

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2025

Ondřej Pulpit



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

MĚŘENÍ ODEZEV KAPALIN V ČASOVÉ OBLASTI OSCILOSKOPEM

MEASUREMENT OF TIME RESPONSES OF LIQUID SOLUTIONS USING AN OSCILLOSCOPE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ondřej Pulpit

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Ladislav Polák, Ph.D.

BRNO 2025

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Elektronika a komunikační technologie**

Ústav radioelektroniky

Student: Ondřej Pulpit

ID: 230162

Ročník: 3

Akademický rok: 2024/25

NÁZEV TÉMATU:

Měření odezvy kapalin v časové oblasti osciloskopem

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se možnostmi využití elektrických měřících metod pro rozlišování kapalin. Navrhněte postup pro zkoumání elektrických vlastností kapalin na základě analýzy odezvy vzorku na jednorázový a periodický impulzní širokospektrální signál v časové a spektrální oblasti pomocí osciloskopu s FFT. Vyberte minimálně tři kapaliny, porovnejte výsledky s harmonickým buzením vzorků a prozkoumejte nelinearitu vzorků. Navrhněte vhodný postup pro sběr, správu a zpracování (např. i statistické) snímaných hodnot ve vhodném programovém prostředí (např. MATLAB, Python).

Uvažujte kapaliny s různou koncentrací příměsí a proveďte detailní měření (např. statistického zpracování). Zjistěte, které parametry se zásadně mění a jaké jsou odlišnosti. Pokud je to možné, najděte empirický vztah mezi sledovaným parametrem a koncentrací. Získané výsledky přehledně zpracujte, analyzujte a diskutujte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] KERR, Riley; JERABEK, Jan; SOTNER, Roman a FREEBORN, Todd J. Exploring the Effect of Electrode Material on the Electrical Impedance of Liquid Samples. Online. In: SoutheastCon 2024. IEEE, 2024, s. 1099-1105. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/SoutheastCon52093.2024.10500108>.

[2] SLAY, John et al. Distinguishing Liquid Solutions With Alcohol Using Electrical Impedance Measurements: Preliminary Study for Food Safety Applications. Online. IEEE Sensors Journal. 2023, roč. 23, č. 22, s. 26997-27007. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2023.3315798>.

Termín zadání: 10.2.2025

Termín odevzdání: 2.6.2025

Vedoucí práce: doc. Ing. Ladislav Polák, Ph.D.

Konzultant: doc. Ing. Roman Šotner, Ph.D.

doc. Ing. Lucie Hudcová, Ph.D.

předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Tato bakalářská práce představuje způsob pro zkoumání vlastností kapalin pomocí měření jejich odezvy v časové oblasti pomocí osciloskopu s rychlou Fourierovou transformací (FFT). Je navržen postup měření elektrických vlastností vzorků kapalin, založen na základě analýzy odezvy vzorku na jednorázový a periodický impulzní širokospektrální signál v časové oblasti. Testované vzorky kapalin jsou buzeny střídavým napětím sinusového nebo obdélníkového průběhu a je pozorována frekvenční závislost impedance, změna frekvenčního spektra a projevy nelinearity v zobrazení režimu XY. Získané výsledky z měření jsou zpracované v programovém prostředí MATLAB a přehledně diskutované.

Klíčová slova

Elektroimpedační spektroskopie, osciloskop, převodník, rychlá Fourierova transformace, elektrody, destilovaná voda, ethanol, plnotučné mléko, nelinearita

Abstract

This bachelor's thesis presents a method for exploring the properties of liquids by measuring their time-domain responses using an oscilloscope equipped with an option of Fast Fourier Transform (FFT). A measurement procedure is proposed to determine the electrical properties of liquid samples by analyzing their sample's responses to both single-shot and periodic impulsive broadband signals in the time domain. The tested liquid samples are excited with alternating voltages of sinusoidal or rectangular waveforms, allowing for the observation of their impedance frequency dependence, changes in the frequency spectrum, and nonlinear behavior in an XY format. The measurement results are processed using MATLAB software and discussed in an appropriate context.

Keywords

Electroimpedance spectroscopy, oscilloscope, convertor, Fast Fourier Transformation, electrodes, distilled water, ethanol, whole milk, nonlinearity, frequency spectrum

Bibliografická citace

PULPIT, Ondřej. *Měření odezev kapalin v časové oblasti osciloskopem*. Online, bakalářská práce. Ladislav POLÁK (vedoucí práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2025. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/167847>. [cit. 2025-06-02].

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta: *Ondřej Pulpit*

VUT ID studenta: *230162*

Typ práce: *Bakalářská práce*

Akademický rok: *2024/25*

Téma závěrečné práce: *Měření odezev kapalin v časové oblasti osciloskopem*

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné 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 závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 2. června 2025

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Ladislavu Polákovi, Ph.D. za účinnou metodickou a pedagogickou pomoc při zpracování mé bakalářské práce. Děkuji též prof. Ing. Romanu Šotnerovi, Ph.D. za jeho odbornou pomoc a rady v praktické části této práce.

V Brně dne: 2. června 2025

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	8
ÚVOD	10
1. POPIS MĚŘÍCÍCH METOD PRO ROZLIŠOVÁNÍ KAPALIN	11
1.1 ELEKTROIMPEDANČNÍ SPEKTROSKOPIE	11
1.1.1 <i>Impedance elektrody</i>	12
1.1.2 <i>Kapacita dvojvrstvy</i>	13
1.1.3 <i>Konstantní fázový prvek (CPE)</i>	13
1.2 ELEKTROANALYTICKÉ METODY	14
1.2.1 <i>Konduktometrie a dielektrimetrie</i>	14
2. PŘEVODNÍK PROUDU NA NAPĚTÍ.....	16
2.1 NÁVRH PŘEVODNÍKU PROUDU NA NAPĚTÍ.....	16
2.2 DIGITÁLNÍ OSCILOSKOP	17
2.3 FOURIEROVA TRANSFORMACE.....	18
2.4 LISSAJOUSOVY KŘIVKY	19
3. VYTVÁŘENÍ ROZTOKŮ	20
3.1 ROZPUSTNOST CUKRU	20
4. MĚŘENÍ KAPALIN V ČASOVÉ OBLASTI.....	21
4.1 REFERENČNÍ MĚŘENÍ	23
4.2 VÝSLEDKY MĚŘENÍ VZORKŮ KAPALIN.....	26
4.2.1 <i>Destilovaná voda</i>	27
4.2.2 <i>Destilovaná voda s příměsí cukru</i>	30
4.2.3 <i>Plnotučné mléko</i>	34
4.2.4 <i>Plnotučné mléko s příměsí cukru</i>	38
4.2.5 <i>Ocet</i>	43
4.2.6 <i>Ocet s příměsí cukru</i>	47
4.2.7 <i>Ethanol</i>	51
ZÁVĚR	56
LITERATURA.....	58
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	61
SEZNAM PŘÍLOH.....	63

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Schéma ekvivalentního obvodu pro Randlesův článek [1].....	11
1.2	Randlesův článek popisující impedanci elektrody [2].....	12
1.3	Niquistův diagram pro Randlesův obvod s Warburgovou impedancí, převzato z [4].....	12
1.4	Modely elektrické dvojvrstvy: Helmholtzův model (A), Gouyův- Chapmanův model (B), Sternův model (C), převzato z [2]	13
1.5	Niquistův diagram pro Randlesův obvod s CPE, převzato z [4]	14
1.6	Princip konduktometrie a dielektrimetrie [8]	15
2.1	Teoretické zapojení převodníku proudu na napětí [10].....	16
2.2	Praktické zapojení převodníku	17
2.3	Blokové schéma n-kanálového číslicového osciloskopu, převzato z [14].....	18
2.4	Lissajousovy obrazce pro poměr frekvencí 1:1 a různý fázový posun, převzato z [19].....	19
4.1	Vybrané kapaliny	21
4.2	Schéma aparatury pro měření kapalin	22
4.3	Fotka měřicího pracoviště	22
4.4	Frekvenční charakteristika zátěže 100Ω.....	23
4.5	XY graf pro rezistor 100 kΩ na frekvenci 1 kHz, 100 mV _{pp} a převodní odpor a) 100 kΩ b) 10 kΩ	24
4.6	Frekvenční spektra zátěže 10 kΩ pro budící napětí 1 V _{pp} a) 100 mV _{pp} R _F = 10 kΩ b) 100 mV _{pp} a R _F = 1 kΩ c) 10 V _{pp} a R _F = 10 kΩ.....	25
4.7	Odezva na jednotkový skok odporu 1 kΩ a) 1 V _{pp} a R _F = 10kΩ b) 10 V _{pp} a R _F = 10 Ω c) 1 V _{pp} a R _F = 1 kΩ d) 10 V _{pp} a R _F = 1kΩ e) 1 V _{pp} a R _F = 100Ω c) 10 V _{pp} a R _F = 100 Ω.....	26
4.8	Impedanční a fázová charakteristika destilované vody	27
4.9	Impedanční a fázová závislost destilované vody při opakovaném měření	28
4.10	XY grafy destilované vody a) 100 mV _{pp} 300 Hz b) 20 V _{pp} 300 Hz c) 100 mV _{pp} , 1kHz d) 20 V _{pp} , 1kHz e) 100 mV _{pp} 10 kHz f) 20V _{pp} 10 kHz.....	29
4.11	Spektrum obdélníkového signálu destilované vody a) 100 mV _{pp} 300 Hz b) 20 V _{pp} 300 Hz c) 100 mV _{pp} 1 kHz d) 20 V _{pp} 1 kHz e) 100 mV _{pp} 10 kHz f) 20 V _{pp} 10 kHz.....	29
4.12	Proudová odezva na jednotkový skok destilované vody bez příměsí a) 1 V _{pp} , R _F = 10 kΩ b) 10 V _{pp} , R _F = 10 kΩ c) 1 V _{pp} , R _F = 1 kΩ d) 10 V _{pp} , R _F = 1 kΩ e) 1 V _{pp} , R _F = 100 Ω f) 10 V _{pp} , R _F = 100 Ω.....	30
4.13	Impedanční a fázové charakteristiky roztoku destilované vody s cukrem	31
4.14	Závislost impedance na koncentraci na frekvenci 1 kHz a amplitudě 1 V _{pp}	31
4.15	Opakovaná měření frekvenční (a) a fázových charakteristik pro koncentrace b) 30 % a c) 60 % ...	32
4.16	XY zobrazení destilované vody s příměsí 300 Hz a) 10 %, 100 mV _{pp} b) 10 %, 300 mV _{pp} ; c) 30 %, 100 mV _{pp} d) 30 % 300 mV _{pp} e) 55 % 100 mV _{pp} f) 55 % 300 mV _{pp}	33
4.17	Spektrum obdélníkového signálu a proudové odezvy destil. vody s příměsí a) 10 % 300 Hz, 100 mV _{pp} b) 30 % 1 kHz 1 V _{pp} c) 60 % 10 kHz 10 V _{pp}	33
4.18	Odezva na jednotkový skok pro R _F 1kΩ a)1V _{pp} , 10% b)10V _{pp} , 10% c)1V _{pp} , 30% d) 10V _{pp} , 30% e)1V _{pp} , 60% f)10V _{pp} , 60%.....	34
4.19	Impedanční a fázová charakteristika plnotučného mléka	35
4.20	Opakovaná měření frekvenční charakteristiky plnotučného mléka bez příměsí	35
4.21	XY grafy plnotučného mléka bez příměsí a) 300Hz 5V _{pp} ; b) 300Hz 10V _{pp} ; c) 1kHz 5V _{pp} ; d) 1kHz 10V _{pp} ; e) 10kHz 5V _{pp} ; f) 10kHz 10V _{pp}	36
4.22	Zkreslení vstupního signálu na frekvenci 1 kHz	37
4.23	Odezva na jednotkový skok a) 1 V _{pp} , R _F = 100 Ω b) 10 V _{pp} , R _F = 100 Ω c) 1 V _{pp} , R _F = 10 Ω d) 10 V _{pp} , R _F = 10 Ω.....	38
4.24	Srovnání frekvenčních charakteristik různých koncentrací roztoků mléka a cukru pro 1 V _{pp}	39
4.25	Závislost impedance na koncentraci roztoků mléka a cukru pro 10 kHz a 1 V _{pp}	39

4.26	a) Impedanční charakteristika, fázové charakteristiky koncentrace b) 25 %, c) 50 %	40
4.27	XY grafy plnotučného mléka s příměsí cukru na frekvenci 300 Hz a) 5 % 3 V _{pp} b) 5 % 5 V _{pp} c) 25 % 3 V _{pp} d) 25 % 5 V _{pp} e) 50 % 3 V _{pp} f) 50 % 5 V _{pp}	41
4.28	Zkreslení obdélníkového spektra roztoku mléka a cukru pro 300 Hz a) 35 % 100 mV _{pp} b) 35 % 20 V _{pp} c) 40 % 100 mV _{pp} d) 40 % 20 V _{pp} e) 50 % 100 mV _{pp} f) 50 % 20 V _{pp}	42
4.29	Proudová odezva na jednotkový skok plnotučného mléka s příměsí cukru pro R _F = 100 Ω a) 1 V _{pp} 10 % b) 10 V _{pp} 10 % c) 1 V _{pp} 30 % d) 10 V _{pp} 30 % e) 1 V _{pp} 50 % f) 10 V _{pp} 50 %	43
4.30	Impedanční a fázová charakteristika octu bez příměsí	44
4.31	Opakované měření frekvenční charakteristiky octu pro 1V _{pp} a R _F 100Ω.....	44
4.32	XY grafy octu a) 100 mV _{pp} , 300 Hz b) 20 V _{pp} , 300 Hz c) 100 mV _{pp} , 1 kHz d) 20 V _{pp} , 1 kHz e) 100 mV _{pp} , 10 kHz; f) 20 V _{pp} , 10 kHz.....	45
4.33	Spektrum obdélníkového signálu a proudové odezvy octu a) 100 mV _{pp} 300 Hz b) 20 V _{pp} 300 Hz c) 100 mV _{pp} 1 kHz d) 20 V _{pp} 1 kHz e) 100 mV _{pp} 10 kHz f) 20 V _{pp} 10 kHz.....	46
4.34	Proudová odezva octu na jednotkový skok bez příměsí a) 1 V _{pp} R _F = 100 Ω b) 10 V _{pp} R _F = 100 Ω c) 1 V _{pp} R _F = 10 Ω d) 10 V _{pp} R _F = 10 Ω.....	47
4.35	Srovnání frekvenčních charakteristik roztoků octu s cukrem pro 1 V _{pp} a R _F = 1 kΩ.....	48
4.36	Závislost koncentrace na impedanci pro 1 kHz a 1 V _{pp}	48
4.37	Opakovaná měření impedančních charakteristik a) a fázových charakteristik octu pro koncentrace b) 30 % c) 60 %	49
4.38	XY graf octu s příměsí na frekvenci 300 Hz a) 10 % 100 mV _{pp} b) 10 % 500 mV _{pp} c) 30 % 100 mV _{pp} d) 30 % 500 mV _{pp} e) 60 % 100 mV _{pp} f) 60 % 500 mV _{pp}	50
4.39	Spektrum obdélníkového signálu a proudové odezvy roztoků octu a cukru a) 10 % 300 Hz 100 mV _{pp} b) 30 % 1 kHz 1 V _{pp} c) 60 % 10 kHz 10 V _{pp}	50
4.40	Proudové odezvy roztoků octu na jednotkový skok pro R _F = 100 Ω a) 10 % 1 V _{pp} b) 10 % 10 V _{pp} c) 30 % 1 V _{pp} d) 30 % 10 V _{pp} e) 60 % 1 V _{pp} f) 60 % 10 V _{pp}	51
4.41	Impedanční a fázová charakteristika ethanolu.....	52
4.42	Opakované měření FRA.....	52
4.43	XY grafy ethanolu pro a) 300 Hz 3 V _{pp} b) 300 HZ 20 V _{pp} c) 10 kHz 3 V _{pp} d) 10 kHz 20V _{pp}	53
4.44	Frekvenční spektrum a) 300 Hz 100 mV _{pp} , b) 1 kHz 3 V _{pp} c) 10 kHz 500 mV _{pp} d) 10 kHz 20 V _{pp}	54
4.45	Proudová odezva na jednotkový skok a) 1 V _{pp} R _F = 100 kΩ b) 10 V _{pp} R _F = 100 kΩ c) 1 V _{pp} R _F = 10kΩ d) 10 V _{pp} R _F = 10 kΩ e) 1 V _{pp} R _F = 1 kΩ f) 10 V _{pp} R _F = 1 kΩ.....	55

ÚVOD

Metody zkoumání kvality potravin a pitné vody jsou velmi aktuální a důležité oblasti výzkumu. V různých částech světa jsou rozdílné přístupy k pitné vodě. S rostoucí populací planety a probíhající klimatickou změnou, se rozdíly k přístupu pitné vody ještě více prohlubují a požadavky na její kvalitu rostou.

Cílem této bakalářské práce je za použití osciloskopu jako hlavního měřicího přístroje prozkoumat vlastnosti kapalin v časové oblasti a ve frekvenčním spektru a pozorovat změny parametrů po přidání příměsi, naměřená data zpracovat v jazykovém prostředí MATLAB. Pro zajištění kompatibility mezi odezvou vzorku a osciloskopem byl navržen a sestrojen převodník proudu na napětí.

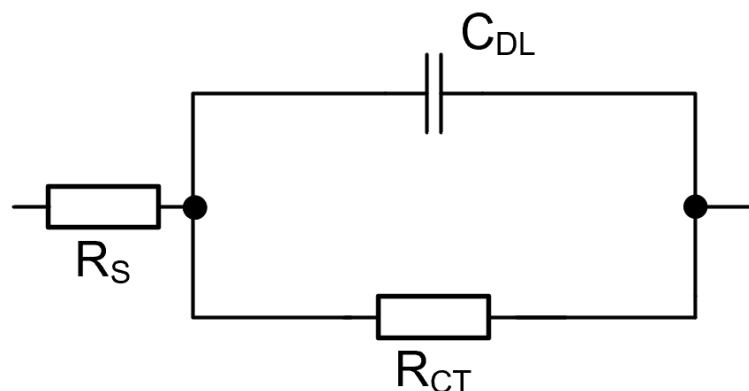
V první kapitole jsou popsány elektrické měřicí metody pro rozlišování kapalin a s ní spojené pojmy, popisující děje uvnitř elektrolytu, nutné k vytvoření náhradního schématu měřeného elektrolytického článku. V druhé kapitole je vysvětlen princip transimpedačního převodníku a jeho následná realizace. Je popsáno vnitřní zapojení digitálního osciloskopu, princip Fourierovy transformace a Lissajousových obrazců. Ve třetí kapitole jsou vysvětleny metody pro vyjádření koncentrace a rozpustnost cukru v měřených kapalinách. Ve čtvrté kapitole jsou provedeny a diskutovány měření parametrů u destilované vody, plnotučného mléka, octa, ethanolu a jejich cukerných roztoků. Všechna získaná data byla zpracována v prostředí MATLAB a následně zveřejněna v repozitáři na GitHubu.

1. POPIS MĚŘÍCÍCH METOD PRO ROZLIŠOVÁNÍ KAPALIN

V této kapitole jsou popsány běžně používané měřicí metody pro zjištění elektrických vlastností kapalin, které budou sloužit pro pochopení problematiky této bakalářské práce. Jsou zde vysvětleny jevy, ke kterým dochází uvnitř elektrolytu a na rozhraní elektroda-elektrolyt. Na základě nich lze následně vytvořit náhradní obvodové schéma elektrolytu pomocí pasivních součástek.

1.1 Elektroimpedanční spektroskopie

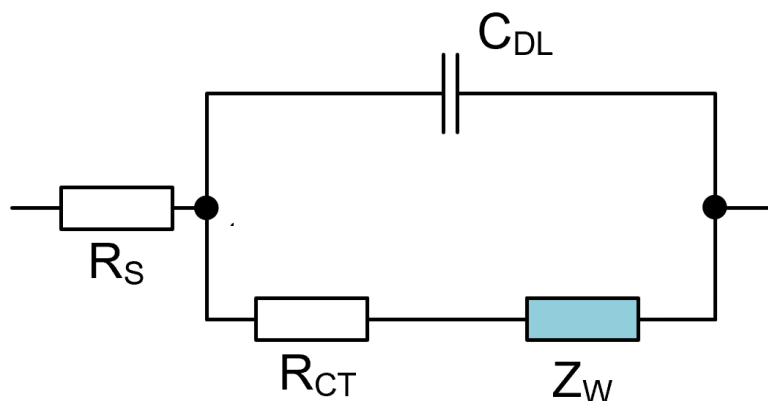
Elektroimpedanční spektroskopie je metoda měření kapalných a pevných látek a jejich impedanční závislost na frekvenci, která se pohybuje v rozmezích 0,1 mHz až 1 MHz a měří se od vyšších po nižší kmitočty kvůli stabilitě systému. Interpretace měřených dat probíhá nalezením tzv. ekvivalentního elektrického obvodu, který má stejné vlastnosti jako měřená kapalina. Cílem je pomocí sériových a paralelních kombinací reálných elektrických prvků a prvků specifických pro elektrochemii, které jsou popsány níže, sestavit co nejjednodušší zapojení ekvivalentního elektrického obvodu. Jako reálné prvky se používají rezistory, které nahrazují odpor kapaliny a přenosu náboje. Kondenzátory popisují kapacitu elektrické dvojvrstvy. Cívka se v ekvivalentních obvodech nepoužívá. Příkladem specifických prvků je tzv. Warburgova impedance a člen konstantního fázového posuvu (CPE – Constant Phase Element). Nejjednodušším zapojením ekvivalentního elektrického obvodu je tzv. Randelsův článek (viz Obr. 1.1), který se skládá z paralelní kombinace R_{CT} (odpor přenosu náboje) a C_{DL} (kapacita dvojvrstvy) v sérii s R_S (odpor elektrolytu) [1].



Obrázek 1.1 Schéma ekvivalentního obvodu pro Randelsův článek [1]

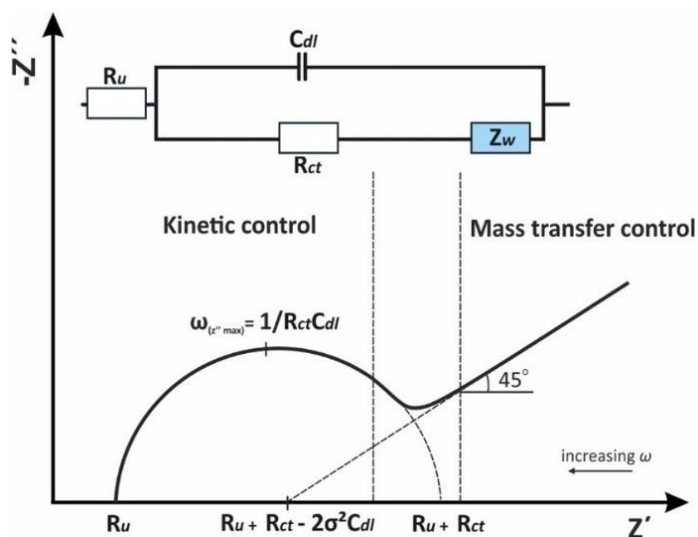
1.1.1 Impedance elektrody

Schéma uvedené na Obrázku. 1.2, vycházející z Obr. 1.1, představuje reprezentaci impedanci jedné elektrody, kde k R_{CT} je do série vřazen prvek Z_W . Jedná se o tzv. Warburgovu impedanci, která je sériovou kombinací RC prvků, takže je frekvenčně závislá a představuje konečnou rychlost difúze iontů z elektrolytu k elektrodě a společně tvoří Faradayovu impedanci [2], [3].



Obrázek 1.2 Randlesův člunek popisující impedanci elektrody [2]

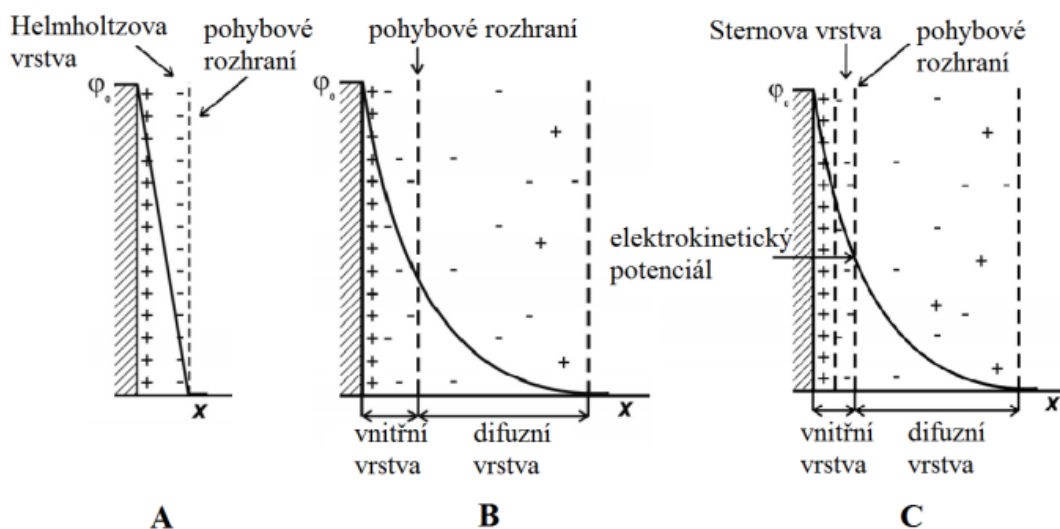
Pro nízké frekvence má kapacita C_{DL} velmi vysokou reaktanci a proud tak prochází pouze tzv. Faradayovou impedancí. Naopak, při vysokých frekvencích se přestane projevovat impedance Z_W , protože ionty se nemohou pohybovat příliš daleko [4]. Tyhle vlastnosti lze pozorovat v tzv. Nyquistově grafu, prezentované na Obr. 1.3. Osa Z' reprezentuje reálnou složku impedance a Z'' složku imaginární.



Obrázek 1.3 Nyquistův diagram pro Randlesův obvod s Warburgovou impedancí, převzato z [4]

1.1.2 Kapacita dvojvrstvy

Kapacita dvojvrstvy (Double Layer Capacity) je parametr, který popisuje rozrání elektroda-elektrolyt z elektrochemického hlediska. Dvojvrstva vzniká při vložení elektrody do elektrolytu. Jednotlivé vrstvy mají vůči sobě opačný náboj. Vnitřní vrstvu tvoří nabitý povrch elektrody. Velikost náboje klesá lineárně s rostoucí vzdáleností od elektrody (Obrázek.1.4 A). Vnější vrstvu tvoří ionty opačné polaroty a jsou tedy elektrostaticky přitahovány k vrstvě vnitřní [2]. Podle předpokladů Gouya a Chapmana jsou ionty pouze elektricky nabitě bezrozměrné body a na povrchu elektrody nemohou vázat stejné množství iontů opačné polaroty. K první vrstvě iontů se váže pouze část protiiontů, zatímco zbytek tvoří tzv. difúzní vrstvu (Obrázek.1.4 B). Sternův model (Obrázek.1.4 C) počítá s rozměry iontů. Sternova vrstva těsně u povrchu elektrody se skládá z iontů vázanými hlavně adsorpčními silami. Ve vzdálenější (difúzní) vrstvě jsou ionty přitahovány elektrostatickými silami [2][5].

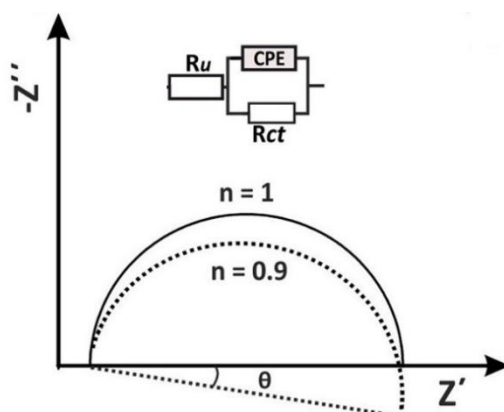


Obrázek 1.4 Modely elektrické dvojvrstvy: Helmholtzův model (A), Gouyův-Chapmanův model (B), Sternův model (C), převzato z [2]

1.1.3 Konstantní fázový prvek (CPE)

Prvek konstantní fáze (CPE) byl poprvé popsán v roce 1950 a byl připisován nerovnoměrnému rozložení proudu na povrchu elektrody kvůli jejich mikroskopickým drsnostem. V pozdějších letech se však ukázalo, že drsnost povrchu elektrod se projevuje až u vysokých frekvencí (v řádu GHz až MHz), které se v elektrochemii běžně nepoužívají [3].

Pro neideálně hladké elektrody kapacita dvojvrstvy vykazuje odlišnosti od ideální kapacity. Ty lze nejlépe pozorovat opět na Nyquistově diagramu (viz Obrázek 1.5). Ideální kapacitní chování prvku je reprezentováno půlkružnicí s počátkem, středem a koncem na ose x . CPE má tenhle střed a konec půlkružnice posunut o určitý úhel [6].



Obrázek 1.5 Niquistův diagram pro Randlesův obvod s CPE, převzato z [4]

Impedance CPE je dáno vztahem:

$$Z(\text{CPE}) = \frac{1}{Y_0 \cdot (j\omega)^n}, \quad (1.1)$$

kde Y_0 je parametr popisující kapacitní vlastnost a exponent n je <1 .

Hodnota parametru n je většinou v rozsahu 0,9 až 0,99 v závislosti na materiálu elektrody, její drsnosti a přítomnosti adsorpčních iontů v elektrolytu [7]. Pro $n = 1$ se jedná o ideální kondenzátor C_{DL} s fázovým posunem o 90° , $n = 0,5$ odpovídá Warburgově impedanci o fázovém posunu 45° a pro $n = 0$ se jedná o rezistor bez fázového posuvu [4].

1.2 Elektroanalytické metody

Tyto metody jsou založeny na měření elektrických vlastností celého roztoku, a ne na elektrochemické reakci mezi prvky. Proto se jim říká elektrometrické a řadí se do kategorie neselektivních. Měří pouze souhrnné vlastnosti látky bez ohledu na její složení. Jsou dvě, konduktometrie jejíž měřenou vlastností je tedy vodivost a dielektrimetrie, u které se zkoumá permitivita [8].

1.2.1 Konduktometrie a dielektrimetrie

Odpor roztoku je často klíčovým faktorem v určení impedance elektrochemického článku. U odporu iontových roztoků hraje roli i tzv. koncentrace iontů, teplota roztoku a tvar nádoby, ve které je elektrolyt umístěn. Odpor elektrolytu je dán vztahem (1.2), kde S představuje plochu elektrod a l jejich vzdálenost (viz Obr. 1.6), kterou protéká proud, a ρ je rezistivita roztoku [9]:

$$R_S = \rho_S \cdot \frac{l}{S}. \quad (1.2)$$

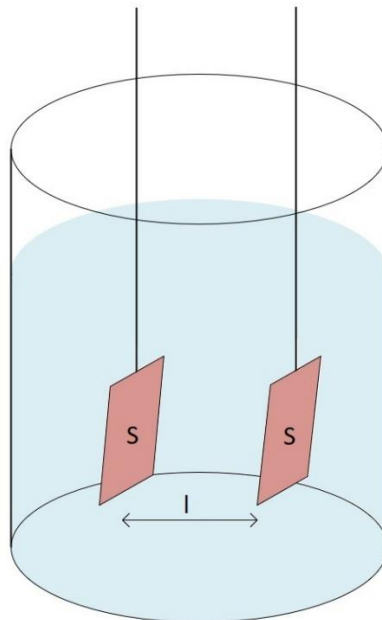
Častěji se však uvádí konduktivita roztoku, tedy převrácená hodnota rezistivity:

$$R_S = \frac{1}{\sigma_S} \cdot \frac{l}{S} \rightarrow \sigma_S = R_S \cdot \frac{l}{S}. \quad (1.3)$$

Pro určité roztoky existují tabulkové hodnoty vodivosti a teoreticky by mělo být možné spočítat i koncentrace jednotlivých složek. V praxi však v roztoku dochází k mnoha vlivům, např. disociace částic nebo vzájemné ovlivňování iontů, které tenhle výpočet značně ztěžují [8]. Konduktivitu však lze spočítat z naměřených experimentálních dat vložených do ekvivalentního modelu. V praxi se v odporu R_S projeví i odpor elektrod a připojovacích kabelů, avšak hodnoty odporů měřící aparatury se v praxi často zanedbávají. [9].

Dielektrimetrie funguje na podobném principu, akorát se zkoumá permitivita roztoku. Obrázek 1.6 si lze představit jako kondenzátor, s určitou permitivitou, tedy schopností látky akumulovat elektrický náboj. Permitivitu elektrolytu zjistíme z poměru kapacit, měřeného článku C a kapacity kondenzátoru s permitivitou vakua C_0 [8]:

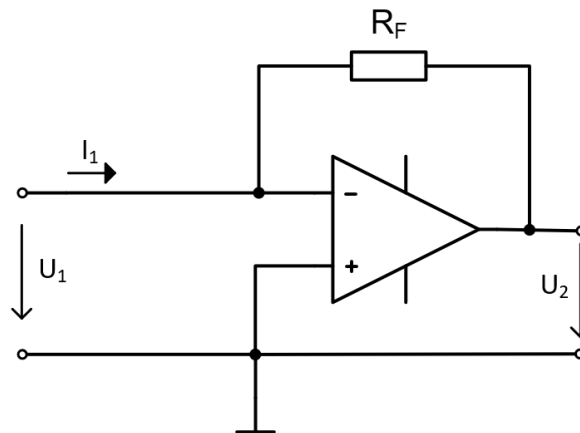
$$\epsilon_r = \frac{C}{C_0} \quad (1.4)$$



Obrázek 1.6 Princip konduktometrie a dielektrimetrie [8]

2. PŘEVODNÍK PROUDU NA NAPĚTÍ

Měřená kapalina se se při nízkých kmitočtech chová jako rezistivní prvek. Její odezva na budící napětí bude proud, který je potřeba měřit. Osciloskop, bez příslušné aparatury, měří pouze napěťové signály. To znamená, že je potřeba převést proud na napětí. Teoretické zapojení převodníku proudu na napětí, taktéž nazývaného transrezistor [10] je na Obr. **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů..**



Obrázek 2.1 Teoretické zapojení převodníku proudu na napětí [10]

Převodní vztah proudu a napětí je dán rovnicí [10]:

$$Z_T = \frac{U_2}{I_1} = -\frac{R_F \cdot A}{1 + A} \rightarrow U_2 = -\frac{R_F \cdot A \cdot I_1}{1 + A}. \quad (2.1)$$

Pokud budeme uvažovat, že operační zesilovač je ideální, tedy že jeho zesílení je nekonečné ($A \rightarrow \infty$), dostaneme zjednodušený vztah:

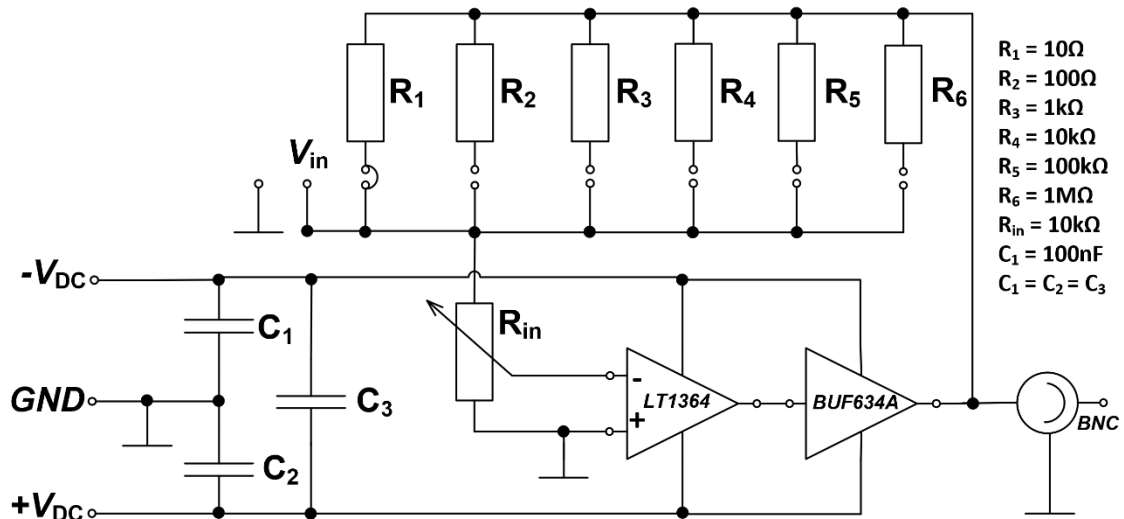
$$Z_T = \frac{U_2}{I_1} = -R_F \rightarrow U_2 = -R_F \cdot I_1, \quad (2.2)$$

ze kterého vyplývá, že výstupní napětí převodníku je dáno pouze součinem zpětnovazebního rezistoru R_F a vstupního proudu I_1 .

2.1 Návrh převodníku proud na napětí

Návrh převodníku proudu na napětí vychází z teorie popsané v předchozí kapitole. Deska plošných spojů (DPS) převodníku je navržen pomocí softwaru EAGLE. Pro tuhle aplikaci byl vybrán OZ – operační zesilovač LT1364CN8, hlavně z důvodu velké šířky pásma [11]. Před záporný vstup je vřazen odporový trimr R_{in} , nastavený na hodnotu $8k\Omega$. Jeho funkcí je zabránit rozkmitání OZ. Na výstupu OZ je proudový posilovač BUF634A [12], jehož cílem pokrýt vysoký proudový odběr, vznikající při nízké impedanci zátěže a buzením vysokým napětím. Kondenzátory C_1 , C_2 , C_3 , jsou umístěny co nejbližší napájecímu konektoru a slouží k blokování vysokofrekvenčního šumu ze zdroje napájení

a vyrovnávání napětí při kolísání napětí napájecího [13]. Hodnoty převodních odporů R_1 až R_6 jsou uvedeny v Obr. 2.2 a jsou zvoleny tak, aby byl pokryt co největší rozsah možných proudů, jejich změna se provádí zkratovací propojkou. Pro připojení kanálu osciloskopu slouží BNC konektor. Napájení, vstupní svorka převodníku a svorky převodních odporů jsou realizovány pinovou lištou s roztečí 2,54 mm. Seznam součástek je uveden v příloze A.2.

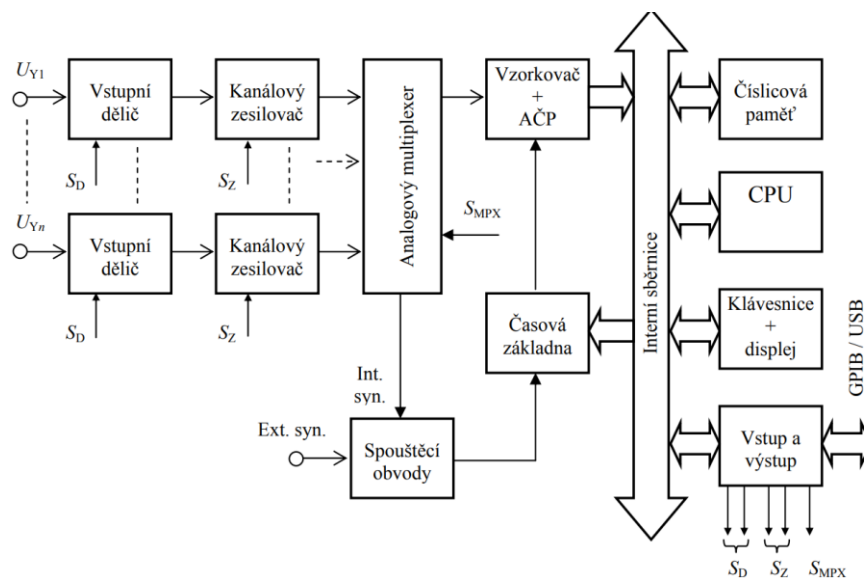


Obrázek 2.2 Praktické zapojení převodníku

2.2 Digitální osciloskop

V elektrotechnice je nedílnou součástí měření a analýza obvodů. K tomu slouží široká škála měřicích přístrojů od jednoduchých voltmetrů a ampérmetrů až po osciloskopy a spektrální analyzátoři. V dnešní době se převážně používají digitální osciloskopy. Ty měří napětí nebo jiné elektrické i neelektrické veličiny převedené na napětí a zobrazuje jeho průběh a změny v čase. Pomocí zabudovaných funkcí, které usnadňují práci se signálem, lze měřit nespočet jeho vlastností. Pokročilejší osciloskopy mají zabudovanou funkci rychlé Fourierové transformaci (Fast Fourier Transformation – FFT), pomocí níž lze signál převést z časové oblasti do oblasti frekvenční [14].

Signál je v obrázku 2.3 na vstupu (U_{Y1}) připojený na dělič napětí a vstupní zesilovač. Tyto prvky zajišťují správnou úroveň signálu pro další zpracování. Multiplexer slouží k přepínání požadovaného kanálu. Následně je signál zdigitalizován pomocí AČP – analogově-číslicového převodníku s určitou vzorkovací frekvencí a jeho výsledek se zapisuje do paměti. Vnitřní výpočetní jednotka osciloskopu poté zobrazuje průběh signálu na obrazovce. Procesor s pomocí ovládacích prvků též zajišťuje komunikaci s obsluhou. [15]



Obrázek 2.3 Blokové schéma n-kanalového číslicového osciloskopu, převzato z [14]

2.3 Fourierova transformace

Fourierova transformace je matematická metoda, která říká, že každou funkci lze popsat jako součet či integraci harmonických složek, každá s jinou vahou a fázovým posunem. Váhová funkce udává, jaké frekvence je potřeba použít pro součet (integraci) harmonických složek, aby bylo možné zpětně sestavit původní funkci. Tenhle algoritmus je v praxi často zdlouhavý a nepřináší uspokojivé výsledky. Analytické řešení funguje jen za určitých okolností a při řešení pomocí počítače jsou výsledkem disktrétní hodnoty, tedy nespojitá funkce. Kvůli tomu byla navržena Disktrétní Fourierova Transformace (DFT), která je stále časově náročná. Náročnost roste s druhou mocninou vstupního polynomu. Proto byl navržen algoritmus, který pracuje s vlastnostmi exponenciálních disktrétních funkcí, a tím snižuje výpočetní dobu. Tento algoritmus se nazývá FFT. Nejzákladnější odvození Fourierovy transformace vychází z Fourierovy řady periodické funkce nebo Fourierovy trigonometrické řady [16], [17]:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t), \quad (2.3)$$

kde a_n a b_n jsou koeficienty (váhy) Fourierovy řady a jsou dány vztahy:

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^{0+T} f(t) \cos(n\omega t) dt, \quad (2.4)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^{0+T} f(t) \sin(n\omega t) dt. \quad (2.5)$$

Řadu lze zapsat i v komplexním tvaru:

$$f(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} c_n \exp(jn\omega t) , \quad (2.6)$$

a její koeficienty vyjádřit následovně:

$$c_n = \frac{1}{T} \int_0^{0+T} f(t) \exp(-jn\omega t) dt . \quad (2.7)$$

Fourierova transformace se odvozuje z Fourierovy řady zavedením nekonečně dlouhé periody ($T \rightarrow \infty$). Tímhle postupem se zajistí, že metodu bude možné aplikovat i pro neperiodické signály:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \exp(-j\omega t) dt . \quad (2.8)$$

Vztah pro $F(\omega)$ je nazýván Fourierův obraz (spektrum) funkce $f(t)$. Opačnou operací, tedy zpětné Fourierovy transformace, vyjádříme funkci $f(t)$:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) \exp(j\omega t) d\omega . \quad (2.9)$$

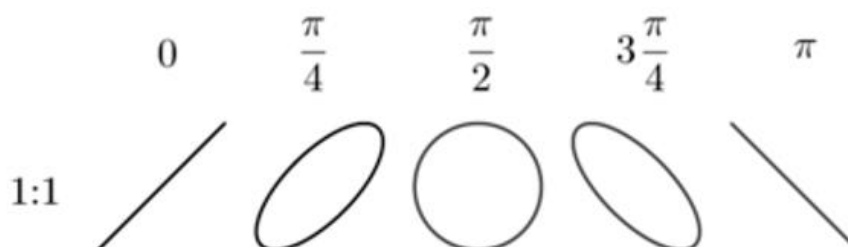
2.4 Lissajousovy křivky

Lissajousovy křivky jsou pojmenovány po Jules-Antoinne Lissajousovi a zobrazují skládání dvou, zpravidla harmonických vln (kmitů), kdy osa x reprezentuje vlnu (2.10) a osa y vlnu (2.11) [18]:

$$x = A_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1) , \quad (2.10)$$

$$y = A_2 \sin(\omega_2 t + \varphi_2) . \quad (2.11)$$

Takové zobrazení se v elektrotechnice označuje jako XY a lze jej zobrazit na osciloskopu. Tvar křivek závisí na poměru amplitud a frekvencí obou signálů a jejich vzájemnému fázovému posuvu. Pokud lze poměr frekvencí zapsat jako racionální číslo, vytvoří se křivka uzavřená tzv. obrazec [18]. Na Obrázku 2.4 jsou ukázány nejjednodušší tvary Lissajousových obrazců, které se objevují v praktické části této práce.



Obrázek 2.4 Lissajousovy obrazce pro poměr frekvencí 1:1 a různý fázový posun, převzato z [19][14]

3. VYTVÁŘENÍ ROZTOKŮ

Roztok je homogenní směs dvou nebo více látek v relativních poměrech, které lze měnit do meze rozpustnosti. Koncentrace roztoku je hodnota udávající množství rozpuštěné látky v rozpouštědle. Rozlišujeme tři základní stavy. Nenasycený roztok je stav, kdy se přidaná látka v rozpouštědle rozpustí. Nasycený roztok, kdy se přidávaná látka přestane rozpouštět (nasycený stav) a při vložení množství látky do rozpouštědla, které již nelze rozpustit, vzniká roztok přesycený **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**

Obecně se koncentrace roztoků dají vyjádřit třemi různými poměry (zlomky), kdy v čitateli je složka, která se mísí s rozpouštědlem. V čitateli je součet rozpouštědla a všech míšených složek. Podle typu zlomku se počítá s hmotností (3.1), objemem (3.2) nebo látkovým množstvím (3.3). Vynásobením zlomku 100 se údaj vyjádří v procentech [8]:

$$m_i = \frac{m_{složka}}{m_{celek}}, \quad (3.1)$$

$$\varphi_i = \frac{V_{složka}}{V_{celek}}, \quad (3.2)$$

$$x_i = \frac{n_{složka}}{n_{celek}}. \quad (3.3)$$

3.1 Rozpustnost cukru

Běžně dostupný krystalový cukr, použitý v této práci, se podle české legislativy musí skládat minimálně z 99,7 % ze sacharózy [20]. Rozpustnost cukru, respektive sacharózy je zaměřena pouze na kapaliny použité v této práci (viz Obr. 4.1). V destilované vodě rozpustnost sacharózy činí maximálně 67,1 % [22], při teplotě 20 °C a tlaku 101,325 kPa (1atm). V ethanolu se sacharóza takřka nerozpouští, její koncentrace se při teplotě 30 °C pohybuje nejvýše kolem 0,1 % **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** Pro plnotučné mléko a ocet neexistují tabulkové či jinak experimentálně ověřené hodnoty rozpustnosti cukru. Za předpokladu, že kravské mléko je z 87 % složeno z vody a obsah cukrů je průměrně 4,8 % [23], lze předpokládat podobnou maximální rozpustnost sacharózy jako v destilované vodě. Stejný předpoklad platí i pro 8% roztok octa.

4. MĚŘENÍ KAPALIN V ČASOVÉ OBLASTI

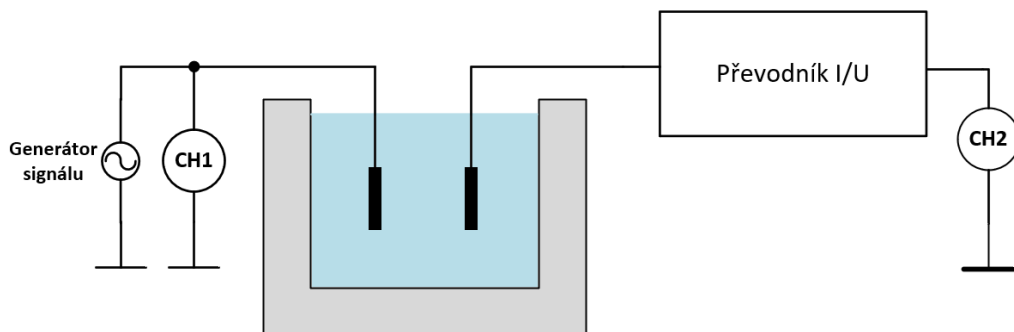
Kapaliny byly v objemu 20 ml umístěny do skleněné kádinky o objemu 25 ml. Hloubka ponoru elektrod činila 15 mm. Objem kapaliny a hloubka ponoru byly zvoleny po poradě s konzultantem práce. Jako elektrody byly použity běžné kolíky z kolíkové lišty bez žádné galvanické úpravy (nanesení vrstvy platiny). Není tedy zajištěna minimalizace interakce mezi elektrodou a elektrolytem [25]. Rozteč elektrod je 2,54 mm, což odpovídá konektoru SMA určeného na DPS [26]. Tenhle rozměr byl zvolen z důvodu malých rozměrů měřící nádoby, objemu kapaliny a pro možné využití v praxi. Rozteč elektrod byla zajištěna umístěním do korkového zátky. Měřené kapaliny byly vybrány po poradě s konzultantem bakalářské práce. Jedná se o destilovanou vodu, ethanol v koncentraci 96 %, trvanlivé plnotučné mléko s tučností 3,5 % a 8 % kvasný lihový ocet (viz Obr. 4.1).



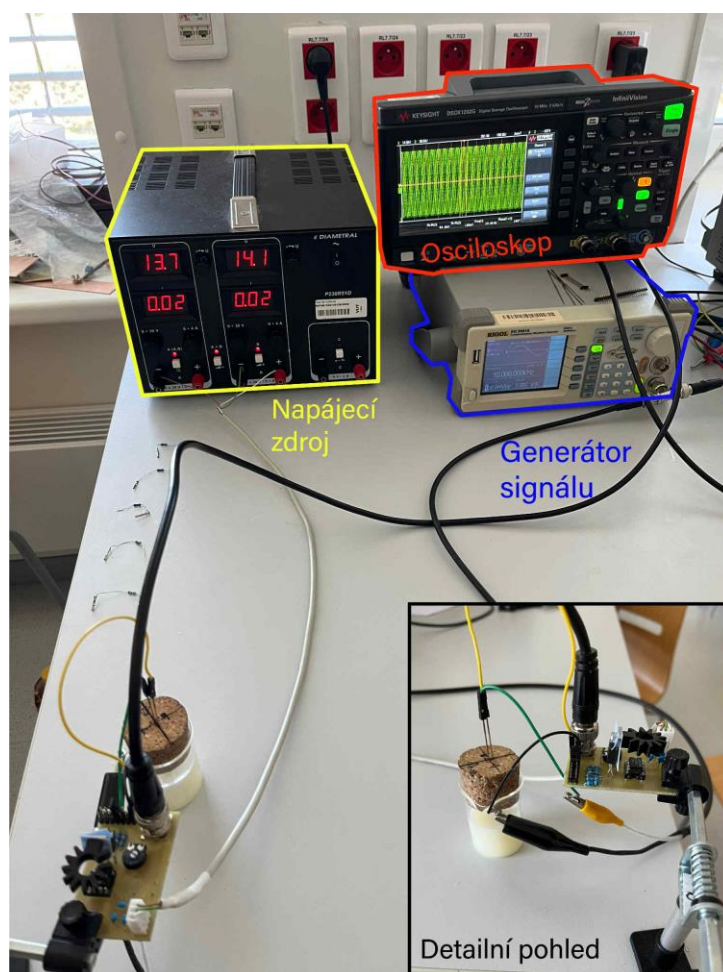
Obrázek 4.1 Vybrané kapaliny

Měření bylo prováděno na osciloskopu Keysight DSOX120G se zabudovaným generátorem signálu a funkcí Frequency Response Analysis (FRA) – analýza frekvenční odezvy, která měří zisk zvoleného kanálu v decibelech a jeho fázový posun [27]. Pro využití této funkce bylo nutné použít zabudovaný generátor osciloskopu. FRA bylo využito pro měření závislosti impedance kapalin na frekvenci. Pro měření nelinearity, zkreslení spektra a odezvu na jednotkový skok byl použit samostatný generátor signálu Rigol DG 3061A, který má větší napěťový rozsah budícího signálu než generátor v osciloskopu [28]. Generátor signálu je připojen koaxiálním kabelem s BNC konektorem na kanál 1 osciloskopu a krokosvorkou na jednu elektrodu ponořenou v kapalině. Druhá elektroda je připojena propojovacím drátem na záporný vstup převodníku.

Výstup převodníku je přiveden opět koaxiálním kabelem s BNC konektorem na kanál 2 osciloskopu a zpětnovazební odpory. Blokové schéma zapojení je na Obr. 4.2 a fotka pracoviště na Obr. 4.3. Měřená data byla exportována jako textový soubor .csv pro následné zpracování dat v programovém prostředí MATLAB a grafy následně nahrány na GitHub [29].



Obrázek 4.2 Schéma aparatury pro měření kapalin



Obrázek 4.3 Fotka měřicího pracoviště

4.1 Referenční měření

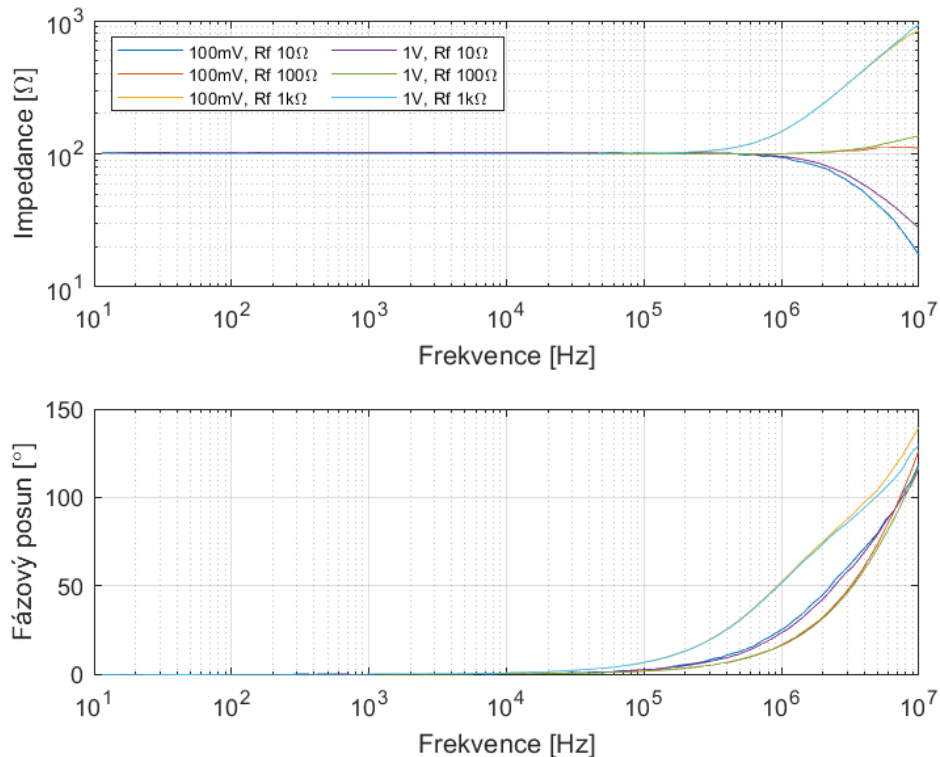
Pro ověření správné funkce realizovaného převodníku proudu na napětí a přesnosti jednotlivých převodních odporů bylo provedeno referenční měření na čistě rezistivní zátěži. Hodnoty zatěžovacích odporů byly zvoleny $10\ \Omega$, $100\ \Omega$, $1\ \text{k}\Omega$, $10\ \text{k}\Omega$, $100\ \text{k}\Omega$ a měly za cíl pokrýt předpokládané impedance kapalin. Měření bylo prováděno při napájecím napětí převodníku $\pm 14\text{V}$, frekvenční rozsah $10\ \text{Hz}$ až $10\ \text{MHz}$ na budících napětích $1\ \text{V}_{\text{pp}}$ a $100\ \text{mV}_{\text{pp}}$, aby byla ověřena funkce i při nízkém budícím napětí, respektive snímaném proudu. Využitím vztahu pro přepočítání zisku decibelů [30]:

$$U_2 = 10^{\frac{G}{20}} \cdot U_1, \quad (4.1)$$

kde G označuje měřený zisk, lze zpětně s pomocí (2.2) spočítat a ověřit zatěžovací odpor R_{LOAD} :

$$R_{LOAD} = \frac{U_1}{\frac{U_2}{R_F}} = \frac{U_1}{U_2} \cdot R_F. \quad (4.2)$$

Z frekvenčních charakteristik [29] (viz Obr. 4.4) lze pozorovat, že přesnost převodníku závisí na zvoleném převodním odporu R_F . Při vhodném zvolení tohoto odporu transimpedanční převodník funguje do $100\ \text{kHz}$ s minimálním fázovým posuvem.



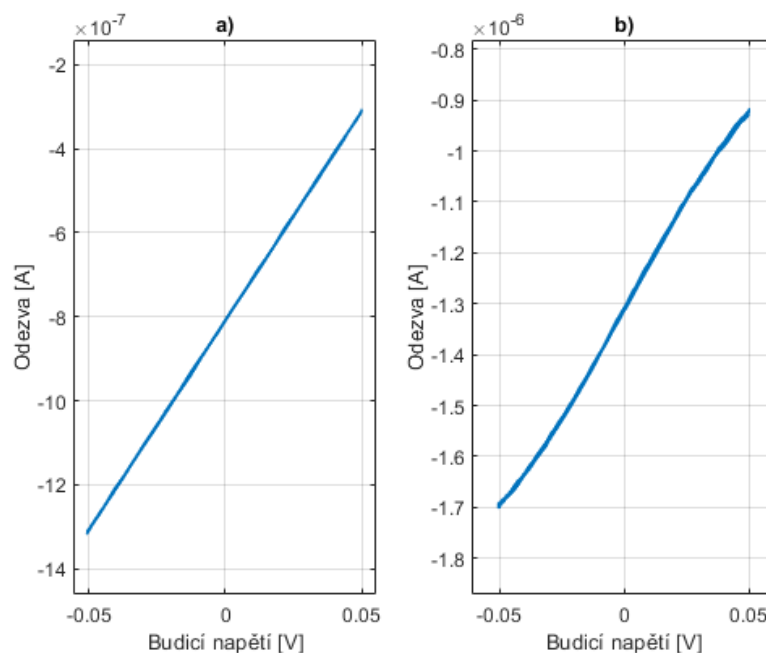
Obrázek 4.4 Frekvenční charakteristika zátěže $100\ \Omega$

Nelineární zkreslení bylo měřeno pro budící napětí 100 mV_{pp}, 1 V_{pp}, 10 V_{pp} a 20 V_{pp}. U zátěže 100 kΩ a 10 kΩ došlo k nelineárnímu zkreslení při nejmenší budící amplitudě a volbě o řád nižšího převodního odporu (viz Obr. 4.5), což je nejspíše způsobeno velmi malým výstupním napětím převodníku, ve kterém se projeví i velké zašumění, takže na osciloskopu se jeví jako zkreslené. Ostatní výsledky mají lineární průběh v celém rozsahu budícího napětí. Měření obdélníkového signálu neprokázalo žádné zkreslení frekvenčního spektra proudové odezvy na žádném zkoumaném zatěžovacím odporu. Na kmitočtu 300 Hz však do spektra prostoupili složky aliasingu [31]. Docházelo však ke stejnosměrnému posuvu při buzení malou amplitudou pro sinusový i obdélníkový signál. Na velikost posuvu měl vliv i převodní odpor (viz Obr. 4.6). Tento posuv je zapříčiněn převodníkem a nebyl nijak kompenzován. Byla snaha stejnosměrný posun kompenzovat, připojením napěťového děliče na kladný vstup operačního zesilovače. Docházelo však k tvarovému zkreslení výstupního průběhu i v oblasti, kde bez kompenzace ke zkreslení nedocházelo. Stejnosměrný posun neměl na výsledky měření zásadní vliv [29].

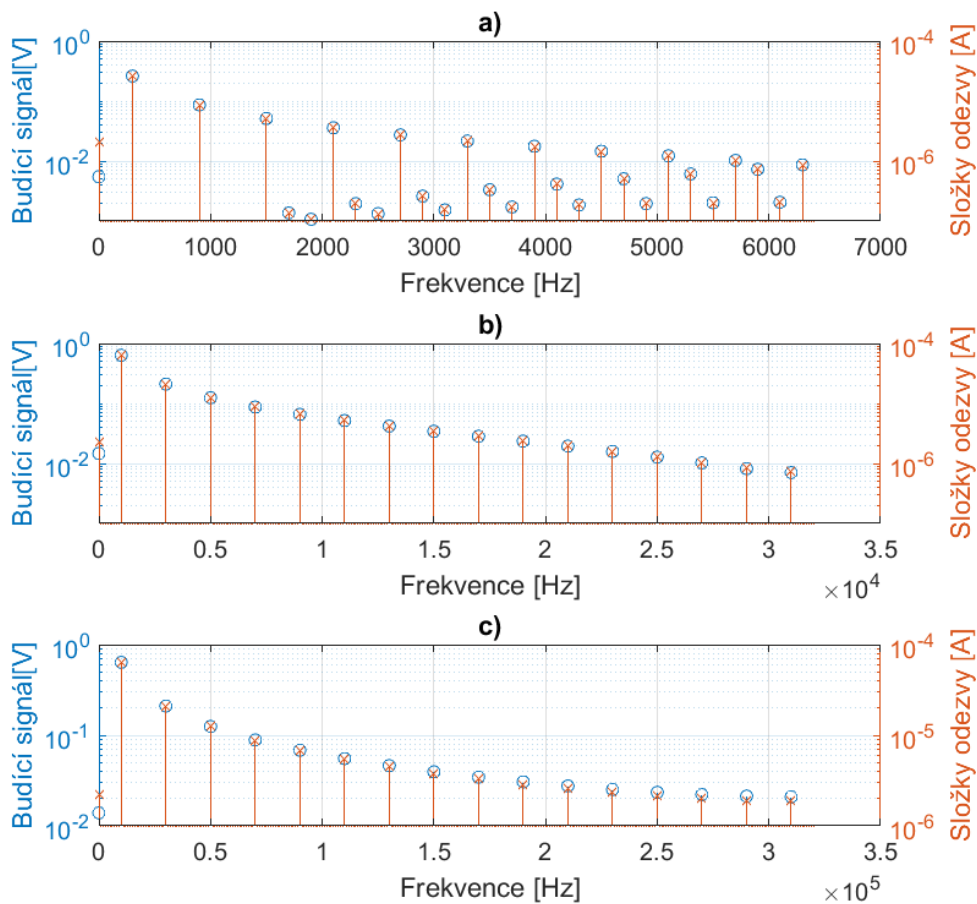
Výpočet proudu procházejícího rezistorem, respektive vzorkem kapaliny, vychází ze vztahu (2.2) vyjádřením proudu I_1 :

$$I_1 = \frac{U_2}{-R_F}, \quad (4.3)$$

Kde U_2 reprezentuje napětí na výstupu převodníku a R_F je hodnota převodního odporu.

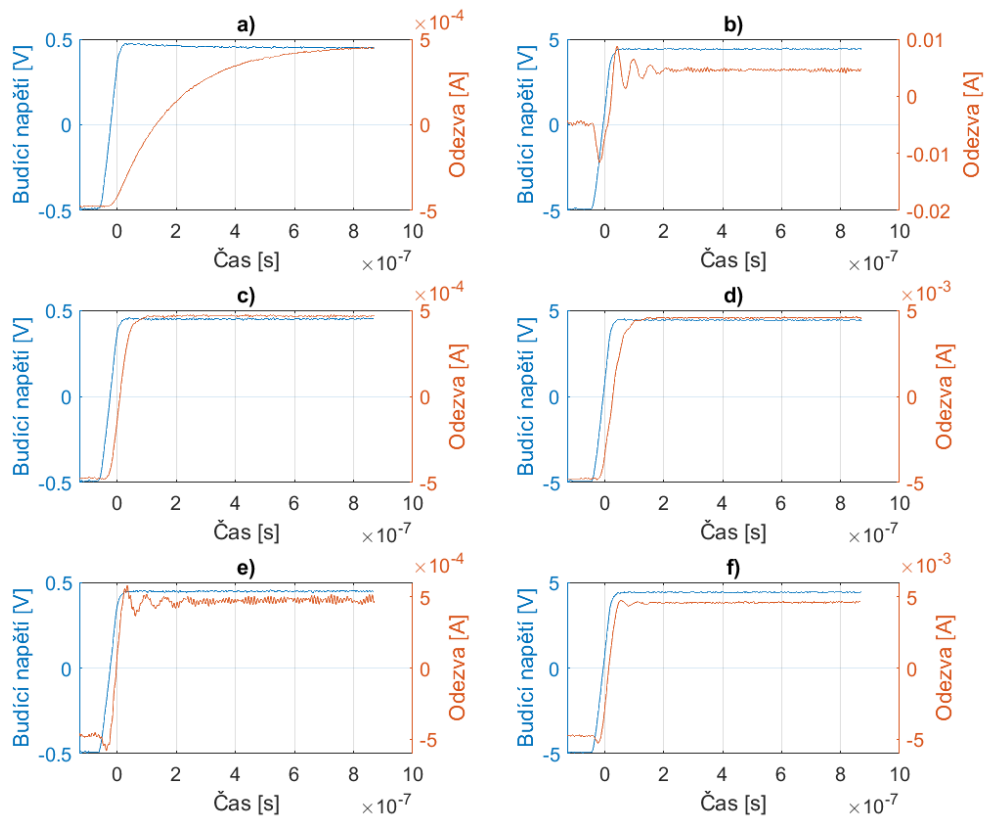


Obrázek 4.5 XY graf pro rezistor 100 kΩ na frekvenci 1 kHz, 100 mV_{pp} a převodní odpor a) 100 kΩ b) 10 kΩ



Obrázek 4.6 Frekvenční spektra zátěže $10 \text{ k}\Omega$ pro budící napětí 1 V_{pp} a) $100 \text{ mV}_{\text{pp}}$ a $R_F = 10 \text{ k}\Omega$ b) $100 \text{ mV}_{\text{pp}}$ a $R_F = 1 \text{ k}\Omega$ c) 10 V_{pp} a $R_F = 10 \text{ k}\Omega$

Referenční měření odezvy na jednotkový skok bylo měřeno nastavením generátoru do režimu PULSE se střídou 50 %, bez stejnosměrného posuvu, na kmitočtu 1 kHz a pro amplitudy 1 V_{pp} a 10 V_{pp}. Odezva nejvíce závisela na volbě převodního odporu R_F . Zvolením řádově většího rezistoru, než je zatěžovací přechází náběžná hrana v exponenciální křivku (viz Obr. 4.7 a)), naopak menší převodní odpor způsobil rozkmitání, které se následně ustálilo (viz Obr. 4.7 b)). Odpovídající převodní odpor nezpůsobil žádné deformace proudové odezvy na jednotkový skok [29].



Obrázek 4.7 Odezva na jednotkový skok odporu $1 \text{ k}\Omega$ a) 1 V_{pp} a $R_F = 10 \text{ k}\Omega$ b) 10 V_{pp} a $R_F = 10 \text{ }\Omega$ c) 1 V_{pp} a $R_F = 1 \text{ k}\Omega$ d) 10 V_{pp} a $R_F = 1 \text{ k}\Omega$ e) 1 V_{pp} a $R_F = 100 \Omega$ c) 10 V_{pp} a $R_F = 100 \text{ }\Omega$

4.2 Výsledky měření vzorků kapalin

Frekvenční charakteristika byla měřena pro stejná budící napětí jako v kapitole 4.1, pouze byl snížen kmitočtový rozsah do 1 MHz . Opakovaná měření frekvenčních charakteristik probíhala ihned po sobě (cca po 2 minutách), snaha byla ověřit stálost parametrů v čase. Projevy nelinearity byly zkoumány závislostí odezvy proudu na vstupním sinusovém signálu v rozsahu 100 mV_{pp} až 20 V_{pp} na kmitočtech 300 Hz , 1 kHz a 10 kHz . Zkreslení spektra bylo pozorováno buzením obdélníkového signálu pro stejné amplitudy a frekvence jako při zkoumání nelinearity. Proudová odezva na jednotkový skok byla měřena při stejném nastavení generátoru jako při referenčním měření. Do vzorků kapalin byl následně přimícháván cukr a byly sledovány změny ve všech výše zmíněných měřeních. Pro nízké budící amplitudy byla proudová odezva velmi zašuměná, z toho důvodu byla všechna měření prováděna v akvizičním režimu High Resolution, který zvyšuje vertikální rozlišení osciloskopu a dojde tím k potlačení šumu [27]. Výsledky frekvenčních charakteristik byly vyjádřeny pomocí (4.2). Zkreslení spektra, vyjádření v grafu XY a odezva na jednotkový skok byly zpracovány s pomocí (4.3). Impedance

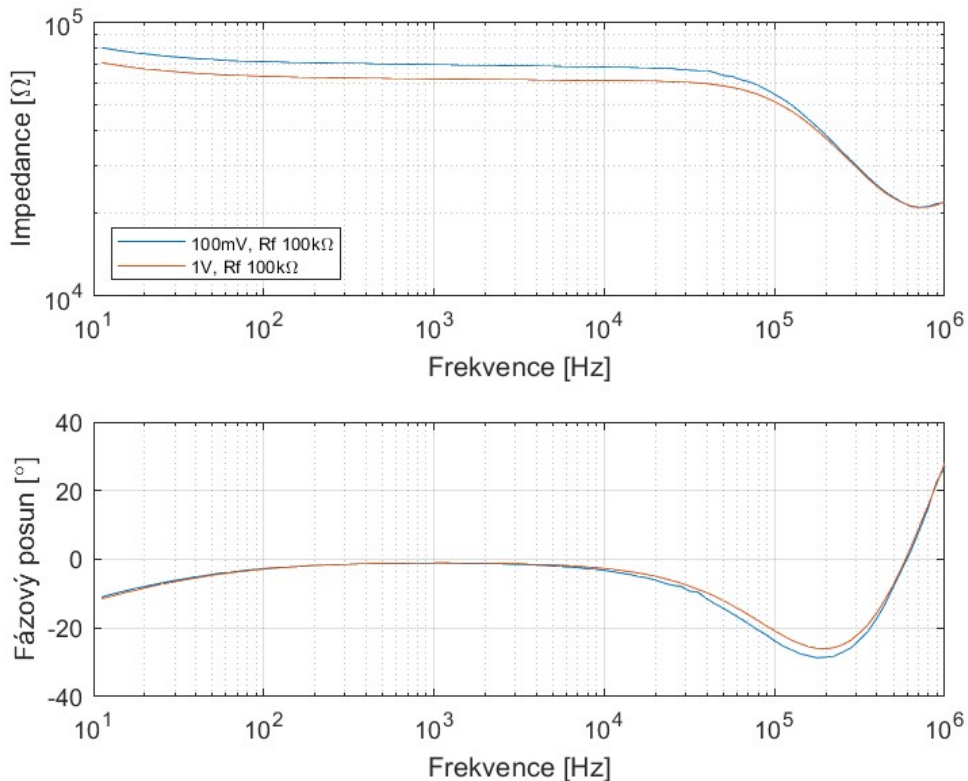
vyjádřená v grafech její závislosti na koncentraci byla spočítána pomocí nalezení hodnot špička – špička pro vstupní napětí a proudovou odezvu (4.3) a jejich podílem byla získána impedance vzorku:

$$R_{vzorek} = \frac{U_{1max} - U_{1min}}{I_{1max} - I_{1min}} = \frac{U_{1pp}}{I_{1pp}}. \quad (4.4)$$

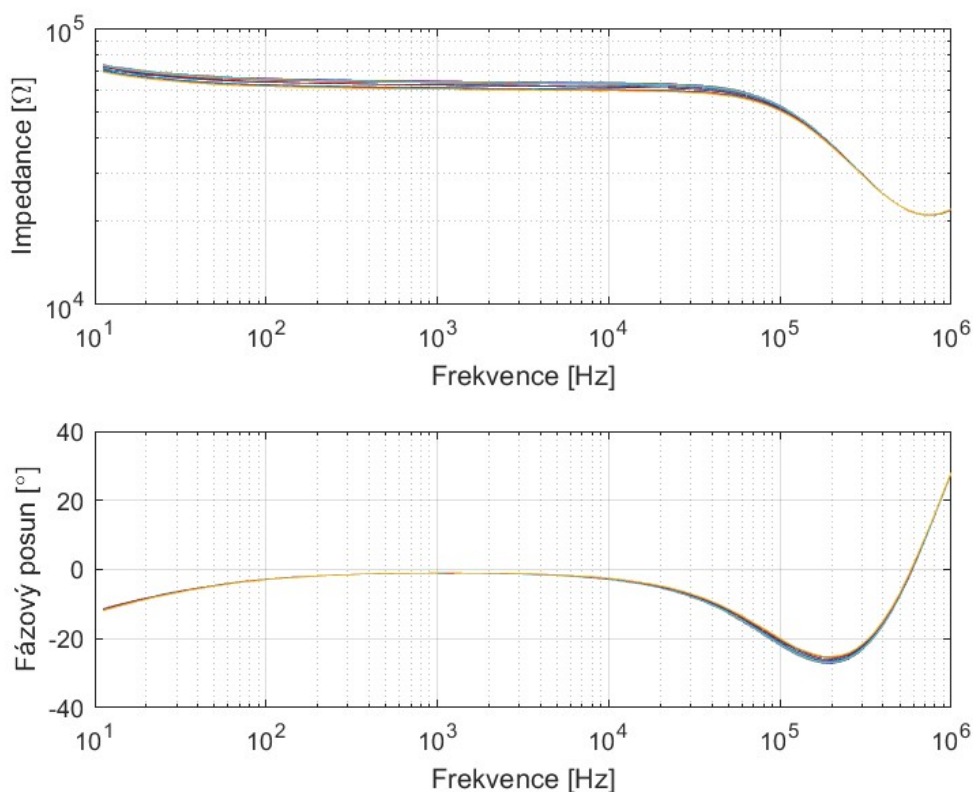
4.2.1 Destilovaná voda

Z naměřených hodnot frekvenční charakteristiky (viz Obr. 4.8) lze vidět závislost impedance na budícím napětí, kdy s rostoucí amplitudou impedance klesá. Mezi frekvencemi 100 Hz a 40 kHz je impedance takřka konstantní a dosahuje hodnoty 70 kΩ respektive 60 kΩ. Za hranicí 40 kHz dochází k prudkému poklesu impedance. S vyšším budícím napětím impedance poklesla. Průběhy fázových posunu jsou téměř totožné.

Bylo provedeno 10 měření frekvenčních charakteristik pro statistické zpracování při budícím napětí 1 V_{pp} (Obr. 4.9). Impedance se v čase měnila v rozmezí 60 kΩ až 64 kΩ, nezávisle na pořadí měření. Průběhy fázových posunů téměř splývají. Rozptyl impedancí lze, vzhledem k jejich celkové hodnotě, považovat za zanedbatelný [29].

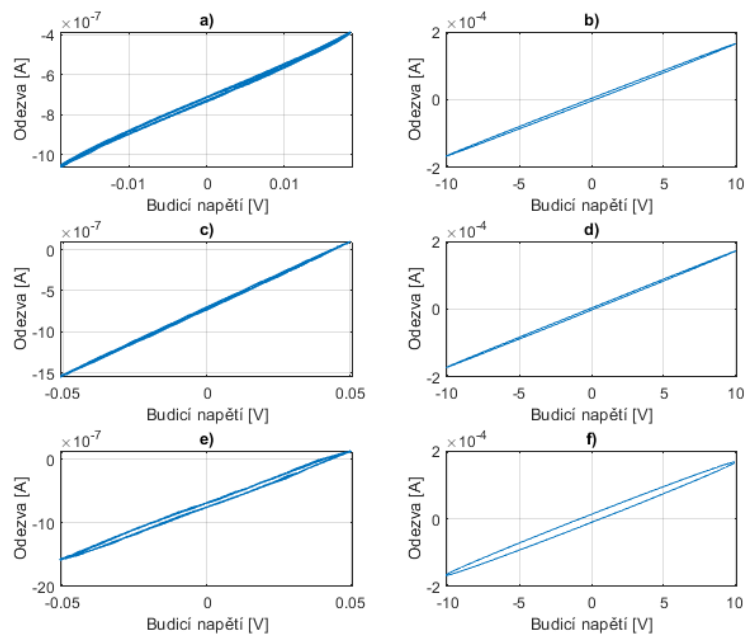


Obrázek 4.8 Impedanční a fázová charakteristika destilované vody

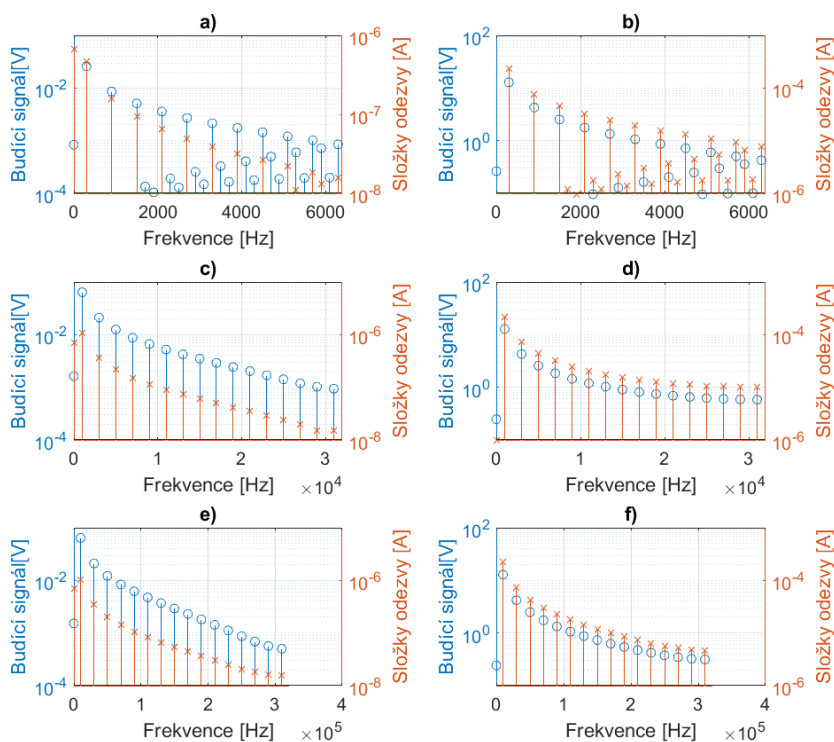


Obrázek 4.9 Impedanční a fázová závislost destilované vody při opakovaném měření

U měření nelinearity v režimu XY docházelo na malých budících napětích k tomu, že signál byl zašuměn a jeho přímka, respektive křivka, nemá hladký průběh jako při vyšších napětích (viz Obr. 4.10 a), c), e)). Díky zašumění a fázovému posuvu, který vytváří v zobrazení XY elipsy, je obtížně pozorovat projevy nelinearity, které nejsou výrazné. Nelineární průběh se projevil pouze při 300 Hz a buzení 100 mV_{pp} . Na vyšších amplitudách nebo frekvencích se nelinearita neprojevila. Obrázek 4.10 ukazuje porovnání XY průběhu při nejnižších a nejvyšších amplitudách všech měřených frekvencí [29].

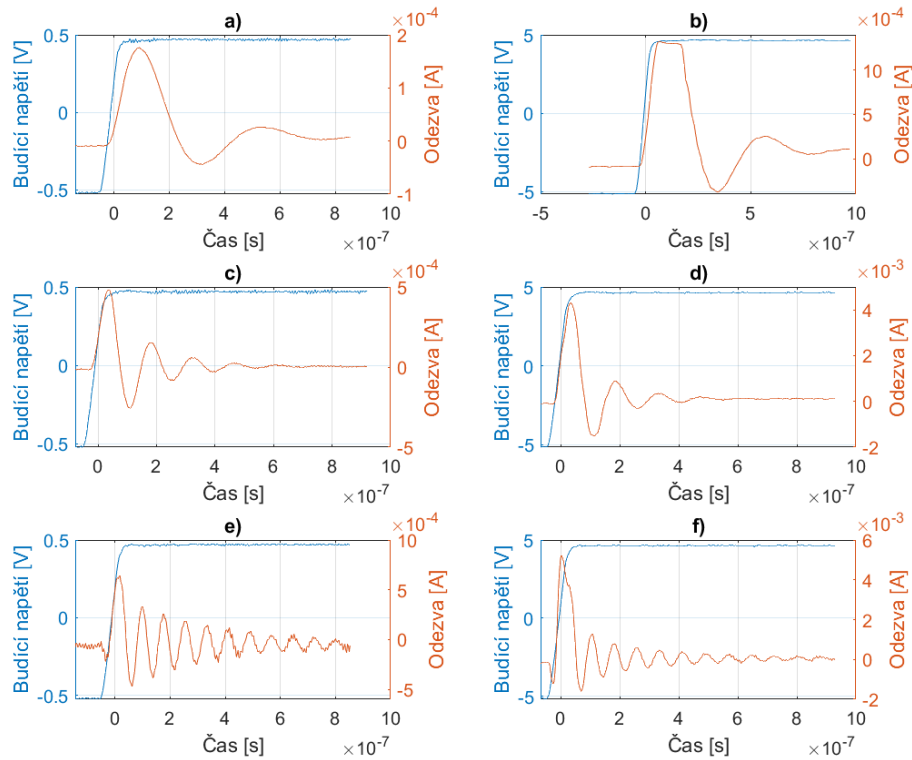


Obrázek 4.10 XY grafy destilované vody a) 100 mV_{pp} 300 Hz b) 20 V_{pp} 300 Hz c) 100 mV_{pp} , 1 kHz d) 20 V_{pp} , 1 kHz e) 100 mV_{pp} 10 kHz f) 20 V_{pp} 10 kHz



Obrázek 4.11 Spektrum obdélníkového signálu destilované vody a) 100 mV_{pp} 300 Hz b) 20 V_{pp} 300 Hz c) 100 mV_{pp} 1 kHz d) 20 V_{pp} 1 kHz e) 100 mV_{pp} 10 kHz f) 20 V_{pp} 10 kHz

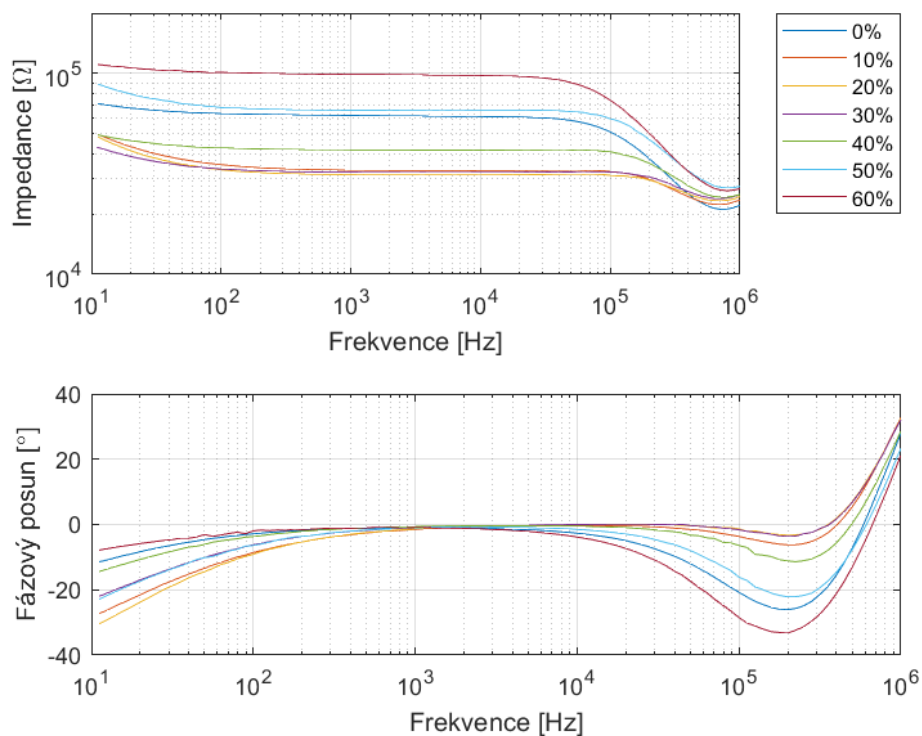
Proudová odezva destilované vody na jednotkový skok vytváří tlumené kmity [32], jejichž frekvence s klesajícím převodním odporem roste (viz Obr. 4.12). Ne všechny odezvy, respektive kmity mají hladký harmonický průběh, takže jejich opakovací kmitočty jsou pouze přibližné. Frekvence kmitů pro převodní odpor $10\text{ k}\Omega$ je $2,2\text{ MHz}$, pro $1\text{ k}\Omega$ kmitají s frekvencí $6,8\text{ MHz}$ a 10 MHz pro převodní odpor $100\ \Omega$ [29].



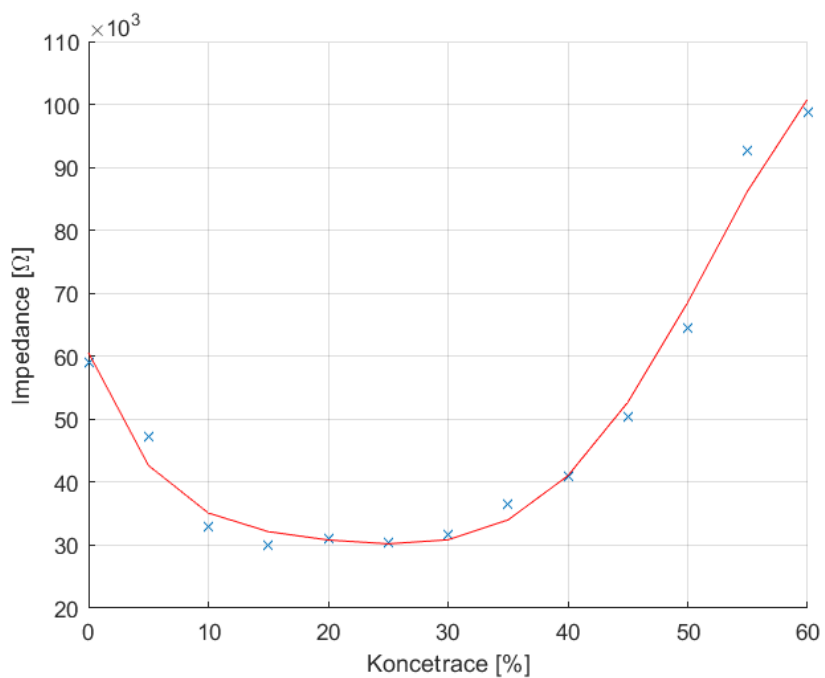
Obrázek 4.12 Proudová odezva na jednotkový skok destilované vody bez příměsí
a) 1 V_{pp} , $R_F = 10\text{ k}\Omega$ b) 10 V_{pp} , $R_F = 10\text{ k}\Omega$ c) 1 V_{pp} , $R_F = 1\text{ k}\Omega$
d) 10 V_{pp} , $R_F = 1\text{ k}\Omega$ e) 1 V_{pp} , $R_F = 100\ \Omega$ f) 10 V_{pp} , $R_F = 100\ \Omega$

4.2.2 Destilovaná voda s příměsí cukru

Roztok destilované vody s cukrem byl míchán po 5 % až do 60 % koncentrace, kdy se již cukr rozpouštěl velice obtížně a dlouho. Výsledky závislosti frekvenčních charakteristik jsou tvarově stejné, jako u destilované vody bez příměsí (viz Obr. 4.13). Lze pozorovat závislost impedance na koncentraci roztoku (viz Obr. 4.14). Po přidání příměsí do 10 % impedance klesá, poté je do 25 % konstantní a má poloviční hodnotu oproti čisté destilované vodě. Následně roste exponenciálně až na více než dvojnásobek vůči destilované vodě bez příměsí. Velikost fázového posuvu je taktéž závislá na koncentraci, respektive impedanci. V oblasti nízkých kmitočtů s rostoucí impedancí se fázový posun zmenšuje. Pro vysoké kmitočty se naopak zvětšuje [29]. Změny vlastností po přidání cukru jsou nejspíše způsobeny tím, že molekuly sacharózy si po rozpuštění ve vodě zachovávají svou strukturu tzn. nerozkládají se na volné ionty, které by vedly elektrický proud [33].

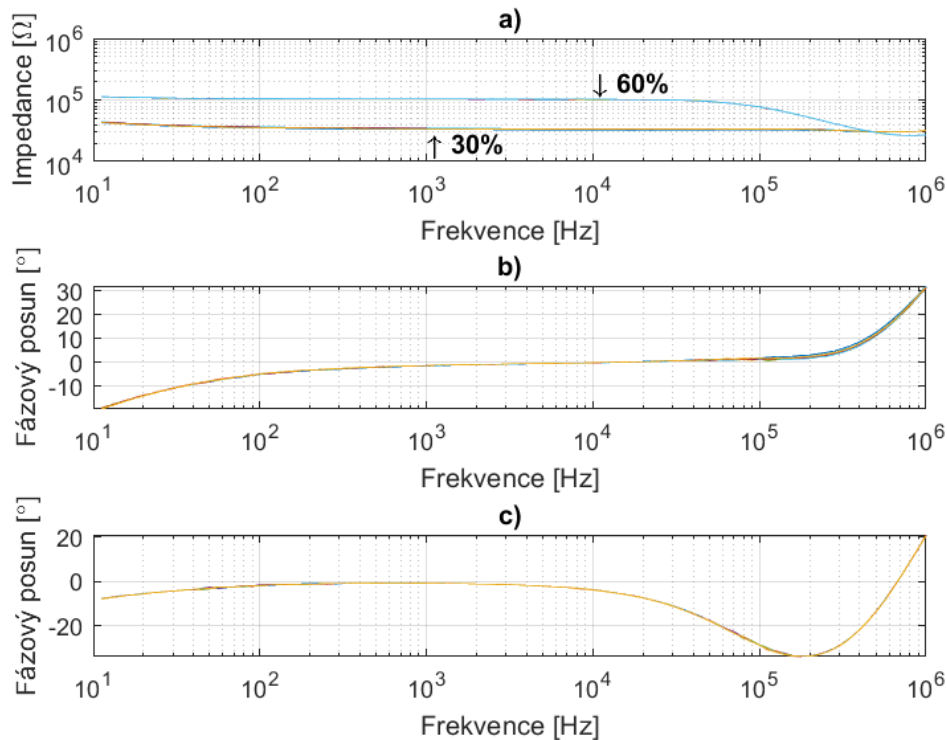


Obrázek 4.13 Impedanční a fázové charakteristiky roztoku destilované vody s cukrem



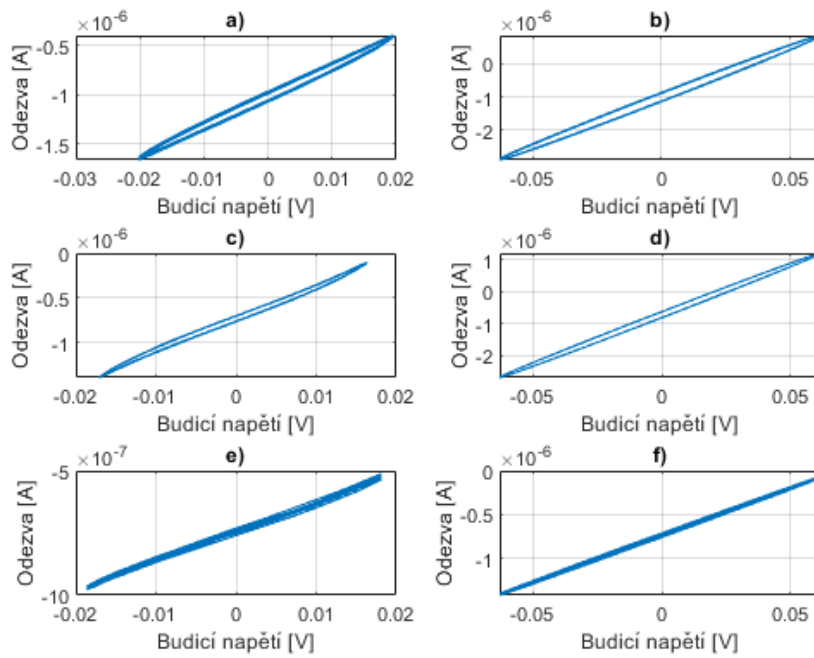
Obrázek 4.14 Závislost impedance na koncentraci na frekvenci 1 kHz a amplitudě $1 V_{pp}$

Opakovaná měření kmitočtové charakteristiky koncentrací 30 % a 60 % ukazují, že impedance a fázové posuny roztoků jsou v čase v podstatě neměnné. Rozptyl impedancí je v lineárních částech obou koncentrací kolem 2 k Ω . Fázové posuny splývají (viz Obr. 4.15) [29].

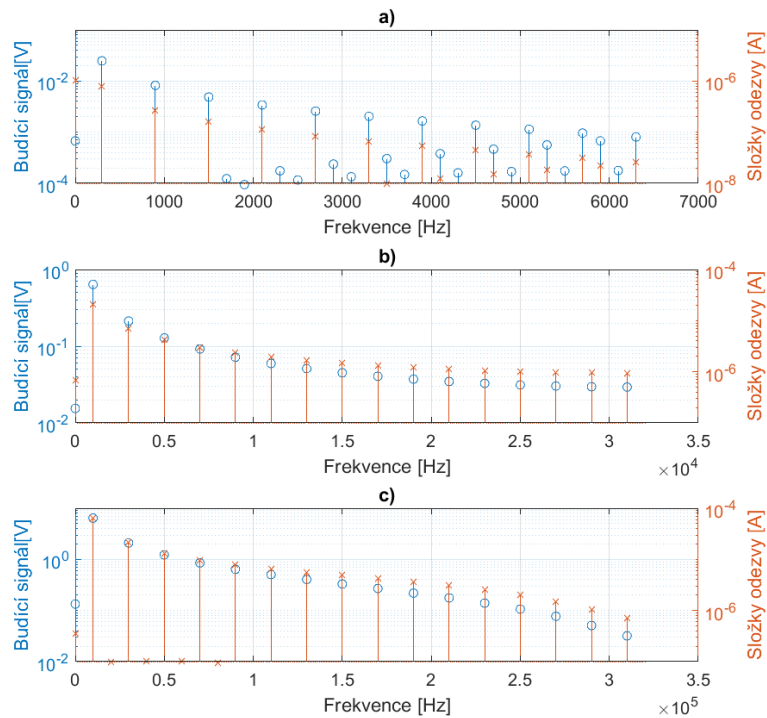


Obrázek 4.15 Opakovaná měření frekvenční (a) a fázových charakteristik pro koncentrace b) 30 % a c) 60 %

Nelinearita roztoků destilované vody s cukrem se projevuje pro všechny koncentrace obdobně jako u destilované vody bez příměsi. Dochází k ní pouze na kmitočtu 300 Hz a malých budících amplitudách. Obrázek 4.16 srovnává projevy nelinearity pro různé koncentrace. Lze pozorovat zmenšení fázového posunu zplošťováním elips. Což koresponduje s fázovými charakteristikami Obrázku 4.13. Roztoky destilované vody a cukru na nízké frekvenci nezkrusovali obdélníkové spektrum, ale při vyšších harmonických složkách začal do spektra prostupovat aliasing [31]. S rostoucí koncentrací se spektrum odezvy začalo zkrusovat. Obrázek 4.17 ukazuje frekvenční spektra pro různé podmínky měření [29].

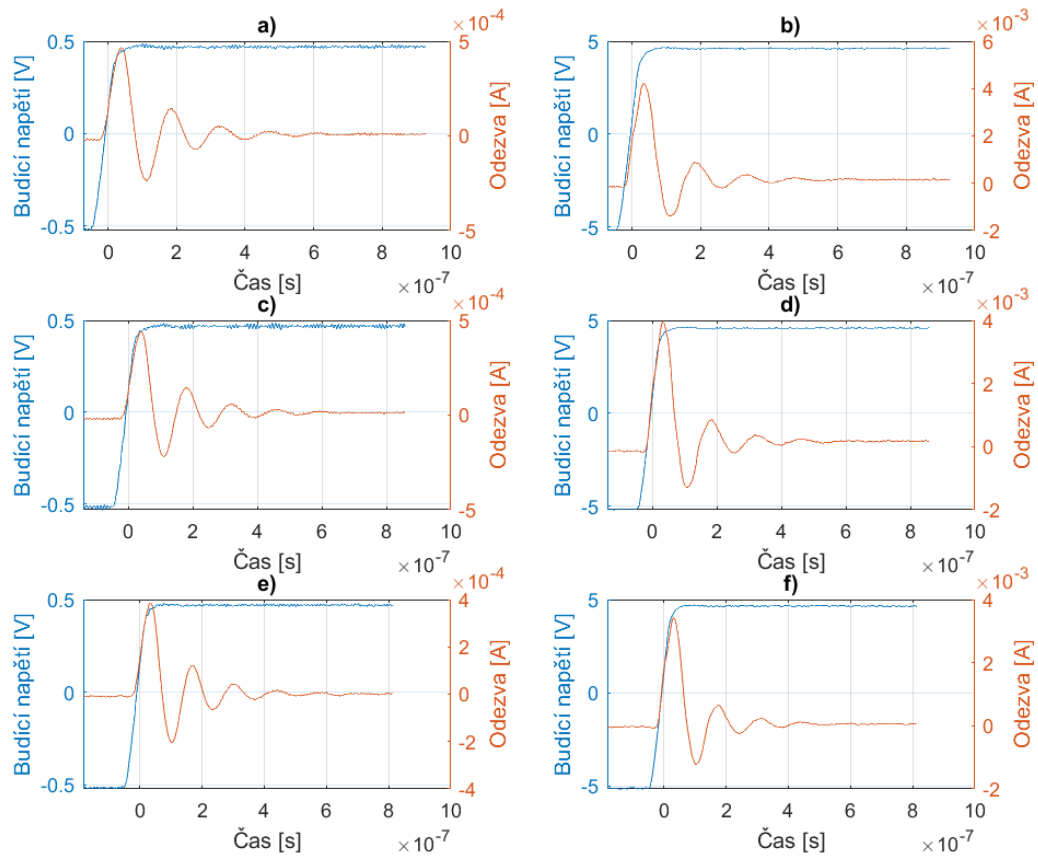


Obrázek 4.16 XY zobrazení destilované vody s příměsí 300 Hz a) 10 %, 100 mV_{pp} b) 10 %, 300 mV_{pp}; c) 30 %, 100 mV_{pp} d) 30 % 300 mV_{pp} e) 55 % 100 mV_{pp} f) 55 % 300 mV_{pp}



Obrázek 4.17 Spektrum obdélníkového signálu a proudové odezvy destil. vody s příměsí a) 10 % 300 Hz, 100 mV_{pp} b) 30 % 1 kHz 1 V_{pp} c) 60 % 10 kHz 10 V_{pp}

Přidání cukru v různých koncentracích nemělo vliv na změnu vlastností proudové odezvy jednotkového skoku. Opakovací kmitočty se při rostoucí koncentraci nemění. (viz Obr. 4.18) [29].

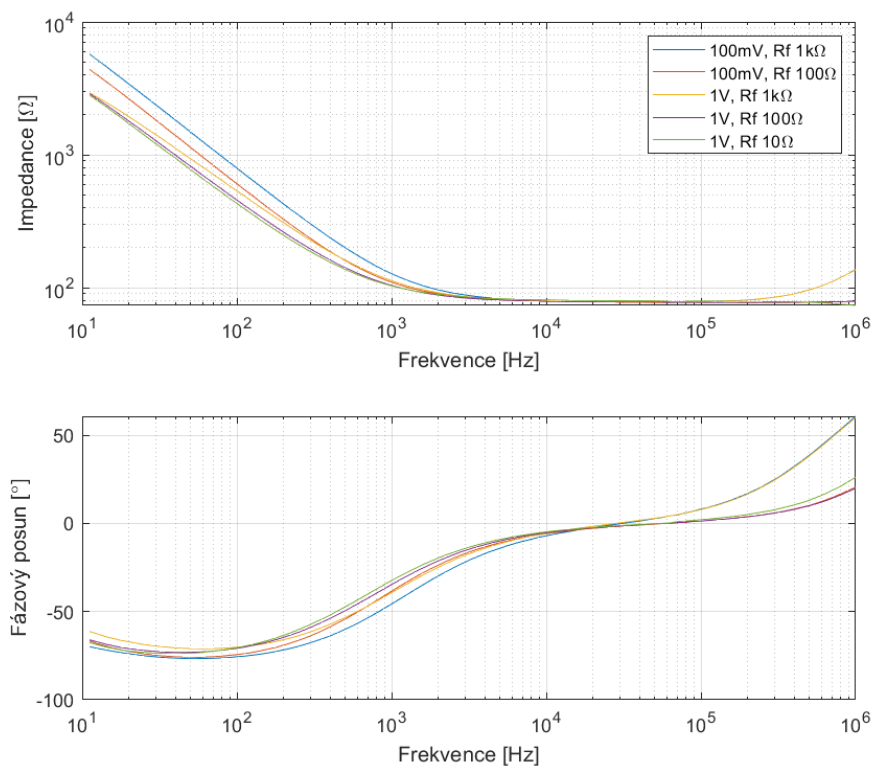


Obrázek 4.18 Odezva na jednotkový skok pro R_F 1k Ω a) 1V_{pp}, 10% b) 10V_{pp}, 10% c) 1V_{pp}, 30% d) 10V_{pp}, 30% e) 1V_{pp}, 60% f) 10V_{pp}, 60%

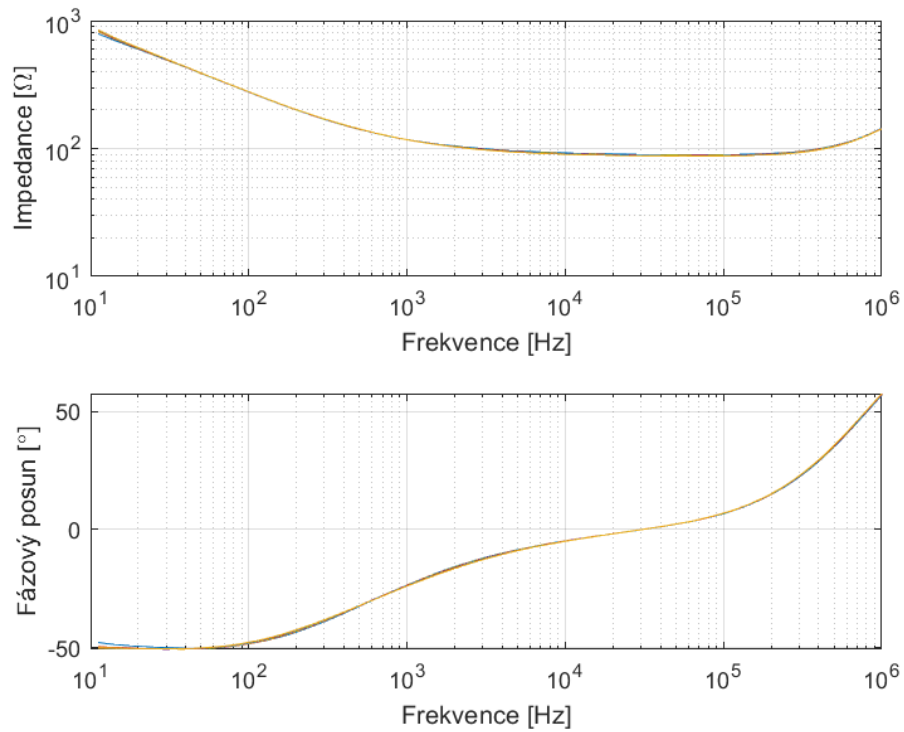
4.2.3 Plnotučné mléko

Výsledky průběhů frekvenčních charakteristik ukazují, že impedance s rostoucí frekvencí klesá od řádově jednotek k Ω až do 80 Ω na 1 kHz, kdy všechny průběhy splynou (viz Obr. 4.19). Fázový posun se na nízkých kmitočtech pohybuje kolem hranice 70° a se vzrůstajícím kmitočtem se blíží 0°.

Provedením 10 měření FRA pro velikost budícího signálu 1 V_{pp}, se prokázalo, stejně jako u destilované vody, vysoká reprodukovatelnost, kdy jednotlivé průběhy téměř splývají (viz Obr. 4.20) [29].

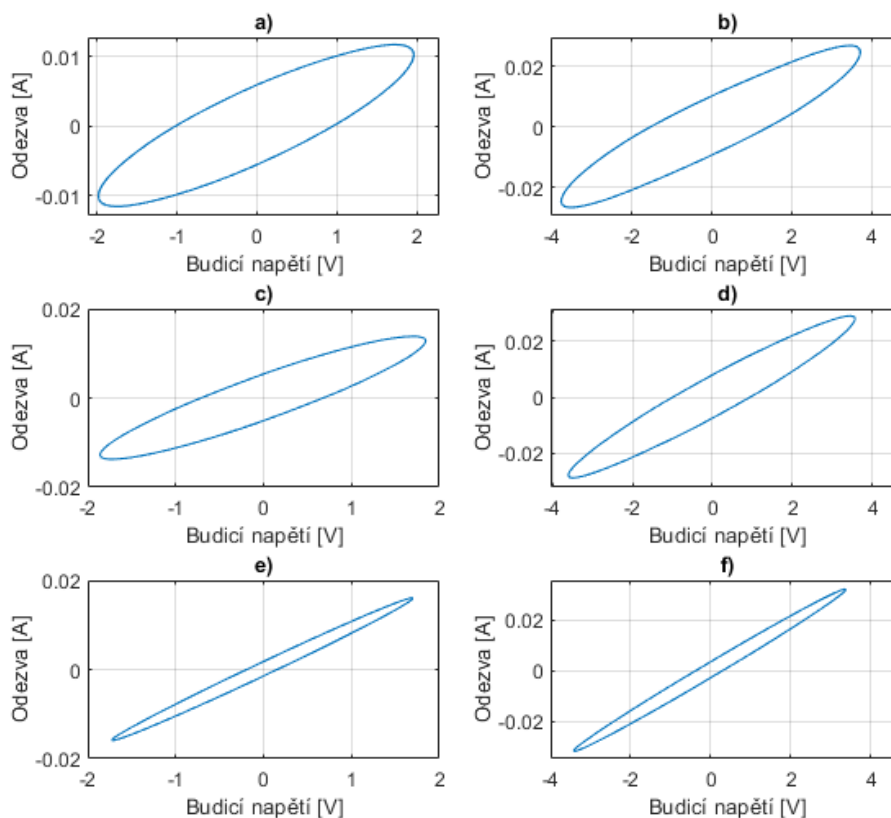


Obrázek 4.19 Impedanční a fázová charakteristika plnotučného mléka



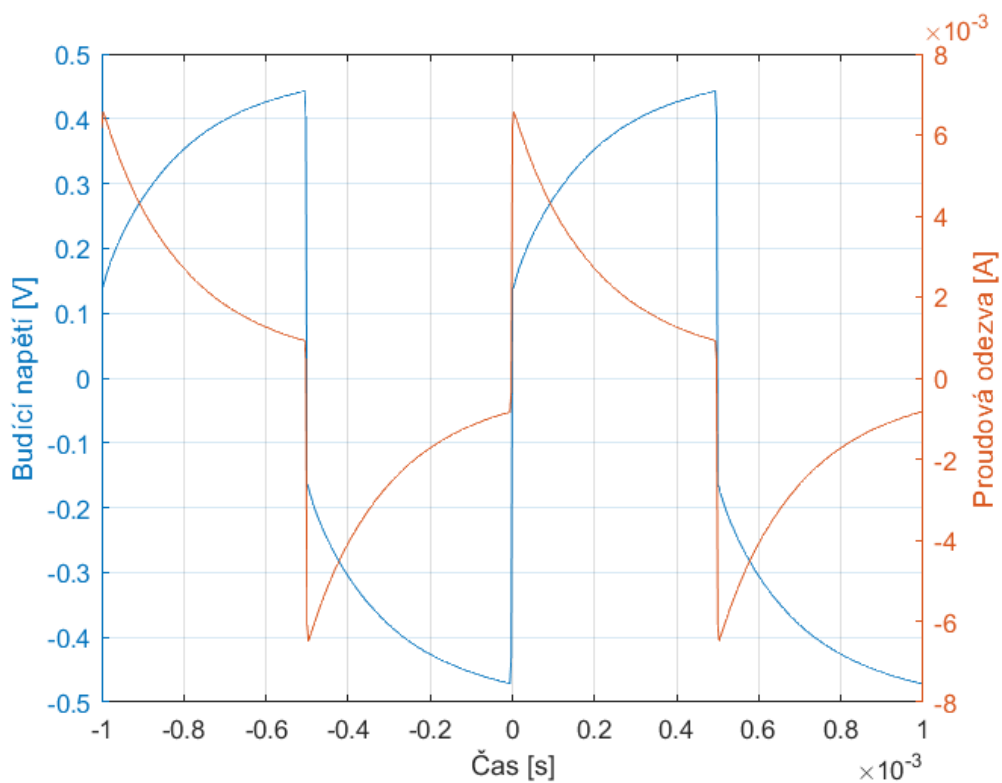
Obrázek 4.20 Opakovaná měření frekvenční charakteristiky plnotučného mléka bez příměsí

Nelinearita se u mléka určovala obtížněji, kvůli výrazným fázovým posuvům vytvářející elipsy v zobrazení XY. Byla však pozorovatelná na frekvenci 300 Hz od 10 V_{pp} budícího napětí. Tedy v nelineární oblasti frekvenční charakteristiky, kdy dochází ke značnému fázovému posuvu. Na frekvenci 1kHz a 10kHz jsou již projevy nelinearity zcela minimální nebo k nim vůbec nedochází [29].



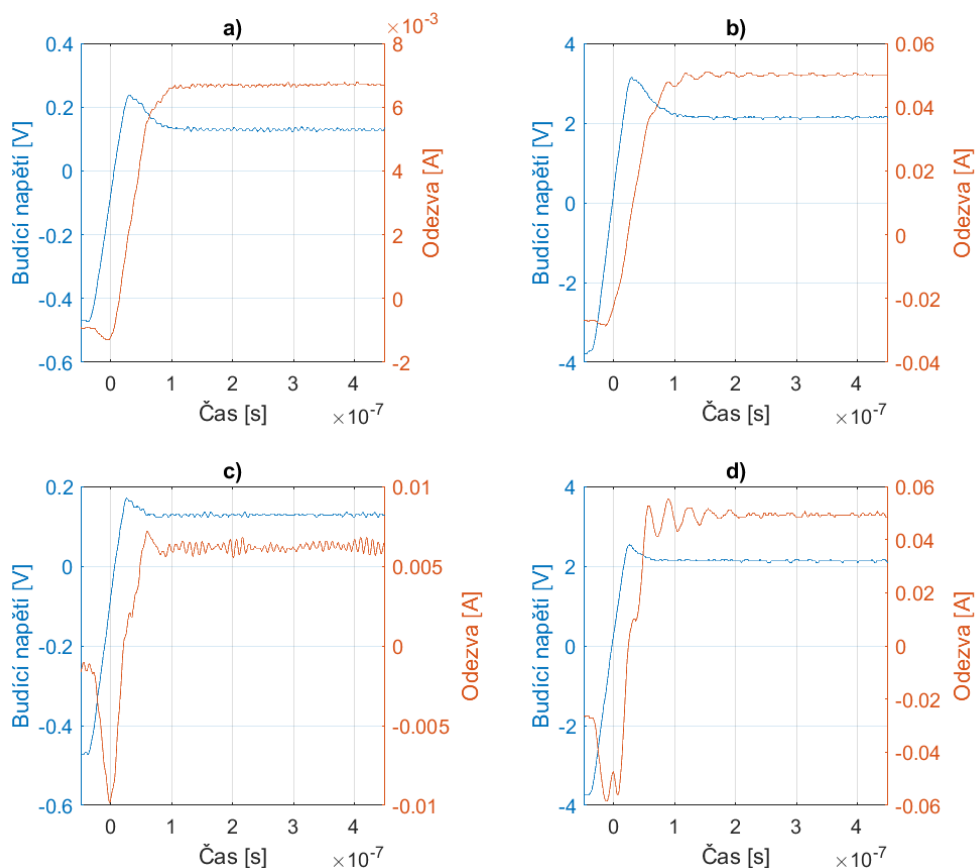
Obrázek 4.21 XY grafy plnotučného mléka bez příměsí a) 300Hz 5V_{pp}; b) 300Hz 10V_{pp}; c) 1kHz 5V_{pp}; d) 1kHz 10V_{pp}; e) 10kHz 5V_{pp}; f) 10kHz 10V_{pp}

Při měření obdélníkového spektra docházelo ke zkreslení jak výstupního, tak i vstupního signálu. Příčinou je výrazná reaktanční složka na nízkých frekvencích vzorku a jeho nízká impedance. Při takto velkém zkreslení nelze považovat výsledky zkreslení frekvenčního spektra za validní [34].



Obrázek 4.22 Zkreslení vstupního signálu na frekvenci 1 kHz

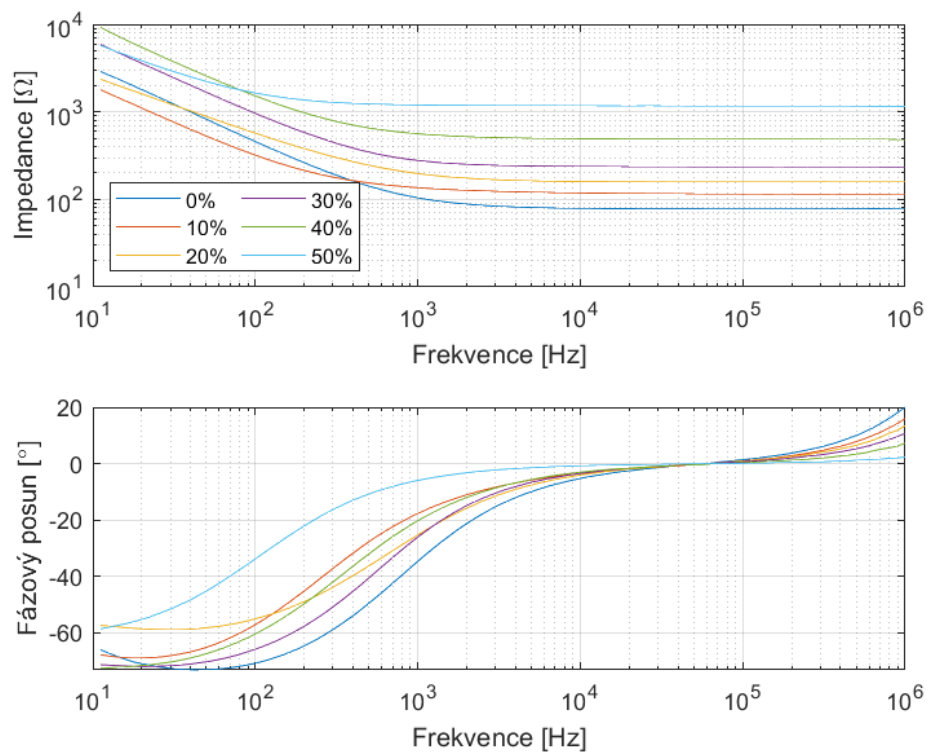
Výsledky proudové odezvy na jednotkový skok jsou postiženy stejným efektem. Časová základna je však o 4 řády menší a vstupní signál zde má po ustálení překmitu konstantní úroveň. Z obrázku 4.23 lze vidět, že kromě převodního odporu má na proudovou odezvu jednotkového skoku vliv i amplituda signálu. Při volbě převodního odporu 100Ω (řádově srovnatelný s impedancí vzorku) vznikají velmi slabé tlumené kmity s kmitočtem 29 MHz. Volba převodního odporu 10Ω , dochází při náběžné hraně k výraznému překmitu do opačné polarity a vzniku tlumených kmitů, jejichž kmitočet se stejný jako pro $R_F = 100 \Omega$ [29].



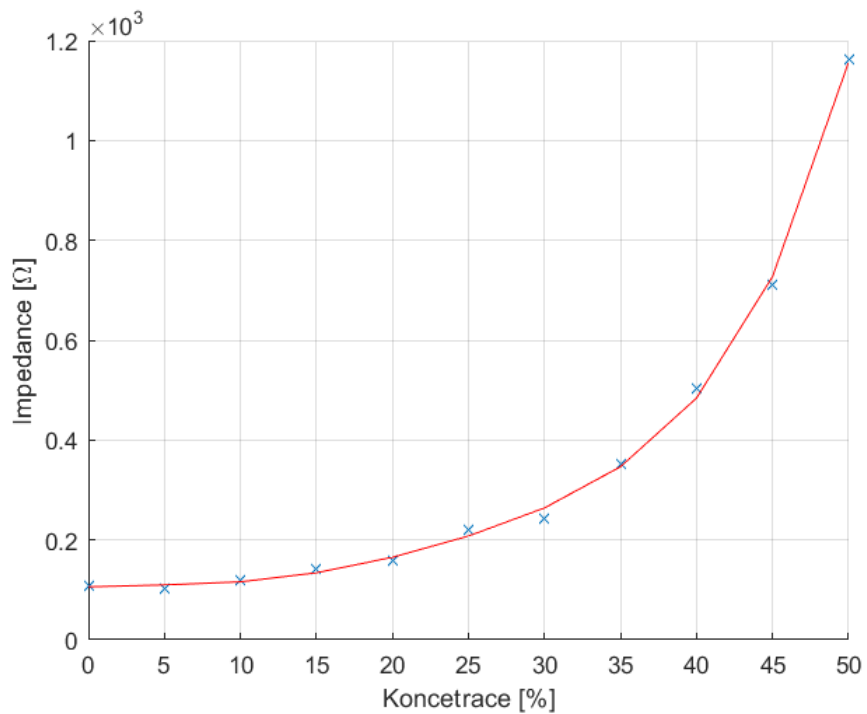
Obrázek 4.23 Odezva na jednotkový skok a) 1 V_{pp}, $R_F = 100 \Omega$ b) 10 V_{pp}, $R_F = 100 \Omega$ c) 1 V_{pp}, $R_F = 10 \Omega$ d) 10 V_{pp}, $R_F = 10 \Omega$

4.2.4 Plnotučné mléko s příměsí cukru

Roztok plnotučného mléka s cukrem byl měřen v rozsahu koncentrací 5 % - 50 % s krokem 5 %. Maximální měřená koncentrace byla snížena, protože již nešlo s jistotou ověřit, zda došlo k úplnému rozpuštění cukru. Obrázek 4.24 ukazuje srovnání jejich průběhů pro budící napětí 1 V_{pp} a převodní odpor 1 k Ω . Lze vidět, že jsou si tvarově velmi podobné. Závislost impedance na koncentraci je zobrazena v obrázku 4.25 jde pozorovat přibližný exponenciální růst. Průběhy fázových posunů jsou si taktéž tvarově velmi podobné, pouze se snižuje kmitočet, při kterém se začíná fáze klesat [29].

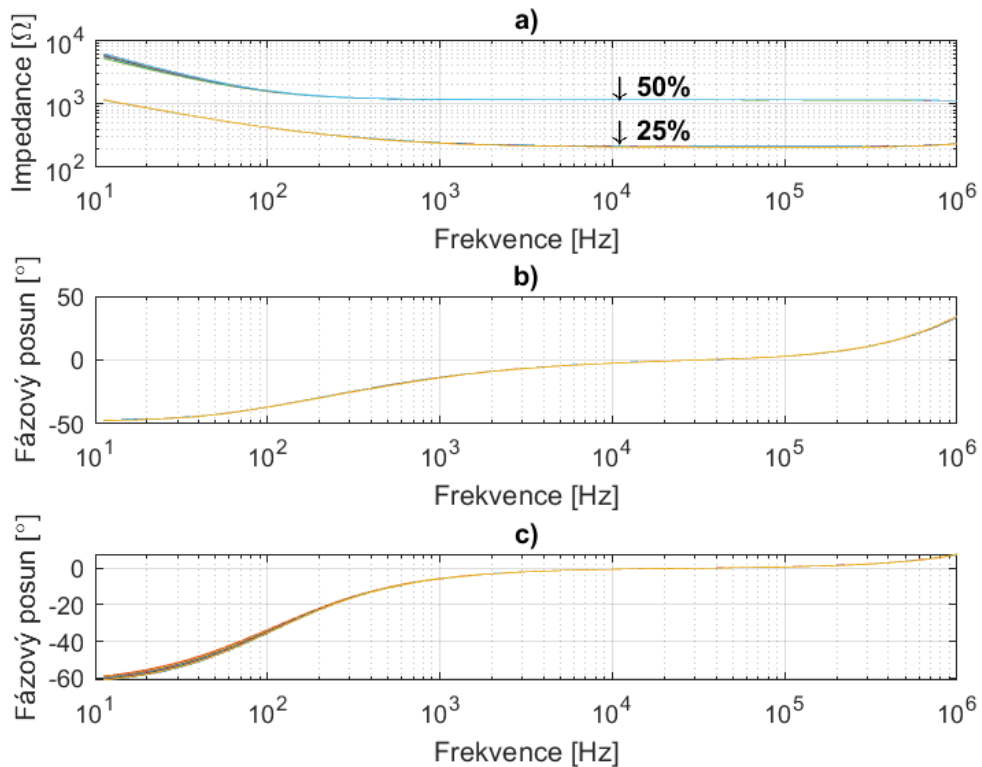


Obrázek 4.24 Srovnání frekvenčních charakteristik různých koncentrací roztoků mléka a cukru pro 1 V_{pp}



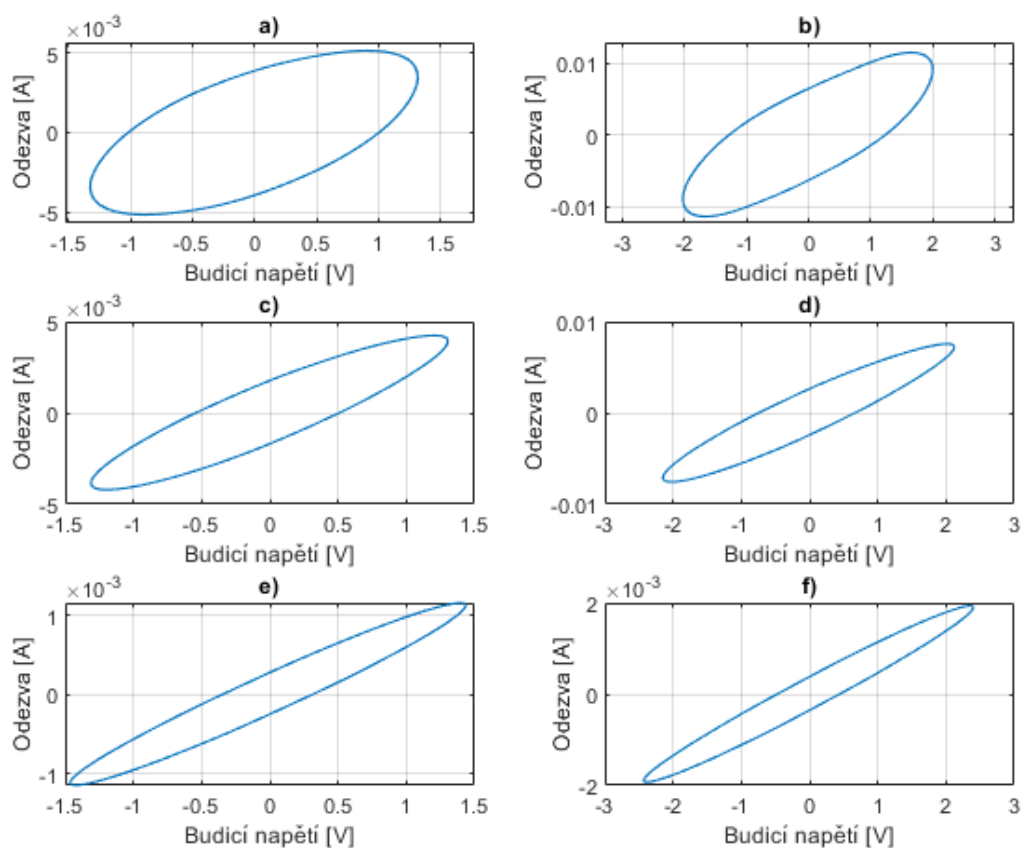
Obrázek 4.25 Závislost impedance na koncentraci roztoků mléka a cukru pro 10 kHz a 1 V_{pp}

Opakovaná měření FRA charakteristik (viz Obr. 4.26) koncentrací 25 % a 50 % ukazují vysokou reprodukovatelnost výsledku v čase. V lineární části frekvenční charakteristiky je rozptyl impedance tak nízký, že jednotlivé průběhy do sebe splývají. Totéž lze prohlásit i pro fázové posuny [29].



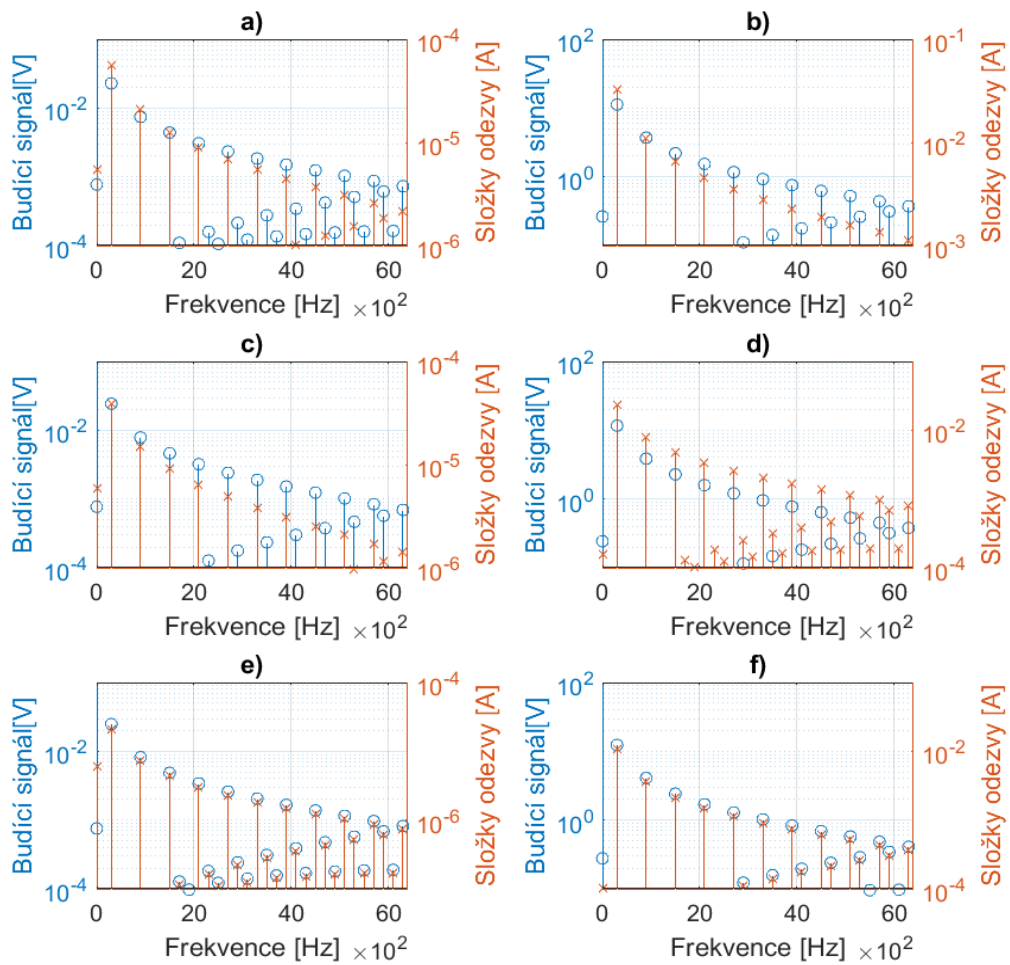
Obrázek 4.26 a) Impedanční charakteristika, fázové charakteristiky koncentrace b) 25 %, c) 50 %

Měření nelinearity probíhalo za stejných podmínek jako pro destilovanou vodu. Projevovала se, stejně jako u mléka bez příměsí, pouze v nelineární části frekvenční charakteristiky, tedy na kmitočtu 300 Hz od 5 V_{pp}. S rostoucí koncentrací cukru se projevy nelinearity snižovali, což koresponduje s poklesem fázového posunu. Od 30 % se již roztoky chovaly lineárně. Na frekvencích 1 kHz a 10 kHz se nelinearita neprojevila pro žádnou koncentraci. Obrázek 4.27 srovnává XY průběhy na kmitočtu 300 Hz pro různé koncentrace [29].



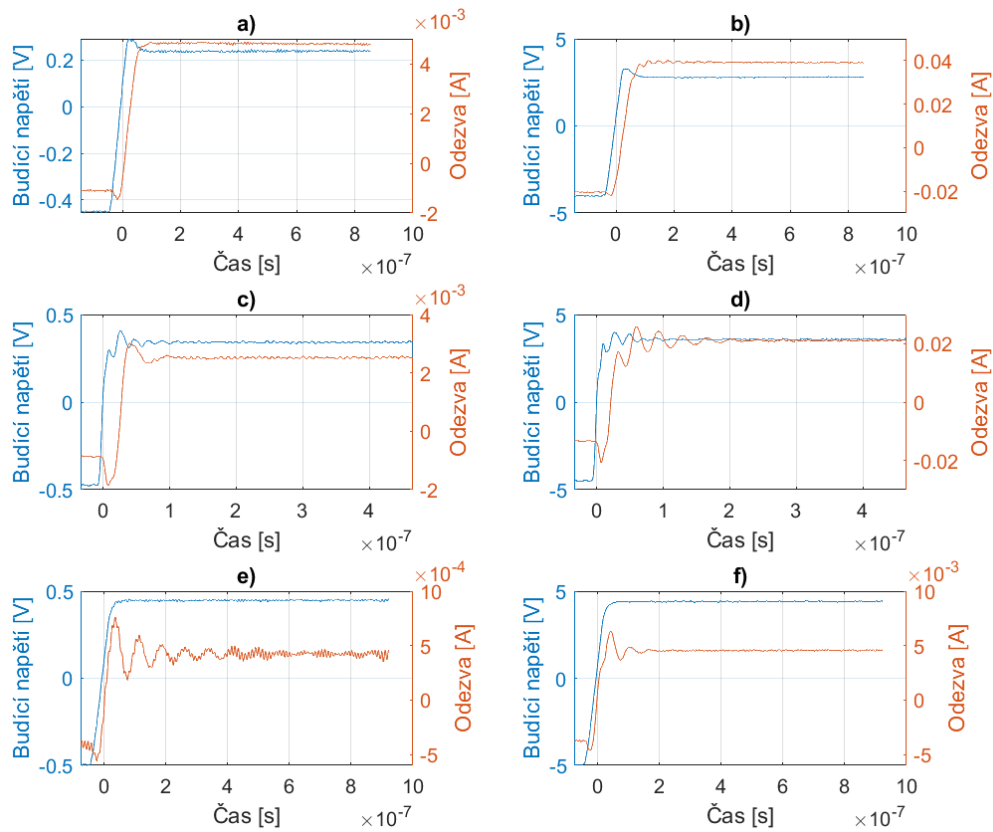
Obrázek 4.27 XY grafy plnotučného mléka s příměsí cukru na frekvenci 300 Hz
 a) 5 % 3 V_{pp} b) 5 % 5 V_{pp} c) 25 % 3 V_{pp} d) 25 % 5 V_{pp} e) 50 % 3 V_{pp}
 f) 50 % 5 V_{pp}

S rostoucí koncentrací cukru se zkreslení budícího obdélníkového signálu v časové oblasti výrazně snižovalo. Od hranice 35 % lze budící signál považovat za nezkreslený a bylo možné zkoumat frekvenční spektrum proudové odezvy. Ke zkreslení docházelo zejména na frekvenci 300 Hz, kdy pokles spektrálních složek neodpovídá vstupnímu spektru a rostoucí koncentrace cukru zkreslení postupně potlačovala. Při nižších budících amplitudách zůstalo zkreslení na 1 kHz minimální. Při 10 kHz se zkreslení neprojevovalo. Stejně jako u destilované vody prostupují do spektra složky aliasingu. Obrázek 4.28 ukazuje srovnání spekter při 300 Hz pro různé koncentrace a úrovně budící amplitudy [29].



Obrázek 4.28 Zkreslení obdélníkového spektra roztoku mléka a cukru pro 300 Hz
 a) 35 % 100 mV_{pp} b) 35 % 20 V_{pp} c) 40 % 100 mV_{pp} d) 40 % 20 V_{pp}
 e) 50 % 100 mV_{pp} f) 50 % 20 V_{pp}

Výsledky odezvy na jednotkový skok ukazují, že s rostoucí koncentrací cukru (a tedy s vyšší impedancí vzorku) se při stejném převodním odporu objevují výrazné tlumené kmity (viz Obr. 4.29) a jejich opakovací kmitočty se snižuje z původních 29 MHz až na 13 MHz pro koncentraci 50 % a převodní odpor 100 Ω . Při zvýšení amplitudy budícího signálu se tlumené kmitání omezí. Při volbě řádově většího převodního odporu se proudová odezva zaobluje a přechází v exponenciální růst [29].

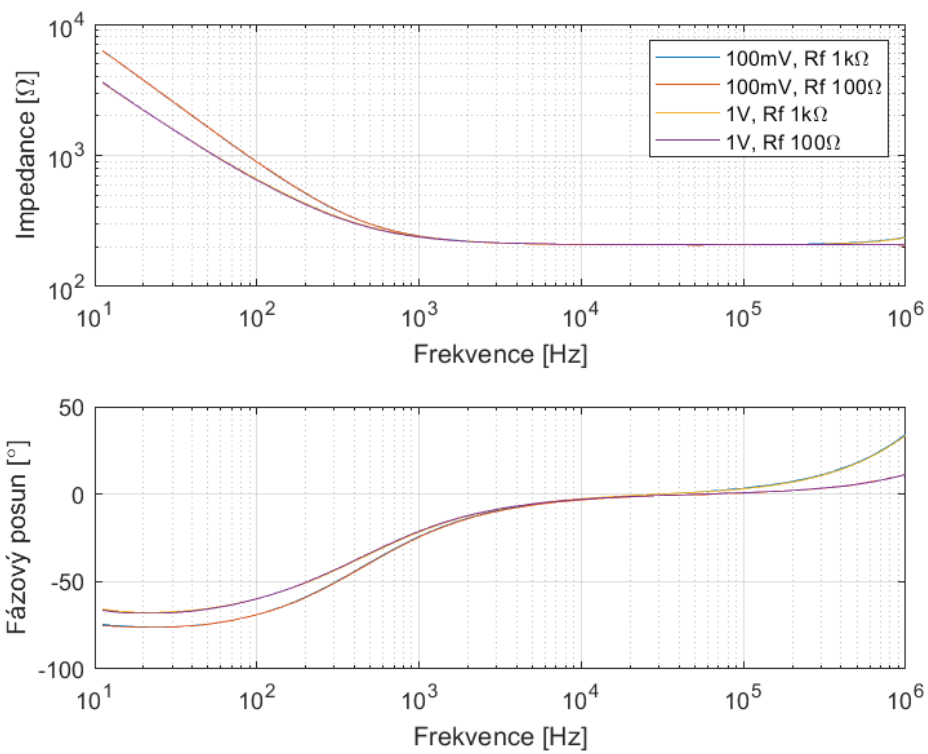


Obrázek 4.29 Proudová odezva na jednotkový skok plnotučného mléka s příměsí cukru pro $R_F = 100 \Omega$ a) $1 V_{pp}$ 10 % b) $10 V_{pp}$ 10 % c) $1 V_{pp}$ 30 % d) $10 V_{pp}$ 30 % e) $1 V_{pp}$ 50 % f) $10 V_{pp}$ 50 %

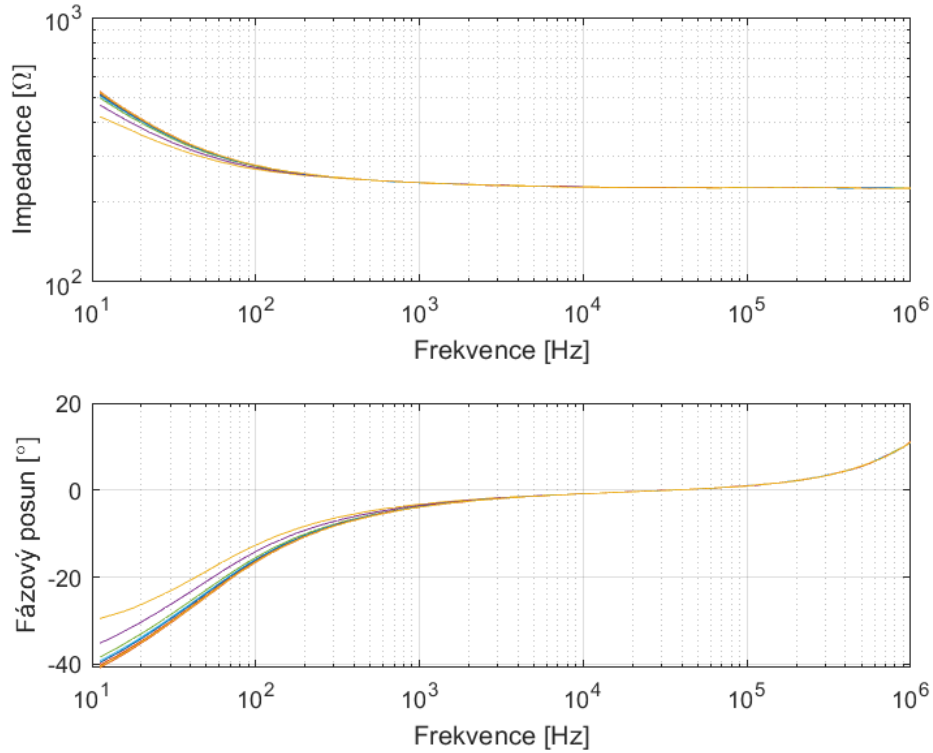
4.2.5 Ocet

Výsledky měření frekvenční charakteristiky ukazují, že ocet je tvarově podobný mléku (viz Obr. 4.30). Jeho impedance do 200 Hz klesá z jednotek $k\Omega$ do hodnoty pohybující se nad hranicí 200 Ω . Ocet je v nelineární části, stejně jako mléko, závislý na velikosti budícího napětí. Jeho fázový posun klesá z 75° při 100 mV_{pp}, respektive 67° pro 1 V_{pp}, nelineárně k nule.

Opakované měření FRA ukázalo, že ocet je v čase stabilní a reprodukovatelnost měření je tedy vysoká (viz Obr. 4.31). Rozptyl impedance je v lineární části v rozmezí 10 Ω a je na čase nezávislý [29].



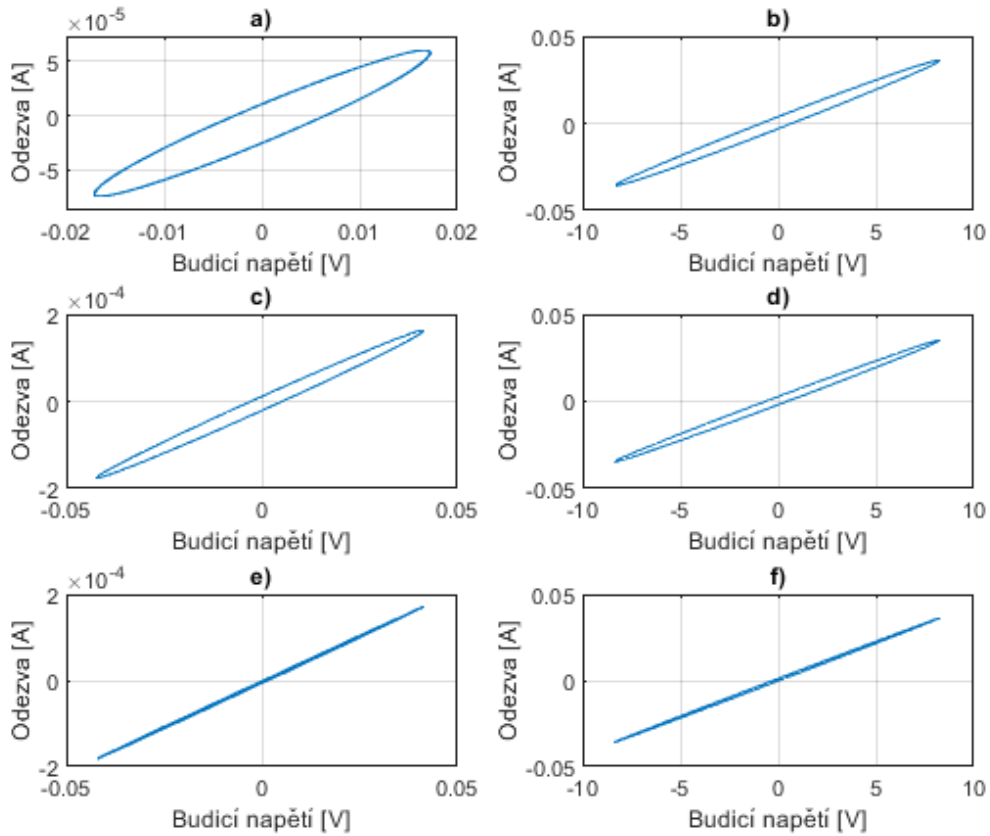
Obrázek 4.30 Impedanční a fázová charakteristika octu bez příměsí



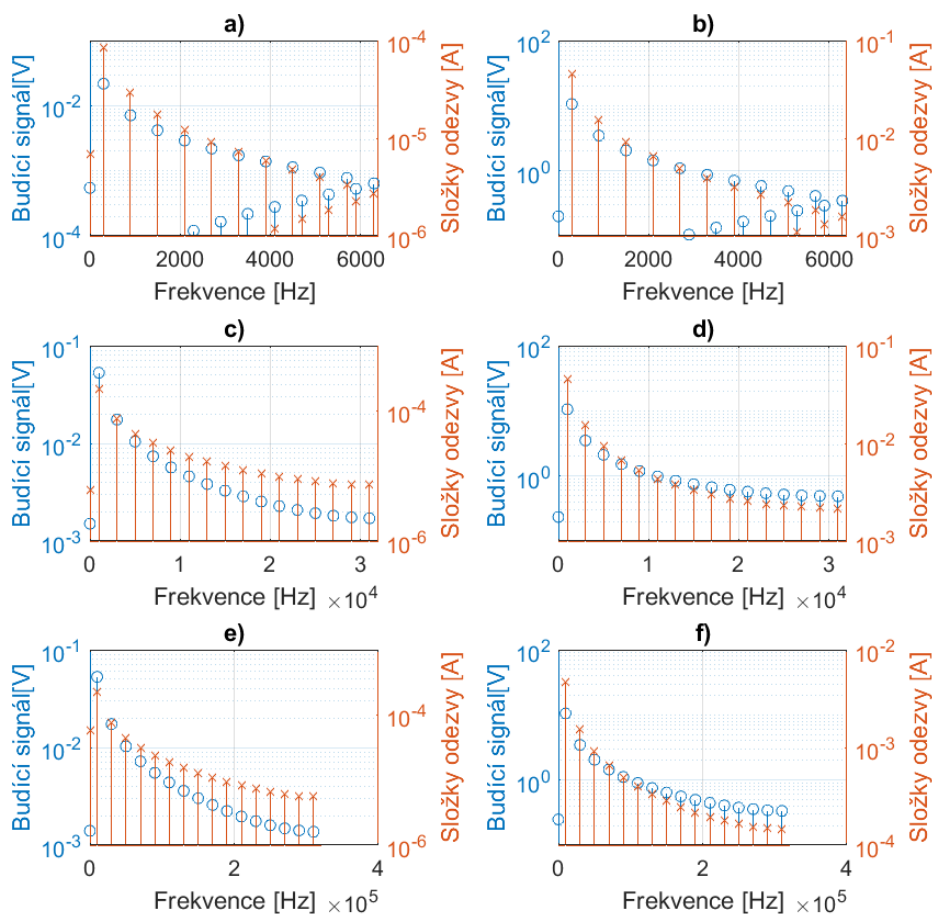
Obrázek 4.31 Opakované měření frekvenční charakteristiky octu pro $1V_{pp}$ a $R_F 100\Omega$

Nelinearita octu se vlivem výrazného fázového posunu na frekvenci 300 Hz určuje obtížně. Nelinearita se na tomhle kmitočtu projevuje velmi málo nebo vůbec. Na vyšších kmitočtech se již ocet chová lineárně. Obrázek 4.32 ukazuje XY charakteristiku pro minimální a maximální měřenou amplitudu na všech třech frekvencích [29].

Zkoumání frekvenčního spektra obdélníkového signálu za žádných podmínek neprokázalo zkreslení proudové odezvy obdélníkového signálu. Pro buzení kmitočtem 300 Hz se u vyšších složek spektra začal projevovat aliasing [31]. Obrázek 4.33 ukazuje spektra pro nejnižší a nejvyšší amplitudy na všech měřených frekvencích.

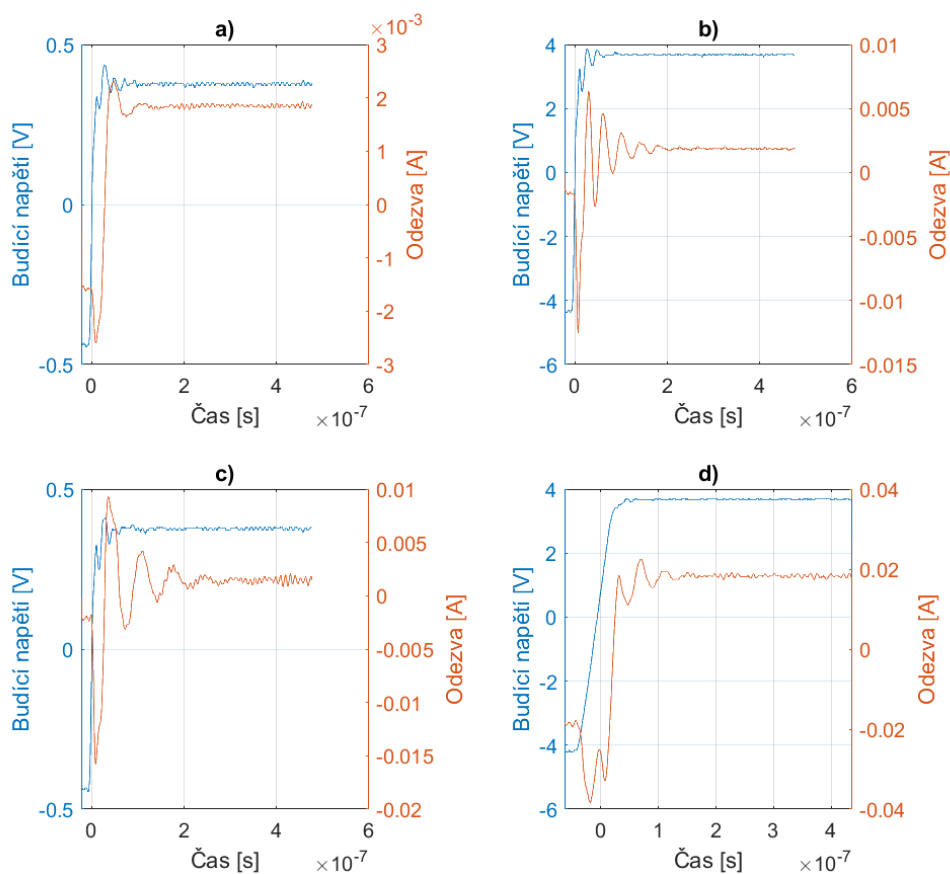


Obrázek 4.32 XY grafy octu a) 100 mV_{pp} , 300 Hz b) 20 V_{pp} , 300 Hz c) 100 mV_{pp} , 1 kHz d) 20 V_{pp} , 1 kHz e) 100 mV_{pp} , 10 kHz; f) 20 V_{pp} , 10 kHz



Obrázek 4.33 Spektrum obdélníkového signálu a proudové odezvy octu a) $100 \text{ mV}_{\text{pp}}$ 300 Hz b) 20 V_{pp} 300 Hz c) $100 \text{ mV}_{\text{pp}}$ 1 kHz d) 20 V_{pp} 1 kHz e) $100 \text{ mV}_{\text{pp}}$ 10 kHz f) 20 V_{pp} 10 kHz

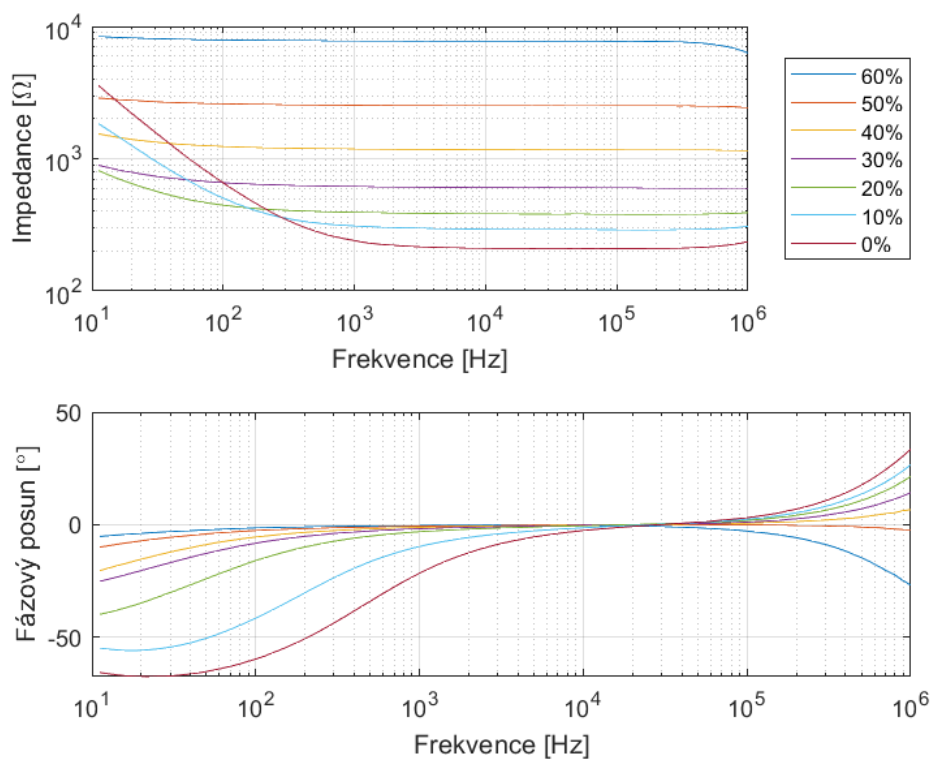
Proudová odezva na jednotkový skok octu bez příměsí závisí na volbě převodního odporu. Pokud je zvolen převodní odpor řádově odpovídající impedanci vzorku, tak při buzení nízkou amplitudou (1 V) takřka nedochází ke vzniku tlumených kmitů. Při vyšší amplitudě jsou již tlumené kmity výrazné a jejich kmitočet se pohybuje kolem 25 MHz . Volbou řádově menšího převodního odporu dochází při náběžné hraně k výraznému překmitu do opačné polarity. Obrázek 4.34 ukazuje výše popsané situace. Proudová odezva při zvolení řádově vyššího odporu má za následek deformaci náběžné hrany odezvy a přechází v exponenciální nárůst [29].



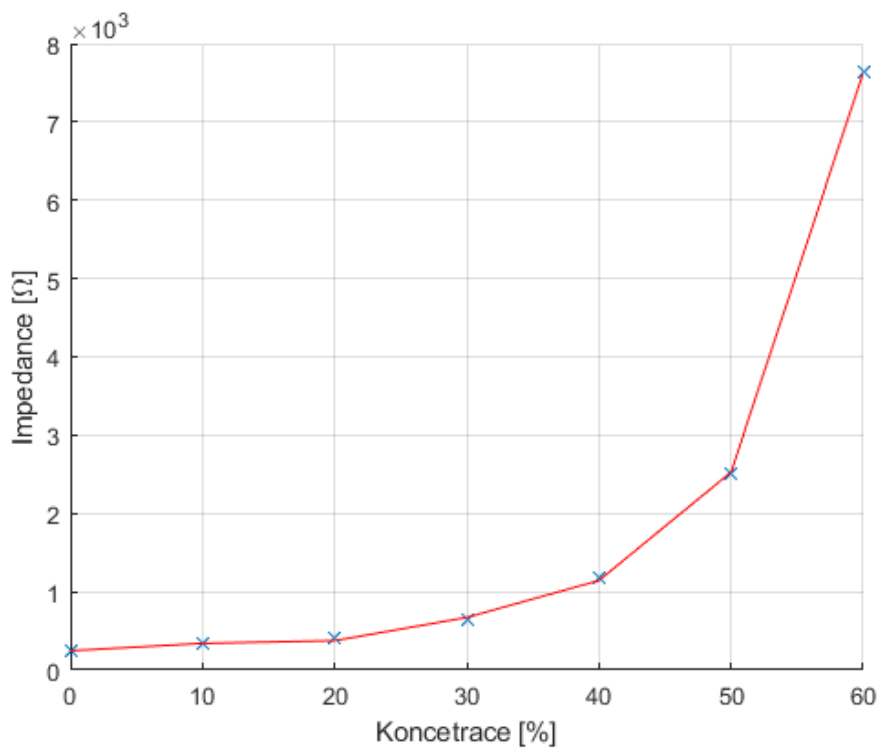
Obrázek 4.34 Proudová odezva octu na jednotkový skok bez příměsí a) $1 V_{pp}$ $R_F = 100 \Omega$ b) $10 V_{pp}$ $R_F = 100 \Omega$ c) $1 V_{pp}$ $R_F = 10 \Omega$ d) $10 V_{pp}$ $R_F = 10 \Omega$

4.2.6 Ocet s příměsí cukru

Ocet byl míchán s cukrem po 10 % až do koncentrace 60 %. Obrázek 4.35 ukazuje srovnání frekvenčních charakteristik všech měřených koncentrací. Lze pozorovat, že s rostoucí koncentrací cukru, se indukční charakter na nižších frekvencích snižuje. Pro koncentraci 30 % je již průběh impedance téměř konstantní. Podobné vlastnosti má i fázový posun, který se snižuje svůj výchozí stav z 65° až k hranici 5° . Při nulové koncentraci se impedance pohybuje pod 250Ω a roste exponenciálně na hodnotu $7,6 k\Omega$ pro koncentraci 60 % (viz Obr. 4.36) [29].

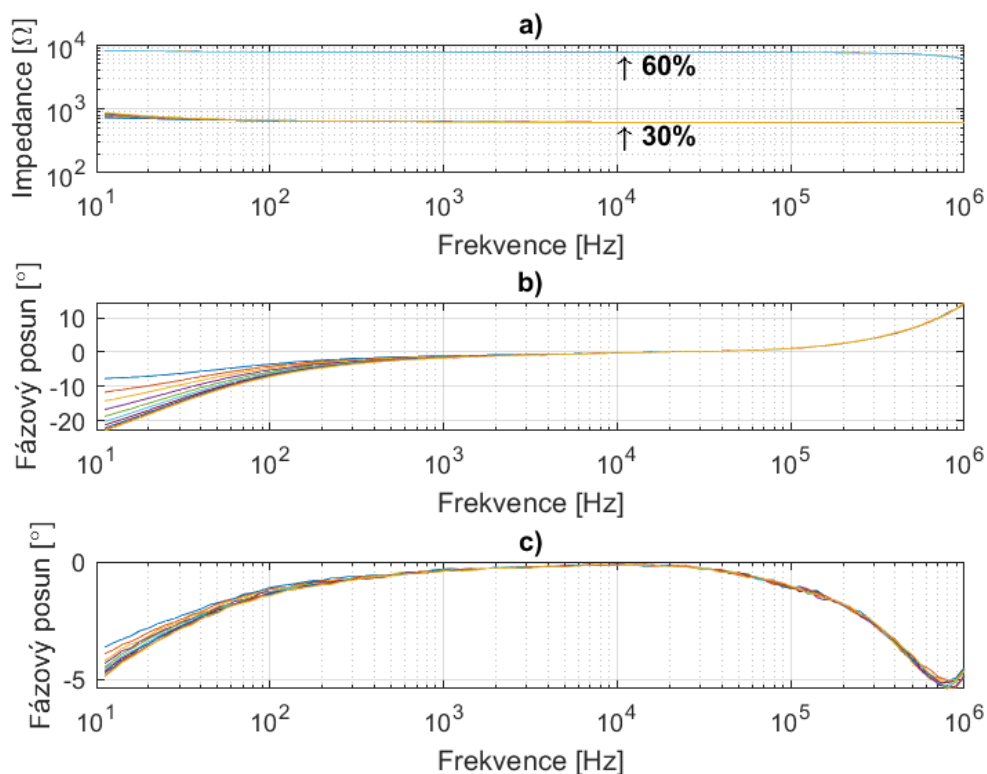


Obrázek 4.35 Srovnání frekvenčních charakteristik roztoků octu s cukrem pro 1 V_{pp} a R_F = 1 kΩ



Obrázek 4.36 Závislost koncentrace na impedanci pro 1 kHz a 1 V_{pp}

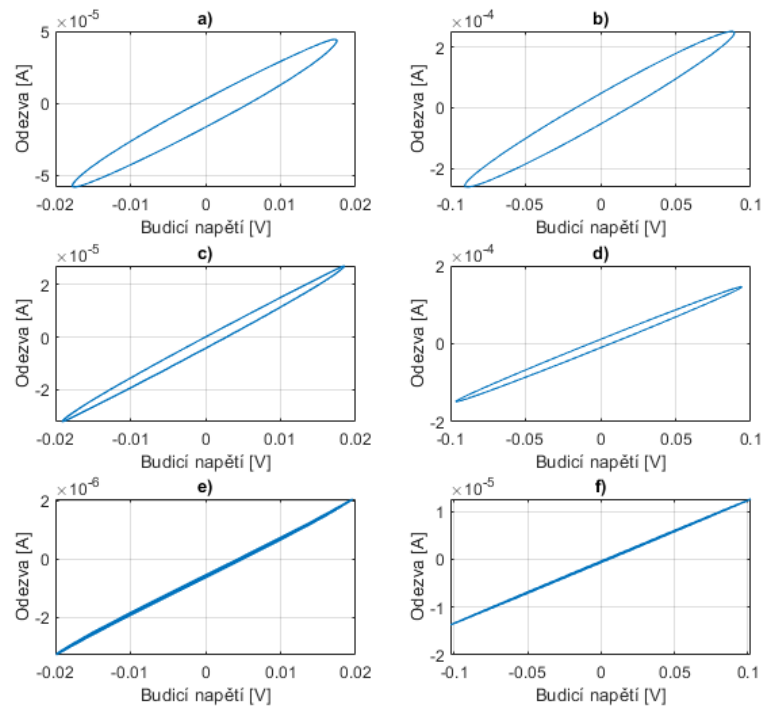
Statistická měření FRA charakteristik byla zkoumána na $1 V_{pp}$ (viz Obr. 4.37). Rozptyl impedancí je v lineární části 20Ω pro koncentraci 30 % a 80Ω pro 60 %, což je s ohledem na jejich celkovou impedanci zanedbatelné a měření lze považovat za vysoce reprodukovatelné [29].



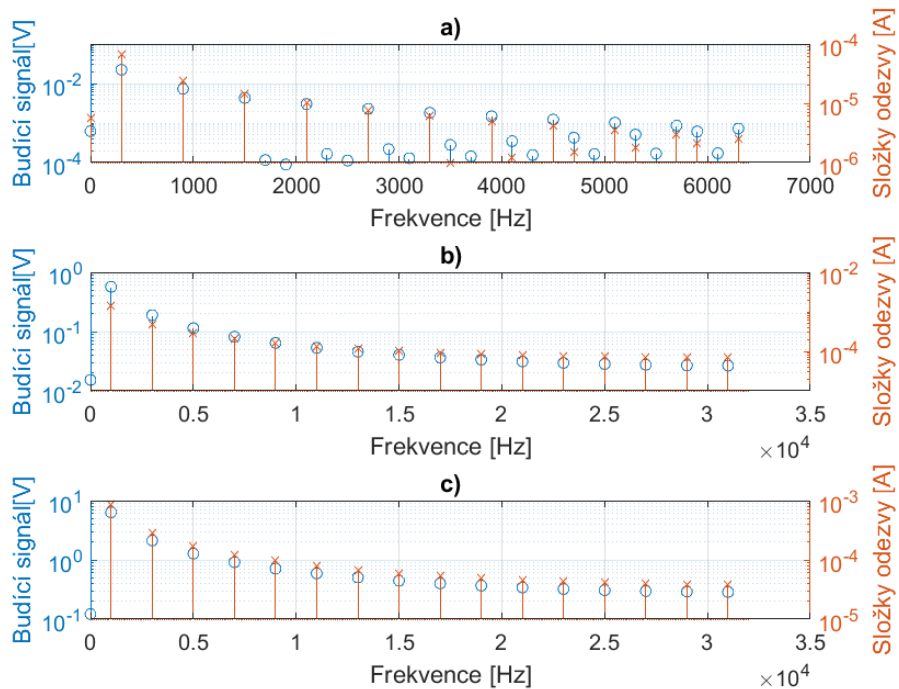
Obrázek 4.37 Opakovaná měření impedančních charakteristik a) a fázových charakteristik octu pro koncentrace b) 30 % c) 60 %

Nelinearita se projevila pouze na kmitočtu 300 Hz a budícím napětí $100 mV_{pp}$ pro všechny měřené koncentrace. Pro 1 kHz a 10 kHz jsou roztoky lineární. Obrázek 4.38 ukazuje srovnání pro dvě nejmenší hodnoty buzení na 300 Hz a tři různé koncentrace. Z obrázku je také patrné zmenšení fázového posunu kdy elipsa, s rostoucí koncentrací, přechází v křivku.

Stejně jako u destilované vody s příměsí cukru nedocházelo k výraznému zkreslení spektra širokospektrálního signálu napříč všemi koncentracemi. Na 300 Hz docházelo k prostupu aliasingu [31] do spektra. Obrázek 4.39 ukazuje spektrum budícího signálu a jeho proudovou odezvu pro různé koncentrace [29].

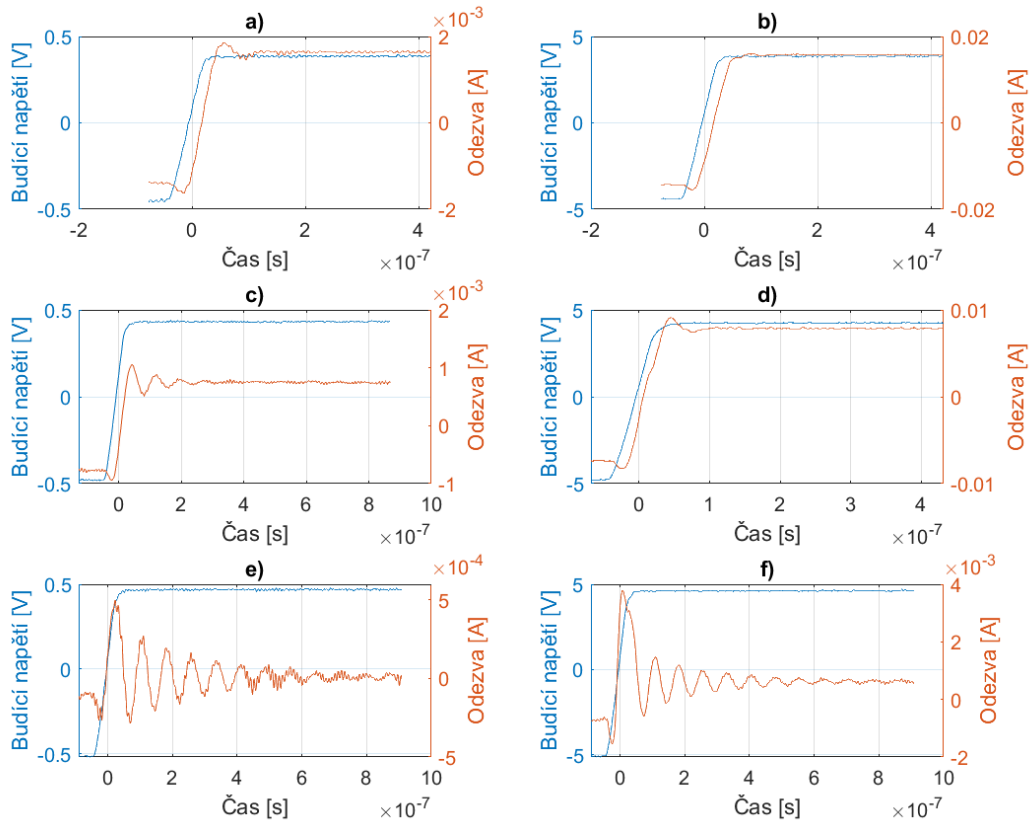


Obrázek 4.38 XY graf octu s příměsí na frekvenci 300 Hz a) 10 % 100 mV_{pp} b) 10 % 500 mV_{pp} c) 30 % 100 mV_{pp} d) 30 % 500 mV_{pp} e) 60 % 100 mV_{pp} f) 60 % 500 mV_{pp}



Obrázek 4.39 Spektrum obdélníkového signálu a proudové odezvy roztoků octu a cukru a) 10 % 300 Hz 100 mV_{pp} b) 30 % 1 kHz 1 V_{pp} c) 60 % 10 kHz 10 V_{pp}

Proudová odezva octu na jednotkový skok se lišila podle zvoleného převodního odporu. Obrázek 4.40 ukazuje rozdíly v odezvě pro různé koncentrace při stejném R_F . Pokud převodní odpor řádově koresponduje s impedancí vzorku, dochází k malému rozkmitu při nízké amplitudě a takřka žádnému při vysoké amplitudě. S rostoucí koncentrací a pro stejný převodní odpor se rozkmit odezvy zvětšuje, avšak jeho frekvence se nemění. Frekvence tlumených kmitů na obrázku 4.40 činí 12,8 MHz [29].

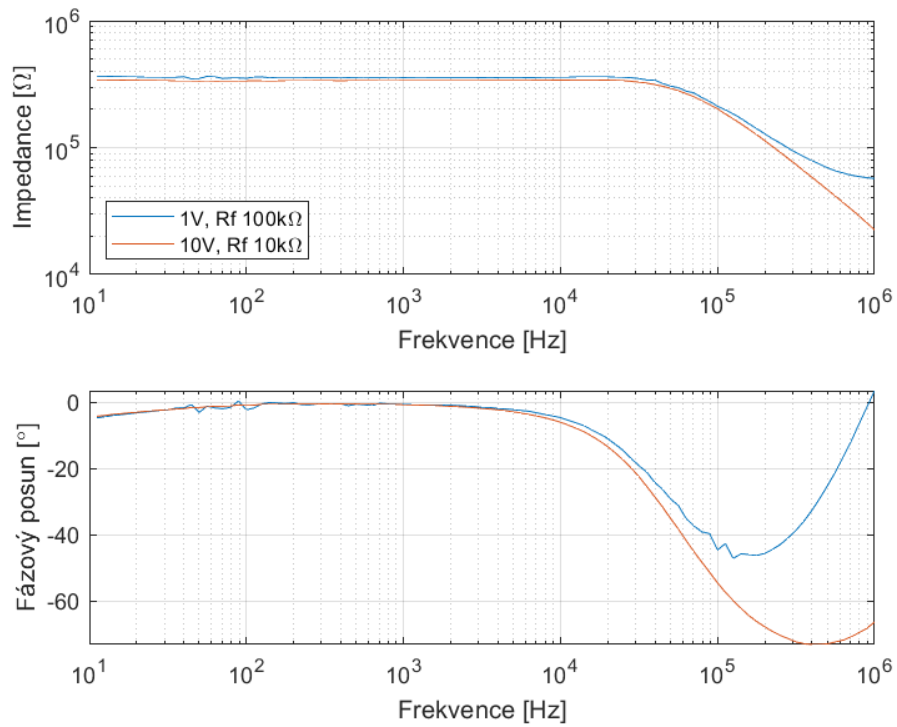


Obrázek 4.40 Proudové odezvy roztoků octu na jednotkový skok pro $R_F = 100 \Omega$
 a) 10 % 1 V_{pp} b) 10 % 10 V_{pp} c) 30 % 1 V_{pp} d) 30 % 10 V_{pp} e) 60 % 1 V_{pp} f) 60 % 10 V_{pp}

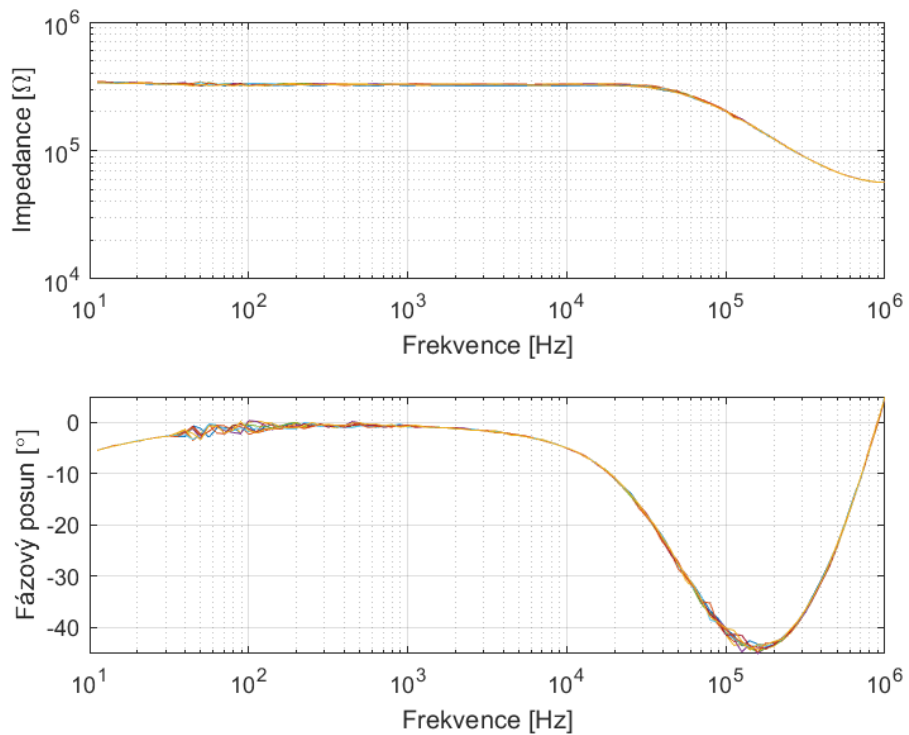
4.2.7 Ethanol

Do ethanolu nebyly míchány žádné příměsi, z důvodu velmi malé rozpustnosti cukru (viz Kapitola 3.1). Na nízkých amplitudách bylo z důvodu vysoké impedance látky velice zašuměná proudová odezva látky, což lze vidět v obrázku 4.41. FRA charakteristika ukazuje, že jeho impedance se pohybuje v lineární části charakteristiky kolem 350 kΩ a od 30 kHz začíná klesat. Zvýšení amplitudy nemá na hodnotu impedance zásadní vliv.

Statistické měření FRA charakteristiky ethanolu bylo provedeno pro budící napětí 1 V_{pp} a ukázalo (viz Obr. 4.42), že látka je v čase stabilní. Rozptyl impedance se v lineární části pohybuje kolem 1 kΩ [29].

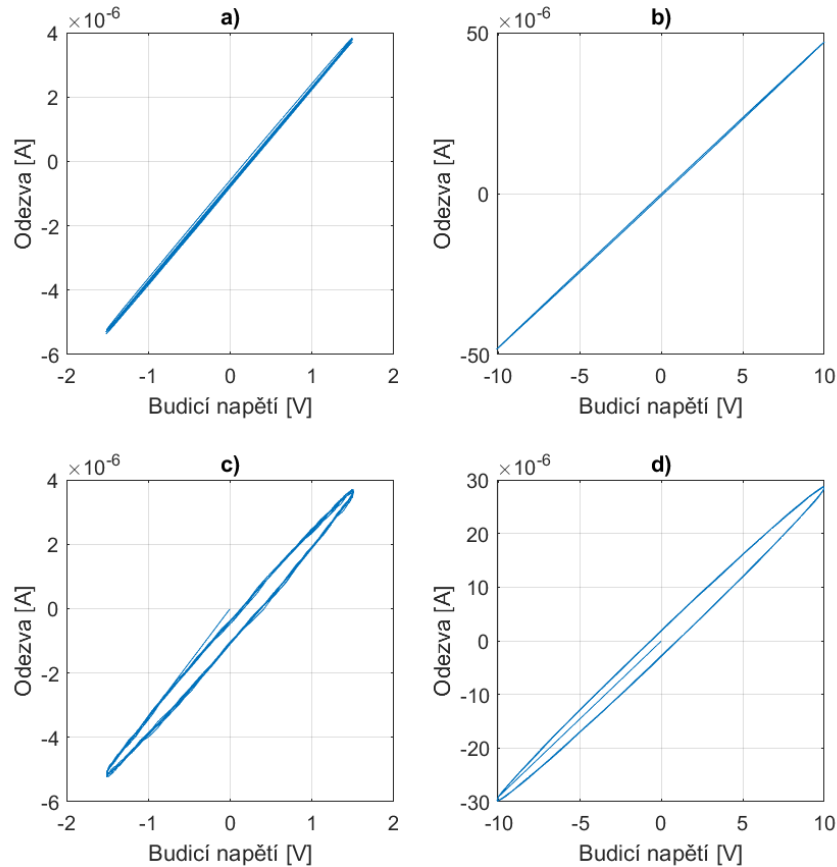


Obrázek 4.41 Impedanční a fázová charakteristika ethanolu



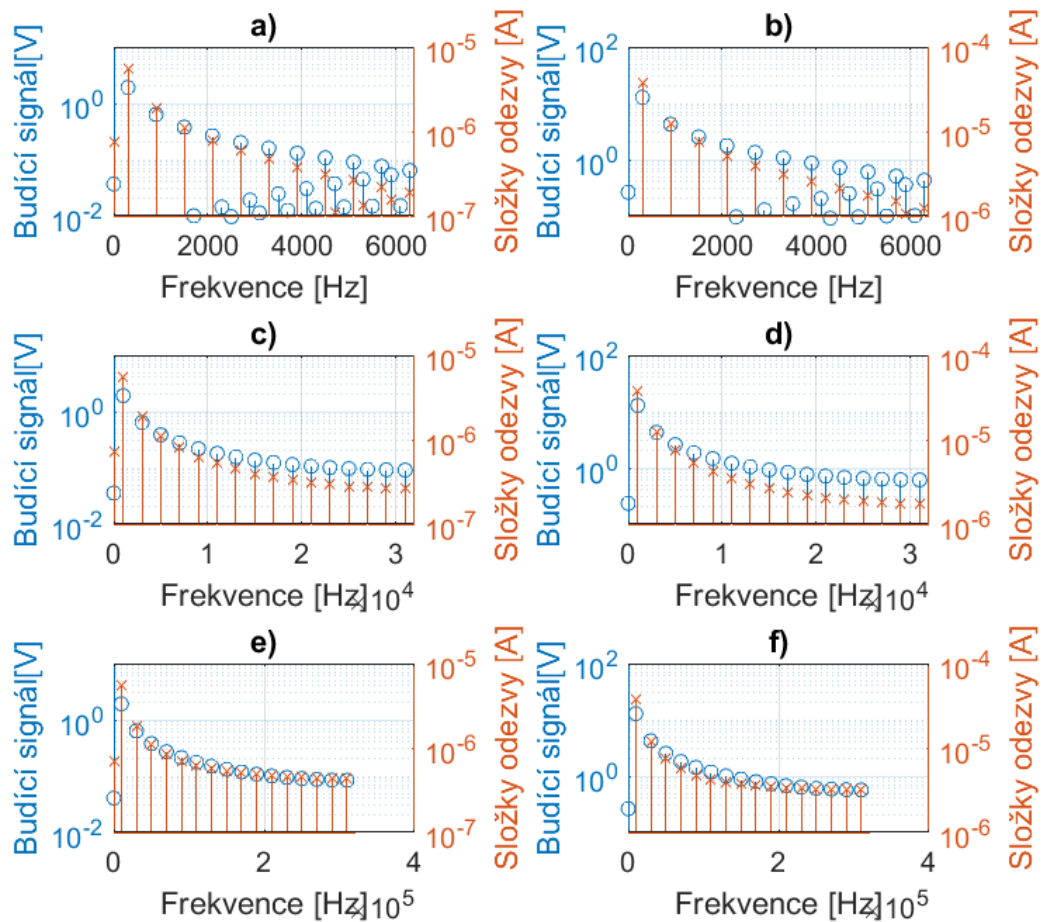
Obrázek 4.42 Opakované měření FRA

U buzení ethanolu nízkou amplitudou (do $3 V_{pp}$) docházelo k problému, že proudová odezva byla výrazně zašuměna. To má za následek, že grafy XY nevytváří elipsu ani přímku, respektive křivku. Obrázek 4.43 porovnává průběhy pro 300 Hz a 10 kHz [29].



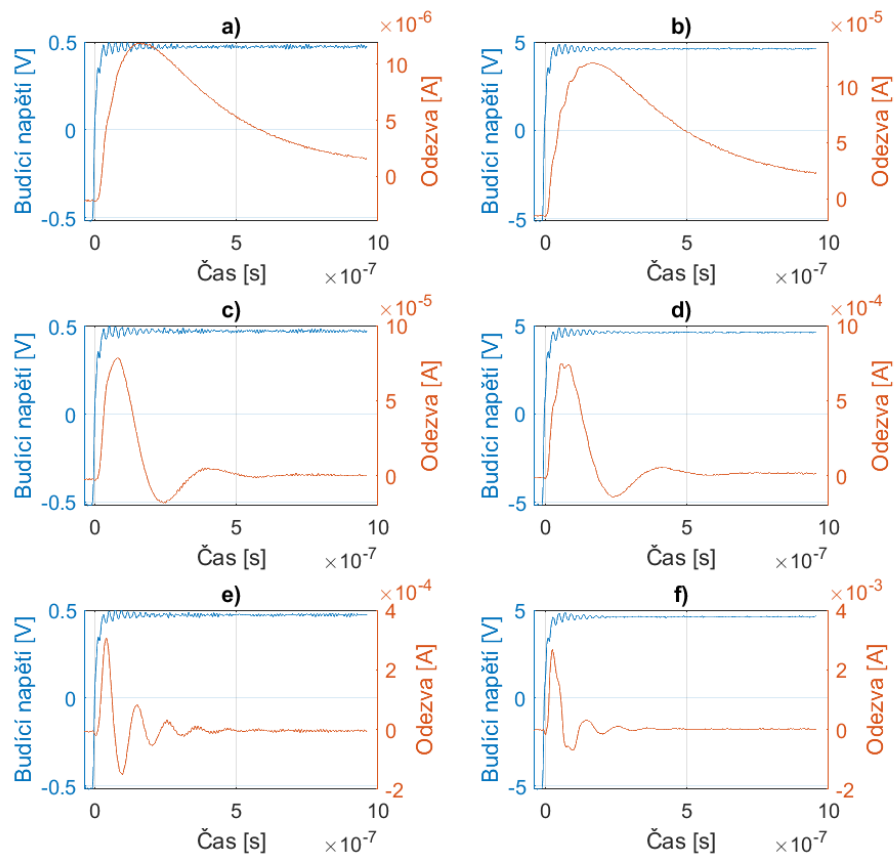
Obrázek 4.43 XY grafy ethanolu pro a) 300 Hz 3 V_{pp} b) 300 HZ 20 V_{pp} c) 10 kHz 3 V_{pp} d) 10 kHz 20V_{pp}

Stejný problém nastal i při buzení obdélníkovým signálem. Kvůli tomu nelze spolehlivě určit zkreslení spektra na nízkých amplitudách (do $3 V_{pp}$). Při vyšších amplitudách došlo ke zkreslení spektra na 10 kHz, kdy od 9. spektrální složky nedocházelo k jejich poklesu. Obrázek 4.44 porovnává frekvenční spektra za různých podmínek [29].



Obrázek 4.44 Frekvenční spektrum a) 300 Hz 100 mV_{pp}, b) 1 kHz 3 V_{pp}
 c) 10 kHz 500 mV_{pp} d) 10 kHz 20 V_{pp}

Proudová odezva ethanolu na jednotkový skok, stejně jako ostatní látky, závisí na volbě převodního odporu. Kdy frekvence tlumených kmitů vzrůstá s klesajícím R_F . Pro převodní odpor 10 k Ω je frekvence kmitů 3 MHz, pro 1 k Ω na 9,2 MHz. Obrázek 4.45 ukazuje proudovou odezvu pro různé převodní odpory a amplitudy. Zvětšení amplitudy nemá výrazný vliv na frekvenci tlumených kmitů [29].



Obrázek 4.45 Proudová odezva na jednotkový skok a) 1 V_{pp} R_F = 100 kΩ b) 10 V_{pp} R_F = 100 kΩ c) 1 V_{pp} R_F = 10 kΩ d) 10 V_{pp} R_F = 10 kΩ e) 1 V_{pp} R_F = 1 kΩ f) 10 V_{pp} R_F = 1 kΩ

ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo analyzovat elektrické vlastnosti kapalin pomocí osciloskopu pro buzení harmonickým a širokospektrálním signálem, včetně statistického zpracování. Výsledky byly následně zpracovány v programovém prostředí MATLAB. Pro zajištění kompatibility mezi osciloskopem a proudovou odezvou vzorku byl navrhnut transimpedační převodník s posilovačem proudu.

Referenční měření ukázalo spolehlivost převodníku do 100 kHz, nad tímto kmitočtem se začala projevovat parazitní kapacita měřící aparatury. Při vhodné volbě převodního odporu převodník nezkrusoval signál v časové ani frekvenční oblasti, pouze se na nízkém kmitočtu objevoval aliasing. Při buzení amplitudou do 1 V docházelo ke stejnosměrnému posuvu, jež nemělo na naměřené výsledky vliv. Vzorky kapalin (destilovaná voda, ethanol, plnotučné mléko, ocet) a jejich cukerné roztoky byly vybrány po konzultaci s vedoucím práce.

Frekvenční analýza ukázala, že voda a ethanol mají velmi podobné impedanční i fázové charakteristiky, stejně jako mléko a ocet. Opakovaná měření potvrdila vynikající reprodukovatelnost výsledků. Přidání cukru do vzorků kapalin mělo výrazný vliv na velikost impedance i fázového posunu. Pro ocet a mléko měla závislost impedance na koncentraci cukru exponenciální průběh, pro destilovanou vodu nejprve impedance klesla na polovinu, od hranice 30 % cukru začíná taktéž růst exponenciálně. Nelinearita byla nejvýraznější u plnotučného mléka a s rostoucí koncentrací cukru se průběh v XY zobrazení linearizoval. U ostatních látek byly projevy nelinearity minimální nebo vůbec žádné. Zkreslení širokospektrálního signálu se prokázalo u plnotučného mléka a ethanolu. Destilovaná voda ani ocet spektrum obdélníkového signálu nezkrusovali. Na proudovou odezvu jednotkového skoku měla největší vliv poměr hodnoty převodního odporu a impedance kapaliny. Odezva destilované vody a ethanolu měla za následek vznik tlumených kmitů jejichž frekvence závisela na volbě převodu. Přidání příměsí nemělo na vlastnosti odezvy výrazný vliv. Proudové odezvy na jednotkový skok plnotučného mléka a octu byly na volbě převodního odporu závislejší. Pokud byl převod řádově vyšší než impedance vzorku, náběžná hrana odezvy přecházela v exponenciální růst. Převod odpovídající impedanci kapaliny nezpůsobil výrazné změny v odezvě a při volbě menší převodního odporu odezva vzorků vytvářela tlumené kmity.

Nejjednodušší způsob, jak od sebe jednotlivé látky bez příměsí odlišit je jejich impedance v lineární části charakteristiky. Hodně se také lišily jednotlivé odezvy na jednotkový skok, kde se jako spolehlivý parametr ukazuje opakovací frekvence tlumených kmitů, která se po přidání příměsí mění jen minimálně.

Pro další zkoumání této metody měření by bylo vhodné analyzovat látky s příměsí, která po rozpuštění do kapaliny uvolní volné ionty a tím zvýší vodivost daného roztoku. Bylo by vhodné zvolit lepší uchycení elektrod, které by při výměně vzorku zajistilo plně konstantní hloubka ponoru i úhel pod kterým jsou elektrody umístěny do kapaliny. Což

korkovou zátkou nelze zcela zajistit. Pro lepší a rychlejší práci s naměřenými daty je žádoucí vytvoření programu, který by dokázal variabilně přejmenovávat jména .csv souborů.

LITERATURA

- [1] TARKOVIČ, M.; BRONCOVÁ, G. a KRONĎÁK, M. Elektroimpedanční spektroskopie a její využití v chemické analýze. Online. *Chemické listy*. 2012, č. 106, s. 1068-1069. Dostupné z: http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2012_11_1067-1074.pdf. [cit. 2024-11-09].
- [2] VRBOVÁ, Eva. *Elektrochemická impedanční spektroskopie jako charakterizační metoda modifikovaných nanostrukturovaných elektrod*. Online, Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav biomedicínského inženýrství, 2015. [cit. 2024-11-07].
- [3] LASIA, Andrzej. The Origin of the Constant Phase Element. Online. *The Journal of Physical Chemistry Letters*. 2022, roč. 13, č. 2, s. 580-589. ISSN 1948-7185. Dostupné z: <https://doi.org/10.1021/acs.jpcelett.1c03782>. [cit. 2024-11-09].
- [4] LAZANAS, Alexandros Ch. a PRODROMIDIS, Mamas I. Electrochemical Impedance Spectroscopy — A Tutorial. Online. *ACS Measurement Science Au*. 2023, roč. 3, č. 3, s. 162-193. ISSN 2694-250X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1021/acsmeasuresciau.2c00070>. [cit. 2024-11-09].
- [5] *Electroscope*. Online. Roč. 2013, č. 4. Dostupné z: <https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/11025/6207/1/r7c4c2.pdf>. [cit. 2024-12-26].
- [6] VYPLEL, Vojtěch. *Extrakce a modelování impedančních charakteristik organických látek*. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2023.
- [7] BARSOUKOV, Evgenij a MACDONALD, J. Ross (ed.). *Impedance Spectroscopy*. Online. 2. Hoboken: Wiley, 2005. ISBN 9780471647492. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/0471716243>. [cit. 2024-11-09].
- [8] SKOOG, Douglas A.; WEST, Donald M.; HOLLER, James F. a CROUCH, Stanley R. *Analytická chemie*. Vydání: první. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2019. ISBN 978-80-7592-043-0.
- [9] Basics of Electrochemical Impedance Spectroscopy. Online. Dostupné z: <https://www.gamry.com/application-notes/EIS/basics-of-electrochemical-impedance-spectroscopy/>. [cit. 2024-11-09].
- [10] BRANČÍK, Lubomír. *Analogové elektronické obvody*. Online. Brno, 2007. [cit. 2024-12-22].
- [11] *LT1364 – Dual and Quad 70MHz, 1000V/μs Op Amps*. Online. In: ANALOG DEVICES. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/13645fa.pdf>. [cit. 2024-11-30].
- [12] *BUF634 250mA High-Speed Buffer*. Online. In: TEXAS INSTRUMENTS. Dostupné z: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/buf634.pdf?ts=1746120031268&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F. [cit. 2025-05-02].

- [13] *Capacitors: Decoupling (Bypass) Capacitors*. Online. In: Sparkfun. Dostupné z: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/capacitors/application-examples>. [cit. 2024-11-30].
- [14] STEINBAUER, Miloslav. *Měření v elektronice*. [online]. Brno, 2010. [cit. 2024-12-22].
- [15] *Oscilokopy - principy činnosti*. Online. 2003. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/teorie-a-praxe/dokumentace/oscilokopy-principy-cinnosti.html>. [cit. 2024-11-10].
- [16] *Fourierova transformace*. Online. 2003. [cit. 2024-12-22]. Dostupné z: <http://apfyz.upol.cz/ucebnice/down/mini/fourtrans.pdf>.
- [17] SVOBODA, Zdeněk. *Matematika 2*. Online. Brno, 2014. [cit. 2024-12-22].
- [18] PAUK, J. *Lissajousovy obrazce*. Online. Dostupné z: <http://fyzsem.fjfi.cvut.cz/2008-2009/Zima08/proc/lissa.pdf>. [cit. 2025-05-27].
- [19] *How to Read Lissajous Curves on Oscilloscopes*. Online. In: Cadence. Dostupné z: <https://resources.pcb.cadence.com/blog/how-to-read-lissajous-curves-on-oscilloscopes>. [cit. 2025-05-27].
- [20] CÍDLOVÁ, Hana a MOKRÁ, Zuzana. *Obecná chemie*. Online. 2018. ISBN 978-80-210-8953-2. Dostupné z: https://is.muni.cz/do/rect/el/estud/pedf/js18/obecna_chemie/web/skripta/Obecn_a-chemie.pdf. [cit. 2025-04-14].
- [21] Vyhláška č. 76/2003 Sb.: Vyhláška, kterou se stanoví požadavky pro přírodní sladidla, med, cukrovinky, kakaový prášek a směsi kakaa s cukrem, čokoládu a čokoládové bonbony. In: . 2003. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2003-76>.
- [22] LIDE, David R. *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. 85. CRC Press, 2004. ISBN 0-8493-0485-7.
- [23] GALVÃO, Alessandro C. a ROBAZZA, Weber S. *Journal of Chemical & Engineering Data*. Online. Roč. 2016, č. 61. ISSN 2997–3002. Dostupné z: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.jced.5b01102>. [cit. 2025-04-14].
- [24] Milk composition and microbiology. Online. Dostupné z: https://www.groupe-esa.com/ladmec/bricks_modules/brick02/co/ZBO_Brick02_2.html. [cit. 2025-05-04].
- [25] KERR, Riley; JERABEK, Jan; SOTNER, Roman a FREEBORN, Todd J. Exploring the Effect of Electrode Material on the Electrical Impedance of Liquid Samples. Online. In: *SoutheastCon 2024*. IEEE, 2024, s. 1099-1105. ISBN 979-8-3503-1710-7. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/SoutheastCon52093.2024.10500108>. [cit. 2024-12-07].
- [26] *SMA Connector Gold Plated SMA Coaxial Connector*. Online. In: Mouser electronics. Dostupné z: https://cz.mouser.com/datasheet/2/743/LPRS_04102019_SMAconnector-1568179.pdf. [cit. 2024-12-17].

- [27] *DSOX1202G Oscilloscope: 70/100/200 MHz, 2 Analog Channels, with a built-in Waveform Generator*. Online. In: KEYSIGHT. Dostupné z: <https://www.keysight.com/us/en/assets/7018-06411/data-sheets/5992-3484.pdf>. [cit. 2024-12-05].
- [28] *RIGOL Data Sheet DG3000 Series Function/Arbitrary Waveform Generator DG3121A, DG3101A, DG3061A*. Online. In: . Dostupné z: https://www.technica-m.ru/upload/support_ext/rigol_dg3000a_datasheet_en.pdf. [cit. 2024-12-22].
- [29] PULPIT, Ondřej. Měření odezev kapalin v časové oblasti osciloskopem. GitHub [online]. 2024. Dostupné z: <https://github.com/Pidekk/M-en-odezev-kapalin-v-asov-oblasti-osciloskopem/tree/main>. [cit. 2024-12-28].
- [30] VÁGNER, Petr. *Vysokofrekvenční technika*. [online]. Brno, 2013. [cit. 2024-12-22]. Dostupné z: Elearning VUT.
- [31] ŠEBESTA, Vladimír; SMĚKAL, Zdeněk. *Signály a soustavy*. [online]. Brno. [cit. 2025-2-6]. Dostupné z: Elearning VUT.
- [32] KOPEČNÝ, Jan a JANUROVÁ, Eva. *Fyzika pro bakaláře*. Online. ISBN 80-248-1200-2. Dostupné z: https://www.studopory.vsb.cz/studijnimaterialy/Fyzikaprobakalare/PDF/1_7_2_tlum.pdf. [cit. 2025-05-31].
- [33] Purdue University. Solubility and Complex-Ion Equilibria [online]. [cit. 2025-06-02]. Dostupné z: <https://chemed.chem.purdue.edu/genchem/topicreview/bp/ch18/soluble.php#top>
- [34] ELLIOTT SOUND PRODUCTS. *Squarewave Testing Of Amplifiers & Filters*. Online. 2015. Dostupné z: <https://sound-au.com/articles/squarewave.htm>. [cit. 2025-05-28].

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
VUT	Vysoké učení technické v Brně
EIS	Elektroimpedační spektroskopie
CPE	Konstantní fázový element
FFT	Rychlá Fourierova Transformace
AČP	Analogově-číslicový převodník
DFT	Diskrétní Fourierova Transformace
DPS	Deska plošných spojů
FRA	Analýza frekvenční odezvy
OZ	Operační zesilovač

Symbole:

R_{CT}	odpor přenosu náboje	(Ω)
C_{DL}	kapacita dvojvrstvy	(F)
R_S	odpor elektrolytu	(Ω)
Z_W	Warburgova impedance	(Ω)
Y_0	kapacitní vlastnost CPE	(Fs^{-n})
ω	úhlová frekvence	(Hz)
j	imaginární jednotka	($-1^{1/2}$)
n	koefficient prostředí elektroda-elektrolyt	(-)
l	délka	(m)
S	plocha	(m^2)
ρ_s	měrný elektrický odpor elektrolytu	(Ωm)
σ_s	měrná elektrická vodivost elektrolytu	(Ωm^{-1})
ε_r	relativní permitivita	(-)
C	kapacita článku	(F)
C_0	kapacita kondenzátoru	(F)
Z_T	transimpedance	(Ω)
U_1	vstupní napětí operačního zesilovače	(V)
U_2	výstupní napětí operačního zesilovače	(V)
I_1	vstupní proud operačního zesilovače	(A)
R_F	zpětnovazební odpor	(Ω)
C_1	blokovací kondenzátor	(F)
C_2	blokovací kondenzátor	(F)
C_3	blokovací kondenzátor	(F)
R_{in}	odporový trimr	(Ω)
R_l	převodní odpor	(Ω)

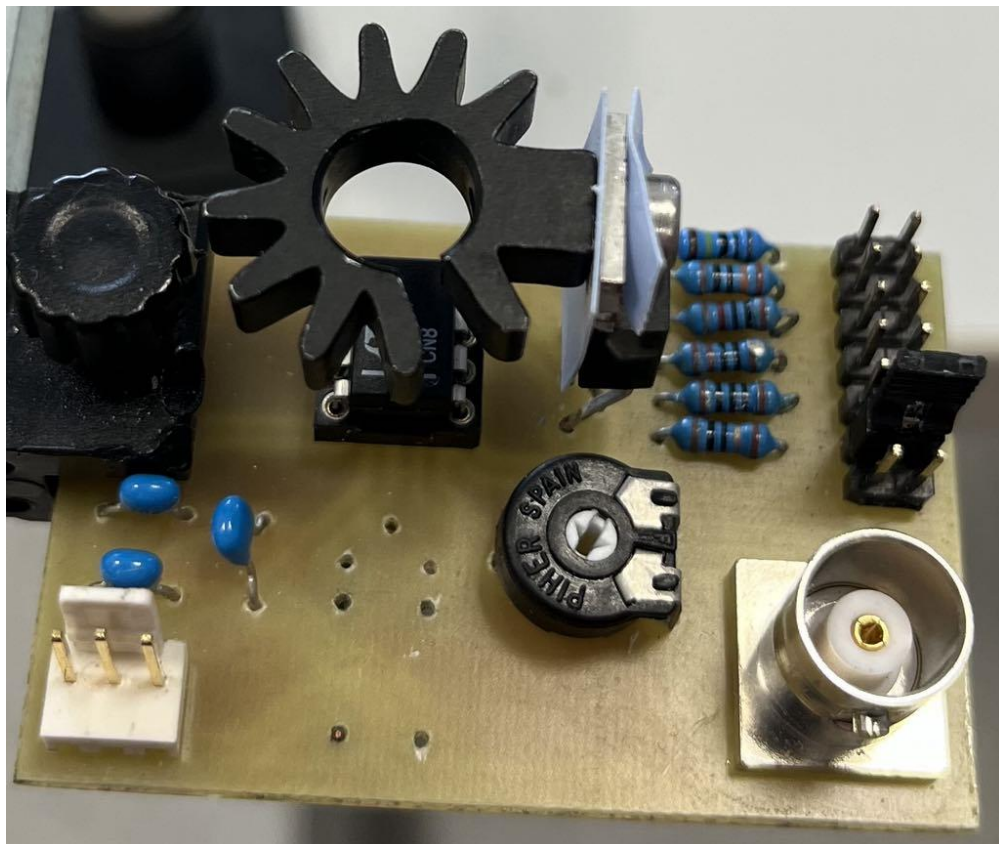
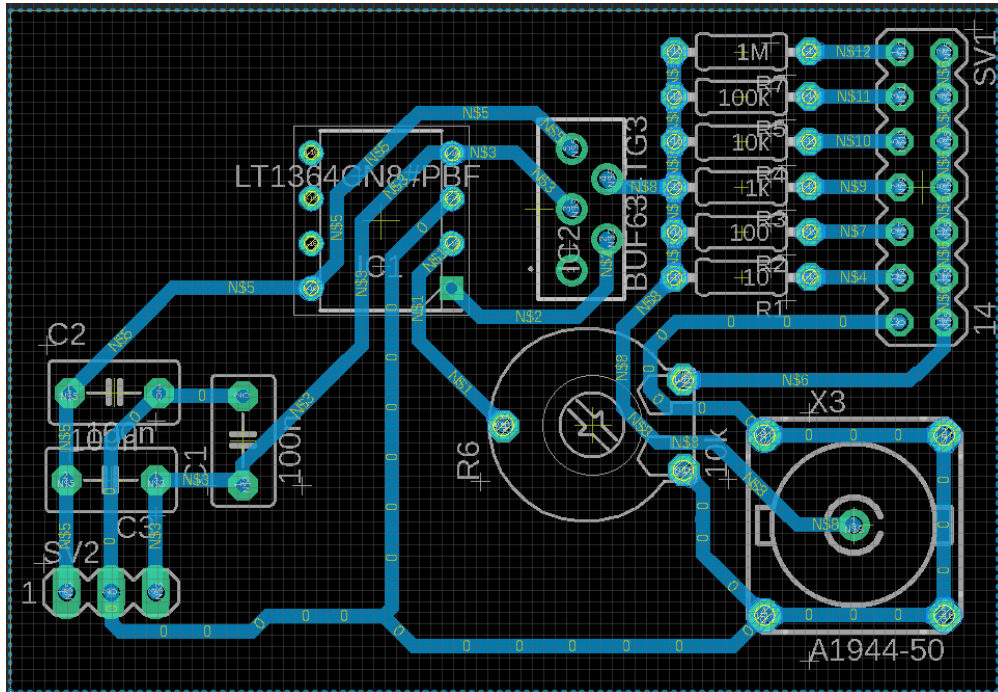
R_2	převodní odpor	(Ω)
R_3	převodní odpor	(Ω)
R_4	převodní odpor	(Ω)
R_5	převodní odpor	(Ω)
R_6	převodní odpor	(Ω)
U_{Y1}	vstupní svorka osciloskopu	(V)
$f(t)$	předpis funkce v časové oblasti	(-)
a_n	lichý koeficient Fourierovy řady	(-)
b_n	sudý koeficient Fourierovy řady	(-)
c_n	koeficient Fourierovy řady v komplexním tvaru	(-)
$F(\omega)$	Fourierův obraz	(-)
T	perioda	(s)
R_{LOAD}	zátěž	(Ω)
G	zisk převodníku	(dB)
m_i	hmotnostní zlomek	(-)
$m_{složka}$	hmotnost příměsi	(g)
m_{celek}	hmotnost všech složek roztoku	(g)
φ_i	objemový zlomek	(-)
$V_{složka}$	objem příměsi	(m ³)
V_{celek}	objem všech složek roztoku	(m ³)
x_i	molární zlomek	(-)
$n_{složka}$	látkové množství příměsi	(mol)
n_{celek}	látkové množství všech složek roztoku	(mol)

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA A - PODKLADY PRO NÁVRH PŘEVODNÍKU.....	64
--	----

Příloha A - Podklady pro návrh převodníku

A.1 DPS



A.2 Seznam použitých součástek

Operační zesilovač	TL1364 CN8
Proudový posilovač	BUF634TG3
Rezistory	$R_1 = 10 \Omega$ $R_2 = 100 \Omega$ $R_3 = 1 \text{ k}\Omega$ $R_4 = 10 \text{ k}\Omega$ $R_5 = 100 \text{ k}\Omega$ $R_6 = 1 \text{ M}\Omega$
Trimr	R_{in} - PT10VK10
Kondenzátor	$C_1 = 100 \text{ nF}$, keramický $C_2 = 100 \text{ nF}$, keramický $C_3 = 100 \text{ nF}$, keramický
Konektor	BNC přímý
Pinová lišta	2x 9pin 2,54 mm
Napájecí konektor	KK254 3pin 2,54 mm
Zkratovací propojka 2,54mm	
Socket pro OZ	