

Elektrická měření

8. MĚŘENÍ IMPEDANCÍ A ADMITANCÍ (R - L , C - G)

2024/2025

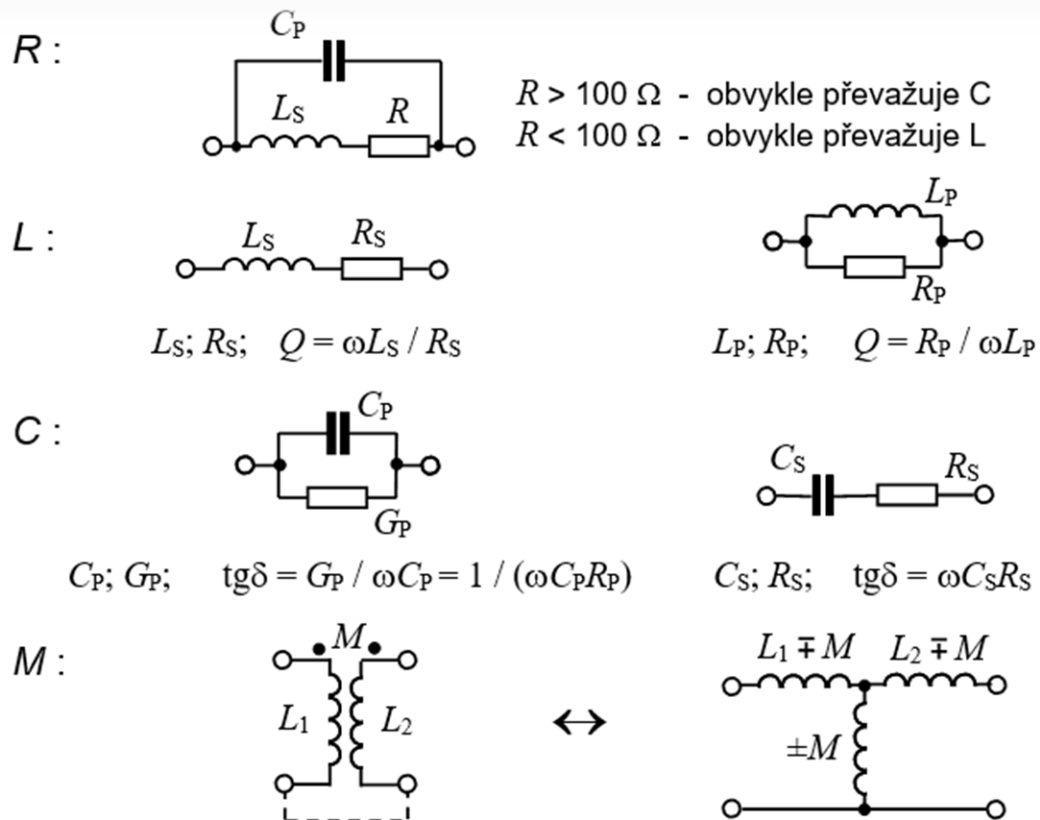
Jakub Svatoš

8. MĚŘENÍ IMPEDANCÍ A ADMITANCÍ (R-L, C-G)

- **Náhradní schémata, etalony**
- **Číslicové měření impedancí a admitancí** – fázorový princip, další metody měření
- **Střídavé můstky** – princip, podmínky rovnováhy
- **Kapacitní a indukčnostní senzory, LVDT** – principy

Náhradní schémata R, L, C, M

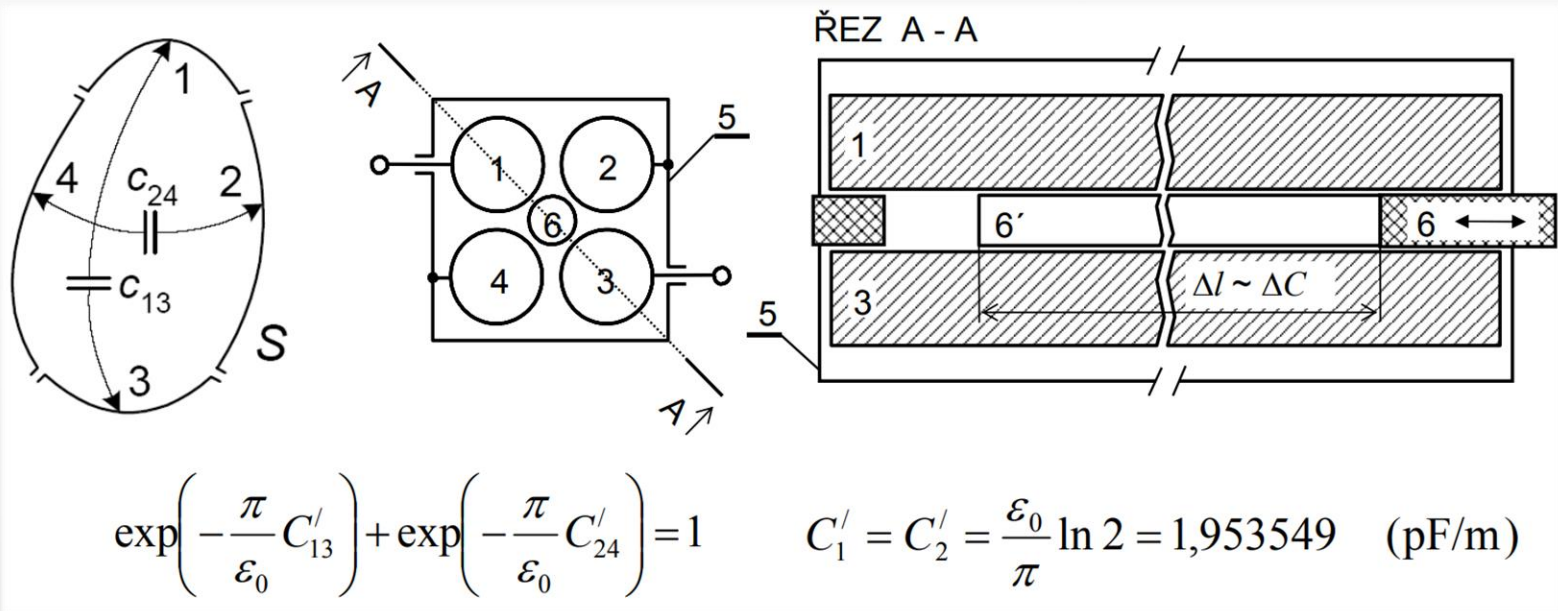
Náhradní schémata odporů, cívek a kondenzátorů



Etalony

Primární etalon kapacity

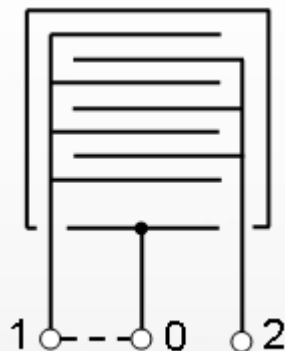
- kvantový Hallův jevu ve střídavém režimu – pouze pár světových pracovišť
- vypočitatelný etalon kapacity – Thompson – Lampard (*Nature*, 1956)



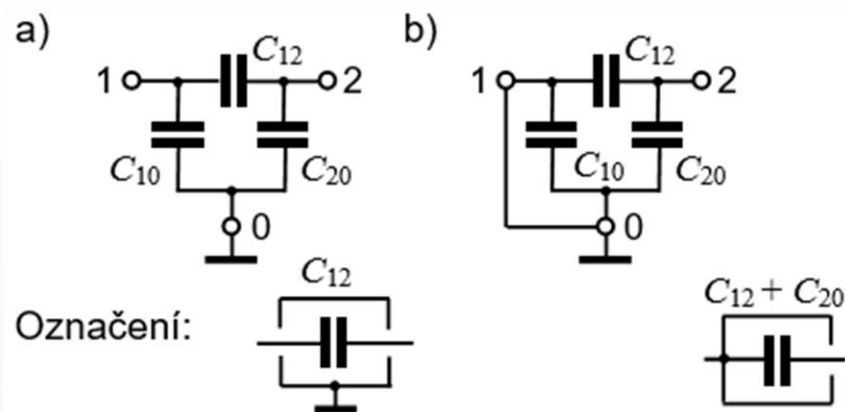
v případě symetrické konfigurace

Sekundární etalon kapacity

- deskové (plněné plynem)
- křemenné



Náhradní schéma:



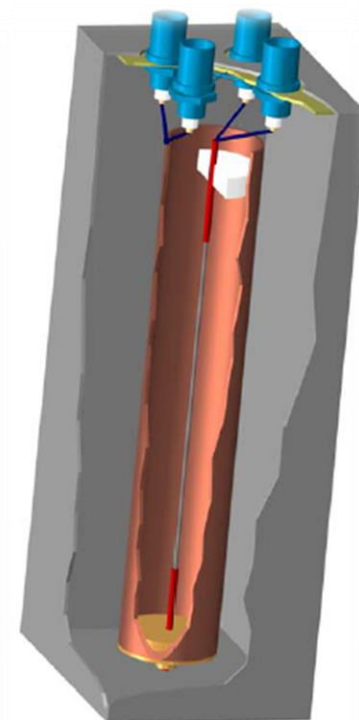
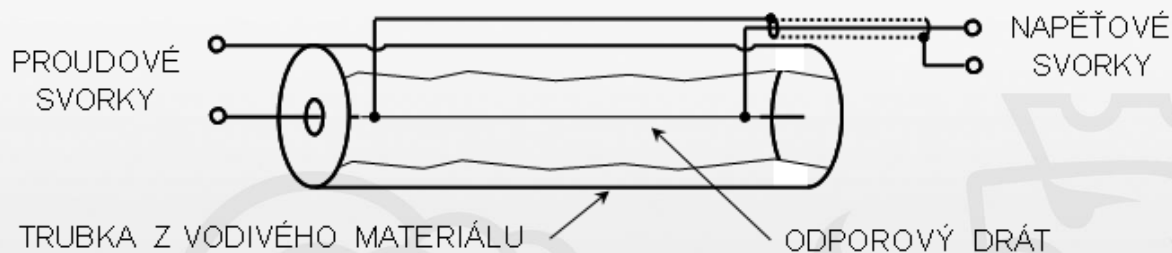
Etalony indukčnosti

- válcové (stínění × závit nakrátko)
- toroidní (stabilní materiál kostry)

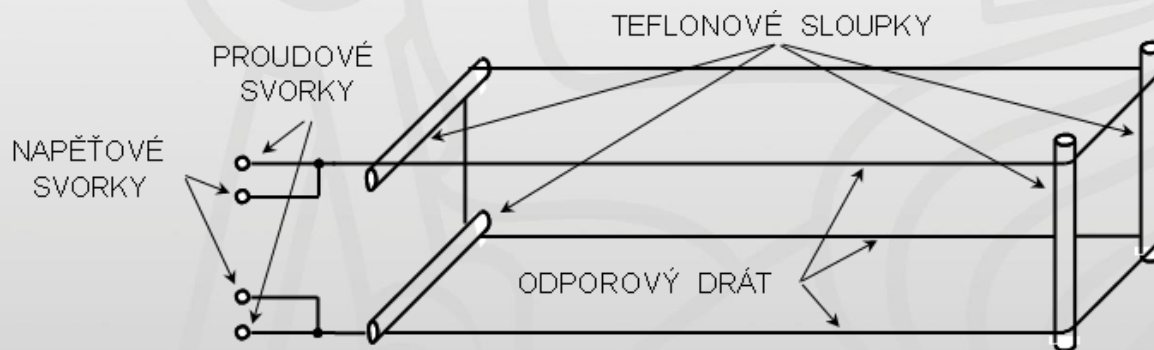
Etalony odporu (pro měření střídavým proudem)

- definovaná frek. závislost $R(f)$, definovaná časová konstanta $\tau = RC$

1) koaxiální (pro malá R a velké proudy viz koaxiální bočník – předn. 4)



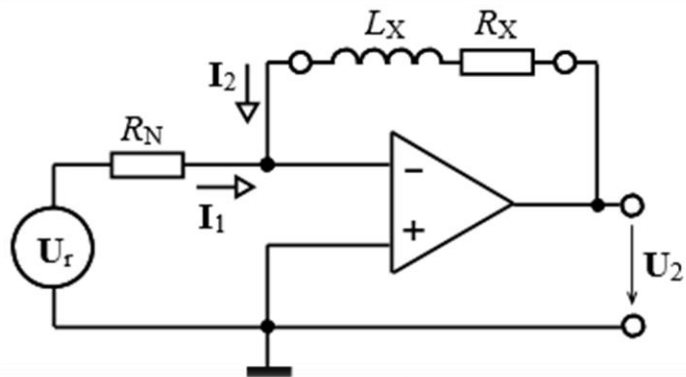
2) definovaná smyčka ("přeložená")



Číslicové měření impedancí a admitancí (fázorový princip)

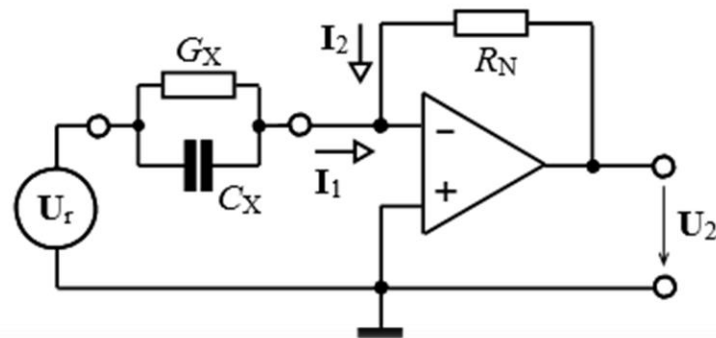
Převodník $U \rightarrow Z$

Měření parametrů cívek:



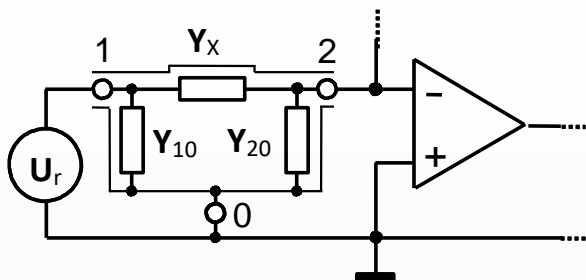
$$\begin{aligned}
 I_1 = -I_2 &\rightarrow \frac{U_r}{R_N} = -\frac{U_2}{(R_X + j\omega L_X)} \\
 &\downarrow \\
 (R_X + j\omega L_X) &= -\frac{U_2}{U_r} R_N \\
 &\downarrow \\
 R_X &= -\frac{\operatorname{Re}\{U_2\}}{U_r} R_N; \quad L_X = -\frac{\operatorname{Im}\{U_2\}}{\omega U_r} R_N
 \end{aligned}$$

Měření parametrů kondenzátorů:

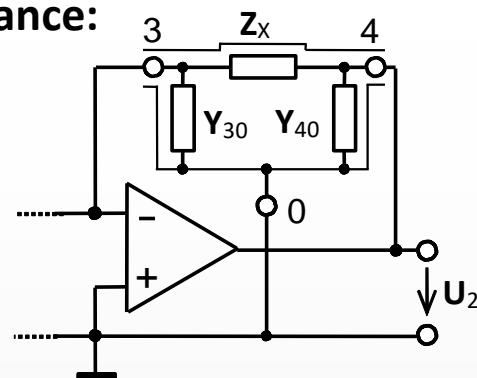


$$\begin{aligned}
 I_1 = -I_2 &\rightarrow U_r (G_X + j\omega C_X) = -\frac{U_2}{R_N} \\
 &\downarrow \\
 (G_X + j\omega C_X) &= -\frac{U_2}{R_N U_r} \\
 &\downarrow \\
 G_X &= -\frac{\operatorname{Re}\{U_2\}}{U_r R_N}; \quad C_X = -\frac{\operatorname{Im}\{U_2\}}{\omega U_r R_N}
 \end{aligned}$$

Stínění a zemnění měřené impedance / admittance:

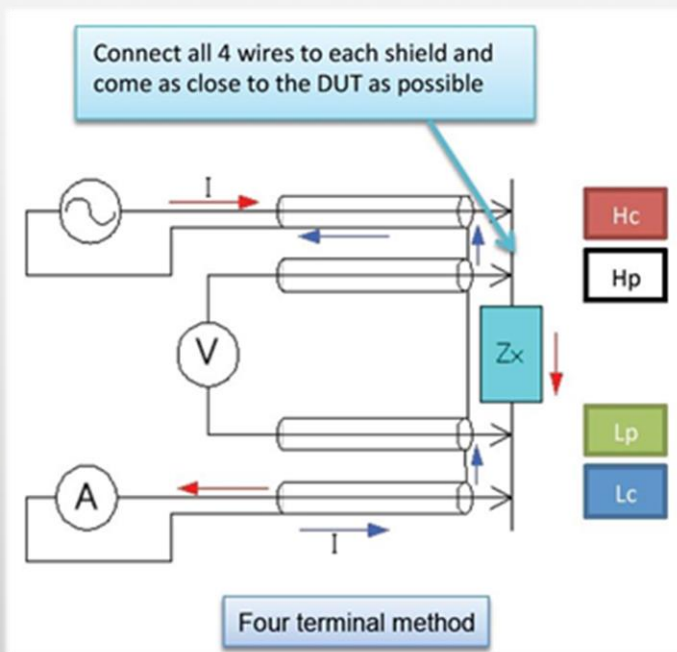


$Y_{10} \parallel U_r$; U_r je ideální zdroj napětí
(Y_{10} neovlivní velikost napětí U_r)
na Y_{20} je nulové napětí, Y_{20} se neuplatní



$Y_{40} \parallel U_2$; U_2 - výstup OZ - ideální zdroj
(Y_{40} neovlivní velikost napětí U_2)
na Y_{30} je nulové napětí, Y_{30} se neuplatní

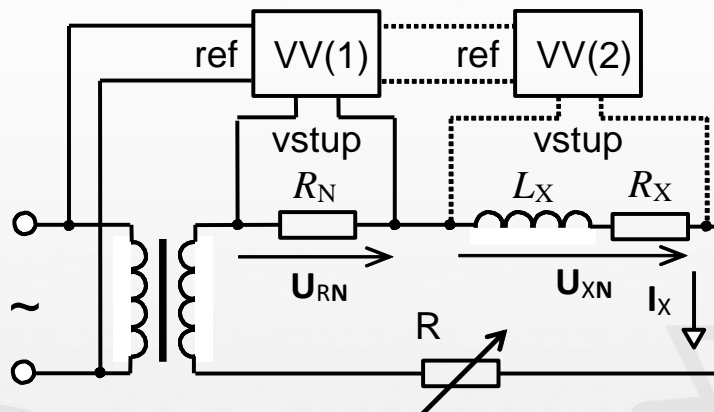
Zapojení komerčního RLC-metru



Čtyř-vodičové připojení: stínění se nesmí uzemnit na dalším místě, vrací se jím měřicí proud, částečně se potlačí indukčnost přívodních vodičů, nebude záviset na okolních předmětech.

Sériová srovnávací metoda (měření cívek s feromagnetickým jádrem) **PRO ILUSTRACI**

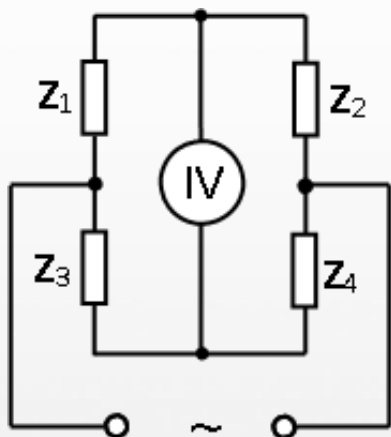
V některých případech není možné použít zapojení s OZ z důvodu velkého proudu nastavujícího pracovní bod cívky



$$\frac{U_X}{(R_X + j\omega L_X)} = \frac{U_{RN}}{R_N} \rightarrow (R_X + j\omega L_X) = \frac{U_X}{U_{RN}} R_N$$

$$\left[\begin{array}{l} \text{Po úpravách (rozložení na reálnou a imag. část):} \\ R_X = \frac{R_N}{U_{RN}^2} (\text{Re}\{U_{RN}\}\text{Re}\{U_X\} + \text{Im}\{U_{RN}\}\text{Im}\{U_X\}) \\ L_X = \frac{R_N}{\omega U_{RN}^2} (\text{Re}\{U_{RN}\}\text{Im}\{U_X\} - \text{Im}\{U_{RN}\}\text{Re}\{U_X\}) \end{array} \right]$$

Střídavé můstky Wheatstoneova typu



$$Z_1 \cdot Z_4 = Z_2 \cdot Z_3$$
$$\begin{array}{cc} \swarrow & \searrow \\ \operatorname{Re} [Z_1 Z_4] = \operatorname{Re} [Z_2 Z_3] & \operatorname{Im} [Z_1 \cdot Z_4] = \operatorname{Im} [Z_2 \cdot Z_3] \end{array}$$

Použití

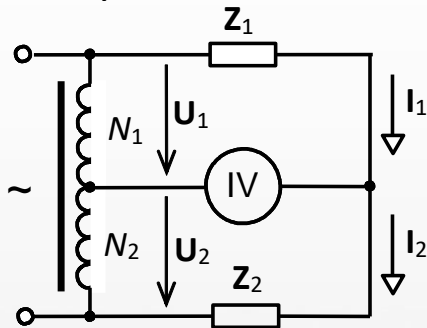
Dříve - měření parametrů cívek a kondenzátorů

Nyní - nevyvážený můstek - kapacitní a indukční senzory;

- můstek se vyváží pro základní kapacitu (indukčnost) senzoru,
- změna kapacity (indukčnost) způsobí rozvážení můstku
- napětí na měřicí diagonále je úměrné rozvážení

Transformátorové můstky

Princip



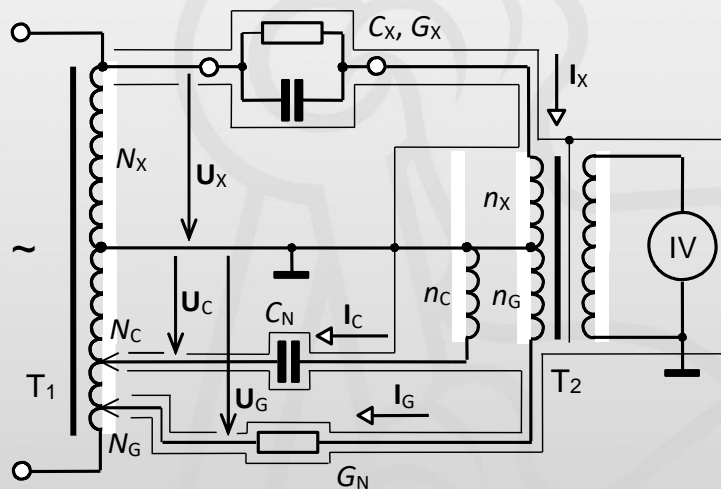
$$I_{IV} = 0 \rightarrow I_1 = I_2 \rightarrow \frac{U_1}{Z_1} = \frac{U_2}{Z_2} \rightarrow \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

2 podmínky rovnováhy: $|Z_1|/|Z_2| = N_1/N_2$; $\varphi_{Z1} = \varphi_{Z2}$

N_1 / N_2 - Indukční dělič - speciální autotransformátor –
(N_1 / N_2 definováno s vysokou přesností 0,01 až 0,0001 %)

Použití:

1) Přesná měření R, L, C



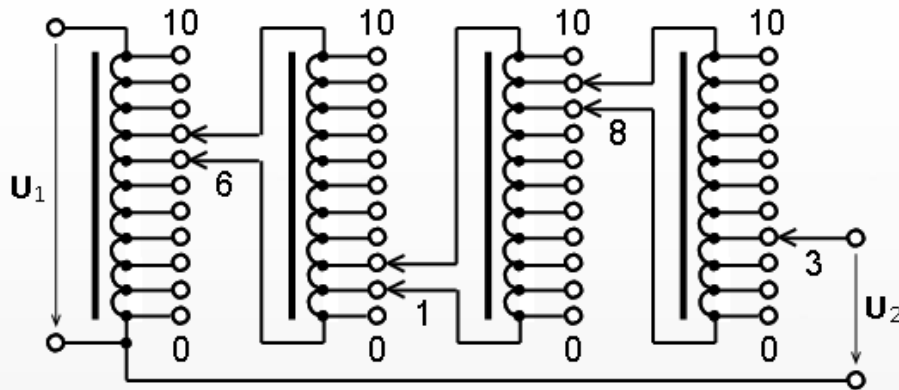
$$n_X I_X = n_G I_G + n_C I_C$$

$$n_X U_X (G_X + j\omega C_X) = n_G U_G G_N + n_C U_C j\omega C_N$$

$$C_X = C_N \frac{N_C}{N_X} \frac{n_C}{n_X};$$

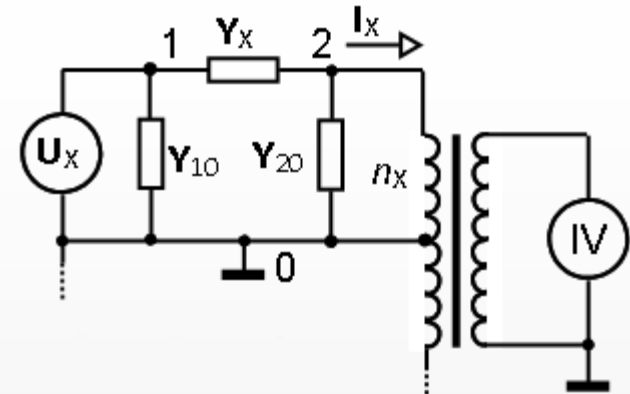
$$G_X = G_N \frac{N_G}{N_X} \frac{n_G}{n_X}$$

Indukční dělič (Kelvin-Varleyovo zapojení)



$$U_2 = 0,6183 U_1$$

Stínění měřené admittance



$Y_{10} \parallel U_X$ - U_X ideální zdroj napětí
 (Y_{10} neovlivní velikost napětí U_X)
 na $Y_{20} \parallel n_X$ ve vyváženém stavu
 nulové napětí, Y_{20} se neuplatní

2) Převodník pro kapacitní a indukčnostní senzory

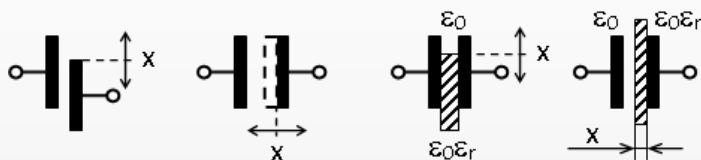
Nevyvážený můstek:

- můstek se vyváží pro základní kapacitu (indukčnost) senzoru,
- změna kapacity (indukčnost) způsobí rozvážení můstku
- napětí na měřicí diagonále je úměrné rozvážení a tedy i změně měřené fyzikální veličiny

Kapacitní a indukčnostní senzory, LVDT

Kapacitní senzory

$$C_X = \frac{S \varepsilon_0 \varepsilon_r}{d}$$



Použití:

- měření výšky hladiny
- měření tloušťky fólie

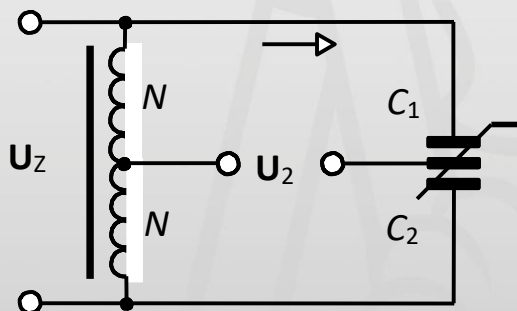
Diferenční kapacitní senzory



Použití:

- senzory posunutí (úchylkoměry)
- senzory tlaku

Obvod vyhodnocení - princip

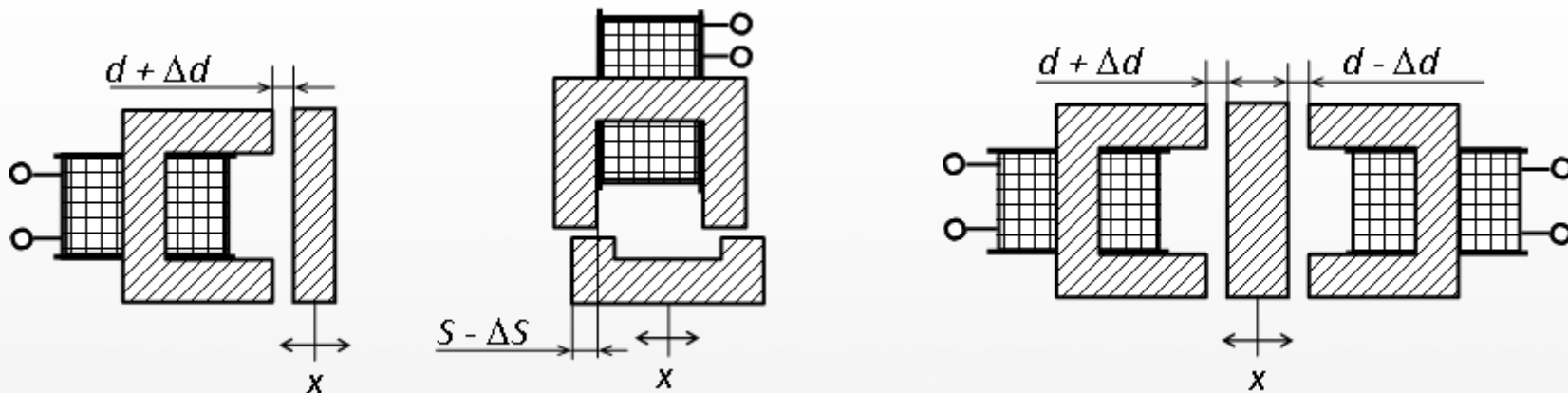


$$U_2 = \frac{U_Z}{2} - U_Z \frac{1/j\omega C_2}{1/j\omega C_1 + 1/j\omega C_2} =$$

$$= U_Z \left(\frac{1}{2} - \frac{C_1}{C_1 + C_2} \right) = U_Z \frac{1}{2} \left(\frac{C_2 - C_1}{C_1 + C_2} \right)$$

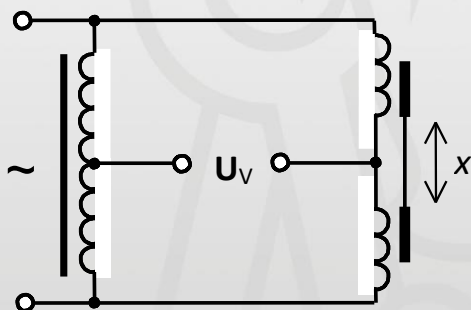
Indukčnostní senzory

$$L_x = N^2 \mu_0 \mu_r S / d$$

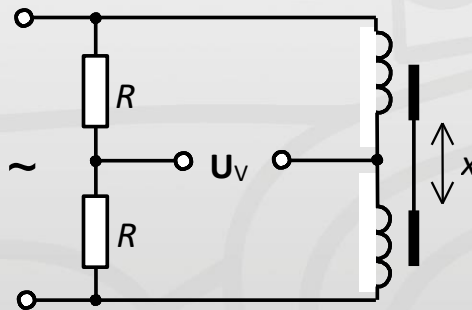


Obvod vyhodnocení – princip – nevyvážené můstky

transformátorový



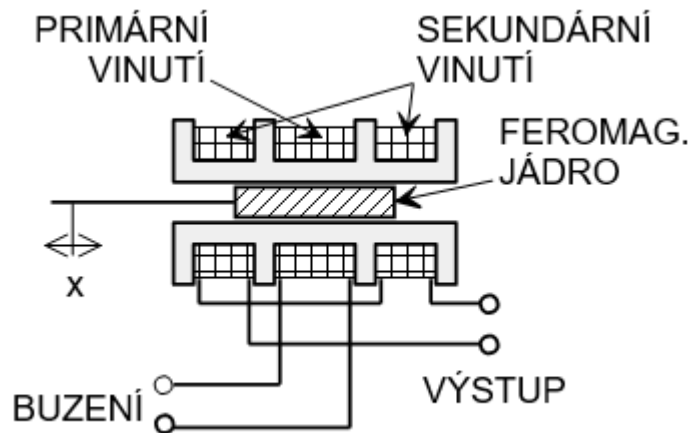
Wheatstoneova typu



Diferenční transformátorový senzor

(LVDT – Linear Variable Differential Transformer)

Princip



Výstup řízeného a neřízeného usměrňovače

