



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

VYHODNOCENÍ OBSAHU TUKU A CUKRU V MLÉCE ELEKTRICKOU IMPEDANČNÍ SPEKTROSKOPIÍ

MILK FAT AND SUGAR CONTENT EVALUATION USING ELECTRICAL IMPEDANCE SPECTROSCOPY

SEMESTRÁLNÍ PRÁCE

SEMESTRAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Marek Smolinský

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Roman Šotner, Ph.D.

BRNO 2024

Semestrální práce

bakalářský studijní program **Elektronika a komunikační technologie**

Ústav radioelektroniky

Student: Marek Smolinský

ID: 246936

Ročník: 3

Akademický rok: 2024/25

NÁZEV TÉMATU:

Vyhodnocení obsahu tuku a cukru v mléce elektrickou impedanční spektroskopií

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

BP(K)C-SEP: Seznamte se s měřením impedance pomocí modulu Analog Discovery 2 a analyzátoru Keysight 4990A. Ověřte měření impedance referenční kapaliny (deionizovaná destilovaná voda) za pomoci hrotových elektrod (pozlacené elektrody ve dvou vzdálenostech – jednotky/desítky mm, platinové elektrody), které musí být neustále ve fixním ponoru. Najděte parametry obvodového modelu měřené impedance pomocí nástroje Nova či dostupného skriptu v Matlabu. Porovnejte výsledky impedančního měření (modul, fáze, $R+jX$) nízkofrekvenčního (0,5%), polofrekvenčního (1,5%) a plnofrekvenčního mléka (3,5%), případně smetany jednoho výrobce (v případě času více výrobců). Zmíněnými metodami najděte parametry modelu každého vzorku a porovnejte je tabulkou včetně chybové funkce vzhledem k měřeným datům.

BP(K)C-BAP: Pokuste se zvýšit koncentraci tuku (např. 10, 25, 50, 75, 90 %) a zjistit vliv na impedanční odezvu měřenou všemi zmíněnými způsoby a příslušné modely. To samé proveďte s cukrem. Zjistěte, které parametry se v modelu zásadně mění a jaké jsou odlišnosti. Výsledky zpracujte graficky i tabulkami.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] SLAY, John; SOTNER, Roman; FREEBORN, Todd J.; JERABEK, Jan; POLAK, Ladislav 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. ISSN 1530-437X.

[2] 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.

Termín zadání: 20.9.2024

Termín odevzdání: 2.1.2025

Vedoucí práce: doc. Ing. Roman Šotner, Ph.D.

doc. Ing. Lucie Hudcová, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor semestrální práce nesmí při vytváření semestrální 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

Na meranie sa použili dva prístroje, Analog Discovery 2 od firmy Digilent a impedančný analyzátor Keysight E4990A. Každý bol použitý na mierne iné merania. Prístrojom Analog Discovery 2 sa meralo od nižších frekvencií a analyzátorom Keysight E4990A sme pozorovali zmenu impedancie mliečnych výrobkov pod jednosmerným napätím.

Pozorovalo sa správanie rôznych koncentrácií tuku a rôznych koncentrácií cukru v mliečnych výrobkoch. Použité mliečne výrobky boli mlieka a smotany s rôznym obsahom tuku a jedno plnotučné mlieko, v ktorom sa menila koncentrácia cukru.

Vypočítali z nameraných charakteristík náhradné impedančné modely, ktoré sa porovnali. Pozorovali sme zmenu hodnôt jednotlivých parametrov modelu pri zmene koncentrácie tuku alebo cukru. Porovnali sa priebehy modelov so skutočnými nameranými priebehmi a porovnanie nameraných charakteristík medzi jednotlivými prístrojmi.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

Impedančná charakteristika mliečnych výrobkov, náhradné modely.

ABSTRACT

Two instruments were used for the measurements: the Analog Discovery 2 by Digilent and the Keysight E4990A impedance analyzer. Each was used for slightly different measurements. The Analog Discovery 2 was used for measurements at lower frequencies, while the Keysight E4990A analyzer was used to observe changes in the impedance of dairy products under DC voltage.

The behavior of various fat concentrations and various sugar concentrations in dairy products was observed. The dairy products used included milk and cream with different fat contents, as well as one whole milk sample in which the sugar concentration was varied.

Equivalent impedance models were calculated from the measured characteristics and compared. We observed changes in the values of individual model parameters with varying fat or sugar concentrations. The model responses were compared to the actual measured responses, as well as a comparison of the measured characteristics between the two instruments.

KEYWORDS

Impedance characteristics of dairy products, alternative models.

SMOLINSKÝ, Marek. *Vyhodnotenie obsahu tuku a cukru v mlieku elektrickou impedančnou spektroskopiou*. Semestrálna práca. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2025. Vedúci práce: doc. Ing. Roman Šotner, Ph.D.

Vyhlásenie autora o pôvodnosti diela

Meno a priezvisko autora: Marek Smolinský
VUT ID autora: 246936
Typ práce: Semestrálna práca
Akademický rok: 2024/25
Téma záverečnej práce: Vyhodnotenie obsahu tuku a cukru v mlieku elektrickou impedančnou spektroskopiou

Vyhlasujem, že svoju záverečnú prácu som vypracoval samostatne pod vedením vedúcej/cého záverečnej práce, s využitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej záverečnej práce ďalej vyhlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto záverečnej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/alebo majetkových a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona Českej republiky č. 121/2000 Sb., o práve autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), v znení neskorších predpisov, vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníka Českej republiky č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora*

*Autor podpisuje iba v tlačenej verzii.

POĎAKOVANIE

Rád by som poďakoval vedúcemu bakalárskej práce pánovi doc. Ing. Romanovi Šotnerovi, Ph.D. za odborné vedenie, konzultácie, trpezlivosť a podnetné návrhy ku práci.

Obsah

| | |
|--|-----------|
| Úvod | 12 |
| 1 Teória | 13 |
| 1.1 Základy impedancia | 13 |
| 1.2 Náhradný model impedancie | 15 |
| 1.3 Merací modul Digilent Analog Discovery 2 | 16 |
| 1.4 Impedančný analyzátor Keysight E4990A | 16 |
| 2 Praktická časť | 18 |
| 2.1 Koncentrácie tuku | 19 |
| 2.1.1 Nízke frekvencie | 19 |
| 2.1.2 Polarizácia jednosmerným napätím | 22 |
| 2.2 Koncentrácie cukru | 24 |
| 2.2.1 Nízke frekvencie | 25 |
| 2.2.2 Polarizácia jednosmerným napätím | 26 |
| 2.3 Náhradné modely impedancie | 26 |
| 2.3.1 Porovnanie priebehov modelov z hodnôt z prístroja Digilent Analog Discovery 2 | 28 |
| 2.3.2 Porovnanie priebehov modelov z hodnôt z prístroja Keysight E4990A | 32 |
| 2.3.3 Modely z výsledkov nameraných prístrojom Digilent Analog Discovery 2 | 36 |
| 2.4 Porovnanie nameraných priebehov | 40 |
| Záver | 43 |
| Zoznam príloh | 45 |
| Literatúra | 46 |

Zoznam obrázkov

| | | |
|------|---|----|
| 1.1 | Impedancia v komplexnej rovine | 14 |
| 1.2 | Digilent - Analog Discovery 2 (prevzaté z [1]) | 16 |
| 1.3 | Impedančný analyzátor Keysight E4990A (prevzaté z [2]) | 17 |
| 2.1 | Použitý a) SMA konektor (prevzaté z [3]), b) RF kábel (prevzaté z [4]), c) SMA redukcia (prevzaté z [5]) | 18 |
| 2.2 | Prídavný modul na meranie impedancie pre Analog Discovery 2 (prevzaté z [1]) | 19 |
| 2.3 | Prostredie Wave Forms | 20 |
| 2.4 | Prostredie Wave Forms: meranie "Impedance" | 20 |
| 2.5 | Bloková schéma zapojenia pre meranie s Analog Discovery 2 | 21 |
| 2.6 | Impedančná charakteristika mlieka - Analog Discovery 2: a) moduly b) fázy | 21 |
| 2.7 | Bloková schéma zapojenia pre meranie s impedančným analyzátorom Keysight E4990A | 22 |
| 2.8 | Impedančná charakteristika mlieka - Keysight E4990A: a) moduly b) fázy | 22 |
| 2.9 | Výsledok elektrolýzy tuku v mlieku | 23 |
| 2.10 | Závislosť impedancie na zmene jednosmerného napätia pre merané vzorky: a) obsah tuku 1,5 %, b) obsah tuku 12 %, c) obsah tuku 40 % | 24 |
| 2.11 | Impedančná charakteristika mlieka (zmena koncentrácie cukru) - Digilent Analog Discovery 2: a) moduly b) fázy | 25 |
| 2.12 | Impedančná charakteristika mlieka (zmena koncentrácie cukru) - Keysight E4990A: a) moduly b) fázy | 26 |
| 2.13 | Náhradné impedančný model odpovedajúci rovnici 2.1 | 27 |
| 2.14 | Náhradné impedančný model odpovedajúci rovnici 2.2 | 27 |
| 2.15 | Náhradné impedančný model odpovedajúci rovnici 2.3 | 28 |
| 2.17 | Impedančné charakteristiky modelov: a) obsah tuku 0,5 %, b) obsah tuku 1,5 %, c) obsah tuku 3,5 %, d) obsah tuku 12 %, e) obsah tuku 30 %, f) obsah tuku 40 %, g) obsah tuku 80 % | 30 |
| 2.19 | Impedančné charakteristiky modelov: a) obsah cukru +0 %, b) obsah cukru +20 %, c) obsah cukru +30 %, d) obsah cukru +40 %, e) obsah cukru +50 % | 32 |
| 2.21 | Impedančné charakteristiky modelov: a) obsah tuku 0,5 %, b) obsah tuku 1,5 %, c) obsah tuku 3,5 %, d) obsah tuku 12 %, e) obsah tuku 30 %, f) obsah tuku 40 %, g) obsah tuku 80 % | 34 |

| | |
|---|----|
| 2.23 Impedančné charakteristiky modelov: a) obsah cukru +0 %, b) obsah cukru +20 %, c) obsah cukru +30 %, d) obsah cukru +40 %, e) obsah cukru +50 % | 36 |
| 2.24 Závislosť zmeny parametrov modelu na: a) koncentrácii tuku, b) koncentrácii cukru | 38 |
| 2.25 Závislosť zmeny parametrov modelu na: a) koncentrácii tuku, b) koncentrácii cukru | 40 |
| 2.28 Porovnanie nameraných charakteristík prístrojov: a) obsah tuku 0,5 %, b) obsah tuku 1,5 %, c) obsah tuku 3,5 %, d) obsah tuku 12 %, e) obsah tuku 30 %, f) obsah tuku 40 %, g) obsah tuku 80 % | 42 |

Zoznam tabuliek

| | | |
|-----|--|----|
| 2.1 | Porovnanie hodnôt súčiastok pre zmenu koncentrácie tuku, Digilent Analog Discovery 2 | 37 |
| 2.2 | Porovnanie hodnôt súčiastok pre zmenu koncentrácie cukru, Digilent Analog Discovery 2 | 37 |
| 2.3 | Porovnanie hodnôt súčiastok pre zmenu koncentrácie tuku, Keysight E4990A | 39 |
| 2.4 | Porovnanie hodnôt súčiastok pre koncentrácie tuku 80 %, Keysight E4990A | 39 |
| 2.5 | Porovnanie hodnôt súčiastok pre zmenu koncentrácie cukru, Keysight E4990A | 39 |

Zoznam výpisov

Úvod

V tejto študentskej práci sa venovalo meraniu impedancie špecifických kvapalín (mlieka) a extrakcii modelov, ktoré indikujú rozdiely dané obsahom prímiesí, tuk a cukor. Merané vzorky mlieka boli vybrané na základe toho aké druhy mlieka sa dajú kúpiť v obchode.

Merala sa závislosť impedancie na frekvencii a jej zmena pri zmene obsahu tuku v meranej kvapaline, mlieku.

Cieľom bolo zistiť ako sa správa impedancia mlieka pri zmene obsiahnutých prímiesí, podobne ako v práci o zisťovaní zmeny impedancie a jej modelu v závislosti na alkohole [6].

1 Teória

1.1 Základy impedancia

Impedancia predstavuje hodnotu odporu, ktorý bráni pretekajúcemu striedavému prúdu. Obrátenou hodnotou impedancie je admitancia:

$$\mathbf{Y} = \frac{1}{\mathbf{Z}}. \quad (1.1)$$

Pokiaľ chceme hodnotu impedancie \mathbf{Z} musíme ju odmerať analyzátorom impedancie. Alebo odmeriame napätie na impedancii a prúd, ktorý ňou preteká a hodnotu impedancie vypočítame pomocou Ohmovho zákona na každej frekvencii, ktorá nás zaujíma:

$$\mathbf{U} = \mathbf{Z} \cdot \mathbf{I}, \quad (1.2)$$

kde napätie \mathbf{U} je vo voltoch [V], a prúd \mathbf{I} je v ampéroch [A] [7, 8, 9].

Impedancia je vektor v komplexnej rovine. Má teda komplexný tvar, reálna a imaginárna časť (prípadne v tvare modulu a uhlu, fáze). Reálna časť impedancie je ideálny, frekvenčne nezávislý odpor a imaginárna časť je pridružená frekvenčne závislá reaktancia, ktorá určuje či ma impedancia induktívny charakter alebo kapacitný charakter [8, 10, 11]:

$$\mathbf{Z} = R + jX, \quad (1.3)$$

$$\mathbf{Z} = R - jX. \quad (1.4)$$

Prípadne v goniometrickom tvare:

$$\mathbf{Z} = |Z| \cdot \exp(j\varphi), \quad (1.5)$$

Pokiaľ by sme mali hodnotu impedancie v tvare (1.3) alebo (1.4) a chceme vedieť modul impedancie a jej fázu tak je to potrebné prepočítať podľa nasledujúcich vzorcov:

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2}, \quad (1.6)$$

$$\phi = \arctan \frac{X}{R}. \quad (1.7)$$

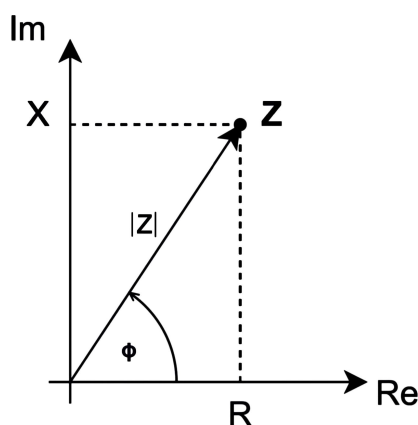
V prípade, že ale máme impedanciu v tvare podľa vzorca (1.5) a chceme vedieť hodnoty reálnej a imaginárnej časti impedancie možno použiť vzorce:

$$R = \cos \varphi \cdot |Z|, \quad (1.8)$$

$$X = \sin \varphi \cdot |Z|. \quad (1.9)$$

Treba si dať pozor pri používaní vzorcov (1.8) a (1.9) aby hodnota φ bola v radiánoch [8, 11, 12].

Vo vzorcoch (1.3) a (1.4), R predstavuje reálnu časť impedancie, teda rezistívnu zložku. Imaginárnu časť impedancie, teda reaktanciu, predstavuje jX . Podľa znamienka pred imaginárnou časťou určujeme, či má reaktancia indukčný charakter alebo kapacitný charakter. Pokiaľ má imaginárna časť znamienko "+" ($+jX$) reaktancia má indukčný charakter. Znamienko "-" ($-jX$) hovorí, že reaktancia má charakter kapacitný [9, 10].



Obr. 1.1: Impedancia v komplexnej rovine

V goniometrickom tvare (1.5), $|Z|$ predstavuje modul impedancie a teda jej veľkosť, veľkosť fázora impedancie. Fáza sa označuje ako φ , je to uhol, ktorý vektor Impedancie Z zvierá v komplexnej rovine s osou X a teda s reálnou časťou R impedancie vo vzorcoch (1.3) a (1.4). Rezistívnu zložku si môžeme predstaviť ako ideálny odpor, ktorý má lineárnu charakteristiku a má rovnakú hodnotu na každej frekvencii. Reaktancia, ktorá má indukčný charakter sa zvykne označovať ako X_L . Induktor, ideálna cievka, má iba indukčnosť L . Reaktancia s kapacitným charakterom sa označuje X_C . Kapacitor, teda ideálny kondenzátor, má iba kapacitu C [9, 10, 12]. Jednotlivé reaktancie môžeme vyjadriť takto:

$$X_L = 2\pi fL, \quad (1.10)$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC}. \quad (1.11)$$

Zo vzorcou (1.10) a (1.11) vidíme, že reaktancia je frekvenčne závislá veličina, to znamená, že jej veľkosť je závislá na frekvencii prúdu prechádzajúcim danou reaktanciou.

Rezistor, ako ideálny odpor, nemá fázový posuv, $\varphi = 0^\circ$. To znamená, že napätie na rezistore je vo fáze s prúdom tečúcim týmto rezistorom. Pokiaľ má impedancia induktívny charakter tak fáza je kladná a teda napätie na impedancii predbieha prúd tečúci impedanciou o φ° . Impedancia s kapacitným charakterom má opačnú fázu ako s indukčným charakterom, teda fáza je záporná a prúd tečúci impedanciou predbieha napätie o φ° [8, 9, 11, 12].

Reálny rezistor má veľa parazitných vlastností, ktoré spôsobujú, že sa správa skôr ako impedancia zmiešaného charakteru (impedančná charakteristika má rezistívny, kapacitný aj induktívny charakter).

1.2 Náhradný model impedancie

Reálna impedancia sa dá zobrazit pomocou ideálnych súčiastok, rezistora, induktora a kapacitora. Toto pomocné zobrazenie sa nazýva náhradný model impedancie. Je to zapojenie ideálnych súčiastok, ktoré sú vhodným spôsobom zapojené. Toto zapojenie nám pomáha lepšie popísať danú impedanciu a správanie sa napätia a prúdu v obvode [11, 12].

Model impedancie vieme spraviť z priebehu frekvenčnej charakteristiky impedancie. Jednoduchšie modely možno modelovať priamo, zložitejšie vyžadujú použitie numerických metód a zložitejšie modely. Často sa na to používajú rôzne programy a skripty, ktoré nám už dané hodnoty ideálnych súčiastok extrahujú z nameraných dát a prípadne rovno nakreslia zapojenie týchto súčiastok v tomto modele [6, 13].

Avšak my vieme aj pohľadom na krivku priebehu určiť predbežne z akých ideálnych elementárnych súčiastok sa daná meraná impedancia skladá a aké bude ich zapojenie (do série, paralelne a kombinácia). Treba si ale krivku "rozobrať" postupne po úsekoch, lebo každá časť krivky predstavuje chovanie definované iným typom prvku. Pre prípadné doladenie na určitých frekvenciách existuje aj prvok konštatnej fázy CPE fraktál [6, 13]. Ideálnu fraktálnu impedanciu kapacitného a induktívneho charakteru môžeme napísať ako:

$$Z_{C\alpha}(s) = \frac{1}{s^\alpha C_a}, \quad (1.12)$$

$$Z_{L\alpha}(s) = s^\alpha L_a, \quad (1.13)$$

kde a je rád impedancie, C_a pseudokapacita, L_a pseudoindukčnosť. Modulová charakteristika je závislá na ráde svojej strmosti, $|Z_{C\alpha}|[dBW] = -\alpha \cdot 20 \log(f) +$

$20\log(1/(2a))$, $|Z_{La}|[dBW] = \alpha \cdot 20\log(f) + 20\log(2a)$ a fázova charakteristika $\varphi_{Ca} = -\alpha \cdot 90^\circ$, $\varphi_{La} = \alpha \cdot 90^\circ$. Hodnota pseudokapacity a pseudoindukčnosti spôsobuje posuv charakteristiky vo zvislom smere. V ideálnom obvode je hodnota fázového posuvu konštantná a je v rozmedzí 0 až $\pm 90^\circ$ [14].

1.3 Merací modul Digilent Analog Discovery 2

Analog Discovery 2 [1] od firmy Digilent vznikol v spojení firmy Analog Devices a Digilent s podporou univerzitného programu "Xilinx University Program". Je to malý prenosný USB osciloskop, logický analyzátor a multi-funkčný prístroj. Umožňuje meranie veličín, vizualizáciu nameraných hodnôt, generovanie signálu a ukladanie nameraných hodnôt [1, 15].

Ovládanie meracieho modulu Analog Discovery 2 je pomocou programu "WaveForms". Má možnosť pripojenia viacerých meracích modulov, ako je impedančný analyzátor "Analog Discovery Impedance Analyzer", BNC adaptér pre pripojenie BNC meracieho kábla s BNC konektorom (sondy osciloskopou), prípadne adaptér "Breadboard" na pripojenie nepájivého poľa a ďalšie prídavné moduly na meranie [1, 15].



Obr. 1.2: Digilent - Analog Discovery 2 (prevzaté z [1])

1.4 Impedančný analyzátor Keysight E4990A

Impedančný analyzátor slúži na meranie veličín ako sú modul impedancie ($|Z|$), fázu impedancie (φ), hodnotu paralelného a sériového kapacitora, induktora a rezistora a ďalšie parametre týkajúce sa meranie impedancie a jej náhradného modelu. Má 4 meracie konektory typu BNC s možnosťou "prerobenia" na 1 konektor po pripojení adaptéru (fixtúry) Keysight 42942A [2] alebo po pripojení impedančnej sondy 42941A [2].

To je spomenutých iba pár parametrov, s ktorými sa mierne pracovalo pri tomto meraní, pre viac informácii o analyzátore Keysight E4990A je potreba pozrieť datasheet [2].



Obr. 1.3: Impedančný analyzátor Keysight E4990A (prevzaté z [2])

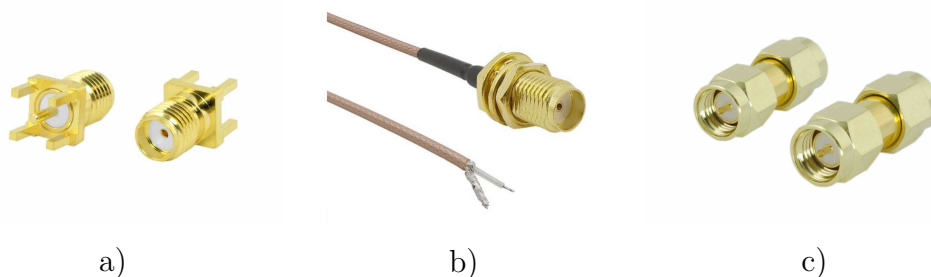
2 Praktická časť

Pre zistenie správania sa impedancie mlieka a smotany, pri rôznom obsahu tuku a cukru v mlieku, bolo treba spraviť frekvenčnú charakteristiku impedancie každého vzorku mlieka a smotany.

Impedančná charakteristika sa merala pomocou dvoch analyzátorov. Prvý bol Analog Discovery 2 od firmy Digilent a druhý bol Keysight 4990A. Namerané impedančné charakteristiky sa potom vložili do skriptu v MATLABe [16], v ktorom sa vytvorili hodnoty súčiastok náhradného modelu impedancie.

Keďže namerané hodnoty impedancie tekutiny sú závislé na objeme tekutiny, rozostupe meracích elektród a ich ponoreniu v tekutine, tak všetky vzorky mali objem tekutiny 15 ml, rozostup medzi meracími elektródami bol 4 mm, priemer meracej elektródy bol 0,5 mm a ponorenie v meranej tekutine bolo 13 mm. Elektródy boli pripájkované ku RF konektoru typu SMA, obr. 2.1a, kvôli ľahšiemu pripojeniu k analyzátorom a zachovaniu vzdialenosti medzi elektródami. Jedna elektróda bola pripevnená na vnútorný guľatý pin (koaxiálny stred) konektora a druhá na vonkajší hranatý pin (opletenie). Pri meraní na Analog Discovery 2 bol použitý aj prepojovací RF kábel s konektorom SMA na oboch stranách, obr. 2.1b (SMA-Z CAB 50R s káblom 0,1m) [4] a SMA redukcia, obr. 2.1c (GOLDEN LOCH SMA - SMA V/V 50R redukcia) [5].

Vzhľadom na to, že vrchnák na meracej nádobe, v ktorej sa merala tekutina, je z hliníku, musel som odizolovať meracie elektródy aj SMA konektor od vrchnáku aby nedochádzalo ku skresleniu výsledkov prípadným kontaktom medzi vrchnákom a meracou sústavou.



Obr. 2.1: Použitý a) SMA konektor (prevzaté z [3]), b) RF kábel (prevzaté z [4]), c) SMA redukcia (prevzaté z [5])

2.1 Koncentrácie tuku

Meralo sa 7 rôznych obsahov tuku v mlieku. Prvá vzorka mala obsah tuku 0,5 %, druhá mala 1,5 % a posledná, tretia, mala obsah tuku 3,5 %. Množstvo tuku bolo vybrané podľa typicky nájdniteľných mliek v obchode, a teda nízkotučné (odstredené) mlieko (0,5 %), polotučné mlieko (1,5 %) a plnotučné mlieko (3,5 %). Množstvo cukru v každej vzorke mlieka bolo rovnaké a to 4,9 %. Každá vzorka bola od výrobcu Kaufland.

Pre vyššie koncentrácie tuku sa merali smotany. Prvá mala obsah tuku 12 %, druhá 33 % a tretia smotana mala obsah tuku 40 %. Tu bol zvolený výrobca Kunín.

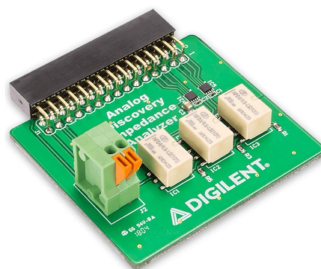
2.1.1 Nízke frekvencie

Prístroj Analog Discovery 2 od firmy Digilent je použitý na meranie frekvenčnej charakteristiky na nižších frekvenciách.

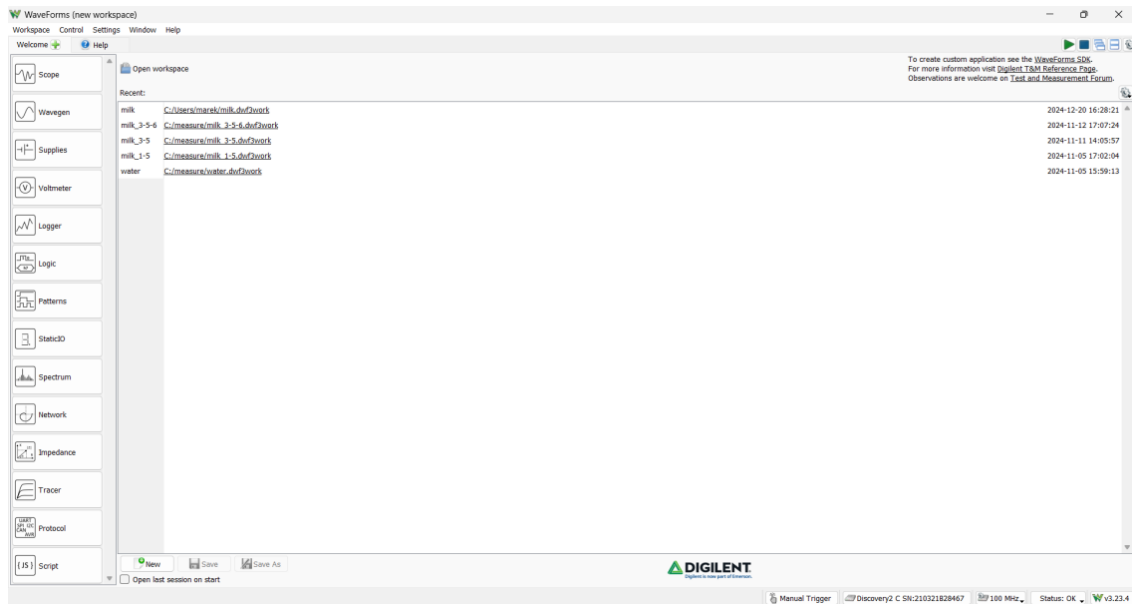
Na meranie sa použil prídavný modul pre meranie impedancie a frekvenčného priebehu impedancie, obr. 2.2. Ten sa pripojil na piny Analogu Discovery 2 určené pre prídavné moduly.

Celý prístroj som pomocou dátovo-napájacieho káblu USB pripojil k počítaču. Potom sa na počítači pomocou nainštalovaného programu "Wave Forms" ovláda Analog Discovery 2, obr. 2.3.

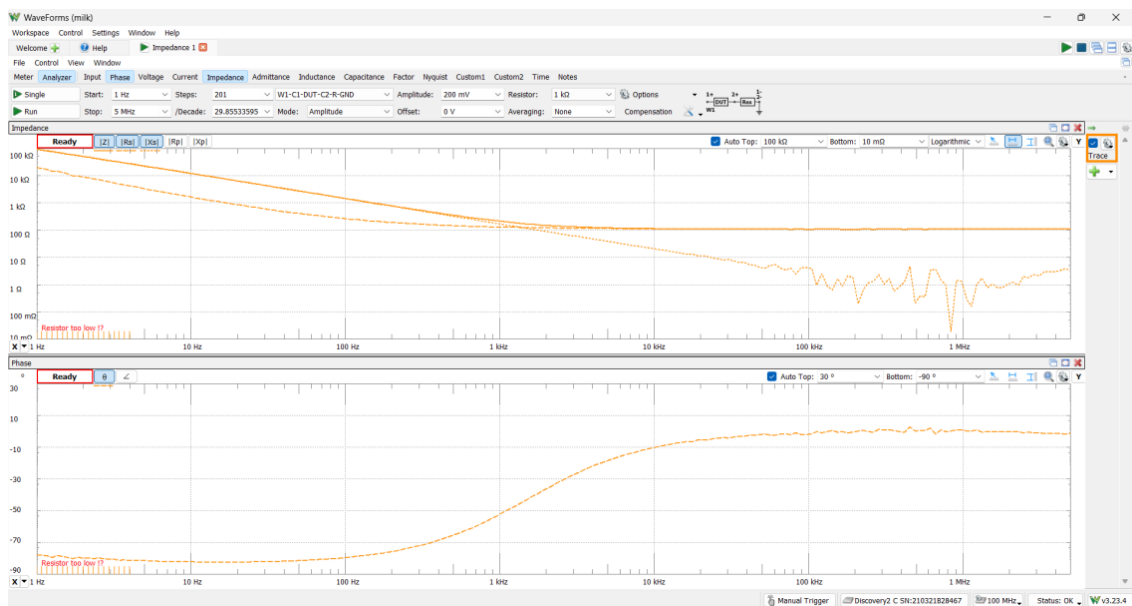
V programe je na výber viacero druhov merania. Na naše meranie sa použilo meranie impedancie s názvom "Impedance", obr. 2.4.



Obr. 2.2: Prídavný modul na meranie impedancie pre Analog Discovery 2 (prevzaté z [1])



Obr. 2.3: Prostredie Wave Forms

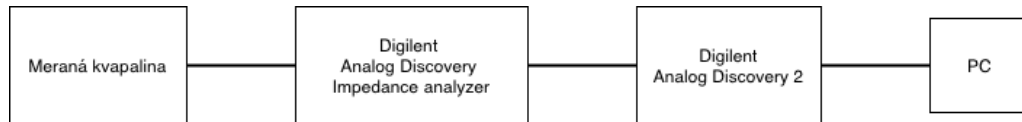


Obr. 2.4: Prostredie Wave Forms: meranie "Impedance"

Po zvolení merania sa zobrazilo okno s prázdnyimi grafmi, nastavovacou lištou a ďalšie nastavovacie okná. V nastavovacej lište som nastavil počiatočnú frekvenciu 1 Hz a koncovú frekvenciu 5 MHz. Počet meraných bodov som nastavil na 201 bodov, úroveň napätia generátoru som nastavil na 200 mV a snímací rezistor $R_{sens} = 1 \text{ k}\Omega$. Všetko ostatné som ponechal v pôvodnom nastavení. Potom sa spravila kompenzácia merania, teda kompenzácia na používanú meraciu sústavu, pre zvolený frekvenčný

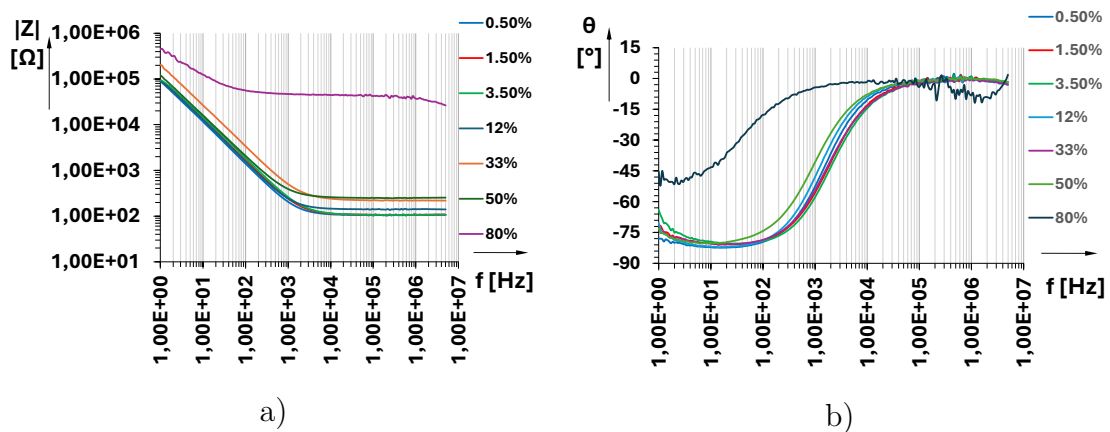
rozsah, počet bodov a nastavené napätie generátora, pre každý snímací rezistor v ponuke R_{sens} (tie sú v hodnotách od 10 Ω až 1 M Ω).

Po nastavení a kompenzácii som pripojil ku prístroju nádobku s meranou kvapalinou. Blokovaná schéma zapojenia je na obrázku 2.5.



Obr. 2.5: Blokovaná schéma zapojenia pre meranie s Analog Discovery 2

Namerané modulové a fázové frekvenčné charakteristiky sú zobrazené na obr. 2.6.



Obr. 2.6: Impedančná charakteristika mlieka - Analog Discovery 2: a) moduly b) fázy

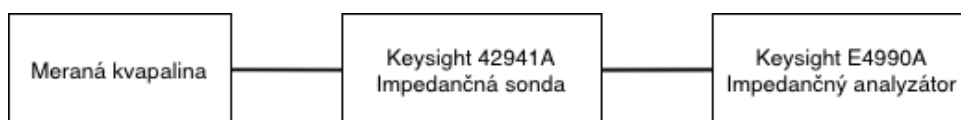
Na začiatku charakteristiky modulu impedancie, obr. 2.6a, pri frekvencii 1 Hz vidím, že každá vzorka mlieka má podobne veľký modul impedancie. Postupne avšak modul $|Z|$ s rastúcou frekvenciou začína klesať s poklesom okolo 11 k Ω /dek. Hodnota modulu impedancie sa ustáli až pri frekvenciách nad 100 kHz, kedy sa už prejavuje iba jednosmerný odpor. Je vidieť, že s rastúcou koncentráciou tuku postupne narastá veľkosť tohoto jednosmerného odporu. Jediná koncentrácia, ktorej model sa tvarovo nepodobá je koncentrácia tuku 80%.

Na obr. 2.6b je vidieť, že každá vzorka má inú fázu impedancie pri nízkych frekvenciách. Najväčší rozdiel vo fáze je pre koncentráciu tuku 80 %. Zvyšné fazy koncentrácií sa striedajú a teda nevieme jednoznačne určiť rozdiely v priebehoch, avšak všetky majú podobný tvar.

2.1.2 Polarizácia jednosmerným napätím

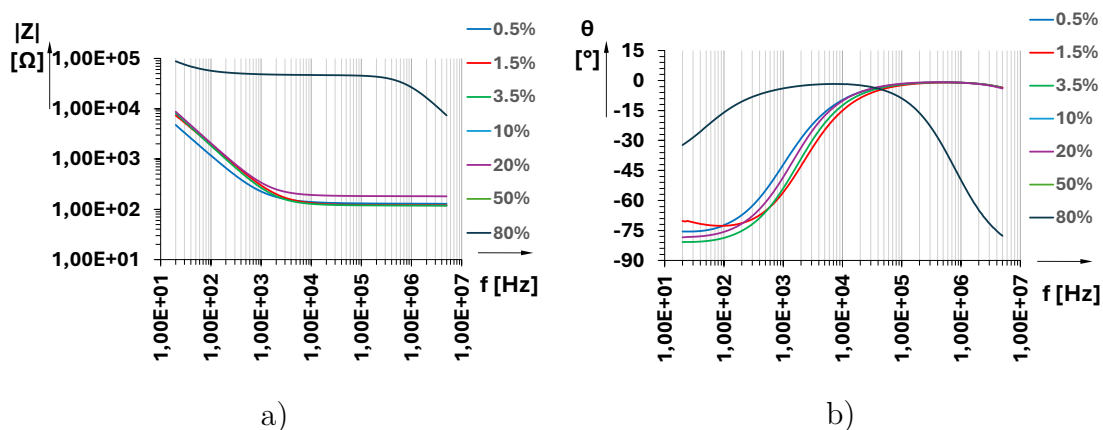
Impedančný analyzátor Keysight E4990A neumožňuje meranie na takých nízkych frekvenciách ako Analog Discovery 2 od Digilentu. Umožňuje ale polarizáciu meranej kvapaliny jednosmerným napätím. Vo frekvenčnom rozsahu 20 Hz až 5 MHz sa postupne zvyšovalo jednosmerné napätie polarizujúce meranú kvapalinu od 0V až do 5V, jedno meranie na každú zmenu polarizujúceho napätia. Budiace striedavé napätie ostalo rovnaké ako pri predošlom meraní, 200 mV.

Na vstup a výstup analyzátoru je pripojená impedančná sonda Keysight 42941A. Merané priebehy modulu impedancie a fázy je možno vidieť na displeji analyzátoru, avšak pre lepšiu čitateľnosť je obrazovka zrkadlená na externý monitor. Pred meraním sa urobila kalibrácia analyzátoru ku meranému SMA konektoru (viď. obrázok 2.1). Bloková schéma zapojenia pre meranie s analyzátorom je na obrázku 2.7.



Obr. 2.7: Bloková schéma zapojenia pre meranie s impedančným analyzátorom Keysight E4990A

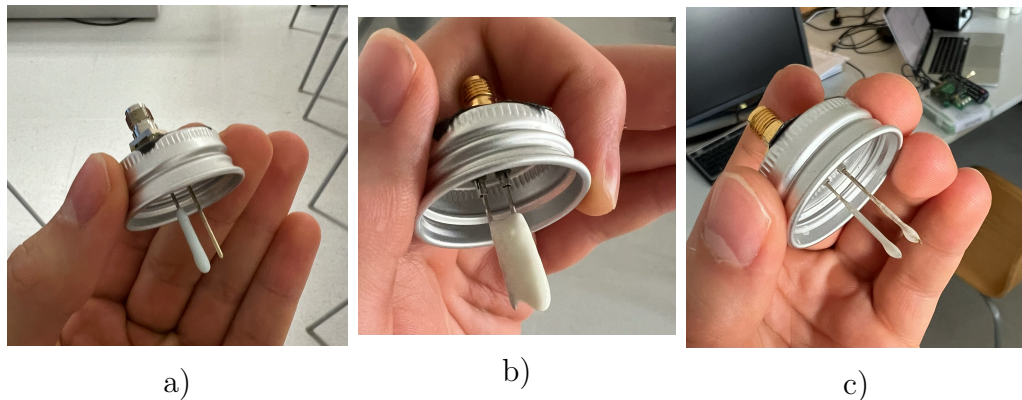
Namerané frekvenčné priebehy impedancie odmerané impedančným analyzátorom Keysight E4990A každého vzorku mlieka sú vidieť v grafoch obrázku 2.8.



Obr. 2.8: Impedančná charakteristika mlieka - Keysight E4990A: a) moduly b) fázy

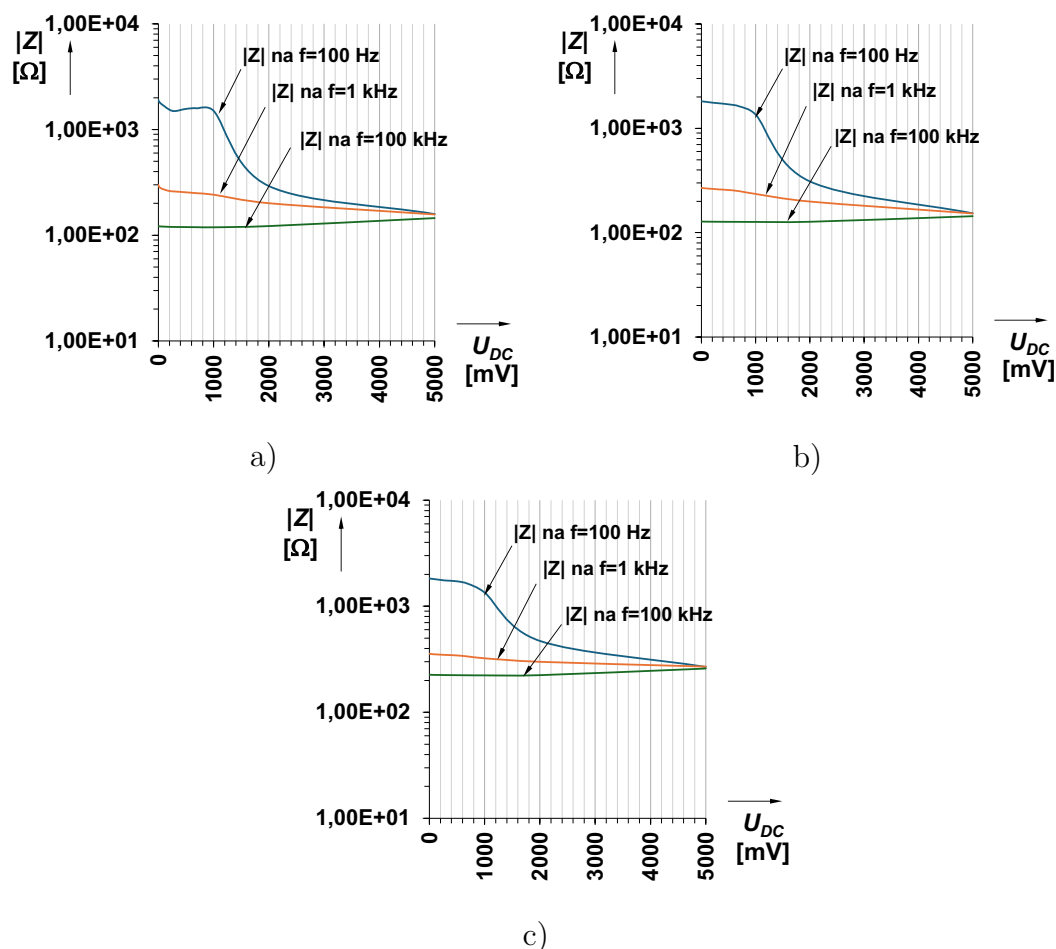
Pri postupnom zvyšovaní jednosmerného napätia od 0 V do 5 V je vidieť väčšiu zmenu chovania impedancie mlieka až pri hodnote napätia nad 500 mV, do tejto hodnoty napätia je impedancia relatívne lineárna. Pri tejto hodnote sa priebeh impedancie začal rýchlejšie meniť. Začal zanikať počiatočný pokles, vplyv kapacitnej zložky postupne zanikal. Pri napätí 1 V mala impedancia už takmer čisto rezistívny

charakter. Po skončení merania som otvoril nádobku s meraným mliekom a na kladnej elektróde bolo vidieť vytvorenie bieleho povlaku (viď. obrázok 2.9). Tento povlak sa zväčšoval s pribúdajúcou koncentráciou tuku, čím viac tuku tým bol povlak širší, pri smotane s koncentráciou tuku 40 % povlak spojil obe meracie elektródy, kladnú so zápornou, (viď. obrázok 2.9b). Po odstránení povlaku bolo vidieť jasné zoxidovanie meracej elektródy, bola potrebná výmena meracej elektródy pred meraním ďalšieho vzorku.



Obr. 2.9: Výsledok elektrolýzy tuku v mlieku

Závislosť zmeny impedancie na zväčšovaní jednosmerného napätia je ukázaná na obr. 2.10. Zobrazené sú závislosti na vybraných frekvenciách, a to 100 Hz, 1 kHz a 100 kHz. Z týchto závislostí je vidieť, že hodnota modulu impedancie mlieka pri každom meraní vzorku postupne s narastajúcim jednosmerným polarizačným napätím U_{DC} klesá hlavne na nižších frekvenciách. Pri vyšších frekvenciách tento pokles nie je až taký veľký a pri frekvencii 100 kHz sa dokonca už takmer nemení.



Obr. 2.10: Závislosť impedancie na zmene jednosmerného napätia pre merané vzorky: a) obsah tuku 1,5 %, b) obsah tuku 12 %, c) obsah tuku 40 %

2.2 Koncentrácie cukru

Na zmenu koncentrácie cukru v mlieku som použil mlieko s koncentráciou tuku 3,2 % a pôvodnou koncentráciou cukru 4,7 %.

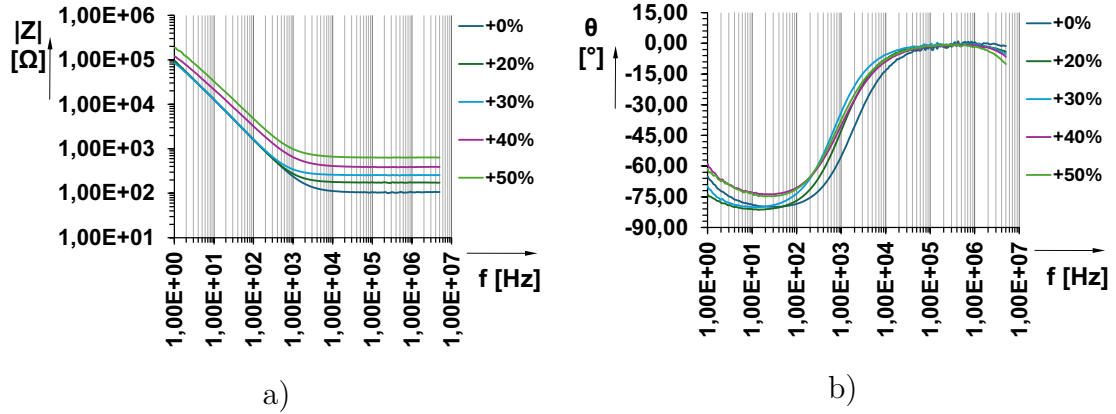
Koncentrácia cukru sa zvyšovala pridávaním bieleho cukru do pužitého mlieka. Zistilo som, že 10 gramov cukru má objem 6 ml. Pokiaľ potrebujeme zvýšiť koncentráciu cukru o 20 %, bolo treba pridať do 100 ml 20 gramov cukru, avšak do 100 ml mlieka už so zvýšenou koncentráciou cukru. Takže pri každej meranej vzorke sme museli vypočítať o koľko menej mlieka treba použiť.

Merané koncentrácie boli +0 % (pôvodné mlieko bez pridaného cukru), +20 % (88 ml mlieka, 20 gramov pridaného cukru), +30 % (82 ml mlieka, 30 gramov pridaného cukru), +40 % (76 ml mlieka, 40 gramov pridaného cukru), +50 % (70 ml mlieka, 50 gramov pridaného cukru). Väčšiu koncentráciu sa už nedala dosiahnuť, cukor sa v mlieku už nechcel rozpustiť.

2.2.1 Nízke frekvencie

Postup merania bol rovnaký ako pri meraní v kapitole 2.1 Koncentrácia tuku, podkapitola 2.1.1 Nízke frekvencie.

Namerané hodnoty



Obr. 2.11: Impedančná charakteristika mlieka (zmena koncentrácie cukru) - Digilent Analog Discovery 2: a) moduly b) fázy

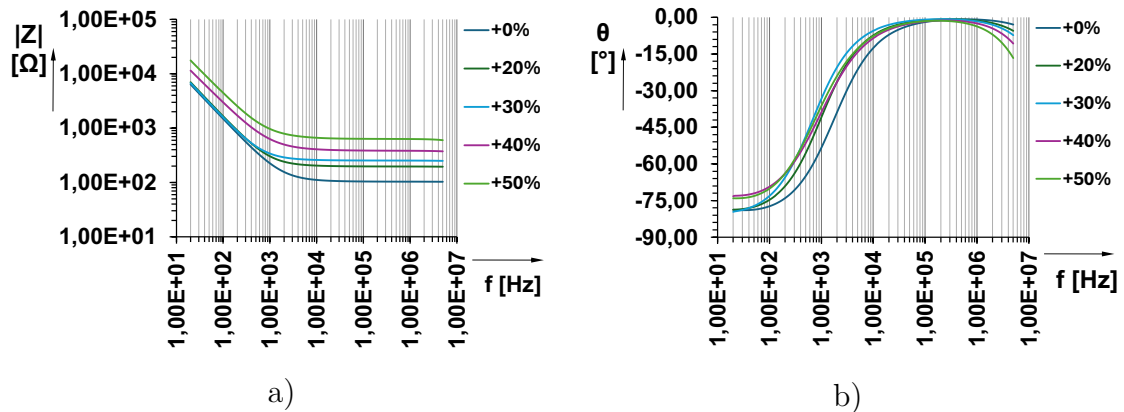
Zväčšenie koncentrácie cukru v mlieku spôsobilo nárast modulu impedancie, viď obr. 2.11a. Zo začiatku máme pokles modulu impedancie so sklonom okolo $10 \text{ k}\Omega/\text{dek}$. Modul sa ustávy na konštantnej úrovni na frekvencii okolo 10 kHz.

Z fáze impedancie nie je až tak zrejmalá zmena koncentrácie cukru, ale je tam vidieť mierny frekvenčný posuv smerom na nižšie frekvencie v strednej oblasti meraných frekvencií, obr. 2.11b.

2.2.2 Polarizácia jednosmerným napätím

Postup merania bol rovnaký ako pri meraní v kapitole 2.1 Koncentrácia tuku, podkapitola 2.1.2 Polarizácia jednosmerným napätím.

Namerané hodnoty



Obr. 2.12: Impedančná charakteristika mlieka (zmena koncentrácie cukru) - Keysight E4990A: a) moduly b) fázy

Priebehy modulu a fázy sú tvarovo veľmi podobné tým priebehom z podkapitoly vyššie, podkapitola 2.2.1. Zväčšenie koncentrácie cukru spôsobilo zväčšenie modulu, obr. 2.12a, a frekvenčný posuv fázy na nižšie frekvencie, obr. 2.12b.

2.3 Náhradné modely impedancie

Pre výpočet hodnôt náhradného modelu sa použil skript v MATLABe. Pre optimalizáciu sa menila hodnota parametru N , krajné hodnoty l_b a l_u , v ktorých má hľadať a kritériálna funkcia Z , v MATLABe označená ako J . Pre všetky náhradné modely boli použité tri kritériálne funkcie. Prvá má tvar 2.1 a bola použitá pre vzorky s koncentráciou tuku 0,5 % (Digilent Analog Discovery 2), 1,5 % (Digilent Analog Discovery 2), 3,5 % (Digilent Analog Discovery 2) a s koncentráciou cukru +0 % (Digilent Analog Discovery 2), +20 % (Digilent Analog Discovery 2), +30 % (Digilent Analog Discovery 2), +40 % (Digilent Analog Discovery 2), +50 % (Digilent Analog Discovery 2):

$$Z = R_s + \frac{1}{\frac{1}{R_{p1}} + C_1 \cdot (2 \cdot \pi \cdot f \cdot j)^{(\alpha_1)}} + \frac{1}{\frac{1}{R_{p2}} + C_2 \cdot (2 \cdot \pi \cdot f \cdot j)^{(\alpha_2)}}. \quad (2.1)$$

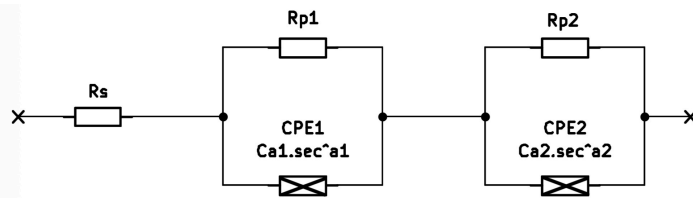
Druhá má tvar 2.2 a bola použitá pre vzorky s koncentráciou tuku 12 % (Digilent Analog Discovery 2), 30 % (Digilent Analog Discovery 2), 40 % (Digilent Analog Discovery 2), 80 % (Digilent Analog Discovery 2), 0,5 % (Keysight E4990A), 1,5 % (Keysight E4990A), 3,5 % (Keysight E4990A), 12 % (Keysight E4990A), 30 % (Keysight E4990A), 40 % (Keysight E4990A) a s koncentráciou cukru +0 % (Keysight E4990A), +20 % (Keysight E4990A), +30 % (Keysight E4990A), +40 % (Keysight E4990A), +50 % (Keysight E4990A):

$$Z = R_s + \frac{1}{\frac{1}{R_{p1}} + C_1 \cdot (2 \cdot \pi \cdot f \cdot j)^{(\alpha_1)}} + \frac{1}{\frac{1}{R_{p2}} + C_2 \cdot (2 \cdot \pi \cdot f \cdot j)^{(\alpha_2)}} + \frac{1}{\frac{1}{R_{p3}} + C_3 \cdot (2 \cdot \pi \cdot f \cdot j)^{(\alpha_3)}} \cdot \quad (2.2)$$

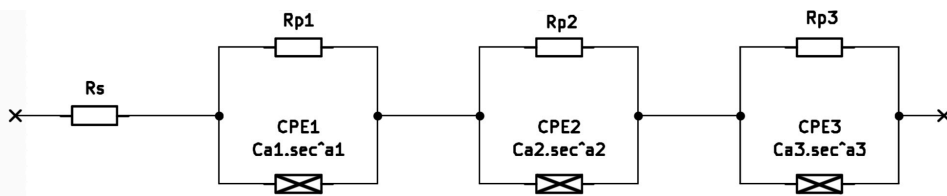
Pre koncentráciu 80 % (Keysight E4990A) bola použitá kriteriálna funkcia v tvare 2.3:

$$Z = R_s + \frac{1}{\frac{1}{R_{p1}} + \frac{1}{R_{p3}} + C_1 \cdot (2 \cdot \pi \cdot f \cdot j)^{(\alpha_1)}} + \frac{1}{\frac{1}{R_{p2}} + \frac{1}{R_{p4}} + C_2 \cdot (2 \cdot \pi \cdot f \cdot j)^{(\alpha_2)}} \cdot \quad (2.3)$$

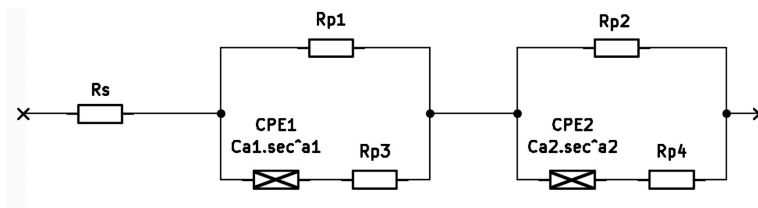
Týmto kriteriálnym funkciám odpovedajú jednotlivé zapojenia náhradných modelov. Pre prvú kriteriálnu funkciu, 2.1, platí zapojenie na obrázku 2.13, pre druhú platí zapojenie na obrázku 2.14 a pre tretiu platí zapojenie na obrázku 2.15.



Obr. 2.13: Náhradné impedančný model odpovedajúci rovnici 2.1



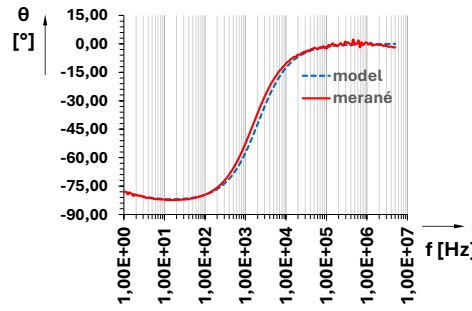
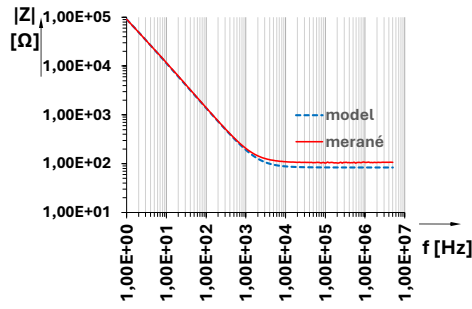
Obr. 2.14: Náhradné impedančný model odpovedajúci rovnici 2.2



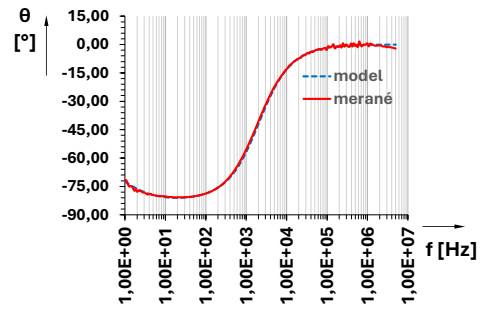
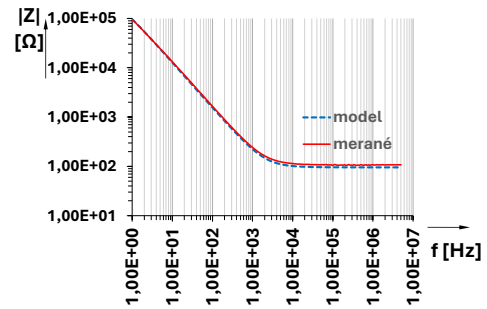
Obr. 2.15: Náhradné impedančný model odpovedajúci rovnici 2.3

2.3.1 Porovnanie priebehov modelov z hodnôt z prístroja Digi-lent Analog Discovery 2

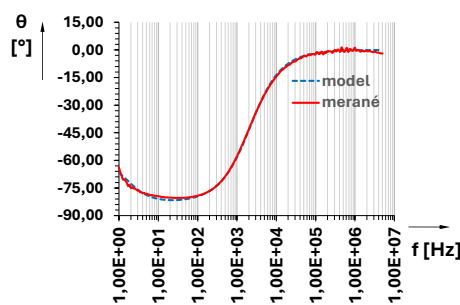
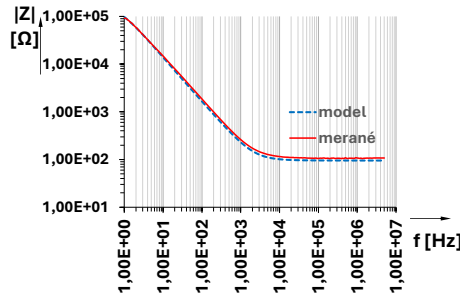
Pre porovnanie frekvenčného priebehu modelu s nameranými hodnotami tu je obr. 2.17 a 2.19. Na týchto grafoch je vidieť, že frekvenčné priebehy modulu $|Z|$ aj fáze φ modelov sa relatívne zhodujú s priebehmi, ktoré sú namerané. Najväčšie odchýlky nastali na začiatku fázových frekvenčných charakteristík a na ich konci. Odchýlka fáze na konci chrakteristík je spôsobená chybou merania prístrojom Analog Discovery 2, zvlnenie nameranej chrakteristiky.



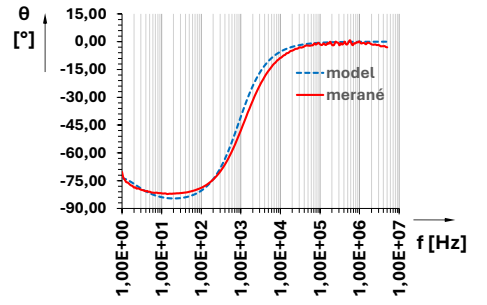
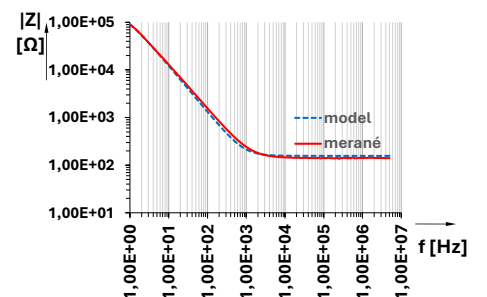
a)



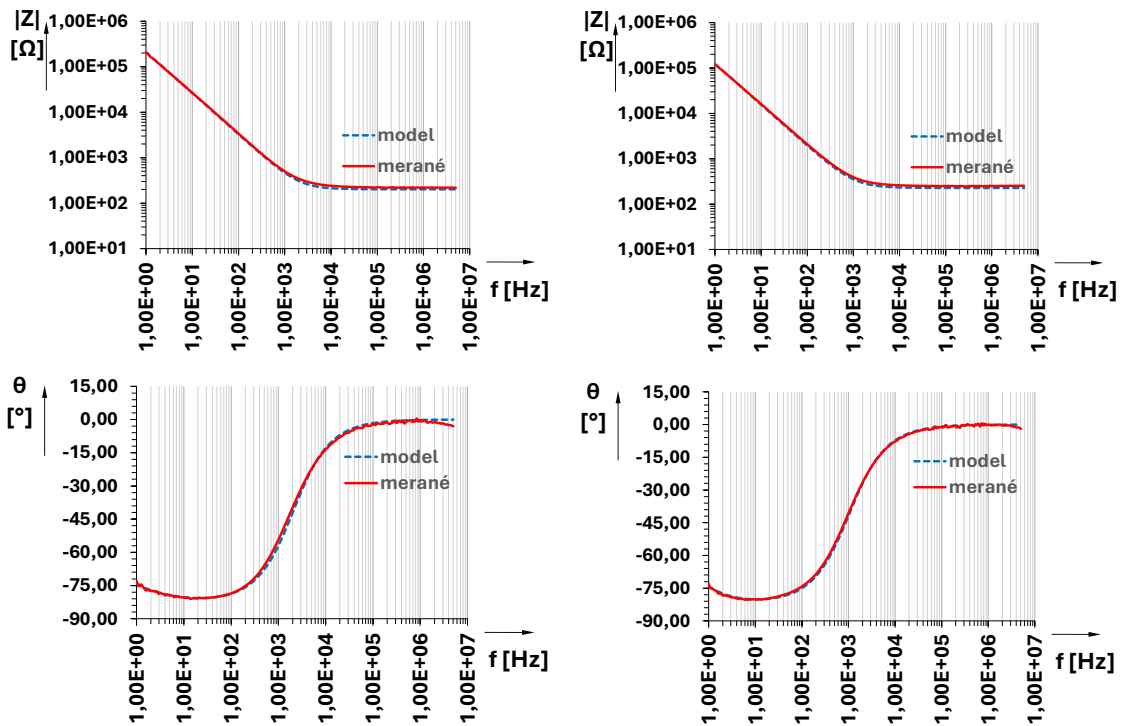
b)



c)

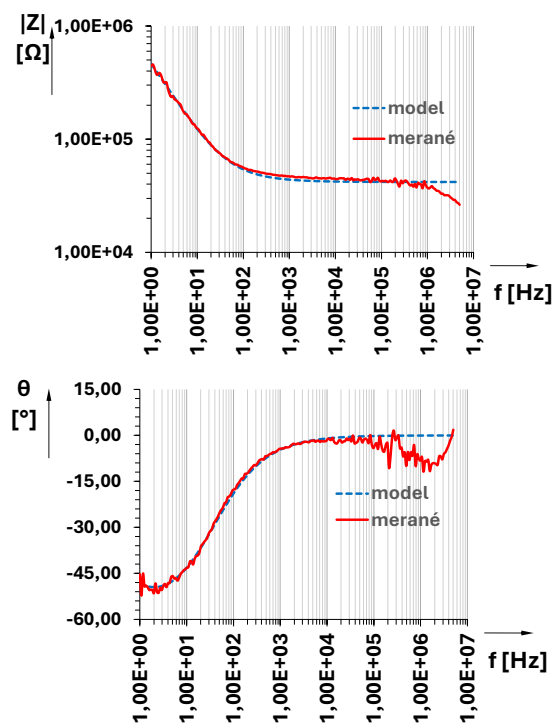


d)



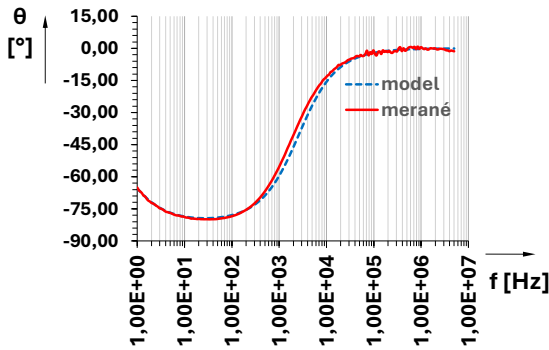
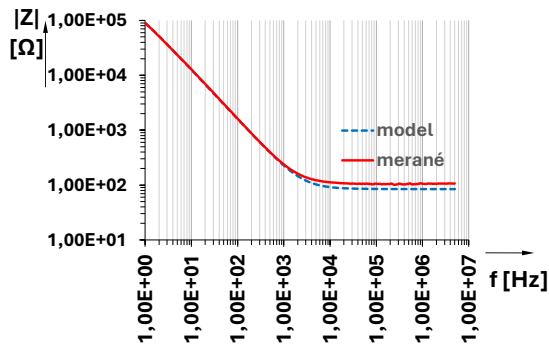
e)

f)

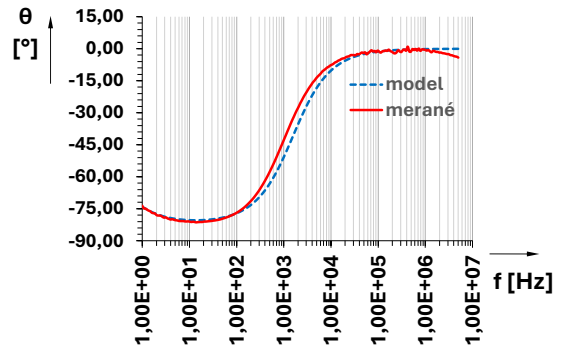
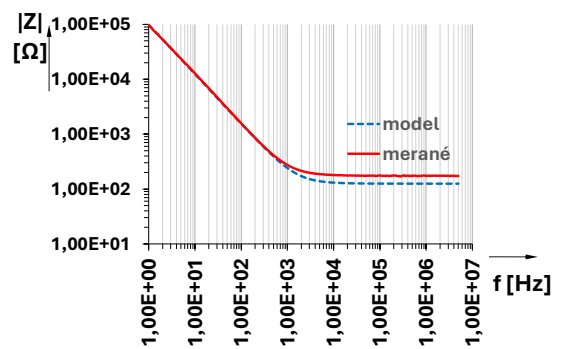


g)

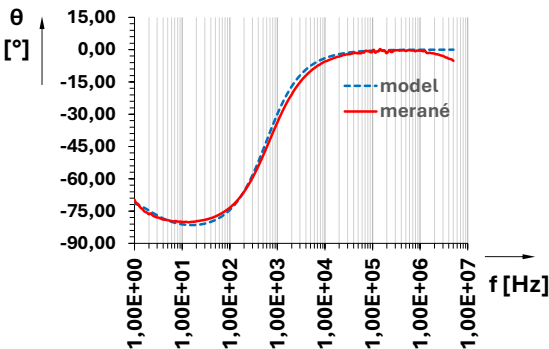
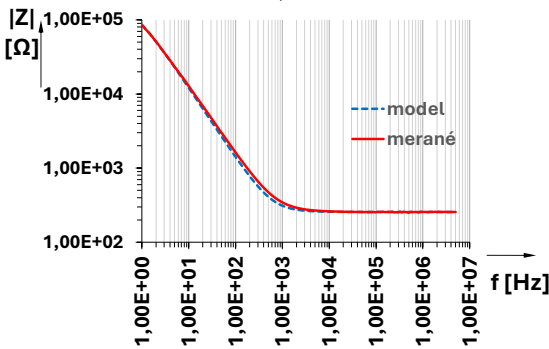
Obr. 2.17: Impedančné charakteristiky modelov: a) obsah tuku 0,5 %, b) obsah tuku 1,5 %, c) obsah tuku 3,5 %, d) obsah tuku 12 %, e) obsah tuku 30 %, f) obsah tuku 40 %, g) obsah tuku 80 %



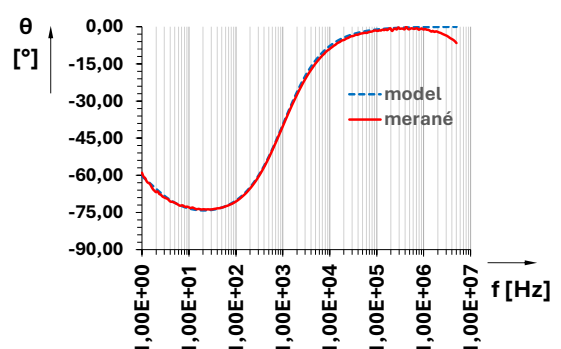
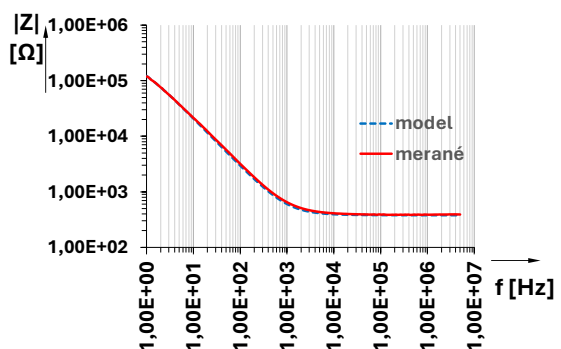
a)



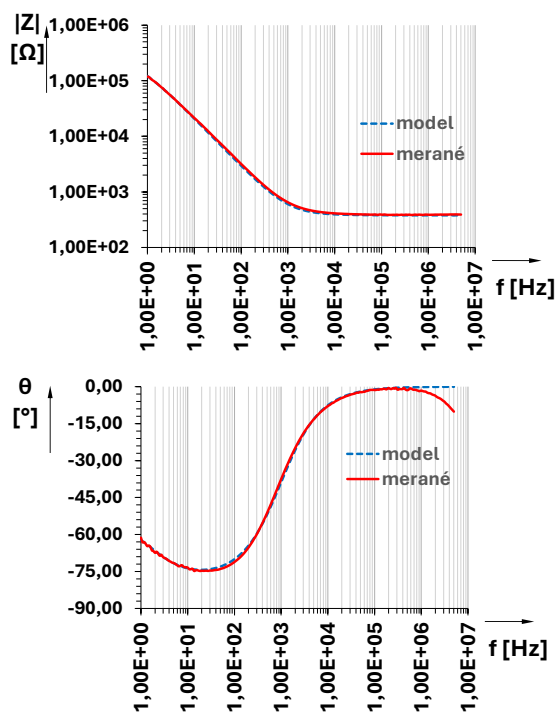
b)



c)



d)



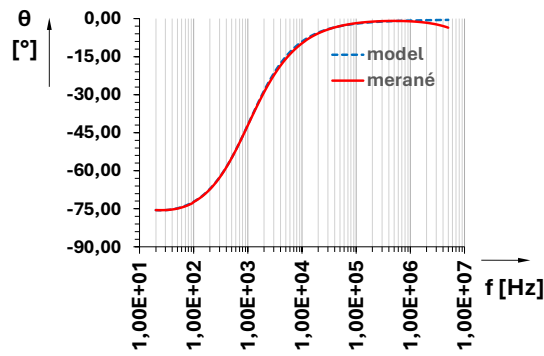
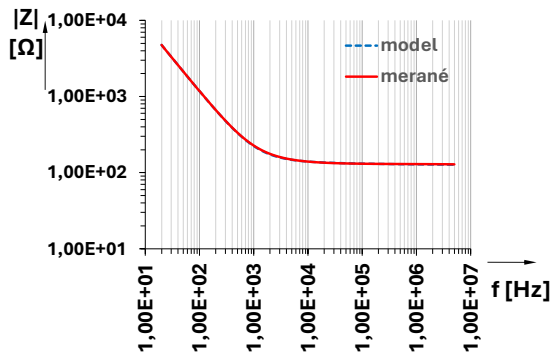
e)

Obr. 2.19: Impedančné charakteristiky modelov: a) obsah cukru +0 %, b) obsah cukru +20 %, c) obsah cukru +30 %, d) obsah cukru +40 %, e) obsah cukru +50 %

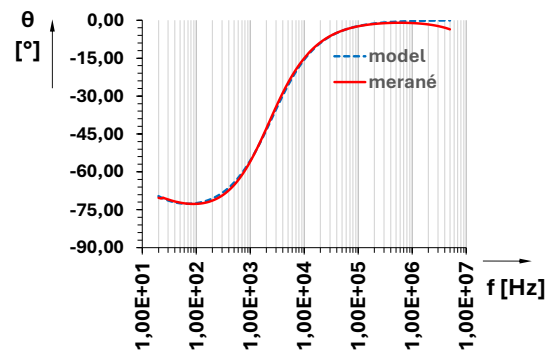
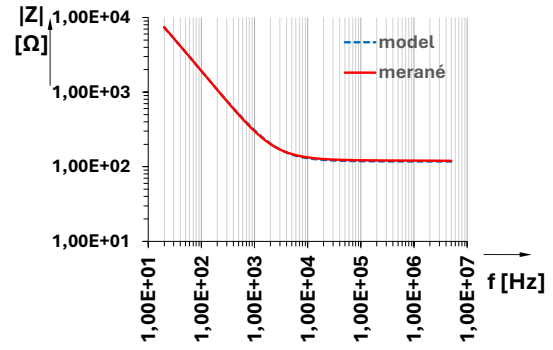
2.3.2 Porovnanie priebehov modelov z hodnôt z prístroja Keysight E4990A

Náhradné modely z nameraných hodnôt z impedančného analyzátoru Keysight E4990A sa líšia od už vyššie spomenutých modelov vytvorených z hodnôt nameraných prístrojom Analog Discovery 2. Tento rozdiel je avšak iba v hodnotách súčiastok, nie v samotnom zapojení, tam ostávajú zapojenia na obr. 2.13 a na obr. 2.14.

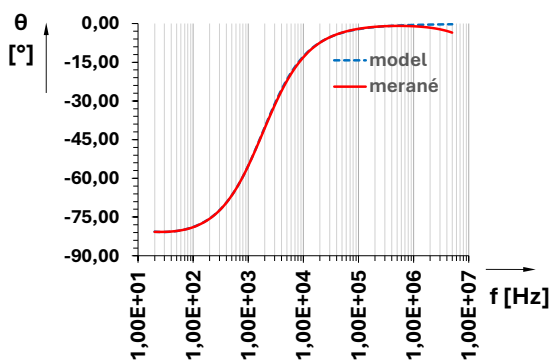
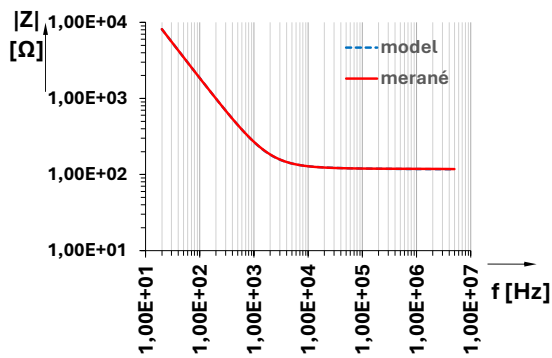
Modely boli vytvorené taktiež pomocou MATLABu [16]. Frekvenčné priebehy modelu a nameraných hodnôt su porovnané na obr. 2.21 a obr. ???. Je vidieť, že priebehy sa priebehovo zhodujú avšak s menšími rozdielmi hlavne v priebehu fáze φ na začiatku charakteristiky a na konci charakteristiky.



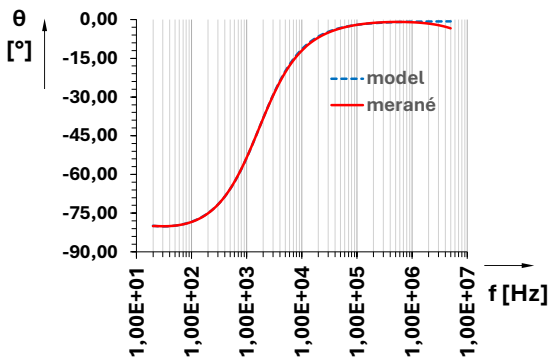
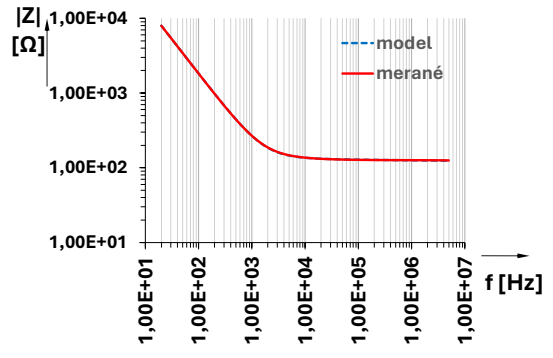
a)



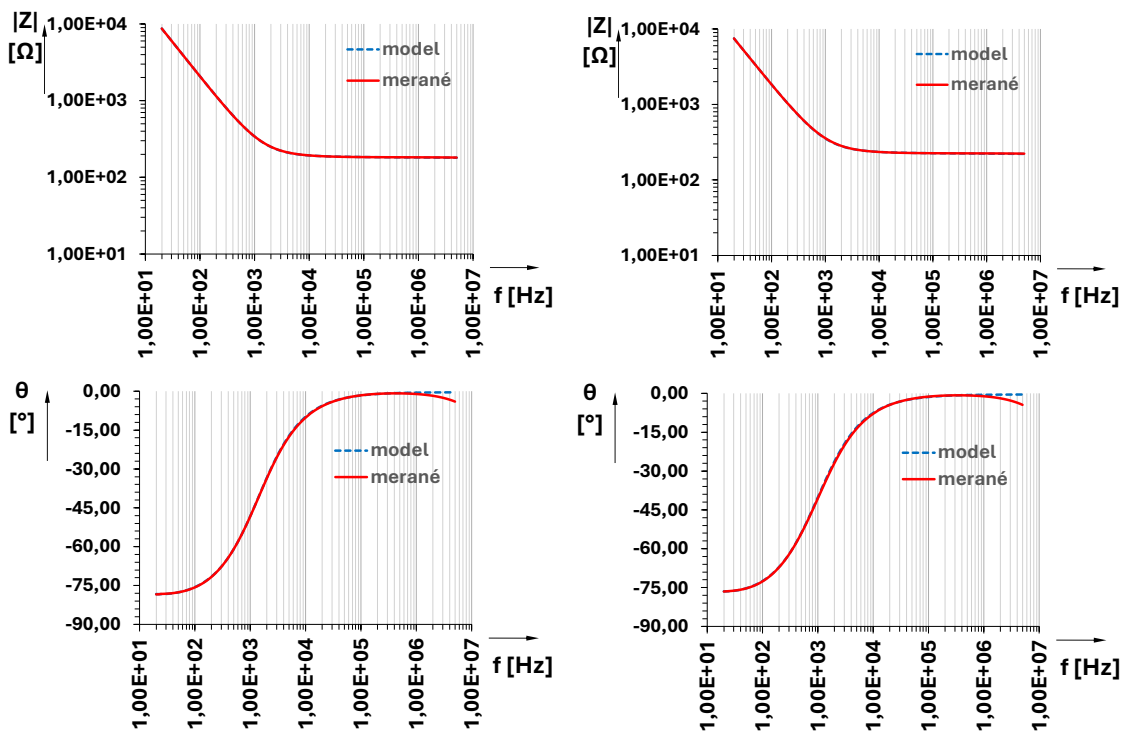
b)



c)

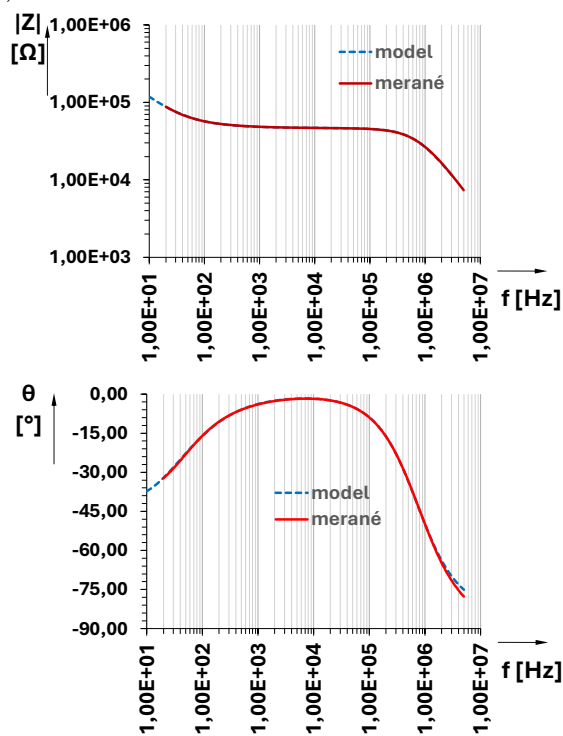


d)



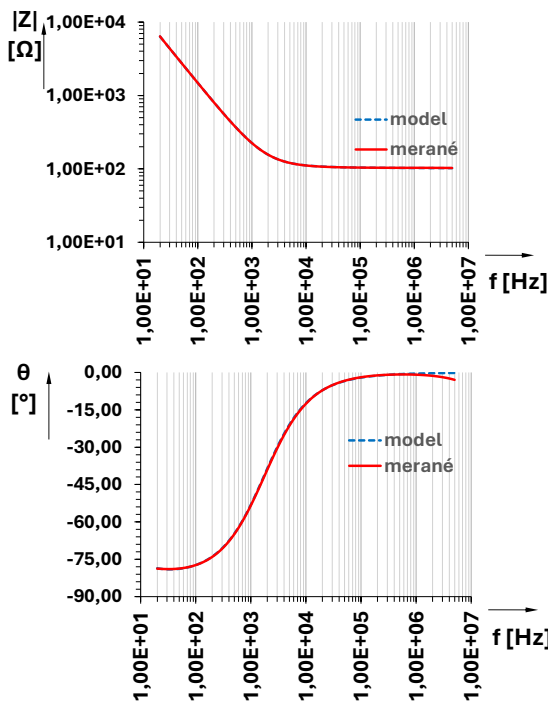
e)

f)

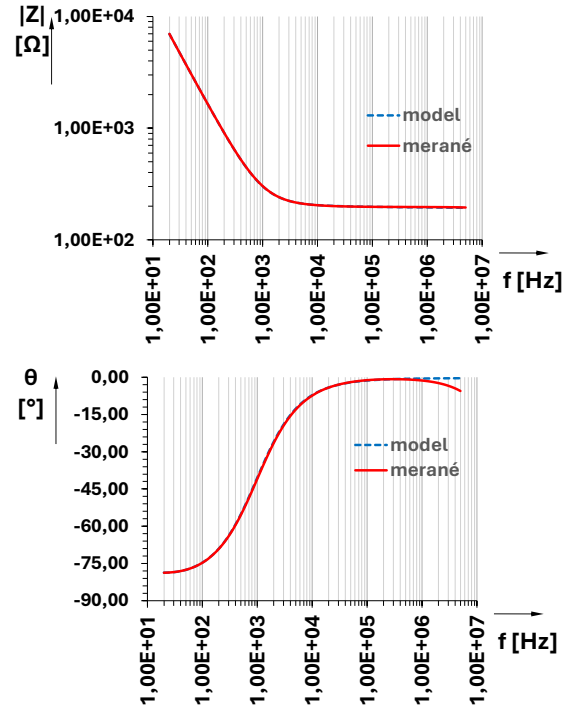


g)

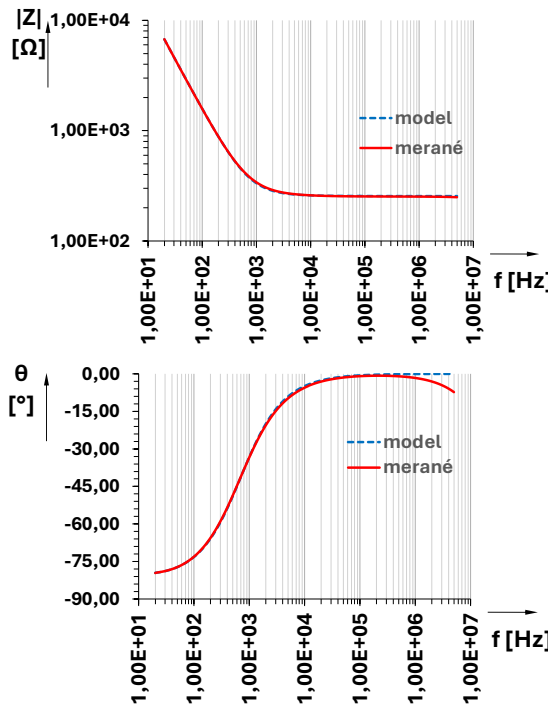
Obr. 2.21: Impedančné charakteristiky modelov: a) obsah tuku 0,5 %, b) obsah tuku 1,5 %, c) obsah tuku 3,5 %, d) obsah tuku 12 %, e) obsah tuku 30 %, f) obsah tuku 40 %, g) obsah tuku 80 %



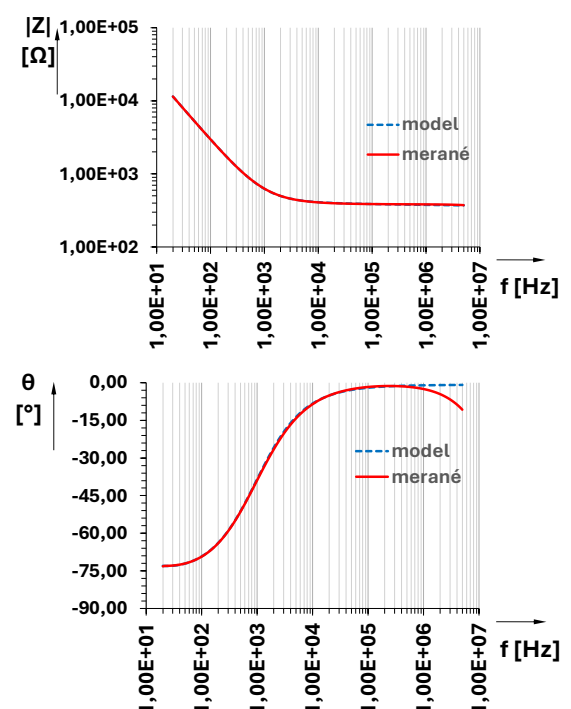
a)



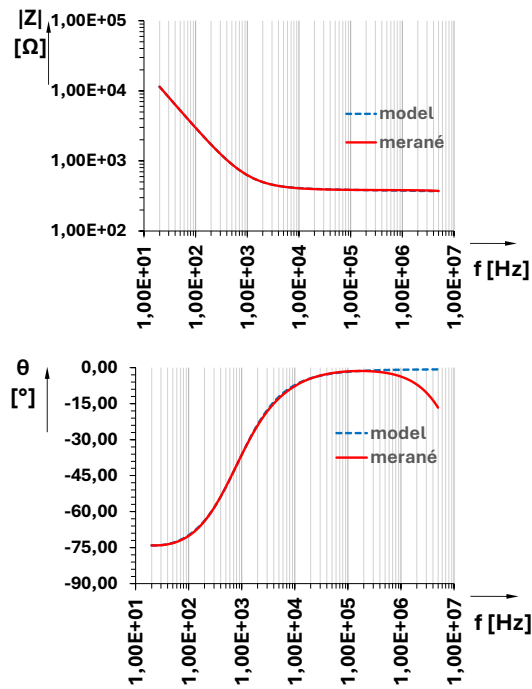
b)



c)



d)



e)

Obr. 2.23: Impedančné charakteristiky modelov: a) obsah cukru +0 %, b) obsah cukru +20 %, c) obsah cukru +30 %, d) obsah cukru +40 %, e) obsah cukru +50 %

2.3.3 Modely z výsledkov nameraných prístrojom Digilent Analog Discovery 2

Sériový odpor R_s postupne narastá s rastúcou koncentráciou tuku, odpory R_{p1} , R_{p2} a R_{p3} sa výrazne menia, ale nemožno povedať akým presným spôsobom pri zmene koncentrácie tuku. Kapacita $C_{\alpha1}$ s rastúcou koncentráciou tuku mierne klesá, ale pri koncentrácii tuku 80 % výrazne narastie na hodnotu okolo $89 \text{ mF} \cdot \text{sec}^{1-\alpha}$. Kapacita $C_{\alpha2}$ najskôr kolíše v rozmedzí $2,3 \mu\text{F} \cdot \text{sec}^{1-\alpha}$ až $3,2 \mu\text{F} \cdot \text{sec}^{1-\alpha}$, potom ale strmo narastie (koncentrácie tuku 30 % a 40 %) a pri koncentrácii tuku klesne na hodnotu okolo $6,2 \mu\text{F} \cdot \text{sec}^{1-\alpha}$. Hodnoty parametru α sa až na dve výnimky stále držia v rozmedzí 0,86 až 1.

Zmena koncentrácie cukru spôsobila postupný nárast hodnoty odporu R_s , nárast hodnoty odporu R_{p1} . U odporu R_{p2} sa nedá jednoznačne povedať ako sa mení s rastúcou koncentráciou cukru, ale jeho rozdiely sú vcelku veľké, hlavne pri vzorkách s +20 % a +30 % cukru. Kapacita $C_{\alpha1}$ postupne narastá s narastajúcou koncentráciou cukru, ale po pridaní 50 % cukru klesne pod pôvodnú hodnotu, všetko to je v rozmedzí $1,8 \mu F \cdot sec^{1-\alpha}$ až $3,3 \mu F \cdot sec^{1-\alpha}$. Kapacita $C_{\alpha2}$ postupne klesá s rastúcou koncentráciou. Hodnoty parametru α sú relatívne konštantné a držia sa v rozmedzí 0,84 až 1.

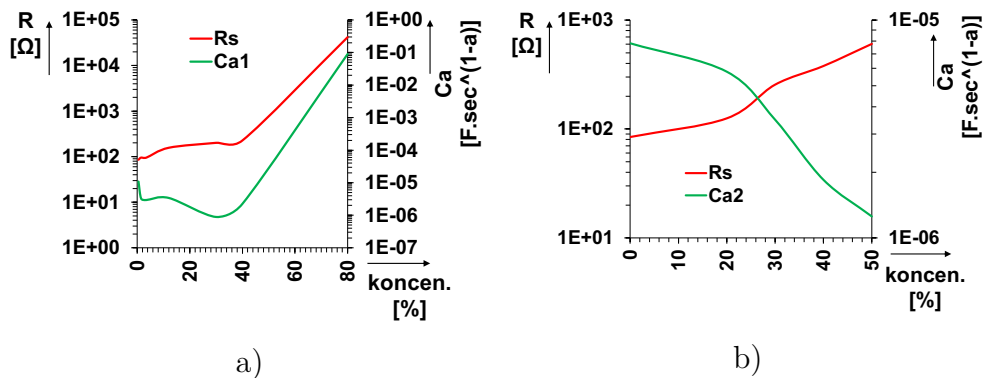
Hodnoty pre každú vzorku sú porovnané v tabuľkách 2.1 a 2.2.

| | | 0,50% | 1,50% | 3,50% | 12% | 30% | 40% | 80% |
|---------------|----------------------------|----------|----------|----------|-----------|----------|----------|-----------|
| R_s | $[\Omega]$ | 85,55 | 95,41 | 95,26 | 156,67 | 201,16 | 226,47 | 41877,67 |
| R_{p1} | $[k\Omega]$ | 24,42 | 126,82 | 100000 | 49,47 | 1520,90 | 351,52 | 881339,03 |
| $C_{\alpha1}$ | $[F \cdot sec^{1-\alpha}]$ | 1,08E-05 | 3,27E-06 | 2,94E-06 | 3,40E-06 | 8,85E-07 | 2,24E-06 | 0,089 |
| α_1 | $[-]$ | 0,908 | 0,879 | 0,887 | 0,947 | 0,913 | 0,883 | 0,968 |
| R_{p2} | $[k\Omega]$ | 6633,41 | 5,154E+8 | 48,56 | 1E+9 | 0,1E-6 | 24070,03 | 999996,09 |
| $C_{\alpha2}$ | $[F \cdot sec^{1-\alpha}]$ | 2,29E-06 | 3,23E-06 | 3,03E-06 | 2,44E-06 | 0,084 | 0,039 | 6,17E-06 |
| α_2 | $[-]$ | 0,928 | 1 | 1 | 1 | 2,76E-05 | 0,997 | 1 |
| R_{p3} | $[k\Omega]$ | - | - | - | 664299,63 | 2,14 | 99872,44 | 1758,94 |
| $C_{\alpha3}$ | $[F \cdot sec^{1-\alpha}]$ | - | - | - | 1 | 1,74E-05 | 3,79E-06 | 5,85E-07 |
| α_3 | $[-]$ | - | - | - | 0,996 | 1 | 1 | 0,691 |

Tab. 2.1: Porovnanie hodnôt súčastok pre zmenu koncentrácie tuku, Digilent Analog Discovery 2

| | | +0% | +20% | +30% | +40% | +50% |
|---------------|----------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| R_s | $[\Omega]$ | 84,37 | 125,22 | 255,38 | 378,70 | 604,15 |
| R_{p1} | $[k\Omega]$ | 192,34 | 337,60 | 5,05E+8 | 9,97E+8 | 9,79E+8 |
| $C_{\alpha1}$ | $[F \cdot sec^{1-\alpha}]$ | 2,39E-06 | 2,63E-06 | 2,79E-06 | 3,27E-06 | 1,87E-06 |
| α_1 | $[-]$ | 0,890 | 0,892 | 1 | 1 | 1 |
| R_{p2} | $[k\Omega]$ | 1E+9 | 5,82E+8 | 57,66 | 151,20 | 226,05 |
| $C_{\alpha2}$ | $[F \cdot sec^{1-\alpha}]$ | 7,83E-06 | 5,79E-06 | 3,49E-06 | 1,85E-06 | 1,25E-06 |
| α_2 | $[-]$ | 0,976 | 0,976 | 0,911 | 0,840 | 0,836 |

Tab. 2.2: Porovnanie hodnôt súčastok pre zmenu koncentrácie cukru, Digilent Analog Discovery 2



Obr. 2.24: Závislosť zmeny parametrov modelu na: a) koncentrácii tuku, b) koncentrácii cukru

Modely z výsledkov nameraných prístrojom Keysight E4990A

Odpor R_s pre prvé 3 vzorky kolíše, potom ale pre vyššie koncentrácie tuku postupne narastá, podobne sa správa aj odpor R_{p1} , ten má ale väčšie skoky v hodnotách. Odpor R_{p2} postupne klesá s rastúcou koncentráciou tuku, pokles hodnôt je dosť veľký. Kapacita $C_{\alpha1}$ s rastúcou koncentráciou tuku mierne klesá, s jedinou výnimkou a to vzorka s 40 % tuku, kedy výrazne stúpa. $C_{\alpha2}$ má podobné hodnoty v rozmedzí $8 \text{ mF} \cdot \text{sec}^{1-\alpha}$ až $15 \text{ mF} \cdot \text{sec}^{1-\alpha}$ až na koncentrácie 1,50%, 40% a 80% kedy sú tieto hodnoty veľmi odlišné od toho intervalu. U parametru α sa nedá určiť jeho predpokladaná zmena pri zmene koncentrácie tuku.

Pri zväčšení koncentrácie cukru môžeme povedať, že odpory R_s a R_{p1} postupne narastajú. U odporov R_{p2} a R_{p3} sa nedá povedať, ako sa správajú, ich hodnoty oscilujú a rozdiely medzi nimi sú dosť veľké. Kapacita $C_{\alpha1}$ relatívne plynulo klesá s rastúcou koncentráciou cukru, kapacity $C_{\alpha2}$ a $C_{\alpha3}$ sú výrazne väčšie ako kapacita $C_{\alpha1}$, ale ich hodnoty nemajú tendenciu klesať ani stúpať so zmenou koncentrácie cukru. Parameter α_1 sa pri všetkých vzorkoách drží v rozmedzí 0,86 až 1, pre vzorky s pridaným cukrom o +30 % a +50 % do tohoto intervalu patri aj parameter α_3 , pre iné koncentrácie parameter α_3 už nemá tak jenznačný interval a jeho skoky sú relatívne veľké. Parameter α_2 má najpr veľký skok pri prvotnej zmene koncentrácie cukru, potom ale má hodnoty menšie ako 0,085.

Hodnoty pre každú vzorku sú porovnané v tabulkách 2.3, 2.4 a 2.5.

| | | 0,50% | 1,50% | 3,50% | 12% | 30% | 40% |
|---------------|--|----------|----------|----------|----------|-----------|----------|
| R_s | $[\Omega]$ | 123,73 | 107,57 | 116,50 | 78,28 | 130,53 | 184,32 |
| R_{p1} | $[\text{k}\Omega]$ | 97,82 | 43,79 | 251,69 | 208,23 | 301,93 | 2392,11 |
| $C_{\alpha1}$ | $[\text{F} \cdot \text{sec}^{1-\alpha}]$ | 2,93E-06 | 2,34E-06 | 1,38E-06 | 1,45E-06 | 1,47E-06 | 0,017 |
| α_1 | $[-]$ | 0,887 | 0,858 | 0,928 | 0,922 | 0,901 | 0,027 |
| R_{p2} | $[\text{k}\Omega]$ | 9411,18 | 10000,00 | 7382,06 | 566,67 | 0,1E-6 | 1,00E-09 |
| $C_{\alpha2}$ | $[\text{F} \cdot \text{sec}^{1-\alpha}]$ | 0,011 | 1,43E-05 | 0,008 | 0,015 | 0,005 | 0,060 |
| α_2 | $[-]$ | 0,184 | 0,897 | 0,417 | 0,0197 | 0,029 | 1,36E-08 |
| R_{p3} | $[\text{k}\Omega]$ | 9997,94 | 3707,66 | 9997,58 | 29,61 | 933816,27 | 222,86 |
| $C_{\alpha3}$ | $[\text{F} \cdot \text{sec}^{1-\alpha}]$ | 0,0001 | 0,099 | 0,007 | 0,090 | 0,015 | 1,81E-06 |
| α_3 | $[-]$ | 0,999 | 3,29E-06 | 0,288 | 1 | 0,015 | 0,890 |

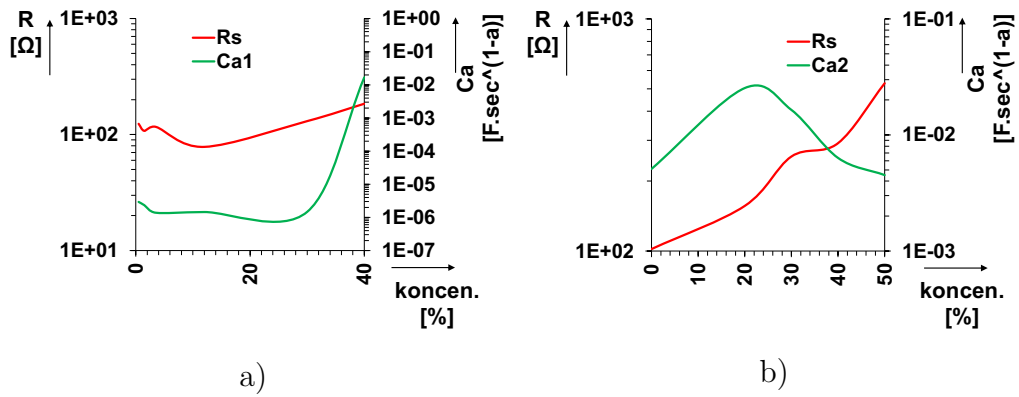
Tab. 2.3: Porovnanie hodnôt súčastok pre zmenu koncentrácie tuku, Keysight E4990A

| | Rs [m Ω] | Rp1 [G Ω] | C1 [$\mu\text{F} \cdot \text{sec}^{1-\alpha}$] | a1 [-] | Rp2 [G Ω] | C2 [n F $\cdot\text{sec}^{1-\alpha}$] | a2 [-] | Rp3 [$\mu\Omega$] | Rp4 [m Ω] |
|-----|------------------|-------------------|--|--------|-------------------|--|--------|---------------------|-------------------|
| 80% | 2,85 | 9,995E+5 | 0,555 | 0,715 | 8,118E+5 | 1,271E-3 | 0,935 | 1,783 | 2,143E-2 |

Tab. 2.4: Porovnanie hodnôt súčastok pre koncentrácie tuku 80 %, Keysight E4990A

| | | +0% | +20% | +30% | +40% | +50% |
|---------------|--|----------|----------|----------|----------|----------|
| R_s | $[\Omega]$ | 101,98 | 156,46 | 255,34 | 291,51 | 528,09 |
| R_{p1} | $[\text{k}\Omega]$ | 123,74 | 212,95 | 0,1E-6 | 233,35 | 349,66 |
| $C_{\alpha1}$ | $[\text{F} \cdot \text{sec}^{1-\alpha}]$ | 1,84E-06 | 1,73E-06 | 0,092 | 1,34E-06 | 8,18E-07 |
| α_1 | $[-]$ | 0,920 | 0,913 | 0,998 | 0,864 | 0,878 |
| R_{p2} | $[\text{k}\Omega]$ | 4,23E+8 | 9,11E+8 | 1,00E-12 | 1E+9 | 1E+9 |
| $C_{\alpha2}$ | $[\text{F} \cdot \text{sec}^{1-\alpha}]$ | 0,005 | 0,025 | 0,016 | 0,006 | 0,004 |
| α_2 | $[-]$ | 0,467 | 0,082 | 0 | 0,045 | 0,058 |
| R_{p3} | $[\text{k}\Omega]$ | 8,42E+8 | 7,64E+8 | 401,06 | 9,73E+8 | 8,13E+8 |
| $C_{\alpha3}$ | $[\text{F} \cdot \text{sec}^{1-\alpha}]$ | 0,004 | 0,036 | 1,76E-06 | 0,099 | 0,013 |
| α_3 | $[-]$ | 0,373 | 0,0002 | 0,918 | 0,023 | 0,964 |

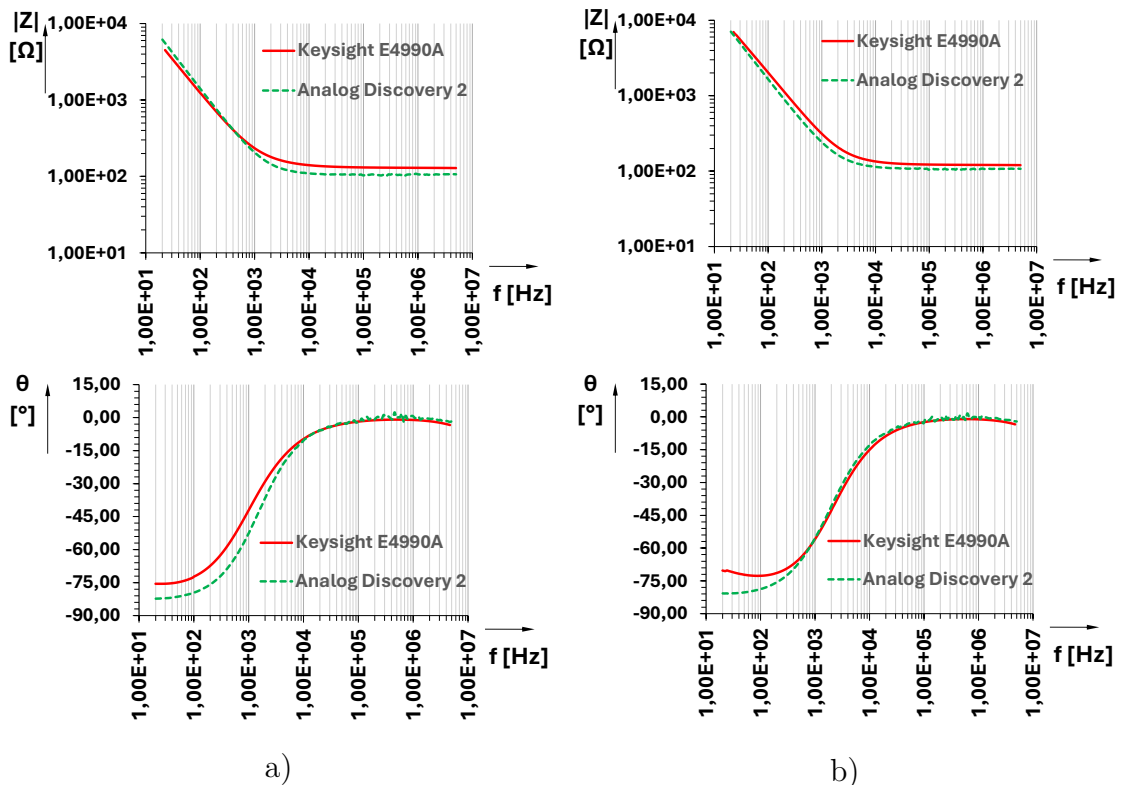
Tab. 2.5: Porovnanie hodnôt súčastok pre zmenu koncentrácie cukru, Keysight E4990A

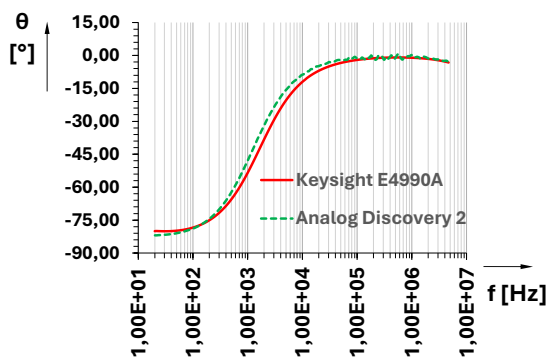
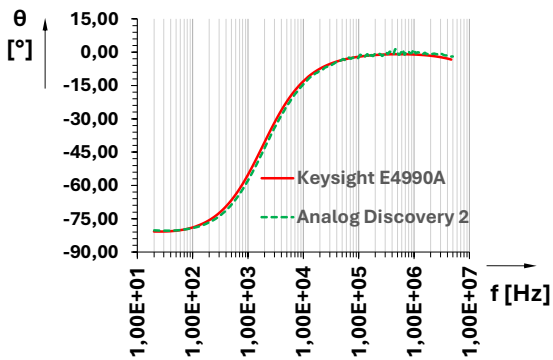
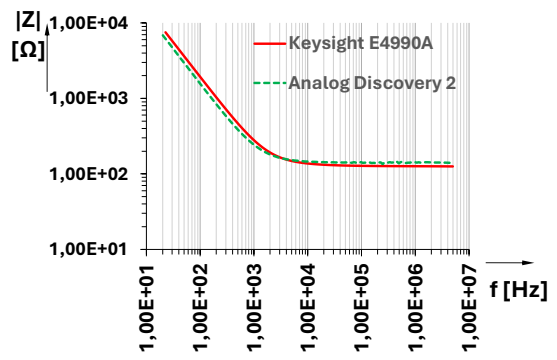
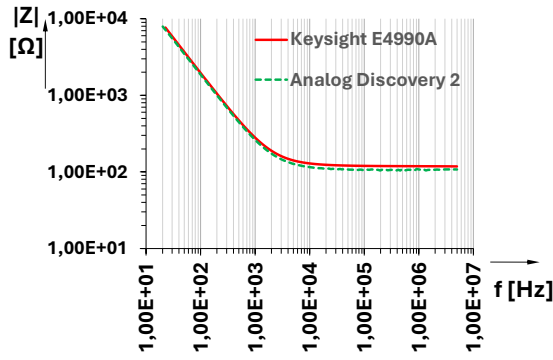


Obr. 2.25: Závislosť zmeny parametrov modelu na: a) koncentrácii tuku, b) koncentrácii cukru

2.4 Porovnanie nameraných priebehov

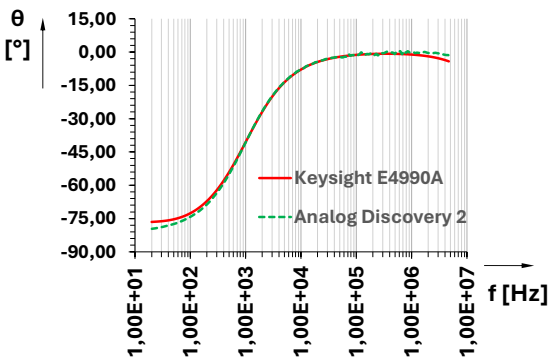
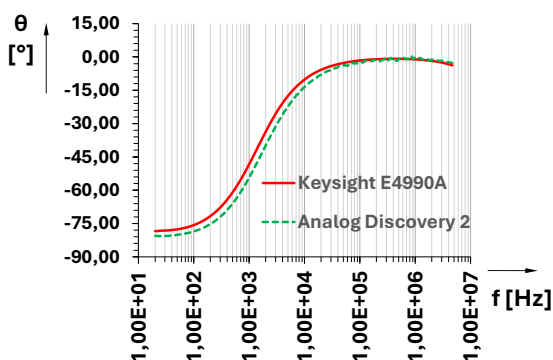
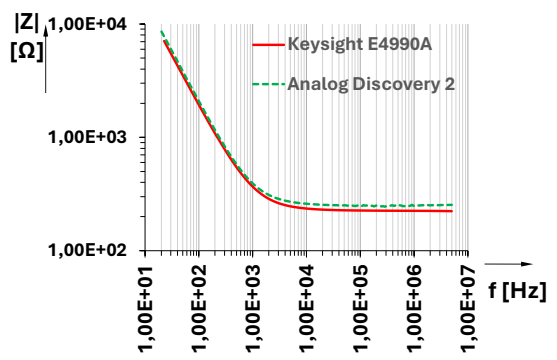
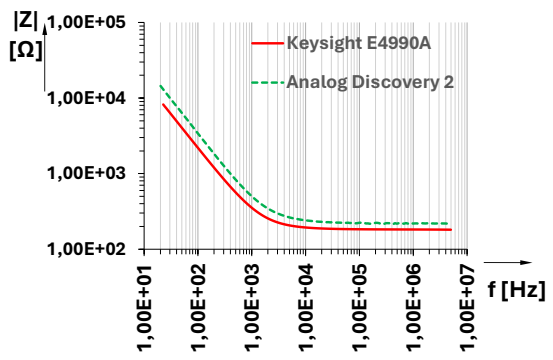
Keďže každý prístroj, ktorý bol použitý má iné parametre, presnosť, cenu a tak ďalej, tak sa spravilo aj porovnanie nameraných hodnôt medzi jednotlivými prístrojmi, grafy na obr. 2.28.





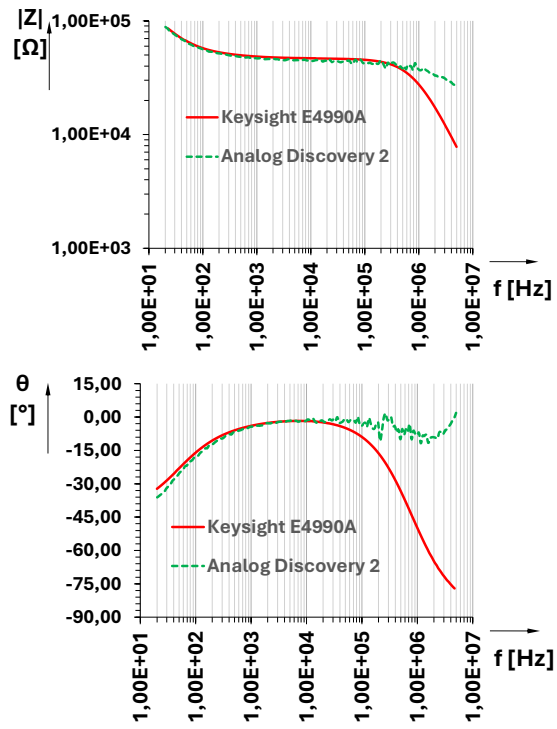
c)

d)



e)

f)



g)

Obr. 2.28: Porovnanie nameraných charakteristík prístrojov: a) obsah tuku 0,5 %, b) obsah tuku 1,5 %, c) obsah tuku 3,5 %, d) obsah tuku 12 %, e) obsah tuku 30 %, f) obsah tuku 40 %, g) obsah tuku 80 %

Záver

Modul impedancie sa postupne s narastajúcou koncentráciou tuku v mliečnych výrobkoch postupne zväčšuje, najväčší rozdiel je vidieť na vyšších frekvenciách, od 10 kHz. V týchto frekvenciách sa dá relatívne dobre zistiť zmena koncentrácie tuku, čím viac tuku, tým vyššia hodnota modulu impedancie. Priebehy skoro všetkých koncentrácií tuku majú veľmi podobné tvary aj sklon na nízkych frekvenciách, do 1 kHz. Fáza impedancie je tvarovo u skoro každého vzorku rovnaká, rôzne koncentrácie tuku spôsobujú rôzne počiatkové fázy a frekvenčný posuv fáze na stredných frekvenciách, rozmedie od 100 Hz do 10 kHz. Jediná koncentrácia tuku, ktorá má menej spoločný priebeh modulu impedancie je koncentrácia tuku 80 %, fázou má podobnú podľa prístroja Digilent Analog Discovery 2 ale podľa analyzátoru Keysight E4990A je fáza veľmi odlišná.

Pri zvyšovaní jednosmerného polarizačného napätia sa zistilo, že pri narastajúcom napätí sa impedancia postupne mení. Priebeh modulu impedancie sa na začiatku charakteristiky postupne znižuje, v princípe časť od meraných 20 Hz až do frekvencie 100 kHz, na vyššej frekvencii už túto zmenu moc nevidieť. Fáza impedancie sa s narastajúcim napätím taktiež vyrovnávala až do stavu kedy jej hodnota počas celého meraného frekvenčného rozsahu bola $\varphi = 0^\circ$. Od napätia 2 V mala modulová časť aj fázová časť už takmer konštantný charakter v celom meranom frekvenčnom rozsahu. Tieto zmeny hodnôt boli zrejme spôsobené tým, že sa počas merania vytvorila na kladnej meracej elektróde vrstva zhutnutého mlieka spôsobená elektrolýzou tuku v mliečnych výrobkoch. Čím bola koncentrácia tuku vyššia, tým bola vrstva väčšia, pri koncentracii tuku 40 % mala taký priemer, že spojila kladnú meráciu elektródu so zápornou. Avšak pri koncentracii tuku 80 % už tento jav nenastal.

Zväčšenie koncentrácie cukru spôsobila nárast modulu impedancie a frekvenčný posuv fáze, podobne ako u zmeny koncentrácie tuku. Pri module impedancie je ale o niečo lepšie rozoznateľná zmena koncentrácie cukru, oproti tomu keď sa menila koncentrácia tuku. Modul a fáza každého meraného vzorku majú veľmi podobné priebehy.

Koncentrácia cukru nemala vplyv na zmenu správania sa samotnej tekutiny pri polarizácii jednosmerným napätím. Pri každej koncentracii cukru vznikol rovnaký povlak, vrstva zhusteného mlieka, na kladnej meracej elektróde.

Extrakcia náhradných impedančných modelov bola pomocou skriptu v prostredí MATLAB. Boli použité tri kritériálne funkcie a teda tri náhradné modely, ktorý model bol použitý pre ktorú meranú vzorku je v kapitole 2.3, Náhradné modely. Z tabuliek s hodnotami súčastok, tab. 2.1, 2.2, 2.3, 2.4 a 2.5, je vidieť, že či už zmena koncentrácie tuku alebo cukru, tak väčšinou sa postupne zväčšuje hodnota odporu

R_s . Pri zmene koncentrácie tuku väčšinou klesá hodnota kapacity $C_{\alpha 1}$ a narastá odpor R_{p1} . Parameter a je väčšinou veľmi blízky hodnote 1, u prístroja Keysight E4990A pri zmene koncentrácie cukru má hodnotu menšiu ako 0,5 a skôr sa blížiacu k hodnote 0. Viac spojitostí medzi každou zmenou koncentrácie u oboch prístrojov nie je vidieť. Rozdiely v hodnotách súčastok medzi prístrojmi sú spôsobené mierne odlišnými nameranými charakteristikami.

Priebehy medzi jednotlivými prístrojmi sú mierne odlišné, ale ich tvary sú veľmi podobné. Rozdiely sú zrejme spôsobené presnosťami prístrojov. Tieto rozdiely nie sú veľmi veľké a považoval by som ich za zanedbateľné.

Zoznam príloh

Literatúra

- [1] Digilent: Digilent Analog Discovery 2]. 2024, Accessed: November 16, 2024. Dostupné z: <https://digilent.com/shop/analog-discovery-2-100ms-s-usb-oscilloscope-logic-analyzer-and-variable-power?srsltid=AfmB0oqg9LyyB3tol-t-EsiCNxDIOFwL9TuH-AvTnV0CJExzAUap0y8ay>
- [2] Keysight Technologies: E4990A Impedance Analyzer, 20 Hz to 10/20/30/50/120 MHz. 2024, Accessed: November 14, 2024. Dostupné z: <https://www.keysight.com/us/en/product/E4990A/impedance-analyzer-20-hz-10-20-30-50-120-mhz.html>
- [3] Prevádzkované na platforme NetDirect | Content Copyright © 2004 - 2025 by NetDirect: GOLDEN LOCH 1436-6251A1-50 koaxiálny SMA konektor. 2024, Accessed: October 23, 2024. Dostupné z: <https://www.gme.sk/v/1500979/golden-loch-1436-6251a1-50-koaxialny-sma-konektor>
- [4] Prevádzkované na platforme NetDirect | Content Copyright © 2004 - 2025 by NetDirect: SMA-Z CAB 50R s káblom 0,1m. 2024, Accessed: October 23, 2024. Dostupné z: <https://www.gme.sk/v/1499977/sma-z-cab-50r-s-kablom-01m>
- [5] Prevádzkované na platforme NetDirect | Content Copyright © 2004 - 2025 by NetDirect: GOLDEN LOCH SMA - SMA V/V 50R redukcia. 2024, Accessed: October 23, 2024. Dostupné z: <https://www.gme.sk/v/1500899/golden-loch-sma-sma-v-v-50r-redukcia>
- [6] Slay, J.; Sotner, R.; Freeborn, T. J.; aj.: Distinguishing liquid solutions with alcohol using electrical impedance measurements: Preliminary study for food safety applications. *IEEE Sensors Journal*, ročník 23, č. 22, 2023: s. 26997–27007.
- [7] Callegaro, L.: *Electrical impedance: principles, measurement, and applications*. CRC Press, 2012.
- [8] Kennelly, A. E.: Impedance. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, ročník 10, 1893: s. 172–232.
- [9] Slurzberg, M.; Osterheld, W.: *Essentials of Electricity for Radio and Television*. McGraw-Hill, 1950.
- [10] Horowitz, P.; Hill, W.; Robinson, I.: *The art of electronics*, ročník 2. Cambridge university press Cambridge, 1989.

- [11] Valsa, J.; Dědek, L.; Čermák, P.: *Teoretická elektrotechnika*. Vysoké učení technické, 1991.
- [12] Čajka, J.: *Teorie lineárních obvodů: (Analýza lineárních a linearizovaných elektrických obvodů)*. SNTL, 1979.
- [13] Kerr, R.; Jerabek, J.; Sotner, R.; aj.: Exploring the Effect of Electrode Material on the Electrical Impedance of Liquid Samples. In *SoutheastCon 2024*, IEEE, 2024, s. 1099–1105.
- [14] Gateman, S. M.; Gharbi, O.; de Melo, H. G.; aj.: On the use of a constant phase element (CPE) in electrochemistry. *Current Opinion in Electrochemistry*, ročník 36, 2022: str. 101133.
- [15] Dabacan, M.: Analog discovery 2 reference manual. *Analog Discovery 2 Reference Manual-Digilent Reference*, 2018.
- [16] © 1994-2025 The MathWorks, Inc.: MATLAB). 2025, Accessed: April 29, 2025. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>