

ESF II projekt Západočeské univerzity v Plzni

reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239

Měření impedancí

Přednáška KET/ELM

J. Švarný



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

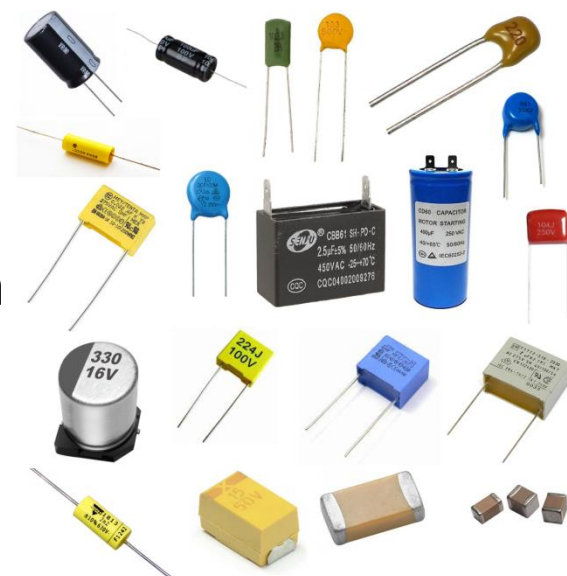
Měření impedancí

Obsah:

- Impedance, základní pojmy
- Náhradní zapojení kondenzátoru a cívky
- Etalony kapacity a indukčnosti
- Měření impedancí A-metrem a V-metrem
- Měření impedancí A-metrem, V-metrem a W-metrem
- Metoda třech V-metrů (Metoda třech A-metrů)
- Přímé měřiče kapacity
- Měření kondenzátorů z vybíjení
- AC můstky
- Měření parametrů impedancí Q-metrem
- Měření vzájemné indukčnosti
- RLC měřiče
- Literatura



(převzato z: <https://www.lte.com.tw>)



(převzato z: <https://www.powerelectronicstalks.com>)

Impedance, základní pojmy

- Komplexní impedance a její velikost:

$$\bar{Z} = Ze^{j\varphi} = R + jX = \frac{\overline{U_Z}}{\overline{I_Z}} \quad (\Omega)$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \frac{U_Z}{I_Z} \quad (\Omega)$$

- Komplexní admittance a její velikost:

$$\bar{Y} = \frac{1}{\bar{Z}} = Ye^{-j\varphi} = G + jB = \frac{\overline{I_Z}}{\overline{U_Z}} \quad (\text{S})$$

$$Y = \sqrt{G^2 + B^2} = \frac{I_Z}{U_Z} \quad (\text{S})$$

- Fázový posuv mezi napětím a proudem na impedanci:

$$\varphi = \arctg \frac{X}{R} = \arctg \frac{G}{B} \quad (^\circ)$$

Impedance, základní pojmy

Parametry ideálních prvků:

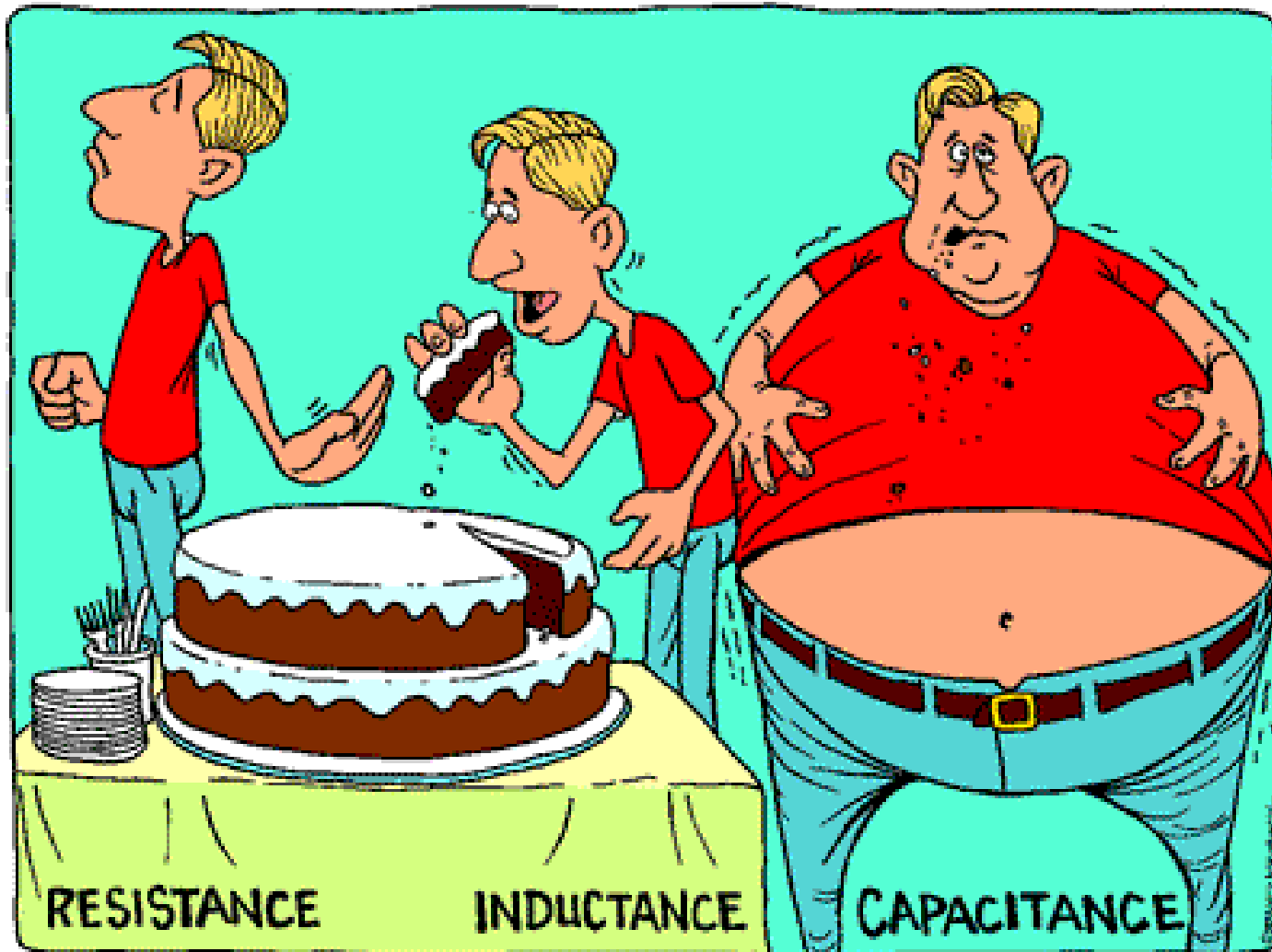
	Rezistor	Induktor	Kapacitor
Impedance \bar{Z}	R	$jX_L = j\omega L = j2\pi fL$	$jX_C = -j\frac{1}{\omega C} = -j\frac{1}{2\pi fC}$
Velikost impedance $ \bar{Z} $	R	$ X_L = \omega L = 2\pi fL$	$ X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC}$
Rezistance R	R	0	0
Reaktance X	0	$X_L = \omega L = 2\pi fL$	$X_C = -\frac{1}{\omega C} = -\frac{1}{2\pi fC}$

Impedance, základní pojmy

Parametry ideálních prvků:

	Rezistor	Induktor	Kapacitor
Admittance \bar{Y}	$G = \frac{1}{R}$	$jB_L = -j\frac{1}{\omega L} = -j\frac{1}{2\pi fL}$	$jB_C = j\omega C = j2\pi fC$
Velikost admittance $ \bar{Y} $	$G = \frac{1}{R}$	$ B_L = \frac{1}{\omega L} = \frac{1}{2\pi fL}$	$ B_C = \omega C = 2\pi fC$
Konduktance G	$G = \frac{1}{R}$	0	0
Susceptance B	0	$B_L = -\frac{1}{\omega L} = -\frac{1}{2\pi fL}$	$B_C = \omega C = 2\pi fC$
Fázový posuv φ	0	+90°	-90°

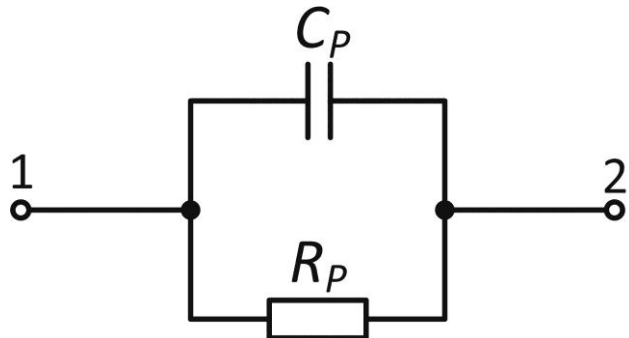
Impedance, základní pojmy



(HP Electronic Cartoons by Rand Kruback, převzato z: http://www.educatorscorner.com/images/cartoon_resstnceb-lg.gif)

Náhradní zapojení kondenzátoru

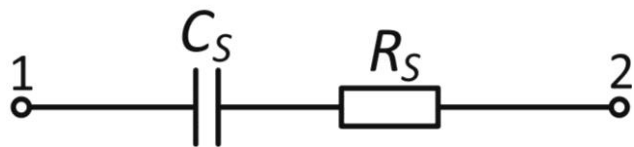
- Paralelní náhrada:



$$D = \operatorname{tg} \delta = \frac{1}{\omega R_p C_p}$$

$$\overline{Y}_p = \overline{Y}_{12} = \frac{1}{R_p} + j\omega C_p$$

- Sériová náhrada:



$$D = \operatorname{tg} \delta = \omega R_s C_s$$

$$\overline{Y}_s = \overline{Y}_{12} = \frac{1}{Z_s} = \frac{1}{R_s + \frac{1}{j\omega C_s}}$$

- Přepočet:

$$\overline{Y}_s = \overline{Y}_p \Rightarrow$$

$$C_s = C_p (1 + D^2)$$

$$R_s = \frac{R_p}{1 + \frac{1}{D^2}}$$

Náhradní zapojení kondenzátoru

Příklad: RLC měřičem Agilent U1733C byl měřen keramický kondenzátor na frekvenci 1 kHz. Zjištěné parametry pro paralelní náhradu jsou: $C_p = 99,5 \text{ nF}$, $D = 0,008$. Vypočtěte parametry kondenzátoru pro odpovídající sériovou náhradu (C_s , R_s).

$$D = \frac{1}{\omega R_p C_p} \Rightarrow R_p = \frac{1}{\omega C_p D} = \frac{1}{2\pi f C_p D} =$$
$$= \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 1 \cdot 10^3 \cdot 100 \cdot 10^{-9} \cdot 0,008} \cong 199,94 \text{ k}\Omega$$

$$R_s = \frac{R_p}{1 + \frac{1}{D^2}} = \frac{199,94 \cdot 10^3}{1 + \frac{1}{0,008^2}} \cong \underline{12,8 \Omega}$$

$$C_s = C_p(1 + D^2) = 99,5 \cdot 10^{-9}(1 + 0,008^2) = \underline{99,506 \text{ nF}}$$

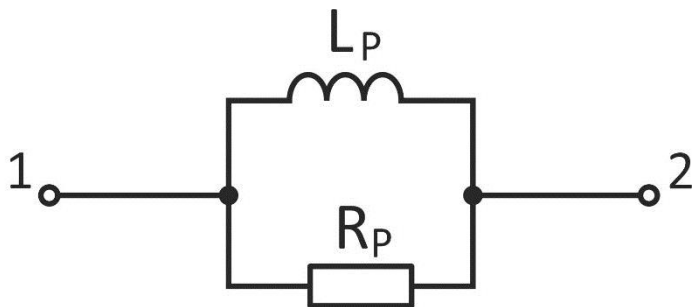
Náhradní zapojení cívky

- Sériová náhrada:



$$Q = \frac{\omega L_s}{R_s}$$
$$\overline{Z}_s = \overline{Z}_{12} = R_s + j \omega L_s$$

- Paralelní náhrada:



$$Q = \frac{R_p}{\omega L_p}$$
$$\overline{Z}_p = \overline{Z}_{12} = \frac{R_p j \omega L_p}{R_p + j \omega L_p}$$

- Přepočít:

$$\overline{Z}_s = \overline{Z}_p \Rightarrow$$

$$L_p = L_s \left(1 + \frac{1}{Q^2} \right)$$

$$R_p = R_s (1 + Q^2)$$

Náhradní zapojení cívky

Příklad: RLC měřičem Agilent U1733C byla měřena toroidní tlumivka na frekvenci 1 kHz. Zjištěné parametry pro sériovou náhradu jsou: $L_s = 146,33 \mu\text{H}$, $Q = 4,62$. Vypočtěte parametry cívky pro odpovídající paralelní náhradu (L_p , R_p).

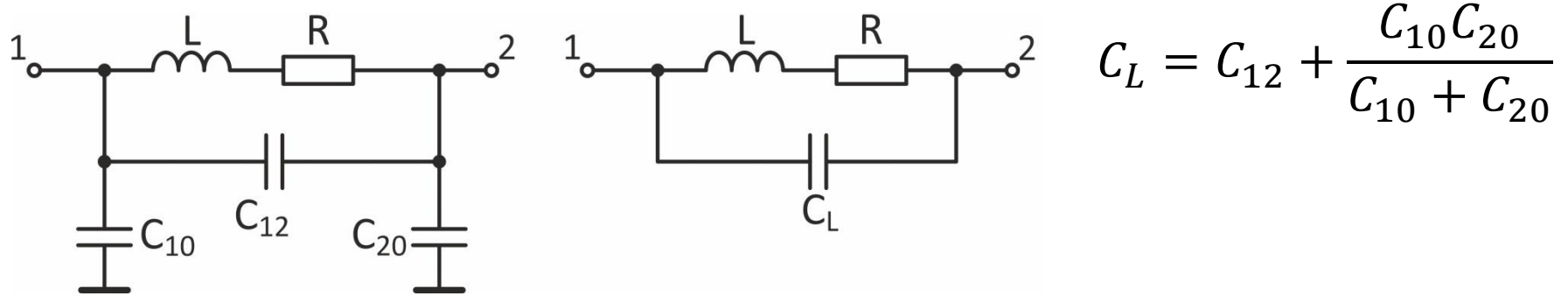
$$Q = \frac{\omega L_s}{R_s} \Rightarrow R_s = \frac{\omega L_s}{Q} = \frac{2\pi f L_s}{Q} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 1 \cdot 10^3 \cdot 146,33 \cdot 10^{-6}}{4,62} = 0,199 \cong 0,2 \Omega$$

$$L_p = L_s \left(1 + \frac{1}{Q^2} \right) = 146,33 \cdot 10^{-6} \left(1 + \frac{1}{4,62^2} \right) = \underline{153,19 \mu\text{H}}$$

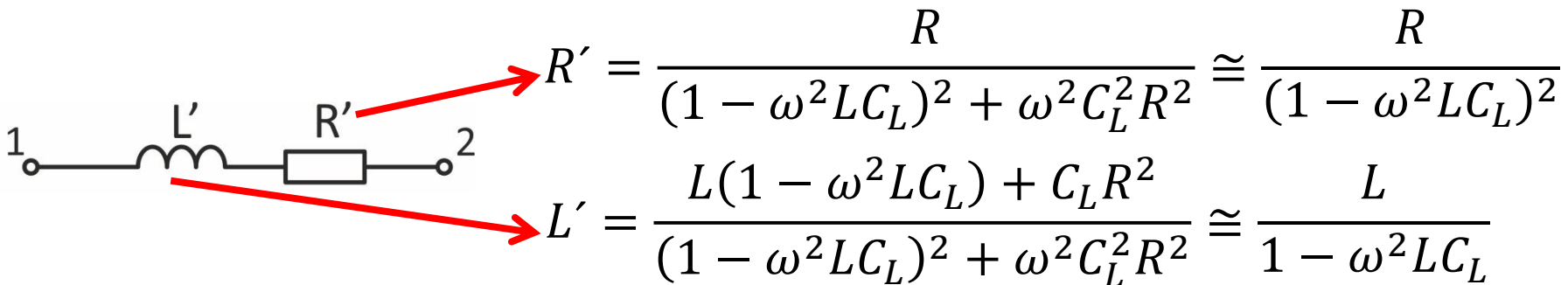
$$R_p = R_s(1 + Q^2) = 0,2 (1 + 4,62^2) = \underline{4,47 \Omega}$$

Náhradní zapojení cívky

Náhradní zapojení cívky s uvažováním parazitních kapacit:



$$C_L = C_{12} + \frac{C_{10}C_{20}}{C_{10} + C_{20}}$$



$$R' = \frac{R}{(1 - \omega^2 LC_L)^2 + \omega^2 C_L^2 R^2} \cong \frac{R}{(1 - \omega^2 LC_L)^2}$$

$$L' = \frac{L(1 - \omega^2 LC_L) + C_L R^2}{(1 - \omega^2 LC_L)^2 + \omega^2 C_L^2 R^2} \cong \frac{L}{1 - \omega^2 LC_L}$$

$$Q = \frac{\omega L'}{R'}$$

Při $\omega^2 LC_L \ll 1$ lze psát:

$$R' \cong R, \quad L' \cong L, \quad Q \cong \frac{\omega L}{R} \quad \left(\text{Podm.: } f_{prac.} \ll \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_L}} \right)$$

Etalony kapacity a indukčnosti

Primární etalony kapacity

Etalon Thompson-Lampard

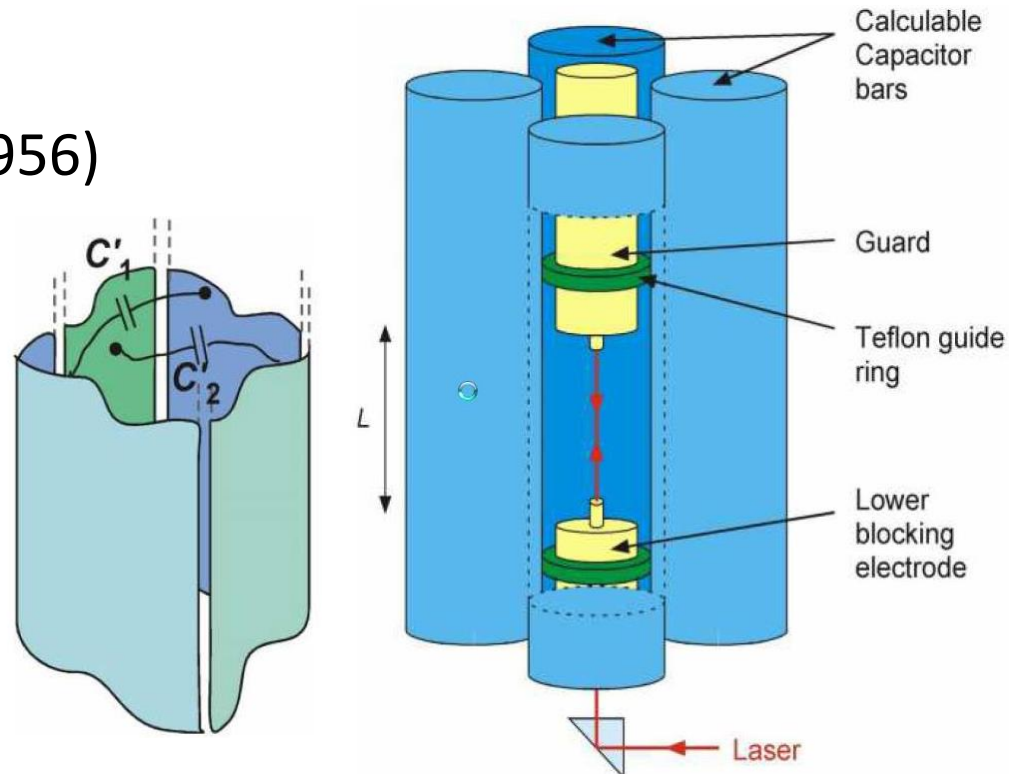
tzv. vypočítatelný kapacitor (1956)



Arthur Melville Thompson



Douglas Geoffrey Lampard



(převzato z: [2])

$$C'_1 = C'_2 = C = L \frac{\epsilon_0}{\pi} \ln(2)$$

$$\Delta C / L = 1,953549 \text{ pF} / \text{m}$$

Etalony kapacity a indukčnosti

Sekundární etalony kapacity

- **Vzduchové, deskové**
($C < 1000$ pF)
obvykle 3-vývodový
- **Slídové nebo křemenné**
(obvykle $C > 1000$ pF)
obvykle 2-vývodový

Příklad: SCA, IET Labs Inc, [3]

- Kapacita: 1 pF až 10 μ F
- Přesnost: $\pm 0,02$ % (malé kap.)
- Stabilita: < 100 ppm/rok
- Max. prac. frekv: 10 kHz
- Dielektrikum: vzduch, slída, polypropylén (dle kapacity)
- Malé ztrátové číslo
(0,0003 pro 100 nF)



*Kapacitní etalon 100 nF, IET
(převzato z: [3])*

Etalony kapacity a indukčnosti

Primární etalony indukčnosti

Porovnávání impedance cívky s impedancí etalonu kapacity na principu Thompson-Lampardova teorému popř. s impedancí termostatovaných kapacitních etalonů s křemičitým dielektrikem.

Sekundární etalony indukčnosti

Jednovrstvé cívky na kostře z křemičitého skla nebo keramiky.

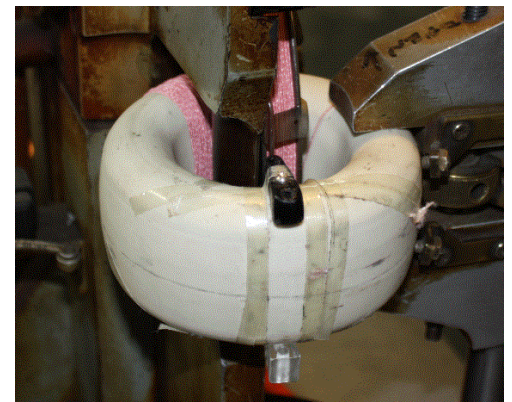
Příklad: Typ 1482,

IET Labs Inc. [4]

- $10 \mu\text{H} - 10 \text{H}$
- Chyba: $\pm 0,1 \%$
- Kalibrováno do: 1 kHz
- Stabilita: $\pm 0,01 \%$ /rok
- Vinutí na keramickém toroidním jádře eliptického průřezu



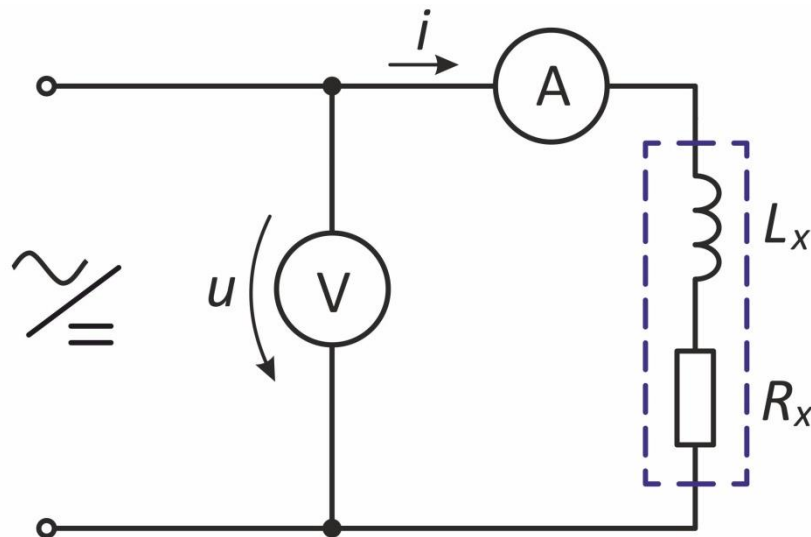
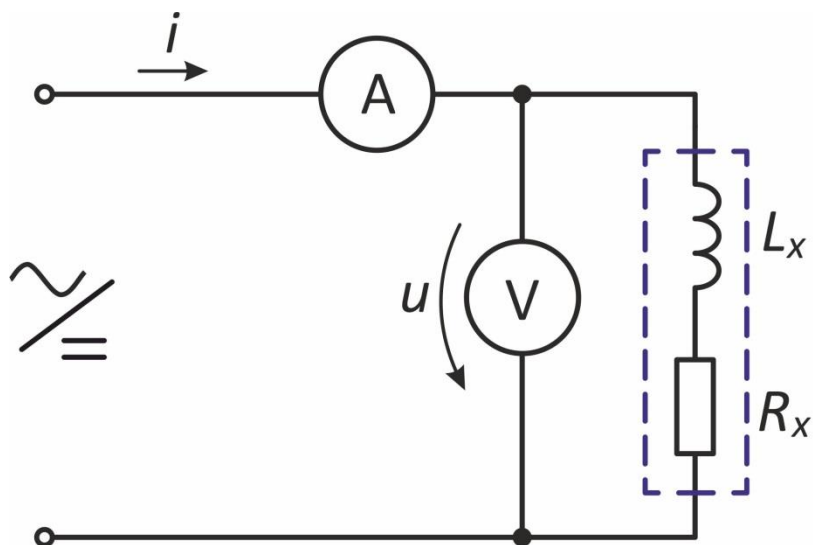
Cívka 1482, 1 mH, [4]



Jádro 1482, [4]

Měření impedancí A-metrem a V-metrem

Měření cívek



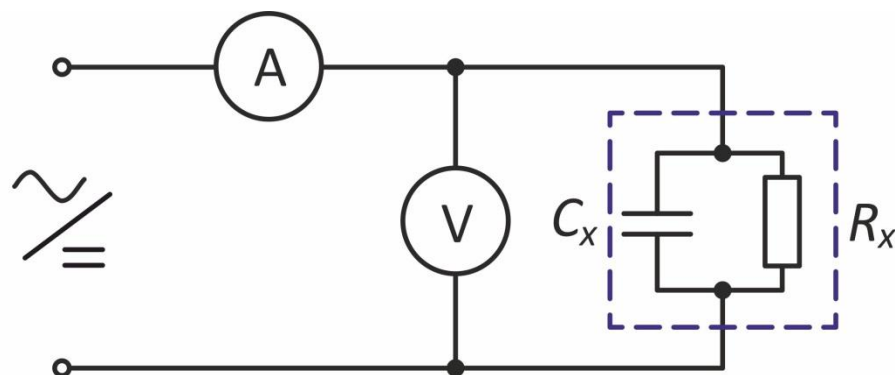
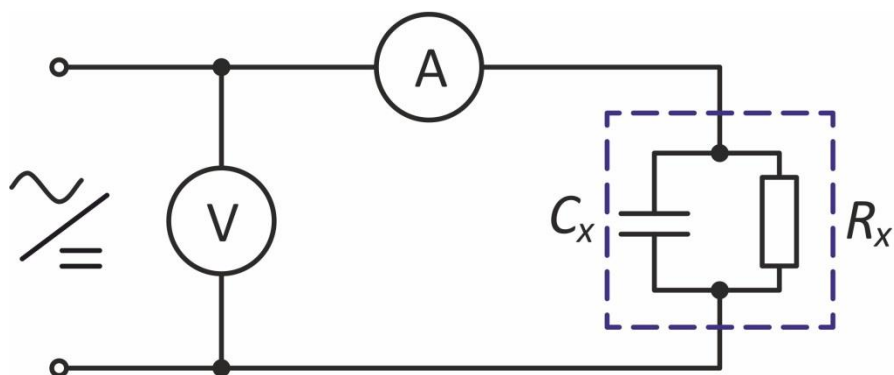
$$Z_x = \frac{U}{I} = \sqrt{R_x^2 + \omega^2 L_x^2}$$

$$\Rightarrow L_x = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{U^2}{I^2} - R_x^2}$$

R_x ...DC odpor cívky (! Nepřesné !)

Měření impedancí A-metrem a V-metrem

Měření kondenzátorů



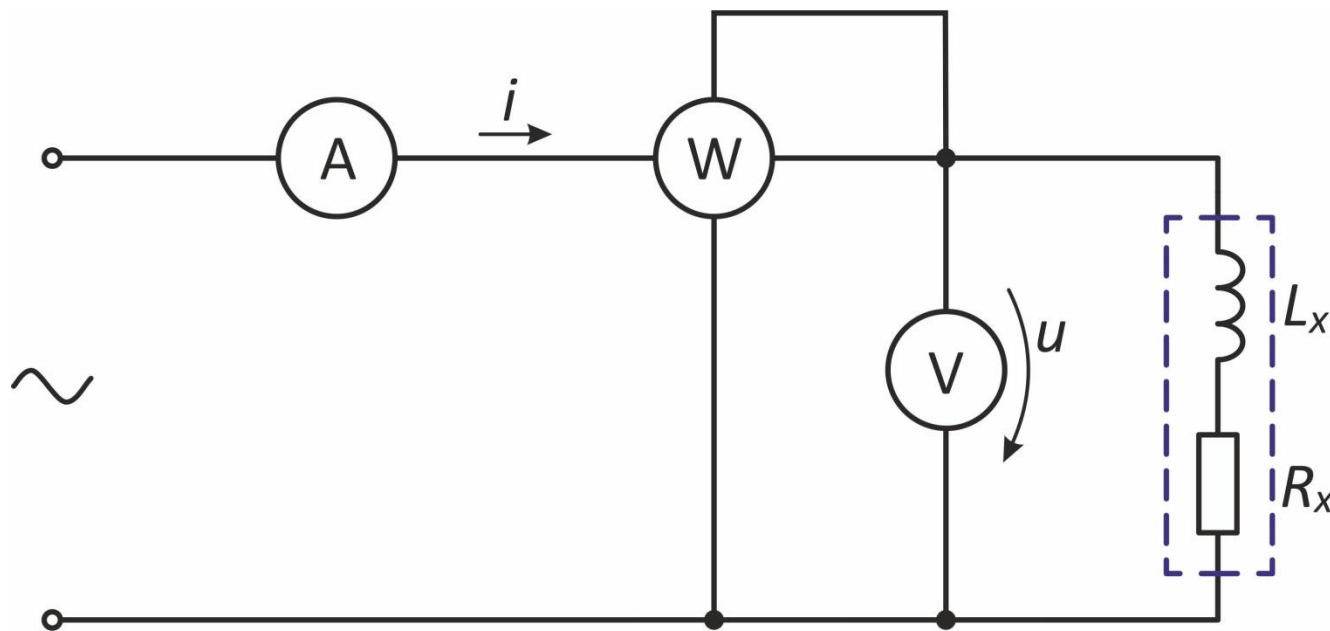
$$Y_x = \frac{I}{U} = \sqrt{G_x^2 + \omega^2 C_x^2} \quad \Rightarrow \quad C_x = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{I^2}{U^2} - \frac{1}{R_x^2}}$$

R_x ...DC odpor kondenzátoru (! Nepřesné !)

Pro kondenzátory s malým ztrátovým číslem ($\operatorname{tg} \delta < 10^{-2}$) platí:

$$C_x \cong \frac{I}{\omega U}$$

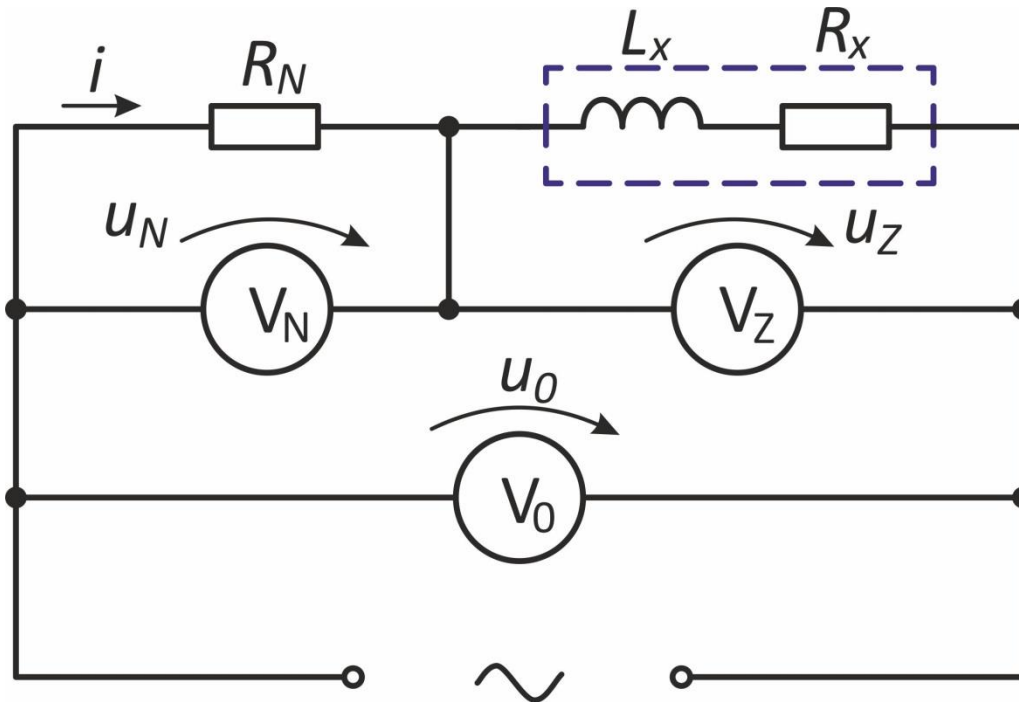
Měření impedancí (cívek) pomocí A-metru, V-metru a W-metru



$$R_x = \frac{P}{I^2}$$

$$Z_x = \frac{U}{I} = \sqrt{R_x^2 + \omega^2 L_x^2} \quad \Rightarrow \quad L_x = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{U^2}{I^2} - \left(\frac{P}{I^2}\right)^2}$$

Metoda tří V-metrů



- Vlastní spotřebu V-metrů zanedbáváme.
- Etalonový odpor slouží ke stanovení velikosti proudu procházejícího impedancí.

$$I = \frac{U_n}{R_n}$$

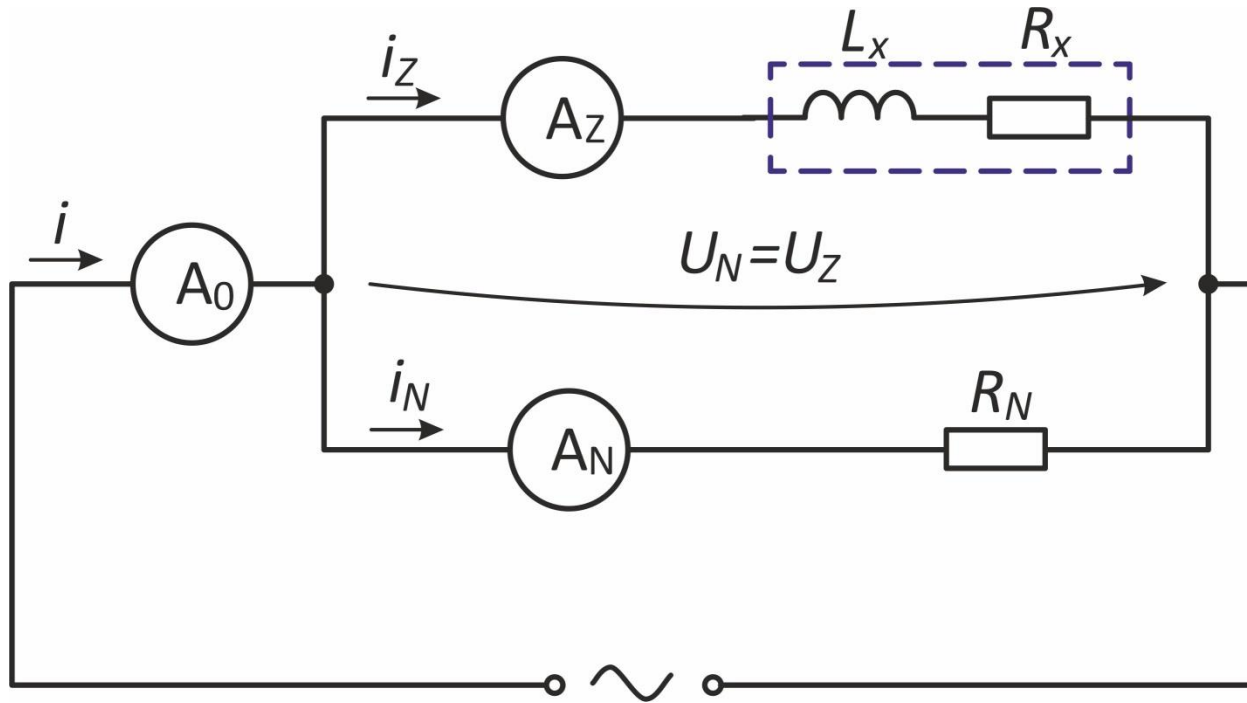
$$Z_x = \frac{U_z}{I}$$

$$R_x = Z_x \cos \varphi$$

$$L_x = \frac{X}{\omega} = \frac{1}{\omega} Z_x \sin \varphi$$

$$\varphi = \arccos \frac{U_0^2 - U_n^2 - U_z^2}{2U_n U_z}$$

Metoda tří A-metrů



$$U_Z = U_n = R_n I_n$$

$$Z_x = \frac{U_Z}{I_Z} = \frac{R_n I_n}{I_Z}$$

$$R_x = Z_x \cos \varphi$$

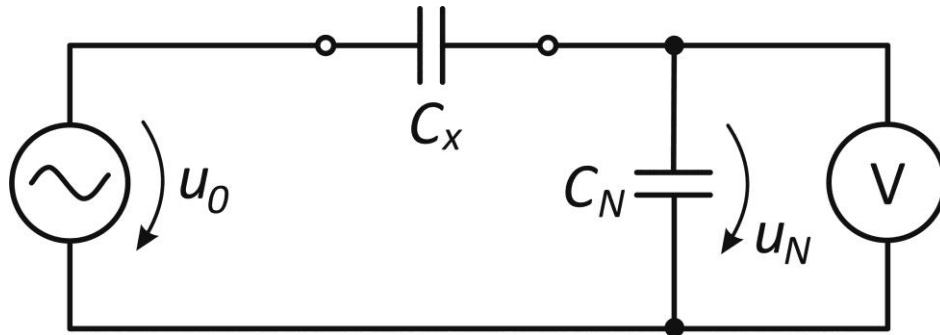
$$L_x = \frac{X}{\omega} = \frac{1}{\omega} Z_x \sin \varphi$$

- Vlastní spotřebu A-metrů zanedbáváme.
- Normálový odpor slouží ke stanovení velikosti napětí na impedanci.

$$\varphi = \arccos \frac{I_0^2 - I_n^2 - I_Z^2}{2I_n I_Z}$$

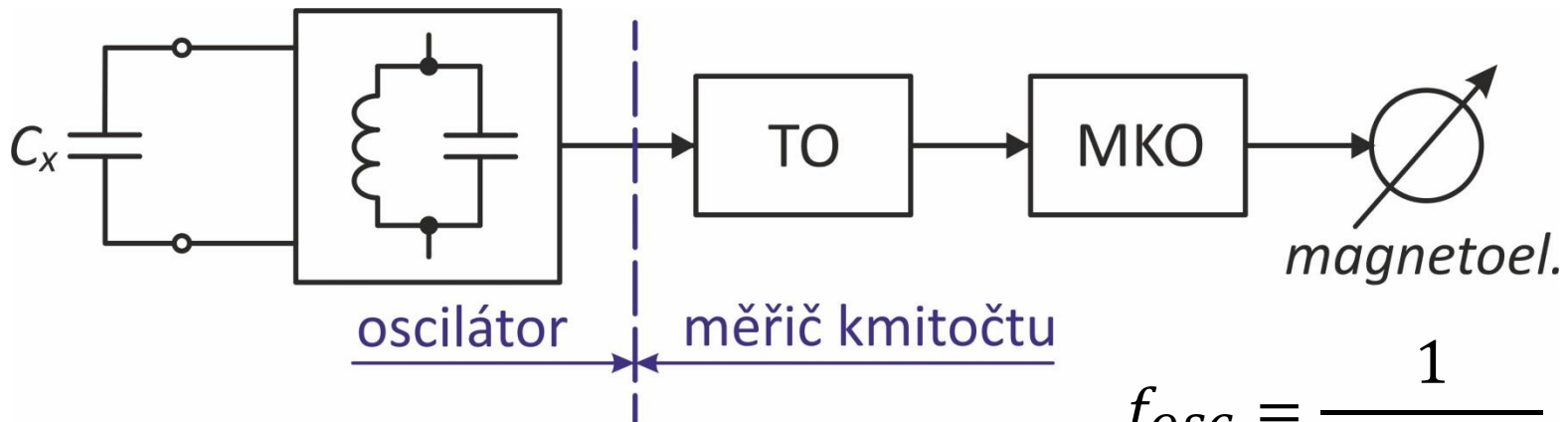
Přímé měřiče kapacity

Měřiče využívající principu impedančního děliče



$$C_x = \frac{C_N}{\frac{U_0}{U_N} - 1}$$

Měřiče pracující na principu změny frekvence oscilátoru



$$f_{osc} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_x}}$$

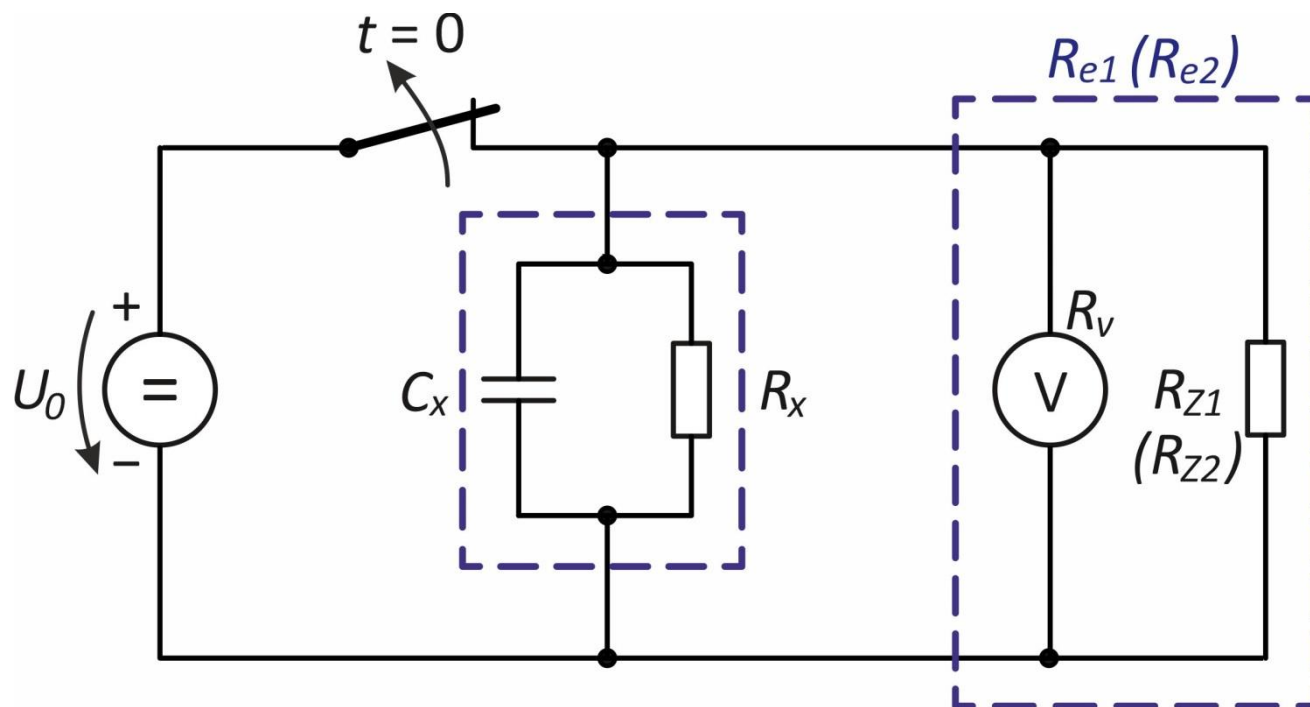
TO-tvarovací obvod, MKO-monostabilní klopný obvod

Měření parametrů kondenzátorů z vybíjení

- Měří se časové konstanty RC obvodu pro dvě různé hodnoty vybíjecího odporu.
- Po rozepnutí spínače platí:

$$u_V(t) = U_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$$

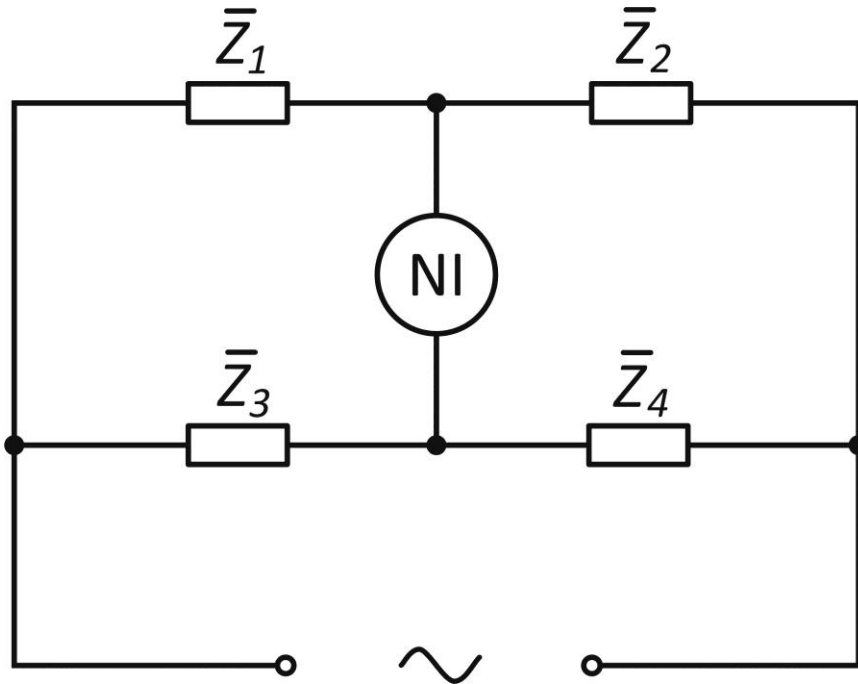
$$\begin{aligned} R_{z1} &\neq R_{z2} \\ R_{e1} &= R_{z1} \parallel R_V \\ R_{e2} &= R_{z2} \parallel R_V \end{aligned}$$



$$\left. \begin{aligned} \tau_1 &= C_x (R_x \parallel R_{e1}) \\ \tau_2 &= C_x (R_x \parallel R_{e2}) \end{aligned} \right\} \Rightarrow \begin{cases} R_x = \dots \\ C_x = \dots \end{cases}$$

Můstkové metody

Obecný střídavý můstek Wheatstoneova typu



- Vyvažuje se na minimální dosažitelnou hodnotu AC napětí měřicí diagonály.

- Podmínky rovnováhy:

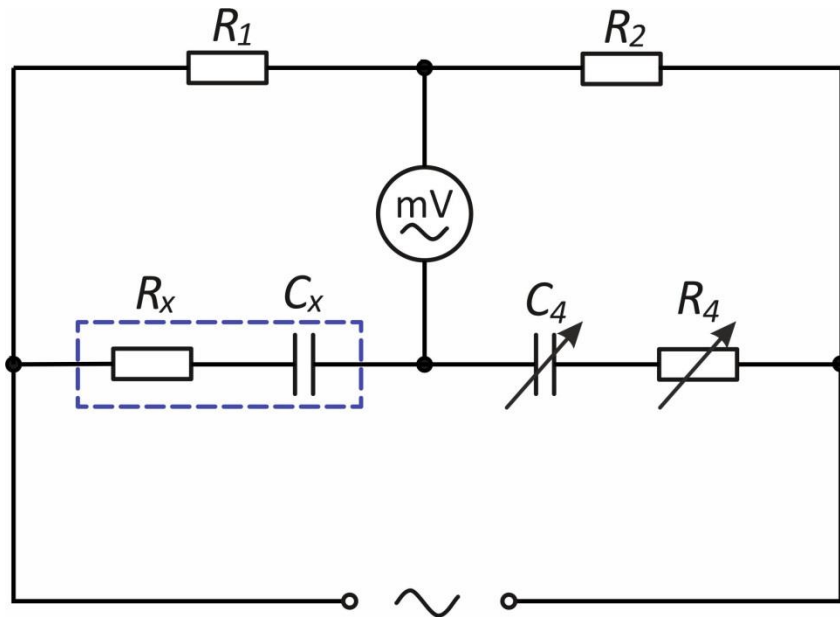
$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{Z_3}{Z_4}$$

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \varphi_3 - \varphi_4$$

- Potřebuje min 2 vhodně zvolené vyvažovací prvky (2 podmínky rovnováhy).
- Pro dosažení konvergence je nutné důsledně střídat vyvažovací prvky.

Můstkové metody - měření kondenzátorů

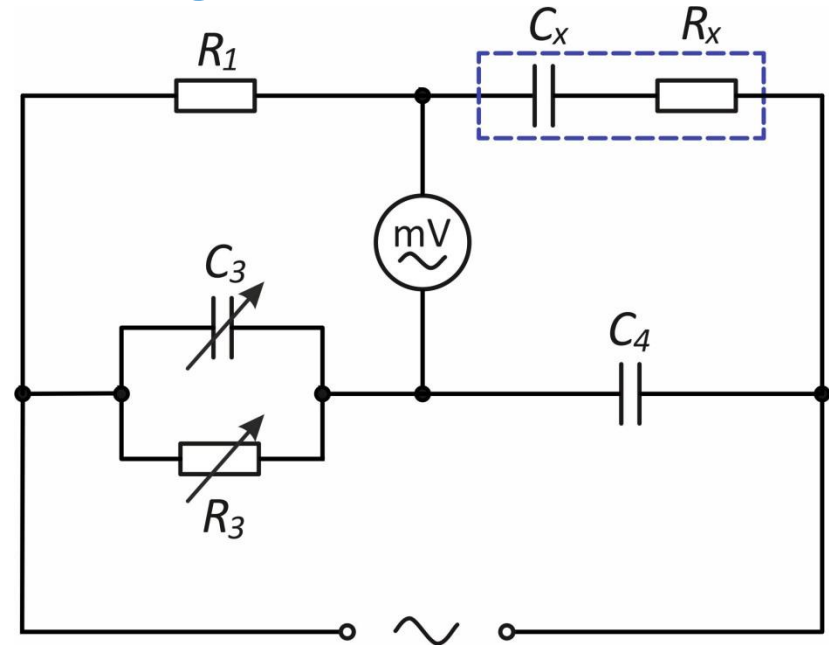
Wienův můstek



$$C_x = C_4 \frac{R_2}{R_1}, \quad R_x = \frac{R_1 R_4}{R_2}$$

- Vznikl upravením de Sautyho můstku

Scheringův můstek

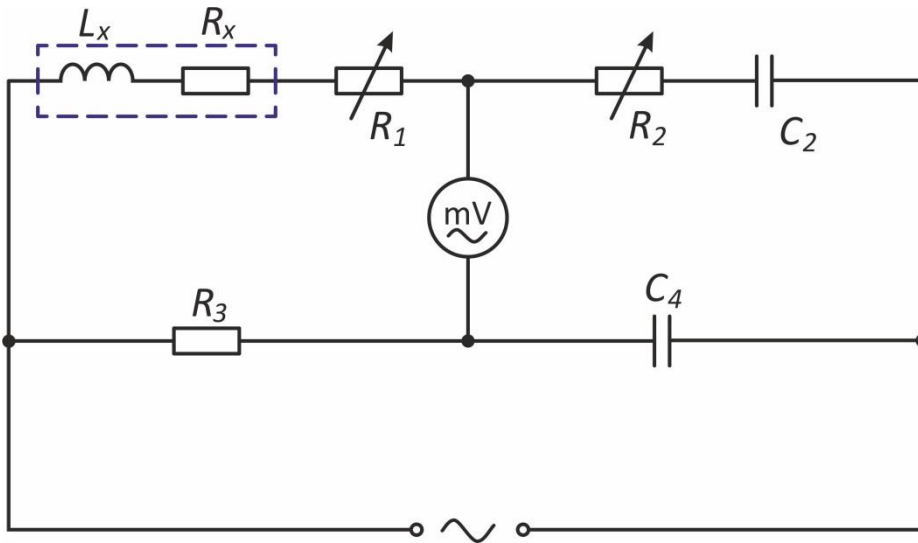


$$C_x = C_4 \frac{R_3}{R_1}, \quad R_x = R_1 \frac{C_3}{C_4}$$

- Po úpravě zapojení umožňuje měřit i kondenzátory vyžadující DC předpětí.
- Pro měření parametrů dielektrik.

Můstkové metody - měření cívek

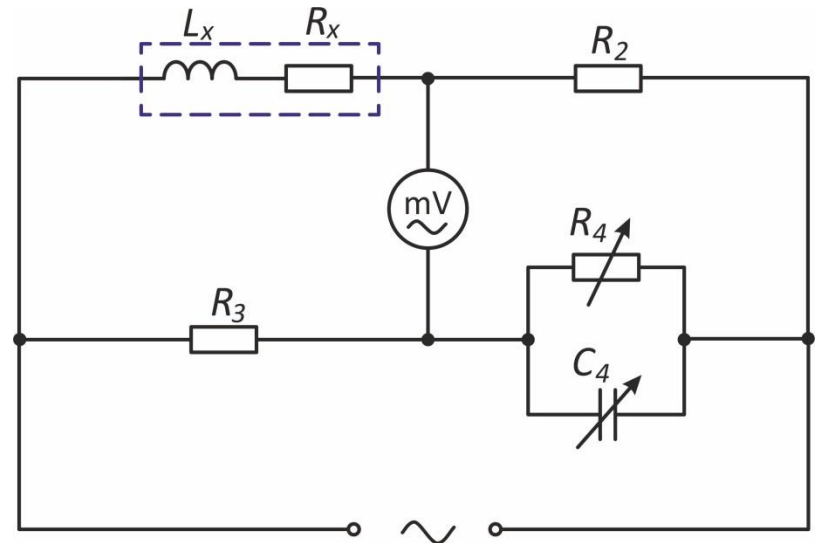
Owenův můstek



$$L_x = R_2 R_3 C_4, \quad R_x = R_3 \frac{C_4}{C_2} - R_1$$

- Měří indukčnosti v širokém rozsahu
- Vyvažovat lze za pomoci odporových dekád

Maxwell-Wienův můstek

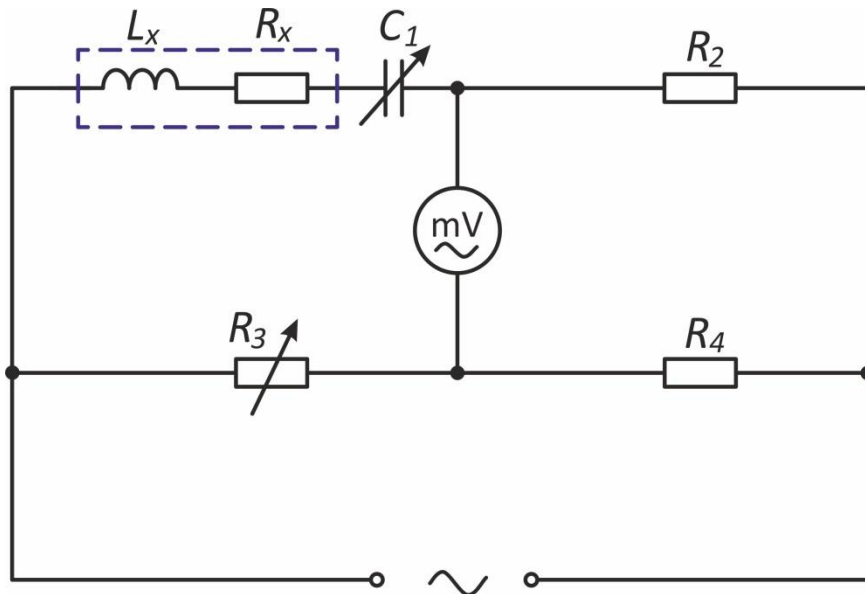


$$L_x = R_2 R_3 C_4, \quad R_x = R_2 \frac{R_3}{R_4}$$

- Přesná měření
- Vhodný pouze pro indukčnosti s $Q \in (1; 10)$

Můstkové metody

Belfisův můstek



$$L_x = \frac{1}{\omega^2 C_1}, \quad R_x = R_2 \frac{R_3}{R_4}$$

- Náhradou kapacitní dekády za induktivní lze měřit kondenzátory
- Měření frekvence

Další můstky pro měření cívek a kondenzátorů:

Andersonův můstek (pro cívky s malým Q)

Hayův můstek (pro cívky s velkým Q)

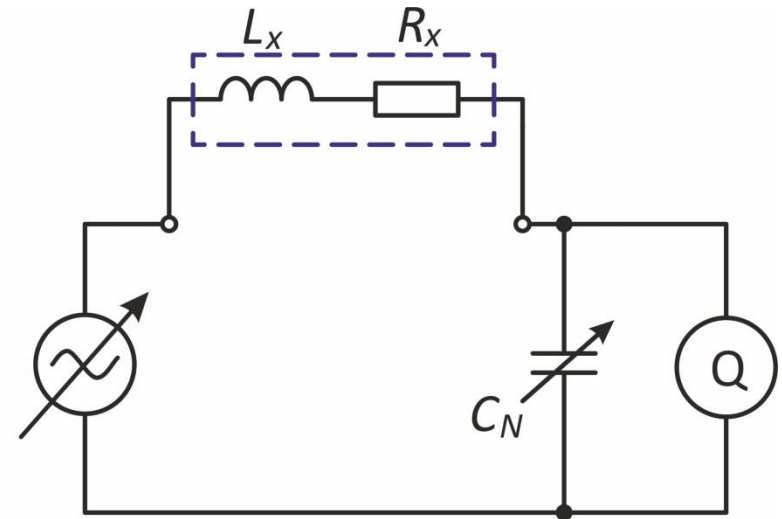
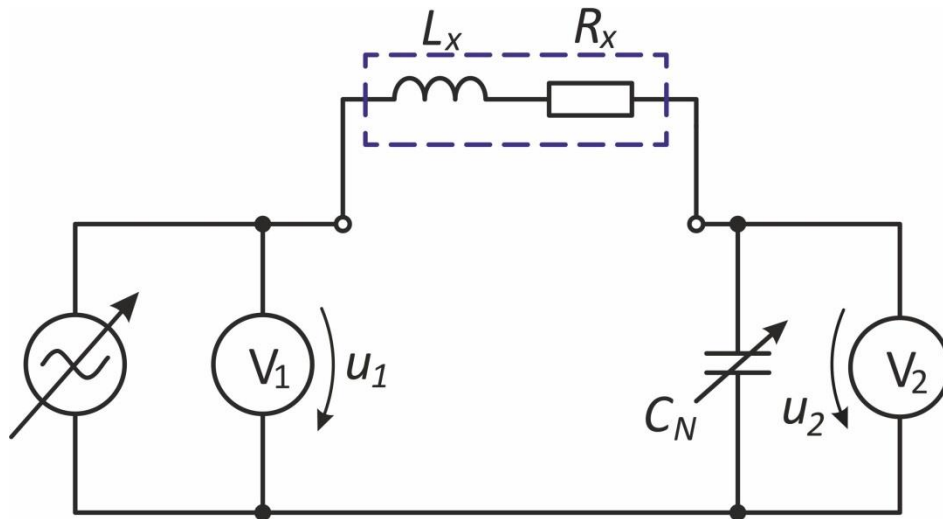
De Sautyho můstek (pouze pro orientační měření kapacit kondenzátorů)

.....

Q-metr

Princip Q-metru

Rezonanční přístroj. Rezonance je dosahováno změnou kapacity ladicího kondenzátoru C_N nebo změnou frekvence oscilátoru f .



$$Q = \frac{U_2}{U_1} = \frac{\frac{1}{\omega C_N}}{R_x} = \left| \frac{1}{\omega C_N} = \omega L_x \right|_{(Rezonance)} = \frac{\omega L_x}{R_x}$$

$$U_1 = konst. \Rightarrow U_2 \sim Q$$



Q-metr

Příklad: Q-metr **BM560**, Tesla

- Frekv. rozsah: 50 kHz až 35 MHz
- Rozsah C_N : 30 pF až 500 pF

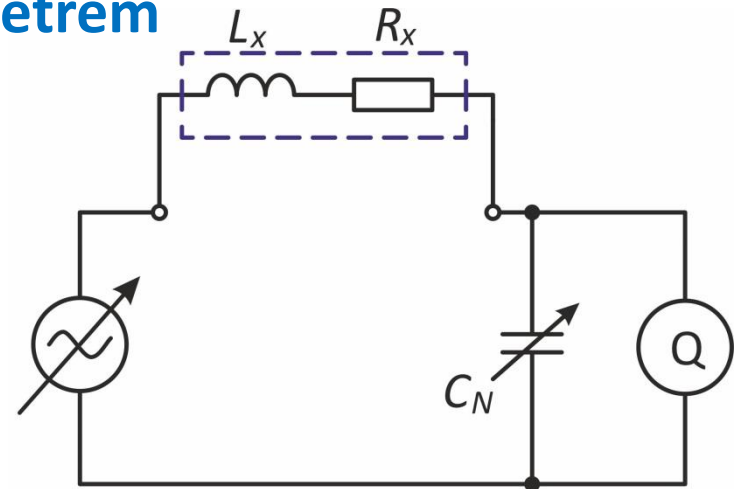


Q-metr

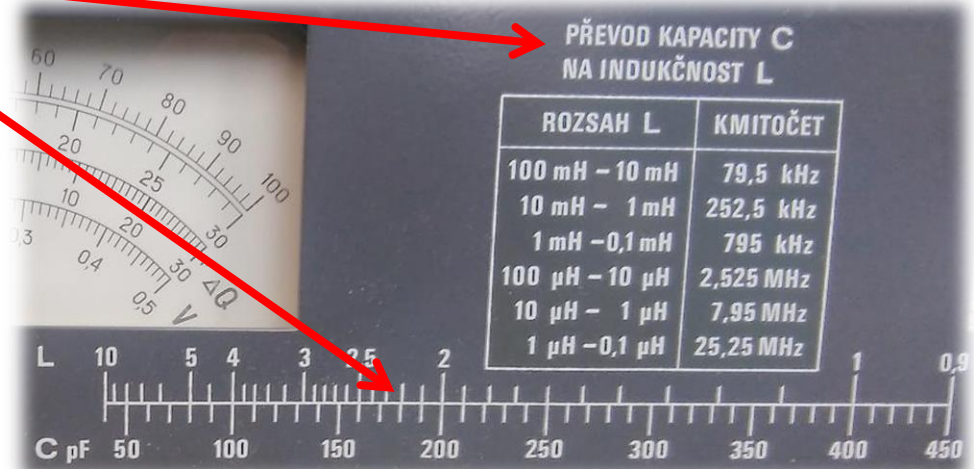
Měření indukčnosti a jakosti cívky Q-metrem

- Indukčnost se určí výpočtem:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_x C_N}} \Rightarrow L_x = \frac{1}{4\pi^2 f^2 C_N}$$



...nebo z převodní stupnice na čelním panelu přístroje.



- Jakost se odečte z vnitřního V-metru.

Q-metr

Měření kapacit kondenzátorů Q-metrem

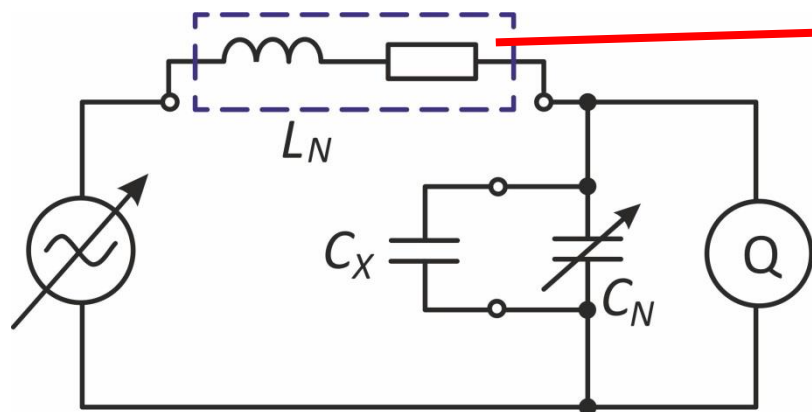
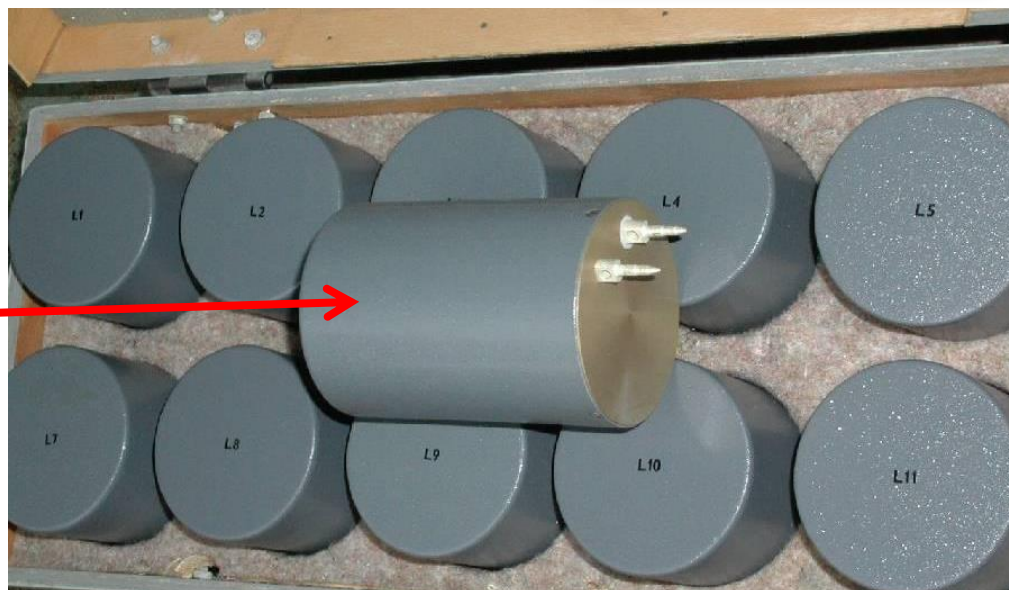
Měření malých kapacit ($C_x < C_{Nmax}$)

Měří se ve dvou krocích – změnou C_N při konstantním f .

$$C_x = C_{N1} - C_{N2} \quad \text{při } f = \textit{konst.}$$

C_{N1} ...rezonanční kapacita (C_N) bez připojeného C_x

C_{N2} ...rezonanční kapacita (C_N) s připojeným C_x



Q-metr

Měření kapacit kondenzátorů Q-metrem

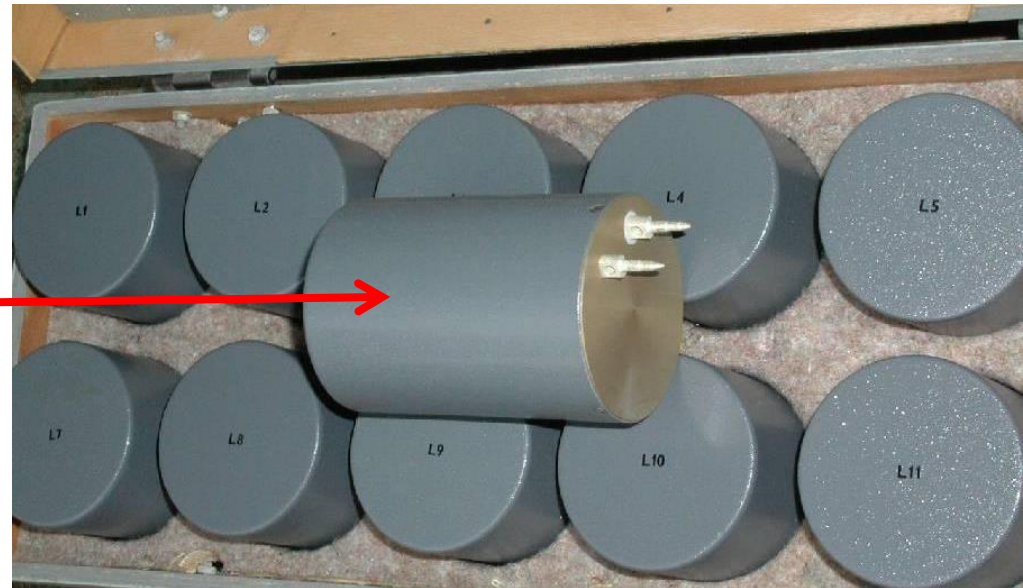
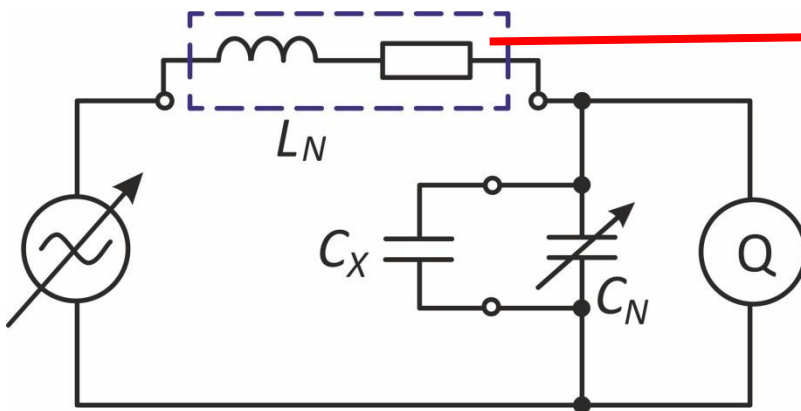
Měření velkých kapacit ($C_x > C_{Nmax}$)

Měří se změnou f při konst. kapacitě C_N .

$$\text{při } C_N = \text{konst.}: C_x = \frac{C_N(f_1^2 - f_2^2)}{f_2^2}$$

f_1 ...rezonanční frekvence bez připojeného C_x

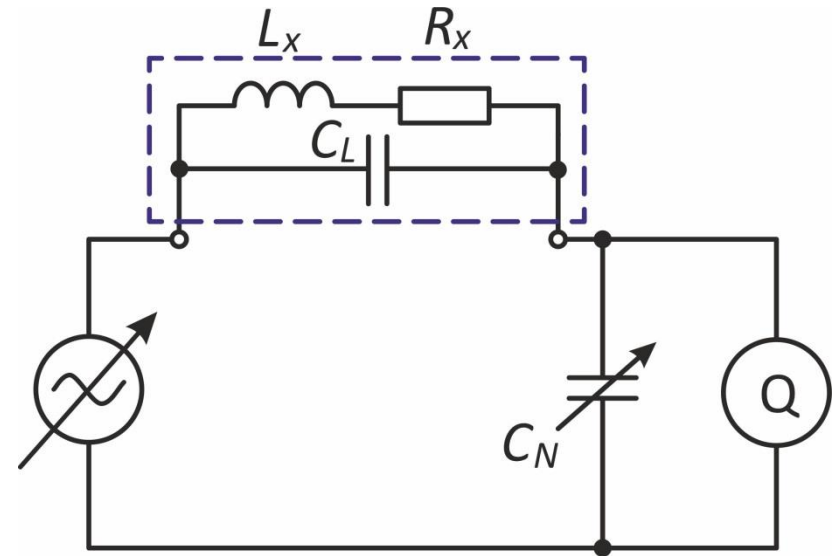
f_2 ...rezonanční frekvence s připojeným C_x



Q-metr

Určení vlastní kapacity cívky C_L
dvojím měřením

$$C_L = \frac{C_{N1} - \frac{f_2^2}{f_1^2} C_{N2}}{\frac{f_2^2}{f_1^2} - 1}$$



C_{N1} ...kapacita ladicího kondenzátoru při rezonanční frekvenci f_1

C_{N2} ...kapacita ladicího kondenzátoru při rezonanční frekvenci f_2



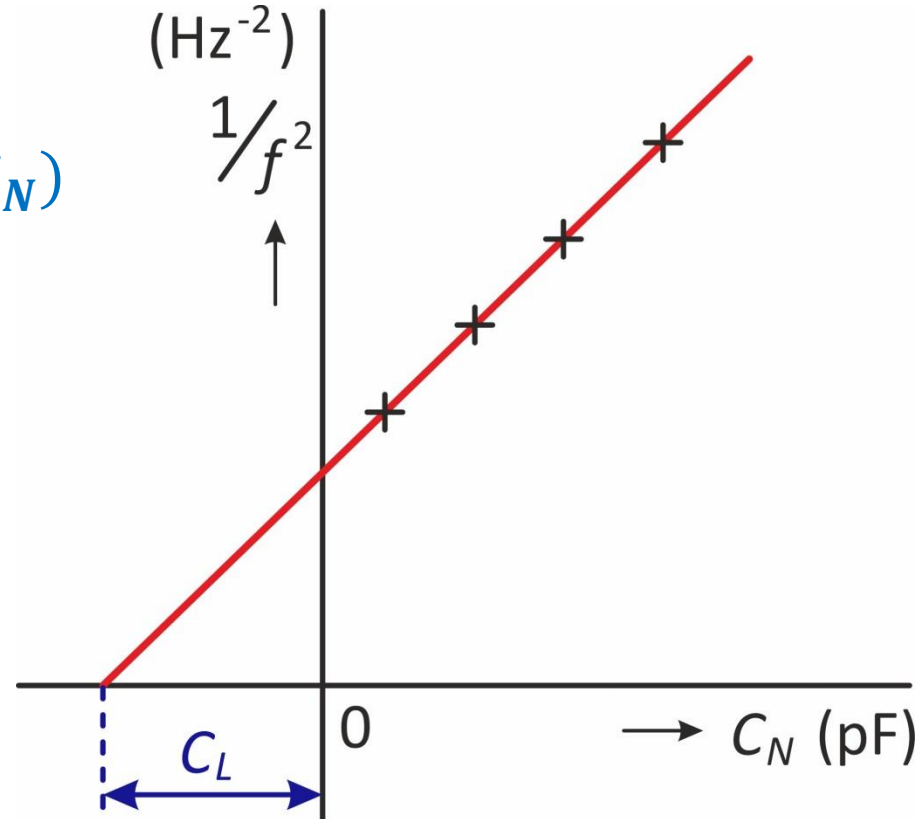
Q-metr

Určení vlastní kapacity cívky C_L
extrapolací závislosti $1/f^2 = g(C_N)$

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_x(C_L + C_N)}}$$

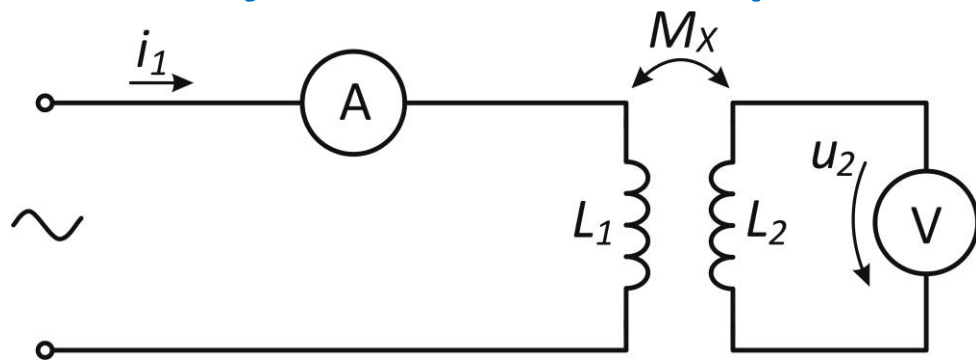
$$\frac{1}{f^2} = 4\pi^2 L_x (C_L + C_N)$$

$$\frac{1}{f^2} = g(C_N) \dots \text{lin. závislost}$$



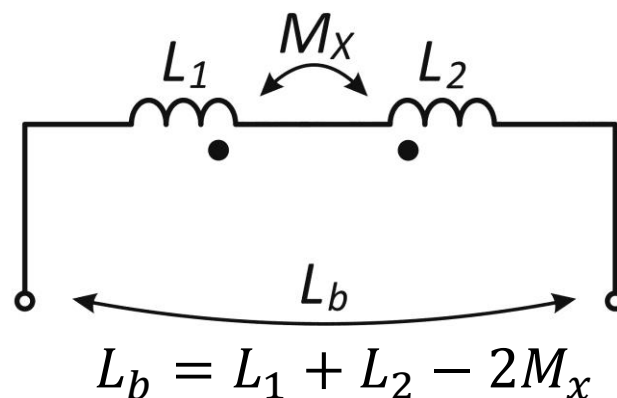
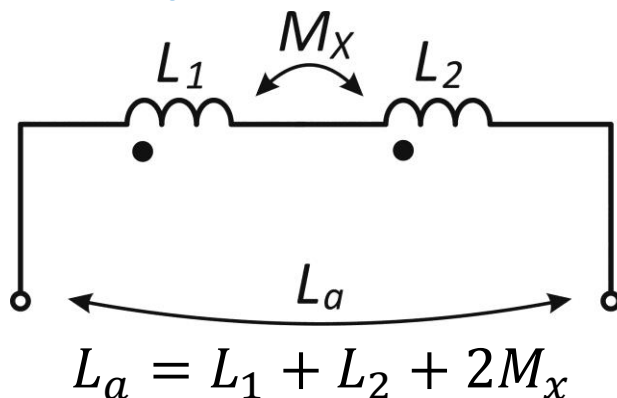
Měření vzájemné indukčnosti

Měření vzájemné indukčnosti pomocí A-metru a V-metru



$$M_x = \frac{U_2}{\omega I_1}$$

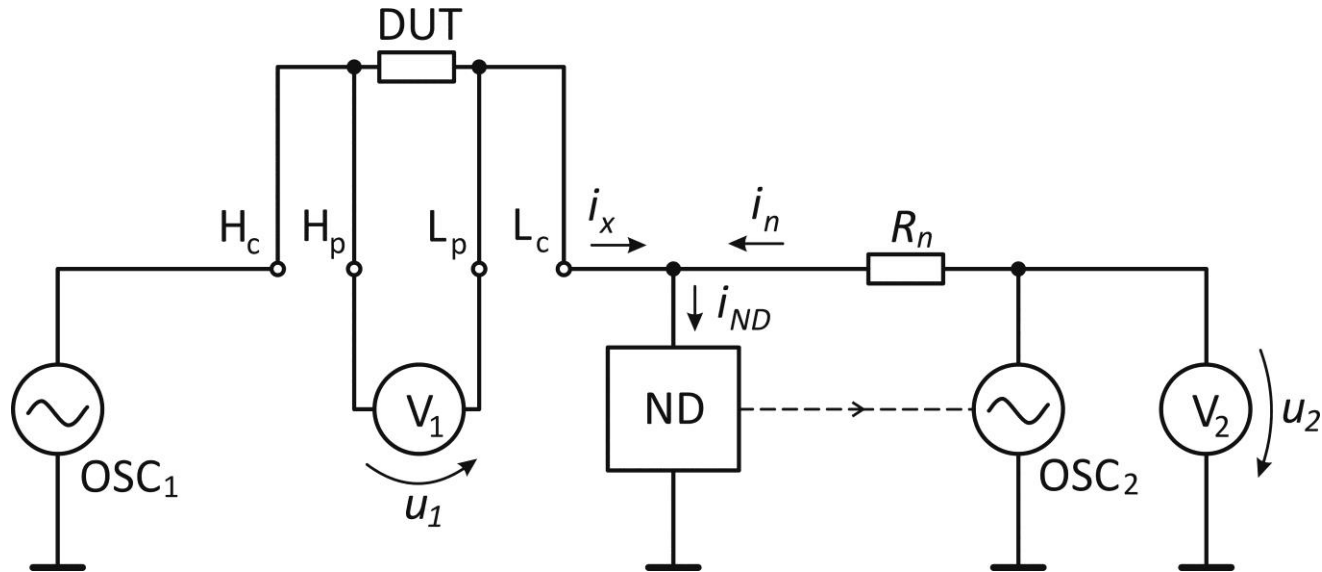
Měření vzájemné indukčnosti z vlastních indukčností



$$M_x = \frac{L_a - L_b}{4}$$

Digitální RLC měřiče

- Měří komplexní impedanci \bar{Z} , ze které jsou následně počítány různé parametry ($C_s, C_p, L_s, L_p, R_s, R_p, D, Q, |\bar{Z}|, |\bar{Y}|$).
- Princip měření \bar{Z} - tzv. "Auto-balancing bridge".



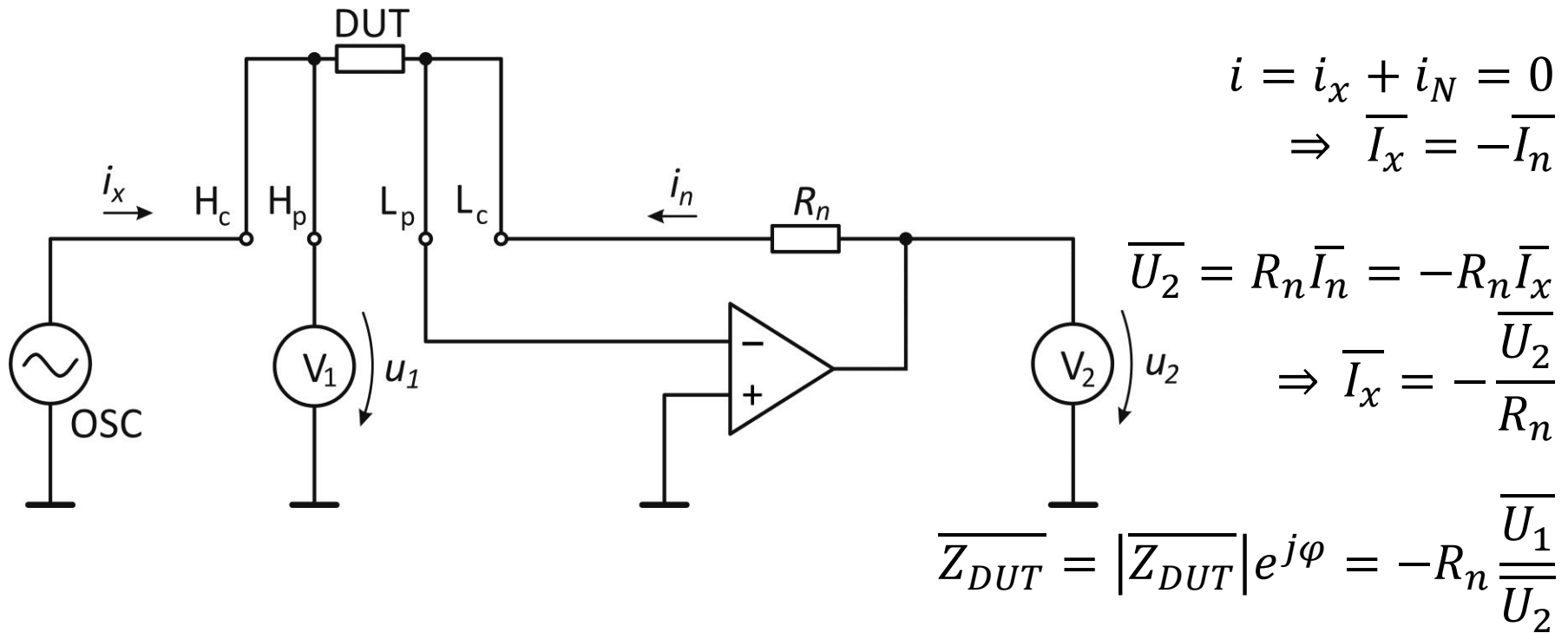
OSC_1 ...oscilátor generující proud i_x

ND...Null Detektor (elektronika řídící OSC_2 tak, aby bylo dosaženo nulového proudu i_{ND} resp. nulového napětí v uzlu A)

Voltmetry V_1 a V_2 měří fázory napětí u_1 a u_2 .

Digitální RLC měřiče

- Podle způsobu provedení ND obvodu může být RLC měřič schopen pracovat až do frekvencí cca 100 MHz.
- Jednodušší RLC měřiče používají na místě ND obvodu I/U převodník (TIA) s OZ (frekvenční omezení do cca 100 kHz).



OSC...oscilátor generující proud i_x

Voltmetry V_1 a V_2 měří fázory napětí u_1 a u_2 .

Digitální RLC měřiče

- Způsob připojení DUT ke svorkám RLC měřiče může silně ovlivnit rozsah měřitelných hodnot a přesnost měření.
- **Proudové svorky** H_C , L_C ... C- Current (Force, Drive...)
 H_C ...High, Current terminal
 L_C ...Low, Current terminal
- **Napěťové svorky:** H_p , L_p ... P- Potential (Sense, Voltage...)
 H_p ...High, Potential terminal
 L_p ...Low, Potential terminal

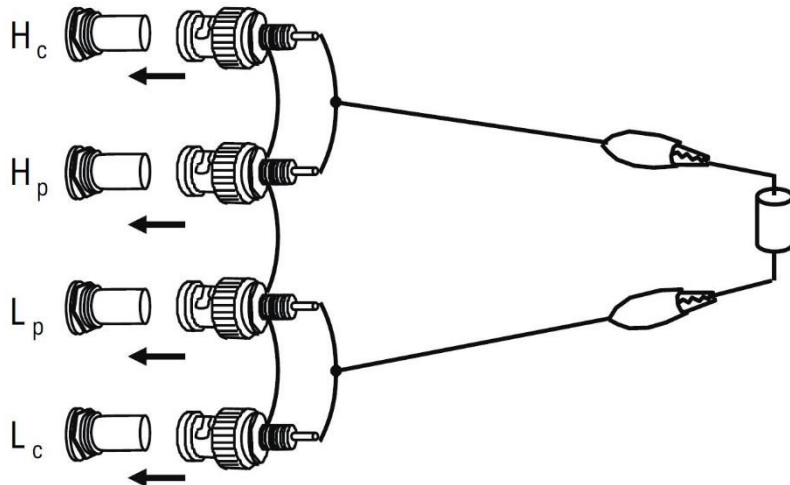


RLC měřič E4980A, Keysight (převzato z: <https://www.keysight.com/>)

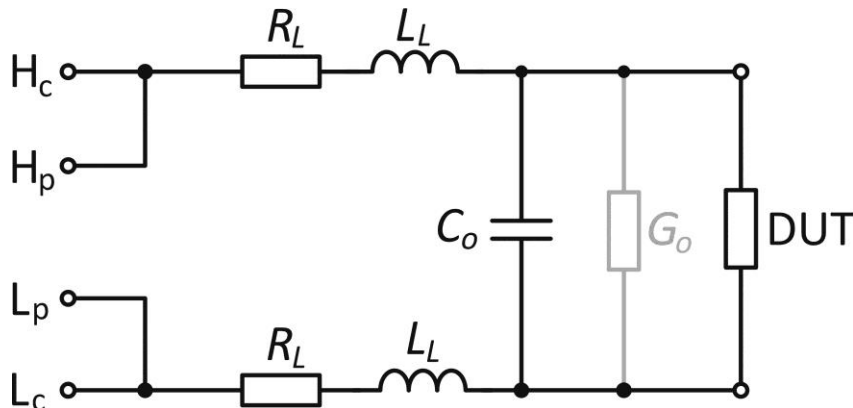
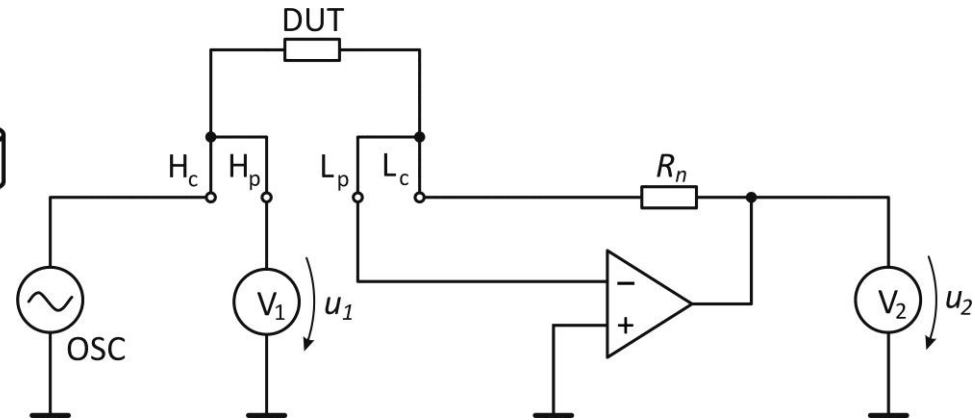
Digitální RLC měřiče

Dvouodičové připojení (2-terminal connection)

Propojení dvěma nestíněnými přívody. Nejjednodušší způsob.



2T připojení (převzato z: [6])



R_L, L_L ...vadí při měření malých Z

G_o ...lze zanedbat

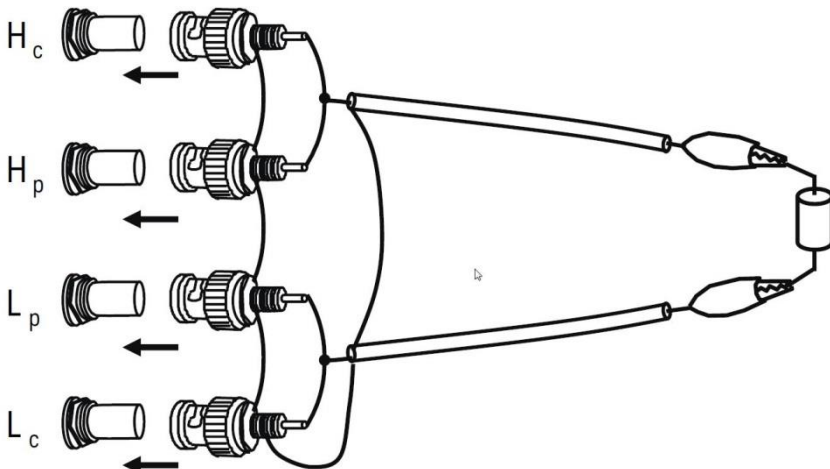
C_o ...nelze zanedbat, (vadí při měření velkých Z)

Vhodné pro měření impedancí v rozsahu cca 100Ω až $10 \text{ k}\Omega$.

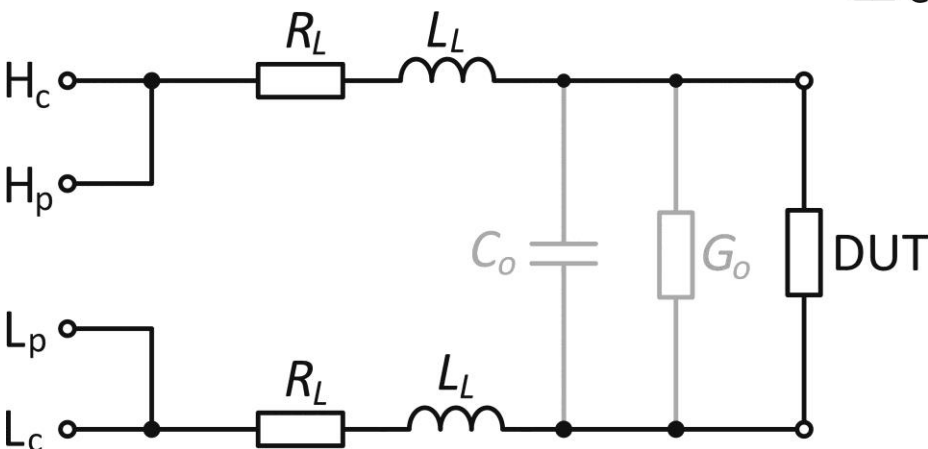
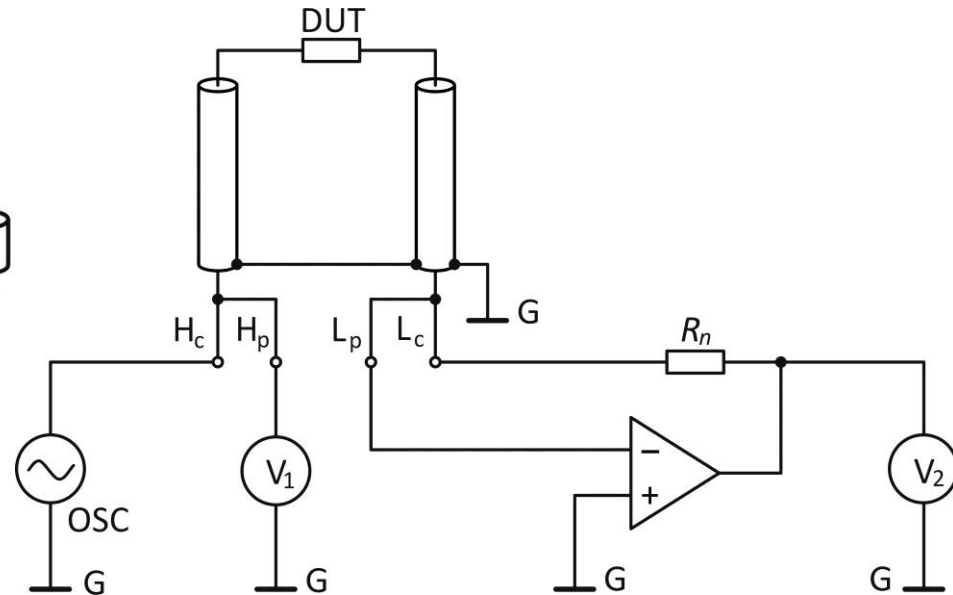
Digitální RLC měřiče

Třívodičové připojení (3-terminal connection)

Propojení dvojicí stíněných přívodů. Stínění připojeno na guarding.



3T připojení (převzato z: [6])



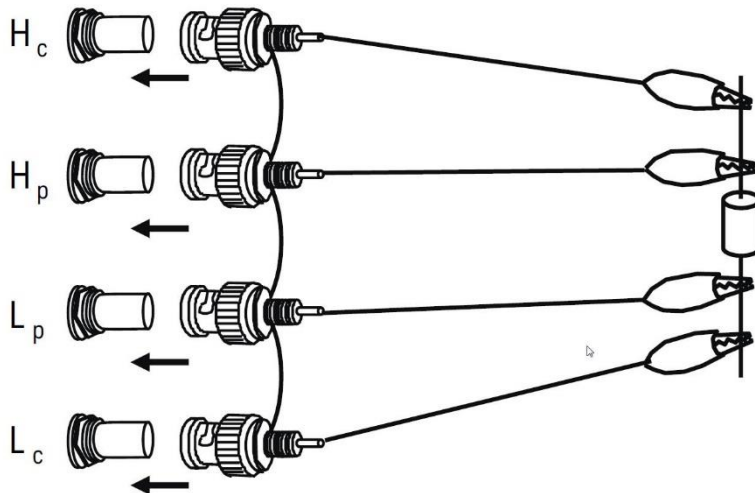
R_L, L_L ...vadí při měření malých Z
 G_o ... lze zanedbat
 C_o ... eliminováno guardingem

Vhodné pro měření impedancí v rozsahu cca 100Ω až $10 \text{ M}\Omega$.

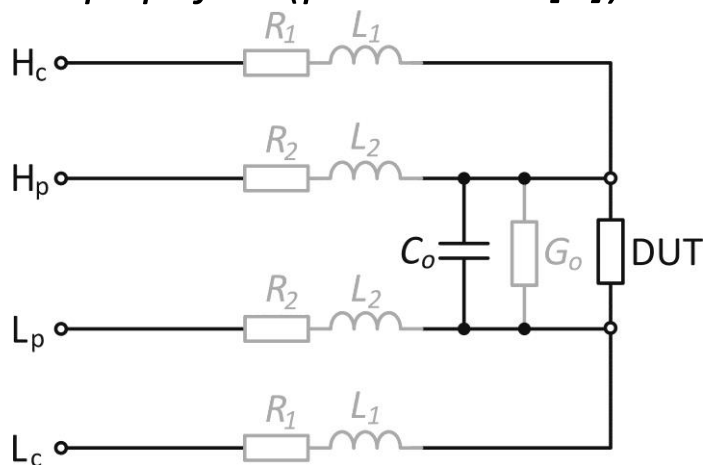
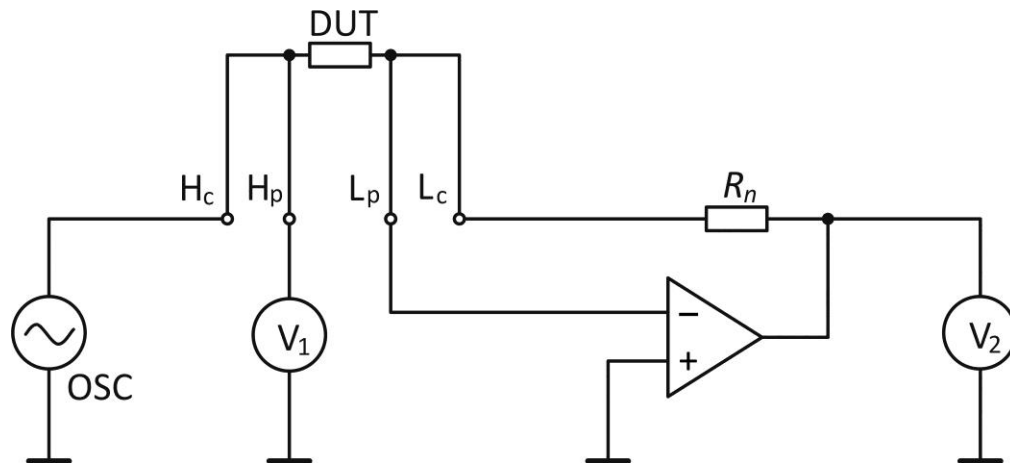
Digitální RLC měřiče

Čtyřvodičové připojení (4-terminal connection)

Propojení čtyřmi přívody (odděleny proudové a napěťové svorky).



4T připojení (převzato z: [6])



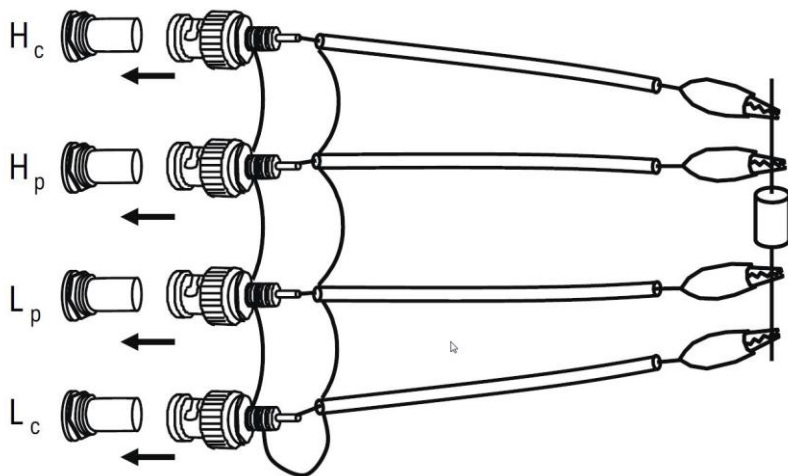
R_1, L_1, R_2, L_2 ...nevadí
 G_0 ...lze zanedbat
 C_0 ...nelze zanedbat, (vadí
při měření velkých Z)

Vhodné pro měření impedancí v rozsahu cca 10 mΩ až 10 kΩ.

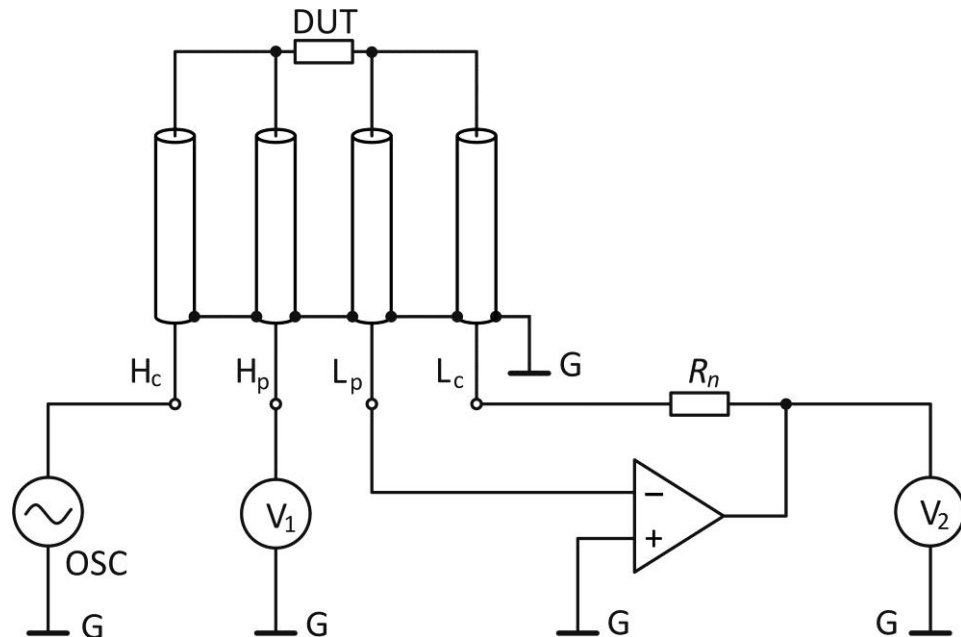
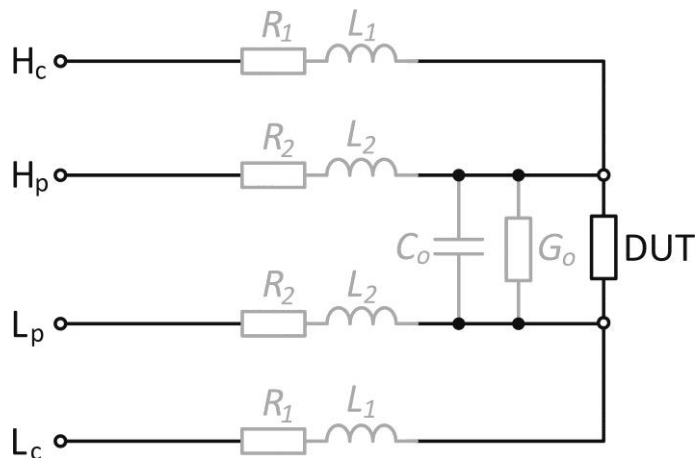
Digitální RLC měřiče

Pětivodičové připojení (5-terminal connection)

Odděleny proudové a napěťové svorky. Stínění + guarding.



5T připojení (převzato z: [6])



R_1, L_1, R_2, L_2 ...nevadí

G_o ...lze zanedbat

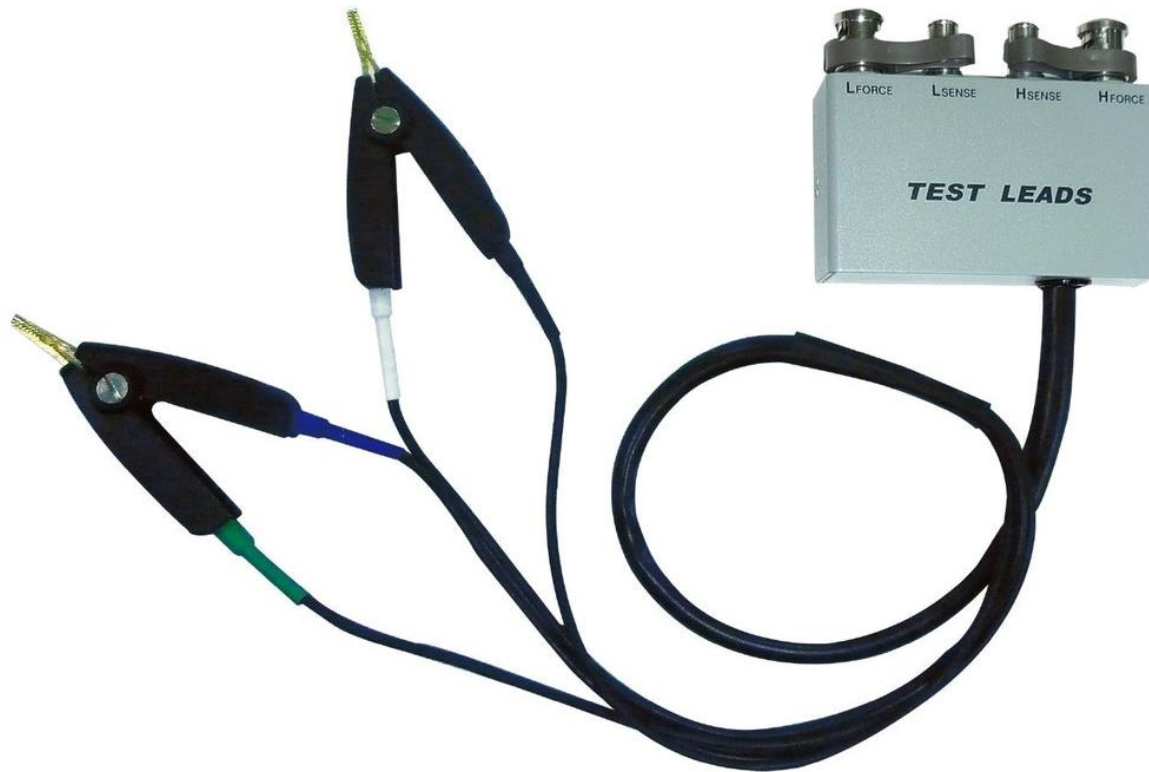
C_o ...eliminováno guardingem

Vhodné pro měření impedancí v rozsahu cca 10 mΩ až 10 MΩ.

Digitální RLC měřiče

Pro připojení DUT se používají různé typy kabelů a adaptérů. Liší se typem připojení (viz výše), provedením připojovacích svorek a frekvenčním rozsahem.

Příklad: Standardní “Kelvinovo”, klešťové provedení testovacího adaptéru pro 4-vodičové resp. 5-vodičové připojení:



Sonda – testovací adaptér LCR06B, GW Instek (převzato z: <https://eshop.micronix.cz/>)

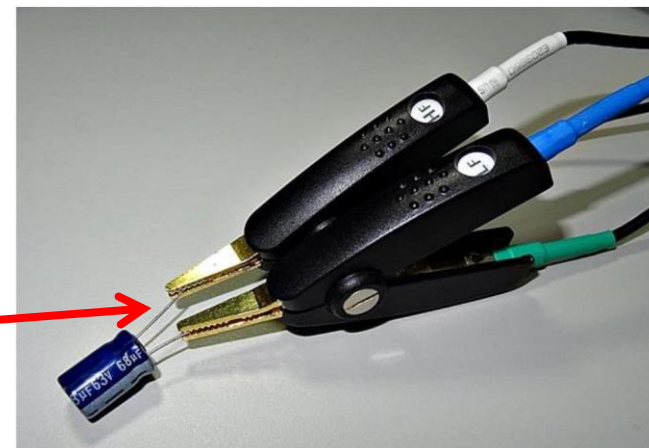
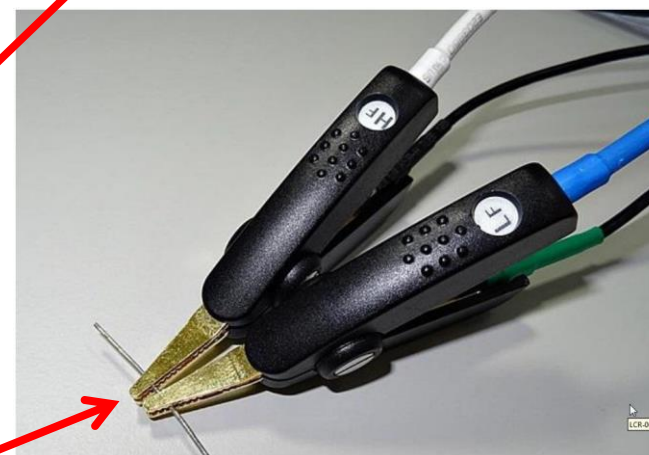
Digitální RLC měřiče

Open/Short kompenzace

Potlačení vlivu zbytkových parazitních parametrů kabelu se provádí tzv. Open/Short kompenzací.

Postup:

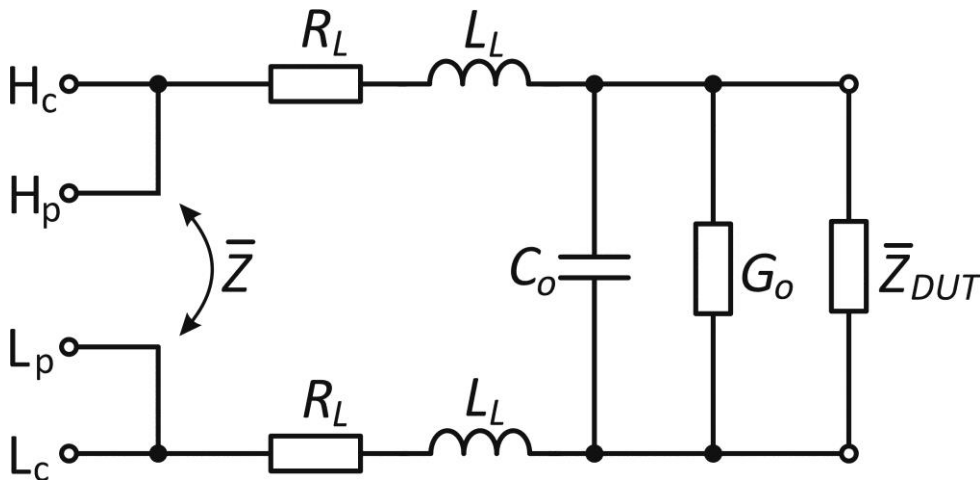
- Nechat H a L kleště vzájemně rozpojené (H_c-H_p propojeny a L_c-L_p propojeny)
- Spustit Open-test
- Propojit H a L kleště vzájemně do zkratu
- Spustit Short-test
- Po provedení obou testů je možné připojit DUT



Digitální RLC měřiče

Princip OPEN/SHORT kompenzace

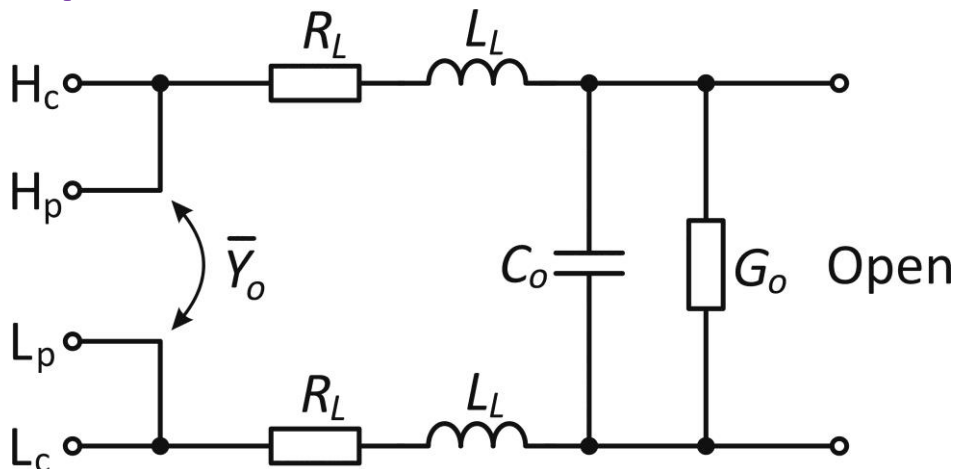
Situace



- Zbytkové parazity kabelu zkreslují měření.
- Měřená hodnota neodpovídá imp. DUT.

$$\bar{Z} \neq \bar{Z}_{DUT}$$

Open test

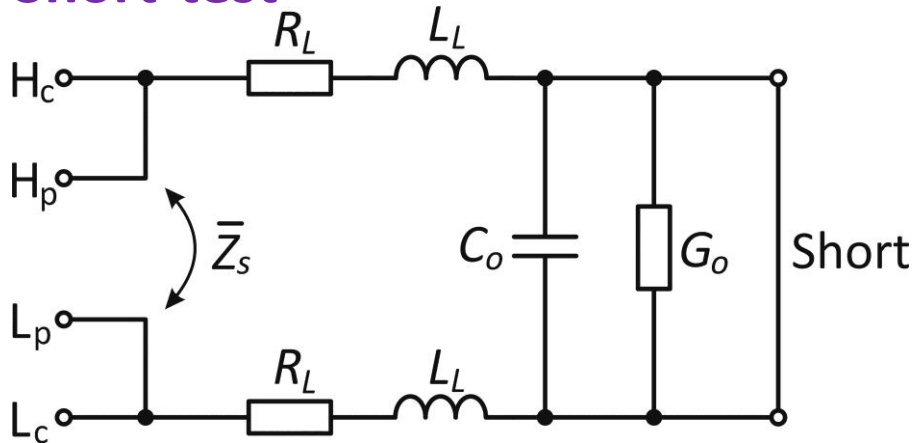


$$\bar{Y}_o = G_o + j\omega C_o$$
$$\left(2R_L + j\omega 2L_L \ll \frac{1}{G_o + j\omega C_o} \right)$$

Digitální RLC měřiče

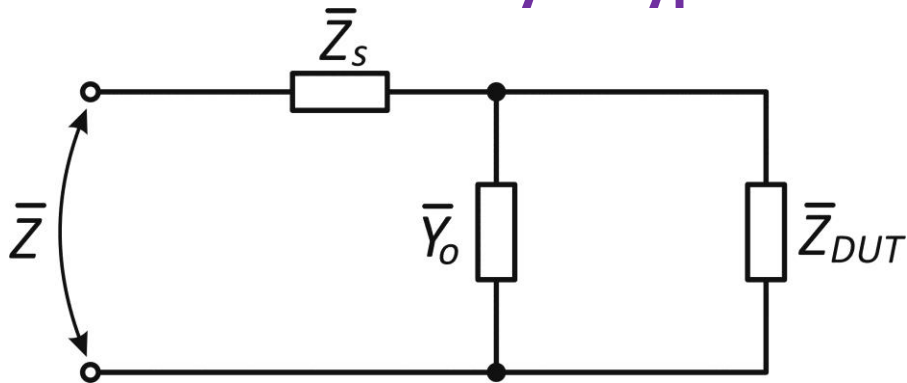
Princip OPEN/SHORT kompenzace

Short-test



$$\bar{Z}_s = 2R_L + j\omega 2L_L$$

Korekce dodatečným výpočtem



$$\begin{aligned}\bar{Z} &= \bar{Z}_s + \left(\frac{1}{\bar{Y}_o} \right) \parallel \bar{Z}_{DUT} = \\ &= \bar{Z}_s + \frac{1}{\bar{Y}_o + \frac{1}{\bar{Z}_{DUT}}} \\ \bar{Z}_{DUT} &= \frac{\bar{Z} - \bar{Z}_s}{1 + \bar{Y}_o(\bar{Z}_s - \bar{Z})}\end{aligned}$$

Digitální RLC měřiče

Příklad: LRC6200, GW Instek, [8]

- Fr. rozs.: 10 Hz až 200 kHz
- Přesnost měř. frekv.: 0,01 %
- Testovací signál:
- CV: 10 mV až 2 V
- CC: 100 μ A až 20 mA
- Rozsah zobr. hodnot:
- Základní přesnost (chyba):
0,05 % (Slow/Med meas.)
0,1 % (Fast meas.)
- Ovládání: RS232/USB



LRC6200, GW Instek

Parameter	Display Range
L	0.00001uH ~ 9999.99H
C	0.00001pF ~ 9999.99mF
R, X, Z	0.00001 Ω ~ 99.9999M Ω
G, B, Y	0.01nS ~ 999.999S
D	0.00001 ~ 9.99999
Q	0.00001 ~ 99999.9
θ_d	-179.999 $^\circ$ ~ 179.999 $^\circ$
θ_r	-3.14159 ~ 3.14159
DCR	0.00001 Ω ~ 99.9999M Ω
$\Delta\%$	-999999% ~ 999999%

*LCR600 rozsahy hodnot jednotlivých veličin
(převzato z: [8])*

Digitální RLC měřiče

Chyba měření (příklad - LCR6200)

Je udávána pro každý měřený parametr ($C_s, C_p, L_s, L_p, R_s, R_p, D, Q, |\bar{Z}|, |\bar{Y}|$) speciálním předpisem (vzorcem).

- Např. pro měření indukčností je chyba LCR6200 vyjádřena:

$$A_e = \pm [AA_r + (K_a + K_b + K_f)100 + K_L]K_c \quad (\%)$$

A_e ...celková procentní chyba

A ...základní chyba

A_r ...korekční koeficient základní přesnosti

K_a ...korekční koeficient a na velikost měřené impedance

K_b ...korekční koeficient b na velikost měřené impedance

K_c ...teplotní korekční koeficient

K_f ...korekční koeficient kalibrace přívodních kabelů

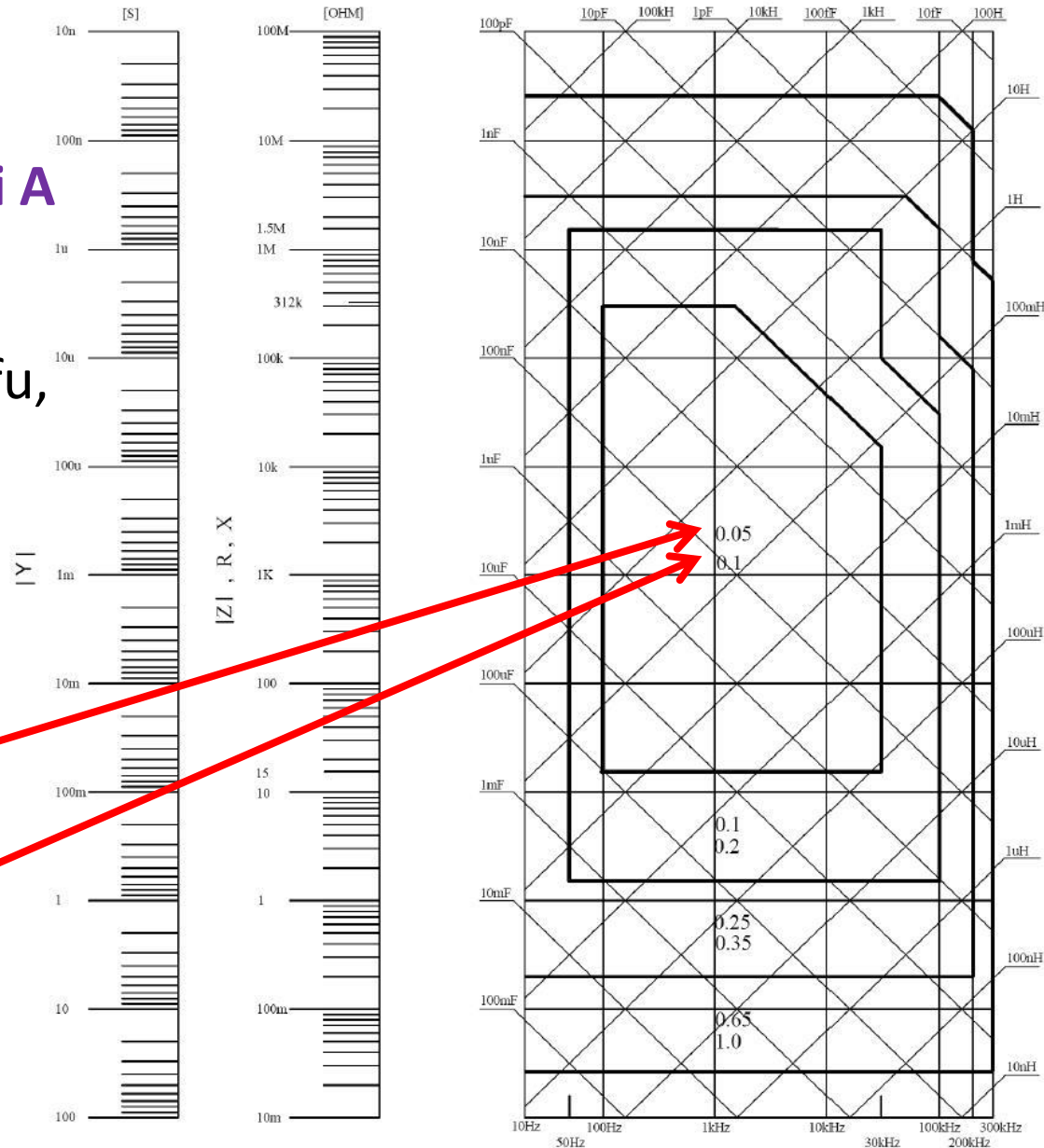
K_L ...korekční koeficient délky přívodních kabelů

Digitální RLC měřiče

Chyba měření (LCR6200)

Stanovení zákl. přesnosti A

- Základní přesnost A je vymezena oblastmi v tzv. reaktančním grafu, (viz [8]).
- Všechny stupnice jsou logaritmické.
- Je uvedena zvlášť hodnota pro:
Slow/Medium meas.
Fast measurement

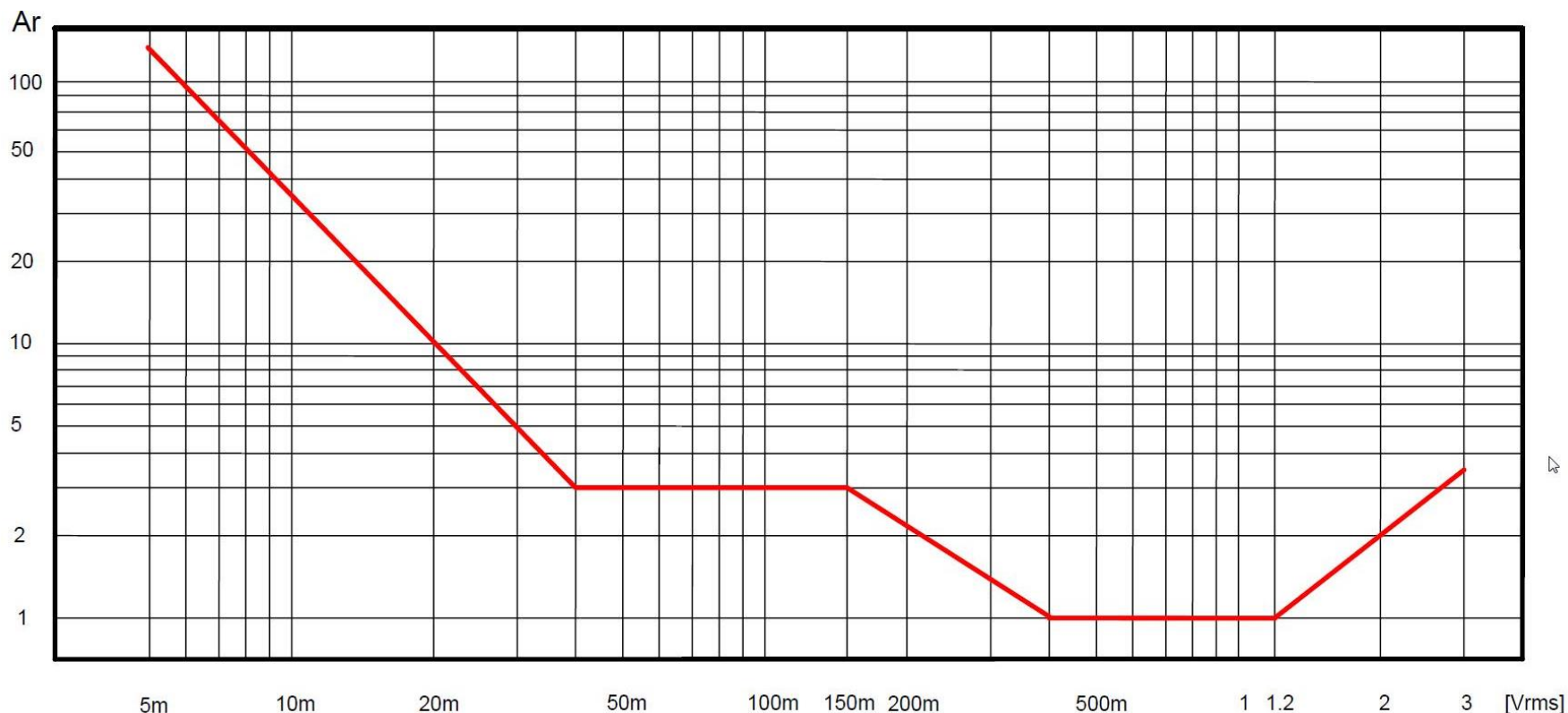


Digitální RLC měřiče

Chyba měření (LCR6200)

Stanovení koeficientu A_r

Hodnota A_r (korekční koeficient základní přesnosti) je závislá na velikosti měřicího napětí (V_{RMS}).



Graf pro stanovení koeficientu A_r (převzato z: [8])

Digitální RLC měřiče

Chyba měření (LCR6200)

Stanovení koeficientů

K_a a K_b

Korekční členy na velikost měřené impedance (K_a a K_b) je nutné dopočítat z následujících předpisů.

Table 13-1 Impedance correction factors

Measurement speed	Measuring frequency	K_a	K_b
Slow Medium	$f_m < 100\text{Hz}$	$(\frac{1 \times 10^{-3}}{ Z_m })(1 + \frac{200}{V_s})(1 + \sqrt{\frac{100}{f_m}})$	$ Z_m (1 \times 10^{-9})(1 + \frac{70}{V_s})(1 + \sqrt{\frac{100}{f_m}})$
	$100\text{Hz} \leq f_m \leq 100\text{kHz}$	$(\frac{1 \times 10^{-3}}{ Z_m })(1 + \frac{200}{V_s})$	$ Z_m (1 \times 10^{-9})(1 + \frac{70}{V_s})$
	$f_m > 100\text{kHz}$	$(\frac{1 \times 10^{-3}}{ Z_m })(2 + \frac{200}{V_s})$	$ Z_m (3 \times 10^{-9})(1 + \frac{70}{V_s})$
Fast	$f_m < 100\text{Hz}$	$(\frac{2.5 \times 10^{-3}}{ Z_m })(1 + \frac{400}{V_s})(1 + \sqrt{\frac{100}{f_m}})$	$ Z_m (2 \times 10^{-9})(1 + \frac{100}{V_s})(1 + \sqrt{\frac{100}{f_m}})$
	$100\text{Hz} \leq f_m \leq 100\text{kHz}$	$(\frac{2.5 \times 10^{-3}}{ Z_m })(1 + \frac{400}{V_s})$	$ Z_m (2 \times 10^{-9})(1 + \frac{100}{V_s})$
	$f_m > 100\text{kHz}$	$(\frac{2.5 \times 10^{-3}}{ Z_m })(2 + \frac{400}{V_s})$	$ Z_m (6 \times 10^{-9})(1 + \frac{100}{V_s})$

f_m : Measuring frequency [Hz]

Z_m : The impedance of the DUT [Ω]

V_s : The amplitude of the measuring signal [mV_{rms}]

When the impedance is less than 500 Ω then use K_a ; K_b can be ignored.

When the impedance is larger than 500 Ω then use K_b ; K_a can be ignored.

Vzorce pro stanovení K_a a K_b (převzato z: [8])

Digitální RLC měřiče

Chyba měření (LCR6200)

Stanovení koeficientu K_c

Table 13-2 Temperature correction factor K_c

Temp (°C)	5	8	18	28	38	
K_c	6	4	2	1	2	4

Tabulka teplotních korekčních koeficientů K_c (převzato z: [8]).

Stanovení koeficientu K_f

Table 13-3 Correction factor for interpolated open/short trimming K_f

Test frequency	K_f
When test frequency equals to the open/short trimming frequency	0
When test frequency is not equal to the open/short trimming frequency	0.0003

Tabulka korekčních koeficientů kalibrace přívodních kabelů K_f (převzato z: [8]).

Digitální RLC měřiče

Chyba měření (LCR6200)

Stanovení koeficientu K_L

Table 13-4 Correction factors for the cable length of test leads K_L

Amplitude of the test signal	Cable length of the test leads		
	0m	1m	2m
$\leq 1.5V_{rms}$	0	$2.5 \times 10^{-2}(1 + 0.5f_m)$	$5 \times 10^{-2}(1 + 0.5f_m)$
$> 1.5V_{rms}$	0	$2.5 \times 10^{-2}(1 + 0.9f_m)$	$5 \times 10^{-2}(1 + 1.1f_m)$

In above table, f_m represents the frequency of the measuring signal [kHz].

Tabulka korekčních koeficientů délky přívodních kabelů K_L (převzato z: [8]).

Literatura

- [1] Haasz V.: Elektrická měření – přístroje a metody, ČVUT 2018
- [2] Regis P. Landim, Helio R. Carvelo, Vincius C. de Olivera: The redefined SI and the electromagnetic quantities in detail–part II: resistance, conductance, charge, capacitance, inductance, power, magnetic flux density and magnetic flux, Metrologia 2019.
- [3] IET Labs Inc.: SCA Standard Capacitance Reference or Working Standards, Data Sheet, www.ietlabs.com
- [4] IET Labs Inc.: 1482 Series Primary Standard Inductor, Data Sheet, www.ietlabs.com
- [5] Tůmová O. a kol.: Elektrická měření – měřicí metody, ZČU, 2005
- [6] Keysight: Impedance Measurement Handbook A Guide to Measurement Technology and Techniques, 6th edition, Application Note, 2020, www.keysight.com
- [7] Hioki: Impedance Measurement Handbook, 1st edition, 2018, www.hioki.com
- [8] GW Instek: LCR Meter LCR-6300/6200/6100/6020/6002, User's Guide, Version: 1.07, www.gwinstek.com