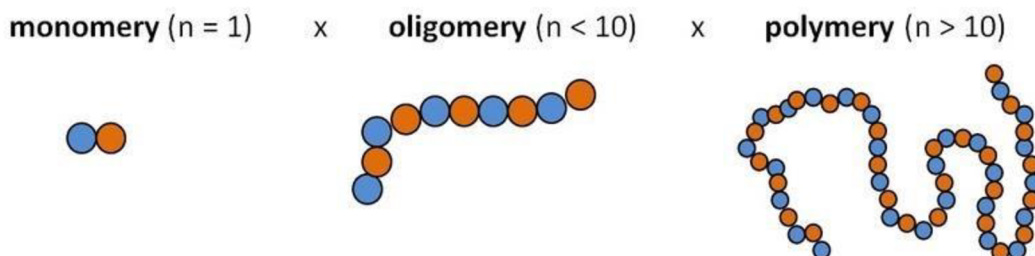
$$Z_{\omega} = R_s + \frac{R_{ct}}{1 + R_{ct} * C_{dl} * (j\omega)} \quad (7)$$

2.5 Polymery

Polymery v práci používáme, protože se v biomedicině užívají k elektrickému zvlákňování a tedy výrobě nanovláken, které se uplatňují například při zhotovování umělých šlach a chrupavek. S konkrétními polymery pracujeme, protože v několika případech byla už schopnost zvlákňování prověřena v dřívějších studiích. Tyto látky byly zvlákňovány stejnosměrným proudem. V této práci se budeme zabývat zvlákňováním střídavým proudem. (Rudnik, 2013)

2.5.1 Základní definice

Termín polymer se běžně používá v průmyslu plastů a kompozitů, často jako synonymum pro plast nebo pryskyřici. Ve skutečnosti polymery zahrnují celou řadu materiálů s různými vlastnostmi. Jsou to organické látky, které se liší od ostatních látek tím, že mají velké molekuly, kterým se říká makromolekuly. V nich se v řetězci opakují základní jednotky, tzv. mery (z řeckého mer = díl). Ve spojení s řeckou předponou poly (poly = mnoho nebo více), proto polymer znamená látku složenou z více merů [viz obr. 12].



Obrázek 12 Porovnání mikromolekulových řetězců (ELUC, 2014)

Jednotka molární hmotnost určuje délku makromolekul. Za makromolekulární látku se považuje sloučenina s vyšší molární hmotností než 10^3 g/mol, v případě polymerů přesahuje hmotnost hodnotu 10^4 g/mol, zatímco molární hmotnost nízkomolekulárních látek může být méně než 100 g/mol (např. voda má molární hmotnost ~ 18 g/mol). Díky své struktuře mají polymery jedinečné vlastnosti, které lze přizpůsobit pro různá použití. Polymery se nacházejí ve volné přírodě. Například kaučuk je přírodní polymerní materiál, který se používá již tisíce let. Má vynikající elastické vlastnosti, které jsou výsledkem

molekulárního polymerního řetězce vytvořeného přírodou. Dalším přírodním polymerem je šelak, pryskyřice produkovaná broukem lakem v Indii a Thajsku, která se používá jako základní nátěr, tmel a lak.

Nejrozšířenějším přírodním polymerem na Zemi je celulóza, organická sloučenina, která se nachází v buněčných stěnách rostlin. Používá se k výrobě papírových výrobků, textilií a dalších materiálů, jako je například celofán.

Polymery můžeme vytvořit i uměle. Mezi umělé nebo syntetické polymery patří materiály, jako je polyethylen, který je nejrozšířenější plast na světě, nachází se v různých výrobcích od nákupních tašek po skladovací nádoby a jednorázové kelímky.

(Běhálek, 2014)

2.5.2 Polymerizace

Polymerizace je proces vytváření syntetických polymerů spojováním malých molekul monomerů do řetězců držených pohromadě kovalentními vazbami. Dvěma hlavními formami polymerace jsou polymerace s postupným růstem a polymerace s růstem řetězce. Hlavní rozdíl mezi nimi spočívá v tom, že při polymeraci s růstem řetězce se molekuly monomeru přidávají do řetězce po jedné molekule. Při postupné polymerizaci se více molekul monomeru váže přímo mezi sebou.

Kdybyste se mohli podívat na polymerní řetězec zblízka, viděli byste, že vizuální struktura a fyzikální vlastnosti molekuly řetězce kopírují fyzikální vlastnosti polymeru. Pokud například polymerní řetězec tvoří pevně stočené vazby mezi monomery, které se obtížně přerušují, bude polymer pravděpodobně pevný a houževnatý. Na druhou stranu, pokud polymerní řetězec obsahuje molekuly s roztažitelnými vlastnostmi, bude mít polymer pravděpodobně pružné vlastnosti.

2.6 Zvlákňování v medicíně

K výrobě nanovláken se nejvíce používá elektrostatické zvlákňování. Principem této metody je působení elektrického pole na látku. V tomto případě působí částice na polymerní roztok nebo taveninu, čímž se vytváří jemná vlákna o průměru v rozsahu

nanometrů. Nanovlákná mají tisíckrát větší plochu povrchu než mikrovlákna. To má za následek vynikající schopnost, díky které se v něm při deformaci netvoří trhliny. Dále disponuje dobrou tuhostí a pórovitostí.

Nanovlákná disponují velkým potenciálem využití do budoucna. Mohla by se používat prakticky ve všech odvětvích průmyslu. Plánuje se jejich vysoké využití k výrobě ochranných oděvů nebo jako pohon vesmírných lodí. V současné době se používají pro výrobu vysoce účinných filtrů vzduchu, které se používají např. na operačních sálech v nemocnicích, atd.

Momentálně probíhá rozsáhlý výzkum pro uplatnění nanovláken v biomedicíně. Předpovídá se jejich využití při výrobě kůže, cév, hojících prostředků nebo umělých orgánů. Dalším možným řešením v budoucnu by mohla být výroba nanovláken z biokompatibilních materiálů, které je schopno tělo po nějaké době vstřebat a napodobuje svými vlastnostmi skutečné tkáň. Nanovlákná, která by byla vyrobena z takto biokompatibilních materiálů, by mohla být využita také na krycí materiál na rány obohacené o antibakteriální nebo jiné látky podporující rychlejší hojení ran. Nanovlákná by mohla sloužit jako matrice pro růst kmenových buněk. Toto řešení se již testuje. Další metodou je zvláknování střídavým proudem, který není zcela dobře popsáno, a proto je jedna z možností výzkumu právě impedanční spektroskopie. Tou se zabýváme v této práci. (Léčba rány.cz, 2012; nanoSPACE, 2023; Sedlák, 2023)

3 Výzkumná část

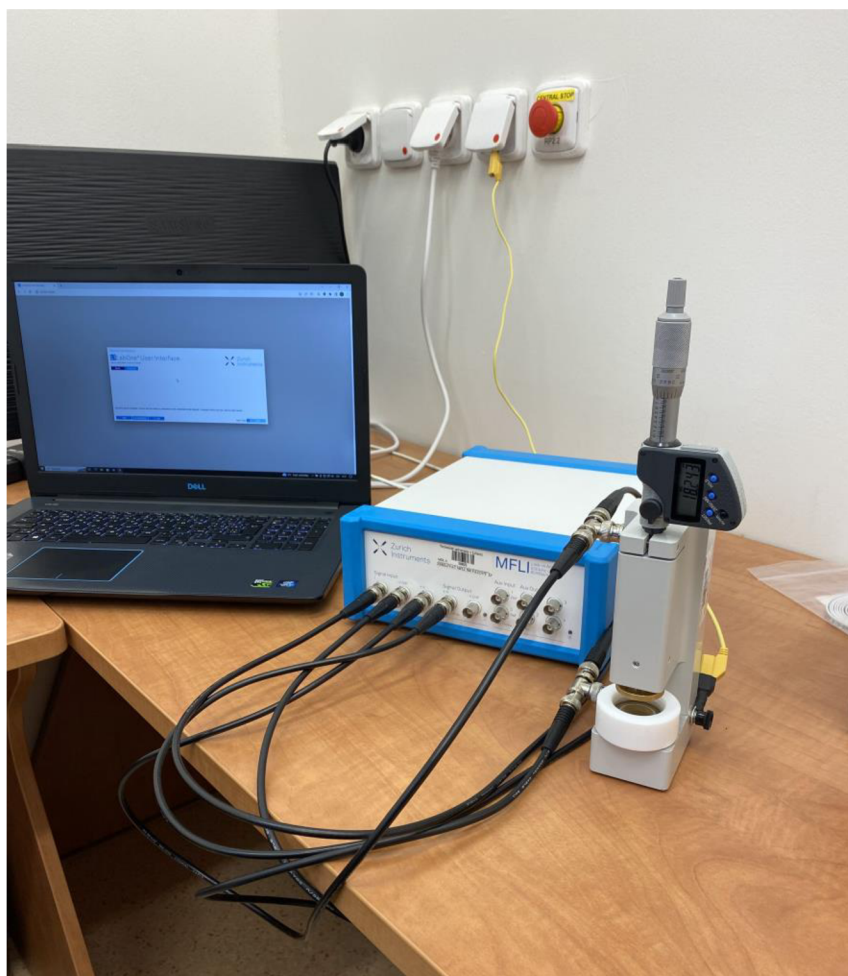
V této kapitole budeme probírat popis měření, použité přístroje a výsledky jednotlivých experimentů spolu s analýzou výsledků.

3.1 Princip měření

Naše měření imituje elektrický obvod, kde náš přístroj je vlastně zdroj střídavého napětí a měřená látka je dielektrikum mezi dvěma elektrodami držáku této látky, neboli vytváří kondenzátor. V pokusu tedy přikládáme napětí na elektrody a sledujeme chování látky, konkrétně její odpor respektive impedanci. Po přiložení napětí na elektrody se v látce začnou natáčet elektrické dipóly, kladný k záporně nabitě elektrodě a záporné ke kladně nabitě elektrodě. V polymerních roztocích se tyto dipóly natáčejí pomaleji, než v pevném prostředí to znamená, že při některých frekvencích se dipóly nestačí úplně otočit k opačně nabitě elektrodě a tím se zvedá impedance “obvodu“. My v měření zjišťujeme právě tuto závislost impedance na frekvence, díky které můžeme vytvořit dalšími grafy zobrazení pro porozumění, jak se jednotlivé látky chovají na vybraných frekvencích.

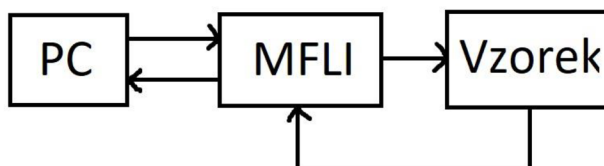
3.2 Základní popis měření

K měření používáme fázově citlivý zesilovač MFLI a jeho rozšíření MFIA pro impedanční analyzátor. V pokusech používáme čtyřterminálové zapojení, které má rozdělené vstupy na proudové a napěťové low a high pro každou elektrodu. Toto zapojení má oproti dvouterminálovému zapojení přesnější konečný výsledek, protože svým zapojením řeší odpor vodiče (minimalizuje jejich vliv) a každý terminál je zaměřený pouze na jednu veličinu o jednom napětí na rozdíl od dvouterminálového, které má dva vodiče rozdělené na low a high pro napětí i proud, takže dochází při impedanci nižší než $1\text{k}\Omega$ k nepřesnostem měření díky vlivu kabelů. V našem měření potřebujeme z těchto hodnot impedance poté vypočítávat další hodnoty pro zpracování v grafech, proto používáme přesnější čtyřterminálové zapojení.



Obrázek 13 Aparatura připravená na měření (vlastní fotografie)

Naše aparatura se skládá z držáku na vzorky, který je spojený pomocí BNC kabelu do zesilovače MFLI a dále držák uzemněn pro maximální přesnost [obr. 13]. Přístroj je připojený do napájení z elektrické sítě a dále k počítači, ve kterém probíhá jeho ovládání. Schéma zapojení je na obr. 14.



Obrázek 14 Schéma zapojení (vlastní fotografie)

Po vložení vzorku pomocí pipety do uzemněného stojanu s dvěma elektrodami [obr. 15] uzpůsobeného pro kapalné vzorky vložíme příslušný vzorek a vrchní elektrodu pomocí mikrometru přiblížíme tak, aby se dotýkala hladiny látky a aby nepřetékala přes elektrodu. Mikrometr přesně definuje vzdálenost elektrod, proto je nutné ho před začátkem měření vynulovat.



Obrázek 15 Držák na vzorky při měření (vlastní fotografie)

Poté zapneme v ovládacím prostředí nástroj impedanční analyzátor, kde nastavíme vybrané frekvenční pásmo, pro které chceme měření provádět. Dále pak nastavíme počet měření v daném rozmezí a také, pro které veličiny chceme svým měřením vykreslit grafy. V našem případě je to fáze (φ), reálná (Real) a imaginární (Imag) část impedance a její absolutní hodnota. Měření probíhá tak, že přístroj postupně prochází celé pásmo frekvencí a zaznamená změřené hodnoty ke každé frekvenci. Záleží na tom, kolik měření před zahájením zvolíme. Čím více měření zvolíme, tím delší čas bude měření trvat. Stejně tak to funguje i u zvoleného frekvenčního pásma. Čím menší frekvenci zvolíme jako počáteční (můžeme až setiny Hz) a k tomu jako konečnou například v jednotkách Hz, tak

může měření trvat i několik hodin, dokonce při opakovaném měření i několik dní. Poté už jen vypneme impedanční analyzátor a pak celý přístroj.

3.3 Použité přístroje

K realizaci experimentu používáme zesilovač MFLI, počítač a držák na vzorky.

3.3.1 Zesilovač MFLI

Jedná se o fázově citlivý zesilovač, který obsahuje rozšíření pro impedanční analyzátor, dále je to velmi přesný měřič LCR (zařízení, které slouží k měření indukčnosti (L), kapacity (C) a odporu (R)) od firmy Zurich Instruments. Měření impedance lze provést ve frekvenčním pásmu od 1 mHz do 5 MHz. V rozsahu frekvencí od 1 Hz do 1 MHz zaručuje přesnost impedančního měření s odchylkou 0,05%. Jeho velkou výhodou je vysoká opakovatelnost měření, malý rozdíl vstupních hodnot proudu a napětí v závislosti na teplotě [obr. 16].



Obrázek 16 MFLI popis vstupů (vlastní fotografie)

V pokusech používáme čtyřterminálové zapojení, které se skládá z dvou napěťových a dvou proudových vstupů. Na obr. 16 je ukázáno jejich přesné uspořádání.

Na obr. 17 je vidět zapojení napájení zdroje přístroje a dále propojení přístroje s PC.



Obrázek 17 MFLI propojení s PC a napájení (vlastní fotografie)

Po zapojení všech kabelů je přístroj připraven k měření.

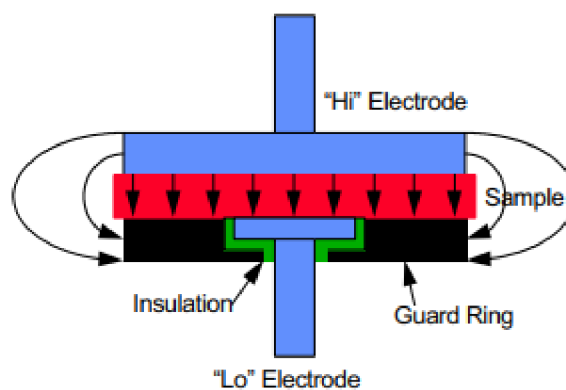
3.3.2 Dvouelektrodový držák vzorků 12962A

Jedná se o držák na vzorky od firmy Ametek [obr. 18], který umožňuje přesné impedanční testy pevných nebo kapalných látek při pokojové teplotě. Skládá se z dvou paralelních elektrod. První pevně umístěna dole a druhou lze pohybovat pomocí nastavení mikrometru až do kontaktu se vzorkem.



Obrázek 18 Držák (vlastní fotografie)

Držák vzorku využívá techniku ochranné elektrody (Guard ring) aby se snížil vliv bludných siločar na okraji vzorku, které by jinak vedly k chybám měření. Ochranná elektroda zajišťuje, že čáry elektrického pole jsou rovnoběžné v celé části vzorku, která se podílí na měření impedance. [obr. 19] (AMETEK, 2023)



Obrázek 19 Popis funkce ochranného prstýnku (AMETEK 2023)

Na obrázku 20 můžeme vidět rozebranou elektrodu na kapalné vzorky. Skládá se z teflonového okraje, který slouží jako ochrana před vytečením kapaliny. Dále z dvou elektrod, větší elektroda je horní a pohyblivá a menší je pevně spojena s ochranným prstenem, čímž zabránuje nerovnoběžným siločarám dopadnout na elektrodu.



Obrázek 20 Jednotlivé části elektrod (vlastní fotografie)

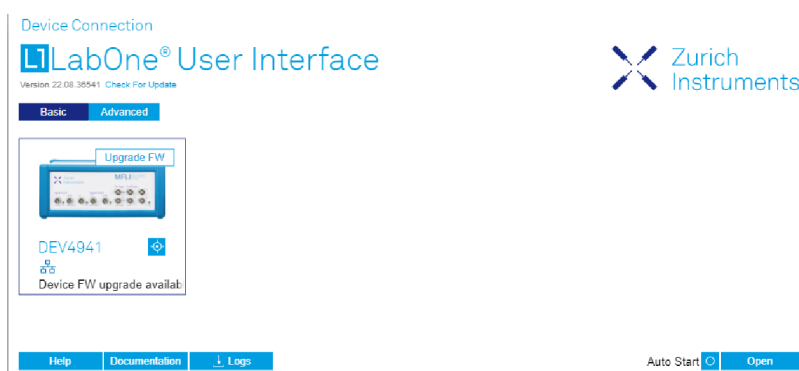
Menší spodní elektroda se zašroubuje do dílu s ochrannou elektrodou a toto celé poté do teflonového okraje, následně se to zašroubuje do spodní části držáku a zbývající větší elektroda do vrchní části držáku. Látku do spodní elektrody uzpůsobené pro kapalné vzorky dostaneme pomocí pipety. Po skončení měření lze obě elektrody opět vyšroubovat a vodou, popřípadě jinou látkou vyčistit. Protože jsme v průběhu měření zjistili, že čištění elektrod má zásadní vliv na celkové měření, zvláště při měření polymerních vzorků je

důležité pořádné vyčištění elektrod, aby usazeniny předchozích vzorků neměly vliv na další měření.

3.4 Ovládání softwaru měření

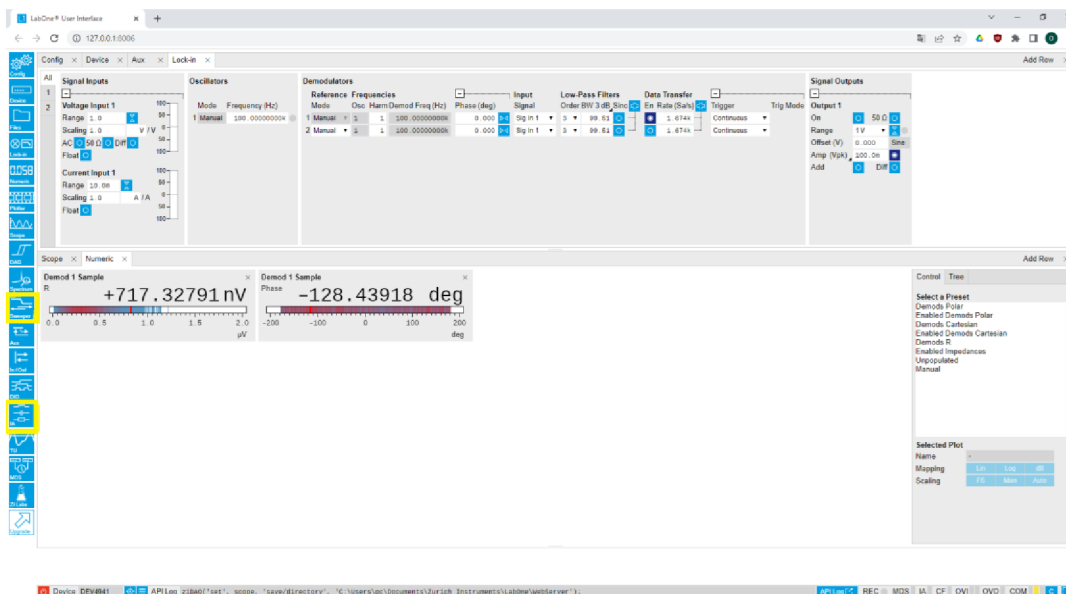
Pokud máme připravený vzorek, můžeme přejít k samotnému měření. V této části popíšeme nastavení systému a samotné měření v prostředí LabOne.

Po připojení přístroje do sítě a k počítači můžeme zapnout internetové rozhraní přístroje MFLI LabOne. Poté musíme zapnout přístroj vypínačem na jeho zadní straně. Prostředí po chvíli načte všechny připojené přístroje a dovolí nám se k němu připojit nebo například probliknout LED pro rozpoznání nabízeného přístroje [obr. 21].



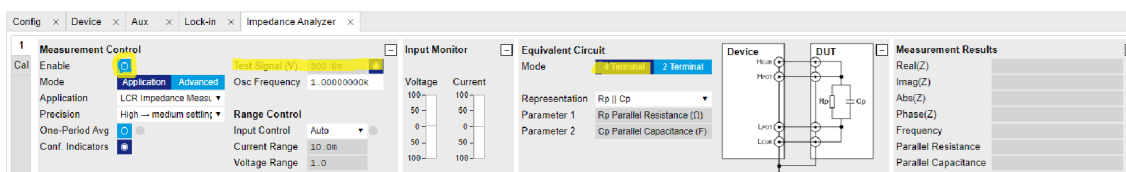
Obrázek 21 LabOne připojení (vlastní fotografie)

Po kliknutí na Open, kterým se připojíme k vybranému přístroji, se otevře úvodní okno, kde můžeme vidět popřípadě přenastavit přístrojové napěťové a proudové vstupy, frekvenci oscilátoru nebo parametry výstupního signálu [obr. 22].



Obrázek 22 LabOne úvodní okno (vlastní fotografie)

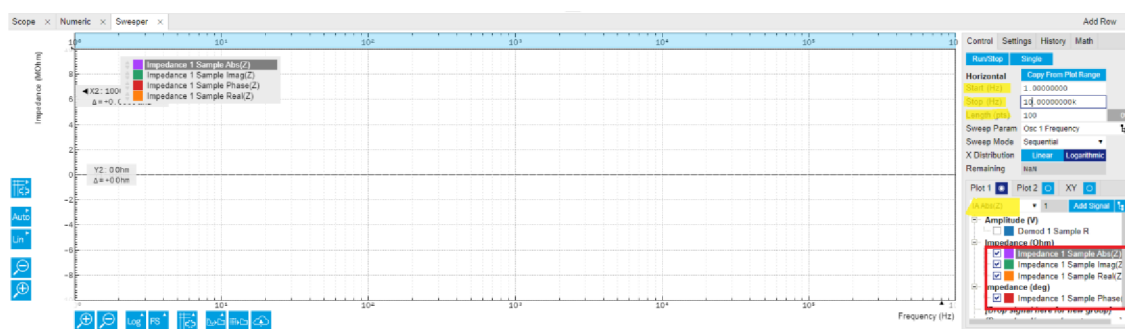
Pro naše měření však budeme potřebovat nástroj IA (impedanční analyzátor), který nalezneme v levé boční liště ve spodní polovině. Poté si tento nástroj přetáhneme mezi ostatní používané nástroje. V této kartě můžeme měnit vnitřní ekvivalentní obvod (pro naše měření je vhodné paralelní zapojení kondenzátoru a rezistoru). Můžeme zde sledovat změřené a dopočtené hodnoty přímo v průběhu měření. Dále také sledovat vstupní napětí a proud nebo například měnit vstupní velikost testovacího signálu [obr. 23], který je pro naše měření 25mV. Lze nastavit až 300 mV. Toto nastavení ale nevyužíváme, protože by mohlo dojít k mírným chybám výsledků.



Obrázek 23 LabOne impedanční analyzátor (vlastní fotografie)

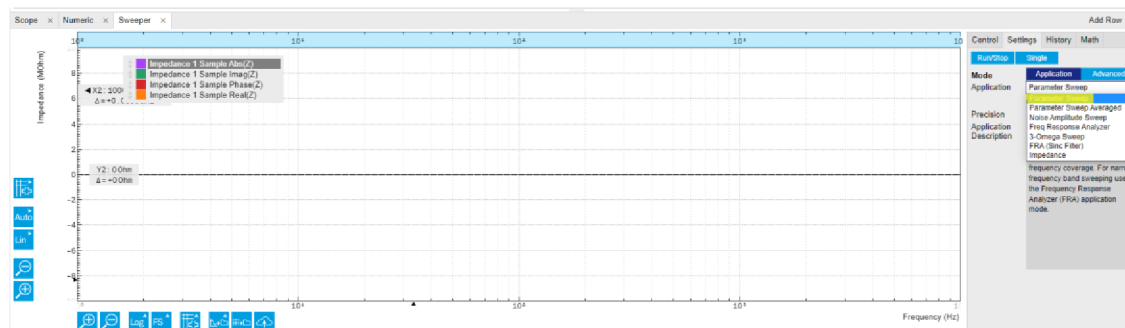
Na obrázku 24 jsme z boční lišty zapnuli funkci Sweeper, nástroj pro generování frekvencí měření a ve kterém se také zobrazuje výsledný graf. Po přetažení Sweeperu mezi aktivní karty se otevře hlavní okno se souřadným systémem pro zobrazení křivek a na pravé straně nastavení měření. V záložce Control nastavíme počáteční a koncovou

frekvenci pokusu, délku měření (neboli kolik měření se uskuteční v zadaném rozmezí frekvencí, z toho vyplývá, že s rostoucím počtem bodů (“Length“) poroste i doba měření). Další důležitou informací, kterou musíme zadat jsou veličiny, které v pokusu chceme sledovat. V našem případě je to reálná a imaginární část a absolutní hodnota impedance a fáze [viz obr. 24].



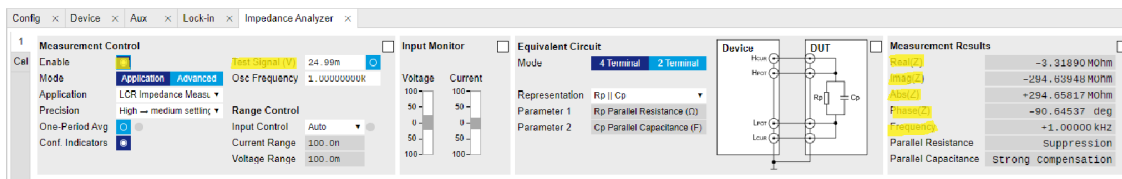
Obrázek 24 LabOne Sweeper control (vlastní fotografie)

Dále v záložce settings vybereme v aplikaci Parametr Sweep, který dává větší důraz na přesnost vybraných měřených parametrů [obr. 25].



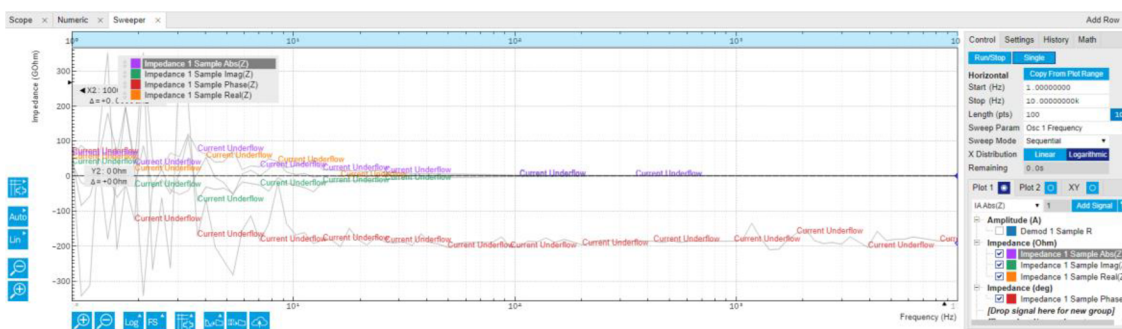
Obrázek 25 LabOne Sweeper nastavení (vlastní fotografie)

Teď už je vše připraveno k zahájení měření, kterým bude pro tuto ilustraci a představení rozhraní vzduch s rozstupem elektrod 2,3 milimetrů. Před samotným zahájením měření musíme ještě v kartě impedančního analyzátoru kliknutím na Enable pro začátek měření [viz obr. 26]. Poté už jen klikneme ve Sweeperu na Single, pro zapnutí jednoho měření. Po zapnutí se nám v řádku Remaining objeví přibližný zbývající čas do konce měření a začnou se vykreslovat křivky naměřených hodnot v grafu.



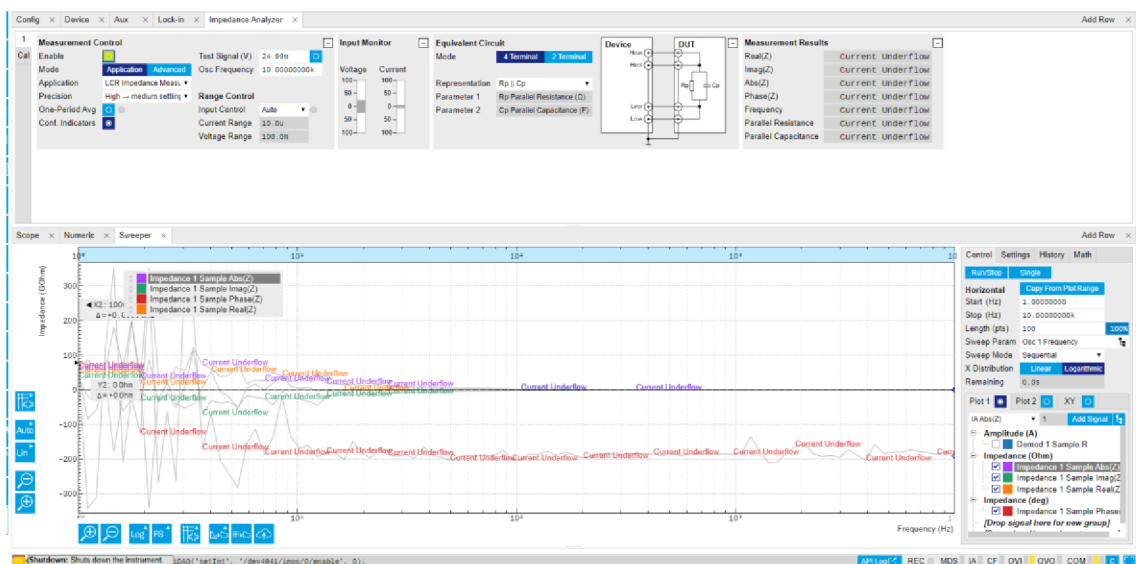
Obrázek 26 LabOne zapnutí IA a start měření (vlastní fotografie)

Po skončení měření ve Sweeperu uvidíme grafy naměřených hodnot zvolených parametrů (fáze, reálná část impedance, atd.). Naše ukázkové měření vzduchu dopadlo podle očekávání a podle předešlých zkušeností s měřením vzduchu prakticky totožně. Po dokreslení všech křivek je vhodné vypnout impedanční analyzátor, abychom se třeba nedotknuli elektrodami a nezpůsobili tak zkrat. Poté můžeme analyzovat vzniklé grafy například pomocí programu Matlab. Ve spodní liště hned pod grafem je možné například změnit měřítko, formát os, stáhnout si v různých formátech graf jako obrázek nebo vygenerovat data z měření ve formě poznámkového bloku ale i dalších formátů [obr. 27].



Obrázek 27 LabOne výsledek měření (vlastní fotografie)

Pro vypnutí přístroje ho nejdříve musíme odpojit od počítače. To uděláme červeným tlačítkem v levém dolním rohu [viz obr. 28].



Obrázek 28 LabOne vypnutí IA (vlastní fotografie)

Poté nám vyskočí tabulka, která říká, že máme chvíli vyčkat, než na přístroji začnou svítit červené LED diody a poté je vhodné kliknout v této tabulce na OK a vypnout přístroj vypínačem na zadní straně přístroje [obr. 29].



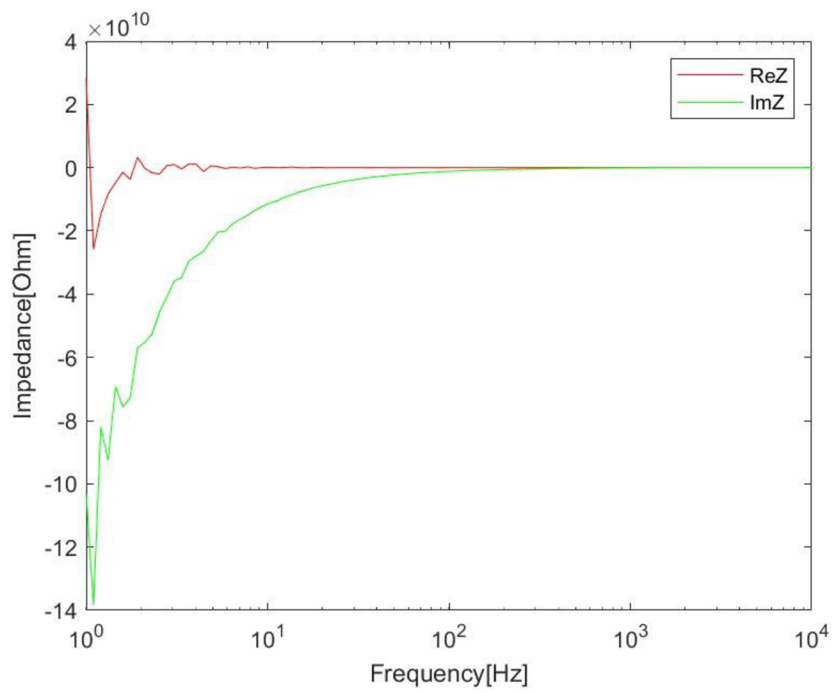
Obrázek 29 LabOne odpojení přístroje (vlastní fotografie)

3.5 Testovací vzorky

Na testovacích vzorcích jsme vyzkoušeli správnost zapojení naší sestavy. Pro tyto účely jsme využili základní měřicí látky, které byly už mnohokrát změřeny a mohli jsme si tedy snadno ověřit funkčnost a správnost našich výsledků.

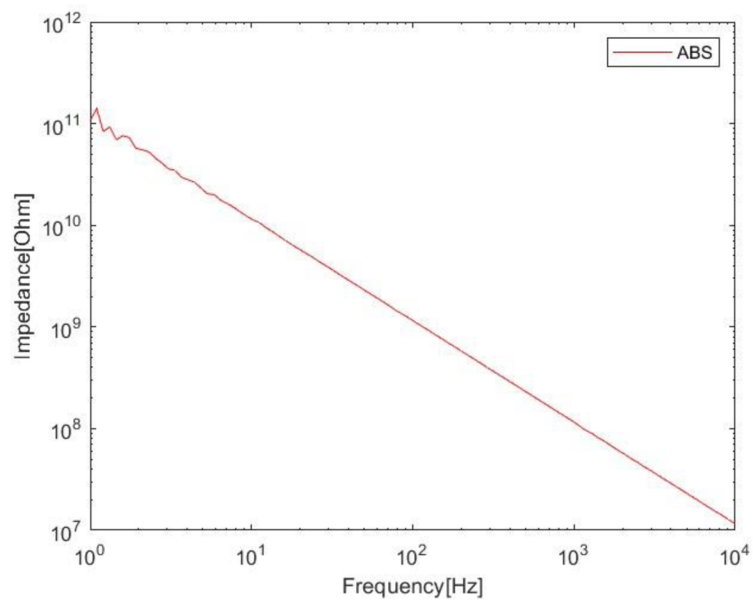
3.5.1 Měření vzduchu

Vzduch jsme použili z důvodů jeho rozsáhlých znalostí z jiných měření a také jeho snadného měření bez potřeby jakýchkoliv příprav.

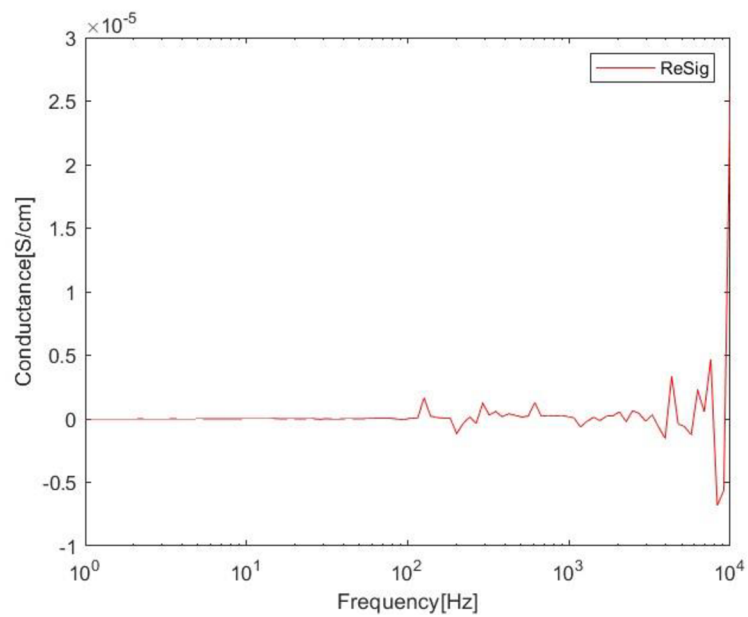


Graf 1 Impedance v závislosti na frekvenci – vzduch (vlastní graf)

Z grafu impedance vyplívá, že s rostoucí frekvencí se snižuje impedance.

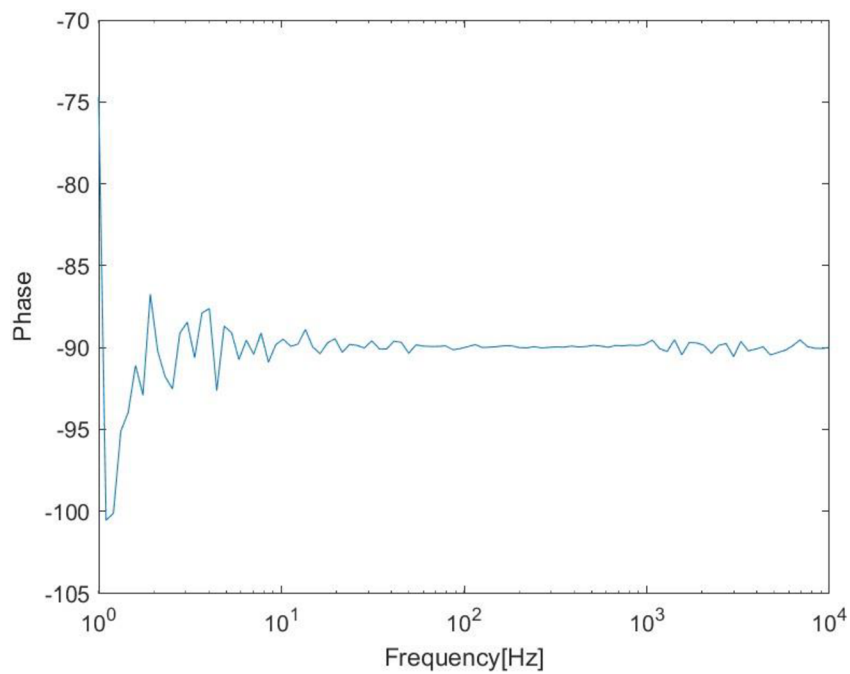


Graf 2 Absolutní hodnota impedance na frekvenci - vzduch (vlastní graf)

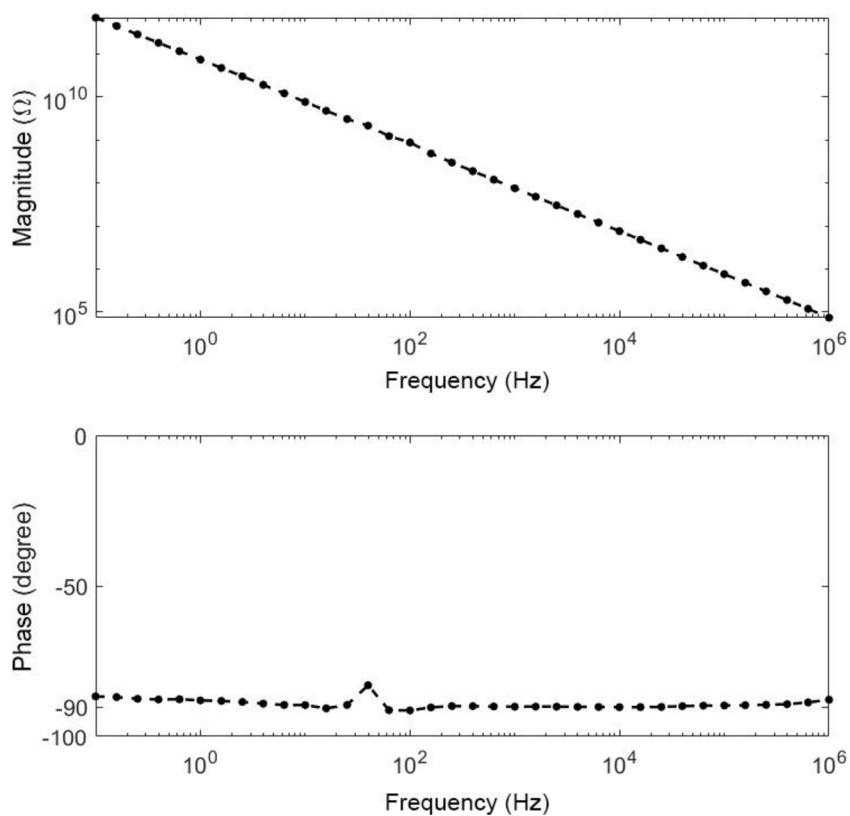


Graf 3 Závislost vodivosti na frekvenci – vzduch (vlastní graf)

Z grafu vodivosti vyplývá, že je vzduch izolant.



Graf 4 Bodeho graf - vzduch (vlastní graf)

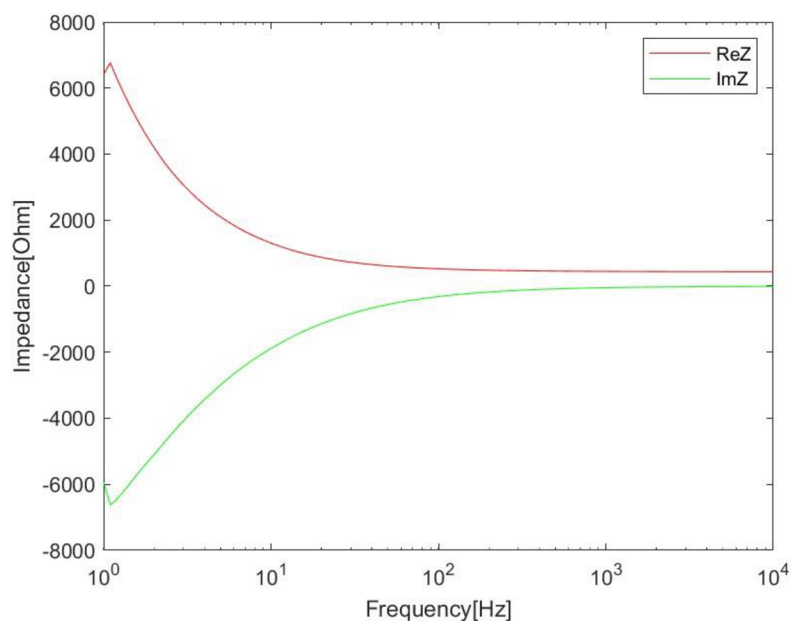


Obrázek 30 Bodeho graf vzduchu pro různé teploty (Sauerwald et al., 2019)

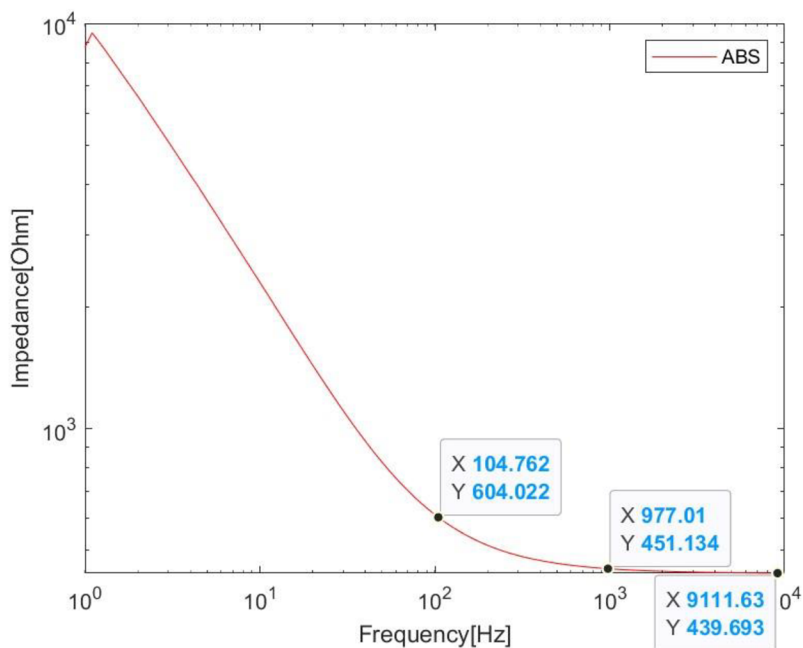
Při pohledu na náš změřený graf a ukázkou grafu z článku *Impedance model for a high-temperature ceramic humidity sensor* si můžeme všimnout, že výsledky jsou srovnatelné. Hodnota fáze v našem grafu je na začátku kolísavá ale s rostoucí frekvencí se ustaluje kolem hodnoty 90°. Přičemž u grafu závislosti absolutní hodnoty impedance na frekvenci vypadají grafy velmi podobné s jediným rozdílem, že námi naměřený graf je posunutý řádově o 1kΩ méně, což mohlo být způsobeno různou relativní vlhkostí.

3.5.2 Měření kohoutkové vody

Kohoutkovou vodu jsme zvolili z důvodu porovnání jejích hodnot s destilovanou vodou.

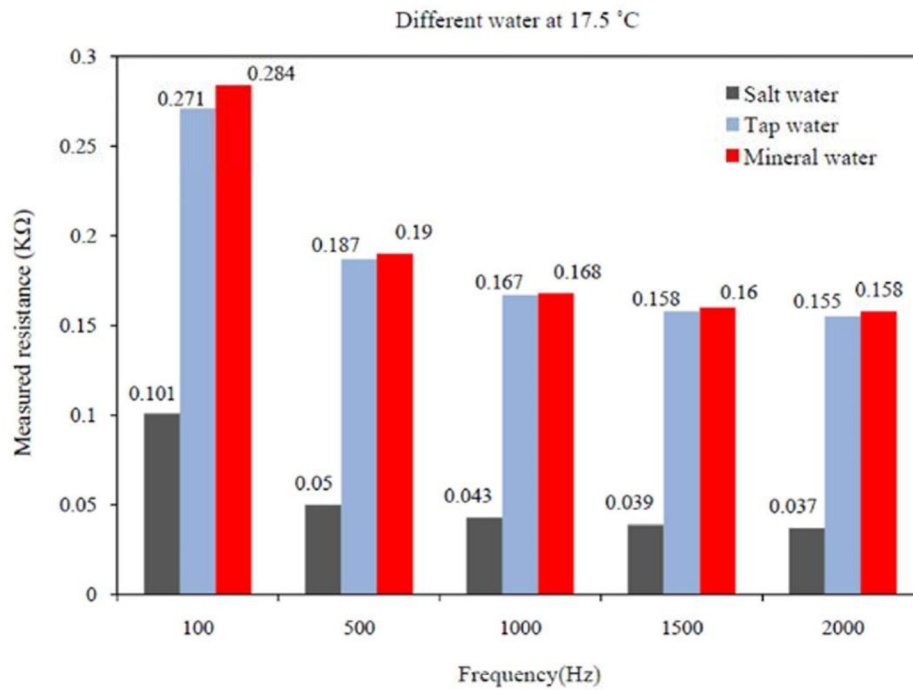


Graf 5 Impedance v závislosti na frekvenci - kohoutková voda (vlastní graf)



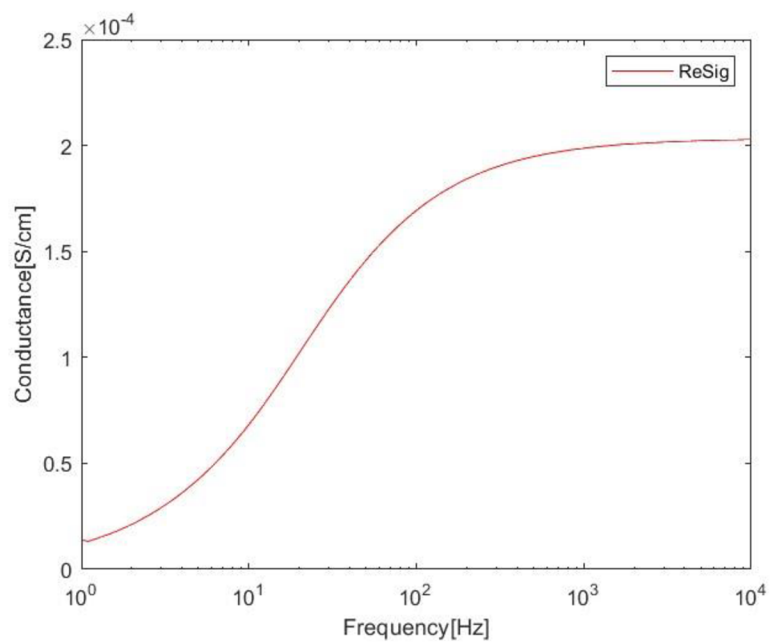
Graf 6 Absolutní hodnota impedance závislá na frekvenci s hodnotami - kohoutková voda (vlastní graf)

Z toho vyplývá, že se podobně jako u vzduchu s rostoucí frekvencí snižuje impedance, tudíž lépe prochází proud.



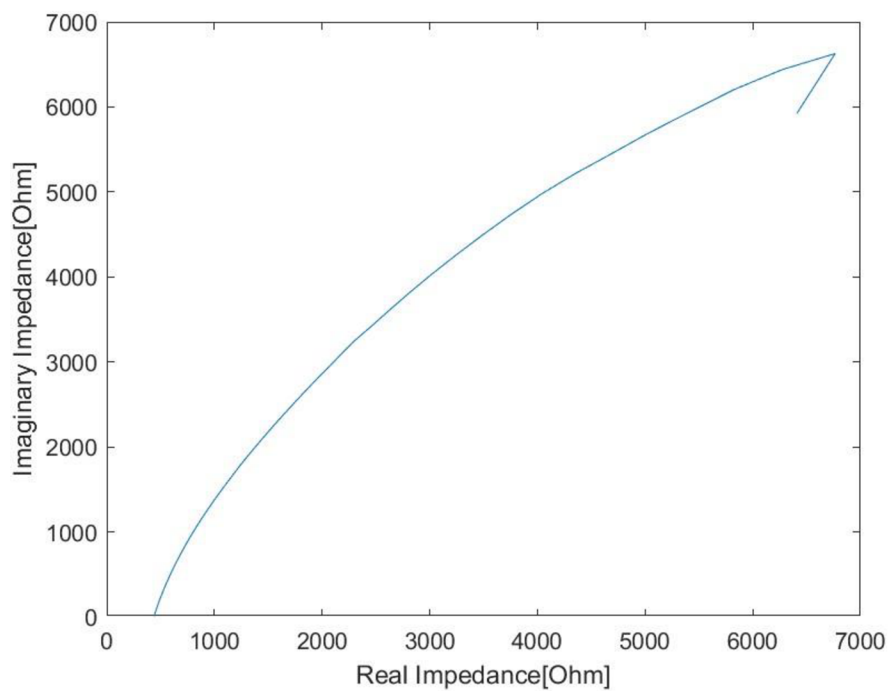
Obrázek 31 Impedance slané, kohoutkové a minerální vody v závislosti na frekvenci (Behzadi a Fekri, 2013)

Z našeho grafu absolutních hodnot impedance v závislosti na frekvenci [graf 6] v porovnání s grafem z článku *Electrical parameter and permittivity measurement of water samples using the capacitive sensor* [obr. 31] můžeme vidět, že jejich hodnoty (v obrázku světle modré) jsou o něco menší než naše. Oba grafy mají klesající tendenci. Z toho si můžeme domyslet, že problém bude v nemožnosti naměření totožných vzorků kohoutkové vody. Kohoutková voda může mít v různých místech jiné složení, proto naše hodnoty nejsou stejné. Ovšem vzhledem k tomu, že rozdíl hodnot není v řádech ale pouze v desítkách či stovkách, tak to znamená, že jsou naše výsledné křivky srovnatelné.

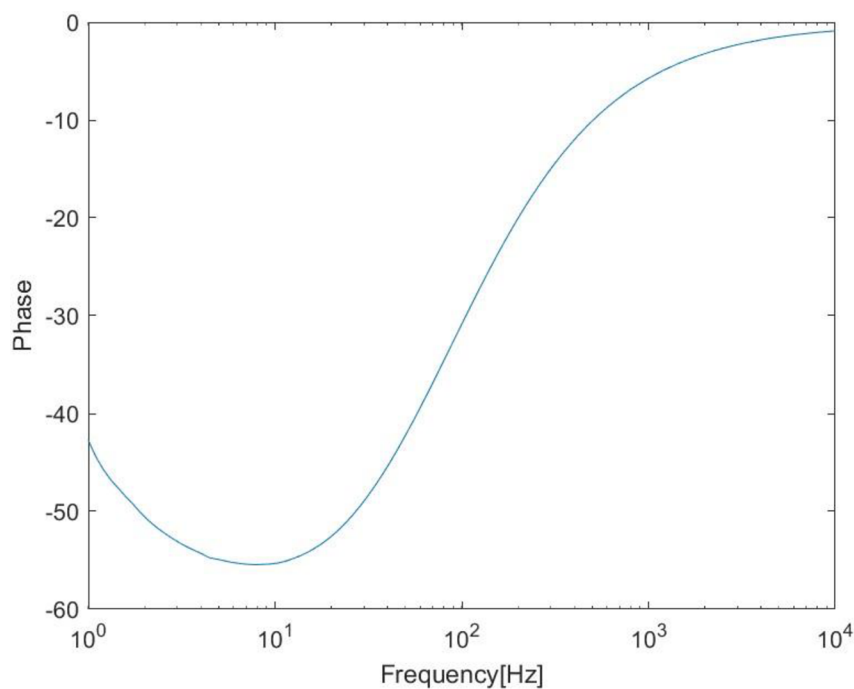


Graf 7 Závislost vodivosti na frekvenci – kohoutková voda (vlastní graf)

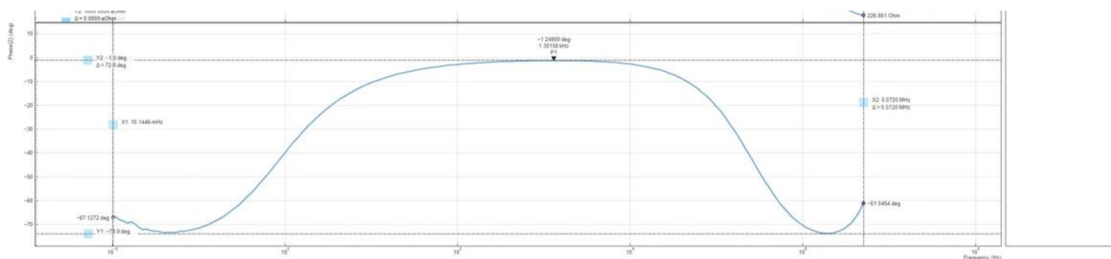
V tomto grafu [graf 7] můžeme vidět reálnou část vodivosti.



Graf 8 Nyquistův graf - kohoutková voda (vlastní graf)



Graf 9 Bodeho graf - kohoutková voda (vlastní graf)

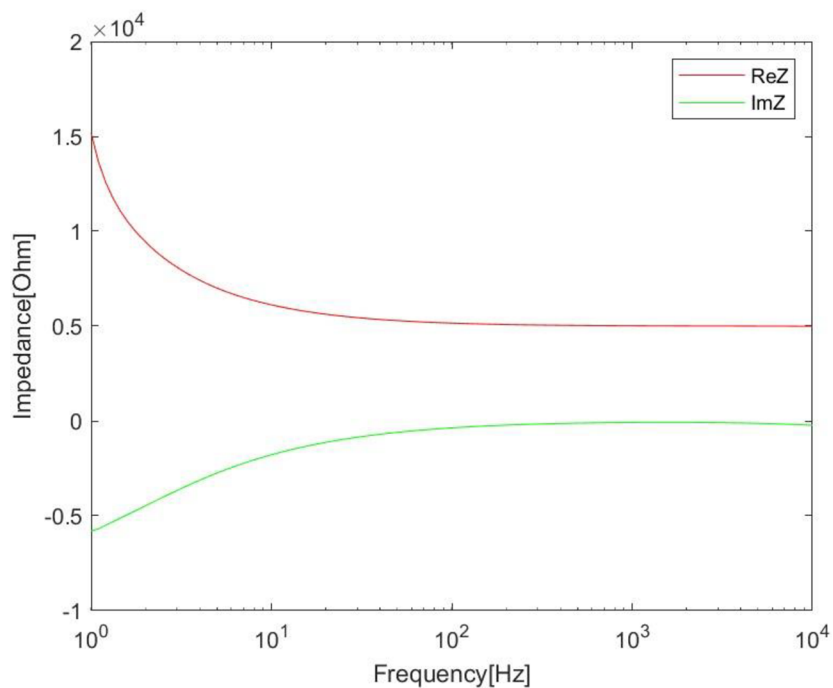


Obrázek 32 Bodeho graf kohoutkové vody (Meng, 2020)

Z našeho změřeného Bodeho grafu v porovnání s obrázkem 31 od výrobce našeho měřicího přístroje MFLI je vidět, že kohoutková voda není ideální jako referenční vzorek. Je totiž velmi nekonzistentní a každé měření se může lehce měnit. Z těchto dvou grafů je tato vlastnost viditelná, ačkoliv se grafy sobě trochu přibližují. Rozdílné je ještě frekvenční pásmo, ve kterém je výrobcem zhotovené měření uděláno. My jsme pro zkrácení času měření zvolili pásmo od 1 Hz do 10kHz na rozdíl od obrázku 31, který je v rozmezí od 10 mHz do 5 MHz. V příloze se nachází graf v lepší velikosti pro náhled.

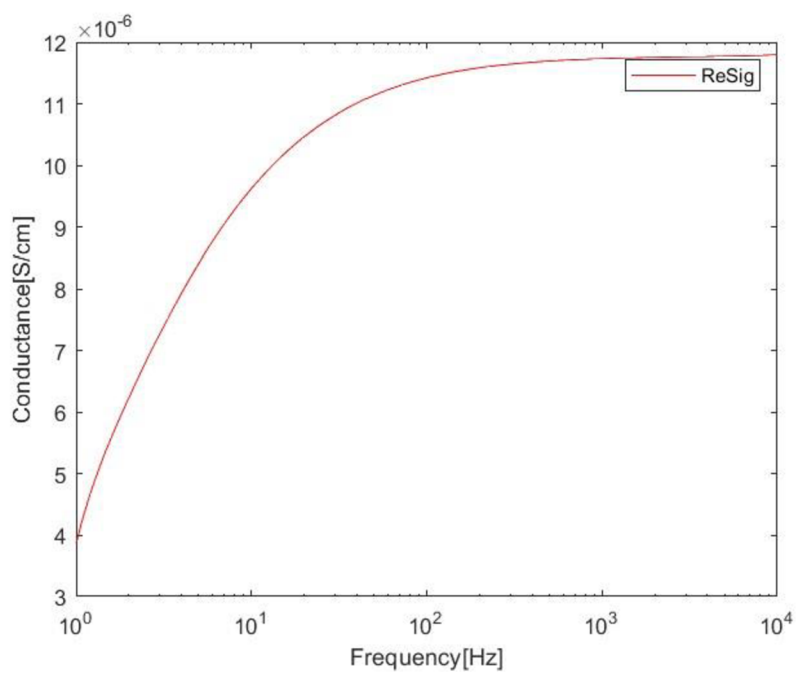
3.5.3 Měření destilované vody

Destilovanou vodu jsme zvolili jako látku, kterou budeme používat před každým měřením jako referenční látku pro ověření správné funkčnosti přístroje.

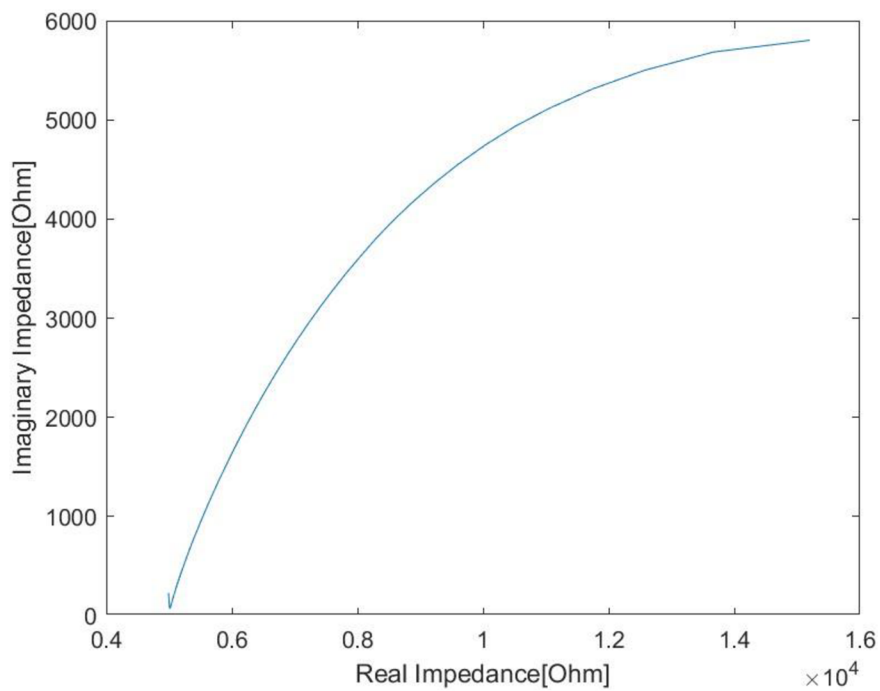


Graf 10 Impedance v závislosti na frekvenci – destilovaná voda (vlastní graf)

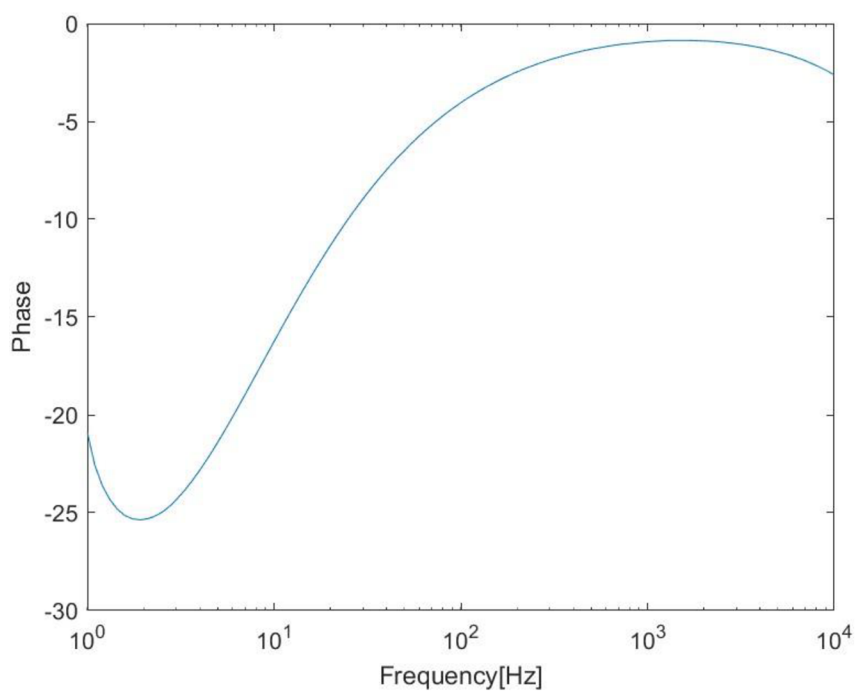
Destilovaná voda má podobný průběh impedancí jako kohoutková voda jen s rozdílem řádově vyšších hodnot impedance. Stejně jako u průběhu vodivosti v závislosti na frekvenci.



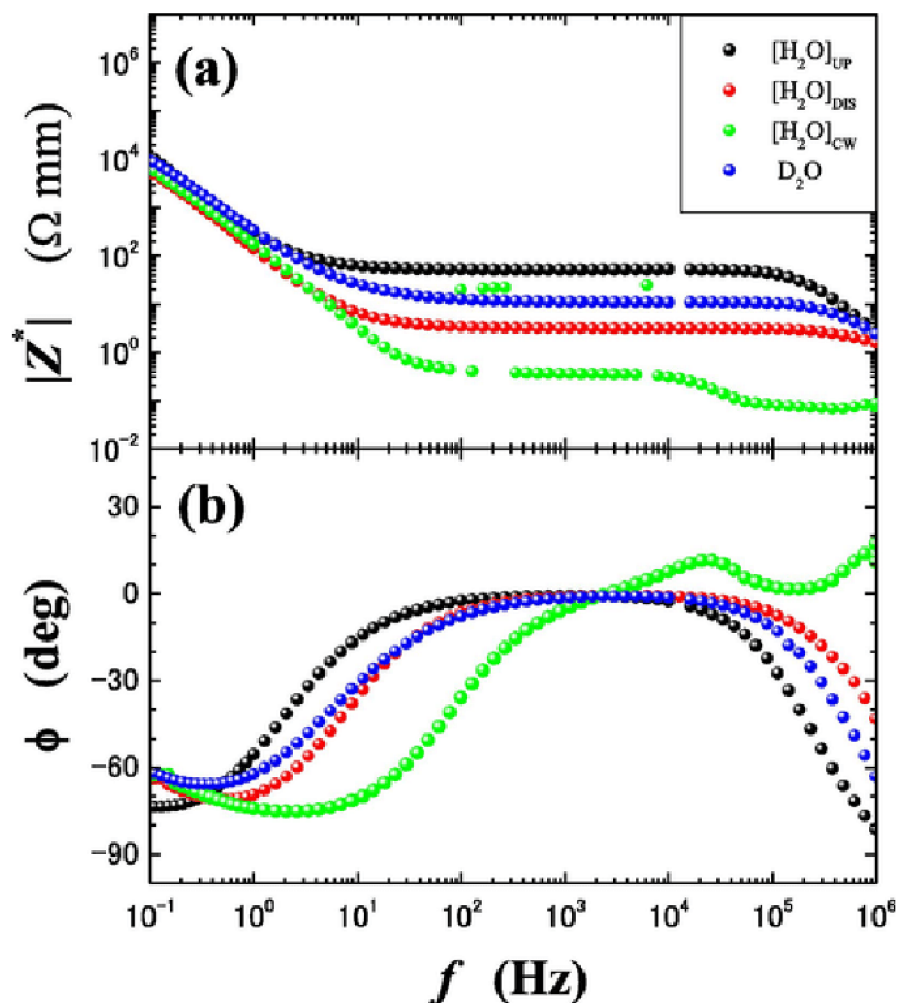
Graf 11 Závislost vodivosti na frekvenci – destilovaná voda (vlastní graf)



Graf 12 Nyquistův graf – destilovaná voda (vlastní graf)



Graf 13 Bodeho graf – destilovaná voda (vlastní graf)



Obrázek 33 Příklad grafů a) absolutní hodnoty impedance b) fáze v závislosti na frekvenci (Abe et al., 2016)

Vybraný obrázek [obr. 33] je z článku *Electrochemical Anomalies of Protic Ionic Liquid – Water Systems: A Case Study Using Ethylammonium Nitrate – Water System*. Křivka, která nás zajímá, je červená týkající se destilované vody. Obrázek 33 grafu a) můžeme porovnat s našimi hodnotami z grafu 10, kde je vidět, že kromě menšího frekvenčního spektra je v našem měření jen lehký rozdíl hodnot. Ten je způsobený tím, že v článku je absolutní hodnota impedance na ose y přepočítaná na impedanci na plochu podle rovnice 7,

$$|Z^*| = \frac{S}{h} [\Omega/mm] \quad (7)$$

kde S je plocha elektrody a h je vzdálenost elektrod.

Na obrázku b) [obr. 33] je Bodeho graf různých kombinací vody. Nás opět zajímá pouze červená křivka destilované vody. V porovnání s našimi daty je velmi podobný. Pouze frekvenční spektrum je větší než naše, tudíž obrázek 33 b) obsahuje námi naměřenou křivku v rozmezí frekvencí od 1Hz do 10kHz.

Měření testovacích vzorků dopadla dobře, proto jsme zkusili naměřit polymery, u kterých neznáme přesněji jejich chování v námi vybraném spektru frekvencí střídavého proudu.

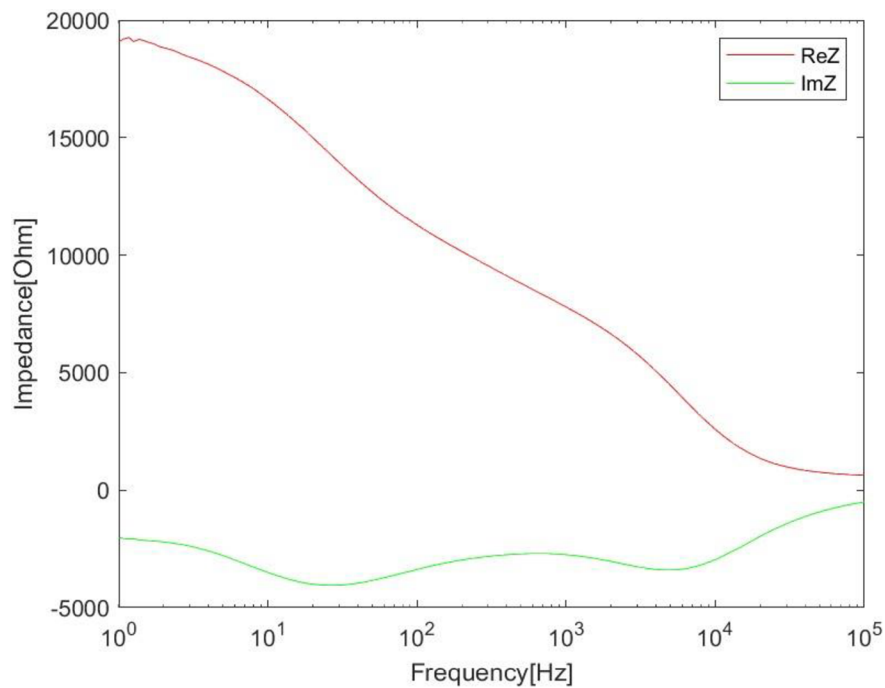
3.6 Měření polymerních roztoků

Pro měření polymerních roztoků jsme použili želatinu, Polyvinylalkohol, polyvinyl butyral. Tyto látky testujeme, protože už jsou několikrát prověřeny z hlediska jejich vlastnosti zvlákňovatelnosti na vyšších frekvencích střídavého proudu a my chceme zjistit, jakou mají impedanční odezvu na frekvencích, kde zvlákňují.

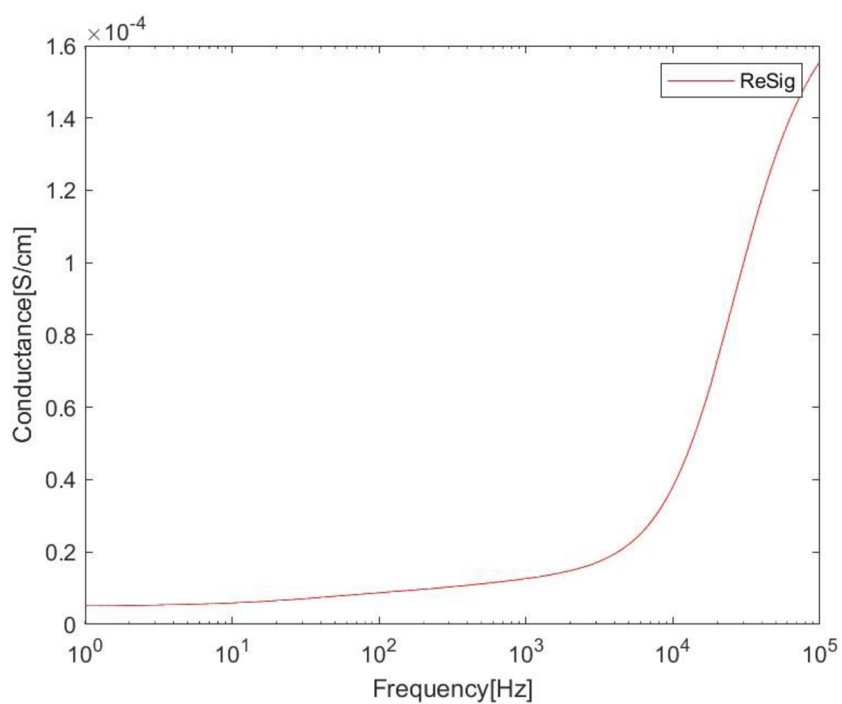
3.6.1 Želatina

Želatina je biopolymer, který se připravuje tepelnou denaturací kolagenu, jež je dostupný v kůži a kostech zvířat za přítomnosti zředěných kyselin. V závislosti na způsobu zpracování želatiny z přírodního kolagenu, a to buď pomocí kyselé, nebo zásadité předúpravy, mohou vzniknout dva typy želatiny: typ A a typ B. Na rozdíl od kolagenu želatina nevyvolává po implantaci žádnou výraznou reakci imunitního systému. Želatiny A a B jsou komerčně dostupné za relativně nízkou cenu. Z těchto důvodů, kromě jejich podobných fyzikálně-chemických a biologických vlastností jako u kolagenu, se želatiny A a B používají jako biomateriály pro hojení ran v různých formách včetně nanovláken. Želatina byla díky své jedinečné chemické a fyzikální povaze využívána jako nosič léčiv. (Narayanaswamy et al., 2016; Deshmukh et al., 2017; Nasrollahzadeh et al., 2021)

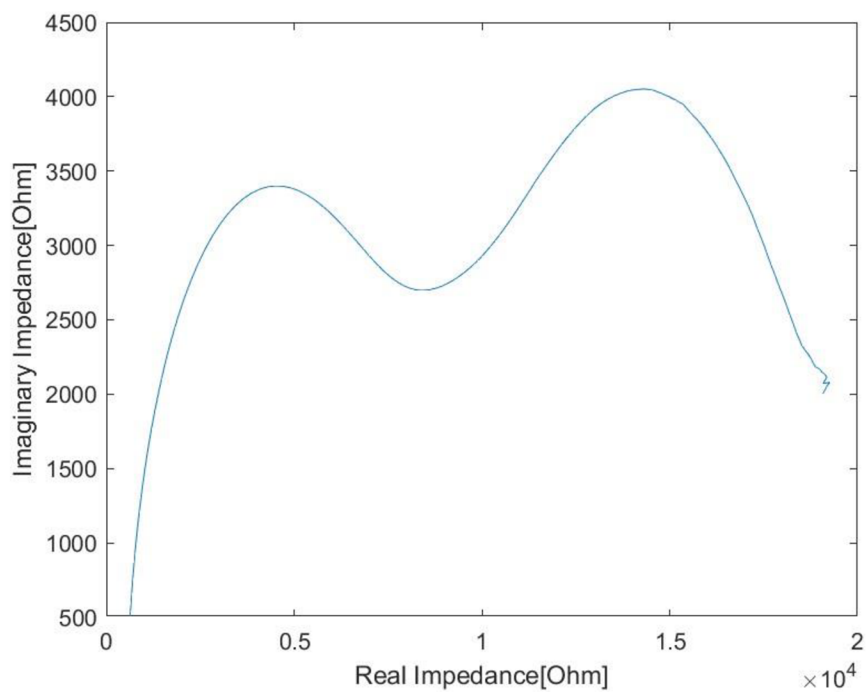
Měření s vrstvou 3,1 mm roztoku



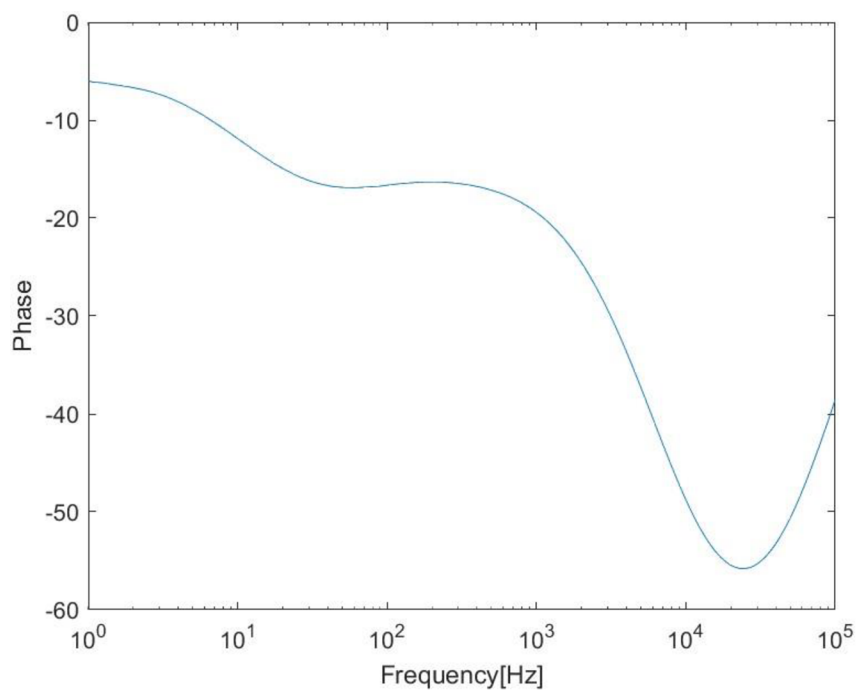
Graf 14 Impedance v závislost na frekvenci - želatina (vlastní graf)



Graf 15 Závislost vodivosti na frekvenci - želatina (vlastní graf)



Graf 16 Nyquistův graf - želatina (vlastní graf)

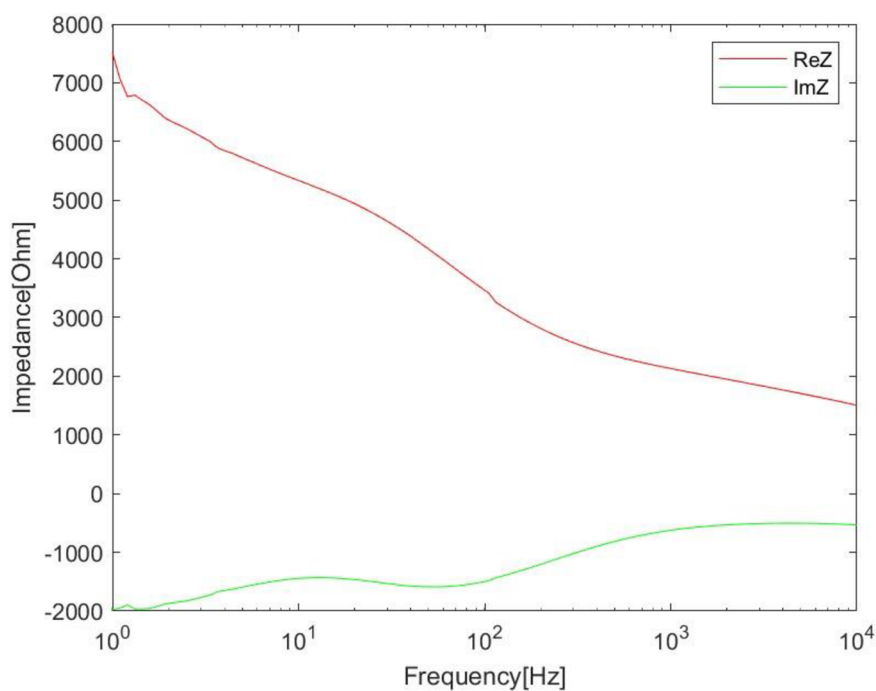


Graf 17 Bodeho graf - želatina (vlastní graf)

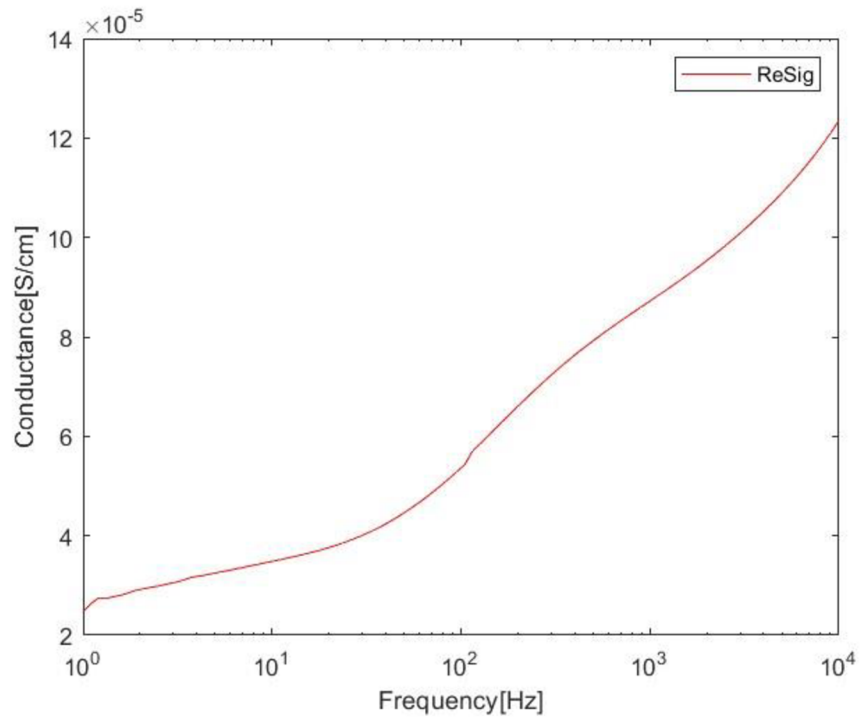
3.6.2 PVA

Polyvinylalkohol (PVA) je ve vodě rozpustný polymer na bázi ropných surovin se zajímavými vlastnostmi, jako je dobrá průhlednost, lesk, antielektrostatické vlastnosti, chemická odolnost a houževnatost. Má také dobré bariérové vlastnosti vůči plynům a dobrou potiskovatelnost. Konečné vlastnosti PVA závisí na vlastnostech jeho mateřského polymeru, tj. polyvinylacetátu a podmínkách jeho polymerace a stupni hydrolýzy. Díky své biokompatibilitě, nízké tendenci ulpívat na bílkovinách a nízké toxicitě má PVA široké uplatnění při výrobě kontaktních čoček, očních kapek nebo náhradách chrupavek. (Rudnik, 2013; Singh et al., 2021)

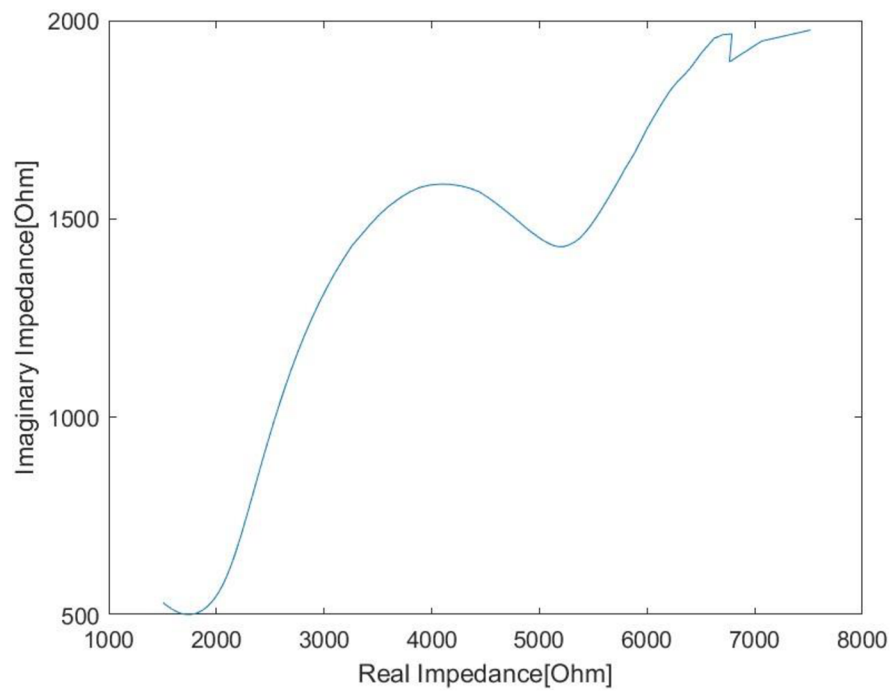
Měření s vrstvou 5,84 mm roztoku



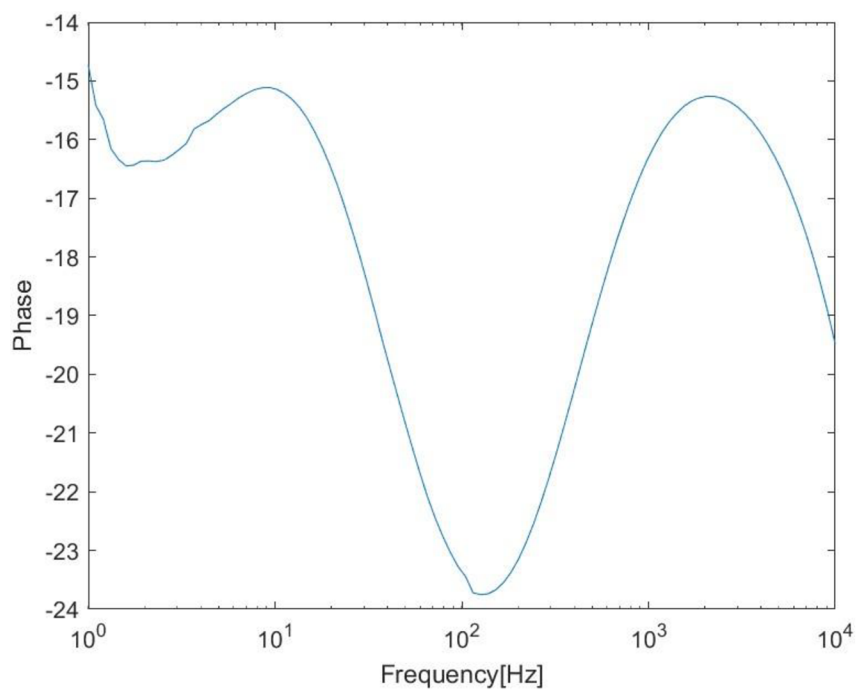
Graf 18 Impedance v závislosti na frekvenci – PVA (vlastní graf)



Graf 19 Závislost vodivosti na frekvenci – PVA (vlastní graf)



Graf 20 Nyquistův graf – PVA (vlastní graf)



Graf 21 Bodeho graf – PVA (vlastní graf)

4 Diskuze

Po zapojení kompletní sestavy bylo nutné ověřit správnost a funkčnost celého systému. Pro tyto účely jsme zvolili měření stejných materiálů, které uvádí výrobce na svých stránkách. Zahájili jsme obyčejné měření vzduchu. To nám ukázalo, že ve vzduchu se nachází mnoho různých částic, které mají vliv na výslednou impedanci. V důsledku to znamenalo velké výkyvy impedancí, kterých si můžeme všimnout ve výsledném grafu. Poté jsme pokračovali k měření kohoutkové vody. Zde jsme si mohli ověřit, že voda měla mnohem menší impedanci než vzduch. Voda tedy vede lépe než vzduch. Náš pokus jsme porovnali s pokusem od výrobce. Závěr je takový, že naše sestava pracuje správně, protože hodnoty byly velmi podobné hodnotám z pokusu výrobce. Poté jsme se rozhodli změřit a prozkoumat nízké frekvenční pásmo polymerních látek, které jsou již prozkoumány v závislosti na jejich vlastnosti zvláknovat. Pro účely experimentu jsme si vybrali látky jako želatina, PVA jen pro demonstraci funkčnosti přístrojů a metody, což je předmětem této bakalářské práce. Vyhodnocení naměřených dat a modelování náhradních obvodů pomocí randless modelu je tématem diplomové práce Aleše Vidricha z fakulty nanomateriálů. Proto při řešení měření těchto látek jsme postup i výsledky společně konzultovali. A s přispěním pana doc. Mikeše jsme došli k názoru, že při měření želatiny, PVA přístroje fungovaly správně a výsledek, tedy grafy dopadly podle očekávání. Celá sestava tedy pracuje správně. U těchto měření jsme došli k dalšímu zjištění, že je velmi důležité z hlediska měření po skončení pokusů s polymerními látkami řádně vymýt spodní elektrodu. Neměly by zůstat žádné usazeniny předešlých polymerů. Znamenaly by nutnost opakování měření z důvodu nepřesvědčivých výsledků a tedy jasných vlivů příměsí polymeru do aktuálně měřené látky. Dalším důležitým faktorem je také, z jakého materiálu jsou elektrody vyrobeny. Tím je mosaz. Díky tomu jsme schopni měřit prakticky vše. Pouze musíme dávat pozor, aby se nejednalo o kyselinu. Mohla by poškodit povrch elektrody, čímž by došlo ke špatnému měření přístroje a tedy nesprávným výsledkům a grafům. Následujícím velmi podstatným vlivem na měření je vrstva měřené látky. Z námi naměřených hodnot vyplývá, že s rostoucí vrstvou látky neboli s větším rozdílem vzdáleností elektrod roste i počáteční impedance a roste amplituda fáze. Dále jsme se přesvědčili, že vliv hraje i velikost vstupního "testovacího" napětí. Výrobce přednastavené napětí je 300 mV. Po několika pokusech jsme zjistili, že pro naše konkrétní účely je lepší snížit napětí na 25 mV pro kvalitnější výsledky z pohledu přesnosti. Jako zpětnou vazbu našich naměřených hodnot a výsledných grafů jsme využili experimenty a látky, které již byly

několikrát zpracovány v minulosti vědci, kteří se touto problematikou zabývali. Dospěli jsme k názoru, že naše sestava funguje dobře, protože námi naměřené hodnoty vycházely ve valné většině shodně s porovnávaným externím experimentem. V malém množství se naše výsledky příliš neslučovaly, jako například u měření kohoutkové vody. Zde to ale mohlo být způsobeno různým složením naší a jejich kohoutkové vody.

5 Závěr

Předmětem bakalářské práce bylo vytvoření metodiky pro měření různých roztoků a provedení základních pokusů pro ověření správnosti a přesnosti metody EIS. Tento cíl se nám povedlo splnit. Nejprve bylo nutné zjistit podrobnosti k samotné teorii a zamyslet se nad rozvrhnutím měření. Po prostudování dokumentů a návodů k použití všech přístrojů použitých k pokusům a pozdějším zapojení aparatury jsme se seznámili s internetovým rozhraním, ve kterém experimenty probíhaly. Poté jsme začali jednoduchými pokusy se vzduchem nebo kohoutkovou vodou, abychom vyzkoušeli správnou funkčnost přístroje. Záměrem naší práce bylo sestavit a správně zapojit aparaturu, prozkoumat přístroj a jeho funkce a způsoby, jakými měří. Pro ukázkou jsme zkoušeli i polymerní roztoky, které jsou prozkoumány z hlediska jejich zvláknovitosti. Tato práce nezkoumá fyzikálně chemické vlastnosti použitých látek a jejich chování, zobrazuje pouze způsob měření a jeho výsledky. Chováním těchto látek a jejich fyzikálním popisem se zabývá kolega ve své diplomové práci, se kterým jsme v experimentech spolupracovali, Bc. Aleš Vidrich. Metoda byla úspěšně vyzkoušena a její výsledky budou sloužit jako návod a základ pro další měření.

Seznam zdrojů

ABE, Hiroshi et al. 2016. Electrochemical Anomalies of Protic Ionic Liquid – Water Systems: A Case Study Using Ethylammonium Nitrate – Water System. *Chemical Physics*. **475**. DOI 10.1016/j.chemphys.2016.07.009.

AMETEK. 2023. 12962A | *Sample Holders* | *Solartron Analytical* [online]. [Cit. 2023-04-28]. Dostupné z: <https://www.ameteksi.com/products/materials-analysis-accessories/12962a-sample-holders>

BARD, Allen J., Larry R. FAULKNER a Henry S. WHITE. 2022. *Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications*. B.m. ; John Wiley & Sons. ISBN 978-1-119-33406-4.

BARTHEL, J. a R. BUCHNER. 2003. Permittivity of Liquids. In: MEYERS, Robert A., ed. *Encyclopedia of Physical Science and Technology (Third Edition)*. New York: Academic Press, s. 697–706. DOI 10.1016/B0-12-227410-5/00553-6. Dostupné také z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B0122274105005536>

BĚHÁLEK, Luboš. 2014. Polymery. In: *Polymery*. Liberec: Code Creator, s.r.o. ISBN 978-80-88058-66-3. Dostupné také z: <https://publi.cz/books/180/Cover.html>

BEHZADI, G a L FEKRI. 2013. Electrical Parameter and Permittivity Measurement of Water Samples Using the Capacitive Sensor. *Environ Sci.*

BENAVENTE, J. 2005. *Recent advances in multidisciplinary applied physics: proceedings of the First International Meeting on Applied Physics (APHYS-2003) October 13-18th, 2003, Badajoz, Spain*. Amsterdam ; Boston: Elsevier. ISBN 978-0-08-044648-6.

BRETT, Christopher M. A. a Ana Maria Oliveira BRETT. 1993. *Electrochemistry: principles, methods, and applications*. Oxford ; New York: Oxford University Press. ISBN 978-0-19-855389-2.

DESHMUKH, K. et al. 2017. 3 - Biopolymer Composites With High Dielectric Performance: Interface Engineering. In: SADASIVUNI, K. K. et al., ed. *Biopolymer Composites in Electronics*. B.m. ; Elsevier, s. 27–128. DOI 10.1016/B978-0-12-809261-3.00003-6. Dostupné také z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128092613000036>

DUBEY, Neha. 2021. Lissajous Figures or Lissajous Patterns. *Electronics Club*. [Cit. 2023-05-02]. Dostupné také z: <https://electronics-club.com/lissajous-figures-or-lissajous-patterns/>

DVOŘÁK, L. 2016. *Měrný odpor vodičů a dalších materiálů*. Dostupné také z: <https://kdf.mff.cuni.cz/vyuka/Fyzika2elmag/MernyOdporLatek.pdf>

ELUC. 2014. *Porovnání mikromolekulových řetězců* [online]. [Cit. 2022-11-10]. Dostupné z: https://eluc.ikap.cz/uploads/images/7415/content_monolipoly.jpg

GAMRY INSTRUMENTS. 2023. *Basics of EIS: Electrochemical Research-Impedance Gamry Instruments* [online]. [Cit. 2023-04-27]. Dostupné z: <https://www.gamry.com/application-notes/EIS/basics-of-electrochemical-impedance-spectroscopy/>

GAURAV, J. 2020. What is Permittivity? Easiest Explanation. *TheElectricalGuy*. [Cit. 2023-04-27]. Dostupné také z: <https://www.theelectricalguy.in/tutorials/what-is-permittivity-easiest-explanation/>

GRIMNES, Sverre a Ørjan G MARTINSEN. 2015. Chapter 3 - Dielectrics. In: GRIMNES, Sverre a Ørjan G MARTINSEN, ed. *Bioimpedance and Bioelectricity Basics (Third Edition)*. Oxford: Academic Press, s. 37–75. DOI 10.1016/B978-0-12-411470-8.00003-9. Dostupné také z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124114708000039>

HUANG, Jun. 2018. Diffusion impedance of electroactive materials, electrolytic solutions and porous electrodes: Warburg impedance and beyond. *Electrochimica Acta*. **281**, 170–188. DOI 10.1016/j.electacta.2018.05.136. Dostupné také z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013468618311824>

KRUPKA, Jerzy. 2003. Precise measurements of the complex permittivity of dielectric materials at microwave frequencies. *Materials Chemistry and Physics*. **79**(2), 195–198. DOI 10.1016/S0254-0584(02)00257-2. Dostupné také z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0254058402002572>

LÉČBA RÁNY.CZ. 2012. *Nanovlákná a jejich využití v medicíně | Léčba rány* [online]. [Cit. 2022-10-25]. Dostupné z: <https://www.lecbarany.cz/premiove-clanky/nanovlakna-jejich-vyuziti-v-medicine>

MACDONALD, J.R. et al. 2018. *Impedance Spectroscopy: Theory, Experiment, and Applications, Third Edition*.

MAGAR, Hend S., Rabeay Y. A. HASSAN a Ashok MULCHANDANI. 2021. Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS): Principles, Construction, and Biosensing Applications. *Sensors (Basel, Switzerland)*. **21**(19). DOI 10.3390/s21196578. Dostupné také z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8512860/>

MENG, Li. 2020. *Bode plot ZI kohoutková voda* [online]. [Cit. 2023-04-29]. Dostupné z: https://www.zhinst.com/sites/default/files/styles/free_aspect_ratio_large_webp/public/blogs/migrate/Dual_Bode.png.webp?itok=8Mr6ja8P

MUTHUKRISHNAN, Vidya. 2020. Conductance: What is it? (Definition, Units & Formula) | Electrical4U. <https://www.electrical4u.com/> [online]. [Cit. 2023-02-08]. Dostupné z: <https://www.electrical4u.com/conductance/>

NANOSPACE. 2023. Elektrostatické zvláknování - nanoSPACE. [nanospace.cz](https://www.nanospace.cz) [online]. [Cit. 2023-04-29]. Dostupné z: <https://www.nanospace.cz/slovník-pojmu/elektrostaticke-zvlaknovani/>

NARAYANASWAMY, Radhakrishnan et al. 2016. Chapter 4 - Basics to different imaging techniques, different nanobiomaterials for image enhancement. In: GRUMEZESCU, Alexandru Mihai, ed. *Nanobiomaterials in Medical Imaging*. B.m.

,: William Andrew Publishing, s. 101–129. DOI 10.1016/B978-0-323-41736-5.00004-2. Dostupné také z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780323417365000042>

NASROLLAHZADEH, Mahmoud et al. 2021. Chapter 4 - Food packaging applications of biopolymer-based (nano)materials. In: NASROLLAHZADEH, Mahmoud, ed. *Biopolymer-Based Metal Nanoparticle Chemistry for Sustainable Applications*. B.m. ,: Elsevier, s. 137–186. DOI 10.1016/B978-0-323-89970-3.00004-4. Dostupné také z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780323899703000044>

PEROFF, Alex. 2022a. Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) Basics. *Pine Research Instrumentation Store*. [Cit. 2023-04-25]. Dostupné také z: <https://pineresearch.com/shop/kb/theory/eis-theory/eis-basics/>

PEROFF, Alex. 2022b. *Sample-Bode-Plot-2.png (800×450)* [online]. [Cit. 2023-04-25]. Dostupné z: <https://pineresearch.com/shop/wp-content/uploads/sites/2/2022/02/Sample-Bode-Plot-2.png>

POHOŘELSKÝ, Michal. 2022. *Soubor:Ohm's Law with Voltage source.png – Multimediaexpo.cz* [online]. [Cit. 2023-05-02]. Dostupné z: http://www.multimediaexpo.cz/mmezc/index.php/Soubor:Ohm%27s_Law_with_Voltage_source.png

ROYLENNIGAN. 2021. What is complex permittivity? In: *r/AskPhysics*. Reddit Post. [Cit. 2023-02-08]. Dostupné také z: www.reddit.com/r/AskPhysics/comments/n5tjhg/what_is_complex_permittivity/

RUDNIK, Ewa. 2013. 13 - Compostable Polymer Properties and Packaging Applications. In: EBNESAJJAD, Sina, ed. *Plastic Films in Food Packaging*. Oxford: William Andrew Publishing, s. 217–248. DOI 10.1016/B978-1-4557-3112-1.00013-2. Dostupné také z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781455731121000132>

SAUERWALD, Tilman et al. 2019. *Bodeho graf různých teplot vzduchu* [online]. [Cit. 2023-04-29]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/332512403/figure/fig2/AS:749086806380547@1555607620323/Bode-plot-of-the-sensor-at-different-temperatures-in-dry-air.ppm>

SEBASTIAN, MAILADIL T. 2008. CHAPTER TWO - MEASUREMENT OF MICROWAVE DIELECTRIC PROPERTIES AND FACTORS AFFECTING THEM. In: SEBASTIAN, MAILADIL T., ed. *Dielectric Materials for Wireless Communication*. Amsterdam: Elsevier, s. 11–47. DOI 10.1016/B978-0-08-045330-9.00002-9. Dostupné také z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080453309000029>

SEDLÁK, Jan. 2023. Škola získala darem supermoderní přístroj. Firma vyhlíží experty na nanovlákná. *Jablonecký deník*. Dostupné také z: https://jablonecky.denik.cz/zpravy_region/nanospider-zelezny-brod-sklarska-skola.html

SEMMLOW, John. 2018. Chapter 15 - Basic Analog Electronics: Operational Amplifiers. In: SEMMLOW, John, ed. *Circuits, Signals and Systems for Bioengineers (Third Edition)*. B.m. ,: Academic Press, s. 681–723. DOI 10.1016/B978-0-12-809395-

5.00015-1. Dostupné také z:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128093955000151>

SINGH, Rachana et al. 2021. Chapter 9 - Environmental hazards and biodegradation of plastic waste: challenges and future prospects. In: SAXENA, Gaurav, Vineet KUMAR a Maulin P. SHAH, ed. *Bioremediation for Environmental Sustainability*. B.m. .: Elsevier, s. 193–214. DOI 10.1016/B978-0-12-820524-2.00009-2. Dostupné také z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128205242000092>

TORRENT-BURGUÉS, Juan. 2021. Reduction of Cd(II) Ions in the Presence of Tetraethylammonium Cations. Adsorption Effect on the Electrode Process. *Electrochem.* 2(3), 415–426. DOI 10.3390/electrochem2030027. Dostupné také z: <https://www.mdpi.com/2673-3293/2/3/27>

ZOLA, Andrew. 2019. What is conductance and how does work? *Networking* [online]. [Cit. 2023-02-08]. Dostupné z: <https://www.techtarget.com/searchnetworking/definition/conductance>

Seznam tabulek

TABULKA 1 OBVODOVÉ PRVKY A VÝPOČET JEJICH IMPEDANCE (PEROFF 2022)	21
---	----

Seznam obrázků

OBRÁZEK 1 MOLEKULA A JEJÍ ELEKTRICKÉ DIPÓLY (GAURAV 2020).....	14
OBRÁZEK 2 PŮSOBENÍ VNĚJŠÍHO ELEKTRICKÉHO POLE NA MOLEKULY V MATERIÁLU (GAURAV 2020)	14
OBRÁZEK 3 ELEKTRICKÝ OBVOD ZÁZORNUJÍCÍ OHMŮV ZÁKON (POHOŘELSKÝ, 2022)	15
OBRÁZEK 4 ZJEDNODUŠENÝ DIAGRAM ELEKTROCHEMICKÉ IMPEDANČNÍ SPEKTROSKOPIE S FÁZOVÝM ÚHLEM (PEROFF 2022)	17
OBRÁZEK 5 PŘÍKLADY LISSAJOUSOVÝCH GRAFŮ S RŮZNÝM FÁZOVÝM POSUNUTÍM (DUBEY, 2021)	18
OBRÁZEK 6 PŘÍKLAD BODEHO GRAFU (PEROFF, 2022)	19
OBRÁZEK 7 PŘÍKLAD NYQUISTOVA GRAFU (PEROFF 2022).....	20
OBRÁZEK 8 MODEL POVRCHU ELEKTRODY VE VODNÍM SYSTÉMU SE TŘEMI ELEKTRODAMI (PEROFF 2022)	22
OBRÁZEK 9 RANDLESŮV OBVOD (TORRENT-BURGUÉS, 2021)	23
OBRÁZEK 10 NYQUISTŮV GRAF RANDLESOVA OBVODU (PEROFF 2022)	24
OBRÁZEK 11 NYQUISTŮV GRAF RANDLESOVA OBVODU SHODNOTAMI R_s A R_{CT} (PEROFF 2022)	25
OBRÁZEK 12 POROVNÁNÍ MIKROMOLEKULOVÝCH ŘETĚZCŮ (ELUC, 2014)	26
OBRÁZEK 13 APARATURA PŘIPRANÁ NA MĚŘENÍ (VLASTNÍ FOTOGRAFIE).....	30
OBRÁZEK 14 SCHÉMA ZAPOJENÍ (VLASTNÍ FOTOGRAFIE)	30
OBRÁZEK 15 DRŽÁK NA VZORKY PŘI MĚŘENÍ (VLASTNÍ FOTOGRAFIE)	31
OBRÁZEK 16 MFLI POPIS VSTUPŮ (VLASTNÍ FOTOGRAFIE)	32
OBRÁZEK 17 MFLI PROPOJENÍ S PC A NAPÁJENÍ (VLASTNÍ FOTOGRAFIE).....	33
OBRÁZEK 18 DRŽÁK (VLASTNÍ FOTOGRAFIE)	34
OBRÁZEK 19 POPIS FUNKCE OCHRANNÉHO PRSTÝNKU (AMETEK 2023)	35
OBRÁZEK 20 JEDNOTLIVÉ ČÁSTI ELEKTROD (VLASTNÍ FOTOGRAFIE)	35
OBRÁZEK 21 LABONE PŘIPOJENÍ (VLASTNÍ FOTOGRAFIE)	36
OBRÁZEK 22 LABONE ÚVODNÍ OKNO (VLASTNÍ FOTOGRAFIE)	37
OBRÁZEK 23 LABONE IMPEDANČNÍ ANALYZÁTOR (VLASTNÍ FOTOGRAFIE).....	37
OBRÁZEK 24 LABONE SWEEPER CONTROL (VLASTNÍ FOTOGRAFIE)	38
OBRÁZEK 25 LABONE SWEEPER NASTAVENÍ (VLASTNÍ FOTOGRAFIE).....	38
OBRÁZEK 26 LABONE ZAPNUTÍ IA A START MĚŘENÍ (VLASTNÍ FOTOGRAFIE)	39
OBRÁZEK 27 LABONE VÝSLEDEK MĚŘENÍ (VLASTNÍ FOTOGRAFIE)	39
OBRÁZEK 28 LABONE VYPNUTÍ IA (VLASTNÍ FOTOGRAFIE)	40
OBRÁZEK 29 LABONE ODPOJENÍ PŘÍSTROJE (VLASTNÍ FOTOGRAFIE).....	40
OBRÁZEK 30 BODEHO GRAF VZDUCHU PRO RŮZNÉ TEPLoty (SAUERWALD ET AL., 2019)	43
OBRÁZEK 31 IMPEDANCE SLANÉ, KOHOUTKOVÉ A MINERÁLNÍ VODY V ZÁVISLOSTI NA FREKVENCI (BEHZADI A FEKRI, 2013)	45
OBRÁZEK 32 BODEHO GRAF KOHOUTKOVÉ VODY (MENG, 2020).....	47
OBRÁZEK 33 PŘÍKLAD GRAFŮ A) ABSOLUTNÍ HODNOTY IMPEDANCE B) FÁZE V ZÁVISLOSTI NA FREKVENCI (ABE ET AL., 2016).....	50

Seznam grafů

GRAF 1 IMPEDANCE V ZÁVISLOSTI NA FREKVENCI – VZDUCH (VLASTNÍ GRAF)	41
GRAF 2 ABSOLUTNÍ HODNOTA IMPEDANCE NA FREKVENCI - VZDUCH (VLASTNÍ GRAF).....	41
GRAF 3 ZÁVISLOST VODIVOSTI NA FREKVENCI – VZDUCH (VLASTNÍ GRAF).....	42
GRAF 4 BODEHO GRAF - VZDUCH (VLASTNÍ GRAF)	42
GRAF 5 IMPEDANCE V ZÁVISLOSTI NA FREKVENCI - KOHOUTKOVÁ VODA (VLASTNÍ GRAF).....	44
GRAF 6 ABSOLUTNÍ HODNOTA IMPEDANCE ZÁVISLÁ NA FREKVENCI S HODNOTAMI - KOHOUTKOVÁ VODA (VLASTNÍ GRAF)	44
GRAF 7 ZÁVISLOST VODIVOSTI NA FREKVENCI – KOHOUTKOVÁ VODA ((VLASTNÍ GRAF)	46
GRAF 8 NYQUISTŮV GRAF - KOHOUTKOVÁ VODA (VLASTNÍ GRAF)	46
GRAF 9 BODEHO GRAF - KOHOUTKOVÁ VODA (VLASTNÍ GRAF).....	47
GRAF 10 IMPEDANCE V ZÁVISLOSTI NA FREKVENCI – DESTILOVANÁ VODA (VLASTNÍ GRAF)	48
GRAF 11 ZÁVISLOST VODIVOSTI NA FREKVENCI – DESTILOVANÁ VODA (VLASTNÍ GRAF).....	48
GRAF 12 NYQUISTŮV GRAF – DESTILOVANÁ VODA (VLASTNÍ GRAF)	49
GRAF 13 BODEHO GRAF – DESTILOVANÁ VODA (VLASTNÍ GRAF)	49
GRAF 14 IMPEDANCE V ZÁVISLOST NA FREKVENCI - ŽELATINA (VLASTNÍ GRAF).....	52
GRAF 15 ZÁVISLOST VODIVOSTI NA FREKVENCI - ŽELATINA (VLASTNÍ GRAF).....	52
GRAF 16 NYQUISTŮV GRAF - ŽELATINA (VLASTNÍ GRAF)	53
GRAF 17 BODEHO GRAF - ŽELATINA (VLASTNÍ GRAF).....	53
GRAF 18 IMPEDANCE V ZÁVISLOSTI NA FREKVENCI – PVA (VLASTNÍ GRAF).....	54
GRAF 19 ZÁVISLOST VODIVOSTI NA FREKVENCI – PVA (VLASTNÍ GRAF).....	55
GRAF 20 NYQUISTŮV GRAF – PVA (VLASTNÍ GRAF)	55
GRAF 21 BODEHO GRAF – PVA (VLASTNÍ GRAF).....	56

Seznam příloh

Příloha A	Kód pro zpracování dat do grafů
Příloha B	Kód pro nahrání dat z textového souboru
Příloha C	Bodeho graf k porovnání

Příloha A Kód pro zpracování dat do grafů

```
function dataplot(filename,L)
[f,AbsZ,ImZ,Phase,ReZ]=imp(filename);

figure('Name','Impedance')
semilogx(f,ReZ,'-r','DisplayName','ReZ')
hold on
semilogx(f,ImZ,'-g','DisplayName','ImZ')
hold off
xlabel('Frequency[Hz]')
ylabel('Impedance[Ohm]')
legend

figure('Name','Impedance ABS')
loglog(f,AbsZ,'-r','DisplayName','ABS')

xlabel('Frequency[Hz]')
ylabel('Impedance[Ohm]')
legend

r=1;
A=pi*r^2;
ReSig=L./(A.*ReZ);
ImSig=L./(A.*abs(ImZ));

figure('Name','Conductance')
semilogx(f,ReSig,'-r','DisplayName','ReSig')
```



```

xlabel('Frequency[Hz]')
ylabel('Conductance[S/cm]')
legend

figure('Name','Complex plane plot')
plot(ReZ,-ImZ)
xlabel('Real Impedance[Ohm]')
ylabel('Imaginary Impedance[Ohm]')
sig=[f,ImSig];

figure
semilogx(f,Phase)
xlabel('Frequency[Hz]')
ylabel('Phase')

end

```

Příloha B Kód pro nahrání dat z textového souboru

```

function [f,AbsZ,ImZ,Phase,ReZ]=imp(filename)
    txt=importdata(filename);
    data=txt.data;
    f=data(:,1);
    AbsZ=data(:,2);
    ImZ=data(:,3);
    Phase=data(:,4);
    ReZ=data(:,5);

end

```

Příloha C Bodeho graf k porovnání s našimi výsledky

MENG, Li. 2020. *Bode plot ZI kohoutková voda* [online]. [Cit. 2023-04-29]. Dostupné z: https://www.zhinst.com/sites/default/files/styles/free_aspect_ratio_large_webp/public/blogs/migrate/Dual_Bode.png.webp?itok=8Mr6ja8

