

Impedanční spektroskopie – [IS]

(Martin Vrňata)

1. Úvod

1.1. Obecné informace k práci

Absolvování laboratorní práce *Impedanční spektroskopie* předpokládá určitou úroveň teoretických znalostí. Potřebný učební text je v kapitole 2 tohoto návodu. Pouze poznatky shrnuté v kapitole 2 budou také náplní vstupního testu.

Před započítím práce v laboratoři musí studenti absolvovat test, jehož náplní budou:

- vztahy pro výpočet impedance ideálního rezistoru, induktoru a kapacitoru,
- fázové posunutí mezi napětím a proudem v obvodu těchto prvků,
- schematické znázornění závislosti impedance na frekvenci měřicího signálu pro paralelní a sériovou rezonanci,
- náhradní elektrické schéma krystalového rezonátoru,
- definice činitele jakosti krystalového rezonátoru.

Kapitoly 3-7 není nutné předem detailně studovat; informace v nich obsažené slouží jako průvodce činností teprve během vlastního měření v laboratoři. Dále se tento návod odvolává na manuál k impedančnímu analyzátoru Agilent 4294A, který bude v tištěné podobě studentům k dispozici až na pracovišti.

2. Teorie

Impedance Z popisuje úhrnný "zdánlivý odpor" elektronických prvků při průchodu harmonického střídavého proudu dané frekvence. Ze znalosti hodnoty impedance, resp. její frekvenční závislosti lze určit např. fázový posun mezi napětím a proudem, a tedy charakterizovat vlastnosti konkrétního elektronického prvku (v této laboratorní práci se jako modelový prvek použije krystalový rezonátor s nanosenou tenkou vrstvou sorbentu) a konstruovat jeho náhradní obvod. V kapitole 2 se nejprve seznámíme s impedančním chováním základních "stavebních kamenů" každého náhradního obvodu - rezistoru, induktoru a kapacitoru. Pak si ukážeme, jak vypočítat impedanci jejich sériových a paralelních kombinací a jaká jsou kritéria rezonance v sériových a paralelních rezonančních obvodech. Získané zkušenosti budeme demonstrovat na modelovém senzoru - krystalovém rezonátoru, u něhož nalezneme podobu náhradního obvodu a stanovíme sériovou i paralelní rezonanční frekvenci.

2.1. Impedance ideálních součástek - rezistoru, induktoru, kapacitoru

Hodnota impedance se udává pomocí komplexního čísla, které se skládá z reálné části R a imaginární části X . Imaginární jednotka se značí j .

$$Z = R + jX \quad (1)$$

Absolutní hodnota (velikost) impedance (Ω) se určí podle vztahu:

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

a fázový úhel (fázový posun mezi napětím a proudem) pak je:

$$\varphi = \arctg \frac{X}{R} \quad (3)$$

Impedance ideálního rezistoru má pouze reálnou část - *rezistanci*, jejíž hodnota je nezávislá na frekvenci (4).

$$|Z_R| = R \quad (4)$$

Reaktance se dále dělí na *induktanci* X_L (kladná reaktance) a *kapacitanci* X_C (záporná reaktance). *Induktance* představuje reaktanci cívky. Je závislá na frekvenci a proud je v jejím důsledku opožděn za napětím o určitý fázový úhel. U ideální cívky - *induktoru* - (5) o indukčnosti L má impedance pouze imaginární část a fázový úhel nabývá hodnoty $+90^\circ$.

$$|Z_L| = X_L = \omega L \quad (5)$$

Kapacitance je naproti tomu reaktanci kondenzátoru a v tomto případě proud naopak předbíhá napětí o určitý fázový úhel. U ideálního kondenzátoru - *kapacitoru* - (6) o kapacitě C má impedance pouze imaginární část a fázový úhel nabývá hodnoty -90° .

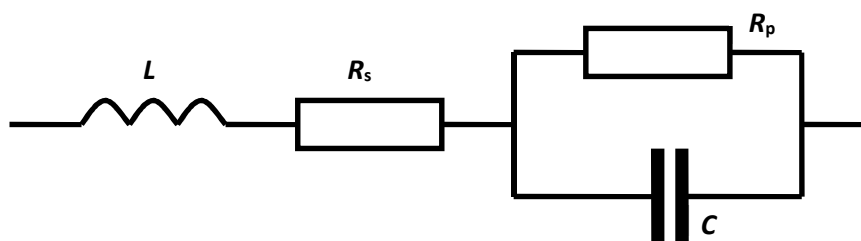
$$|Z_C| = X_C = 1 / \omega C \quad (6)$$

Případ, kdy v konkrétním obvodu mají *induktance* a *kapacitance* stejné absolutní hodnoty, se nazývá *rezonance*. Fázový úhel mezi proudem a napětím je potom nulový. Rozeznáváme dva druhy rezonance – paralelní (impedance nabývá maxima) a sériovou (impedance nabývá minima).

2.2. Impedance reálného odporu, cívky a kondenzátoru

U reálných, fyzicky vyrobených součástek (běžně nazývaných odpor, cívka, kondenzátor) se rezistance, indukčnost a kapacita nevyskytují samostatně; naopak chování reálné součástky je vždy jistou kombinací všech těchto tří příspěvků. Kromě žádané vlastnosti se tak objevují ještě tzv. parazitní prvky. Zdrojem parazitní rezistance je především odpor přívodního vedení, u cívky také odpor vlastního vinutí, v případě kondenzátoru to bývá především svod mezi deskami, způsobený nedokonalostí dielektrika. Parazitní indukčnost má zdroj rovněž v přívodním vedení, projeví se zvlášť při jeho větší délce. Parazitní kapacita se objevuje např. mezi přívodními vodiči v nestíněných kabelech, dále mezi protilehlými kontakty odporů o vyšších hodnotách, sousedními závitů v cívce apod.

Chování reálné součástky můžeme ilustrovat např. náhradním obvodem obecného kondenzátoru (Obr. 1), který vedle hlavního prvku C zahrnuje rovněž parazitní sériový odpor R_s a parazitní indukci L (důsledky přípojného vedení) a parazitní paralelní odpor R_p (svod mezi elektrodami kondenzátoru).

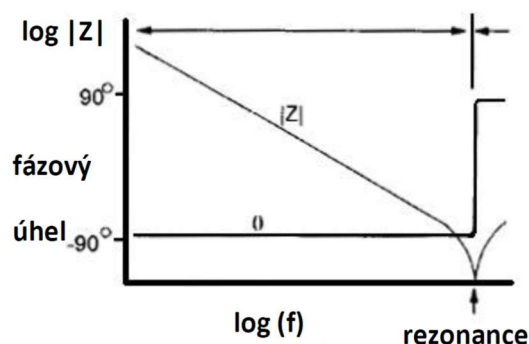


Obr.1.: Náhradní obvod obecného kondenzátoru

Protože se v náhradním obvodu na Obr.1 vyskytuje sériová kombinace R , L , C , můžeme při měření součástky s uvedeným náhradním obvodem při vyšších frekvencích pozorovat tzv. sériovou rezonanci, pro kterou je charakteristické minimum impedance (viz Obr.2).

K posouzení kvality reálné cívky se používá tzv. *činitel jakosti* Q . Jedná se o bezrozměrnou hodnotu definovanou vztahem $Q = X_L/R = \omega L/R$. Tato hodnota je současně rovna $\tan \varphi$ – tangentě fázového posunu mezi napětím a proudem (viz rovnice 3). V případě kondenzátoru bývá zvykem uvádět tzv. *ztrátový činitel* $D = R/X_C = 1/\omega CR$. Představuje tangentu tzv. ztrátového úhlu

$$\delta = \frac{\pi}{2} - |\varphi|.$$



Obr. 2.: Impedance reálného kondenzátoru v závislosti na frekvenci

2.3. Krystalový rezonátor

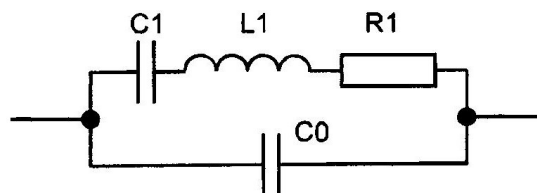
Krystalový rezonátor (krystal) je pasivní elektronická součástka (vyrobená ze speciálně nařezaného krystalu SiO_2) používaná v elektronických obvodech jako rezonátor s velmi přesnou a stabilní rezonanční frekvencí. Používá se zpravidla v přesných oscilátorech, například v digitálních hodinách a hodinách pro taktování procesorů v počítačích a dalších zařízeních spotřební elektroniky. V chemii nachází uplatnění po pokrytí tenkou vrstvou sorbentu, kdy slouží jako chemický senzor detekující s vysokou citlivostí molekuly plynů a par v sorbentu zachycené.

2.4. Elektrické vlastnosti krystalového rezonátoru

Činnost krystalového rezonátoru je založena na piezoelektrickém jevu. Ten se projevuje tak, že při mechanickém namáhání krystalu ve vhodném směru se na krystalu objeví elektrické napětí a naopak po přiložení elektrického napětí se krystal mechanicky zdeformuje. Krystalový rezonátor je tvořen tenkou destičkou (krystalovým výbrusem) opatřenou elektrodami. Nejčastěji se výbrus zhotovuje z monokrystalu křemene a v závislosti

na orientaci řezu se dosahuje různých vlastností krystalového rezonátoru. Po přiložení střídavého napětí se destička rezonátoru rozkmitá. Fyzikálně lze popsat tento děj teorií vynucených kmitů. Jejich amplituda závisí na velikosti vnucené periodické síly, na rozdílu vlastní frekvence výbrusu a frekvence vnucené síly a na činiteli tlumení kmitů. Ve stavu rezonance, kdy jsou obě uvedené frekvence prakticky shodné, dosahuje amplituda kmitů extrémní hodnotu závislou na činiteli tlumení.

Mechanické vlastnosti destičky krystalového rezonátoru lze popsat elektrickými parametry náhradního elektrického obvodu pomocí elektromechanické analogie. Z pohledu obvodu, ve kterém je rezonátor zapojen, se totiž krystal chová jako elektrický rezonanční obvod s několika rezonančními kmitočty. Krystalový rezonátor je možné vybudit do stavu sériové nebo paralelní rezonance. Pro popis



Obr. 3.: Náhradní schéma rezonátoru

vlastností a vyjádření rezonančních frekvencí se nejčastěji používá elektrické náhradní schéma (obr.1). Paralelní kapacita C_0 je určena především kapacitou samotného krystalového výbrusu mezi elektrodami a kapacitou jeho držáku.

Pro frekvenční pásmo 100 kHz až 30 MHz, kde se užívá základní harmonická, je typická hodnota kapacity $C_0 = (1 \text{ až } 40) \text{ pF}$. Parametry C_1 , L_1 a R_1 popisují vlastnosti rezonátoru při sériové rezonanci. Jejich typické hodnoty jsou $C_1 = (0,003 \text{ až } 0,3) \text{ pF}$; $L_1 = (3 \text{ až } 500) \text{ mH}$; $R_1 = (2 \text{ až } 200) \Omega$.

Kmitočet pro sériovou rezonanci určíme ze vztahu

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} \quad (7)$$

Při sériové rezonanci má komplexní impedance obvodu pouze reálnou část, obvod se chová jako elektrický odpor, impedance obvodu při sériové rezonanci dosahuje minima, fázové posunutí mezi napětím a proudem je nulové. Vlivem tlumícího účinku odporu v rezonanční větvi náhradního schématu, kterým se vyjadřuje tlumení mechanických kmitů výbrusu, se dosáhne podmínek sériové rezonance při frekvenci o jednotky Hz nižší, než udává vztah (1).

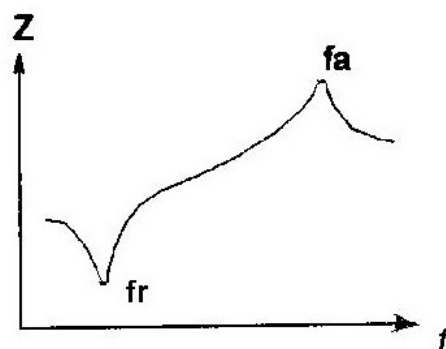
Kmitočet pro paralelní rezonanci f_a určíme ze vztahu

$$f_a = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1 C_0 / (C_1 + C_0)}} \quad (8)$$

Tento vztah lze zjednodušit

$$f_a = f_r \left(1 + \frac{C_1}{2C_0}\right) \quad (9)$$

Protože kapacita C_0 je řádově vyšší než kapacita C_1 , jsou frekvence pro sériovou a paralelní rezonanci blízko sebe. Při paralelní rezonanci dosahuje impedance náhradního obvodu rezonátoru maxima. Závislost impedance Z náhradního elektrického obvodu na frekvenci je na obr. 2 a vykazuje dva extrémy pro frekvence f_r a f_a . Mezi uvedenými frekvencemi f_r a f_a má impedance obvodu charakter indukce

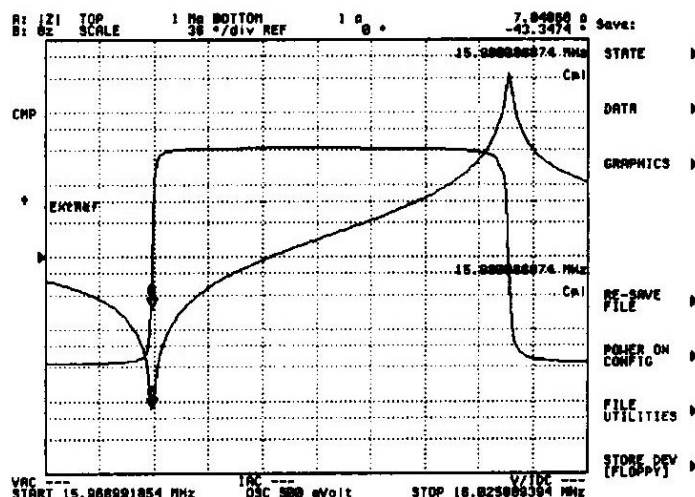


(impedance s frekvencí roste). Fázové posunutí

Obr. 4.: Závislost impedance na frekvenci

mezi napětím a proudem je zde $\vartheta = \pi/2$. Mimo vymezenou kmitočtovou oblast má impedance charakter kapacity a fázové posunutí mezi proudem a napětím $\vartheta = -\pi/2$.

Zápis výsledku měření závislosti impedance Z na frekvenci a závislosti fázového posunutí ϑ na frekvenci pomocí impedančního analyzátoru je na obr. 5.



Obr. 5.: Záznam výsledku měření na krystalovém rezonátoru na obrazovce impedančního analyzátoru Agilent 4294A

Důležitou charakteristikou mechanického rezonujícího systému je tzv. činitel jakosti Q_m . Je definován jako 2π násobek poměru energie akumulované v systému (průměrné energie kmitání) k energii rozptýlené tlumící silou za jednu periodu. Pomocí náhradního schématu krystalového rezonátoru lze odvodit vztah pro činitel jakosti

$$Q_m = \frac{\omega_r L_1}{R_1} = \frac{1}{\omega_r C_1 R_1} = \frac{1}{2\pi f_r C_1 R_1} \quad (10)$$

Obvody s vysokým činitelem jakosti mají úzkou rezonanční křivku s dobře vyjádřeným extrémem obvodové veličiny. Krystalové rezonátory mají činitele jakosti $Q_m = 10^4$ až 10^7 .

3. Cíle práce

Cílem laboratorní úlohy je seznámit se s teoretickými základy impedančních měření, poznat režimy funkce impedančního analyzátoru Agilent 4294A a proměřit impedanční chování reálných elektronických součástek (rezistorů, kondenzátorů a cívek) v závislosti na frekvenci testovacího signálu. Tyto součástky jsou stavebními kameny náhradních obvodů senzorů. Tím studenti získají obecnou průpravu pro měření a vyhodnocování parametrů náhradních obvodů různých senzorů fyzikálních a chemických veličin. V návaznosti na to pak budou vyšetřovat impedanční chování konkrétního senzoru - krystalového rezonátoru s vrstvou sorbentu a stanoví parametry jeho náhradního obvodu.

Úkol 1: Změřte závislost absolutní hodnoty komplexní impedance $|Z|$ na frekvenci f pro následující součástky: a) rezistory o nominálních velikostech 1 Ω , 1 k Ω , 1 M Ω ; b) cívky o nominálních velikostech indukčnosti 1 mH, 10 mH, 100 mH; c) kondenzátory o nominálních velikostech kapacity 1 pF, 1 nF, 1 μ F. Měření ve všech případech provádějte v rozsahu frekvencí $f = 40$ Hz - 100 MHz. Získané závislosti zakreslete schematicky v logaritmických souřadnicích (odděleně pro případ a), b), c)).

Úkol 2: U cívky o indukčnosti 100 mH změřte činitel jakosti Q , u kondenzátoru o kapacitě 1 μ F ztrátový činitel D při frekvencích 100 Hz, 1 kHz, 10 kHz, 100 kHz, 1 MHz, 10 MHz a 100 MHz. Výsledky uveďte ve formě tabulky.

Úkol 3: Změřte závislost absolutní hodnoty komplexní impedance $|Z|$ na frekvenci f pro následující články: sériová kombinace R - L , R - C , R - L - C ; paralelní kombinace R - L , R - C , R - L - C . Měření proveďte pro rozsah frekvencí $f = 40$ Hz - 100 MHz. Zakreslete schematicky průběhy závislosti pro jednotlivé kombinace. V případě sériového uspořádání R - L - C a paralelního uspořádání R - L - C určete také rezonanční frekvence.

Úkol 4: U paralelní R - L - C kombinace proveďte modelování ekvivalentního obvodu. Hodnoty jednotlivých prvků ekvivalentního obvodu vypočtené přístrojem porovnejte s nominálními hodnotami odporu, indukčnosti a kapacity skutečných součástek, z nichž je kombinace sestavena.

Úkol 5: Změřte závislost impedance Z krystalového rezonátoru na frekvenci f (frekvenční charakteristiku) a určete frekvenci f_r sériové rezonance a frekvenci f_a paralelní rezonance.

Úkol 6: Stanovte parametry R_1 , L_1 , C_1 a C_0 náhradního schématu krystalového rezonátoru. Z vypočtených parametrů modelujte teoretickou podobu frekvenční charakteristiky. Proveďte zpětné porovnání frekvenční charakteristiky simulované s její podobou reálně naměřenou v předchozím úkolu.

Úkol 7: Určete činitel jakosti Q_m krystalového rezonátoru.

4. Postup práce

Veškerá měření popisovaná v rámci této úlohy se budou provádět na impedančním analyzátoru *Agilent 4294A*. V laboratoři rovněž máte k dispozici tištěný manuál k tomuto analyzátoru.

Úkoly 1 a 3 : Při měření absolutní hodnoty komplexní impedance jednotlivých součástek a sériových nebo paralelních článků v závislosti na frekvenci postupujte následovně:

V manuálu k impedančnímu analyzátoru si prostudujte kapitoly *Postup kalibrace při připojení přípravku* (str. 137-141), dále *Výběr parametrů měření* (str. 158-161). Problematiku měření následně diskutujte s asistentem. Zaměřte se přitom hlavně na následující otázky: a) určení druhu přípravku, který se musí použít při měření součástek; b) sled kroků při kalibraci přípravku; c) nastavení analyzátoru, aby zobrazoval velikost impedance v závislosti na frekvenci měřicího signálu

Zapněte impedanční analyzátor a obslužný počítač. Provedte nastavení parametrů měření: pomocí klávesy *MEAS* zvolte vhodný typ zobrazení měřených dat; z menu *SWEEP* vyberte frekvenci testovacího signálu jako nezávisle proměnnou veličinu a dále určete, zda se má frekvence v zadaném intervalu 40 Hz - 100 MHz měnit lineárně nebo logaritmicky. Klávesami *SOURCE* a *LEVEL* nastavte požadovanou velikost amplitudy testovacího signálu. Stisknutím klávesy *TRIGGER* a následnou volbou *CONTINUOUS* nastavte režim kontinuálního měření.

S použitím režimu *FIXTURE COMPENSATION* zkalibrujte přípravek pro měření součástek (je součástí standardního vybavení analyzátoru). Kalibrace se musí provádět v rozpojeném i zkratovaném stavu (funkce *OPEN / SHORT*). Přitom se kalibruje přímo při zadaných frekvencích budoucího měření; režim interpolované kompenzace je nepřipustný. Ke správnému provedení kalibrace je nezbytné, aby probíhala zásadně až po nastavení všech parametrů experimentu (viz předchozí odstavec). Jen tak se zajistí kompenzace rušivých vlivů při aktuálně používaném režimu měření. Pokud se provede během experimentu jakákoli změna v menu *MEAS*, *SWEEP* nebo *SOURCE*, je nutno kalibraci opakovat.

Po dokončení kalibrace vkládejte jednotlivé součástky do přípravku. Na obrazovce analyzátoru sledujte kontinuální měření velikosti impedance v závislosti na frekvenci testovacího signálu.

Po ustálení sledované závislosti dejte v menu *TRIGGER* volbu *SINGLE*, což zajistí, že se provede jediný odměr ustálené podoby křivky. Na obslužném počítači v adresáři *DATA* vyhledejte naměřený soubor, který si vhodně nazvěte a vyexportujte do EXCELU. Sestrojte grafy (v logaritmických souřadnicích) závislostí absolutních hodnot komplexní impedance na frekvenci.

Úkol 2: V kapitole *Výběr parametrů měření* (str. 158-161) si nastudujte měření činitele jakosti cívky (režim $L_p - Q$) a disipačního faktoru kondenzátoru (režim $C_p - D$). Pomocí klávesy *MEAS* nastavte tyto režimy měření. V další činnosti (nastavení frekvence a amplitudy testovacího signálu, kalibrace přípravku, export dat) už postupujte stejně jako v případě řešení Úkolu 1 a 3.

Úkol 4 : V manuálu k analyzátoru si prostudujte kapitolu 5.15 *Analýza ekvivalentního obvodu* a vyhledejte Tab. 8-3 na str. 250. Analyzátor umožňuje modelovat celkem 5 typů náhradních obvodů. Na základě grafu $|Z|$ vs. f pro paralelní článek R-L-C (výstup řešení Úkolu 3) rozhodněte, kterým typem náhradního obvodu budete článek modelovat. Potom v menu *DISPLAY* proveďte volbu *EQUIV CKT*. Pomocí tlačítka *SELECT CIRCUIT* zadejte vybraný typ ekvivalentního obvodu (označený písmeny A-E). Po volbě menu *CALCULATE PARAMETERS* se na obrazovce objeví vypočtené hodnoty parametrů náhradního obvodu. Tyto údaje zaznamenejte do protokolu.

Úkol 5: Nejprve proveďte kalibraci přípravku na měření součástek; postup je popsán v instrukcích k Úkolu 1. Po dokončení kalibrace vložte krystalový rezonátor do přípravku. Na obrazovce analyzátoru sledujte kontinuální měření velikosti impedance v závislosti na frekvenci testovacího signálu. Tato závislost má charakter popsáný na Obr.5. Při měření je potřeba dodržet izotermní podmínky, protože vlastnosti krystalů závisejí na teplotě. Minimální opatření v tomto směru je, že pokud krystal upínáme do měřicího přípravku rukou, musíme následně 1-2 min počkat na ustálení podoby měřené závislosti.

Po ustálení dejte v menu *TRIGGER* volbu *SINGLE*, což zajistí, že se provede jediný odměr ustálené podoby křivky. Na obslužném počítači v adresáři *DATA* vyhledejte naměřený soubor, který si vhodně nazvěte a vyexportujte do EXCELU. Vytvořte graf a vyhodnoťte z něj obě rezonanční frekvence f_r a f_a .

Celý tento postup opakujte pro amplitudy testovacího signálu 10 mV, 20 mV, 50 mV, 100 mV, 200 mV, 500 mV a 1000 mV. Sestrojte grafy závislostí hodnot rezonančních frekvencí na velikosti amplitudy testovacího signálu.

Úkol 6: V manuálu k analyzátoru vyhledejte Tab. 8-3 na str. 250. Analyzátor umožňuje modelovat celkem 5 typů náhradních obvodů. Na základě závislosti velikosti impedance na frekvenci testovacího signálu (výstup řešení předchozího úkolu) rozhodněte, kterým typem náhradního obvodu budete krystal modelovat. Potom v menu *DISPLAY* proveďte volbu *EQUIV CKT*. Pomocí tlačítka *SELECT CIRCUIT* zadejte vybraný typ ekvivalentního obvodu (označený písmeny A-E). Po volbě menu *CALCULATE PARAMETERS* se na obrazovce objeví vypočtené hodnoty parametrů náhradního obvodu. Tyto údaje zaznamenejte do protokolu.

Pro zpětnou kontrolu podoby simulované a reálné frekvenční charakteristiky se opět vraťte do menu *DISPLAY* a v něm proveďte volbu *EQUIV CKT*. Písmenem A-E označte uvažovaný typ ekvivalentního obvodu podle Tab. 8-3. Následným stisknutím klávesy *DEFINE PARAMETERS* se dostanete do režimu zadávání parametrů ekvivalentního obvodu. Použijte hodnoty stanovené v předchozím odstavci a po jejich zadání stiskněte *SIMULATE F-CHRS*. Na obrazovce analyzátoru se vykreslí simulovaná podoba frekvenční charakteristiky; tu následně vyneste do společného grafu s reálnou charakteristikou a vytiskněte. Úkol 6 provádějte pouze pro data získaná měřením při amplitudě testovacího signálu 100 mV.

Úkol 7: Činitel jakosti krystalového rezonátoru stanovte z vypočtených parametrů ekvivalentního obvodu podle vztahu (10).

5. Zpracování výsledků

- a) Laboratorní protokol musí splňovat formální náležitosti zadané vedoucím *Laboratoře charakterizace nano a mikrosystémů* na začátku semestru.
- b) Do protokolu zaznamenejte detailní nastavení impedančního analyzátoru (především v menu *MEAS*, *SWEEP*, *SOURCE* a *TRIGGER*), které jste použili pro měření Úkolů 1-7.
- c) Zpracujte graficky, případně formou tabulek výstupy získané při řešení jednotlivých úkolů.
- d) Sledujte odchylky od ideálního chování při měření impedance reálných rezistorů, cívek a kondenzátorů za vyšších frekvencí měřicího signálu.
- e) Vyhodnoťte rezonanční frekvence sériového i paralelního R-L-C článku.
- f) Nakreslete schéma typu náhradního obvodu, který jste se vybrali z nabídky možností přístroje pro modelování paralelního R-L-C článku. Uveďte přístrojem vypočtené hodnoty parametrů tohoto náhradního obvodu a porovnejte je s hodnotami odporu, indukčnosti a kapacity skutečných součástek, ze kterých je článek sestavený.
- g) Nakreslete schéma typu náhradního obvodu, kterým jste se rozhodli modelovat chování krystalového rezonátoru. Uveďte přístrojem vypočtené hodnoty parametrů tohoto náhradního obvodu a podle vztahu (10) určený činitel jakosti.
- h) Přiložte grafické znázornění skutečné a simulované frekvenční charakteristiky krystalového rezonátoru.

6. Bezpečnostní pokyny

Účelem bezpečnostních instrukcí je zabránit úrazu obsluhy či zničení laboratorní stanice. Před zahájením práce se stanicí s Vámi asistent detailně probere zásady práce s analyzátozem. Nedodržení těchto pokynů může být penalizováno předčasným ukončením laboratoře s hodnocením F.

Při práci s laboratorní stanicí platí tato obecná pravidla:

- je nutno jakoukoliv zjištěnou závadu neprodleně nahlásit vyučujícímu asistentovi,
- je zakázáno zapínat impedanční analyzátor v nepřítomnosti asistenta,
- je zakázáno neuváženě manipulovat s tlačítky na ovládacím panelu.

Doporučená literatura

1. Hofmann J., Urbanová M.: Fyzika I - skriptum VŠCHT Praha, 3. vydání (2011)
2. Agilent Technologies Impedance Measurement Handbook, (2003) Agilent Technologies Co. Ltd

Návod pro práci se softwarem ZView4 a ukázka impedančních měření

Autor: M. Hruška

Úvod

V rámci tohoto návodu se naučíme pracovat s programem ZView4, který slouží pro vyhodnocování impedančních spekter. Seznámíme se s prostředím programu, ukážeme si import dat, vytvoření požadovaných ekvivalentních obvodů a následně vyhodnocení ukázkových dat včetně fitování ekvivalentního obvodu.

Poznámka:

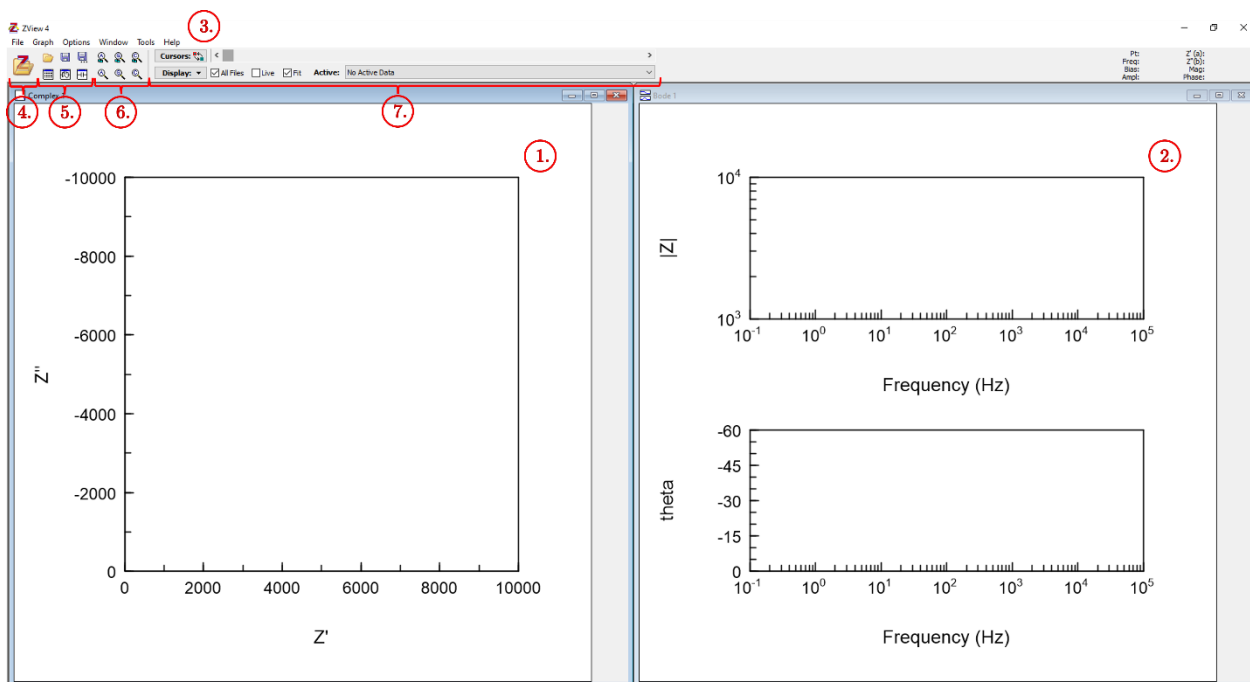
Tento návod předpokládá, již základní znalost impedanční spektroskopie a staví na základních pojmech a běžně používané terminologii.

Program ZView4 je zpoplatněný licencovaný software, pro jehož používání je potřeba používat hardwarový klíč. Pro plnou verzi programu je nutné program každých 6 měsíců otevřít s vloženým hardwarovým klíčem.

Pozor, aby program správně fungoval je nutné jej spustit s administrátorskými právy!

1. Základní popis prostředí programu ZView4

Po otevření programu ZView4 se nám načte okno s následujícím rozložením (Obrázek 1).



Obrázek 1: Prostředí programu ZView4

V tomto okně nalezneme podokna jednotlivých grafů a menu lištu se základním ovládaními:

1) Podokno grafu s Nyquistovou reprezentací impedance

V tomto okně je vynesena Nyquistova reprezentace impedance, tedy závislost imaginární složky impedance (Z''), označovaná také jako reaktance či jalový odpor (jX), na reálné složce impedance (Z'), označované také jako rezistence (R).

$$Z = R + jX = Z' + Z'' \quad (1)$$

2) Podokno grafu s Bodeho reprezentací impedance

V tomto okně jsou vyneseny Bodeho reprezentace impedance, tedy závislosti modulu (také absolutní hodnoty) impedance ($|Z|$) na frekvenci (f) a fáze (theta) na frekvenci.

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

$$\theta = \text{theta} = \arctan\left(\frac{X}{R}\right) \quad (3)$$

3) Základní menu

V základním *menu* nalezneme obvyklá podmenu, jako *File*, *Graph*, *Options*, *Window*, *Tools* a *Help*. Nás bude nejvíce zajímat podmenu *Tools* ve kterém nalezneme možnosti pro sestavení ekvivalentních obvodů a možnosti pro následné fitování dat.

4) Ikona „Z“ pro import dat

Velká ikona složky s písmenem „Z“ v levém horním rohu okna slouží pro otevření předchozích projektů a import dat.

5) Menu pro práci se soubory a daty

Hned vedle ikony pro import dat („Z“) se nachází menu pro rychlou práci se soubory a daty obsahující následující ikony (příslušné funkce je možné nalézt také v jednotlivých *podmenu*):



Otevřít soubor



Uložit soubor



Uložit soubor jako



Zobrazit tabulku s daty



Otevřít podokno pro práci s ekvivalentními obvody



Otevřít podokno pro rychlé fitování

6) Menu pro škálování grafů

Toto menu slouží pro různé škálování grafů a úpravu jejich zobrazení.

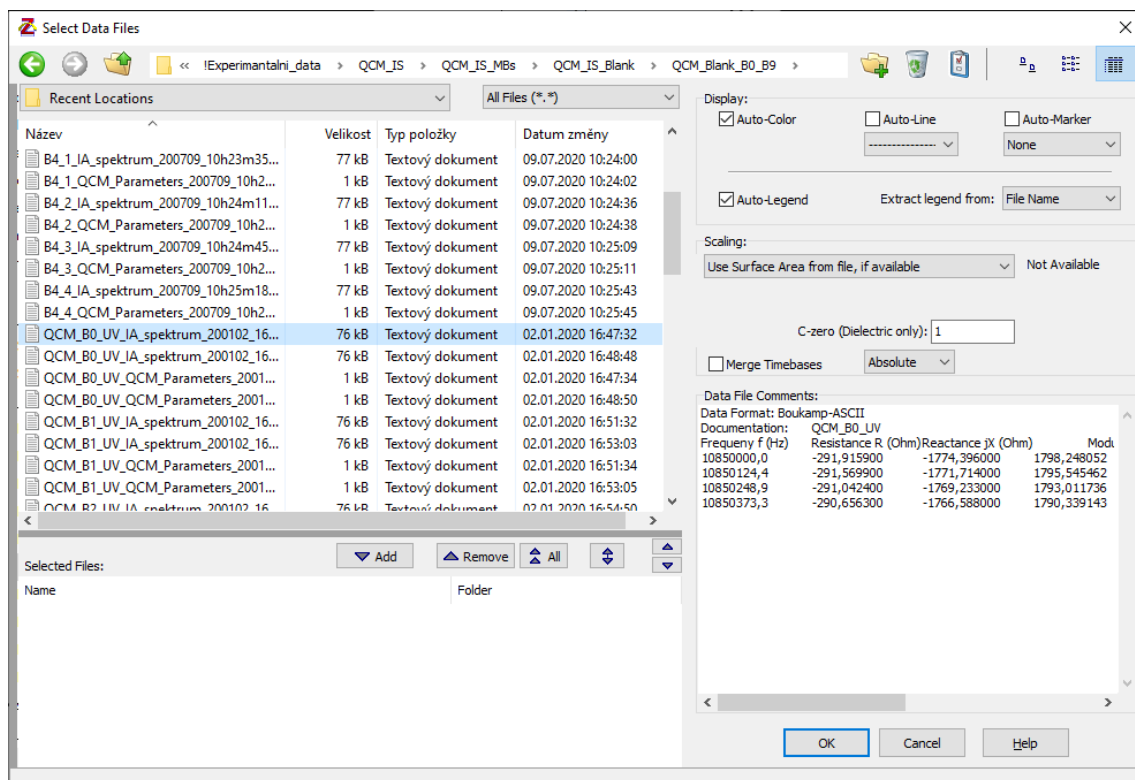
7) Ovládací prvky grafu

Toto menu slouží pro zobrazení vybraných dat v grafech a pro výběr datového setu, který budeme chtít dále analyzovat. Tlačítko *Cursors* slouží k přepínání levého a pravého kurzoru a posouvací lišta pak pohybu kurzorů. Tímto způsobem je možné vybrat jen příslušné body datového setu, pro které následně budeme používat fit dle vybraného ekvivalentního obvodu.

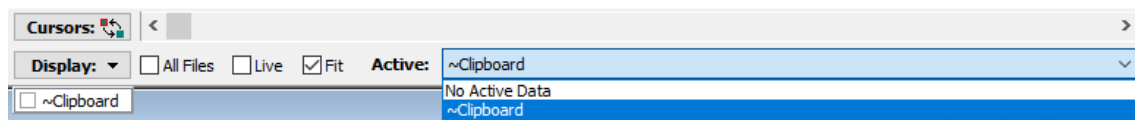
2. Import dat

Pro import dat slouží primárně ikona **4)** s velkým „Z“. Po kliknutí se nám otevře okno pro import dat, ve kterém je možné procházet dokumenty a zvolit možnosti importu. Vše je poměrně intuitivní, avšak je nutné dát si pozor, aby data byla v souboru uvedena s použitím **desetinné tečky**. Příslušný soubor zvolím dvojklikem. V pravém okně se nám rovnou zobrazí náhled komentářů, pokud soubor nějaké obsahuje. Je možné importovat i více datových souborů naráz (**Obrázek 2**).

K jednoduchému importu dat je také možné použít funkce *Paste Data from Clipboard* z podmenu *Tools*. Tento způsob je vhodný, pokud například s daty nejprve pracujeme v tabulkovém procesoru jako je *Microsoft Excel*, či *Origin* a chceme je jednoduše a co nejrychleji převést do *ZView*. Pak stačí data v *Excelu* pouze označit a pomocí zkratky *Crt + C*, uložit do schránky, ze které je pomocí výše zmíněné funkce vložíme do *ZView*. Pokud jsem data správně naimportovali měli bychom je vidět v menu **7) Ovládací prvky grafu** (**Obrázek 3**).



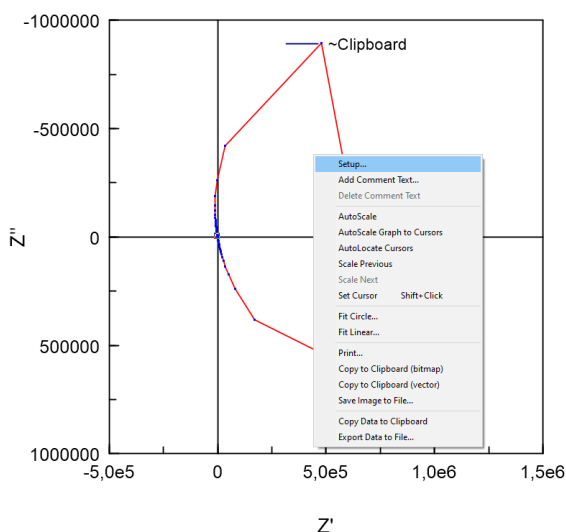
Obrázek 2: Podokno pro import dat



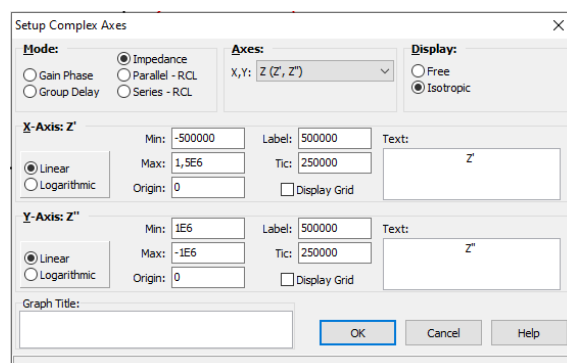
Obrázek 3: Správně importovaná data

3. Zobrazení dat

Aby se nám importovaná data správně zobrazovala, je často nutné uvedené grafy přeskálovat na příslušné meze. To lze provést pomocí menu 6). Někdy je však potřeba pokročilejšího nastavení, toho lze docílit kliknutím pomocí pravého tlačítka myši na příslušný graf a zvolit volbu *Setup*. Pomocí té se nám otevře podokno s pokročilejšími možnostmi formátování grafu.



Obrázek 4: Zvolení volby Setup

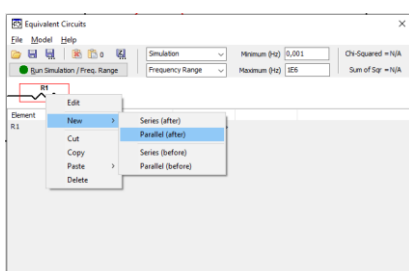


Obrázek 5: Podokno pro pokročilejší formátování grafu

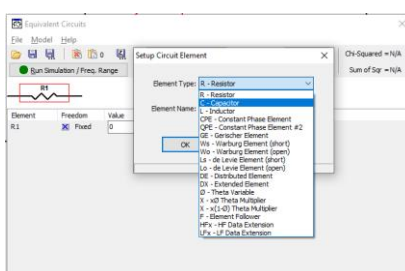
4. Fitování dat pomocí ekvivalentních obvodů

Pokud máme vybraná data již v ZView načtená a grafy správně přizpůsobené, můžeme přejít k samotnému fitování dat pomocí ekvivalentního obvodu. Jedná se tedy o metodu, kdy i složitější impedanční prvky budeme simulovat pomocí základních elektronických prvků/součástek a budeme se snažit najít jejich parametry.

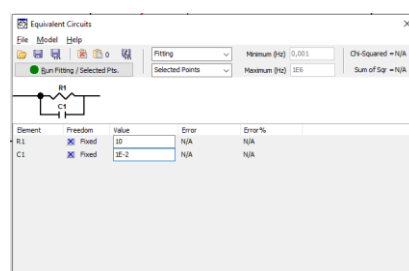
Začneme otevřením podokna *Equivalent Circuits*, které otevřeme buď mocí ikonky  z menu **5**) nebo otevřením stejnojmenné funkce z podmenu *Tools* (*Ctrl + E*). V podokně *Equivalent Circuits* je možné schematicky sestavit příslušný náhradní obvod, na který budeme chtít na naše data fitovat. Příslušné prvky náhradního obvodu vytvoříme pomocí menu, které otevřeme pravým tlačítkem myši. Poté v menu pokračujeme *New*, *Series/Parallel* a následně výběr příslušného prvku z rozbalovacího menu. V horní liště potom volíme, zdali chceme vytvořený náhradní obvod pouze simulovat nebo na příslušná data fitovat. Nutné je také zvolit, zdali simulaci/fitování provedeme v příslušné frekvenční oblasti nebo ve zvolených bodech. Po přidání příslušné elektronické součástky se nám v tabulce pod obvodem zobrazí také pole pro vyplnění hodnoty příslušné veličiny nebo pro nástřel dané hodnoty. Ve sloupci *Freedom* nastavujeme stupně volnosti pro fitování.



Obrázek 6: Menu pro přidání el. součástky

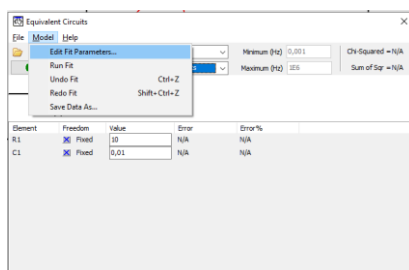


Obrázek 7: Podokno pro přidání el. součástky

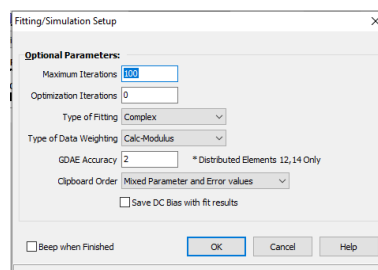


Obrázek 8: Nastavení/nástřel hodnot příslušných prvků

Parametry simulace nebo fitu nastavíme v podokně *Fitting/Simulation Setup*, které vyvoláme z menu *Model, Edit Fit Parameters* (Obrázek 9). Samotnou simulaci nebo fit spustíme tlačítkem *Run Fitting/Selected Pts.* Vytvořený model, respektive ekvivalentní obvod je možné také uložit a následně do programu znovu načíst.



Obrázek 9: Menu Model

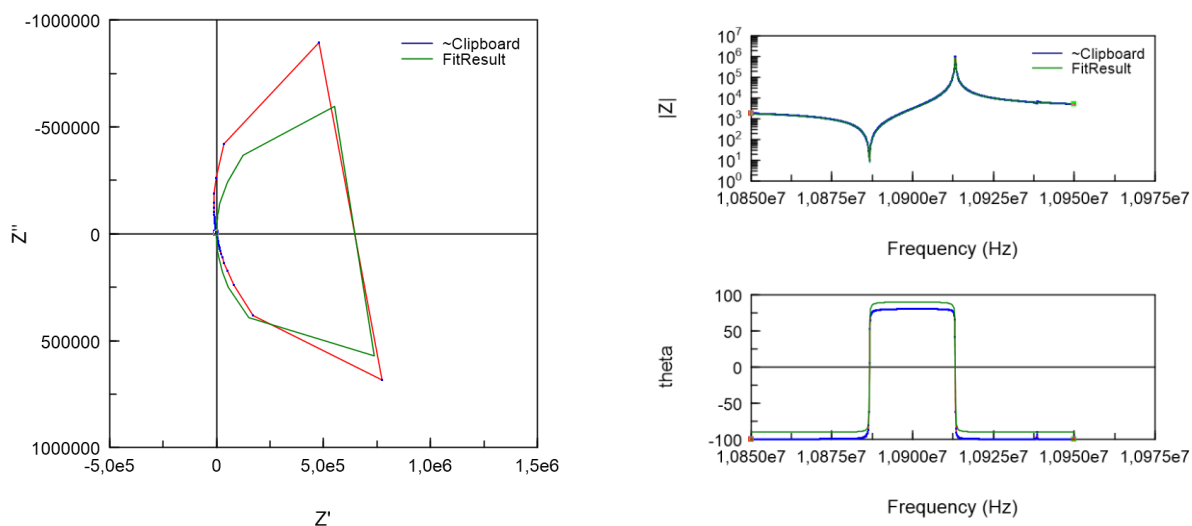


Obrázek 10: Podokno pro nastavení parametrů fitu

Poznámka:

Nastavení nástřelu pro jednotlivé el. součástky v náhradním obvodu vždy konzultujte s asistentem, samotný algoritmus pro fitování dat je odnoží softwaru *LEVM*, který byl vyvinut profesorem J. R. Macdonaldem¹ a špatný nástřel může zapříčinit chybu ve výsledném fitu.

¹ <https://jrossmacdonald.com/levmlevmw/>



Obrázek 11: Ukázka fitu pro impedanční spektrum QCM rezonátoru

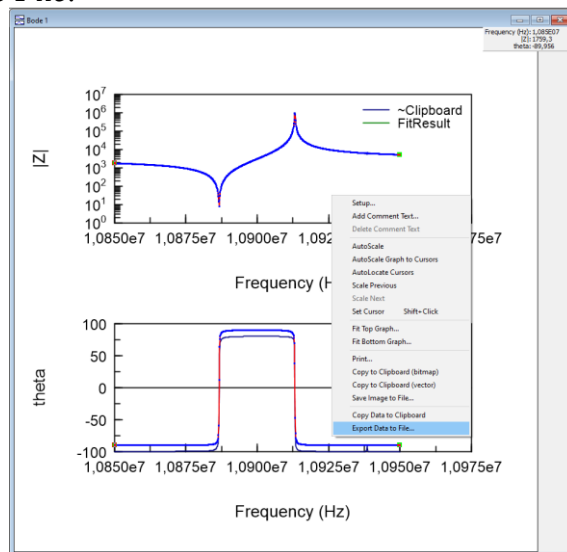
5. Export a ukládání dat

Pro export nebo uložení dat z programu můžeme využít hned několik možností. Pokud budeme s daty dále pracovat, například v tabulkovém procesoru, nejjednodušší možností bude si data zkopírovat přímo z tabulky dat, kterou vyvoláme pomocí ikonky  z menu 5). Poté stačí data zkopírovat pomocí pravého tlačítka myši a funkce *Copy All to Clipboard*. Musíme si dát však pozor, jaká data jsou aktivní zkontrolujte si tedy nejprve výběr *Active*: z menu 7).

Další možností je data exportovat přímo z příslušného grafu, opět pomocí pravého tlačítka myši a funkce *Copy Data to Clipboard* nebo *Export Data to File*.

Point #	Freq	Z' (a)	Z'' (b)	Mag	Phase
1	1,085E07	1,3656	-1759,3	1759,3	-89,956
2	1,085012E07	1,3709	-1756,7	1756,7	-89,955
3	1,085025E07	1,3764	-1754,2	1754,2	-89,955
4	1,085037E07	1,3818	-1751,6	1751,6	-89,955
5	1,085050E07	1,3873	-1749,1	1749,1	-89,955
6	1,085062E07	1,3928	-1746,5	1746,5	-89,954
7	1,085075E07	1,3983	-1743,9	1743,9	-89,954
8	1,085087E07	1,4			-89,954
9	1,0851E07	1,4			-89,954
10	1,085112E07	1,4			-89,953
11	1,085124E07	1,4208	-1733,4	1733,4	-89,953
12	1,085137E07	1,4265	-1730,8	1730,8	-89,953
13	1,085149E07	1,4323	-1728,1	1728,1	-89,953
14	1,085162E07	1,438	-1725,5	1725,5	-89,952
15	1,085174E07	1,4439	-1722,8	1722,8	-89,952
16	1,085187E07	1,4497	-1720,1	1720,1	-89,952
17	1,085199E07	1,4556	-1717,4	1717,4	-89,951
18	1,085212E07	1,4615	-1714,7	1714,7	-89,951
19	1,085224E07	1,4675	-1712	1712	-89,951
20	1,085236E07	1,4735	-1709,3	1709,3	-89,951
21	1,085249E07	1,4795	-1706,6	1706,6	-89,95
22	1,085261E07	1,4856	-1703,8	1703,8	-89,95

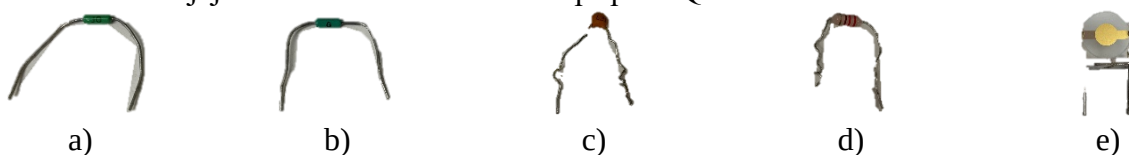
Obrázek 12: Uložení dat do schránky pomocí tabulky



Obrázek 13: Export data z grafu

6. Příklady vyhodnocení náhradních ekvivalentních obvodů

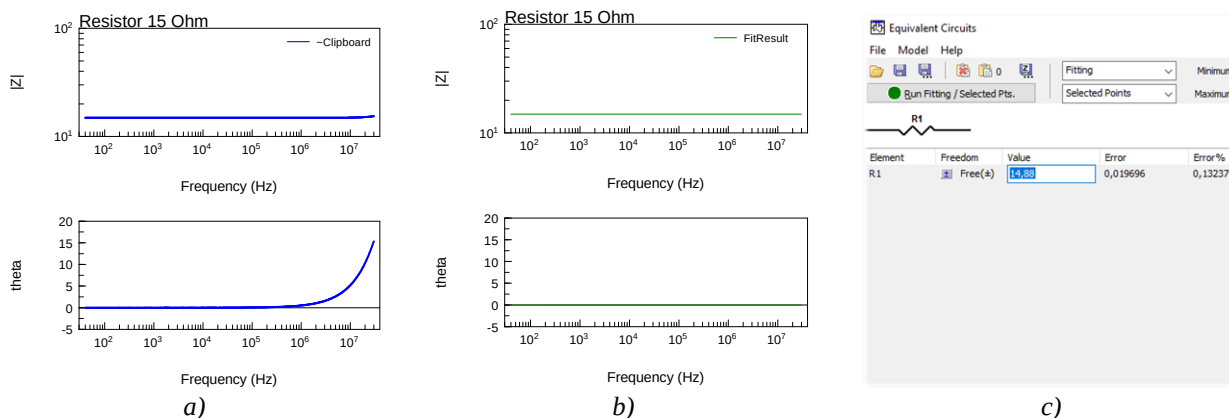
Nyní si ukážeme vyhodnocení a ukázkové fitování dat pro některé základní elektronické součástky, které byly nejprve změřeny impedančním analyzátozem Agilent 4294A v rozsahu 40 Hz až 30 MHz, respektive v okolí jejich rezonanční frekvence v případě QCM rezonátoru.



Obrázek 14: a) Elektrický odpor 15 Ω b) Elektrický odpor 1 M Ω , c) Keramický kondenzátor, d) Cívka, e) QCM rezonátor

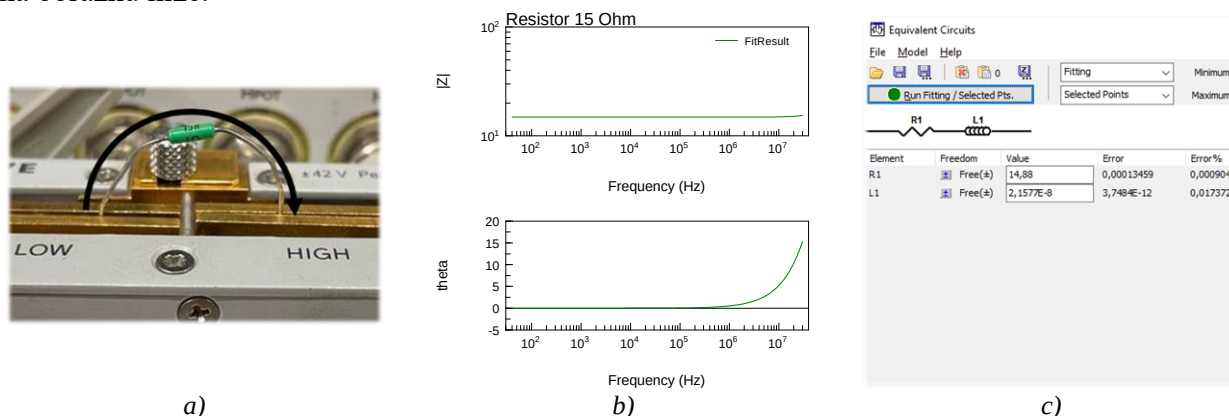
a. Elektrický odpor o nominální hodnotě 15 Ω

Změřená data pomocí impedančního analyzátoru byla nejprve převedena do ZView4 a následně fitována pomocí funkce ekvivalentního obvodu. Jelikož se jedná o elektrický odpor, v podokně pro náhradní obvody byl vytvořen pouze prvek elektrického odporu ($R1$). Jak je však patrné z grafů níže, tak při vyšších frekvencích se začíná projevovat parazitní indukčnost vlivem geometrie přívodních drátů odporu – jednoduchá smyčka.



Obrázek 15: a) Naměřená data, b) Simulovaná data c) Ekvivalentní obvod a výsledná hodnota odporu

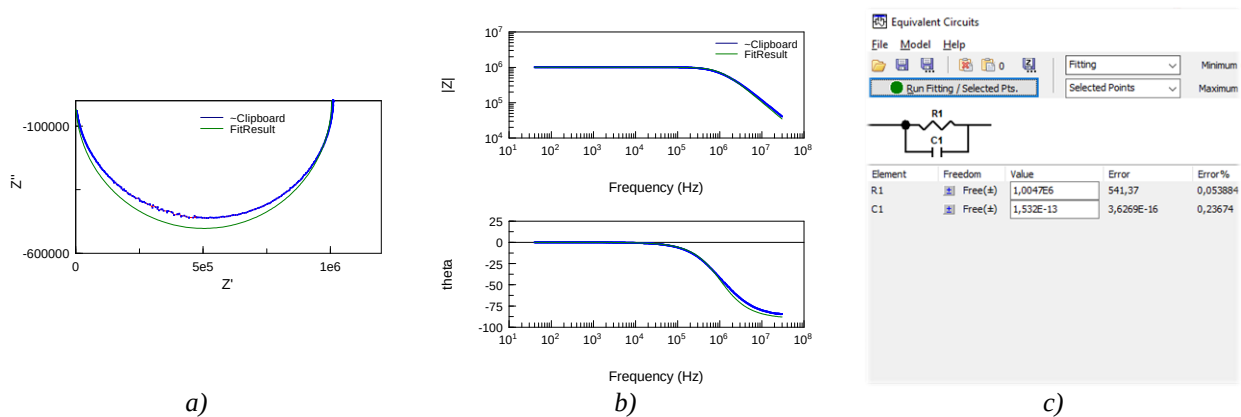
To že se v obvodu při vyšších frekvencích projevuje parazitní indukčnost si ověříme právě přidáním indukčnosti – cívky ($L1$) do náhradního obvodu a spustíme simulaci znovu. Jako nástřel pro hodnotu indukčnosti volíme velmi nízkou hodnotu (například $1 \cdot 10^{-6}$ H), parazitní cívka je přeci jen tvořena jediným závitem přívodních drátů odporu. Výsledný fit, ověřující parazitní indukčnost, je zobrazen na obrázku níže.



Obrázek 16: a) Naznačení vytvořeného závitu cívky vlivem přívodních kontaktů odporu, b) Simulovaná data, c) Ekvivalentní obvod a příslušné hodnoty elektrického odporu a parazitní indukčnosti

b. Elektrický odpor o nominální hodnotě 1 MΩ

Jak jsem se již dozvěděli z předchozího příkladu, reálné elektronické součástky často oproti těm ideálním vykazují spoustu parazitních jevů. Na elektrickém odporu o nominální hodnotě 1 MΩ si nyní ukážeme parazitní kapacitu, která se vytvoří při vysokých frekvencích, kdy kontakty odporu fungují jako elektrody kondenzátoru a celý odpor se tedy při vysokých frekvencích chová spíše jako kondenzátor. (Když se zamyslíte nad konstrukcí kondenzátoru a odporu, tak si můžete představit, že námi studovaný elektrický odpor je ve skutečnosti kondenzátor s dielektrikem o hodnotě elektrického odporu 1 MΩ.)

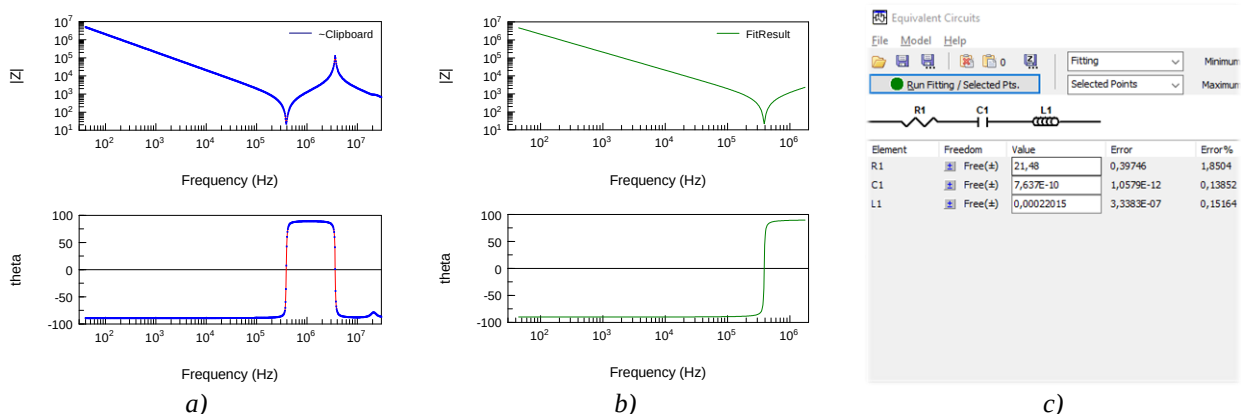


Obrázek 17: a) Nyquistova reprezentace naměřených a simulovaných dat, b) Bodeho reprezentace naměřených a simulovaných dat, c) Ekvivalentní obvod a získané hodnoty elektrických součástek

c. Sériový RLC člen

Jako další příklad si ukážeme sériový RLC člen, který ve skutečnosti vznikl změřením keramického kondenzátoru a cívky v sériovém zapojení, člen elektrického odporu je zde samozřejmě všude přítomný vlivem kontaktních drátů a vnitřního odporu cívky. V tomto případě se opět projeví, jak již v realitě bývá, další parazitní jevy, konkrétně parazitní paralelní kapacita. My se však zaměříme pouze na oblast dat, kde se tento obvod chová jako sériový RLC člen.

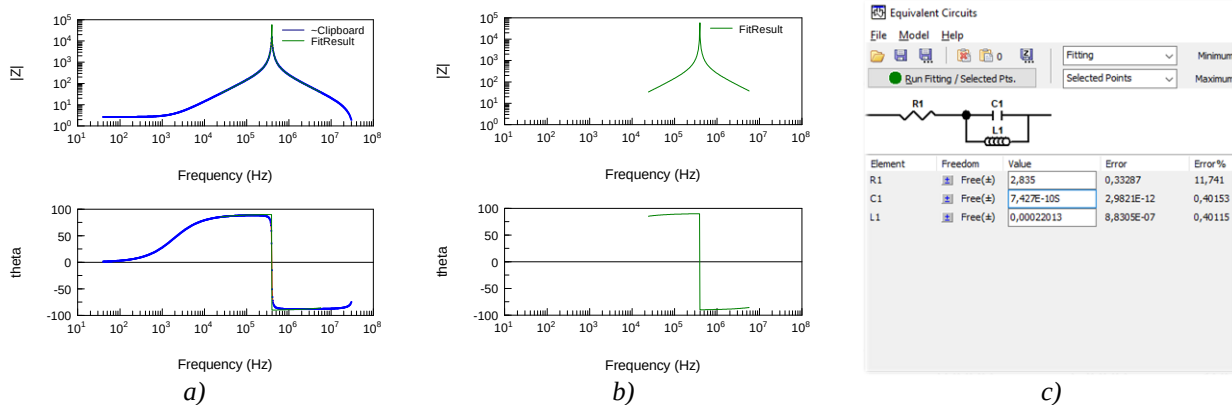
Pomocí kurzorů (menu 7)) si tedy v ZView pro následné fitování vybereme pouze oblast dat v okolí sériové rezonance RLC členu. Nakreslíme si příslušný ekvivalentní obvod a spustíme simulaci.



Obrázek 18: a) Naměřená data, b) Simulované spektrum sériového RLC členu, c) Ekvivalentní obvod RLC členu a příslušné hodnoty elektrických prvků

d. Paralelní RLC člen

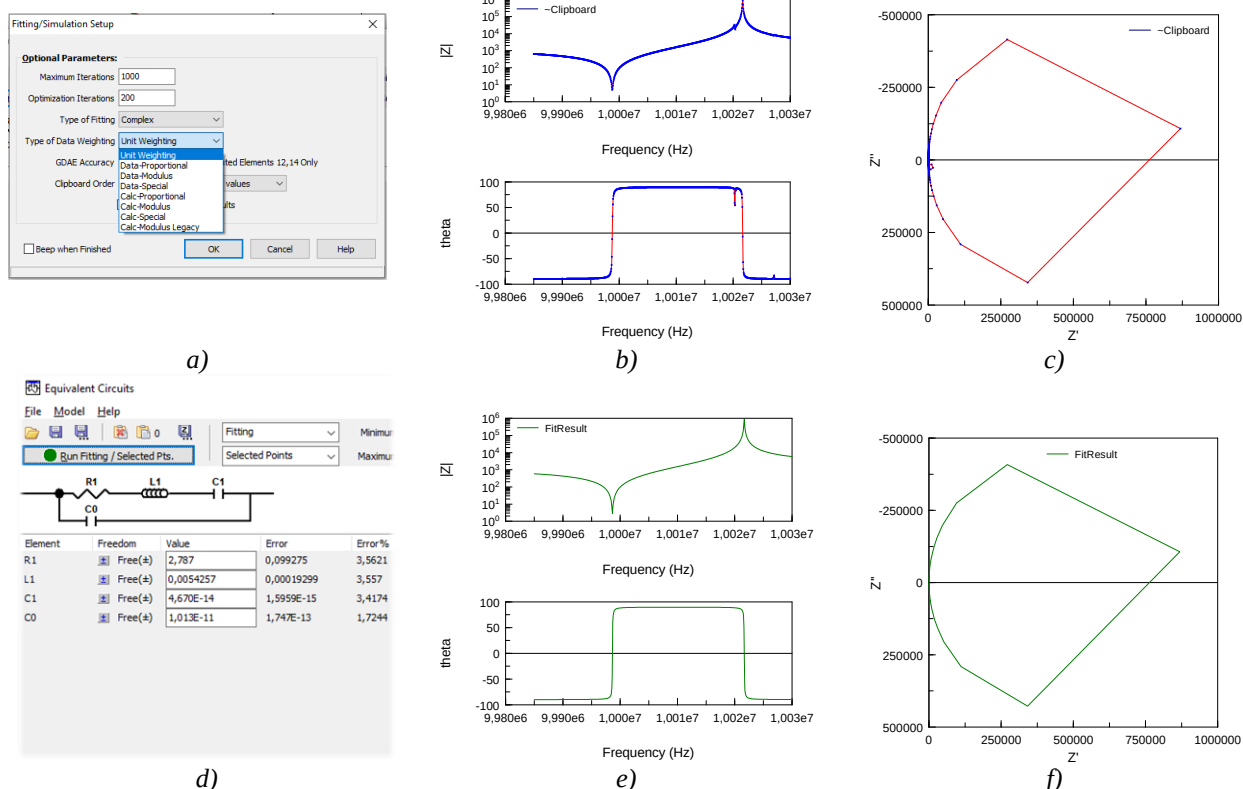
Obdobným způsobem jako v předchozím případě si ukážeme paralelní RLC člen, tvořený stejnými prvky, akorát v paralelním uspořádání. Opět si vybereme pouze oblast dat, která nevykazuje příliš mnoho parazitních vlivů, tedy zhruba od frekvence 10 kHz až do frekvence 10 MHz. Jelikož se jedná o stejné elektrické součástky – keramický kondenzátor a cívka, měli by námi získané hodnoty odpovídat hodnotám z předchozího příkladu. Zhodnocení ponecháme na samotném čtenáři.



Obrázek 19: a) Naměřená data, b) Simulovaná data v oblasti paralelní rezonance, c) Ekvivalentní obvod včetně hodnot příslušných součástek

e. QCM rezonátor

Jako poslední si ukážeme naměřené impedanční spektrum QCM rezonátoru. Nebudeme zde zabíhat příliš do teorie, jak QCM rezonátor funguje, což byste měli vědět již z přednášek, ale předvedeme si pouze praktickou ukázkou a zaměříme se především na technická hlediska fitování QCM rezonátoru v ZView. Ekvivalentní obvod QCM rezonátoru se skládá ze sériové větve RLC členu a paralelní kapacity (C_0), jde o tzv. Butterworth-Van Dyke (BVD) reprezentaci. Pro fitování ekvivalentního obvodu v případě QCM rezonátoru je nutné vybrat pouze úzkou oblast okolo sériové a paralelní rezonance (frekvenci vynášíme v lineárním měřítku) a správný nástřel parametrů ekvivalentního obvodu. Vhodné je také v podokno pro nastavení parametrů fitu přepnout metodu vážení dat na *Unit Weighting*.



Obrázek 20: a) Přepnutí metody vážení dat, b) Naměřené spektrum v Bodeho reprezentaci, c) Naměřené spektrum v Nyquistově reprezentaci, d) Parametry ekvivalentního obvodu, e) Simulované spektrum v Bodeho reprezentaci, f) Simulované spektrum v Nyquistově reprezentaci