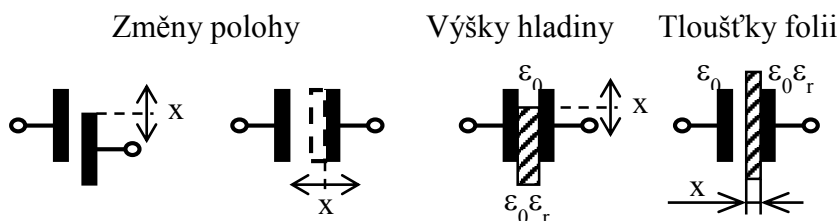


8. MĚŘENÍ IMPEDANCÍ, KAPACITNÍ HLADINOMĚŘ VIR VERZE

Úvod

Kapacitní snímače vyhodnocují změnu kapacity vyvolanou změnou polohy elektrod, permitivity dielektrika nebo přiblížením pozorovaného předmětu. Mohou detekovat jak kovové, tak i nekovové materiály. Používají se např. pro měření:



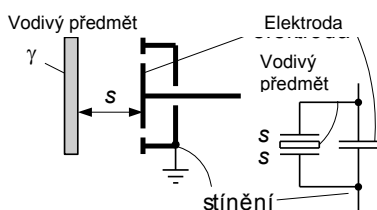
Praktické provedení:



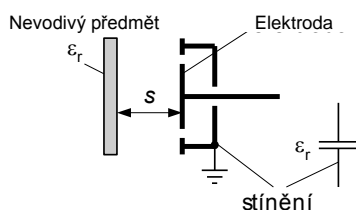
Snímač posunutí 10 mm s přesností 0,01 %

Snímače hladiny

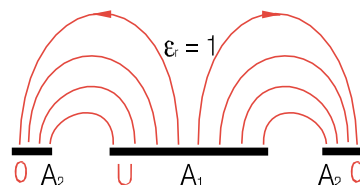
Umožňují i bezdotykové snímání přítomnosti popř. polohy vodivých i nevodivých předmětů (ovlivnění kapacity změnou permitivity okolí – změna tvaru el. pole v okolí elektrod A_1 a A_2).



$$C_v = f\left(\frac{1}{2s}\right)$$



$$C_v = f\left(\epsilon_r, \frac{1}{s}\right)$$



Praktické provedení:



SICK
řada CQ



TURCK
řada BC10-M30K



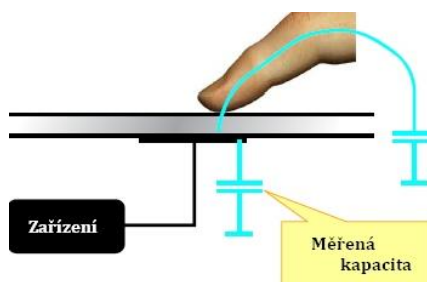
řada KI – kov

ifm

řada KD-plast



Na principu kapacitních senzorů pracují dotykové displeje

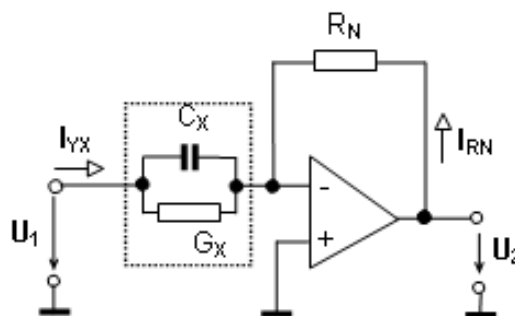


Otázky k úloze (domácí příprava)

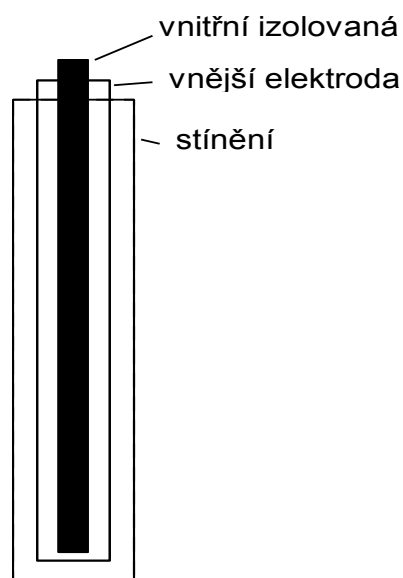
- Z fázorového diagramu odvoďte vztah pro výpočet ztrátového činitele kondenzátoru $\text{tg}\delta$ pro jeho sériové a paralelní náhradní schéma.
- Jak určíte parametry měřeného kondenzátoru (C_x , G_x popř. $\text{tg}\delta_x$) z reálné a imaginární složky výstupního napětí U_2 v zapojení dle obr. 1? (Příslušné vztahy odvoďte, vycházejte z rovnosti $I_{RN} = -I_{ZX}$ a oddělte reálnou a imaginární složku měřeného výstupního napětí.)

Poznámka: Napětí U_1 lze při výpočtu považovat za reálné, protože slouží jako reference.

- Vypočtete přibližnou kapacitu válcového kapacitního snímače výšky hladiny dle obr. 2., je-li naplněn do $\frac{1}{2}$ jeho aktivní výšky destilovanou vodou.



Obr. 1. Princip zapojení převodníku pro měření parametrů kondenzátoru

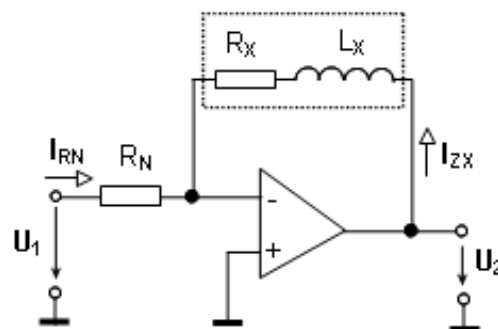


| | |
|------------------------------------|------------------|
| měřená kapalina | destilovaná voda |
| ϕ vnitřní elektrody D2 | 12 mm |
| ϕ vnější elektrody D1 | 18 mm |
| tloušťka izolace vnitřní elektrody | 0.2 mm |
| relativní permitivita vody | 81 |
| vodivost vody | neudána |
| rel. permitivita izolace | cca 6 |
| aktivní výška snímače | 250 mm |

Obr. 2. Náskres uspořádání kapacitního snímače

- Z fázorového diagramu odvoďte vztah pro výpočet činitele jakosti cívky Q pro její sériové a paralelní náhradní schéma.
- 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? (Příslušné vztahy odvoďte, vycházejte z rovnosti $I_{RN} = -I_{ZX}$ a oddělte reálnou a imaginární složku měřeného výstupního napětí.)

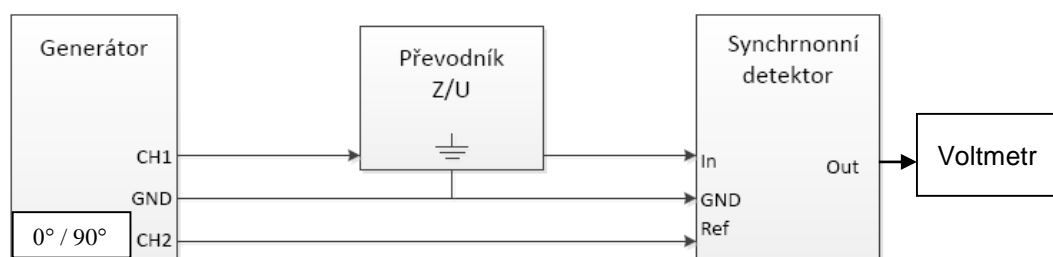
Poznámka: I v tomto případě lze při výpočtu považovat napětí U_1 za reálné, protože slouží jako reference.



Obr. 3. Princip zapojení převodníku pro měření parametrů cívek

Úkoly měření

- A) Z naměřených složek výstupního napětí $\text{Re}(U_2)$ a $\text{Im}(U_2)$ vektorvoltmetrem určete pro kapacitní hladinoměr velikost parametrů náhradního zapojení (hodnoty dle videa). Použijte též měření RLC-metrem pro ověření. Viz body 1 a 2.
- B) Totéž proveďte pro měření parametrů náhradního schématu reálné cívky. Viz body 2 a 3.



Obr. 5. Blokové schéma měřiče impedance se synchronní detekcí a generátorem

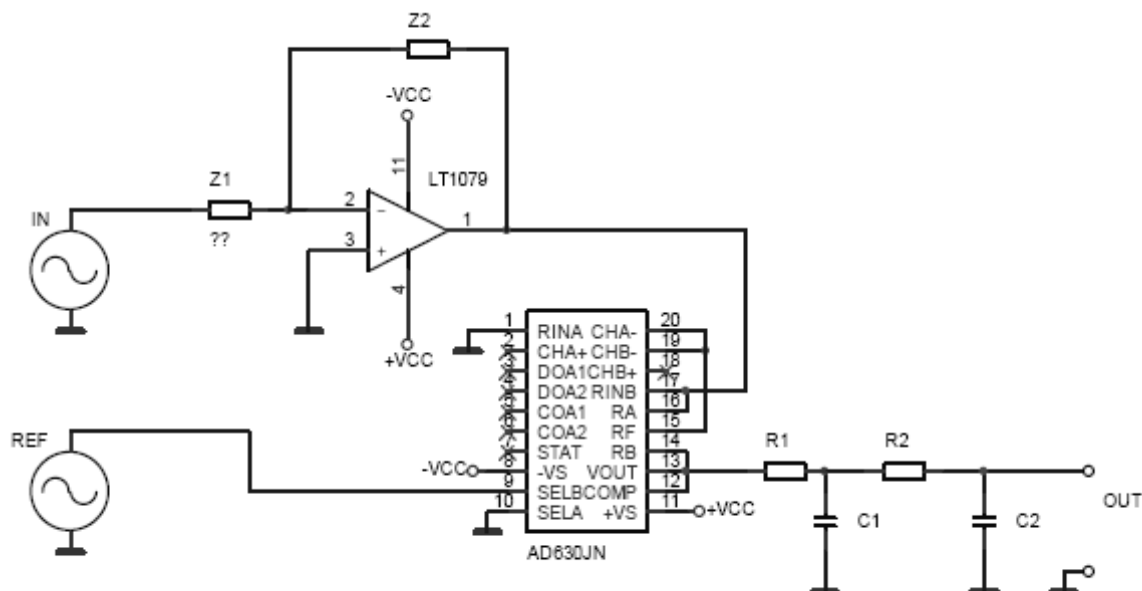
- Nejprve měříme pro jednu úroveň hladiny pomocí převodníku impedance na napětí (Obr. 1 a 5) se synchronní detekcí. Použijte paralelní náhradní schéma C_X , G_X , měříme při kmitočtu **1592 Hz**, $R_N = 100 \text{ k}\Omega$. Prozkoumejte vliv zapojení stínění snímače. Porovnejte průběhy na vstupu a výstupu synchronního detektoru.
- Pro tu samou hladinu jako v bodě 1) měříme kapacitu snímače též RLC metrem HAMEG při frekvenci *blízké* hodnotě 1592 Hz.
- Měřičem s převodníkem podle Obr. 3 a 5 změřte indukčnost a ztrátový odpor předložené cívky. Použijte sériové náhradní schéma L_X , R_X , měříme při kmitočtu **1592 Hz**, $R_N = 1000 \Omega$. Zakreslete do sešitu průběhy napětí za řízeným usměrňovačem (v poloze Re i Im).
- Parametry těže cívky změříme RLC metrem HAMEG při frekvenci *blízké* hodnotě 1592 Hz.

Poznámky k měření:

K bodu 1: Pro nastavení hladiny ve snímači je využit principu spojených nádob. Použijte paralelní náhradní schéma C_X , G_X , měřte při kmitočtu 1592 Hz, $R_N = 100 \text{ k}\Omega$. Při měření imaginární složky využíváme funkce dvoukanalového generátoru pro posun referenčního signálu 90° (tj. kanál 2 posunut o 90° oproti kanálu 1). Pro kapacitu válcového kondenzátoru platí:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{2\pi l}{\ln(D_1 / D_2)}$$

K bodu 1 a 3: Přípravek, jehož zapojení je na obr. 6, obsahuje jak převodník $Y \rightarrow U$ popř. $Z \rightarrow U$ (dle volby prvků Z_1 a Z_2), tak synchronní detektor. Vnitřní zapojení obvodu AD630 (*řízeného usměrňovače*) a další podrobnosti (doporučená zapojení pro různé aplikace) lze nalézt např. na [www stránce http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD630.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD630.pdf).



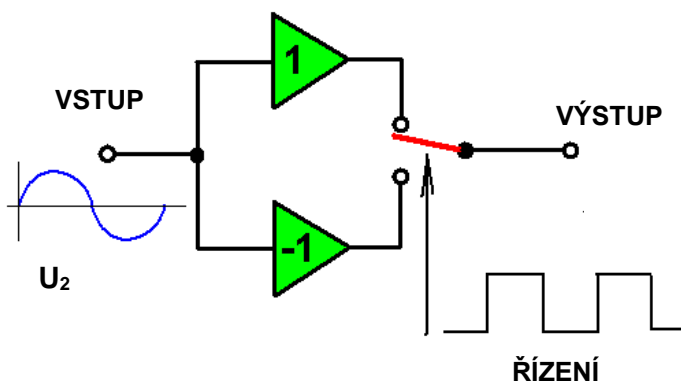
Obr. 6. Zapojení přípravku pro měření parametrů kondenzátoru či cívky

Volbou $\omega = 10^3 \text{ s}^{-1}$ popř. $\omega = 10^4 \text{ s}^{-1}$ a $U_1 = 1 \text{ V}$ se dosáhne toho, že hodnoty prvků náhradního schématu (C_X , G_X , popř. L_X , R_X) se vypočtou z příslušných složek výstupního napětí pouhým vynásobením mocninami 10.

Měření reálné a imaginární složky výstupního napětí synchronním detektorem

Pro měření reálné a imaginární složky výstupního napětí U_2 využíváme řízený usměrňovač – synchronní detektor.

SPÍNAČOVÝ SYNCHRONNÍ DETEKTOR



Obr. 7. Řízený usměrňovač - spínačový synchronní detektor

Jako referenční napětí pro řízení přepínače použijeme při měření reálné složky napájecí napětí z generátoru (napětí U_1), při měření imaginární složky použijeme pro řízení usměrňovače napětí výstupu napájecího generátoru posunuté o 90° proti napětí U_1 . V příloze jsou zobrazeny modelované průběhy na výstupu řízeného usměrňovače pro různé kombinace obvodových prvků $Z1$ a $Z2$ na obr. 6.

Odvození výstupu synchronního detektoru a princip měření Re a Im složky

Jednou z možností, jak odvodit výstupní **signál** synchronního detektoru, resp. vektorvoltmetru, je **vynásobení** jednotkového referenčního (řídícího) signálu $u_R(t)$ signálem měřeným $U_1 = u_X(t)$.

Referenční signál $u_R(t)$ s úhlovou frekvencí ω zapíšeme jako Fourierovu řadu – jedná se vlastně o obdélníkový signál s amplitudou 1 a nulovou stejnosměrnou složkou (=alternujeme zesílení $+1$ a -1):

$$u_R(t) = \frac{4}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k} \sin(k \omega t) \quad k \text{ je liché číslo } (1, 3, 5 \dots)$$

Měřený harmonický signál $U_1 = u_X(t)$ je na stejné frekvenci a je obecně fázově posunutý vůči referenčnímu:

$$u_X(t) = U_{X,m} \sin(\omega t + \varphi)$$

Po vynásobení těchto dvou signálů a aplikaci trigonometrického vzorce

$$\sin(a) \sin(b) = \frac{1}{2} [\cos(a-b) - \cos(a+b)],$$

dostaneme při rozepsání prvního členu řady $k=1$ a všech ostatních od $k=3$ výše pro výstupní napětí $U_2 = u_2(t)$:

$$\begin{aligned} u_2(t) &= u_X(t) u_R(t) = U_{X,m} \frac{4}{\pi} \frac{1}{2} \left[\cos\left(\underbrace{\omega t - \varphi - \omega t}_{-\varphi}\right) - \cos\left(\underbrace{\omega t - \varphi + \omega t}_{2\omega t - \varphi}\right) \right] + \\ &+ U_{X,m} \frac{4}{\pi} \frac{1}{2} \sum_{k=3}^{\infty} \frac{1}{k} \left[\cos\left(\underbrace{\omega t - \varphi - k\omega t}_{(1-k)\omega t - \varphi}\right) - \cos\left(\underbrace{\omega t - \varphi + k\omega t}_{(1+k)\omega t - \varphi}\right) \right] = \\ &= \frac{2}{\pi} U_{X,m} \cos \varphi + \text{stř. složky} = U_{2,0} + \text{stř. složky}. \end{aligned}$$

(Haasz, Elektrická měření, str. 145)

Vidíme, že stejnosměrná složka vznikne pouze v prvním členu řady, a vlastně měříme fázi signálu vůči referenčnímu: pro $\varphi=0^\circ$ je výstupní hodnota detektoru maximální, a pro $\varphi=90^\circ$ je hodnota nulová. Střídavé složky potlačíme dolnoproustným filtrem.

Je důležité si uvědomit, že stejnosměrná složka U_2 na výstupu synchronního detektoru, pokud je signál ve fázi, je vlastně střední hodnotou tohoto vstupního napětí:

$$U_2 = u_2(t) = \frac{2}{\pi} U_{X,m} \cos \varphi = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_{X,eff} \cos \varphi.$$

Jak můžeme tedy takovýmto detektorem měřit Re a Im složku?

Je-li signál $u_X(t)$ čistě reálný tj. ve fázi s referenčním signálem, je fáze $\varphi=0^\circ$ a měříme střední hodnotu reálného signálu.

Je-li signál $u_X(t)$ čistě imaginární, tj. v protifázi s referenčním signálem tj. $\varphi=90^\circ$, obdrželi bychom takto na výstupu nulu – což je správně, protože signál nemá žádnou reálnou složku. **Můžeme však změnit fázi referenčního signálu přesně o 90 stupňů**, pak měříme opět hodnotu přesně úměrnou imaginární složce.

Na principu přepínání fáze řízeného usměrňovače funguje nejen použitý převodník impedance-napětí, ale také ostatní aplikace vektorvoltmetrů.

Další možnost odvození výstupu synchronního detektoru je výpočtem integrálu přes půl periody sinusového napětí posunutého o φ . Řízený usměrňovač se chová při měření reálné složky napětí jako násobička posunutého průběhu $u_2(t) = U_{2m}\sin(\omega t - \varphi)$ obdélníkem se střídou 1:1 a s amplitudou +1 a -1, který je ve fázi s napájecím napětím $u_1(t)$; střední hodnota napětí U'_{2s} je v tomto případě úměrná reálné složce výstupního napětí. Pak platí

$$U'_{2s} = \frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} U_{2m} \sin(\omega t - \varphi) dt = \frac{U_{2m}}{\pi} [-\cos(x - \varphi)]_0^{\pi} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_{2ef} \cos \varphi = \operatorname{Re}\{U_2\}$$

Při odvození výsledného výrazu použijte substituci $\omega t = x$, dále dosad'te $\omega = 2\pi/T$, $U_{2m} = U_{2ef}\sqrt{2}$ a použijte vzorec $\cos(\alpha - \beta) = \cos\alpha \cos\beta + \sin\alpha \sin\beta$. Pro měření imaginární složky je třeba násobit výstupní napětí $u_2(t)$ obdélníkem s amplitudou +1 a -1 posunutým oproti napájecímu napětí o $T/4$ (při výpočtu střední hodnoty integrujeme přes půl periody v mezích $T/4$ až $3T/4$). Obdobně jako v předchozím případě pak platí

$$U''_{2s} = \frac{1}{T/2} \int_{T/4}^{3T/4} U_{2m} \sin(\omega t - \varphi) dt = \frac{U_{2m}}{\pi} [-\cos(x - \varphi)]_{\pi/2}^{3\pi/2} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_{2ef} \sin \varphi = \operatorname{Im}\{U_2\}$$

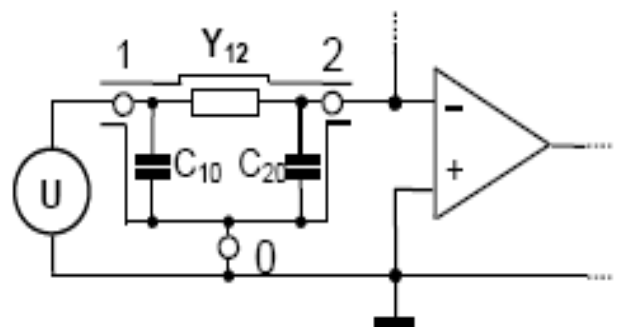
Opět vidíme, že stejnosměrná složka napětí na výstupu řízeného usměrňovače je úměrná střední hodnotě měřeného napětí.

Jak jsme viděli dříve, napětí na výstupu řízeného usměrňovače odpovídající reálné a imaginární složce výstupního napětí převodníku $Z_x \rightarrow U_2$ popř. $Y_x \rightarrow U_2$ má nejen stejnosměrnou, ale i střídavou, je nutné zapojit před vstup číslicového voltmetru ve funkci „měření stejnosměrného napětí“ filtr typu „dolní propust“, který střídavou složku potlačí.

Vliv parazitních kapacit vůči stínění

U použitého převodníku je možné použít třísvorkové připojení měřené admitance. V případě, že stínění měřeného kondenzátoru spojíme se zemní svorkou, parazitní kapacity vůči stínění neovlivní výsledek měření tzv. průchozí admitance Y_{12} . To vyplývá z náhradního schématu na obr. 8.

Rozprostřené kapacity (parazitní svody) mezi měřeným objektem a stíněním (a v případě použití koaxiálních kabelů pro připojení měřeného objektu i jejich kapacitu) lze nahradit parazitními kapacitami C_{10} a C_{20} . Kapacita C_{20} je připojena mezi invertující a neinvertující vstup operačního zesilovače, napětí mezi těmito body je v případě ideálního operačního zesilovače nulové (virtuální nula) a tato parazitní kapacita tedy neovlivní výsledek měření. Kapacita C_{10} je připojena paralelně k referenčnímu zdroji a pokud platí $1/(\omega C_{10}) \gg R_0$ (R_0 je výstupní odpor referenčního zdroje napětí), neovlivní velikost referenčního napětí a tudíž ani výsledek měření. Pro určení velikosti parazitních kapacit C_{10} popř. C_{20} je třeba spojit stínění se svorkou 2 popř. 1. V tom případě se měří paralelní kombinace měřené admitance a příslušné parazitní kapacity. Změřená hodnota kapacity je pak rovna $C_{12} + C_{10}$, popř. $C_{12} + C_{20}$, z čehož lze obě parazitní kapacity snadno určit.



Obr. 8. Náhradní schéma stínění měřené admitance