



**Česká metrologická společnost, z.s.**

**Novotného lávka 5, 116 68 Praha 1**

**tel/fax: 221 082 254**

**e-mail: cms-zk@csvts.cz**

**www.csvts.cz/cms**

**Metodika provozního měření**

**MPM 4.1.2/05/19**

**METODIKA PROVOZNÍHO MĚŘENÍ  
PASIVNÍCH ELEKTRICKÝCH PRVKŮ**

**Praha**  
říjen 2019

**Vzorový metodický postup** byl zpracován a financován ÚNMZ v rámci Plánu standardizace – Program rozvoje metrologie 2019  
Číslo úkolu: VII/3/19

**Zadavatel:** Česká republika – Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, organizační složka státu

**Řešitel:** Česká metrologická společnost, z.s.

© ÚNMZ, ČMS

**Neprodejné:** Metodika je volně k dispozici na stránkách ÚNMZ a ČMS. Nesmí však být dále komerčně šířena.

## 1 Předmět metodiky

Metodika se týká provozního měření parametrů pasivních elektrických prvků pro stejnosměrný a nízkofrekvenční harmonický signál (1 kHz).

Popsané zásady se používají pro měření až do frekvence 100 MHz.

Jedná se o měření hlavních parametrů:

- elektrického odporu,
- kapacity,
- indukčnosti.

Jsou uvedeny základy k měření vedlejších parametrů:

- ztrátový činitel kondenzátorů,
- sériový odpor kondenzátorů,
- dielektrická absorpce kondenzátorů,
- činitel jakosti indukčnosti.

Jsou zdůrazněny zásady pro přesné měření a pro měření okrajových hodnot (na začátku a na konci možného rozsahu měření).

## 2 Související normy a metrologické předpisy

	Agilent (Keysight) Impedance measurement handbook	[1]
Quad Tech	LCR measurement primer	[2]
NPL	A Guide to measuring resistance and impedance below 1 MHz	[3]
HORSKÝ J., HORSKY P.	Calibration of Multifunction and Multirange Instruments by Method of Functional Blocks Cal Lab, International journal of metrology, USA, 3/1997	[4]
HORSKY J.	Calibration of Autobalance RLC Meters, 9.congres Internat. Métrologie 99, Bordeaux, France	[5]
	<a href="https://en.wikipedia.org/wiki/Electrical_impedance">https://en.wikipedia.org/wiki/Electrical_impedance</a>	[6]
	<a href="https://cs.wikipedia.org/wiki/Impedance">https://cs.wikipedia.org/wiki/Impedance</a>	[7]
<b>Kalibrační postupy ČKS pro elektrické prvky</b>		
KP 4.1.2/15/15	Dvousvorkový kapesní měřič RLC	[8]
KP 4.1.2/07/10/N	Dekádový odpor	[9]
KP 4.1.2/09/10/N	Digitální ohmmetry (s rozlišením nejvýše 4,5 digitů)	[10]
KP 4.1.3/01/06/N	Nízkofrekvenční měřiče RLC	[11]

**Staré dokumenty**

- MPM 2300.1 Miery elektrického odporu pre jednosmerný prúd. Sekundárne etalóny a prevádzkové meradlá. Technické požiadavky a metódy skúšania pri typových skúškach [12]
- MPM2304.2 Sekundárne etalóny indukčnosti. Metódy skúšania pre úradné overovanie [13]
- MPM2308.2 Sekundárne etalóny elektrickej kapacity. Metódy skúšania pre úradné overovanie [14]

**Kalibrační postupy zahraniční****Německé**

- Die Kalibriervorschriften VDI/ VDE/ DGQ/ DKD 2622 Blatt8 Kalibrierrichtlinie für Gleichstrom-Widerstände [15]

**Španělské**

- M 08 PROCEDIMIENTO PARA LA CALIBRACIÓN DE CAJAS DE DÉCADAS DE RESISTENCIA Centro Español de Metrología Tres Cantos, Madrid [16]

[16] M 08 PROCEDIMIENTO PARA LA CALIBRACIÓN DE CAJAS DE DÉCADAS DE RESISTENCIA Centro Español de Metrología Tres Cantos, Madrid

**3 Kvalifikace pracovníků provádějících měření**

Kvalifikace pracovníků provádějících měření pasivních elektrických veličin je dána příslušným předpisem organizace. Tito pracovníci se seznámí s metodickým postupem upraveným na konkrétní podmínky daného pracoviště provádějícího měření a případnými (interními) souvisejícími předpisy.

Doporučuje se potvrzení odborné způsobilosti těchto pracovníků prokázat vhodným způsobem, například osvědčením o interním zaškolení, o absolvování odborného kurzu, v krajním případě certifikátem odborné způsobilosti. Úroveň školení závisí na zařazení pracovníka a důležitosti prováděné měřicí operace.

**4 Názvosloví, definice**

UUT měřený prvek, v této metodice pasivní elektrický prvek.

**Impedance**

Elektrická impedance je rozšířením pojmu elektrický odpor na situace, kdy prostředím prochází střídavý elektrický proud.

Nejjednodušším pohledem na impedanci je ten, že se jedná o odpor kladený střídavému proudu. Jednotkou impedance je ohm [ $\Omega$ ], obvykle se značí písmenem  $Z$ .

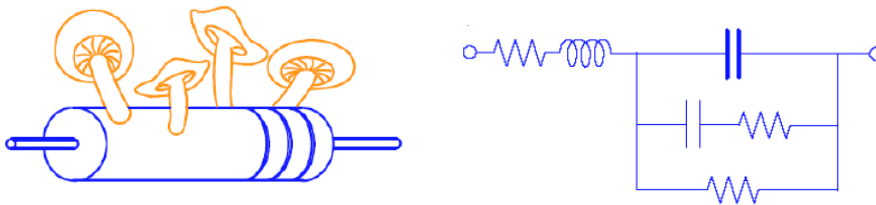
Je-li impedance připojena k napětí  $U$  a protéká-li jí proud  $I$ , je její hodnota dána ohmovým zákonem.

### Open a short - zkrat a rozpojený obvod

Všechna měření v blízkosti spodní a horní části rozsahu měření jsou prováděna po nastavení měřidla při zapojeném zkratu a rozpojeném obvodu. Proto záleží na správném provedení měřených prvků pro tyto hodnoty, které má být řešeno v souvislosti s provedením měřených prvků pro ostatní hodnoty.

### Vyjádření měřené impedance

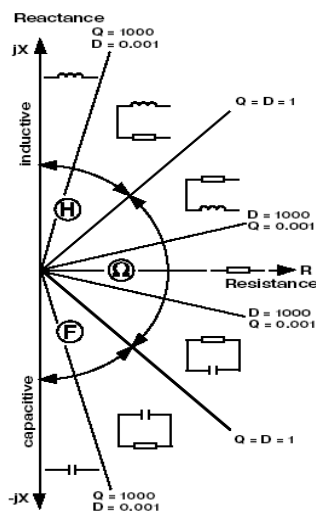
Žádná skutečná elektrická součástka nemá charakter jen odporu, kapacity nebo indukčnosti, vždy má parazitní vlastnosti, jak s nadsázkou ukazuje obr. č.1.



**Obr. č. 1:** Každá elektrická součástka má i nežádoucí, parazitní vlastnosti a náhradní zapojení kondenzátoru se znázorněným odporem a indukčností přívodů, parazitním svodem a RC členem, popisujícím zjednodušeně dielektrickou absorpci.

### Pracovní měřený prvek

Základními parametry pro měřený prvek charakteru impedancí je amplituda, fázový posuv mezi střídavým napětím a proudem na měřený prvek viz obr. č. 2. Vlastní měřený prvek charakteru impedancí se pro různé fázové posuvy mezi signály konstrukčně velmi liší. Snahou je vytvořit vždy měřený prvek co nejvíce se blížíci vlastnostmi ideálnímu  $R$ ,  $L$  nebo  $C$ .



**Obr. č. 2:** Fázový vztah mezi napětím a proudem a jeho vyjádření v náhradním zapojení

Převážná část měření v oblasti měření prvků je přesunuta na měření stejnosměrné hodnoty odporu. Nevýhodou je velmi velký rozsah odporů vyskytující se v praxi. Postačující přesnost, poskytovaná řadou laboratoří je kolem 10 ppm pro střední

hodnoty odporu (10  $\Omega$  až 100 k $\Omega$ ). Tyto kalibrace lze provést pomocí sady měřený prvek odporu a multimetru. Pro odpory s hodnotou menší než 1  $\Omega$  nemají multimetry zdroj dostatečně velkého proudu, aby měřený úbytek napětí byl postačující pro dosažení vyhovující přesnosti. Z toho důvodu se tyto hodnoty měří jiným způsobem, ale tím přesnost měření klesá. Měřicí schopnosti laboratoří začínají kolem 10<sup>-4</sup>  $\Omega$  a končí kolem 10<sup>15</sup>  $\Omega$ . Pro velké odpory nad cca 10 M $\Omega$  se uplatňuje vliv šumů a svodů. Tuto oblast hodnot je třeba řešit samostatně.

Prakticky všechna střídavá měření pro frekvence do 100 MHz (mimo velké kapacity) se provádí na přístrojích nazývaných autobalanční mosty, které pracují na podobném principu jako u měření  $R$ .

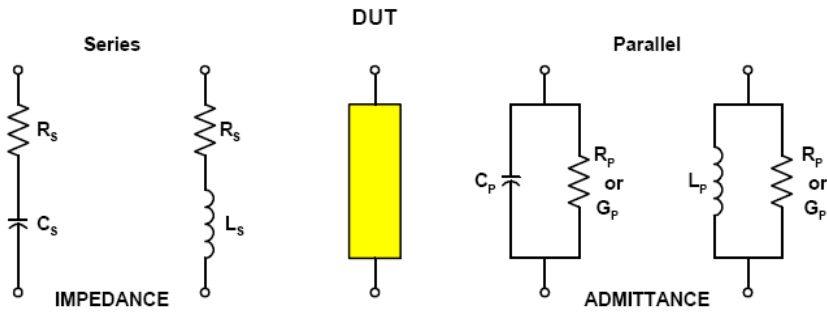
V oblasti frekvencí nad 1 MHz je rozhodující provedení měřeného prvku tak, aby byl co nejvíce potlačen vliv přívodů. Další možností je použití speciálně konstruovaných čtyřpárových měřený prvků vyrobených tak, aby mohly být k mostům připojeny přímo na referenční rovinu mostu, tedy bez přívodů. Rozteče a provedení svorek se liší podle výrobce, naštěstí široký frekvenční rozsah mají pouze mosty HP (Agilent, Keysight) a Wayne Kerr s jednotným provedením přívodů.

Pro frekvence nad 10 MHz (nebo o několik MHz výše) je nutné porovnávat čtyřpárové měřený prvek s měřený prvek dvousvorkovými, které jsou proměřeny ve velmi širokém frekvenčním rozsahu, jedná se o zakončovací odpory koaxiálního vedení. Ty umožňují pracovat v rozsahu impedancí zhruba 10  $\Omega$  až 100  $\Omega$ . Druhou možností jsou koaxiální měřený prvek kapacity realizovatelné pro hodnoty jednotek, nejvýše desítek pF jako úsek vedení naprázdno a pro koaxiální měřený prvek indukčnosti jako úsek vedení nakrátko.

Autobalanční RLCG most má základní funkční blok převodník proud napětí, který je tvořen operačním zesilovačem s rezistorem ve zpětné vazbě. Pro širší frekvenční rozsah je vybaven složitějším zapojením simulujícím stejnou funkci jako zmíněný operační zesilovač. Základní rozsahy mostu jsou určeny přepínáním zpětnovazebního rezistoru tohoto zesilovače. Je proto třeba kalibrovat mosty tohoto typu pomocí rezistorů s minimální frekvenční závislostí, protože jedině tímto způsobem lze prověřit frekvenční závislost převodníku proudu na napětí bez dalších vlivů, viz literatura [1], [6]. [9]. na konci této publikace.

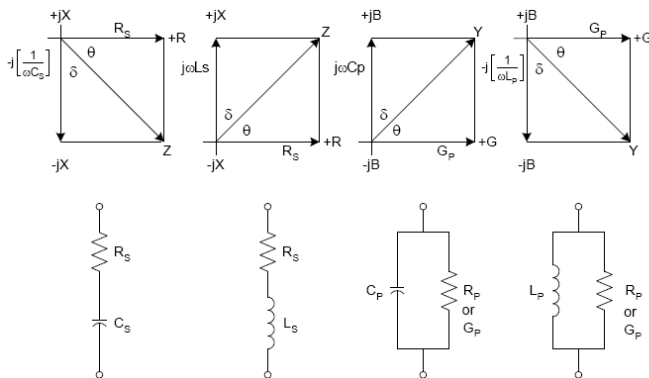
Zjištění charakteru prvku znamená stanovit poměr mezi napětím a proudem u libovolného měřeného obvodu. Tento charakter vychází z fázového posunu mezi celkovým proudem a napětím, při čemž úhel se počítá od napětí k proudu. Podle převažující složky získáme tři typy charakteru reálného prvku, a to odporový ( $\varphi = 0$ ), induktivní ( $\varphi > 0$ ) a kapacitní ( $\varphi < 0$ ). Proto je pro střídavé parametry zaveden **pojem impedance a admittance**. Impedance je poměr mezi střídavým napětím a proudem, je to určitá analogie odporu pro DC signál. Protože napětí i proud jsou komplexními čísly, musí být i impedance komplexním číslem, značíme ji  $Z$ , jednotkou je ohm ( $\Omega$ ).

Převrácenou hodnotou impedance je admittance, je to opět určitá analogie vodivosti pro DC, označuje se  $Y$  a její jednotkou je siemens (S). Při měření reálných prvků pak tedy stanovujeme výsledný charakter prvku.



**Obr. č. 3:** Náhradní zapojení prvku (DUT žlutě, je platné jen na určité frekvenci)

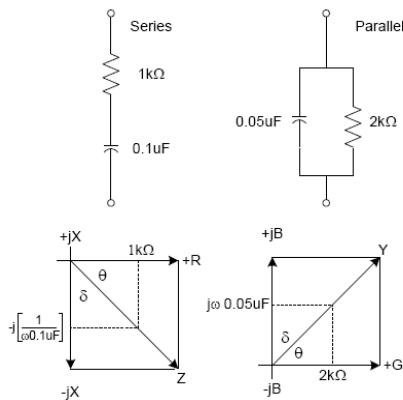
Výhodou takového zapojení je, že se měří jen dvě složky měřené veličiny a fázový posuv mezi nimi, jak ukazuje i obr. č. 4.



**Obr. č. 4:** Fázové vztahy pro různá náhradní zapojení prvku.

Význam náhradního zapojení je tím větší, čím jsou vlastnosti měřené impedance vzdálenější vlastnostem ideálního odporu, ideální kapacity nebo ideální indukčnosti.

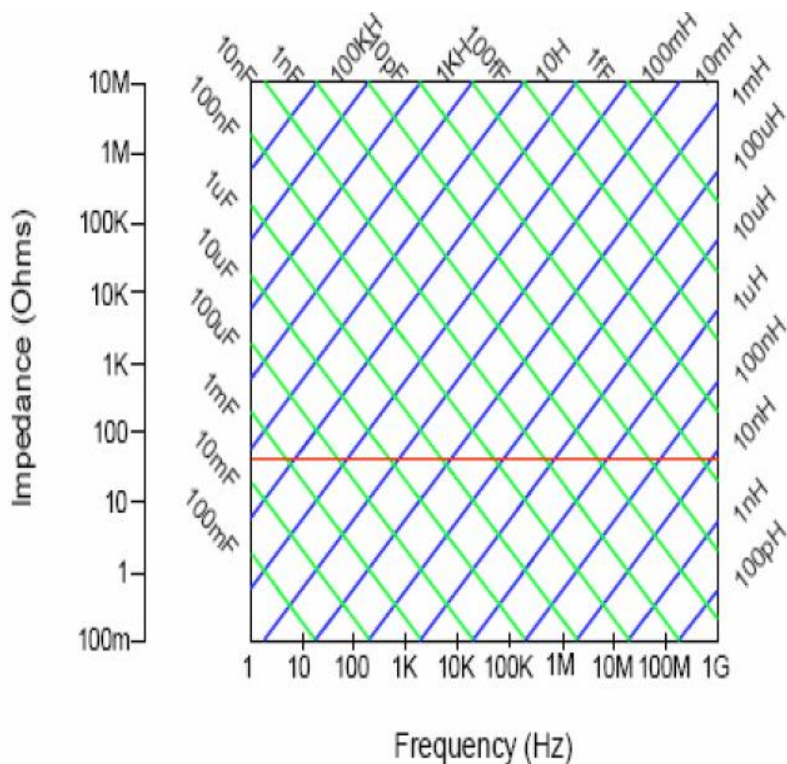
Například pro měřenou impedanci  $Z = 1000 \Omega - j1000 \Omega$  na frekvenci 1,5915 kHz můžeme použít dvě náhradní schémata, sériové zapojení odporu 1 k $\Omega$  a kapacity 0,1  $\mu\text{F}$ , nebo paralelní zapojení odporu 2 k $\Omega$  a kapacity 0,05  $\mu\text{F}$ . Pozor, udané náhradní zapojení platí jen pro danou frekvenci!



**Obr. č. 5:** Ukázka odlišnosti dvou možností vyjádření vlastností jedné součástky (hodnoty prvků platí jen na zvolené frekvenci)

*Nevýhodou impedančních měření v metrologii je, že nejsou k dispozici ideální prvky a proto se musí měřit vlastnosti reálného prvku podle zvoleného náhradního zapojení, to je pro paralelní nebo sériovou kombinaci náhradních prvků a pro zvolené vyjádření složek jako impedance nebo admitance*

Při práci v oblasti měření impedancí je naprosto nezbytné si plně uvědomovat, že zatímco ideální rezistor má hodnotu odporu nezávislou na frekvenci, impedance ideálního kondenzátoru při zvyšování frekvence měření klesá a impedance indukčnosti roste, což lze názorně ukázat v impedanční rovině na **tab. č. 1**. To v praxi znamená, že měřitelnost hodnot kapacity a indukčnosti závisí mimo jiné i na frekvenci z důvodu, že pro příliš vysoké nebo příliš nízké frekvence se dostávají do oblasti velmi malých nebo velmi velkých a tedy těžko měřitelných impedancí.



**Tab. č. 1:** Impedanční rovina

Impedanční rovina slouží k rychlému přehledu o velikosti impedance kapacity nebo indukčnosti v závislosti na frekvenci.

**Impedanční rovina dává zásadní informaci pro každého, kdo potřebuje měřit prvky při střídavém signálu a žádné programy nebo kalkulátory nemohou nahradit představu o velikosti impedance v závislosti na frekvenci tak dobře, jako impedanční diagram.**

Nevýhodou impedančních měření v metrologii je, že nejsou k dispozici ideální prvky a proto se musí měřit vlastnosti reálného prvku podle zvoleného náhradního zapojení, to je pro paralelní nebo sériovou kombinaci náhradních prvků a pro zvolené vyjádření složek jako impedance nebo admitance. Tím se obor rozpadá na řadu veličin, které jsou ale svázány vztahy podle **tabulky č. 2**.



$$\begin{aligned}
 Z &= R_S + jX_S = \frac{1}{Y} = |Z| \varepsilon^{j\theta} \\
 |Z| &= \sqrt{R_S^2 + X_S^2} = \frac{1}{|Y|} \\
 R_S &= \frac{G_P}{G_P^2 + B_P^2} = \frac{R_P}{1 + Q^2} \\
 X_S &= -\frac{B_P}{G_P^2 + B_P^2} \\
 Y &= G_P + jB_P = \frac{1}{Z} = |Y| \varepsilon^{j\phi} \\
 |Y| &= \sqrt{G_P^2 + B_P^2} = \frac{1}{|Z|} \\
 G_P &= \frac{R_S}{R_S^2 + X_S^2} \\
 B_P &= -\frac{X_S}{R_S^2 + X_S^2} \\
 C_S &= -\frac{1}{\omega X_S} = C_P (1 + D^2) \\
 C_P &= \frac{B}{\omega} = \frac{C_S}{1 + D^2} \\
 L_S &= \frac{X}{\omega} = L_P \frac{Q^2}{1 + Q^2} \\
 L_P &= -\frac{1}{\omega B_P} = L_S \left(1 + \frac{1}{Q^2}\right) \\
 Q &= -\frac{1}{D} = \frac{X_S}{R_S} = \frac{G_P}{B_P} = \tan \theta \\
 D &= -\frac{1}{Q} = \frac{R_S}{X_S} = \frac{B_P}{G_P} = \tan(90^\circ - \theta) = \tan \delta \\
 \theta &= -\phi \\
 \phi &= -\theta
 \end{aligned}$$

**Tab. č. 2:** Převodní vztahy v oblasti měření impedancí.

Při práci v oblasti měření impedancí je naprosto nezbytné si plně uvědomovat, že zatímco ideální rezistor má hodnotu odporu nezávislou na frekvenci, impedance ideálního kondenzátoru při zvyšování frekvence měření klesá a impedance indukčnosti roste, což lze názorně ukázat v impedanční rovině na **tab. č. 1**. To v praxi znamená, že měřitelnost hodnot kapacity a indukčnosti závisí mimo jiné i na frekvenci z důvodu, že pro příliš vysoké nebo příliš nízké frekvence se dostávají do oblasti velmi malých nebo velmi velkých a tedy těžko měřitelných impedancí.

**E série** je systém preferovaných čísel odvozený pro použití v elektronických součástkách. Skládá se ze série E1, E3, E6, E12, E24, E48, E96 a E192, kde číslo za „E“ označuje množství hodnot „kroků“ v každé sérii. I když je teoreticky možné vyrábět komponenty jakékoliv hodnoty, v praxi nutnost zjednodušení zásob vedla průmysl k usazování na sérii E pro odpory, kondenzátory, indukty. Jiné typy elektrických komponent jsou specifikovány řadou Renard (např. Pojistky) nebo jsou definovány v příslušných normách (např. IEC 60228 pro vodiče). Součástky se vyrábí tak, aby nebyly vyrobeny zmetkové hodnoty, každá vyrobená hodnota vyhoví pro některou hodnotu z řady E, jsou to tak zvané E-serie:

- **E1**
  - 1.00
- **E3** (>20 % tolerance)
  - 1.00, 2.20, 4.70
- **E6** (20 % tolerance)
  - 1.00, 1.50, 2.20, 3.30, 4.70, 6.80
- **E12** (10 % tolerance)
  - 1.00, 1.20, 1.50, 1.80, 2.20, 2.70, 3.30, 3.90, 4.70, 5.60, 6.80, 8.20
- **E12** (10 % tolerance)
  - 1.0, 1.2, 1.5, 1.8, 2.2, 2.7, 3.3, 3.9, 4.7, 5.6, 6.8, 8.2
- **E24** (5 % tolerance)
  - 1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.5, 1.6, 1.8, 2.0, 2.2, 2.4, 2.7, 3.0, 3.3, 3.6, 3.9, 4.3, 4.7, 5.1, 5.6, 6.2, 6.8, 7.5, 8.2, 9.1
- **E48** v (2 % tolerance)
  - 1.00, 1.05, 1.10, 1.15, 1.21, 1.27, 1.33, 1.40, 1.47, 1.54, 1.62, 1.69, 1.78, 1.87, 1.96, 2.05, 2.15, 2.26, 2.37, 2.49, 2.61, 2.74, 2.87, 3.01, 3.16, 3.32, 3.48, 3.65, 3.83, 4.02, 4.22, 4.42, 4.64, 4.87, 5.11, 5.36, 5.62, 5.90, 6.19, 6.49, 6.81, 7.15, 7.50, 7.87, 8.25, 8.66, 9.09, 9.53
- **E96** (1 % tolerance)
  - 1.00, 1.02, 1.05, 1.07, 1.10, 1.13, 1.15, 1.18, 1.21, 1.24, 1.27, 1.30, 1.33, 1.37, 1.40, 1.43, 1.47, 1.50, 1.54, 1.58, 1.62, 1.65, 1.69, 1.74, 1.78, 1.82, 1.87, 1.91, 1.96, 2.00, 2.05, 2.10, 2.15, 2.21, 2.26, 2.32, 2.37, 2.43, 2.49, 2.55, 2.61, 2.67, 2.74, 2.80, 2.87, 2.94, 3.01, 3.09, 3.16, 3.24, 3.32, 3.40, 3.48, 3.57, 3.65, 3.74, 3.83, 3.92, 4.02, 4.12, 4.22, 4.32, 4.42, 4.53, 4.64, 4.75, 4.87, 4.99, 5.11, 5.23, 5.36, 5.49, 5.62, 5.76, 5.90, 6.04, 6.19, 6.34, 6.49, 6.65, 6.81, 6.98, 7.15, 7.32, 7.50, 7.68, 7.87, 8.06, 8.25, 8.45, 8.66, 8.87, 9.09, 9.31, 9.53, 9.76

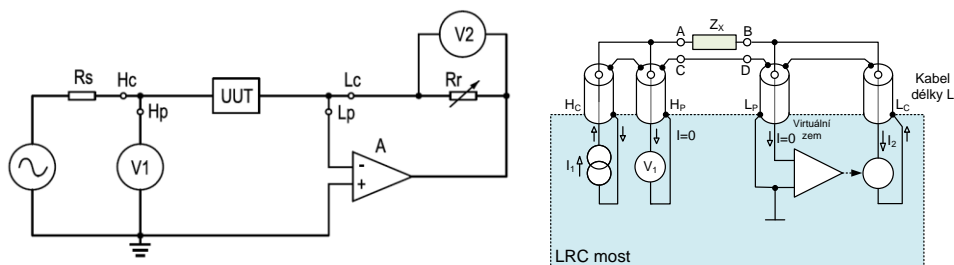
### Vysvětlení použitých pojmů speciálních pro oblast impedancí

Klasický impedanční most – přístroj mostového typu obsahující nejméně čtyři ramena tvořená impedančními prvky, ve kterém měříme impedanci vyvážením mostu pro měřenou reálnou a imaginární složku měřené impedance.

Transformátorový most - mostové zapojení, ve kterém poměrová ramena jsou nahrazena měřicími transformátorovými děliči.

Autobalanční most - elektronický měřicí přístroj pro měření impedancí, kde neznámá impedance je zapojena mezi zdroj měřicího signálu a virtuální zem. Ta je na nízkých kmitočtech tvořena převodníkem proudu na napětí s inventující operačním zesilovačem.

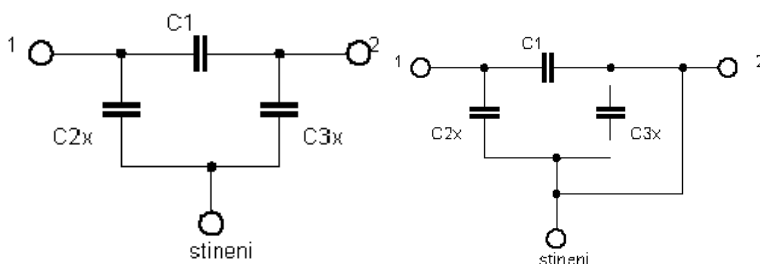
Na inventujícím vstupu tohoto zesilovače je virtuální zem, přepínáním odporu ve zpětné vazbě se mění rozsahy přístroje. Přístroj měří reálnou a imaginární složku impedance a podle nastavené funkce měření z nich počítá požadovaný parametr ( $R$ ,  $L$ ,  $C$ ,  $G$ ,  $Q$ ,  $D$ , ...) pro sériové nebo paralelní náhradní zapojení. Měřená impedance se připojuje čtyřsvorkově nebo čtyřpárově. Prakticky všechny průmyslově vyráběné měřiče impedancí jsou řešeny na tomto principu.



Obr. č. 6: Základní princip autobalančního mostu a 4 TP provedení mostu.

Dvousvorkové připojení - měřený prvek je připojen pouze svými dvěma svorkami. Pokud obsahuje i stínění, pak je připojeno k jedné ze svorek, zpravidla k té, která je připojena ke zdroji měřicího signálu. Dvousvorkově se nejčastěji připojuje měřený prvek indukčnosti. Měřený prvek musí být co nejdále od zdrojů rušení a ovlivňujících veličin (kovových předmětů u měřených indukčností). Toto zapojení je ze všech způsobů připojení nejvíce ovlivňováno okolím a nejméně vhodné pro přesné měření. Není zde potlačen vliv přívodů. Používá se například u kapesních multimetrů při měření  $R$ . Nejčastěji se při střídavém měření používají zkroucené vodiče, aby byl omezen vliv rušení.

Trojsvorkové připojení - měřený prvek je umístěn ve stínícím krytu, který je připojen na třetí svorku. Používá se nejčastěji u měřený prvku kapacity malých a středních hodnot kapacity. Je vhodné pro měření středních a velkých hodnot impedance. Nejčastěji se při střídavém měření používají dva koaxiální kabely.



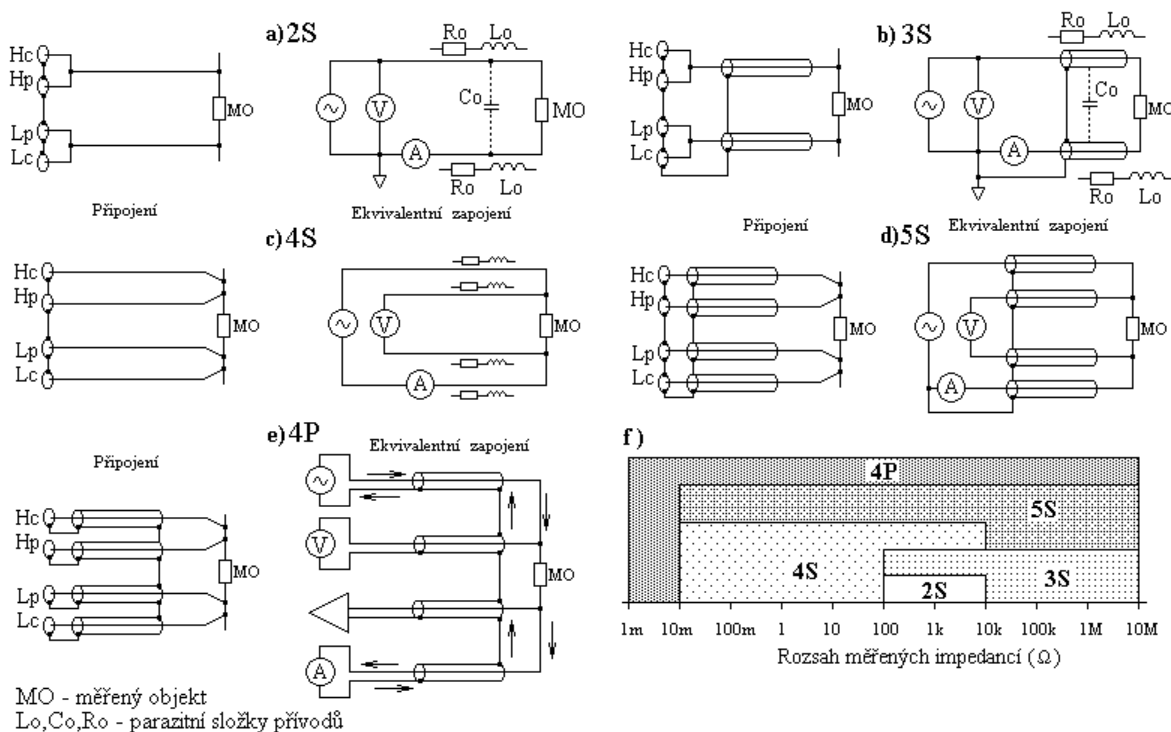
Obr. č. 7: a) Třísvorkový měřený prvek kapacity a b) jeho dvousvorkové připojení

Čtyřsvorkové připojení - na prvek jsou připojeny měřící proudové a napěťové přívody. Smyslem čtyřsvorkového připojení je odstranit vliv přechodového odporu a odporu připojovacích kabelů. Je vhodné pro měření malých a středních hodnot impedance. Nejčastěji se při střídavém měření používají zkroucené nebo stíněné vodiče.

Pětisvorkové připojení - obdobně jako u čtyřsvorkového připojení jsou na měřený prvek připojeny napěťové a proudové přívody. Měřený prvek je ale navíc opatřen stíněním vyvedeným na pátou svorku. Toto připojení má lepší vlastnosti než čtyřsvorkové zapojení, protože měřený prvek je stíněný. Nejčastěji se při střídavém měření používají čtyři koaxiální

kabely nebo stíněné vodiče, při čemž alespoň jeden vodič je spojen se stíněním měřeného objektu.

Čtyřpárové připojení - používaná zkratka 4TP (Terminal Pair). Nejdůležitější a nejčastěji používané připojení pro měření impedance k autobalančním mostům. Je vhodné pro nejšířší rozsah měření impedancí ze všech uvedených zapojení. Měřený prvek je umístěn ve stínícím krytu a vyveden čtyřsvorkově na čtyři koaxiální kabely. Vnější vodiče koaxiálních kabelů musí být propojeny i na straně měřené impedance.



**Obr. č. 8:** Způsoby propojení měřeného objektu a měřicího přístroje: a) Dvojsvorkové b) Trojsvorkové c) Čtyřsvorkové d) Pětisvorkové e) Čtyřpárové.

### Přívody

Vývody odporu a ostatních součástek a přívody jsou z mědi. Ta má teplotní koeficient odporu  $+0,4 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$ . Vlastní měřený prvek odporu má teplotní závislost i o několik řádů menší, asi pod  $0,001 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$ . Přívody jsou často cínované nebo jinak pokovené. Pro čištění měděných vodičů můžeme používat oškrabání nožem, nikdy ne abrasivní materiály a prostředky s částicemi, jako je například brusný papír. Kvalitní kabely k DMM mají odpor kolem  $30 \text{ m}\Omega$  každý. Kontaktní odpor svorek závisí na ploše, která je v kontaktu, na čistotě a na materiálu svorek. Kolísá mezi  $0,3 \text{ m}\Omega$  až asi do  $100 \text{ m}\Omega$ . Anodizované hliníkové povrchy mají na povrchu tenkou vrstvu velmi kvalitního izolantu.

### Termonapětí

Termonapětí je nejčastější zdroj chyb při měření stejnosměrného napětí malé úrovně. Toto napětí vzniká na styku dvou různých materiálů s různými teplotami. Jeho velikost závisí na druhu spojených materiálů a na rozdílu teplot obou stran těchto spojů v uzavřeném proudovém obvodu.

Nejčastěji jsou používány měděné vodiče. Spoj dvou měděných vodičů má termonapětí menší než  $0,2 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ . Je-li jeden z vodičů zoxidován, stoupne toto termonapětí až na neúnosně velkých  $1\ 400 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ . Proto musí být, tam kde je to možné, učiněna vhodná opatření, například termonapětí mědi proti stříbru nebo zlatu je  $0,3 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ , mědi proti cínové pájce  $1$  až  $3 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ . Pájené spoje postačí pro nižší nároky, postříbřené kontakty mají nevýhodu, že mohou oxidovat, zlacené vyhoví ve většině případů. Problémy jsou v pouzdření citlivých polovodičových obvodů, protože termonapětí mědi proti kovu je  $40$  až  $75 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$  a mědi proti křemíku  $400 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ . V tomto případě je jediná možnost, dobrá teplotní vazba minimalizující teplotní rozdíly. Ta není problémem u vodivých materiálů, problematická je u izolátorů, které obvykle izolují elektricky i tepelně. Dobrou tepelnou vodivost mají z elektrických izolátorů elox na hliníku a berilliumoxid.

Termonapětí je významný zdroj potíží hlavně při měření odporu, protože se odpor ohřívá i proudem při měření. Nejlepším prostředkem proti termonapětí je kontakt stejných materiálů a hlavně stálá a stejná teplota. Nejlépe se chovají měděné zalisované spoje.

**Tab. č. 3:** Termonapětí proti mědi

Materiál	Teplotní závislost proti Cu v $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Měď	pod 0,2
Kadmiová pájka	0,2
Zlato	0,2
Stříbro	0,2
Mosaz	2
Cín	3
Cínová pájka 50/50	3
Beriliová měď	4
Hliník	4
Železo	12
Nikl	22
Křemík	500
Oxidovaná měď	nad 1000

### Magnetické vazby

Uzavřený obvod tvořený na příklad zemními spoji a sítovým zemněním působí jako rámová anténa. Indukují se do ní malá napětí, avšak působí jako zdroj s malým vnitřním odporem. Jejich vliv se omezuje zmenšením plochy antény, to znamená užíváme zkroucené nebo koaxiální vodiče. Citlivé obvody uvnitř přístrojů mohou být stíněny uzavřenými kryty z magneticky měkkého materiálu. Možnost vzniku smyček ze zemnicích vodičů se snažíme omezit zemněním do jednoho centrálního zemního bodu a užitím, tam kde je to možné, izolovaných napájecích zdrojů nebo baterií.

### Bílý šum

Každý elektrický odpor je zdrojem šumu. Jeho velikost závisí na hodnotě odporu, teplotě a šířce pásma. Proto se snažíme omezovat šířku pásma na nezbytně nutnou a nízkošumové obvody jsou obvykle nízkoimpedanční. Snížení šumu snížením teploty se dosahuje jen ve velmi speciálních a velmi drahých případech.

Při pokojové teplotě je špičková hodnota špičkového napětí dána vztahem:

$$E_{pp} = 6,5 \times 10^{-10} \sqrt{R\Delta f} ,$$

Velikost nežádoucího šumu se tedy omezuje hlavně snížením  $\Delta f$  nebo  $R$ , pokud je to možné. Vzorec také ukazuje, že pro větší hodnoty  $R$  musí být větší i šum  $E_{pp}$ .

### Rušivé proudy

Při citlivých měřeních se mohou uplatnit rušivé proudy vlivem triboelektrického, piezoelektrického jevu, elektrochemických jevů a svodů. Triboelektrický proud vzniká vlivem nábojů vytvářených při mechanickém namáhání izolátorů, například při ohýbání koaxiálního kabelu. Piezoelektrický proud vzniká mechanickým namáháním některých izolačních materiálů. Elektrochemické jevy vznikají nejčastěji na nedostatečně čistých deskách plošných spojů, ty je nutno po pájení pečlivě očistit, v jednodušších případech methylalkoholem. Hodnota rušivého proudu špatně očištěného plošného spoje může být až 10 nA, při pečlivém očištění může klesnout až na řádově 0,1 pA. U koaxiálního kabelu se může pohybovat od 10 nA až po jednotky fA, podle provedení čistoty a mechanického namáhání

**Izolační odpor** – odpor mezi dvěma místy měřicího obvodu – např. dvěma vodiči kabelu nebo měřicími svorkami jako důsledek konečné hodnoty odporu materiálu, na kterém jsou svorky namontovány.

**Svodový odpor** – odpor mezi konkrétním místem měřeného obvodu a zemí, respektive bodem přivedeným na nulový potenciál.

**Zdroj GUARD** – přídavný aktivní (regulovaný) nebo pasivní (neregulovaný) zdroj napětí  $V_G$ , používaný pro potlačení vlivu izolačních či svodových odporů.

**Guard odporu** – doplňkové stínění či obdobná konstrukční část odporového měřeného prvku, kterou je možné připojit ke zdroji  $V_G$ .

### Rušivé vlivy při měření $nf$ prvků

#### Teplotní závislost

Rozhodující je teplota měřeného prvku. Teplotu měříme kalibrovaným teploměrem s rozlišením alespoň 0,1 °C v místě kalibrace. Při měření je třeba respektovat nejistotu stanovení teploty a teplotní závislost měřených prvků. Pokud není změřena, lze orientačně předpokládat následující maximální hodnoty.

#### Měřený prvek charakteru odporu

S kovovou fólií a drátové	3 ppm/°C
S kovovou vrstvou	100 ppm/°C

#### Měřený prvek charakteru kapacity

Invarové plněné dusíkem	5 ppm/°C
Hliníkové, mosazné, izolace vzduch	50 ppm/°C
Slída, keramika NPO	35 ppm/°C

Fóliové, podle druhu fólie

200 ppm/°C

### Měřený prvek charakteru indukčnosti

nejvíce je teplotně závislá reálná část impedance, vlivem toho, že jsou navinuty měděným drátem, což znamená, že reálná část impedance má teplotní závislost kolem 0,43 % na °C. Pro tuto velkou teplotní závislost se obvykle pro netermostatovaný měřený prvek odporová složka neudává, protože by byla příliš ovlivněna nejistotou teploty měřený prvku při měření.

### Rozdělení zkratů podle frekvence užití

#### Zkrat pro frekvence do 10 kHz

Běžné konstrukce zkratu vyhoví do desítek kHz, ale nesprávným provedením zkratu nebo jeho improvizací se vnese do měření chyba řádově v mΩ.

#### Zkrat pro frekvence do 1 MHz

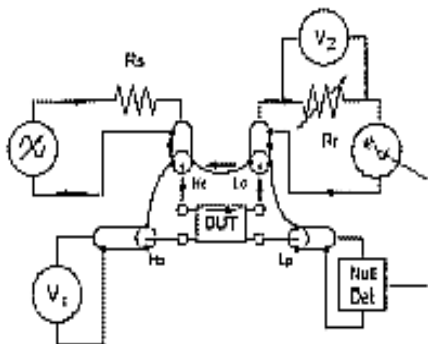
Je třeba definovat místo definice zkratu, pro přívody delší než 1 m klesá využitelný rozsah měřených impedancí. Byla experimentálně porovnána různá provedení zkratu pro frekvence do 50 MHz. Porovnáno bylo provedení koaxiální, s konektory SMA, koaxiální, 4 kabely 10 cm, 2xT-spojka (kratší nelze složit s komerčními T-kusy BNC), s páskovým vedením, různé drátové konstrukce do X, Hamonův spoj, atd.

#### Zkrat pro frekvence do 100 MHz

Experimentálně byla provedena měření s několika druhy zkratů. Měřením bylo zjištěno, že nad 10 MHz je kritické provedení zkratu na měřené hodnoty. Porovnáním provedení s páskovým vedením s provedení koaxiální konstrukcí (rozdíl v délce vodičů je asi 14 cm) byly naměřeny rozdíly do 10 MHz pod 0,1 mΩ, rostoucí ale pro frekvenci 50 MHz už nad několik mΩ.

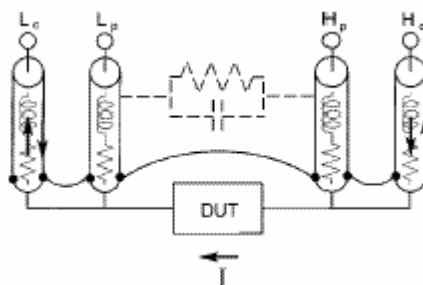
#### Zkrat pro frekvence nad 100 MHz

Pro frekvence nad 100 MHz jsou problémy připojení již tak velké, že je výhodnější měření v koaxiální trase, kde jsou lépe definované okrajové podmínky open a short. Nevýhodou je menší měřitelný rozsah impedancí.



Obr. č. 9: Princip čtyřpárového připojení u mostů Agilent.

Čtyřpárové mosty vyžadují propojení stínění na konci měřicích kabelů, jak ukazuje obr. 50.



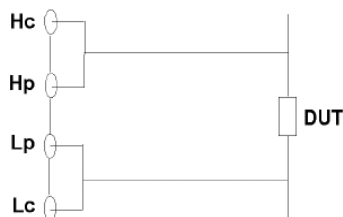
**Obr. č. 10:** Připojení měřeného měřený prvku k čtyřpárovému mostu vyžaduje propojení stínění přívodních kabelů na straně měřeného prvku.

Rozsah měřené impedance je mezi  $1 \text{ m}\Omega$  až  $100 \text{ M}\Omega$  a mosty ho mohou vyjádřit v libovolně zadané sériové nebo paralelní konfiguraci (jako  $R, L, C, Z, \varphi, Q, B, G$  a  $B$ ). Autobalanční RLCG most má základní funkční blok převodník proud napětí, který je tvořen operačním zesilovačem s rezistorem ve zpětné vazbě, nebo pro širší frekvenční rozsah složitějším zapojením simulujícím stejnou funkci jako zmíněný operační zesilovač. Základní rozsahy mostu jsou určeny přepínáním zpětnovazebního rezistoru tohoto zesilovače. Je proto nanejvýš žádoucí kalibrovat mosty tohoto typu pomocí rezistorů s minimální a známou frekvenční závislostí, protože jedině tímto způsobem lze prověřit frekvenční závislost převodníku proudu na napětí bez dalších vlivů.

### *Měření pasivních elektrických součástek*

Současný život je proscen elektronikou a všechna elektrická zařízení obsahují obrovské množství pasivních součástek. Protože všechny součástky mají mnoho parazitních vlastností, mění se jejich parametry s kmitočtem. Proto je potřebné mít možnost měřit parametry na zvoleném kmitočtu.

**Dvousvorkové připojení** - měřený prvek je připojen pouze svými dvěma svorkami. Pokud obsahuje i stínění, pak je připojeno k jedné ze svorek, zpravidla k té, která je připojena ke zdroji měřicího signálu. Dvousvorkově se nejčastěji připojují měřený prvek charakteru indukčnosti. Měřený prvek musí být co nejdále od zdrojů rušení a ovlivňujících veličin (kovových předmětů u měřených indukčností). Ze všech způsobů je připojení nejvíce ovlivňováno okolím a je nejméně vhodné pro přesné měření. Není potlačen vliv přívodů. Používá se například u kapesních multimetrů při měření  $R$ . Nejčastěji se při střídavém měření používají zkroucené vodiče, aby byl omezen vliv rušení.



### Optimální rozsah měření pro dvousvorkové připojení

1 m $\Omega$	10 m $\Omega$	0,1 $\Omega$	1 $\Omega$	10 $\Omega$	100 $\Omega$	1 k $\Omega$	10 k $\Omega$	100 k $\Omega$	1 M $\Omega$	10 M $\Omega$	100M $\Omega$
--------------	---------------	--------------	------------	-------------	--------------	--------------	---------------	----------------	--------------	---------------	---------------





Obr. č. 11: Dvousvorkové připojení je nejčastější při měření prvků.

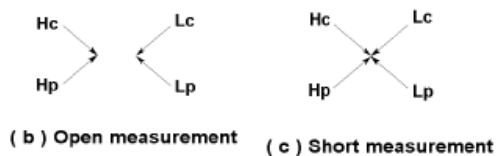
### Vyjádření měřené impedance

Nevýhodou impedance měření je, že nejsou k dispozici ideální prvky a proto se musí měřit vlastnosti reálného prvku podle zvoleného náhradního zapojení, to je pro paralelní nebo sériovou kombinaci náhradních prvků a pro zvolené vyjádření složek jako impedance nebo admitance.

Tím se obor rozpadá na řadu veličin, které jsou ale svázány vztahy podle **tab. č. 1**. Impedanční most měří obvykle jen  $Z$  a  $\varphi$  a ostatní veličiny počítá podle vzorců v **tab. č. 1**.

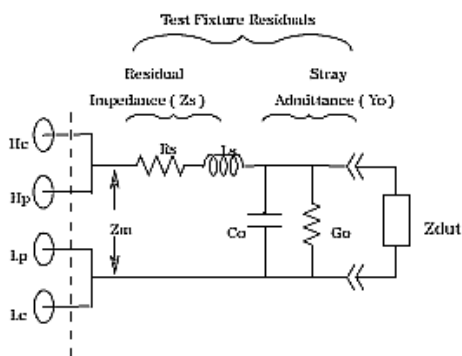
### Kompenzace *open* a *short* pro střídavá měření impedancí

Kompenzaci *open* je především důležité provést při měření malých hodnot kapacity (obecně velké hodnoty impedance), kdy se projeví vliv kapacity mezi přívody. V tomto případě je důležité zachovat vzdálenosti mezi přívody měřeného prvku stejné jako při provedení kompenzace *open*.



Obr. č. 12: Open a short

Měření malých impedancí je závislé na správné a stabilní kompenzaci *short*. Její správné provedení záleží mimo jiné také na frekvenci měření. Zkrat je nutné definovat v rovině měření, to je buď na svorkách přístroje nebo na konci přívodů. Je také nutné zachovat způsob provedení připojení měřené součástky.



Obr. č. 13: Open a short kompenzace.  $Z_{dut} = 0$  (short),  $Z_{dut} \rightarrow \infty$  (open), náhradní schéma.

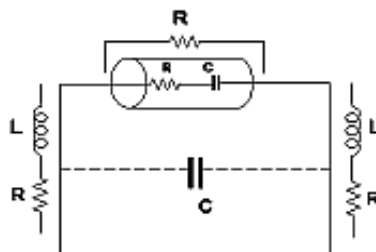
### Druhy zkratů při měření impedancí

V dnešní době se impedance měří zejména pomocí LCR měřičů, které pracují v širokém rozsahu frekvencí (DC až desítky MHz). Pro tyto měřiče však jsou dosavadní měřené prvky a způsoby kalibrace velmi nedostatečné. Dosavadní starší metody kalibrace čtyřpárových měřičů impedance pro frekvence nad 10 MHz vycházely z vypočítatelných úseků koaxiálního vedení. Užívá se hlavně úsek vedení naprázdno pro měřený prvek charakteru kapacity. To je však jen dvojpól a je realizovatelný jen pro horní část měřeného rozsahu (velké impedance). Problematika referenční roviny měření se tímto způsobem dále komplikuje přechodem mezi referenční rovinou měřiče a rovinou definice vstupní impedance vedení, která není jednoduše kompenzovatelná.

**Náhradní zapojení** jeho význam je tím větší, čím je měřená impedance vzdálenější od ideálního odporu, ideální kapacity nebo ideální indukčnosti.

Například pro měřenou impedanci  $Z = 1000 \Omega - j1000 \Omega$  na frekvenci 1,5915 kHz můžeme použít dvě náhradní schémata, sériové zapojení odporu 1 k $\Omega$  a kapacity 0,1  $\mu\text{F}$ , nebo paralelní zapojení odporu 2 k $\Omega$  a kapacity 0,05  $\mu\text{F}$ . Pozor, uvedená náhradní zapojení platí jen pro udanou frekvenci!

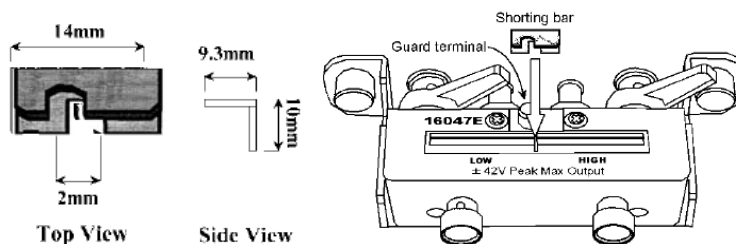
Běžný reálný prvek v praxi má dva drátové vývody nebo vývodní plošky, takže je otázka, zda má být přesnost měřiče definována s čtyřpárovými měřenými prvky, nebo jen dvojsorkově, což je bližší použití v praxi.



Obr. č. 14: Parazitní vlastnosti na skutečném prvku.

### Dvouvorkový zkrat pro přípravky s kontaktními ploškami

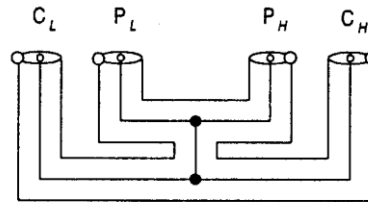
Toto provedení má význam hlavně pro provozní měření součástek s drátovými vývody. Přípravky tohoto typu neumožňují přesnou definici *open* a *short*. Proto je nutné pro malé impedance vždy popsat použitý referenční zkrat.



Obr. č. 15: Příklad 2W provedení short fy Agilent.

**Čtyřpárový zkrat**

Čtyřpárový zkrat má význam hlavně v metrologii. Při čtyřpárovém zapojení impedančního mostu měřící proud protéká i přes stínící box měřený prvku a velmi proto závisí při měření malých impedancí i na jeho provedení.



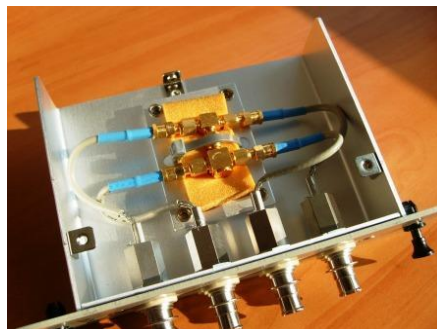
Short Circuit Termination

**Obr. č. 16: Koaxiální short.****Zkrat na konci kabelů**

Tento zkrat je univerzální pro frekvence do 10 MHz. Velká pozornost se musí věnovat propojení kabelů. T-kusem jsou propojeny proudové svorky, druhým T-kusem napěťové, a zkrat definuje propojka mezi nimi. Toto provedení je možné provést koaxiálními T-kusy a spojkou při měření s kabely.

**Obr. č. 17: Příklad definice zkratu na konci kabelů, Koaxiální short.**

V případě referenční roviny přímo na svorkách mostu je nutno použít speciální měřený prvek pro zkrat,

**Obr. č. 18: Provedení konstrukčně stejně jako zkraty na konci kabelů (HP 16074A). Koaxiální short.**

## Rozdělení zkratů podle frekvence užití

### Zkrat pro frekvence do 10 kHz

Běžné konstrukce zkratu vyhoví do desítek kHz, ale nesprávným provedením zkratu nebo jeho improvizací se vnese do měření chyba řádově v  $m\Omega$ .

### Zkrat pro frekvence do 1 MHz

Je třeba definovat místo definice zkratu, pro přívody delší než 1 m klesá využitelný rozsah měřených impedancí. Byly experimentálně porovnány různá provedení zkratu pro frekvence do 50 MHz. Porovnáno bylo provedení koaxiální, s konektory SMA, koaxiální, 4 kabely 10 cm, 2xT-spojka (kratší nelze složit s komerčními T-kusy BNC), s páskovým vedením, různé drátové konstrukce do X, Hamonův spoj, atd

### Zkrat pro frekvence do 100 MHz

Experimentálně byla provedena měření s několika druhy zkratů. Měřením bylo zjištěno, že nad 10 MHz je kritické provedení zkratu na měřené hodnoty. Porovnáním provedení s páskovým vedením s provedení koaxiální konstrukcí (rozdíl v délce vodičů je asi 14 cm) byly naměřeny rozdíly do 10 MHz pod  $0,1 m\Omega$ , rostoucí ale pro frekvenci 50 MHz už nad několik  $m\Omega$ .

### Zkrat pro frekvence nad 100 MHz

Pro frekvence nad 100 MHz jsou problémy připojení již tak velké, že je výhodnější měření v koaxiální trase, kde jsou lépe definované okrajové podmínky open a short. Nevýhodou je menší měřitelný rozsah impedancí.

### Závěr ke zkratu-short

Definice zkratu určuje nejnižší měřitelnou hodnotu a snižuje přesnost měření malých hodnot impedance. Se vzrůstající frekvencí měření její význam roste. Pro impedanční měření na frekvencích nad 10 MHz je již velmi důležité konkrétní provedení použitého zkratu a musí být u každého měření popsáno.

### Principy AC měřičů impedancí

Z přehledu je vidět, že autobalanční mosty mají velkou výhodu měření od několika Hz až do desítek MHz v jednom přístroji. Jsou nejrozšířenější a v ČR jsou dominantní.

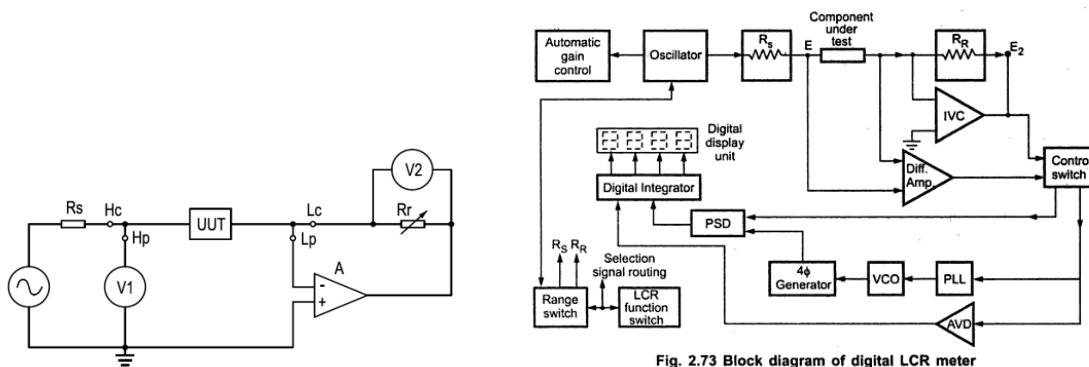


Fig. 2.73 Block diagram of digital LCR meter

**Obr. č. 19:** Autobalanční most je vhodný pro čtyřsvorkové připojení měřené impedance UUT.

Operační zesilovač A je u nízkofrekvenčních přístrojů nízkošumový širokopásmový zesilovač s mezní frekvencí asi o 3 řády vyšší, než je nejvyšší pracovní frekvence. Pro širokopásmové mosty s nejvyšší pracovní frekvencí 10 MHz a vyšší již nemůže být použit tak širokopásmový zesilovač a proto je zapojení mostu složitější.

## 5 Měřidla a pomocná měřicí zařízení

Měřidla se volí podle potřeby měření a popisu uvedeného dále pro jednotlivé veličiny.

Poznámka: Všechna použitá měřidla a pomocná měřicí zařízení musí být navázána na měřený prvek vhodného rozsahu a přesnosti a musí mít platnou kalibraci.

## 6 Obecné podmínky měření – veličiny ovlivňující výsledky měření

### Prvky a jejich členění při měření

#### Stejnoseměrný odpor

Stejnoseměrný odpor se měří ve velmi širokém rozmezí hodnot. Nejvyšší přesnost je dosahována pro střední hodnoty přibližně od  $1 \Omega$  do  $10\,000 \Omega$ . Pro malé hodnoty působí potíže malá úroveň měřených signálů, pro velké šum a napěťová závislost měřených odporů. Odporů jsou teplotně závislé, proto lze přesnou návaznost realizovat jen v termostatu. Pro velmi přesné měření se uplatní i tlaková závislost. Stupnice odporu se odvozuje buď Hammonovými dekadami nebo proudovými komparátory.

#### Odpor při střídavém proudu

Velmi záleží na způsobu připojení. Nepraktičtější je čtyřpárová definice odporu, při které je měřený prvek připojen na 4 přívody se společným stíněním. Pro malé hodnoty odporů omezuje frekvenční charakteristiku sériová indukčnost, pro velké hodnoty paralelní kapacita. Jen odporů v přizpůsobených trasách se daří realizovat pro velký frekvenční rozsah.

#### Kapacita

Hodnoty kapacity do  $10\,000 \text{ pF}$  se vyrábí s plynným dielektrikem. Kapacita je závislá nejen na teplotě, ale i na orientaci kondenzátoru ke gravitačnímu poli. Vyšší hodnoty kapacity jsou realizovány s pevným dielektrikem, což přináší složitější závislost na frekvenci a úrovni měřeného signálu. Teplotní závislost kapacity je obvykle určující složkou nejistoty při její kalibraci. Problém je, že obvykle není dostatečně přesně známá.

#### Indukčnost

Většina dostupných měřených prvků indukčnosti má nevhodné připojení přes přístrojové svorky, které neumožňují nejvyšší přesnost měření. měřený prvek charakteru s otevřeným polem jsou citlivé na rušení a blízkost feromagnetických předmětů. Toroidní měřený prvek mají zase složitější frekvenční závislost. Protože jsou měřený prvek charakteru indukčnosti vyvinuty z Cu drátu, který má velkou teplotní závislost odporu, neudává se obvykle hodnota sériové indukčnosti.

**Ztrátový činitel kapacity D**

Malý je u měřených prvků s plynným dielektrikem, kde je ovlivněn hlavně izolátorem a velmi tenkou povrchovou vrstvou na elektrodách. U měřených prvků s pevným dielektrikem je o několik řádů horší a má závislost na frekvenci a úrovni signálu.

**Činitel jakosti indukčnosti Q**

Užívá se hlavně při vysokofrekvenčních měřeních. měřený prvek jsou velmi vzácné a závislé na teplotě i vlhkosti. Primární měřený prvek charakteru jsou k dispozici jen výjimečně.

**7 Metrologické meze využití metody měření**

*Je uvedeno u příslušného měření*

**8 Kontrola měřidla před použitím a příprava na měření****Základní bezpečnostní pokyny a varování**

Převážná většina měření prvků se provádí při bezpečné úrovni signálu.

Pokud je ale měřicí přístroj napájen ze sítě, musí být dodržena všechna bezpečnostní opatření.

Pokud je měřena součástka uvnitř zařízení, musí být toto zařízení odpojeno od napájení a zejména od rozvodné napájecí sítě.

Většina měření prvků se provádí se signály, které jsou v oblasti, která není nebezpečná obsluze.

Při měření prvků uvnitř nějakého zařízení musí být toto zařízení odpojeno od napájecí sítě a musí být vybity všechny jeho kondenzátory:

- Měřte až po důkladné úvaze co, kde a jak budete měřit,
- rozsah přístroje nastavte podle očekávaného parametru a hodnoty s měřidlem nastavený na očekávaný rozsah nebo na rozsah větší,
- nepřivádějte na měřené zařízení nebo přístroj napájecí napětí (včetně bateriových),
- abyste se vyhnuli úrazu elektrickým proudem nebo poškození přístroje, nepřivádějte mezi svorky a uzemnění větší napětí než 60 VDC nebo 30 Vrms (AC).

**Varování**

**Při měření velkých hodnot  $R$  je někdy nutné pracovat v oblasti nebezpečných napětí, a proto tam musí být zachována všechna bezpečnostní opatření.**

Abyste se vyhnuli úrazu elektrickým proudem nebo zranění a zabránili případnému

poškození přístroje nebo měřeného obvodu, dodržujte následující pravidla:

- Před použitím přístroje zkontrolujte jeho kryt. Nepoužívejte přístroj s poškozeným krytem. Hledejte ulomené části krytu nebo chybějící plast. Věnujte pozornost izolaci v okolí konektorů,
- zkontrolujte měřicí přívody, zda nemají poškozenou izolaci nebo odhaleny vodivé části. Zkontrolujte je, zda nejsou přerušeny,
- poškozené měřicí přívody před měřením nahraďte přívody stejného typu nebo specifikace,
- používají se vždy originální kabely, které nesmí být poškozené. Přívody držíme vždy na určeném místě tak, aby byly ruce chráněny před sklouznutím,
- ruce, držící přívody, nesmí být mokré, mokré nebo zapocené ruce před měřením utřeme,
- při měření používejte správné svorky, režim a rozsah pro dané měření,
- přístroj nepoužívejte ani neskladujte v prostředí s vysokou teplotou nebo vlhkostí, ve výbušném nebo hořlavém prostředí nebo v silném magnetickém poli. Ve vlhku může dojít ke zhoršení vlastnosti přístroje,
- vyměňte baterii ihned poté, co se objeví indikace slabé baterie na displeji. S vybitou baterií může přístroj udávat neplatné hodnoty, které mohou vést k úrazu elektrickým proudem a zranění,
- před otevřením krytu přístroje odpojte měřicí přívody a přístroj vypněte,
- při opravě používejte pouze náhradní díly stejného typu nebo specifikace,
- vnitřní obvody přístroje by neměly být svévolně upravovány, aby se předešlo poškození přístroje a úrazu,
- všechna popisovaná měření je určena jen pro vnitřní použití (v bytě),
- pro čištění povrchu použijte měkký hadřík a slabý roztok čistícího prostředku, K čištění nepoužívejte abrazivní prostředky nebo rozpouštědla. Vyhněte se tím korozi, poškození a úrazu,
- pokud přístroj nepoužíváte, vypněte jej. Před delším nepoužíváním vyjměte baterii,
- pravidelně kontrolujte baterii, která může po delší době používání začít vytékat. Vytékající baterii ihned vyměňte, protože by mohla poškodit přístroj.

### Elektrický odpor

Elektrický odpor (Rezistor) je základní součástka všech elektrických zařízení.

Názvoslovný problém je, že odpor je vlastnost (parametr), název se ale běžně používá i pro součástku, pro kterou bylo navržen pojem rezistor.

Velký obchod má v sortimentu mezi 50 000 až 100 000 různých provedení a typů odporů.

Elektrický odpor měříme v extrémně širokém rozsahu hodnot cca  $10^{-6} \Omega$  do více než  $10^{15} \Omega$ .

Měření odporu při stejnosměrném signálu je obvykle jednodušší než při střídavém signálu.

Měření při střídavém signálu je obvykle dražší a složitější. Musí být udána frekvence a

použité náhradní zapojení

Měření při střídavém signálu je pro impedance s převažujícím odporovým, kapacitním nebo induktivním charakterem (malý fázový posuv) obvykle jednodušší a přesnější.

Impedance  $Z$  pro ideální odpor je kmitočtově nezávislá a rovná se  $R$ .

Optimální z hlediska frekvenční závislosti je hodnota mezi  $50 \Omega$  až  $100 \Omega$ , kde jsou součástky použitelné až do  $10 \text{ GHz}$ .

Pro hodnoty pod  $100 \Omega$  používáme sériové náhradní schéma a sériová indukčnost je v řádech  $\text{nH}$  až  $\mu\text{H}$ .

Pro hodnoty pod  $100 \Omega$  impedance  $Z$  součástky s kmitočtem roste.

Pro hodnoty nad  $100 \Omega$  používáme paralelní náhradní schéma a paralelní kapacita obvyklé součástky je v řádu  $\text{pF}$ .

Pro hodnoty nad  $100 \Omega$  impedance  $Z$  součástky s kmitočtem klesá.

### Velké hodnoty $R$ (nad $100 \text{ M}\Omega$ )

Měření musí být provedeno při předepsaném napětí, které může být nebezpečné, proto platí ve zvýšené míře všechna bezpečnostní opatření.

Součástky s velkým odporem bývají často napětově závislé. Proto se musí měřit při správném napětí.



**Obr. č. 20:** Ohm se zvukově podobá k Óm též Aum, což je posvátná slabika známá z Ikk ÓM kár, což se dá přeložit jako: „Existuje (pouze) jediné Jsoucnó“, nebo „Jedno Jsoucnó jest“, případně „Existuje jediné Bytí“ a tak se nabízí shoda a podoba s významem odporu a jeho jednotky Ohm v elektronice

### Ohmův zákon

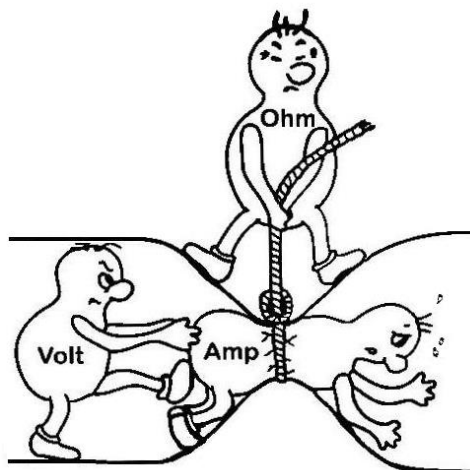
Předmět má odpor jeden ohm, jestliže po přiložení jednoho voltu napětí jím protéká proud jeden ampér.



Jednotka byla pojmenována podle německého fyzika Geoga Ohma, objevitele vztahu mezi napětím a proudem, známého nyní jako Ohmův zákon. Ten roku 1827 vydal svoji práci, ve které formuloval zákon, podle něhož je proud procházející obvodem přímo úměrný elektrickému napětí. Tento zákon – dnes nazývaný jeho jménem – formuluje uvedený vztah tak jednoduše, že zprvu nebyl německými vědci brán vážně. Až když jej v roce 1841 vyznamenala Královská společnost v Londýně za výsledky badatelské práce, se jeho věhlas v Německu rychle rozšířil.

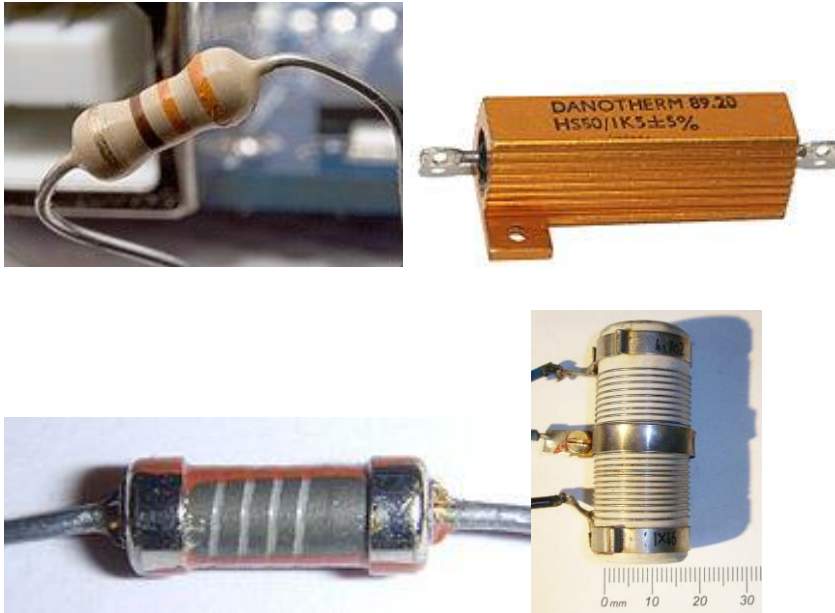


Obr. č. 21: Ohmův zákon obrazně.

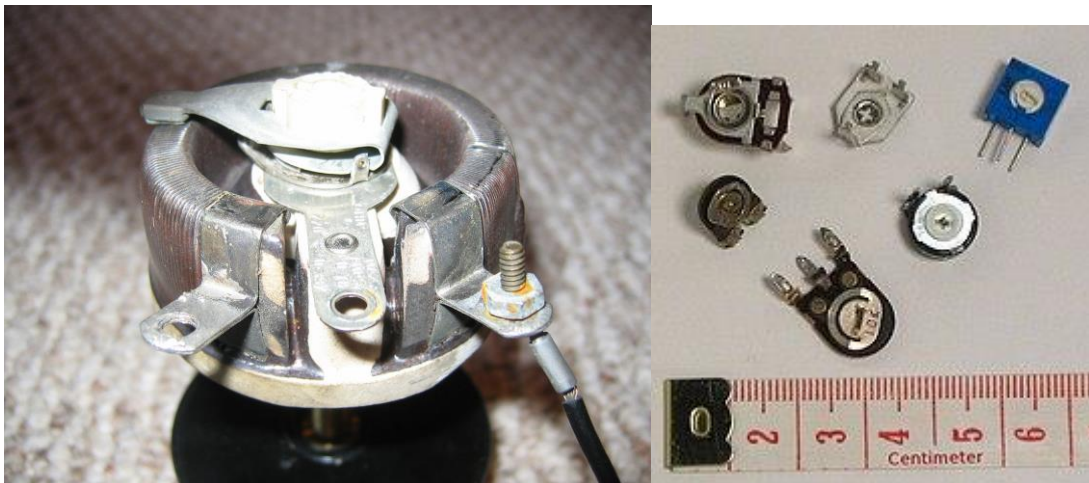


Obr. č. 22: Neznámější zobrazení ohmova zákona a významu odporu na internetu.

**R** - použití, technologie.



Obr. č. 23: Různá provedení rezistorů (odporů).



Obr. č. 24: Ukázka nastavitelných provedení (potenciometry)

## 9 Postup měření

### Měření odporu multimetrem

Měření odporu multimetrem je dnes nejrozšířenější metodou používanou v praxi. Multimetr je ideální pro měření, ale má dvě omezení. Z principu nemůže mít vestavěn zdroj velkého proudu pro měření velmi malých odporů a také nemá dostatečně malý vstupní proud a nemá ani zdroj vysokého napětí pro měření velmi velkých odporů.

**Měření odporu multimetrem a parazitní vlastnosti  $R$** 

Multimetry mají vestavěn zdroj proudu, max. 100 mA a menší od několika nA do 100 mA. Napěťová schopnost těchto zdrojů proudu bývá mezi 5 V až 12 V.

Velké odpory se měří se zdroji napětí až do 100 V, někdy i jako paralelní kombinace měřeného odporu a odporu vstupního děliče multimetru (který je 10 M $\Omega$ ).

*Integrační čas a rozlišení*

Integrační čas měření se volí v násobcích period sítě (NPLC). Pro NPLC nad 10 roste přesnost již málo a často DMM pro NPLC nad 10 vyhodnotí měření jako průměr ze skupiny měření pro NPLC 10, například pro NPLC 50 je to průměr z 5 měření při NPLC 10. Některé, hlavně vysokohmové provedení pro je vstupní měřený prvek charakteru odporu a měřený prvek charakteru odporu v kalibrátorech mají paralelně zapojený kondenzátor pro snížení šumu. Ten může působit potíže při měření multimetrem, protože vyžaduje čas na nabití, a pokud DMM má měřící cyklus, kde není stále stejný proud do zátěže, může příliš velká paralelní kapacita měření znemožnit. (kapacita se skládá z cca 200 pF na koaxiální příklady, +150 pF je vstupní kapacita DMM + kapacita měřeného  $R$ ).

*Svorka Guard a Ohm Guard na multimetru.*

Většina multimetrů má plovoucí stínění, označené Guard a přístrojovou zem označenou Ground. Měříme-li neuzemněný měřený prvek charakteru odporu, pak mezi měřený prvkem a zemí je odpor řádu 10<sup>12</sup> a výše. Bez použití guardů je možné, že se na měřeném objektu objeví nepřipustně velké napětí například vlivem elektrostatické elektřiny. Některé DMM obsahují i svorku Ohm Guard, na které je napětí odvozené od zdroje proudu DMM.

Multimetr má řadu funkcí pro zlepšení a zjednodušení měření:

*Autozero.*

Funkce autozero je určena ke změření a potlačení (odečtením) vnitřních offsetů multimeru. Multimetr ji provede na povel proti internímu zkratu, při kterém si změří offset a dále jej od měření odečítá.

*Kompensace offsetu - true ohm*

Při měření  $R$  se vyskytují offsety hlavně vlivem termonapětí. Multimetr je odliší měřením s napájením odporu měřícím proudem a měřením napětí bez napájení, případně přepíná polaritu napájecího zdroje proudu a někdy i vyhodnocovacího voltmetru a offsety vypočítá.

Multimetry mohou měřit odpor dvousvorkově a čtyřsvorkově.

**Dvousvorkové měření**

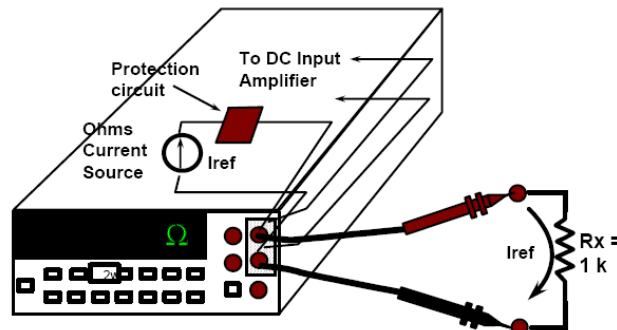
Multimetr v tomto případě měří odpor měřený prveku  $R$  + odpor přívodů (2 x 30 m $\Omega$ ) a odpor kontaktů (2 x 0,3 m $\Omega$ ). Odpor přívodů lze potlačit nulováním voltmetru, odpor kontaktů je součástí měřeného odporu a jeho reprodukovatelnost součástí nejistoty měření. Bez korekce na odpor přívodů je tedy při měření malých a středních hodnot odporu:

$$R_{\text{naměřené}} = (R + 0,068) \Omega.$$

Při měření velkých hodnot odporu v kovovém neuzemněném pouzdře:

$$R_{\text{naměřené}} = (R // 2 \cdot 10^{13}) \Omega.$$

### Measuring Resistance Two-Wire Technique



\*\*\*"Terminals" switch in "FRONT"

\* Press **2W**

\* Since voltage is sensed at front terminals, measurement includes all lead resistance

\* To eliminate the lead resistance:

\* Short leads together

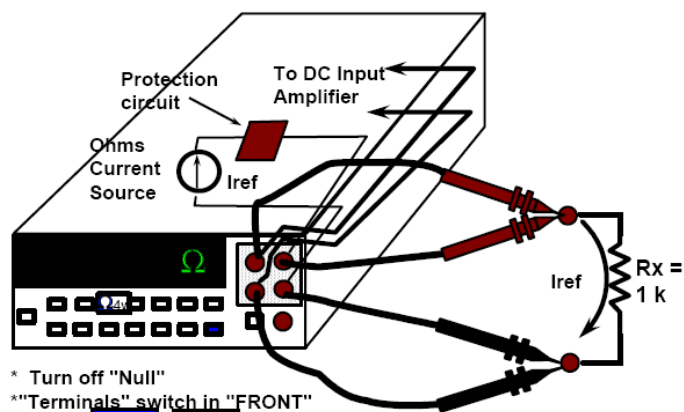
\* Press **Null**

\* Original value will now be subtracted from each reading

Obr. č. 25: Měření DC R multimetrem, dvousvorkové připojení.

### Čtyřsvorkové měření

### Measuring Resistance Four-Wire Technique



\* Turn off "Null"

\*\*\*"Terminals" switch in "FRONT"

\* Press **4W**

\* Voltage is now sensed directly at the resistor, so lead resistance is not a factor

\* Because input impedance of DC Input Amplifier is so high, no current flows through sense leads, hence no lead resistance error

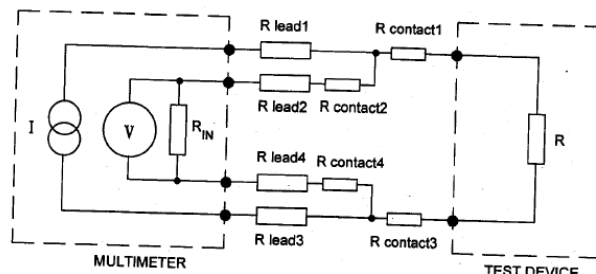
Obr. č. 26: Měření DC R multimetrem, čtyřsvorkové připojení.

Při tomto zapojení je jedním párem svorek do odporu přiváděn proud, ale odpor je definovaný podle úbytku napětí mezi jiným párem svorek. U měřených prvků typu odporu

velmi malých hodnot je hodnota odporu přívodů srovnatelná i větší, než odpor definovaný mezi napěťovými svorkami. Mohou nastat případy:

1. Měření při čtyřsvorkovém připojení na odpor se dvěma vývody:

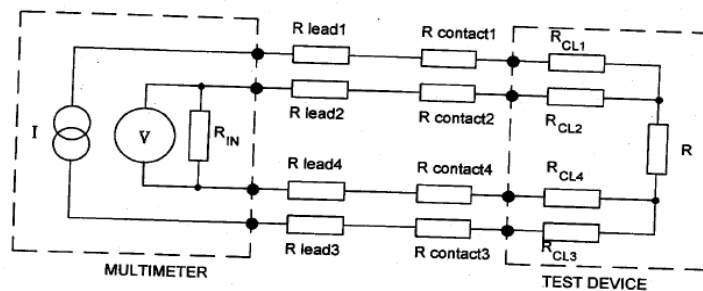
$$R_{\text{naměřené}} = (R + R_{\text{kontaků}}) \Omega = (R + 0,006) \Omega.$$



Obr. č. 27: Čtyřsvorkové připojení na odpor se dvěma vývody.

2. Měření při čtyřsvorkovém připojení na odpor se čtyřmi vývody:

$$R_{\text{naměřené}} = (R) \Omega.$$



Obr. č. 28: Čtyřsvorkové připojení na odpor se čtyřmi vývody.

3. Měření při čtyřsvorkovém připojení na odpor vysoké hodnoty se dvěma vývody:

$$R_{\text{naměřené}} = (R // 2 \cdot 10^{13}) \Omega.$$

4. Měření při čtyřsvorkovém připojení na odpor vysoké hodnoty se třemi vývody, stínění připojeno na vývod ohm guard multimetru:

$$R_{\text{naměřené}} = (R) \Omega.$$

#### Malé odpory 1 mΩ až 10 Ω

Měříme porovnáním měřeného s etalonovým odporem čtyřvodičovou metodou pomocí proudového zdroje, milivoltmetru a měřený prvkového odporu. V zahraničí je možné měření až do proudů 3000 A (Austrálie).

Měřicí proud volíme takový, aby úbytek napětí umožňoval dostatečně přesné měření bez uplatnění vlivu termoelektrického napětí (asi 100 mV), ale aby nedocházelo k ohřevu etalonového a měřeného odporu. Při měření je třeba respektovat dovolené proudové zatížení odporů, proto při větších měřicích proudech měříme jen do takové velikosti odporu, abychom nepřekročili dovolený ztrátový výkon odporu. Ohřev můžeme orientačně kontrolovat zasunutím sondy teploměru do měřený etalonového i do měřeného odporu a v případě zjištění změny teploty úměrně zvětšíme příslušnou složku nejistoty měření. Při menších požadavcích na přesnost je možné měřený etalonový odpor vypustit a měřený odpor vypočítat z poměru napětí a proudu. Vliv termoelektrického napětí kontrolujeme měřením ve funkci true ohm, pokud ji použitý přístroj má, nebo opakováním měření při opačné polaritě. Nucené chlazení měřených prvků bývá užitečné.

#### *Postup pro přesné měření*

Nastavit multimetr následovně: rozsah DCV auto – tlačítka *DCV* a *Auto*, rozlišení co nejvíce, např.  $8\frac{1}{2}$  - tlač. *Config*, *Resl* a 8, Filtr ON – tlač. *Config* a *Filt*, Input A/B - tlač. *Input* a *A/B*.

Nastavit zdroj proudu (kalibrátor + zesilovač) na funkci DCI. Doporučený proud volit podle zadání zákazníka, specifikace měřených prvků a možností laboratoře.

Zapnout výstup kalibrátoru. Multimetr nastavit na měření poměru hodnot měřeného odporu a etalonového prvku. Provést odečet minimálně deseti měření, přičemž polovina měření se provede při opačném zapojení + a – proudových a napěťových svorek. V průběhu měření kontrolovat teplotu teploměrem v místě měření.

#### **Střední odpory 10 $\Omega$ až 100 k $\Omega$**

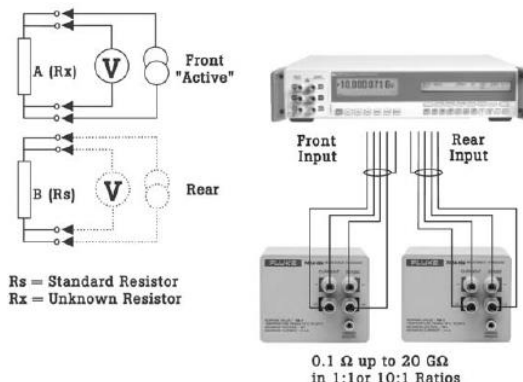
Měříme nejčastěji čtyřvodičovým ohmmetrem číslicového multimetru přímo nebo porovnáním s měřeným odporem. Každé měření opakujeme a sledujeme ustálení.

#### *Postup- přímé měření*

Nastavit podle dokumentace výrobce multimetr takto: funkce „Ohm“, rozsah podle očekávané hodnoty neznámého odporu, Config „4 W“ pro hodnoty do 20 k $\Omega$  „True  $\Omega$ “, pro hodnoty nad 20 M $\Omega$  „High  $\Omega$ “, filtr „ON“, Resolution „7,5“.

Zkratovat přívodní vodiče multimetru ve čtyřvodičovém zapojení a provést funkci nulování, obvykle značenou „ZERO“.

Připojit neznámý odpor čtyřvodičově, pro hodnoty nad 100 k $\Omega$  (20 M $\Omega$ ) dvouvodičově, k multimetru. Po ustálení zobrazovaného údaje odečítat postupně alespoň 10 hodnot měřeného odporu.



Obr. č. 29: Měření porovnáním s etalonem

**Kalibrace hodnot  $1 \Omega \div 1 \text{ G}\Omega$** 

Multimetrem je dvoukanalově měřen kalibrovaný odpor s hodnotou  $R_x$  a odporový měřený prvek s hodnotou  $R_n$ . Multimetr naměří hodnoty  $R_x'$  a  $R_n'$  a jejich poměr  $\frac{R_x'}{R_n'} = r$ . Pak za

předpokladu, že nominální hodnoty kalibrovaného odporu i odporového etalonu jsou stejné a multimetr měří oba se stejnou odchylkou, platí pro neznámý odpor:  $R_x = r \cdot R_n$ .

*Postup - porovnání s etalonem*

Zapojit multimetr pro čtyřdrátové měření odporů - kanál A na kalibrovaný odpor, kanál B na odporový měřený prvek.

Nastavit multimetr následovně: rozsah OHM auto 4W – tlačítka *Ohm, Auto, Config a 4w*, rozlišení  $8\frac{1}{2}$  - tlač. *Config, Resl a 8*, Filtr ON – tlač. *Config a Filt*, Input A/B - tlač. *Input a A/B*. Pro odpory nad  $20 \text{ M}\Omega$  rozsah Hi OHM – tlač. *Ohm, Config, HiΩ*.

Multimetr zobrazuje poměr hodnot kalibrovaného odporu a odporového etalonu.

Provést minimálně deset odečtů naměřené hodnoty. V průběhu měření kontrolovat teplotu v místě měření bodovým teploměrem.

Výsledný odpor kalibrovaného normálu vypočítat jako součin průměrného údaje multimetru a hodnoty odporového měřeného prvku aproximované do doby měření.

**Velké odpory  $100 \text{ k}\Omega$  až  $1 \text{ G}\Omega$** 

Měříme dvou vodičovým ohmmetrem přímo nebo porovnáním s měřeným prvkovým odporem. Na DMM již nevyhoví obvyklé vodiče, výhodnější je izolace PFTE (teflon).

**Velmi velké odpory nad  $1 \text{ G}\Omega$** 

Měříme dvou vodičově nebo tří vodičově pomocí napěťového zdroje a ampérmetru buď přímo, kdy hodnotu vypočteme z poměru napětí a proudu, nebo porovnáním s měřeným etalonovým odporem. Napětí nastavíme podle požadavku zákazníka. Při použití měřeného etalonového odporu použijeme takové napětí, při kterém byl měřený etalonový odpor kalibrován. U extrémně velkých odporů (zpravidla nad  $10 \text{ G}\Omega$  je stínění (třetí vodič) nezbytné, protože účinně zabrání nežádoucím svodům, které mohou výrazně ovlivnit naměřenou hodnotu. Při tří vodičovém zapojení se složka parazitního odporu na straně napěťového zdroje neprojeví.

Složka na straně ampérmetru se projeví úměrně úbytku napětí na ampérmetru. Kromě toho je třeba dodržovat dostatečnou vzdálenost od obvodů a při odečtu se nepohybovat.

Na kalibračních listech velkých odporů uvádíme skutečnou naměřenou vlhkost ne pouze meze možné vlhkosti.

Velké odpory mají velkou závislost hodnoty na napětí. Proto by se měly kalibrovat vždy při napětí, při kterém se používají a měla by být u nich změřena i napěťová závislost. Napěťová závislost není parametr, kterým by se výrobci chlubili. Pokud ji udají, například 1 ppm/V, pak pro měření při 1000 V může být změna odporu až 1000 ppm oproti hodnotě měřené při 1V, to je 0,1 % a to je hodnota již nezanedbatelná.

### **Odporové dekády**

U odporových dekád je velmi důležitý stav přepínačů. Ten se kontroluje kontrolou zbytkového odporu při všech dekádách nastavených na nulu. Měřicí proud se volí do 30 % z maximálního proudu povoleného pro první dekádu. Odpor se změří před a po čišťení přepínačů pokud jsou k tomu uzpůsobeny. Dekádu několikrát protočíme. U dekád, kde je to konstrukčně možné, kontrolujeme stav přepínačů, případně je vyčistíme a znovu konzervujeme. K tomu je nutný souhlas zákazníka včetně upřesnění, čím budou přepínače čištěny a čím konzervovány. Klasický konzervační tradiční prostředek, používaný již desítky let je lékárenská vazelina (vaselinum album).

Pro dekády s odpory nad 100 k $\Omega$  je třeba věnovat pozornost i isolačnímu odporu, případně isolační odpor i přeměřit.

Při kalibraci u odporových dekád nejprve změříme přechodový odpor dekády při nastaveném nulovém odporu ve všech polohách přepínače nastavených na 0 a kontrolujeme z kalibračního listu dekády jeho hodnotu i konstatování, že všechny další uváděné hodnoty jsou bez této hodnoty nulového odporu. Potom postupně měříme všechny polohy přepínačů každé dekády při ostatních nastavených na nule a od naměřené hodnoty odečteme dříve změřený přechodový odpor a naměřené hodnoty uvádíme bez přechodového odporu dekády. Způsob uvedení naměřených hodnot popíšeme dostatečně jasně v zápisu o měření.

### *Postup*

Nastavit podle dokumentace výrobce multimetr takto: funkce „Ohm“, rozsah podle očekávané hodnoty neznámého odporu, Config „True  $\Omega$ “, filtr „ON“, Resolution „7,5“. Zkratovat přívodní vodiče multimetru ve čtyřvodičovém zapojení a provést funkci „ZERO“.

Připojit dekádu čtyřvodičově k multimetru. Nastavit přepínače do nulové polohy. Po ustálení zobrazovaného údaje zapsat hodnotu nulového odporu dekády  $R_o$ .

Změřit  $R_o$  opakovaně celkem 10x, vždy po předchozím protočení přepínačů. Průměrnou hodnotu  $R_o$  vložit jako konstantu pro odečítání od měřené hodnoty (funkce „MATH, Config, - c“ nebo nulováním).

### **Kalibrace měřičů odporu pro rychlé a přesné měření**

Měříme přímým měřením čtyřvodičovou metodou měřené odpory podle rozsahu přístroje v dekadických hodnotách 1 m $\Omega$ , 10 m $\Omega$ , 0,1  $\Omega$ , 1  $\Omega$ , 10  $\Omega$  atd., nad 10 k $\Omega$  obvykle



dvouvodičově, případně se započtením odporu přívodů. Při měření je třeba respektovat dovolené proudové zatížení měřených etalonových odporů, proto při větších měřících proudcích měříme jen do takové velikosti odporu, abychom nepřekročili dovolený ztrátový výkon odporu a měření provádíme jen nezbytně nutnou dobu (hrncové etalonové odpory, například ze ZIP Krasnodar ve vzduchu max. 3 W).

Ohřev můžeme orientačně kontrolovat zasunutím sondy teploměru do měřeného odporu a v případě zjištění změny teploty úměrně zvětšíme příslušnou složku nejistoty měření.

### **Měřiče velkých odporů**

K měření vlastností izolací, stanovování měrných odporů dielektrik apod. se používají měřiče vysokých odporů často nazývané též megaohmmetry, teraohmmetry, apod. Horní mez měřicího rozsahu se u těchto přístrojů pohybuje od  $10^7 \Omega$  do  $10^{16} \Omega$ .

Pro účely této kapitoly se definuje vysoký odpor jako odpor větší než nebo roven  $1 \text{ M}\Omega$ .

Pro přímá měření vysokých odporů se nejčastěji používají měřidla pracující v režimu konstantního napětí nebo měřidla pracující v režimu konstantního proudu.

Měření provádíme dvouvodičově nebo třívodičově přímým měřením měřeného odporu. Na měřidlo nastavíme takové měřící napětí, při kterém byl měřený odpor kalibrován. Jako měřicí body použijeme dekadickou řadu hodnot odpovídající měřeným odporům. U hodnot pod  $10 \text{ G}\Omega$  můžeme pomocí dekády nastavit i jiné než dekadické hodnoty, v závislosti na požadavcích zákazníka. U měření extrémně velkých odporů je stínění (třetí vodič) nezbytné, protože účinně zabrání nežádoucím svodům, které mohou výrazně ovlivnit naměřenou hodnotu. Kromě toho je třeba dodržovat dostatečnou vzdálenost od obvodů a při odečtu se nepohybovat. Všechna měření opakujeme a sledujeme ustálení i driftы.

### **Měřidla pracující v režimu konstantního napětí**

Tato měřidla používají k měření vysokého odporu zdroje konstantního napětí a ampérmetru a hodnotu odporu stanovují jako poměr napětí zdroje a proudu udávaného ampérmetrem. Měřicí napětí těchto měřidel se podle typu a nastavené hodnoty pohybují od 1 V do 5 kV. Vzhledem k tomu, že vysoké odpory jsou často napětově závislé, je třeba údaj o naměřené hodnotě odporu doplnit údajem o měřícím napětí. Princip měřidla pracujícího v režimu konstantního napětí neumožňuje eliminaci odporu přívodů pomocí čtyřsvorkového zapojení a proto není vhodný k přesnému měření malých a středních odporů. Princip měřidla pracujícího v režimu konstantního napětí naopak umožňuje elegantní vyloučení svodových proudů.

Tato měřidla používají k měření vysokého odporu zdroje konstantního proudu a voltmetr a hodnotu odporu stanovují jako poměr napětí udávaného voltmetrem a proudu zdroje. Měřicí napětí těchto měřidel se podle typu a nastavené hodnoty pohybují do 20 V a v některých případech do 200 V. Vzhledem k tomu, že odpory vysoké hodnoty jsou často napětově závislé, je třeba měření provádět při stanoveném měřícím napětí, což může být u měřidel tohoto typu problém.

Princip měřidla pracující v režimu konstantního proudu umožňuje eliminaci odporu přívodů pomocí čtyřsvorkového zapojení a proto je vhodný k přesnému měření malých a středních odporů. Vyloučení svodových proudů je ovšem komplikovanější než měřidel

pracujících v režimu konstantního napětí, jak bude vysvětleno dále.

Odpor kalibrovaného odporu je označen  $R_{ps}$ .

### **Elektrická kapacita**

Kondenzátor je druhá základní pasivní součástka všech elektrických zařízení.

Velký obchod má v sortimentu tisíce různých kondenzátorů.

Kondenzátory měříme v extrémně širokém rozsahu hodnot cca 0,1 pF do více než 1mF.

Měření kapacity se provádí přednostně při střídavém signálu na frekvenci, na které má kondenzátor pracovat.

Hodnota kapacity mezi 0 pF až 1000 pF se realizuje kondenzátory převážně s plynným nebo keramickým dielektrikem a pracuje v širokém rozsahu frekvence.

Hodnota kapacity mezi 1000 pF až 1 000 000 pF se realizuje kondenzátory převážně dielektrikem s plastovými foliemi a pracuje obvykle rozsahu frekvence do 1 MHz.

Hodnota kapacity nad 1 000 000 pF se realizuje elektrolytickými kondenzátory a pracuje obvykle rozsahu frekvence do 100 Hz.

Pro kondenzátory impedance  $Z$  součástky s kmitočtem klesá.

Pro hodnoty do 1  $\mu$ F používáme obvykle paralelní náhradní schéma.

Pro hodnoty nad 100  $\mu$ F používáme sériové náhradní schéma a sériový náhradní odpor omezuje filtrační možnosti kondenzátoru hlavně pro vyšší část používaného rozsahu frekvence, na které součástka pracuje.

### **Kapacita**

Příklady hlavních principů - viz názvosloví výše.

### **Vývoj měření kapacity**

#### **Klasické mosty**

Příklad Tesla Brno BM 400 (cca do roku 1960).

#### **Transformátorové mosty**

Příklad Tesla Brno BM 394, BM 495 (cca do roku 1970, přesné a stabilní).

#### **Přechodné typy**

Příklad Tesla Brno BM 559, BM 509 (cca do roku 1980).

#### **Čtyřsvorkový mosty**

#### **Většina současných měřičů**

Příklad WK řada 6400

### Čtyřpárové mosty

Příklad Tesla Brno BM 595, všechny mosty Keysight.

### Obvody s fourierovou analýzou (bez fázových detektorů)

Cca od roku 2000, moderní. Příklad WK řada 6500.

### Vysoce přesná měření kapacity

Ve vysoce výkonných LCR metrech, je použita technika jak najít hodnotu kondenzátoru udělána tak, že AC signál známé frekvence je aplikován přes interní zdroj s nízkou hodnotou odporu a kondenzátoru podle testu v sériové konfiguraci. AC proud tekoucí do kondenzátoru musí proudit přes odpor zdroje, vytváří střídavé napětí na odporu. Velikost a fáze tohoto napětí může být měřena a ve srovnání s původním signálem AC, a kapacitu lze vypočítat. Techniky, jako je tento frekvenční domény měření mohou být velmi přesné a mohou poskytnout informace i o dalších parametrech, jako je ztrátový činitel, ale nástroje, které implementují tyto techniky jsou specializované, umožní pouze měření pasivních sítí a stojí více než 3500 dolarů. Více univerzální přístroje, DMM, mají nízkonákladová omezení, která jim nedovolují, aby zahrnovaly signálu AC zdroje, nicméně, stále mohou implementovat i funkci měření kapacity a to tím, že použijí stejného stejnosměrného proudového zdroje použitého k měření odporu.

### Levné kapacitní měření

Jak bylo uvedeno dříve, digitální multimetry obsahují přesné vnitřní zdroj proudu, který se používá k vytvoření stejnosměrného napětí přes odpor. Stejný přesný zdroj proudu může být použit k vytvoření úbytku napětí na kondenzátoru. Ideální kondenzátor, který se nabíjí z ideálního zdroje konstantního proudu, vytvoří rampu, charakterizovanou rovnicí

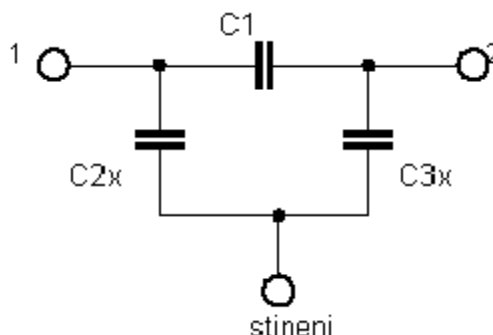
$$I = C \, dV / dt.$$

Proto může hodnota kapacitou  $C$  být vypočtena v časové oblasti použitím konstantního zdroje proudu a pozorováním rychlosti změny napětí na kondenzátoru. Mnoho levných DMM a kapesních DMM provádí měření kapacity za předpokladu, že zdroj proudu i měřený kondenzátor jsou oba ideální. Žádné ideální kondenzátory však neexistují. Kondenzátory mají neideální faktory, jako dielektrické absorpce, svod, ztrátový činitel, a ekvivalentní sériový odpor (ESR). Tyto termíny mohou způsobovat podstatnou chybu do oblasti měřicí techniky časové, je popsáno výše. Proto se většina z levných přístrojů, kterými se měření kapacita mají poznámku ve specifikaci o tom, že jejich specifikace platí pouze pro foliové kondenzátory. Foliové kondenzátory, jako jsou s polyesterovým a polypropylenovým dielektrikem, mají dostatečně nízké ztráty, že tato technika měření v časové oblasti může dát výsledky, které jsou s přesností na 1 %. Chyby zavedené vlivem nefilmových dielektrik, však nemusí nutně vyžadovat použití vysoce výkonných LCR metrů. Existují i další techniky, které byly v nedávné době zavedeny v stolních multimetrech, které mohou snížit chyby způsobené nefilmovými dielektriky.

### Třísvořkové a dvojsvořkové zapojení měřený prvek charakteru kapacity

Měření prvky typu kapacity jsou obvykle kalibrovány v třísvořkovém nebo čtyřpárovém zapojení ale používány jako dvojsvořkové. Při měření průchozí kapacity stíněného kapacitního měřený prvek je měřená kapacita ovlivněna ještě parazitními kapacitami mezi jednotlivými elektrodami kondenzátoru a jeho stíněním ( $X$ ). Kondenzátor se tedy jeví jako 3 kondenzátory, z nichž jeden ( $C1$ ) je průchozí kapacita (to je ta, kterou chceme měřit) a

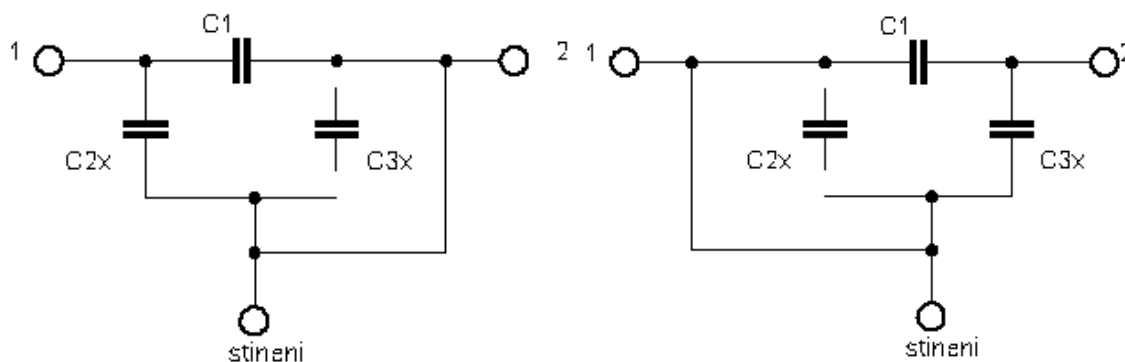
zbývající dvě ( $C_{2x}$  a  $C_{3x}$ ) jsou parazitní kapacity proti stínění (X).



**Obr. č. 30:** Kondenzátor v pouzdře jako etalon je třísvorkový.

### Dvojsvorkové zapojení

Při připojení stínění na jeden z vývodů kondenzátoru, vznikne dvojsvorkové zapojení a jedna z kapacit proti stínění je zkratována, ale druhá je zapojena paralelně průchozí kapacitě ( $C_1$ ), hodnota kapacity měřený prvku je tedy větší než oří třísvorkovém zapojení.



**Obr. č. 31:** Kondenzátor v pouzdře jako etalon jako dvojsvorkový.

Vlastností měřených etalonů a prvků

### Keramické kondenzátory

Keramické kondenzátory jsou teplotně stálé a nahradily slídové kondenzátory. Mají teplotní závislost do 35 ppm/°C, stabilitu menší než 10 ppm/rok,  $D$  okolo 0,0001. Jsou vhodné pro hodnoty kapacity do 1 000 000 pF.

Dielektrikum pro velmi kvalitní kondenzátory tvoří keramika C0G (NPO). Pro hodnoty nad stovky pF se vyrábí jako vrstevové, které mají až 80 vrstev.

### Fóliové kondenzátory - základní informace

Pro realizaci měřeného prvku typu kapacity od 1  $\mu$ F do 100  $\mu$ F se používají fóliové kondenzátory. Tyto kondenzátory se rozdělují do dvou základních skupin:

Kondenzátory s elektrodami z tenkých kovových fólií, které umožňují velmi vysoké impulsní a proudové zatížení, mají velmi dobrou stabilitu a spolehlivost, velmi vysoký izolační odpor a velmi nízké dielektrické ztráty. Speciální konstrukce těchto kondenzátorů zajišťuje jejich samoregenerační schopnost.

Kondenzátory z metalizovaných fólií mají vynikající samoregenerační schopnosti a velmi malé rozměry. Kontakty jsou provedeny nastříkáním kovové vrstvy na čela svitků kondenzátorů. Vývody jsou přivařeny na tyto kontaktní plochy. Nástříkem kontaktů dojde ke zkratování jednotlivých závitů kondenzátorů a tím se dosáhne velmi nízké vlastní indukčnosti a vysoké rezonanční frekvence kondenzátoru.

Dielektrickem jsou polyesterová fólie, nebo metalizovaná polyesterová fólie (kondenzátory označované MKT), polypropylénová fólie nebo metalizovaná polypropylénová fólie pro kondenzátory označované jako MKP, MKPI a KPI impulsní kondenzátory. **Tab. č. 3** uvádí porovnání parametrů kondenzátorů.

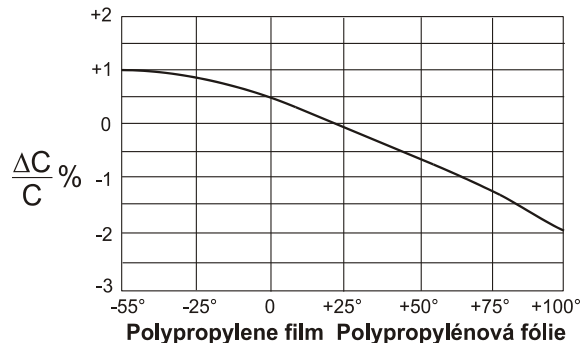
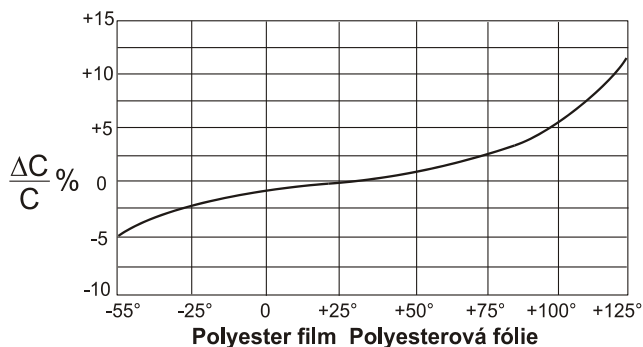
**Tab. č. 3:** Dielektrické vlastnosti kondenzátorů

Type	MKT	MKP
Relativní dielektrická konstanta $\epsilon$	3,2	2,2
DF na 1 kHz, $\tan \delta$	0,005	0,0005
$R_{is}$ [ $G\Omega \times \mu F$ ]	25	100
Dielektrická absorpce [%]	0,2	0,05
Drift kapacity $\Delta C/C$ [%]	1,5	0,5
Absorpce vlhkosti [%]	0,4	0,01
Maximální teplota [ $^{\circ}C$ ]	100 - 125	85 - 100
$T_c$ [ppm/ $^{\circ}C$ ], [ $10^{-6}/^{\circ}C$ ]	+400, $\pm 200$	-200, $\pm 100$

Kondenzátory MKT mají vysokou dielektrickou konstantu, vysokou dielektrickou pevnost, výborné samoregenerační vlastnosti, dobrou stabilitu, vyšší ztráty než MKP a kladný teplotní koeficient ( $+400 \cdot 10^{-6}/^{\circ}C$ ).

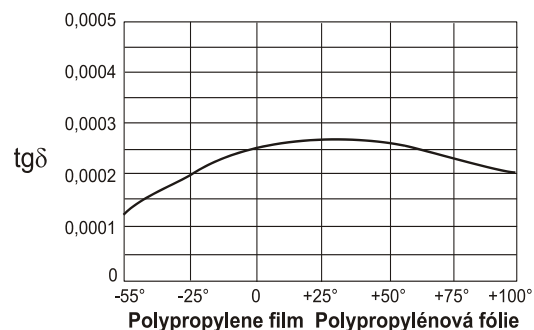
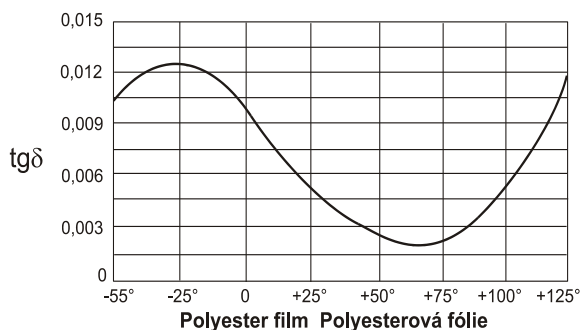
Kondenzátory MKP mají vynikající elektrické parametry, velmi nízké dielektrické ztráty, velmi vysoký izolační odpor, vysokou dielektrickou pevnost, velmi nízkou dielektrickou absorpci, vynikající odolnost proti vlhkosti. Teplotní koeficient je záporný ( $-200 \cdot 10^{-6}/^{\circ}C$ ). Kapacita kondenzátorů se mění s teplotou. V závislosti na dielektrické konstantě a teplotním koeficientu materiálu dielektrika.

Teplotní koeficient  $\alpha_c$  je v závislosti na typu dielektrika buď kladný ( $+400 \cdot 10^{-6}/^{\circ}C$ ) pro MKT kondenzátory, nebo záporný ( $-200 \cdot 10^{-6}/^{\circ}C$ ) pro MKP kondenzátory, ale u obou dielektrik je nelineární, viz grafy.

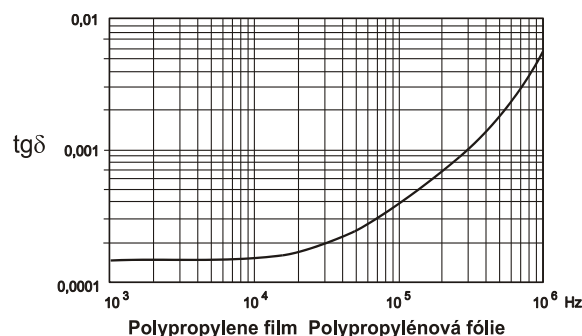
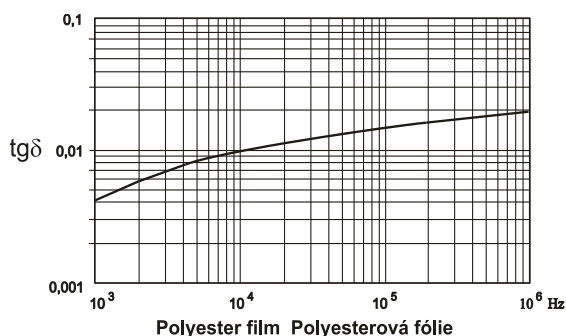


Obr. č. 32: Teplotní závislost kapacity foliových kondenzátorů

Ztrátový činitel vyjadřuje ztráty v materiálu dielektrika, v odporu kontaktů a izolačním odporu.



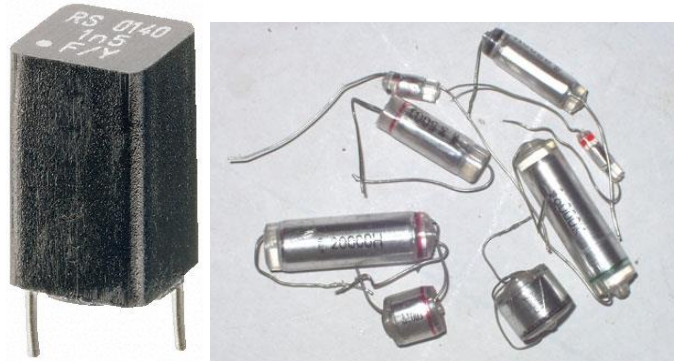
Obr. č. 33: Teplotní závislost ztrátového činitele foliových kondenzátorů



Obr. č. 34: Frekvenční závislost ztrátového činitele foliových kondenzátorů

### Polystyren

Kondenzátory byly známé pod názvem „styroflex“. Jedná se o velmi kvalitní kondenzátory s velmi malými ztrátami řádu 0,0001, malou dielektrickou absorpcí a velkým izolačním odporem. Jejich nízká teplotní odolnost při pájení (pouze 85 °C) je vytlačila z nových konstrukcí. Některé výrobní typy, měly vývody jen vložené a nepřivařené k folii a časem, zvláště když nebyly dostatečně hermetické, se zhoršoval jejich ztrátový činitel.



**Obr. č. 35:** Polystyrénové kondenzátory.

### Teflon

Teflon TFE je označení firmy DuPont pro polytetrafluoroethylen (PTFE).

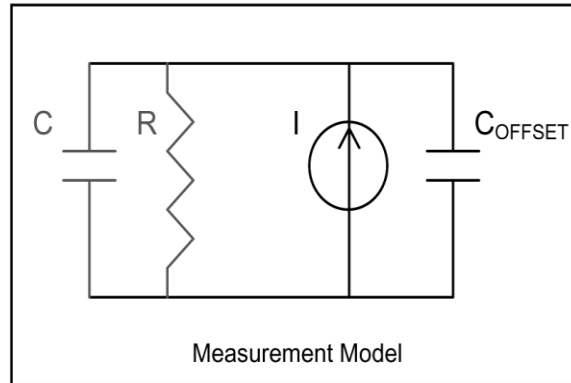
Tyto kondenzátory mají nejvyšší izolaci a nejnižší ztráty z foliových kondenzátorů, ale pro velmi vysokou cenu se používají jenom výjimečně.

### *Měření kapacity s DMM*

Mnoho digitálních voltmetrů obsahuje funkci pro měření kapacity. Tyto přístroje obvykle pracují tak, že nabíjejí a vybíjejí kondenzátor známým proudem a měří rychlost změny napětí. Čím pomalejší rychlost nárůstu napětí, tím je měřená kapacita větší. Digitální multimetry obvykle měří kondenzátory v rozsahu od nanofaradů do několika set mikrofaradů. Kondenzátor měřený s ručním multimetrem v ceně do 100 \$ může dát podstatně jiný výsledek než pro stejný kondenzátor měřený s LCR metrem v ceně do 10 000 \$. To samé, když se kondenzátor měří se dvěma různými ručními multimetry, může také poskytnout výsledky, které se liší o několik procent v závislosti materiálu dielektrika kondenzátoru a na algoritmu měření. S cílem zjistit faktory, které přispívají k této různorodosti a, což je ještě důležitější, vědět, kdy přejít na 10,000 \$ LCR metr, je důležité pochopit principy měření algoritmů použitých k výrobě pro kapacitní měření. Analýzu kapacitního měření lze nejlépe pochopit tím, že zkoumáme způsob, jakým jsou měřeny odpory. Když digitální multimetr měří odpor, používá konstantní zdroj proudu nějaké známé hodnoty, s cílem generovat napětí na rezistoru podle testu. To má za následek napětí DC, který je snadno přepočteno na hodnotu odporu, které ADC a firmware signálu zpracuje. Chybové podmínky spočívající v systému měření odporu jsou snadno pochopitelné a dá se jim vyhnout. Termální EMF, odpor přívodních vodičů, svodové proudy, a vlastní ohřev jsou některé z více významných zdrojů chyb a mohou být ovládnány pomocí vhodných metod měření a vestavěnými funkcemi multimetru, jako je například kompenzace offsetu. I v levných DMM, mohou být bez větších potíží měřeny odpory s přesností lepší než 30 ppm. Vytvoření dostatečně přesného měření pro pasivní komponenty jiného typu, jako je například kondenzátor, je zcela jiná věc.

### **Lepší levné kapacitní měření**

Ztráty v kondenzátoru, který se nabíjí ze stejnosměrného zdroje proudu je nejsnáze modelovat jako paralelní odpor ke kondenzátoru. Tento model je znázorněn na **obr. č. 36**.

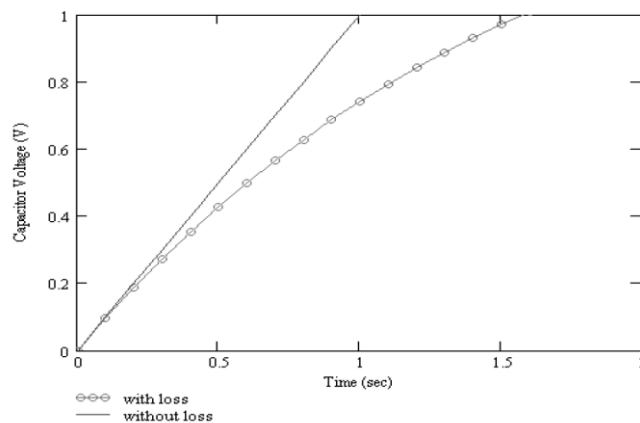


**Obr. č. 36:** Časový model měření kapacity ns multimetru.

Konstantní zdroj proudu připojený na paralelní obvod RC vytvoří ve výsledku v napětí ve tvaru oblouku, který se mění s časem, a je vyjádřen:

$$v(t) = IR(1 - e^{-t/\tau})$$

za předpokladu, že nemá žádné počáteční napětí na kondenzátoru. V této rovnici, je časová konstanta rovna  $R$  násobku  $C$  a  $I$  je hodnota konstantního proudu zdroje. Obě tyto křivky a ideální lineární křivka jsou znázorněny na **obr. č. 37**.



**Obr. č. 37:** Kondenzátor a napětí, se ztrátou a bez ztráty.

Všimněte si, že paralelní odpor má tendenci ohýbat přímkou podle exponenciály. Oblast mezi přímkou a křivkou je kvůli ztrátě složka, která vytváří chybu měření. Protože se jedná o transcendentální rovnice, je docela obtížné je řešit bez použití iterační techniky. Derivát této rovnice,

$$\frac{dv}{dt} = \frac{I}{C}(e^{-t/\tau})$$

může být řešen v uzavřené formě. Pokud RC časová konstanta je známá, může se kapacitní hodnota  $C$  najít nahrazením do této rovnice, v metodě podobné na časové oblasti kapacitního algoritmu bez ztráty zamítnutí.



**Základní měření.**

Vylepšení tedy spočívá v nalezení závažnost RC časové konstanty.

Pro zjištění RC časové konstanty, je kondenzátor podle testu prvního vybití připojen buď odpor paralelně, nebo tím, že obrátí polaritu zdroje proudu. Konstantní proud se zapne a vysokorychlostní hodnoty pořídí analog / digitální převodník na multimetru (ADC). Exponenciální fit se provádí v těchto měřeních a pomocí jak hodnoty samé a sklonu přímky mezi sousedními odečty a je vypočítána RC časová konstanta. Tento algoritmus má řadu přísných požadavků, které ho činí nevhodným pro každý digitální multimetr:

- První a nejdůležitější, musí ADC v digitálním multimetru dost rychle zachytit více bodů na náboje rampy testovaného kondenzátoru a bez zavedení významného šumu měření,
- za druhé, konstantní zdroj proudu multimetru nesmí vykazovat jiné než ideální chování, jako je například tepelný drift při zapínání,
- za třetí se musí vnitřní kapacita multimetru a kapacita sond kalibrovat, což může být stejně jednoduché jako používání "Math Null" funkce odečíst aktuální čtení ze všech následujících měření,
- konečně musí vnitřní kapacita na multimetru mít poměrně dobrý faktor kvality, aby se zabránilo zavedení chyb způsobených vlastní RC časovou konstantou.

Pokud jsou tyto požadavky splněny, mohou uživatelé získat podstatně lepší přesnosti údajů. (Například kapacitní měření v Agilent 34410A je založen na metodě, velmi podobné jako je popsáno výše).

Výše popsaná měření vyžadují aktuální zdroj pouze jedné polarity, jako vnitřní odpor může být použit k vybití kondenzátoru po testu. S trochou více nákladů v aktuálním zdroji, může být proveden jiný způsob potlačení vlivu ztráty. Pokud je k dispozici přesný zdroj proudu, mohou oba, proudové zrcadlo se zdrojem proudu, vytvořit pravoúhlý střídavý proudový signál v opačné jeho polaritě v předem určeném intervalu. Tento střídavý proud zdroje vytvoří trojúhelníkový průběh v napětí, pokud je připojen na kondenzátor. Pokud má kondenzátor ztráty, budou na trojúhelníku vlny obsahující exponenciální výrazy, jak znázorněno na obrázku č. 2.

Tyto exponenciální podmínky změny velikosti harmonických ve frekvenčním spektru průběhu napětí. Multimetr National Instruments NI 4072 používá metodu podobnou této, ve kterém je rychlá Fourierova transformace (FFT) pro stanovení kmitočtového spektra, a první a třetí harmonické jsou podmínkou ve srovnání k odstranění ztráty.

**Chyby v kapacitním měření na DMM**

Existuje několik významných problémů u jakéhokoliv časově orientovaného provádění měření kapacity. První z nich je, že hodnota kapacity se může změnit podstatně s frekvencí. LCRmetrů, jako je Agilent 4263B mají schopnost měření kapacity na více frekvencích pomocí interního, variabilního zdroje střídavého napětí. U hliníkového elektrolytického kondenzátoru, se může kapacita lišit až o několik procent mezi frekvencí 100 Hz a 1 kHz. Méně nákladný algoritmus obvykle pracuje na jedné frekvenci, a proto není při vyšších frekvencích.

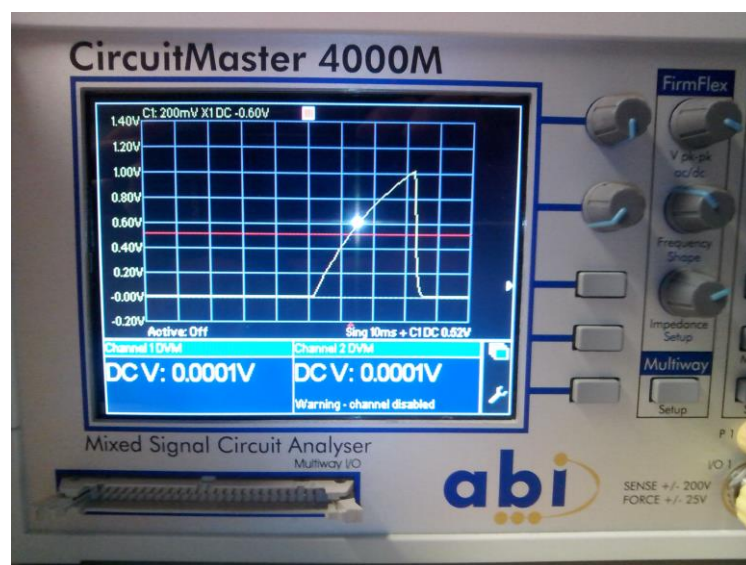
Další neideální chování charakteristické kondenzátorů, které mohou vést k překroucení

výsledků měření s nižšími náklady je ekvivalentní sériový odpor kondenzátoru, nebo ESR. Předpokládejme na chvíli, že pozitivní proud se používá k nabíjení kondenzátoru při testu, při měřicím cyklu. Pokud odpor připojený mezi kondenzátorem a zemí se používá pro vybití kondenzátoru a má jej připravit pro další měřicí cyklus, musí být co možná nejnižší napětí na kondenzátoru bude (0 V).

Vzhledem k tomu, konstantní proud vytváří napětí rampy na kondenzátoru, bude hodnota napětí na více měřicích cyklech větší, než 0 V. Toto zkreslení nevytváří žádné významné chyby pro filmové a keramické kondenzátory, ale pro hliníkové elektrolytické kondenzátory, to může mít na výsledek velký vliv. To je kvůli tomu, že se ESR mění nelineárně s DC předpětím.

Jednoduchý způsob vyřešení tohoto problému je, aby se zkreslení DC na kondenzátoru bylo co nejmenší, provádět pomocí střídavého proudu zdroje, při vybití pod 0 V, nebo tím, že snižuje amplitudu napětí proudu na kondenzátoru. Každá z těchto technik může poskytnout přesné výsledky. V některých případech může být hodnota kondenzátoru aplikovaného s DC předpětím žádoucí. V případě, že je kondenzátor použit v obvodu, který má DC předpětí přes něj v normálním provozu (například v napájecím oddělení). Měřidla, která používají zdroj AC, jako LCR metry, obvykle poskytují možnost měřit hodnotu s předpětím DC za těchto podmínek.

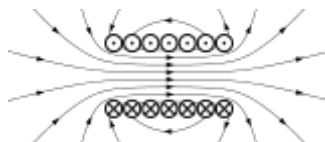
Tato analýza ukazuje, že jsou mnohé vlastnosti, které se musí vzít v úvahu při měření hodnoty kondenzátoru. Pro obecné řešení problémů nebo pro měření vysoce kvalitních filmových kondenzátorů, je jednoduchá a nenákladná časově vymezená technika integrována do univerzálních multimetrů bude více než adekvátní. Pro měření, která vyžadují extrémně vysokou přesnost a měření dalších parametrů, by měl být volbou výkonný LCR metr. Tam je, jak je uvedeno výše, některá střední cesta mezi těmito dvěma extrémy, které snižují ztráty pomocí relativně levných metod. Tyto metody neumožní výpočet vlastností, jako je faktor ztrát, ale zlepši přesnosti měření pro nižší kvality kondenzátorů.



Obr. č. 38: Záznam měření kapacity na osciloskopu.

## Indukčnost

- Cívka je třetí nejrozšířenější základní pasivní součástka všech elektrických zařízení,
- velký obchod má v sortimentu stovky až tisíce různých cívek,
- indukčnost se vyskytuje v každém transformátoru,
- měří se i vazbě mezi dvěma cívkami popsaná vzájemnou indukčností,
- indukčnost měříme v širokém rozsahu hodnot cca 1 nH do více než 100H,
- měření indukčnosti se provádí přednostně při střídavém signálu na frekvenci, na které má kondenzátor pracovat,
- hodnota indukčnosti do cca 10  $\mu\text{H}$  se realizuje cívkami převážně bez jádra,
- hodnota indukčnosti nad cca 1 mH se realizuje cívkami převážně s jádrem,
- použité jádro obvykle činí součástku závislou na frekvenci a i na velikosti signálu,
- běžná cívka je ovlivněna i prvky v blízkém okolí,
- toroidní provedení potlačuje vliv okolí,
- vedlejší parametr indukčnosti je sériový odpor,
- protože cívka je vinuta z Cu drátu, je její sériový odpor teplotně závislý podle použité mědi, tedy 0,4%/ $^{\circ}\text{C}$ . To znamená, že u měření musí být udána i teplota.



Obr. č. 39: Běžná cívka tzv. s otevřeným polem.

### Přehled měřených prvků $L$ používaných v ČR:

#### Měřený prvek charakteru vlastní a vzájemné indukčnosti

Měřený prvek charakteru vlastní indukčnosti je tvořen obvykle vzduchovou cívkou. Při průchodu proudu touto cívkou vzniká v jejím okolí magnetické pole. Toto pole je soustředěno uvnitř toroidu u toroidních měřených prvků, u měřených prvků s otevřeným polem zasahuje daleko do okolí. Pokud není použito stínění, není toto magnetické pole nijak ovlivněno a měřená indukčnost cívky odpovídá její vlastní indukčnosti.

Při použití stínění se magnetické pole indukuje do plechu tvořícího stínění, který tak vytváří závit nakrátko. Tím dochází ke zvýšení ztrát v magnetickém obvodu cívky a ovlivnění měřené hodnoty vlastní indukčnosti.

#### Toroidní měřený prvek charakteru-indukčnosti

Ruské měřené prvky charakteru toroidní konstrukce vysoké kvality, jako je například měřený prvek charakteru typu P5115. Jsou umístěny v robustním kovovém pouzdře, které stabilizuje teplotu a stíní měřený prvek. Některé konstrukce mají cívku zalitou, například do korkové drti v asfaltovém kompaundu.



**Obr. č. 40:** Vnitřní konstrukce toroidního měřeného prvku indukčnosti typu P5115.



**Obr. č. 41:** Toroidní měřený prvek charakteru indukčnosti pod  $100 \mu\text{H}$  s potlačením vlivu indukčnosti přívodů.

Měřený prvek charakteru indukčnosti pod  $100 \mu\text{H}$  má další svorky se zkratovací spojkou. Měření v první poloze umožní změřit zbytkové indukčnosti a po přepnutí do druhé polohy se hodnota měřeného prvku změní o hodnotu, definovanou tímto měřeným prvkem.

#### Měřený prvek charakteru cívky s otevřeným polem

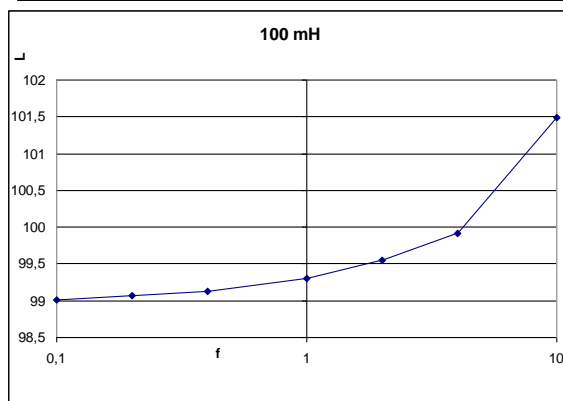
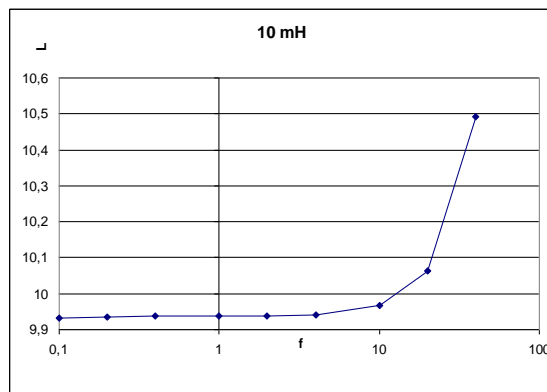
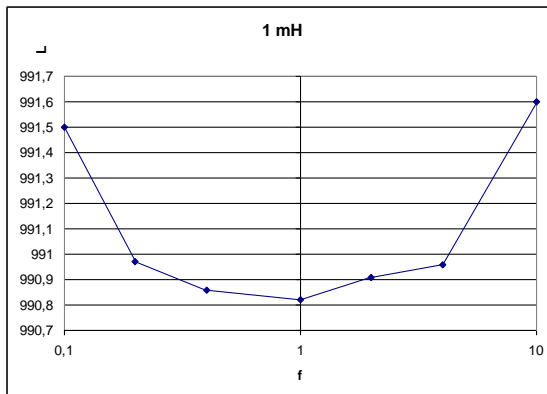
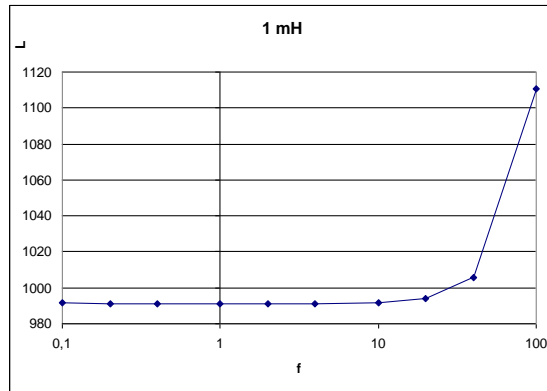
Měřený prvek charakteru válcové konstrukce s otevřeným polem, v ČR velmi rozšířené v počtu několika desítek sad, je například měřený prvek charakteru RFT 0187. V praxi našich laboratoří jsou nejdůležitější. Pro konstrukci s otevřeným polem jsou však nevhodné pro přesná měření.

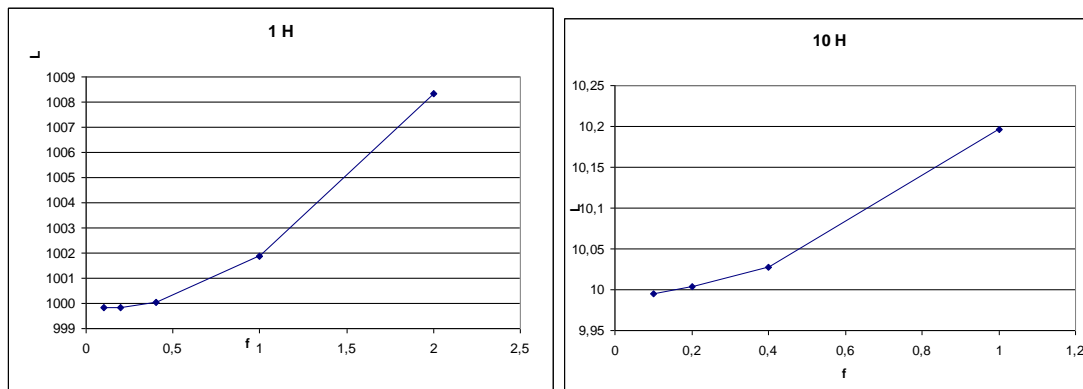


**Obr. č. 42:** Měřený prvek charakteru L s otevřeným polem RFT 0187.

**$L$  indukčnosti RFT 0181, frekvenční závislost  $L$**

Vodorovně je vynesena na ose x frekvence v kHz.





**Obr. č. 43:** Měřený prvek charakteru indukčnosti RFT 0181, ukázka frekvenční závislosti indukčnosti.

### Připojení měřených prvků

Měřený prvek charakteru  $L$  při měření umístujeme nejméně 60 cm od vodivých předmětů nejjednodušeji položením na papírovou krabici od některého přístroje. Korekce Open a Short se provádí v místě připojení na svorkách měřeného prvku. Zkratovací spojka má obvyklé rozměry měřených prvků indukčnosti (10 až 30) nH a je možné ji při malých hodnotách měřené indukčnosti připočítat jako korekci

Měřené prvky charakteru indukčnosti hrají při kalibraci RLC mostů malou úlohu, často mohou být nahrazeny simulovanými induktory. Obvykle se při kalibraci používá pouze jedna hodnota pro ověření funkčnosti indukční funkce mostu. Kalibrace v celém rozsahu vychází z kalibrací měřených prvků kapacity nebo odporu. Měří se obvykle tam, kde dosahuje měřený prvek optimálních vlastností 1 H až 10 H na 100 Hz, nižší hodnoty od 1 mH do 1 H na 1 kHz, hodnoty pod 1 mH na pracovní frekvenci, která bývá od 10 kHz výše.

Měřený prvek typu indukčnosti v toroidním provedení má obvykle velmi výraznou frekvenční závislost a nehodí se pro práce v širším frekvenčním rozsahu. Měřený prvek s otevřeným polem válcové konstrukce má lépe sledovatelnou frekvenční závislost, mohou se používat v rozsahu nejméně jedné dekády frekvence.

## 10 Stanovení nejistoty při měření

### Výsledky měření, chyby a nejistoty

#### Chyby měření

Měření je ovlivněno mnoha zdroji chyb, z nichž některé mohou zvětšit, ale jiné mohou zmenšit naměřenou hodnotu. Cílem jakékoli metrologické laboratoře je, aby tyto chyby byly malé, ale nemohou být nikdy sníženy na nulu. Úkolem pro všechny kalibrační laboratoře je zjistit množství těchto chyb a jak velké mohou být. Měření jsou ovlivněny třemi typy chyb, jsou to chyby náhodné, systematické a hrubé.

Náhodné chyby se tvoří z neznámých nebo nepoznaných příčin a jsou zjistitelné jen při opakovaných měřeních se stabilním a konzistentním (bezesporným) nastavením měřicí

techniky. Tento typ chyby bude mít za následek, že čtení při opakovaném měření nejsou vždy stejná. Není-li vliv způsobující chybu zřejmý, pak chyba spadá do kategorie náhodných chyb.

**Poznámka:** Náhodné chyby nelze kvantifikovat bez stabilního prostředí a konzistentní měřicí techniky!

Systematické chyby se týkají zařízení používaných v procesu měření nebo vnějších vlivů na zařízení. Příklady zahrnují: vlivy a účinky zatížení, termonapětí, drift, svodové proudy, vnější rušení a šum.

Hrubé chyby jsou způsobeny lidmi a mohou být odstraněny přísně kontrolovanou prací s odpovídajícím školením. Příklady hrubé chyby zahrnují chybný výklad výsledků, nesprávné úpravy, špatný používaný přístroj pro dané měření, chyby v záznamu údaje a výpočetní chyby. Všem těmto chybám se lze vyhnout řádným vyškolením a pozorností k detailům při práci.

### **Zdroje nejistoty**

Nejistota ve výsledcích měření může být ovlivněna mnoha faktory. Hlavní a většinou významné z nich bývají následující:

- Referenční měřený prvek a měřicí zařízení: nejistota jejich kalibrace, dlouhodobý drift, rozlišení, vliv elektromagnetického rušení, citlivost vůči změnám během přepravy a manipulace,
- nastavení parametrů měření: kabely, stínění, ohřev a doba ohřevu; termonapětí, měřicí sondy
- postup měření: doba měření, počet měření, klimatizace, stav měřených prvků a zařízení,
- podmínky prostředí: teplota, kolísání teploty, vlhkosti vzduchu, elektromagnetické vlivy, přechodové jevy v napájení.

### **Klasifikace nejistoty**

Metoda hodnocení nejistoty **typu "A"**, je metoda hodnocení nejistoty měření statistickou analýzou série měření. Například stanovení standardní odchylky série měření.

Metoda hodnocení nejistoty **typu "B"** je metoda hodnocení nejistoty měření jiným způsobem než statistickou analýzou série pozorování. Příkladem by mohla být výrobce zveřejněná specifikace pro přístroj.

### **Metody určování nejistoty**

Zveřejněné specifikace, jak bylo zmíněno dříve, jsou nejčastější zdroj nejistoty údajů používaných u komerčních kalibračních laboratoří. Tato metoda je nejvhodnější pro laboratoře, které provádějí pouze "jednoduché měření".

Jednoduché měření může být definováno jako jakékoli vyhodnocení, které je provedeno v rozsahu specifikace použitého měřeného prvku. Tato metoda stanovení je považována za nejistotu typu "B".

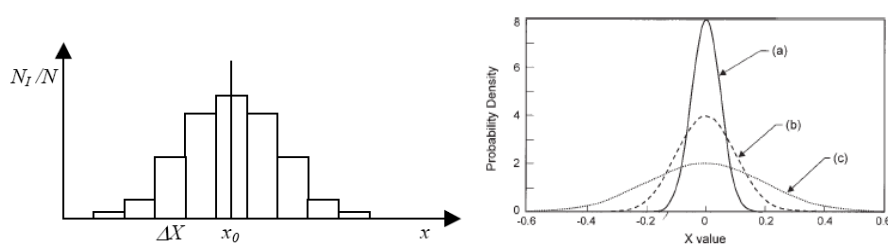
Statistické metody vyžadují provedení řady měření ve stanoveném časovém období. Tyto metody jsou nejvíce robustní a jsou vhodné pro všechny laboratoře, které vyžadují, aby

byla vysoká důvěra pro jejich nejistoty měření. Jedná se o nejistotu typu "A".

### Rozložení pravděpodobnosti spojené s nejistotou měření

Výsledek měření je uvnitř určitého intervalu hodnot. Tento interval může mít různý tvar, který popisuje rozdělení nejistoty měření typu "B". Poslední informace, které jsou potřebné k určení standardní nejistoty, je rozdělení nejistoty typu B. Existují čtyři základní typy rozložení:

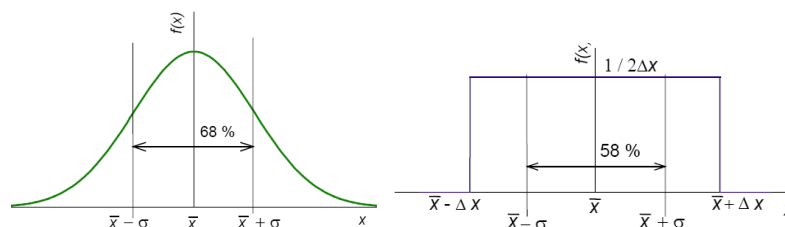
- Normální rozložení,
- obdélníkové rozložení,
- trojúhelníkové rozložení,
- rozložení U-tvaru.



**Obr. č. 44:** Při opakovaném měření má výskyt naměřených hodnot v grafu tvar blízký normálnímu rozložení. Čím je měření přesnější, tím je graf rozložení užší, na obr. vpravo je křivka (a) pro přesnější měření než na (b) a (c)

Normální rozložení je obvykle spojeno s nejistotou typu "A", dělitel je jedna.

Obdélníkové rozložení se používá tam, kde je rovná pravděpodobnost měření, vyskytující se v závazných limitech specifikací. Tento typ rozložení je obvykle spojen se specifikacemi výrobce. GUM doporučuje použít obdélníkové rozložení, pokud rozdělení není podrobněji známo. Předpoklad obdélníkového rozložení umožní laboratoři chybovat na konzervativní straně, tedy uvést nejistotu větší, než je skutečná. Chcete-li převést specifikace na obdélníkové rozložení typu "B", pak pro stanovení nejistoty dělíme specifikaci druhou odmocninou ze tří a tím dojdeme ke standardní nejistotě.



**Obr. č. 45:** Nejdůležitější je normální rozdělení, vyskytující se ve většině praktických měření a rovnoměrné rozdělení, používané často u specifikací pro své jasně určené hranice.

Trojúhelníkové rozdělení a rozdělení U-tvaru nebudeme diskutovat v tomto článku, protože vyžaduje dobré pochopení statistických metod, které je nad rámec tohoto dokumentu a je méně časté v praxi.



**Výpočet nejistoty**

V procesu stanovování nejistoty musí být brány v úvahu složky vlivem všech nejdůležitějších příspěvků k nejistotě měření. Poté, co jsou definovány všechny příspěvky nejistoty je třeba je převést na standardní nejistotu. GUM poskytuje následující korekční faktory pro nenormální rozdělení.

**Tab. č. 4:** Přepočítací koeficienty pro různá rozložení

rozdělení	dělit odmocninou z	dělitel
obdélníkové	3	1,732
trojúhelníkové	6	2,4495
U-tvaru	2	1,4142

Například specifikace výrobce multimetru na 100 V je udaná jako  $\pm 0,5$  V. Chceme-li převést toto obdélníkové rozdělení na standardní nejistotu, pak musíme podělit 0,5 V druhou odmocninou ze 3 tj. (1,7321) a pro standardní nejistotu tak získáme 0,289 V.

**Kombinovaná nejistota**

Poté, co byly převedeny všechny příspěvky nejistoty na standardní nejistoty, pak musí být standardní nejistoty převedeny na jednotnou měrnou jednotku. Posledním krokem výpočtu nejistoty je jejich součet. Každá ze složek standardních se umocní na druhou, a všechny komponenty se sečtou. Odmocnina výsledku je brána jako celková standardní nejistota.

Vzorec pro sčítání nejistot, například  $U_1$  až  $U_3$  je:

$$U = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2}$$

Rozšířená nejistota se získá vynásobením výsledné hodnoty U faktorem pro úroveň pravděpodobnosti 95 %, který je v převážné většině případů dva ( $k = 2$ ). Tato rozšířená nejistota je uvedena v nejistotě výsledku.

**11 Záznamy o měření**

Pokud má organizace stanoveny konkrétní záznamy o měření, využijí se. Úroveň záznamu je dána důležitostí měřicí operace a jeho rozsah stanoví odpovědný pracovník subjektu (technolog, metrolog atd.)

Tyto záznamy mohou obsahovat například:

- identifikace pracoviště provádějícího měření,
- pořadové číslo záznamu, očíslování jednotlivých stran, celkový počet stran,
- informace o měřidle,
- veličiny ovlivňující měření v okamžiku měření a způsob jejich kompenzace,
- název výrobní operace,
- datum měření, (případně i čas),
- označení použité metodiky měření (v našem případě např. MPM 4.1.2/05/19)

- h) měřidla použitá při měření,
- i) obecné vyjádření o návaznosti výsledků měření,
- j) výsledky měření a s nimi spjatou rozšířenou nejistotu měření a/nebo prohlášení o shodě s danou technologickou tolerancí,
- k) jméno pracovníka, provádějícího měření, jméno a podpis odpovědného (vedoucího) pracovníka, razítko pracoviště.

## 12 Péče o metodický postup

Originál metodického postupu je uložen u jeho zpracovatele, další vyhotovení jsou předána příslušným pracovníkům podle rozdělovníku (viz čl. 13.1 tohoto postupu).

Změny, popř. revize metodického postupu provádí jeho zpracovatel. Změny schvaluje vedoucí zpracovatele nebo metrolog organizace.

## 13 Rozdělovník, úprava a schválení, revize

Uvedený příklad je pouze orientační a subjekt si může tuto dokumentaci upravit podle interních předpisů o řízení dokumentů.

### 13.1 Rozdělovník

Metodický postup		Převzal		
Výtisk číslo	Obdrží útvar	Jméno	Podpis	Datum

### 13.2 Úprava a schválení

Metodický postup	Jméno	Podpis	Datum
Upravil			
Úpravu schválil			

### 13.3 Revize

Strana	Popis změny	Zpracoval	Schválil	Datum

## Upozornění

Tento metodický postup je třeba považovat za vzorový. Doporučuje se, aby jej organizace přizpůsobila svým požadavkům s ohledem na své metrologické vybavení a konkrétní podmínky.

## 14 Příloha

Vedlejší parametry prvků,  
D a Q

Obecně

Kapacita  $C$  je definována jako poměr mezi nábojem  $Q$  a napětím  $U$  mezi deskami kondenzátoru:

$$C = \frac{Q}{U} \quad (1)$$

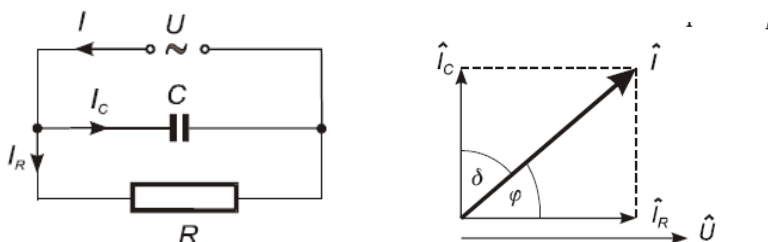
Kondenzátor se v elektrickém obvodu chová jako zásobník energie elektrického pole. Je tvořen dvěma elektrodami, mezi nimiž je dielektrikum (vzduch, slída apod.). Při průchodu střídavého proudu každý kondenzátor vykazuje ztráty, které jsou způsobeny nedokonalou izolací dielektrika, ohmickým odporem elektrod i ztrátami v dielektriku při střídavé polarizaci. Ztráty se projeví ohříváním dielektrika. Proto si lze skutečný kondenzátor představit jako bezeztrátový kondenzátor  $C$ , **obr. č. 46**, k němuž je paralelně připojen svodový odpor  $R$ , jehož velikost je úměrná ztrátám. V praxi se však pro posouzení kvality kondenzátoru uvažuje tzv. ztrátový úhel  $\delta$ , pro nějž platí:

$$\delta = \frac{\pi}{2} - \varphi, \quad (2)$$

z něhož se určuje ztrátový činitel  $\operatorname{tg} \delta$ :

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{1}{\omega CR}. \quad (3)$$

Velmi často se používá místo  $\operatorname{tg} \delta$  jednodušší symbol  $D$  (bez nutnosti používat řecká písmena).



**Obr. č. 46:** Kondenzátor a jeho ztráty

#### Primární měřený prvek charakteru etalonu pro měření činitele ztrát kondenzátorů

Primární pro stanovení ztrát kondenzátorů se realizují podle principu popsaného v třicátých letech minulého století. Vychází z předpokladu, že u speciálně konstruovaného kondenzátoru, u kterého se změni kapacita kondenzátoru posuvem polohy elektrod (změna mezery mezi elektrodami) se ztráty nezmění. Aby se odstranil vliv vlhkosti a mikrovrstev na povrchu elektrod, jsou elektrody obvykle zlacené a kondenzátor se měří ve vakuu.

Měřený prvek charakteru kapacity pro hodnoty nad 1000 nF se obvykle realizují s fóliovými kondenzátory. Keramické nebo slídové se dělají z cenových důvodů maximálně do 10 000 nF. Vhodné a používané dielektrické materiály pro kondenzátory vyšších hodnot kapacity jsou polyesterová fólie, nebo metalizovaná polyesterová fólie, (kondenzátory MKT) či polypropylénová nebo metalizovaná polypropylénová fólie. Polystyrénová fólie má výhodu nejmenších ztrát, ale kondenzátory s polystyrénovou fólií se přestaly vyrábět a prakticky nejsou dostupné.

#### **Vlastnosti fólií pro kondenzátory**

Kondenzátory z polyesteru mají výhodu větší dielektrické konstanty (ve srovnání s polypropylenem), mají vysokou dielektrickou pevnost, výborné samoregenerační vlastnosti, dobrou stabilitu, dost vysoký kladný teplotní koeficient  $(+400 \pm 200)10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ , ale dost velký ztrátový činitel na 1 kHz kolem 0,005, dielektrickou absorpci 0 % a dlouhodobý drift v jednotkách %.

Kondenzátory z polypropylenu mají vynikající elektrické parametry, velmi nízké dielektrické ztráty,  $D$  na 1 kHz 0,0005, velmi vysoký izolační odpor, vysokou dielektrickou pevnost, velmi nízkou dielektrickou absorpci 0,5 %, vynikající odolnost proti vlhkosti. Teplotní koeficient je záporný  $(-200 \pm 100)10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ .

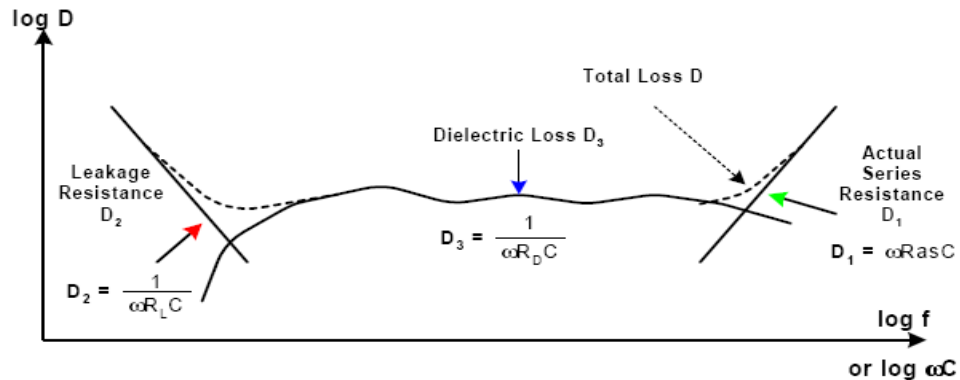
U kondenzátorů s hodnotou kapacity nad 100 nF přestávají být vhodné třísvorkové metody měření, protože vliv přívodů je značný a možnosti jeho kompenzace omezené a nedostatečně stabilní. Pro kapacity od 1000 nF výše je nutné použít čtyřpárové připojení. Čtyřpárové a čtyřsvorkové komerční mosty mají omezenou přesnost měření vedlejší složky. Je to pochopitelné, protože vedlejší složka je pro nízkoztrátové kondenzátory o několik řádů menší než hlavní složka. Přesnost závisí značně na přesnosti fáze v přenosových kanálech mostu. Není problém zajistit velmi přesný fázový posun  $90^{\circ}$  pro fázové detektory, ale je velmi obtížné tento posuv udělat přesný, stabilní pro analogové obvody mostu, zvláště pro širší rozsah frekvence.

#### **Konstrukce fóliových kondenzátorů s malými ztrátami**

Vlastnosti dielektrika jsou dány technologickými možnostmi výrobce plastu a fólie. Konstrukci kondenzátoru lze přizpůsobit očekávanému užití. Vnitřní ztráty v kondenzátoru jsou příčinou vzniku tepla, které může způsobit i destruktci kondenzátoru, není-li teplo dostatečně účinně odváděno. To musí, samozřejmě, konstrukce kondenzátoru umožňovat s masivním pokovením elektrod speciálně konstruované pro vysokofrekvenční ohřev.

#### **Frekvenční závislost ztrát**

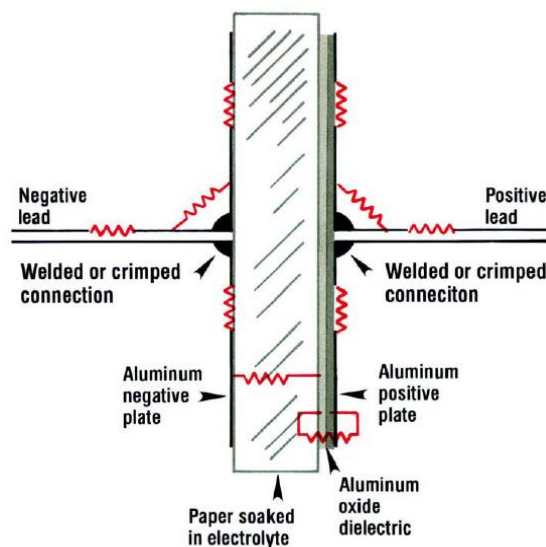
Frekvenční závislost ztrát má 3 základní oblasti (viz obr. č. 47). Na nízkých frekvencích  $D$  s kmitočtem klesá. Pokles je tím větší, čím je  $D$  kondenzátoru větší. I z tohoto důvodu jsou pro praxi výhodnější měřené prvky charakteru s malými ztrátami. Pro střední oblast frekvencí jsou ztráty určeny hlavně vlivem dielektrika. Pro nízkoztrátové kondenzátory není tato oblast vyjádřena. Na vysokých frekvencích ztráty rostou vlivem sériového odporu měřeného prvku.



Obr. č. 47: Frekvenční závislost ztrát (podle firemní literatury QUADTech)

### Elektrolytické kondenzátory

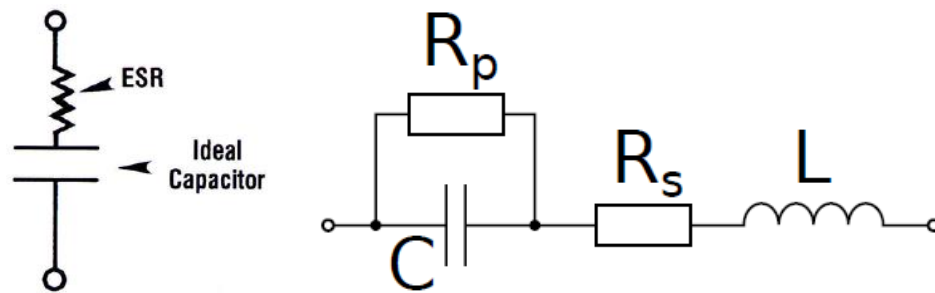
Elektrolytické kondenzátory mají výhodu malých rozměrů, ale pro metrologii spousta nevýhod, pro které se jako měřený prvek nehodí. Proto se někdy nahrazují simulovaným měřeným prvkem, složeným z vhodného kondenzátoru (polystyrénový 10  $\mu\text{F}$ ) a dvou transformátorů, které mohou podle nastaveného převodu simulovat kapacitu až do 1 mF. Nevýhodou tohoto řešení je řada konstrukčních vlivů, omezujících přesnost takového měřeného prvku. Ukázka elektrolytického kondenzátoru s parazitními prvky viz obr. č. 48.



Obr. č. 48: Elektrolytický kondenzátor s parazitními prvky.

### ESR

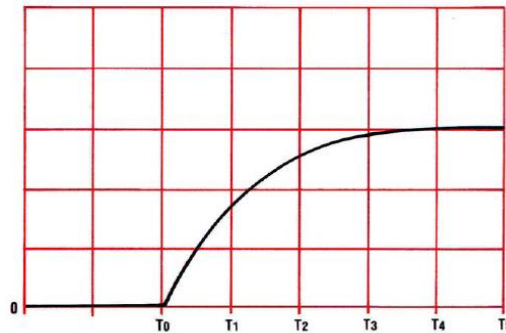
Pro vyšší frekvence a pro větší hodnoty kapacity může být podstatný sériový odpor, často označovaný jako ESR.



**Obr. č. 49:** Náhradní schéma kondenzátoru se sériovým ekvivalentním odporem ESR.

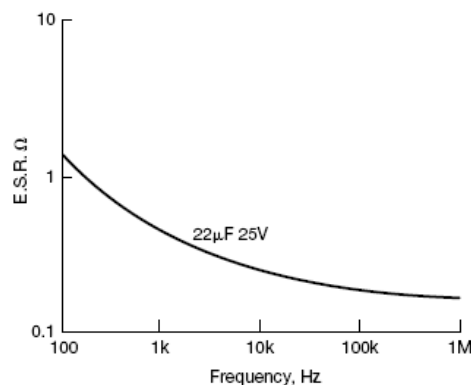
Například pro filtrační kondenzátor síťového zdroje s hodnotou 20 mF, uvažujeme-li sériový odpor 0,5  $\Omega$ , pak při proudu 5 A, je ztrátový výkon na kondenzátoru 12,5 W. Sériový odpor je dán hlavně provedením přívodů kondenzátoru, tloušťkou fólie nebo pokovením a kvalitou připojení vývodů. To bývá u speciálních kondenzátorů tvořeno masivní nastopovanou vrstvou kovu, ale u některých typů, například z teplotně choulostivého polystyrenu, může být kontakt jenom mechanickým přiložením k elektrodové fólii. Takový typ kondenzátoru nelze použít pro měření prvky.

Při měření na měřiči impedance se měří celkový kombinovaný vliv všech složek ztrát. Samostatný sériový odpor ESR je nejlépe zřejmý na nabíjecí křivce kondenzátoru, jak ukazuje obr. č. 50.



**Obr. č. 50:** Nabíjení ideálního kondenzátoru a C se sériovým odporem ESR.

Sériový odpor ESR je málo závislý na frekvenci, jak ukazuje obr. č. 51.



**Obr. č. 51:** Závislost ESR na frekvenci pro tantalový elektrolytický kondenzátor 22  $\mu\text{F}$ .

Na vyšších frekvencích je hodnota filtračního účinku kondenzátorů omezena nejen sériovým odporem ESR, ale i sériovou indukčností ESL, viz obr. č. 52.

$$Z = R + 1/j2\pi fC + j2\pi fL \quad (4)$$

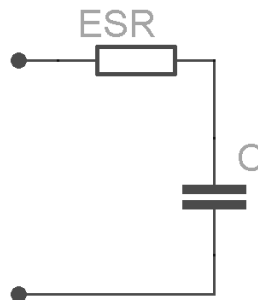


**Obr. č. 52:** Kondenzátor na vyšších frekvencích.

Proto u kvalitních kondenzátorů je věnována pozornost ESR i ESL.

$$|Z_C| = \sqrt{ESR^2 + \left(\omega ESL - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad (5)$$

**Obr. č. 53:** ESL můžeme určit z frekvenční závislosti, měřené pro oblast frekvence, kde již efektivní kapacita kondenzátoru roste.



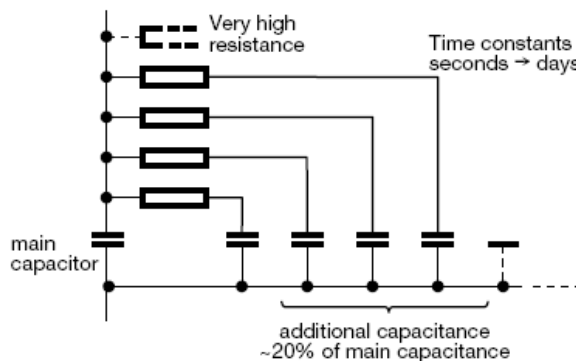
**Obr. č. 54:** ESR omezuje filtrační schopnosti kondenzátoru v obvodech s filtry.

### Dielektrická absorpce

Dielektrická absorpce je další nežádoucí parametr dielektrika. V praxi se projevuje tak, že na kondenzátoru nabitým na stejnosměrné napětí můžeme po krátkodobém vybití po nějaké době znovu naměřit určitou hodnotu napětí. Náhradní zapojení je řada RC členů paralelně ke kondenzátoru. Pro měřený prvek se vždy volí kvalitní dielektrika, u kterých je dielektrická absorpce malá. Dielektrická absorpce je důležitá hlavně u kondenzátorů měřících integrátorů, například v číslicových multimetrech. Náhradní zapojení pro dielektrickou absorpci je řada RC členů paralelně k ideálnímu kondenzátoru viz obr. č. 55. Teoreticky je těchto RC členů nekonečný počet, jak bylo ukázáno v disertační práci Ing. L. Rippera, CSc. Z bývalé firmy TESLA Brno. V praxi se obvykle nahrazuje jedním RC členem.

Náhradní zapojení ukazuje vliv dielektrické absorpce takto: Zkratujeme-li krátkodobě kondenzátor, vybije se kapacita tohoto kondenzátoru, ale nestačí se vybit kondenzátor

v RC členu. Odstraníme-li zkrat, nabíjí se hlavní kondenzátor přes odpor z kondenzátoru RC členu simulujícího dielektrickou absorpci. Velikost dielektrické absorpce závisí na poměru kapacit těchto dvou kondenzátorů, odpor určuje dobu do dosažení rovnovážného stavu.



Obr. č. 55: Náhradní zapojení pro vyjádření dielektrické absorpce kondenzátoru.

### Činitel jakosti $Q$

Činitel jakosti  $Q$  je definován jako poměr imaginární k reálné části impedance.

Používá se v několika typických případech:

- $Q$  u indukčností na vysokých frekvencích od desítek kHz do stovek MHz. Je typicky větší než 1 a dosahuje hodnoty desítek až stovek. Dříve se měřil činitel jakosti častěji a velmi rozšířené byly specializované přístroje na toto měření, nazývané  $Q$  metry,
- $Q$  u indukčností na nízkých frekvencích se většinou neměří, protože reálné objekty mají  $Q$  indukčností pod 1,
- $Q$  u měřených prvků odporů se často udává pro střídavé měřené prvky, určené ke kalibraci měřičů impedancí. Pro nízké kmitočty a drátové měřené prvky odporů se dříve udávala časová konstanta, pro vrstevné a fóliové měřené prvky se více používá  $Q$ ,
- $Q$  u měřených prvků kapacity se vžil pro SMD kondenzátory určené pro vysoké frekvence až do 2 GHz.

### $Q$ u měřeného prvku charakteru indukčnosti

Pro malé a střední hodnoty indukčnosti se používá sériové náhradní schéma, viz obr. č. 56.



Obr. č. 56: Sériové náhradní schéma indukčnosti.

Činitel jakosti  $Q$  je definován jako poměr reaktance cívky  $\omega L$  a jejího sériového odporu  $r$ . Převrácená hodnota  $Q$  je ztrátový činitel  $D$  používaný často při měření kondenzátorů.



Pro činitel jakosti a ztrátový činitel platí:

$$Q = \omega L / r \quad (6)$$

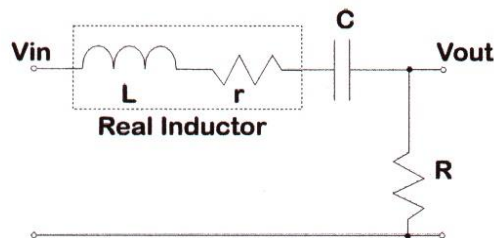
$$D = 1 / \omega CR. \quad (7)$$

Činitel jakosti se užívá u indukčností k charakterizování, jak dalece se liší cívka svými vlastnostmi od ideální indukčnosti. Každá cívka má sériový odpor, protože je vinuta z drátu, který má nějaký odpor. U měření prvků indukčnosti na akustických kmitočtech je vliv sériového odporu cívky velký. Tyto cívky mají malé  $Q$ , často menší než 1 a chovají se tedy jako měřený prvek charakteru obecné impedance, vzdálené od ideální indukčnosti. Protože drát vinutí má odpor s velkou teplotní závislostí, pro měď kolem  $0,4/^\circ\text{C}$ , nebývá většinou  $Q$  na nízkých frekvencích měřeno, protože pro netermostatované měřené prvky je velmi závislé na teplotě měřené cívky.

Větší význam má  $Q$  na vyšších frekvencích a u vysokofrekvenčně laděných obvodů.

### Měření činitele jakosti jako hlavní měřené veličiny

Měření se provádí pro frekvence od 0,05 MHz do 500 MHz a pro  $Q > 10$ . Základním zapojením pro měření je sériový rezonanční obvod viz obr. č. 57.



**Obr. č. 57:** Sériový rezonanční obvod v  $Q$  metru.

Přenosová funkce tohoto obvodu,  $V_{\text{out}} / V_{\text{in}}$ , kterou označíme  $F$  je:

$$F = \frac{R}{(r + R) + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)} \quad (8)$$

Zde je  $Q$  podíl induktivní nebo kapacitní reaktance (v rezonanci jsou stejné) a ztrátového odporu rezonančního obvodu.

Činitel jakosti  $Q$  se pro rezonanční obvod definuje:

$$\Delta f = \frac{f_0}{Q}, \quad (9)$$

kde  $f_0$  je rezonanční frekvence a  $\Delta f$  je šířka pásma pro pokles -3dB.

$$Q \text{ laděného obvodu} = \omega L / (r + R) \quad (10)$$

Pro resonanci platí:

$$f_r = (1 / 2\pi(LC))^{1/2}. \quad (11)$$

Náhradní schéma rezonančního obvodu si můžeme vyjádřit s paralelním  $R$  (par) nebo sériovým odporem  $R$  (ser.). Pro jejich vztah platí:

$$R_{(\text{par})} = R_{(\text{ser})} (Q^2 + 1). \quad (12)$$

Sériový rezonanční obvod byl mezi roky 1950 až 1980 základem velmi rozšířeného a značně univerzálního přístroje, nazývaného Q-METR. Ten umožnil měřit nejen  $Q$  cívky, ale i ostatní impedanční parametry na vysokých frekvencích. Jeho základem je sériový rezonanční obvod LC s kalibrovaným kondenzátorem o proměnné kapacitě  $CE$ , na němž se měří napětí. Při napěťové rezonanci je  $UC$  maximální. Voltmetr je kalibrován na převýšení napětí  $Q = UC/U_0$ . Při rezonanci platí Thomsonův vztah:

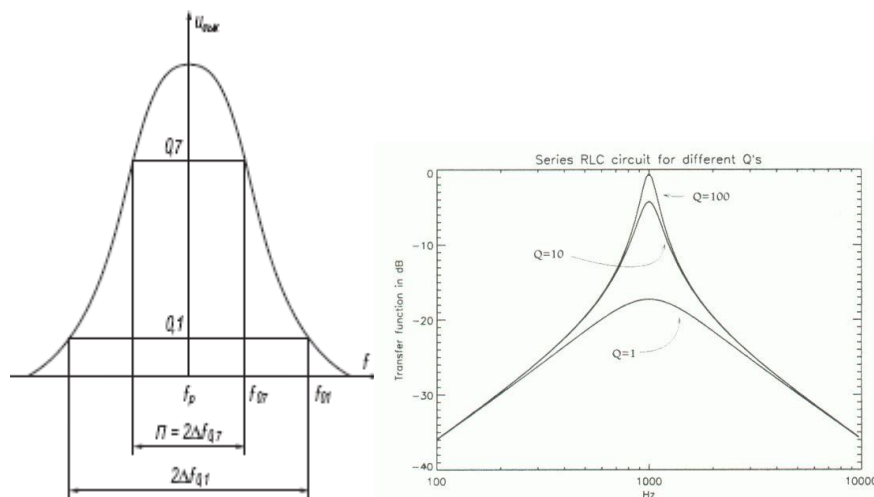
$$\omega r L X = 1 / (\omega r C);$$

Pak

$$UL = UC.$$

Poměr (převýšení) napětí na cívce nebo kondenzátoru oproti napětí zdroje  $U_0$  je

$$UL / U_0 = UC / U_0 = \omega r L X / R X = 1 / (\omega r R X C N) = Q. \quad (13)$$

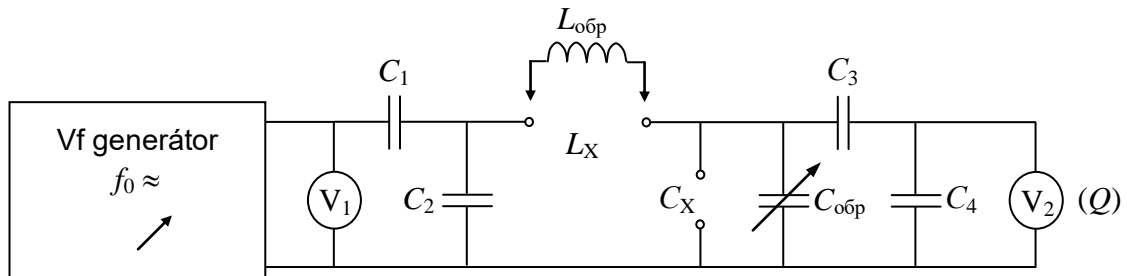


**Obr. č. 58:** Resonanční křivka a šířka pásma a rezonanční křivka a šířka pásma pro různá  $Q$ .

Q-metry nedokáží určit frekvenci resonance měřeného obvodu, při které je proud obvodem největší. S Q-metry se určuje frekvence, při které je napětí na měrném kondenzátoru obvodu největší. Pro  $Q$  nad 10 je ale rozdíl údaje pod 0,5 %, což je většinou při přesnostech měření Q-metrem zanedbatelné.

### Zapojení Q-metru

Přístroj se skládá z vf generátoru, měrného obvodu s měrným kondenzátorem a voltmetrem. Princip je na obr. č. 59. Ukazuje vazbu mezi generátorem a laděným obvodem pomocí kapacitního děliče.



**Obr. č. 59:** Vazba je velmi důležitá, protože ovlivňuje  $Q$  obvodu.

Bylo vypracováno mnoho různých vazebních obvodů, například některé Q-metry TESLA používaly dělič s úsekem koaxiálního vedení

### Měření prvek $Q$ indukčnosti na nízkých frekvencích

Pro frekvence pod cca 10 kHz mají měřený prvek charakteru indukčnosti obvykle malé  $Q$ , a proto se  $Q$  měří jen jako vedlejší, silně teplotně závislý parametr cívky. Proto se autobalanční mosty nekontrolují podle měřených prvků  $L/Q$ , ale podle měřených prvků  $R$  včetně jejich vedlejší složky  $Q$  nebo  $D$ . Pro základní kalibraci autobalančních mostů nejsou měřené prvky charakteru  $Q$  nutné.

### $Q$ u měřených prvků typu odporu

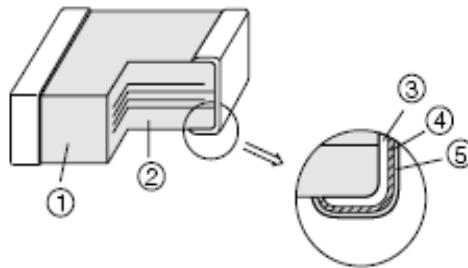
V dřívější době, kdy se používaly převážně drátové měřený prvek charakteru odporu i pro měření na střídavých proudech nízké frekvence, bylo zvykem vyjadřovat parametry odporu pro střídavý proud časovou konstantou odporu. Před asi 30 lety se situace změnila a rozšířilo se udávání  $R$  a  $Q$  na pracovní frekvenci. Tímto způsobem udávají parametry hlavní výrobci měřidel impedance, to je Agilent, QuadTech, Wayne Kerr, i další a udávala je tak i TESLA Brno.

Například všechny mosty všech typů  $QT$  se kalibrují speciální sadou měřených prvků odporu jmenovitých hodnot odporů 5  $\Omega$ , 24,9  $\Omega$ , 374  $\Omega$ , 5970  $\Omega$ , 95 300  $\Omega$ . Tato sada má jako kalibrační data udané  $R$  a  $Q$ .

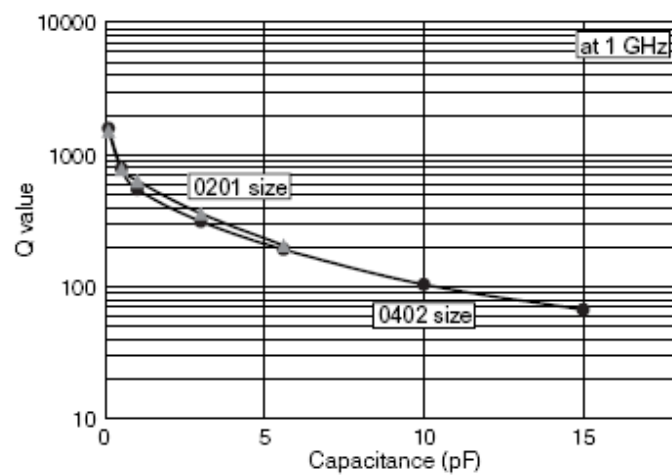
### $Q$ u měřených prvků typu kapacity

Tak jako na nízkých frekvencích je zvykem udávat u kondenzátorů  $D$ , pro mikrovlnné kondenzátory se naopak používá převrácená hodnota od  $D$ , je udáváno  $Q$ . Je to zvykem udávat pro kvalitní kondenzátory typu 1 z hmoty COG, často vícevrstvé konstrukce, tak jako ukazuje obr. č. 60. Většinou jsou tyto kondenzátory v provedení SMD, což dále

zlepšuje jejich ztrátové parametry, protože je potlačen vliv odporu a indukčnosti přívodů.



Obr. č. 60: Provedení vícevrstvého SMD kondenzátoru.



Obr. č. 61: Ukázka závislosti  $Q$  kondenzátoru na velikosti chipu a hodnotě kapacity.

NOT