

Senzory a Měření - protokol 6 - měření impedancí

Vypracoval **Vojtěch Michal** 15. dubna 2021, "měření" provedeno dle videa ze dne 6.4. 2020.

Záznam z měření na Youtube:

<https://www.youtube.com/watch?v=QL2J47hfPA> https://www.youtube.com/watch?v=u-6wo_LpU30 <https://www.youtube.com/watch?v=9WzXOeMrdkQ> <https://www.youtube.com/watch?v=DML2v48wRZc> <https://www.youtube.com/watch?v=JnbYcvqesG0>

Návod k úloze na Moodle: https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/279155/mod_folder/content/0/08_impedance%20a%20hladina_2020%20%281%29.pdf

Domácí příprava

- Z fázorového diagramu odvodíte vztah pro výpočet ztrátového činitele kondenzátoru $\tan \delta$ pro jeho sériové a paralelní náhradní schéma. **Řešení:** Pro sériovou náhradu kondenzátoru platí $\tan \delta = \frac{|U_R|}{|U_S|} = \frac{IR}{I \frac{1}{\omega C}} = R\omega C$.

Pro paralelní platí $\tan \delta = \frac{|I_R|}{|I_C|} = \frac{\frac{U}{R}}{U\omega C} = \frac{1}{\omega RC}$.

- Jak určíte parametry měřeného kondenzátoru (C_x , G_x) z reálné a imaginární složky výstupního napětí U_2 v zapojení dle obr. 1 v zadání? **Řešení:** Na obrázku v zadání je zapojení s

paralelní náhradou kondenzátoru. Platí $Z_X = \frac{1}{\frac{1}{j\omega C_x G_x} + \frac{1}{G_x}} = \frac{1}{G_x + j\omega C_x}$. Analýzou obvodu zjistím

$U_2 = -R_N \cdot \frac{U_1}{Z_X} = -R_N \cdot U_1 (G_x + j\omega C_x)$, pakliže je U_1 reálné, lze osamostatnit hledané složky kapacitní

impedance: $G_x = -\frac{\operatorname{Re}\{U_2\}}{R_N U_1}$, $C_x = -\frac{\operatorname{Im}\{U_2\}}{R_N U_1 \omega}$.

- Vypočtete přibližnou kapacitu válcového kapacitního snímače výšky hladiny dle obr. 2., je-li naplněn do $\frac{1}{2}$ jeho aktivní výšky destilovanou vodou. **Řešení:** Pro kapacitu válcového kondenzátoru platí $C = \epsilon \frac{2\pi l}{\ln \frac{D_1}{D_2}}$,

kde $D_{1,2}$ jsou po řadě poloměry vnější a vnitřní elektrody (tedy $D_1 > D_2$, protože kapacita je jistě kladná a tak musí být kladný i logaritmus), l je délka válce, ϵ je permitivita dielektrika mezi elektrodami. Pakliže je mezera mezi elektrodami ze dvou různých materiálů různé relativní permitivity, naleznou celkovou kapacitu jako součet kapacit obou částí, protože si mohou představit, že se jedná o dva kondenzátory paralelně. Do série s nimi je zapojena kapacita izolace.

```
outer = 18e-3;  
inner = 12e-3;  
insulation = 0.2e-3;
```

```
perm_air = 8.854e-12;
perm_water = 81 * perm_air;
perm_ins = 6 * perm_air;
```

```
length = 250e-3;
```

```
water_height = 0.5; %TODO change here to set a different height of water column.
% Use relative value from [0, 1]
```

```
C_air = 2*pi*length * (1-water_height) * perm_air / log(outer/(inner+insulation))
```

```
C_air = 1.7879e-11
```

```
C_water = 2*pi*length * water_height * perm_water / log(outer/(inner+insulation))
```

```
C_water = 1.4482e-09
```

```
C_ins = 2*pi*length * perm_ins / log((inner+insulation)/inner)
```

```
C_ins = 5.0484e-09
```

```
C = (C_ins^-1 + (C_air + C_water)^-1)^-1 %1.13 nF pro polovinu sloupce
```

```
C = 1.1362e-09
```

- Z fázorového diagramu odvoďte vztah pro výpočet činitele jakosti cívky Q pro její sériové a paralelní náhradní schéma. **Řešení:** Činitel jakosti je převrácená hodnota ztrátového činitele. Pro sériové zapojení

je společný proud, takže $Q = \frac{1}{\tan \delta} = \frac{U_L}{U_R} = \frac{I\omega L}{IR} = \frac{L\omega}{R}$. Pro paralelní zapojení je společné napětí, takže

$$Q = \frac{I_L}{I_R} = \frac{R}{\omega L}.$$

- Jak určíte parametry měřené cívky (L_x , R_x popř. Q_x) z reálné a imaginární složky výstupního napětí U_2 v zapojení dle obr. 3 v zadání? **Řešení:** Postup odvození je identický jako v minulém případě, vychází z aplikace metody uzlových napětí na schéma. Platí $U_2 = -(R_x + j\omega L_x) \frac{U_1}{R_N}$. Pakliže bude budící napětí U_1 reálné (což lze BÚNO předpokládat, protože pro měření impedance je pro nás důležité znát fázový rozdíl mezi fázory, nezáleží ale na jejich absolutní fázi (dokonce ani moc nedává smysl o absolutní fázi hovořit). Poté $R_x = -\frac{\operatorname{Re}\{U_2\}}{U_1} R_N$ a $L_x = -\frac{\operatorname{Im}\{U_2\}}{U_1 \omega} R_N$. Pro nalezení činitele jakosti se přímo dosadí vypočtené L a R do vztahů odvozených výše, úhlová frekvence ω je známá frekvence použitá pro měření.

Poznámky

Voda má permitivitu o dva řády vyšší jak vzduch.

Impedanci měřicí přístroje (jako HAMEG HN8118) podporují výběr náhradního modelu - měření kapacitní i induktivní impedance pro paralelní i sériové náhradní schéma. Před měřením lze snížit vliv parazitních

vlastností vodičů a kontaktů zkratováním a rozpojením měřicích svorek. Přístroj si nakalibruje short i open data a při skutečném měření pak kompenzuje chybu způsobenou neideálními vlastnostmi.

Pro kapacitní impedanci se typičtěji používá paralelní náhradní model, ten i lépe odpovídá představě elementu kondenzátoru jako ideálního kapacitoru, vedle něhož "na okraji" teče malý svodový proud. Pro cívkou se hodí seriové náhradní zapojení intuitivně modelující skutečnost, že odpor a indukční vlastnosti elementu vinutí jsou "za sebou".

Synchronní detektor měří reálnou složku signálu, pakliže je řídicí signál (reference) ve fázi se vstupem. Pro měření imaginární složky je řízení posunuté o $\frac{\pi}{2}$. Na výstupu po low pass filtraci má skoro stejnosměrný signál (ovšem filtrace není dokonalá, odstraní se jen vysoké frekvence způsobené ostrými hranami na výstupu přepínače) se střední hodnotou z intervalu $\pm U_{max}$, jehož velikost je funkcí fázového posunu mezi vstupem a referencí. Pakliže je fázový rozdíl mezi vstupem a referencí 0 respektive π , poté výstupní napětí je maximální respektive minimální a jedná se o $\pm ARV$ (aritmetická střední hodnota) vstupního signálu. Pakliže je fázový posun $\frac{\pi}{2}$, poté má výstupní signál ARV blízkou nule, protože se přepínač v synch. detektoru přepne vždy uprostřed kladné i záporné půlvlny a tedy všechna RMS, která by se stihla naintegrovat za první čtvrtinu periody, se zase odečte kvůli náhlé změně znaménka. Libovolné další hodnoty fázového posunu lze dosáhnout jako superpozice dvou kolmých sinusovek (reálné a imaginární složky), proto měřením ve dvou kolmých směrech získáme hledané hodnoty reálné a imaginární složky impedance. Faktu, že synchronní detektor generuje v principu aritmetickou střední hodnotu, je potřeba věnovat pozornost při návrhu buzení pro měření. Pro harmonický signál (což v našem případě jistě všechny jsou) platí $1.11 \text{ AVR} = \text{RMS}$, toho se užije v úloze 1. Pro příklad průběhů na synchronním detektoru viz https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/279155/mod_folder/content/0/08_impedance%20a%20hladina%20-%20p%C5%99%C3%ADloha.pdf

Buzení obvodu i generování reference pro synchronní detektor musí být z téhož generátoru, aby bylo zajištěno pokud možno precizní nastavení fázového posunu. Nepřesnost fázového posunu povede na hrubé chyby patrné v úlohách A i B. Využití kapacitního principu měření hladiny je robustnější než plovákové metody, vhodné je proto např. pro měření hladiny paliva v nádržích letadel.

Úkoly měření

A) Z naměřených složek výstupního napětí určete pro kapacitní hladinoměr velikost parametrů náhradního zapojení. Použijte též měření RLC-metrem pro ověření.

V odměrném válci je cca 350 mm vody (odečtení od oka). Pro měření RLC metrem HAMEG je obvod buzen z $U_1 = 1 \sin(1500 \cdot 2\pi t) \text{ V}$. Při nastavení paralelního náhradního modelu přístroj měří $C_p = 562.5 \text{ pF}$ a $R_p = 1.55 \text{ M}\Omega$ bez uzemnění stínění kapacitního hladinoměru. Po uzemnění stínění je měřeno $C_p = 533.25 \text{ pF}$ a $R_p = 1.59 \text{ M}\Omega$. To jsou referenční údaje pro pozdější měření.

Vlastní měření pomocí obvodu na obr. 1 v zadání - invertující zesilovač, kde ve ZV je referenční rezistor $R_N = 100 \text{ k}\Omega$, v přímé vazbě je měřena impedance Z_X . Převodník $Z \Rightarrow U$ je buzen harmonickým napětím z generátoru, jež současně bude sloužit jako reference pro měření reálné složky (vliv ohmického odporu hladinoměru) synchronním detektorem. Použitá frekvence $f = 1592 \text{ Hz} \Rightarrow \omega = 2\pi f = 10000 \text{ rad.s}^{-1}$ usnadňuje

odečítání měřené kapacity. Dále volíme $R_N = 100 \text{ k}\Omega$. Podle výše odvozeného vzorce $C_x = -\frac{\text{Im}\{U_2\}}{R_N U_1 \omega}$. Protože $\text{Im}\{U_2\}$ ze synchronního detektoru je v AVR (viz poznámky) a já chci hezký přepočítání mezi U_2 a C_x , volíme buzení $U_1 = 1 \text{ AVR}$, tedy 1.11 RMS a 1.57 Vpp . Závěr: použitím $U_1 = 1.57 \sin(1592 \cdot 2\pi t) \text{ V}$ je vztah pro hledanou kapacitu $C_x = -\frac{\text{DC reading ze synch. det}}{10^5 \cdot 10^4} \Rightarrow C_x = |\text{reading}| \text{ nF}$. Měření ohmického odporu se machinace s

frekvencí netýkají, ten je, jak vidno ze vztahu $G_x = -\frac{\text{Re}\{U_2\}}{R_N U_1}$ na frekvenci nezávislý.

Měřené hodnoty bez stínění: $\text{Re}\{U_2\} = -123 \text{ mV}$, $\text{Im}\{U_2\} = -554.5 \text{ mV}$, měřené hodnoty s uzemněným stíněním $\text{Im}\{U_2\} = -526 \text{ mV}$. Dosazením do odvozených vztahů určíme $G_x = \frac{0.132}{10^5} \Rightarrow R_x = 813 \text{ k}\Omega$ a $C_x = 554.5 \text{ pF}$ nebo

$C_x = 526 \text{ pF}$ v závislosti na přizemnění stínění. Měřená kapacita velmi dobře odpovídá očekávané hodnotě. Měřený odpor odpovídá pouze řádově v důsledku hrubé chyby metody, kdy referenční obdélník pro synchronní detektor nebyl přesně ve fázi a přesně o 90° posunutý vůči generovanému signálu, nýbrž byl cca o 7° odchýlen. Protože v této úloze $\text{Im} \gg \text{Re}$, nepřenositelný fázový posun příliš neublížil měření imaginární složky, ale výrazně zkreslil reálnou.

B) Totéž proveďte pro měření parametrů náhradního schématu reálné cívky.

RLCmetr HAMEG měří $L_x = 50.36 \text{ mH}$ a $R_x = 16 \text{ }\Omega$ pro frekvenci 1.5 kHz . Hodnota seriového odporu je frekvenčně závislá. Pro ruční měření a přepočítání se použijí vztahy odvozené v domácí přípravě

$$R_x = -\frac{\text{Re}\{U_2\}}{U_1} R_N \text{ a } L_x = -\frac{\text{Im}\{U_2\}}{U_1 \omega} R_N.$$

Pro měření převodníkem $Z \Rightarrow U$ a synchronním detektorem je vhodnější zaměnit odpor $R_N = 1 \text{ k}\Omega$ a měřenou impedanci Z_x . Induktivní impedance se seriovým náhraním modelem je vhodná k zapojení do ZV kolem operačního zesilovače, protože jsou pak Re a Im výstupního napětí U_2 přímo úměrné Re a Im měřené impedance. Na první pokus měřeno $\text{Im}\{U_2\} = -476 \text{ mV}$, což je projev zatížení generátoru. Induktorem teče mnohem vyšší proud než kondenzátorem, výstupní napětí generátoru tedy poklesá. Po přenastavení generátoru tak, aby na výstupu měl požadovaných efektivních 1.11 V vyjde $\text{Im}\{U_2\} = -507 \text{ mV} \Rightarrow L_x = 50.6 \text{ mH}$ a to řádově sedí s očekáváním.

Reálná složka je $\text{Re}\{U_2\} = -62 \text{ mV} \Rightarrow R_x = 62 \text{ }\Omega$, což je velká chyba ve srovnání s očekávanými šestnácti ohmy. Chyba je způsobena stejnou hrubou chybou jako v úloze A - nepřesná hodnota fázového posunu.

