



Česká metrologická společnost

Novotného lávka 5, 116 68 Praha 1

tel/fax: 221 082 254

e-mail: cms-zk@csvts.cz

www.csvts.cz/cms

Kalibrační postup

KP 4.1.2/15/15

DVOUSVORKOVÝ KAPESNÍ MĚŘIČ RLC

Praha
Říjen 2015

Vzorový kalibrační postup byl zpracován a financován ÚNMZ v rámci Plánu standardizace – Program rozvoje metrologie

Číslo úkolu: VII/1/15

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

Řešitel: Česká metrologická společnost

Zpracoval: Doc. Ing. Jiří Horský, CSc.

© ÚNMZ, ČMS

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



1 Předmět kalibrace

Kalibrační postup je určen pro dvousvorkové kapesní měřiče RLC (D, Q) pracující s harmonickým signálem pro frekvence mezi 20 Hz až 10 kHz. Je to nejčastěji kategorie multifunkčních kapesních měřicích přístrojů, obvykle s digitálním čtením. Kalibrační postup platí zároveň pro přístroje, které jsou určeny pro měření pouze některých nebo jediné z uvedených funkcí v daných rozsazích, ale ne pro panelové přístroje nebo přístroje vyvinuté pro speciální aplikace.

Postup neplatí pro měření s využitím speciálních principů, jako princip nabíjení a vybíjení nebo rezonanční.

Netýká se kalibrace transformátorových mostů ani klasických přesných čtyřramenných mostů, ale uvedené zásady a postupy mohou být použity i pro tyto typy přístrojů. Netýká se kalibrace přesných dvousvorkových mostů s adaptorem ze čtyřpárového připojení na dvousvorkové připojení s drátovými vývody nebo adaptérem pro SMD součástky.

Netýká se kalibrace impedančních funkcí digitálních multimetrů ani ostatních měřičů, které neměří při harmonickém napájecím signálu.

Tento kalibrační postup je určen pro stanovení minimálního postačujícího rozsahu kalibrace autobalančních dvousvorkových měřičů RLCG zejména na základních frekvencích 120 Hz a na frekvenci 1 kHz (10 kHz).

Uvedená metoda kalibrace vychází z funkčních bloků autobalančních mostů, kde se jako postačující kalibruje ve všech rozsazích zvolenou impedancí (AC R) a na nejméně jednom rozsahu impedancí jiného typu (C). Přitom se předpokládá na základě funkční analýzy přístroje, že když jsme prověřili fázový posuv nejméně jedním etalonem, že kalibrace vyhoví na základě digitálně prováděného fázového posuvu u autobalančních mostů i pro ostatní hodnoty C a L.

2 Související normy a metrologické předpisy

- Impedance Measurement Handbook*, A guide to measurement technology and techniques, 4th Edition Agilent technology (Keysight) [1]
- Guidelines on the Calibration of Digital Multimeters* EURAMET cg- 15 Version 3.0 (02/2015) [2]
- HORSKY J. HORSKY P. *Calibration of Multifunction and Multirange Instruments by Method of Functional Blocks*, Cal Lab, International Journal of metrology, USA, 3-4/1997 [3]
- Henderson, L C A, Williams J *A guide to measuring resistance and impedance below 1 MHz*, publikace NPL, UK [4]
- LCR Measurement Primer*, 1st Edition, April 2012, IET Labs Inc. [5]

3 Kvalifikace pracovníků provádějící kalibraci

Kvalifikace pracovníků provádějících kalibraci je dána příslušným předpisem organizace. Tito pracovníci se seznámí s kalibračním postupem upraveným na konkrétní podmínky kalibrační laboratoře nebo obdobného pracoviště provádějícího kontroly měřidel a se souvisejícími předpisy.

Doporučuje se potvrzení odborné způsobilosti těchto pracovníků prokázat vhodným způsobem, například dokladovaným proškolením, osvědčením o odborné způsobilosti, osobním certifikátem apod.

Kvalifikace se musí dlouhodobě plánovitě udržovat a obnovovat. Vhodné je k tomu například i samostudium zařazené do plánu vzdělávání periodicky za vhodné období.

Pokud pracoviště kalibraci podle metodiky dlouhou neprovádí, doporučuje se zařadit cvičné provedení kalibrace k udržení kvalifikace (například po půl roce).

Osvědčená je i metoda, kdy pracovník provádí nejprve několikrát kalibraci se školitelem, například technickým vedoucím laboratoře (signátorem), další pod dohledem a po absolvování a vyhodnocení takovéto skupiny kalibrací je teprve pověřen pracovat samostatně.

4 Názvosloví, definice

Obecné názvosloví je uvedeno v TNI 010115, Slovník JCGM 200:2008 International vocabulary of Metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM) a International Vocabulary of Terms in Legal Metrology Vydaného v roce 2000: OIML a je dosažitelné v *TERMINOLOGIE Z OBLASTI METROLOGIE* (2. vydání) dostupné na <http://www.unmz.cz/urad/sborniky> - aktuální názvosloví elektro je uvedeno v slovníku IEV (IEC 60050 - International Electrotechnical Vocabulary).

Pojmy pro způsoby připojení měřené impedance k měřiči jsou:

- **dvousvorkové připojení:** měřený prvek je připojen pouze svými dvěma svorkami. Pokud má i stínění, je stínění připojeno k jedné ze svorek, zpravidla k té, která je připojena k měřicímu signálu.
- **trojsvorkové připojení:** měřený prvek je umístěn ve stínícím krytu, který je připojen na třetí svorku, která se připojuje ke stínění měřících kabelů měřiče.

- **čtyřsvorkové připojení:** k měřenému prvku jsou připojeny dva proudové a dva napěťové přívody.
- **pětisvorkové připojení:** obdobně jako u čtyřsvorkového připojení, měřený prvek je ale navíc opatřen stíněním vyvedeným na pátou svorku.
- **čtyřpárové připojení (4TP):** měřený prvek je umístěn ve stínícím krytu a vyveden čtyřsvorkově na čtyři koaxiální konektory, přes které se připojí čtyřmi stíněnými kabely ke konektorům mostu. Vnější vodiče koaxiálních přívodů musí být i na straně měřené impedance spojeny.
- **Short** (obvykle se nepřekládá), je to pojem pro zkrat na vstupních svorkách kalibrovaného měřiče.
- **Open** (obvykle se nepřekládá), je to pojem pro rozpojení vstupních svorek kalibrovaného měřiče.

5 Prostředky potřebné pro kalibraci

Pro kalibraci jsou potřebná následující zařízení:

1. Multimetr s rozsahy AC U a AC I.
2. Čítač nebo multimetr s funkcí měření frekvence.
3. Přípravek „Short“.
4. Osciloskop (není nezbytný).
5. Etalony impedancí podle varianty A, B nebo C tohoto postupu, podle možností a vybavení laboratoře.

Poznámka:

Většina metrologických pracovišť nemá k dispozici impedanční kalibrátor, ale mají často univerzální kalibrátor s funkcí simulace odporu a funkcí simulace kapacity. Pokud jsou nastavitelné hodnoty pro tyto funkce kalibrovány pro frekvence a náhradní zapojení shodné s potřebnými pro kalibraci, je možné je využít, (varianta A).

Pro laboratoře vybavené impedančním kalibrátorem, například Meatest M 550, kde hodnoty pro tyto funkce jsou kalibrovány pro dvousvorkové připojení a frekvence a náhradní zapojení shodné s potřebným pro kalibraci, je to varianta B.

Pro laboratoře, které nemají vybavení podle varianty A nebo B je určena varianta C, kdy je jako etalony použita sada speciálních etalonů impedance podle popisu dále.

Všechny tři varianty je možné kombinovat k dosažení potřebného rozsahu impedancí pro kalibraci.

Varianta C je doporučena varianta.

5.1 Kalibrace etalonů

Etalony a všechna použitá měřidla a pomocná měřicí zařízení musí být navázány na etalony vhodného rozsahu a přesnosti a musí mít platnou kalibraci.

Kalibrace musí být provedena pro:

- Dvousvorkové připojení,
- frekvenci potřebnou při kalibraci,
- náhradní zapojení, jako bude při kalibraci (sériové nebo paralelní).

Je nutné použít správnou volbu typu připojení a náhradního zapojení (sériové nebo paralelní, závisí na velikosti měřené impedance) se nesmí opomenout. Volba náhradního zapojení se uplatní tím více, čím je etalon více vzdálený od ideálního R, C nebo L.

Součástky ze sady podle varianty C měříme před použitím na DMM (R) nebo přesným

kalibrovaném RLC mostu (AC R, C, D), pokud je k dispozici. Pro měření se užívá korekce Short s přípravkem a korekce Open, pokud je k dispozici a je výrobcem kalibrovaného měřiče požadována.

Pro etalony impedance akreditovaně kalibrované se použije hodnota z jejich kalibračního listu pro frekvenci a náhradní zapojení, které je třeba k měření, odporové prvky se mohou dále měřit a sledovat podle DC hodnoty na nejméně 6,5 dig DMM před vlastní kalibrací zákaznického přístroje.

6 Obecné podmínky kalibrace

Teplota prostředí v laboratoři po dobu kalibrace (23 ± 2)°C.

Relativní vlhkost vzduchu v laboratoři v rozmezí 45 až 75 %.

Při měření indukčnosti nesmí být v laboratoři zdroje rušivého magnetického pole a v 30 cm blízkosti etalonů indukčnosti s otevřeným polem nesmí být kovové předměty (mimo měřený přístroj). Přítomnost rušivého pole odhalíme nejsnáze změnou orientace (polohy) měřeného etalonu.

V těchto podmínkách je přístroj stabilizován po dobu minimálně 0,5 hodiny před započítáním samotné kalibrace.

7 Rozsah kalibrace

7.1 Specifika kalibrace mostů s dvousvorkovým připojením.

Skupina kapesních měřičů RLC se vyznačuje tím, že má jen dvousvorkové kontaktní pole, případně i dvě připojovací svorky s krátkými nestíněnými vodiči v příslušenství.

Pro kalibraci se proto nehodí běžné etalony impedancí a není ani možné vždy přímo využít kalibrační data etalonů impedancí, obvykle kalibrovaných v čtyřpárovém zapojení.

Mosty můžeme výhodně a přesněji kalibrovat doporučenou sadou dvousvorkových součástek, jak popisuje varianta C.

Sada součástek příslušných nominálních hodnot s dvousvorkovými (drátovými) vývody se volí s hodnotami podle rozsahů mostu. Převážná většina dvousvorkových kapesních měřičů má rozsahy v násobcích 2. Optimální je použít sadu odporů s kovovou vrstvou a malou teplotní závislostí a nejméně jeden keramický kondenzátor z hmoty NPO 1 nF nebo 10 nF, podrobněji viz článek 17.

7.2 Rozsah kalibrace pro oblast impedancí

Základní kalibraci provedeme nejméně jedním druhem impedance, doporučeno je AC R.

Kalibrujeme:

Impedanci pro počátek a konec stupnice na každém rozsahu měření

Na jednom rozsahu měření (středním) i linearitu.

Na nejméně jednom rozsahu impedanci jiného charakteru (pokud kalibrujeme pomocí R, je doporučeno C).

Doporučení ukazuje tabulka č. 1.

Tabulka č. 1: Doporučené kalibrační body

Rozsah měřiče RLC impedance	Kalibrované body / Ω /		
	Začátek rozsahu	Střed rozsahu	Plný rozsah
Nejnižší	Zkrat,		90 %
Všechny ostatní	10 %		90 %
Jeden (střední)	10 %	50 %	90 %
Nejvyšší	10 %		90 %
Vybraný		50 % - 90 % i vedlejší složka	

Poznámka: pro volbu kalibračních bodů platí podobné zásady jako v bodě 3.4.2.4 dokumentu Calibration Guide EURAMET cg-15 Version 3.0 (02/2015) GUIDELINES ON THE CALIBRATION OF DIGITAL MULTIMETERS.

% jsou udána z plného rozsahu stupnice.

10% indikuje počátek stupnice hodnot, (měření hodnot mezi nulou a 10 % z plného rozsahu se nedoporučuje mimo spodní rozsah), protože se měří s větší přesností v dalším dolním rozsahu. 90 % označuje hodnotu blízkou k plnému rozsahu. Skutečná hodnota se může měnit od 50 % až 99 % celé stupnice pro všechny funkce mimo C a D.

8 Kontrola dodávky a příprava ke kalibraci

Příprava přístroje ke kalibraci

Při přebírání přístroje ke kalibraci je třeba zjistit, zda typ, výrobní číslo a příslušenství dodaného přístroje odpovídá údajům uvedeným v objednávce, nebo dodacím listu.

Před započítím kalibrace se musí vykonat tyto úkony:

Vnější prohlídka

Zkontrolovat vzhled přístroje, stav připojovacích vodičů a konektorů, mechanickou funkci ovládacích prvků.

Zkontrolovat mechanickou nepoškozenost a správnou pružnost připojovacích konektorů a jejich čistotu, v případě potřeby vyčistit.

Zkontrolovat správnou činnost displeje včetně údaje desetinné čárky.

Zkouška provozuschopnosti

Funkční zkouška se provede podle postupu v dokumentaci výrobce. Pokud tento postup v dokumentaci není obsažen nebo dokumentace chybí, provede se zkouška funkce následovně:

Zkontrolovat stav interní baterie (pokud je v přístroji obsažena) měřením na rozsahu s největším odběrem (nejnižší rozsah, obvykle odporu, zkusíme baterii pro zkratované měřicí svorky, nesmí se na displeji ukázat symbol nedostatečné kapacity baterie).

Nemá-li zdroj napětí v mezích stanovených výrobcem, nelze dále měřit.

Není-li přístroj vybaven funkcí AUTOTEST, zkontrolovat elektrickou funkci ovládacích prvků, spolehlivost přepínačů, spolehlivost a nestabilitu analogových nastavení (označené obvykle zero), pokud je jimi přístroj vybaven. Dále zkontrolovat, zda se zobrazují všechny segmenty či prvky displeje nebo obrazovky a zda se správně přepíná desetinná čárka u přístrojů s ručním přepínáním rozsahů.

Čištění a předběžná kontrola

Před vlastní přípravou kalibrace se kontroluje čistota měřidla, čistota a pružnost svorek a všech funkčních částí přístroje.

Příprava měřidla

Provést přípravné úkony v souladu s postupem v dokumentaci kalibrovaného přístroje Zapnout DMM a čítač a ponechat ustálit minimálně 30 minut.

Sada etalonů impedance musí být v prostředí, kde bude provedena kalibrace také nejméně 30 minut.

Zapnout kalibrované měřidlo a nechat ustálit po dobu uvedenou v dokumentaci výrobce. Pokud tato doba není známa, ponechat minimálně 5 minut.

Open a short

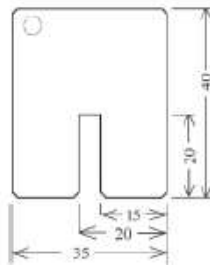
Určení referenční roviny se upřesní se zákazníkem při převzetí přístroje ke kalibraci. Obvyklá je kalibrace s referenční rovinou na páskových svorkách přístroje. Pokud se použijí krátké přívody z příslušenství kalibrovaného měřiče, poznačí se tato skutečnost do kalibračního listu.

Nastavení short určuje nejnižší hodnotu, od které se měří. Mohou nastat následující případy:

1. nastavujeme short na rozsahu, na kterém se měří,
2. nastavení platí pro několik rozsahů,
3. nastavení není možné, se zbytkovou hodnotou musíme počítat při vyhodnocení.
4. Při správném nastavení není zbytková hodnota 0. Například u přístroje MIC 4070d je na rozsahu 2M a 20M hodnota na displeji při zkratu svorek mezi 12 až 14 (naměřenou hodnotu zapíšeme do záznamu).

Nastavení SHORT a OPEN: nastavit měřicí signál na hodnotu podle pokynů výrobce. Pokud výrobce specifikuje na některém rozsahu pro short jinou hodnotu než 0, zaznamenáme zaměřenou hodnotu, která by měla ležet v rozmezí, specifikovaném výrobcem.

Pro korekci **Short** používáme čistý měděný (pocínovaný) drát o průměru asi 0,5 mm nebo speciální přípravek podle obrázku. Je shodný rozměrově s doporučeným přípravkem Keysight P/N 16047-00640. Materiál měď nebo mosaz, povrch niklovaný nebo zlacený. Parazitní impedance přípravku je pod 1 mΩ a 20 nH. Pokud má kalibrovaný přístroj jinou rozteč mezi kleštinami, použijeme přípravek vhodně rozměrově upravený.



Přípravek pro Short

Open nevyžaduje speciální přípravek. Open bez kablíků obvykle není nastavitelný a je mimo rozsah měření přístroje, cca pod 0,1 pF. Pokud se použijí kablíky z příslušenství přístroje, záleží na jejich vzájemné poloze a kontrolujeme zbytkovou kapacitu přímo na kalibrovaném přístroji, zda nezvyšují paralelní kapacitu. Pokud ano, započítáme ji a po dobu měření polohu kablíků neměníme.

9 Postup kalibrace

9.1 Kontrola generátoru RLC měřiče

Kontrolujeme specifikované napětí, proud a frekvenci. Proud kontrolujeme na nejnižším rozsahu, zatíženým jen ampérmetrem. Je to současně i test stavu baterie. Dále je účelné orientačně kontrolovat osciloskopem nelineární zkreslení měřicího signálu alespoň pro jednu hodnotu napětí při měření velké impedance a jednu hodnotu proudu při měření malé impedance. Zkreslení obvykle není ve specifikaci kalibrovaných přístrojů uvedeno, proto naměřenou hodnotu porovnáváme s hodnotou podle prokazatelně vyhovujícího přístroje, pokud je k dispozici. Obvykle je hodnota do 3% (na osciloskopu začíná být přímo viditelné zkreslení) vyhovující. Podstatně zvýšené zkreslení má za následek obtížně odhalitelné vlivy na přesnost měření a doporučuje se v takovém případě dále měření neprovádět.

9.2 Kontrola hlavních složek měřené impedance

Měřený prvek je zapojen přímo do kleštinových svorek kalibrovaného přístroje. Nastavení kalibrovaného přístroje: funkce měření R, měřicí signál, náhradní zapojení a frekvence podle rozsahu mostu.

9.3 Volba frekvencí

Měření se provede na hodnotách frekvence uvedených v dokumentaci výrobce, obvykle to bývá 120 Hz a 1 kHz (10 kHz).

Tabulka č. 2: Volba kalibračních bodů pro měřič s koncovými body rozsahu v násobku 2 (obecně), viz také článek 17.

Rozsah měřiče RLC Ω	Kalibrované body Ω		
	Začátek rozsahu	Střed rozsahu	Plný rozsah
2	Zkrat,		90 %
20	10 %		90 %
200	10 %	50 %	90 %
2k	10 %		90 %
20k	10 %		90 %
200k	10 %		90 %
2M	10 %		90 %
20M	10 %	50 %	open
1 nF		50 %*	

* měří se C i D

9.4 Odpor

Varianta kalibrace A, B, C.

Na každém rozsahu kontrolujeme etalonem minimálně hodnotu pro začátek a druhou pro plnou hodnotu (cca 10 % až 90 % z rozsahu) a nejméně jeden rozsah i na linearitu. Linearitu kontrolujeme na rozsahu do 200 Ω (2k Ω) etalony (cca 10 %, 50 % a 90 % z rozsahu).

Kalibrované body volíme podle tabulky. V tabulce jsou uvedeny obvyklé rozsahy

s násobky 2, ale stejně je možné její použití pro přístroje s jinými rozsahy (pro přístroje s jinými koncovými body rozsahů, například násobky 3, 4, 6 upravíme vynásobením hodnot z tabulky). Při použití odporové dekády je potřebné postupovat opatrně pro velké hodnoty impedance. Na horních okrajových rozsazích velké impedance může být výhodnější nepoužívat etalon odporu, ale kalibrovat horní rozsahy na funkci měření kapacity etalonem kapacity.

9.5 Kapacita

Varianta kalibrace A, B

Kontrolujeme etalonem kapacity nebo ze simulované dekády z kalibrátoru nejméně jednu hodnotu na každém rozsahu. Hodnotu etalonu volíme mezi 50 % až 90 % z rozsahu. Pokud měřič měří na více frekvencích, provedeme kontrolu na všech frekvencích.

Varianta kalibrace C

Kontrolujeme etalonem 1 nF ze sady etalonů impedance podle článku 17.

Pokud je k dispozici více etalonů kapacity, mohou se použít k doplnění kalibrace, není ale nezbytné. Připojujeme je dvousvorkově, to znamená, že u tří a vícesvorkového připojení je stínění připojeno na jeden z přívodů. U etalonů kapacity s hodnotou 10 nF a nižší, se nesmí zapomenout použít hodnotu etalonu pro dvousvorkové připojení, viz poznámka v příloze.

9.6 Indukčnost

Varianta kalibrace A, B, C

Obvykle se u kapesních RLC měřičů samostatně nekontroluje.

Pokud jsou k dispozici vhodné etalony, je možné kalibraci pro kontrolu provést.

Toroidní etalony připojíme přímo (měřič je při tom podložen vhodnou nevodivou krabicí, aby přívody dosáhly na etalon a nemusely být silně ohýbány).

Pokud kalibrujeme indukčnost etalony s otevřeným polem, použijeme k jejich připojení zkroucené dráty délky nejvýše asi do 30 cm.

9.7 Kalibrace pro vedlejší složky měřené impedance.

Z vedlejších složek je nejdůležitější ztrátový činitel kapacity D. Kontrola je doporučena. Je náročnější, protože etalony pro specifikaci vedlejší složky (D, Q, R_s, R_p) jsou obvykle hůře dostupné. Pokud je u etalonu pro hlavní složku specifikována i vedlejší složka využíváme ji i při kalibraci. V tomto postupu se kalibruje pole D pro etalon C 1 nF nebo podle údajů pro vedlejší složku etalonů R podle kalibrace v ČMI nebo AKL.

Kontrolujeme s pomocí kondenzátoru 1 nF ze sady impedancí podle článku 17, který má malé D (pod 0,0001), to je na hranici měřitelnosti kapesních RLC mostů).

Obecně se dá říci, že pro kondenzátory s plynným dielektrikem je D pod hranicí měřitelnosti kapesních autobalančních mostů, rovná se tedy přibližně nule. U kondenzátorů s pevným dielektrikem je nejmenší pro styroflexové dielektrikum, řádu 10^{-4} a to je na hranici měřitelnosti kapesních autobalančních mostů. Proto můžeme kondenzátory s plynným nebo styroflexovým dielektrikem používat pro neakreditovanou kontrolu nuly pro ztrátový činitel kapacity. (Pozor, z principu autobalančních mostů vyplývá, že most může pro nízkoztrátové kondenzátory ukazovat i zápornou hodnotu ztrát). Kondenzátory s polystyrenovým (styroflexovým) dielektrikem mají malé ztráty, ale lze používat jen typy se spolehlivě přivařenými přívody a používaný kondenzátor musí být kalibrován i pro vedlejší složku impedance, protože typy kondenzátorů s vkládanými nebo nedokonale přivařenými přívody časem podstatně zhoršují své ztráty).

9.8 Kalibrace v omezeném rozsahu

Na základě požadavku zákazníka je možné provést kalibraci pouze některých funkcí a rozsahů přístroje na specifikovaných frekvencích. V tom případě se provede kontrola generátoru měřicího signálu a poté kalibrace v požadovaných rozsazích podle postupu v příslušném odstavci. Vždy se provede kontrola linearity alespoň na jednom rozsahu a kontrola charakteristiky fázového detektoru etalonem jiného typu impedance (R-C, C-R).

10 Vyhodnocení kalibrace

Při měření se zaznamenávají:

- Teplota a její tolerance v době a místě měření.
- Výsledky měření.
- Referenční rovina a její umístění (kablíky nebo páskové interní svorky na součástky, provedení korekce open a short).
- Úroveň měřicího signálu a provedení korekcí open a short (naprázdno a nakrátko).
- Naměřené hodnoty pro generátor signálu.
- Naměřené hodnoty při měření impedancí.
- Náhradní zapojení etalonů a frekvenci při měření.

10.1 Varianta kalibrace s kalibrátorem impedance

Varianta kalibrace B.

Kalibrátor impedance Meatest M 550 pro dvousvorkové připojení obsahuje.

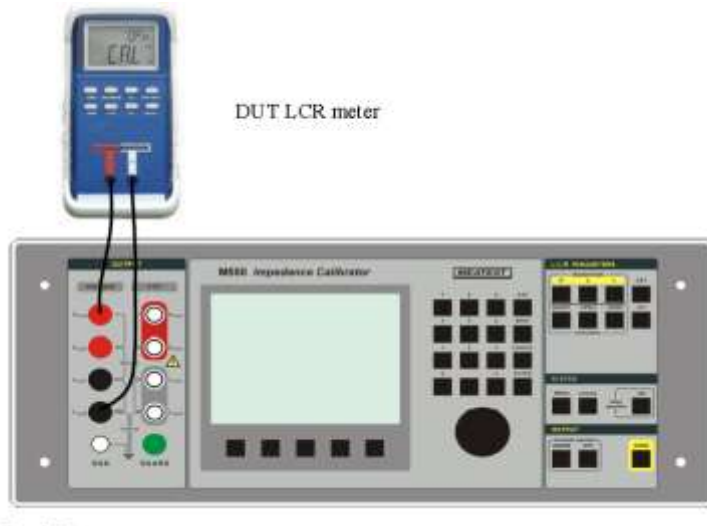
Odpor- 8 etalonů odporu dekadických hodnot od 1 Ω to 10 M Ω

Kapacita- 7 etalonů kapacity dekadických hodnot od 100 pF to 100 μ F



Obr. č. 2: Kalibrátor impedance Meatest M 550

Kalibrátor umožňuje různé druhy připojení měřené impedance, i dvousvorkové připojení impedance z kalibrátoru ke kalibrovanému přístroji. Tento způsob připojení impedančního kalibrátoru k testovanému LCR měřidlu je nejjednodušší, metoda však závisí na mnoha faktorech, které vyplývají z horší přesnosti ve srovnání s čtyřsvorkovými nebo čtyřpárovými metodami připojení. Nevyužije se v tomto případě všech možností kalibrátoru. K výsledku měření jsou přidány chyby sériového odporu a indukčnosti zkušebních vodičů a paralelní kapacita a vodivosti mezi přívodními vodiči. Kalibrovaný přístroj je připojen k svorkám HCUR a LCUR. M550 kalibrační údaje nenabízí v tomto režimu korekce pro zbytkové parametry. Vhodné je použití kalibrátoru zapojeného dvousvorkově pouze do 1 kHz. Ke kalibrátoru připojíme kalibrovaný měřič dle obrázku č. 3.



Obr. č. 3: Připojení RLC měřiče ke kalibrátoru M 550

Varianta kalibrace C

Kalibrace se sadou impedancí z vhodně volených součástek

Poznámka:

navrženy jsou odpory s metalizovanou odporovou vrstvou, u odporů s kovovou folií se nevyužijí plně jejich vlastnosti.

Příklad řešení sady impedancí pro kalibraci mostů s koncovými body rozsahů v násobcích 2

Tabulka č. 3: Doporučené hodnoty pro měřiče se stupnicí do 1,999

Rozsah Ω	Kalibrované body		
	Začátek rozsahu	Střed rozsahu	Plný rozsah
2	Zkrat,		1,8 Ω
20	1,8 Ω		18 Ω
200	18 Ω		180 Ω
2k	180 Ω ,	1k Ω	1k8 Ω
20k	1k8 Ω		18k Ω
200k	18k Ω		180k Ω
2M	180k Ω		1M8 Ω
20M	1M8 Ω		10M Ω
1 nF		1 nF	

Požadované vlastnosti prvků použitých jako etalony:

vysoká kvalita,

- nízký šum,
- nízký teplotní koeficient,
- vysoká dlouhodobá stabilita parametrů,
- standardní tolerance $\pm 1\%$.

Levná sada

doporučených prvků pro kalibraci dvousvorkových měřičů s teplotním koeficientem pod

50 ppm/°C, například odpory s metalizovanou odporovou vrstvou MF0 série Yageo corporation, dodavatel GME, výkon 0.6W, tolerance $\pm 1\%$, T. C. R. $\pm 50\text{ppm}/^\circ\text{C}$, viz specifikace v tab. 4.

Tabulka č. 4: Vlastnosti odporů MF0 série Yageo corporation

Specifikace						
Typ	Max. ztrátový výkon @70°C	Tolerance	Teplotní stabilita		Maximální pracovní napětí	Maximální špičkové napětí
			Hodnota	TK [ppm°C ⁻¹]		
MF-50S	0,6W	$\pm 1\%$	< 5,11Ω	± 100	350V	700V
			5,11Ω ... 2,4MΩ	± 50		
			> 2,4MΩ	± 100		

Doporučený kondenzátor HITANO, dodavatel GME CK 1n/63V NPO, 5%.

Vysoce stabilní sada

doporučených prvků pro kalibraci dvousvorkových měřičů odpory s kovovou vrstvou typ HOLCO Series, dodavatel Farnell, výkon 0,6W, tolerance $\pm 1\%$, T. C. R. $\pm 50\text{ppm}/^\circ\text{C}$.

Doporučený kondenzátor HITANO, dodavatel GME CK 1n/63V NPO, 5%.

Sada kondenzátorů

Pokud se použije ke kalibraci sada diskretních kondenzátorů, je doporučeno kondenzátory do 10 nF včetně volit keramické z hmoty COG (NPO), hodnoty od 100 nF až do 10μF z metalizované folie typu MKP. U foliových je třeba respektovat jejich teplotní závislost.

11 Kalibrační list

Výsledky měření by měly být uváděny v souladu s normou ČSN EN ISO 17025 a jejího článku 5.10 – Uvádění výsledků. Jednou z forem je kalibrační list.

11.1 Náležitosti kalibračního listu

Kalibrační list by měl obsahovat tyto údaje:

- název a adresu kalibrační laboratoře,
- pořadové číslo kalibračního listu, očíslování jednotlivých stran, celkový počet stran,
- jméno a adresu zadavatele, popř. zákazníka,
- název, typ, výrobce a identifikační číslo kalibrovaného měřidla,
- datum přijetí měřidla ke kalibraci (nepovinné), datum provedení kalibrace a datum vystavení kalibračního listu,
- určení specifikace uplatněné při kalibraci nebo označení kalibračního postupu (v tomto případě KP 4.1.2/15/15),
- podmínky, za nichž byla kalibrace provedena (hodnoty ovlivňujících veličin apod.),
- měřidla použitá při kalibraci,
- obecné vyjádření o návaznosti výsledků měření (etalony použité při kalibraci),
- výsledky měření a s nimi spjatou rozšířenou nejistotu měření a/nebo prohlášení o shodě s určitou metrologickou specifikací,
- jméno pracovníka, který měřidlo kalibroval, jméno a podpis odpovědného (vedoucího) pracovníka, razítko kalibrační laboratoře.

Akreditovaná kalibrační laboratoř navíc uvede přidělenou kalibrační značku, číslo laboratoře a odkaz na osvědčení o akreditaci. Součástí kalibračního listu je též prohlášení, že uvedené výsledky se týkají pouze kalibrovaného předmětu a kalibrační list nesmí být bez předběžného písemného souhlasu kalibrační laboratoře publikován jinak než celý.

Pokud provádí kalibrační, resp. jiná metrologická laboratoř kalibraci pro vlastní organizaci, může být kalibrační list zjednodušen, případně vůbec nevystavován (výsledky kalibrace mohou být uvedeny např. v kalibrační kartě měřidla nebo na vhodném nosiči, popř. v elektronické paměti). V tomto případě musí kalibrační laboratoř zpracovat záznam o měření (s uvedenými měřenými hodnotami) a archivovat jej.

11.2 Protokoly

Originál kalibračního listu se předá zadavateli kalibrace. Kopii kalibračního listu si ponechá kalibrační laboratoř a archivuje ji po dobu nejméně pěti let nebo po dobu stanovenou zadavatelem zároveň se záznamem o kalibraci. Doporučuje se archivovat záznamy a kalibrační listy chronologicky. Výsledky kalibrace se mohou v souladu s případnými podnikovými metrologickými dokumenty zanášet do kalibrační karty měřidla nebo ukládat do vhodné elektronické paměti.

11.3 Umístění kalibrační značky

Po provedení kalibrace může kalibrační laboratoř označit kalibrované měřidlo kalibrační značkou, popřípadě kalibračním štítkem, nejčastěji s uvedením čísla kalibračního listu, datem provedení kalibrace, případně s logem laboratoře. Pokud to není výslovně uvedeno v některém interním podnikovém metrologickém předpisu pro interní kalibrace nebo ve smlouvě se zákazníkem, nesmí kalibrační laboratoř uvádět na svém kalibračním štítku datum příští kalibrace, protože stanovení kalibrační lhůty měřidla je právem a povinností uživatele.

12 Péče o kalibrační postup

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

Změny, popř. revize kalibračního postupu provádí jeho zpracovatel. Změny schvaluje vedoucí zpracovatele (vedoucí kalibrační laboratoře, technický vedoucí, signátor nebo metrolog organizace, podle zavedeného systému v konkrétní organizaci).

Doporučuje se plánovitě provádět periodické revize kalibračních postupů. Při revizi hodnotíme nejen aktuálnost provedení postupu, ale i historii kalibrací použitých etalonů a přiměřenost stanoveného CMC. Pro neakreditované laboratoře je přiměřená lhůta mezi revizemi obvykle 5 let, pro akreditované laboratoře je výhodné využít k revizi plánované termíny reakreditace.

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

Kalibrační postup		Převzal		
Výtisk číslo	Obdrží útvar	Jméno	Podpis	Datum

13.2 Úprava a schválení

Kalibrační postup	Jméno	Podpis	Datum
Upravil			
Úpravu schválil			

13.3 Revize

Strana	Popis změny	Zpracoval	Schválil	Datum

14 Stanovení nejistoty měření (příklad výpočtu)**Kalibrace kapesního digitálního RLC měřiče, (například MIC 4070) pro hodnotu kapacity 10 nF na frekvenci 1 kHz.**

V rámci kalibrace kapacitních rozsahů je kalibrován kapesní digitální RLC měřič MIC 4070 pro hodnotu kapacity 10 nF na frekvenci 1 kHz, přičemž je použit jako pracovní etalon kondenzátor s drátovými přívody z hmoty NPO. Je použit následující měřicí postup:

- (1) RLC měřič se zapne a zkontroluje (dostaví) se nula s kablíky ve stejné poloze, jak budou použity pro připojení etalonu C.
- (2) RLC měřič je dvousvorkový a není proto možné k němu připojit přímo etalony kapacity s kondenzátory kalibrované v třísvorkovém zapojení. Etalon C musíme připojit dvousvorkově a podle tohoto připojení i upravit hodnotu etalonu z kalibračního listu.
- (3) Výstupní svorky digitálního RLC měřiče se propojí se svorkami etalonu C pomocí krátkých propojovacích vodičů (drátů) z příslušenství mostu přes vhodné přechody na BNC konektory mostu. Stínění kondenzátoru se spojí s jednou živou svorkou kondenzátoru, obvykle na zdrojové straně při připojení na most. Tím se zkratuje jedna z parazitních kapacit proti zemi, ve zvoleném zapojení kapacita C_{13} .
- (4) RLC měřič se nastaví na frekvenci 1 kHz a rozsah 10 nF a po vhodném stabilizačním období se odečte hodnota udávaná na displeji MIC 4070. Přístroj měří kapacitu pro paralelní náhradní zapojení.
- (5) Odchylka údaje se vypočte z údaje RLC měřiče a z hodnoty etalonového kondenzátoru pro dvousvorkové připojení (je větší než třísvorková kapacita o kapacitu C_{12}).

Odchylka údaje ΔC_X na RLC měřiči, který je kalibrován, se získá ze vztahu

$$\Delta C_X = C_{iX} - C_E + \delta C_{iX} - \delta C_E$$

kde je

C_{iX} – kapacita, kterou ukazuje RLC měřič (index „i“ znamená indikaci),

C_E – kapacita etalonu, v našem případě pro dvousvorkové připojení,

δC_{iX} – korekce indikované kapacity v důsledku konečné rozlišitelnosti měřiče

δC_E – korekce kapacity etalonu v důsledku

- driftu od poslední kalibrace,
- odchyly vlivem okolní teploty,
- změny kapacity pro dvousvorkové zapojení

Kalibrační list poslední kalibrace použitého etalonu kapacity uvádí, že hodnota kapacity je $C_{P3sv} = 9\,980,0$ pF s rozšířenou nejistotou 0,2 pF (zdroj nejistoty z_1). Měření bylo provedeno pro třísvorkově paralelní náhradní zapojení při teplotě $(23,00 \pm 0,05)$ °C.

Ad a) podle historie etalonu je drift od poslední kalibrace menší než $\pm 0,1$ pF (zdroj nejistoty z_2).

Ad b) Při použití etalonu pro kalibraci RLC měřiče MIC 4070 byla teplota etalonu $(23,5 \pm 0,5)$ °C.

Pro teplotu etalonu $(23,5 \pm 0,5)$ °C je změna kapacity dána změnou teploty 0,5 °C a nejistota se zvýší vlivem méně přesné znalosti teploty při použití etalonu $\pm 0,5$ °C.

Při známé teplotní závislosti kapacity etalonu $20\mu\text{F}/\text{F}$ tedy bude změna kapacity ΔC_T

$$\Delta C_T = 9980 \cdot (0,5 \pm 0,5) \cdot 0,000\,02 = (0,1 \pm 0,1) \text{ pF} \quad (\text{zdroj nejistoty } z_3).$$

Ad c) kapacita C_{23} etalonu byla stanovena měřením na $(40,0 \pm 0,1)$ pF (zdroj nejistoty z_4).

Tato kapacita se při dvousvorkovém zapojení připočte k třísvorkové kapacitě etalonu podle kalibračního listu.

Kapacita etalonu při použití a dvojsvorkovém zapojení C_{P2sv} je tedy

$C_{P2sv} = (\text{kapacita podle kalibrace etalonu}) + (\text{vliv teploty}) + (\text{vliv přechodu na dvojsvorkové zapojení}) + (\text{vliv driftu od poslední kalibrace}).$

Rozšířená nejistota

$$U_{C_{P2sv}} = 2x \sqrt{u^2(z_1) + u^2(z_2) + u^2(z_3) + u^2(z_4)}$$

$$U_{C_{P2sv}} = 2x \sqrt{0,1^2 + (0,1/\sqrt{3})^2 + (0,1/\sqrt{3})^2 + (0,1/\sqrt{3})^2} = 0,33 \text{ pF}$$

Z uvedeného příkladu je zřejmé, že při odhadu kapacity a nejistoty kapacity u etalonu kapacity menších hodnot kapacity do cca 10 000 pF kalibrovaného v třísvorkovém zapojení je podstatné neopominout vliv kapacity C_{12} .

C_E pracovní etalon (C_{P2sv})

Etalon kapacity byl kalibrován s rozšířenou nejistotou 0,2 pF.

Hodnota etalonu kapacity je pro dvousvorkové zapojení 10 020,1 pF.

C_{iX} Hodnoty odečtené z RLC měřiče

RLC měřič ukazuje kapacitu 10,01 nF při hodnotě etalonu 10,020 nF. Rozptyl indikovaných hodnot na displeji kalibrovaného měřiče není pozorovatelný, neboť RLC měřič má omezenou rozlišitelnost. Předpokládá se, že údaj odečtený z RLC měřiče je stálý.

δC_{iX} Rozlišitelnost údaje RLC měřiče, který má být kalibrován

Poslední významná číslice na displeji RLC měřiče odpovídá 0,01 nF. Každá hodnota odečtená z RLC měřiče má korekci v důsledku konečné rozlišitelnosti displeje.

Rozlišitelnost displeje je odhadnuta na 0,00 nF s mezemi $\pm 0,005$ nF (tj. polovina velikosti

poslední významné číslice).

δC_E Další korekce pro etalon

Byly podrobně popsány při popisu použití etalonu kapacity kalibrovaného pro třísvorkově paralelní náhradní zapojení při dvousvorkovém náhradním zapojení. Jedná se o příspěvek k nejistotě vlivem

- d) driftu od poslední kalibrace,
- e) odchylky vlivem okolní teploty),
- f) změny kapacity pro dvousvorkové zapojení

Korekce byly popsány při převodu z dvojsvorkového na třísvorkově zapojení a rozšířená nejistota hodnoty etalonu je rovná $U = 0,4$ pF (koeficient rozšíření $k = 2$).

Korelace

O všech vstupních veličinách se soudí, že nejsou korelovány ve významné míře.

Přehled nejistot (E_X)

veličina	odhad	standardní nejistota	pravděpodobnostní rozdělení	citlivostní koeficient	příspěvek k nejistotě
X_i	x_i	$u(x_i)$		c_i	$u_i(y)$
C_{iX}	10,01 nF	-	-	-	
C_E	10,020nF	0,0001 nF	normální	-1,0	-0,0002 nF
δC_{iX}	0,00 nF	0,0029 nF	rovnoměrné	1,0	0,0029 nF
δC_E	0,00 nF	0,0002 nF	normální	-1,0	-0,0002 nF
ΔC_X	-0,01 nF				0,003 nF

Rozšířená nejistota

Ve standardní nejistotě měření vztažené k výsledku zřetelně převažuje vliv konečné rozlišitelnosti RLC měřiče. Výsledné rozdělení není normální, ale v podstatě rovnoměrné. Proto nelze použít metodu efektivních stupňů volnosti popsanou v příloze E dokumentu EA – 4/02 Koeficient rozšíření, který přísluší rovnoměrnému rozdělení se vypočte ze vztahu daného rovnicí (S9.8) v matematické poznámce S 9.14. v EA - 4/02

$$U = k \cdot u(\Delta C_X) = 1,65 \cdot 0,003 \text{ nF} \cong 0,005 \text{ nF}$$

Uvedený výsledek

Změřená odchylka údaje měřené kapacity ručního digitálního RLC měřiče se při 10 nF rovná $\Delta C = (-0,01 \pm 0,005) \text{ nF}$.

Uvedená rozšířená nejistota měření je součinem standardní nejistoty měření a koeficientu rozšíření $k = 1,65$, který byl odvozen za předpokladu rovnoměrného pravděpodobnostního rozdělení pro pravděpodobnost pokrytí 95%.

Dodatečné připomínka

Je zřejmé, že metoda použitá k výpočtu koeficientu rozšíření souvisí se skutečností, že na nejistotu měření vztaženou k výsledku má hlavní vliv konečná rozlišitelnost RLC měřiče. To bude platit pro kalibraci všech přístrojů s malou rozlišitelností údajů, pokud jediným hlavním

zdrojem nejistoty v přehledu nejistot bude konečná rozlišitelnost.
Pro přesnější RLC měřiče s displejem pro více zobrazovaných míst bude nejistota stanovena pro $k = 2$.

15 Validace

Kalibrační metody podléhají validaci v souladu s normou ČSN EN ISO/IEC 17025 čl. 5.4.
Validační zpráva je uložena v archivu sekretariátu ČMS.

Upozornění

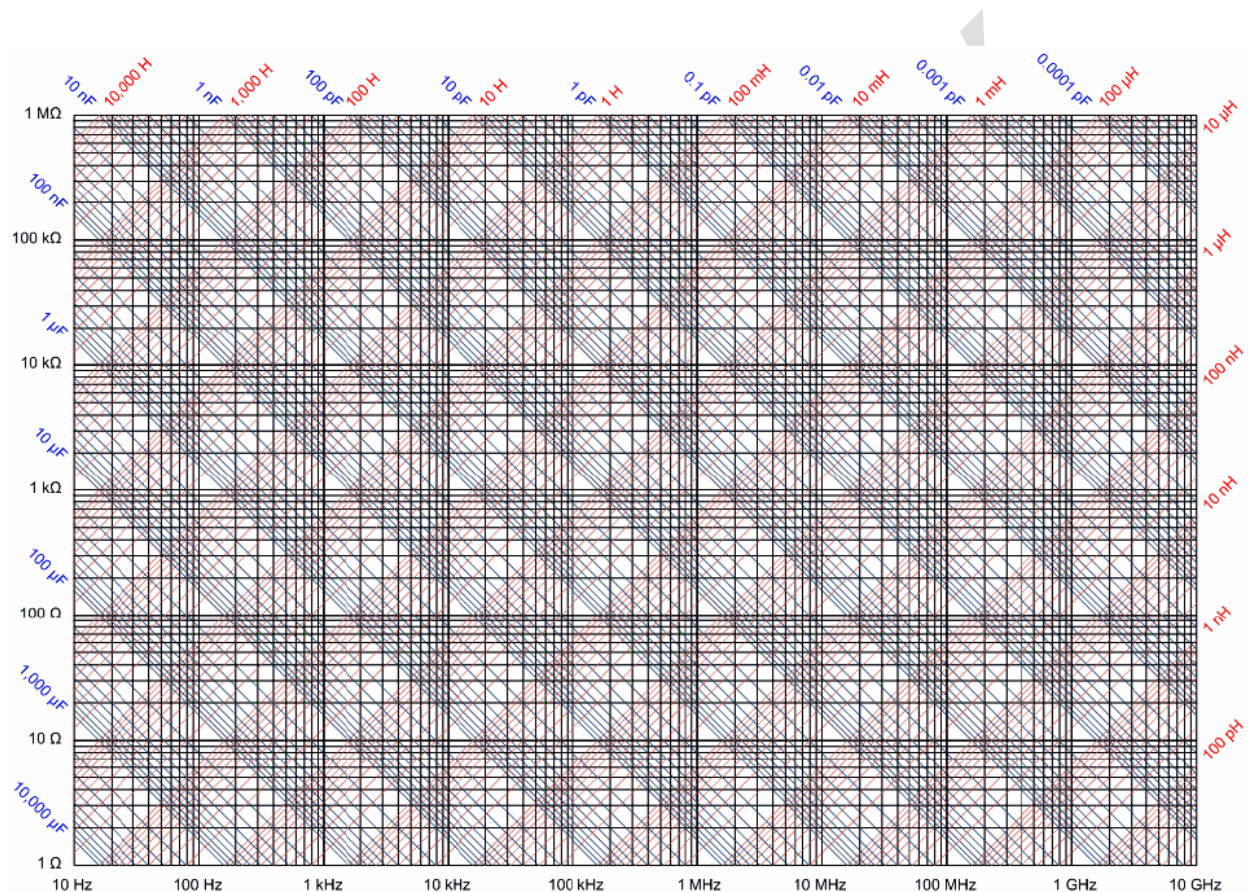
Kalibrační postup je třeba považovat za vzorový. Doporučuje se, aby její organizace přizpůsobila svým požadavkům s ohledem na své metrologické vybavení a konkrétní podmínky. V případě, že střediskem provádějícím kalibraci je akreditovaná kalibrační laboratoř, měl by být kalibrační postup navíc upraven podle příslušných předpisů (zejména MPA a EA).

16 Přílohy

Přílohy nejsou přímou součástí kalibračního postupu. Přílohy uvádí doplňující informace, které by měl kalibrační technik znát ke správnému a kvalifikovanému provedení kalibrace podle uvedeného postupu.

Doporučuje se, aby pracovníci, provádějící předmětné kalibrace se seznámili a opakovaně udržovali znalosti uvedené v přílohách v rámci programu vzdělávání.

a. Impedanční diagram



Impedanční diagram je základní pomůcka pro rychlou orientaci o velikosti měřené impedance a její závislosti na frekvenci.

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 inventujícím 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.

Způsoby připojení:

- **dvousvorkové připojení:** měřený prvek je připojen pouze svými dvěma svorkami. Pokud má i stínění, je stínění připojeno k jedné ze svorek, zpravidla k té, která je připojena k měřicímu signálu. Dvousvorkově se nejčastěji připojují etalony indukčnosti. Měřený objekt musí být co nejdále od zdrojů rušení a dalších rušivých vlivů (kovové předměty u indukčností). Dvousvorkové připojení je nejvíce ovlivňováno okolím a proto nejméně vhodné pro přesná měření.
- **trojsvorkové připojení:** měřený prvek je umístěn ve stínícím krytu, který je připojen na třetí svorku, která se připojuje ke stínění měřících kabelů.
- **čtyřsvorkové připojení:** k měřenému prvku jsou připojeny proudové a napěťové přívody. Čtyřsvorkové připojení minimalizuje vliv přechodového odporu a odporu připojovacích kabelů. Je vhodné pro měření malých a středních hodnot impedance.
- **pětisvorkové připojení:** obdobně jako u čtyřsvorkového připojení, měřený prvek je ale navíc opatřen stíněním vyvedeným na pátou svorku. Je lepší než čtyřsvorkové, protože měřený prvek je stíněný.
- **čtyřpárové připojení (4TP):** měřený prvek je umístěn ve stínícím krytu a vyveden čtyřsvorkově na čtyři BNC konektory, přes které se připojí čtyřmi stíněnými kabely ke konektorům IL (Lo I, Li) IH (Hi I, Hi), PH (Hi U, Hu) a PL (Hi U, Lu) mostu.

Popis svorek čtyřpárových autobalančních mostů:

- **konektor IH (Hi Drive):** budící proudová - svorka na kterou je připojen zdroj měřicího signálu. U důsledně čtyřpárových mostů je vyvedena na BNC konektor. Vnitřním vodičem je buzen měřený prvek, stíněním se měřený proud vrací.
- **konektor IL (Lo Drive):** svorka, na které je virtuální zem, do níž vtéká měřící proud určený připojenou impedancí. Proud se vrací stínícím krytem připojené impedance a vnějším vodičem ke svorce Hi Drive.
- **konektor PH (Hi Sense):** svorka pro měření napětí na napájecí straně měřené impedance.
- **konektor LH (Lo Sense):** napěťová svorka, kterou se kontroluje napětí na straně virtuální země. Potlačuje vliv odporu přívodu a nedokonalosti virtuální země.

b. Měření pasivních elektrických součástek a metrologie

Současný život je prosycen 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.

Vyjádření měřené impedance

Žádná skutečná elektrická součástka nemá charakter jen odporu, kapacity nebo indukčnosti, vždy má parazitní vlastnosti.

Nevýhodou impedančních 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 mezi sebou svázané výpočtovými vztahy-

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

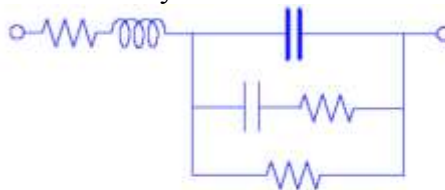
Například pro měřenou impedanci $Z = 1000 \Omega - j1000 \Omega$ na frekvenci 1,5915 kHz můžeme použít dvě náhradní schémata, sériové zapojení odporu 1 k Ω a kapacity 0,1 μF , nebo paralelní zapojení odporu 2 k Ω a kapacity 0,05 μF . Pozor, uvedená náhradní zapojení platí jen pro udanou frekvenci

Dvousvorkové připojení je základní nejjednodušší připojení, kdy je měřený prvek 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 etalony 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.



Dvousvorkové připojení a parazitní impedance

Vlastnosti součástí lze vyjádřit pomocí náhradního zapojení, daného kombinací ideálních prvků. Zapojení podle obrázku obr. 6 vychází z konstrukce součástky.

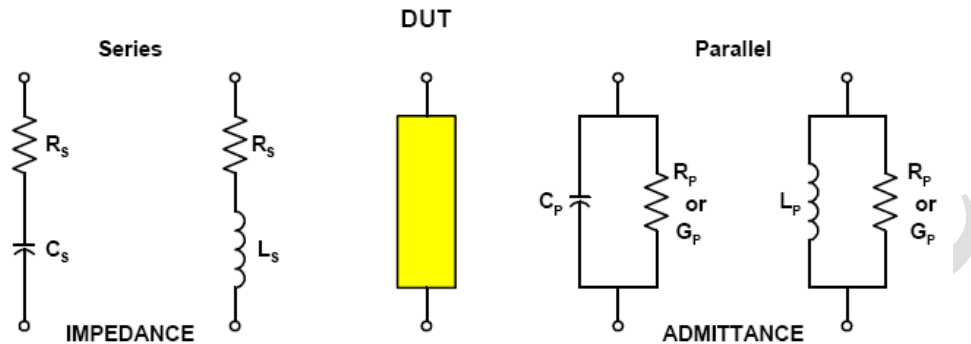


Náhradní zapojení kondenzátoru se znázorněným odporem a indukčností přívodů, parazitním svodem a RC členem, popisujícím zjednodušeně dielektrickou absorpci.

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 admitance**. Impedance je poměr mezi střídavým napětím a proudem, je to určitá analogie odporu pro DC signál.

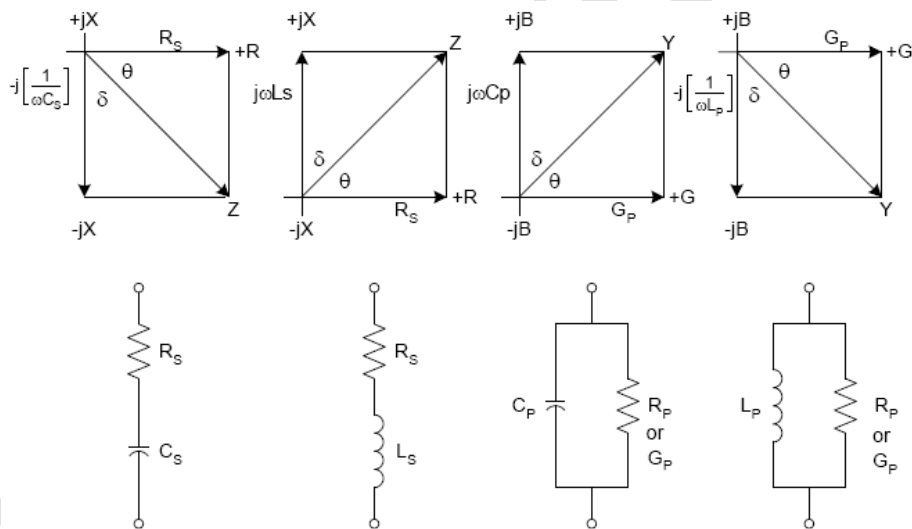
Protože napětí i proud jsou komplexními čísly, musí být i impedance komplexním číslem, značíme ji Z , jednotkou je ohm (Ω).

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.



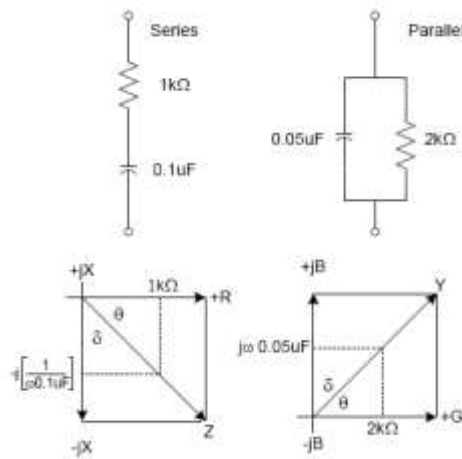
Náhradní zapojení prvku (platné na určité frekvenci)

Výhodou takového zapojení je, že se měří jen dvě složky měřené veličiny a fázový posuv mezi nimi, jak ukazuje i obr. 8.



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.



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 admittance. Tím se obor rozpadá na řadu veličin, které jsou ale svázány vztahy podle tabulky 1.

$$Z = R_S + jX_S = \frac{1}{Y} = |Z| \varepsilon^{j\theta}$$

$$|Z| = \sqrt{R_S^2 + X_S^2} = \frac{1}{|Y|}$$

$$R_S = \frac{G_P}{G_P^2 + B_P^2} = \frac{R_P}{1 + Q^2}$$

$$X_S = -\frac{B_P}{G_P^2 + B_P^2}$$

$$Y = G_P + jB_P = \frac{1}{Z} = |Y| \varepsilon^{j\phi}$$

$$|Y| = \sqrt{G_P^2 + B_P^2} = \frac{1}{|Z|}$$

$$G_P = \frac{R_S}{R_S^2 + X_S^2}$$

$$B_P = -\frac{X_S}{R_S^2 + X_S^2}$$

$$C_S = -\frac{1}{\omega X_S} = C_P (1 + D^2)$$

$$C_P = \frac{B}{\omega} = \frac{C_S}{1 + D^2}$$

$$L_S = \frac{X}{\omega} = L_P \frac{Q^2}{1 + Q^2}$$

$$L_P = -\frac{1}{\omega B_P} = L_S \left(1 + \frac{1}{Q^2}\right)$$

$$Q = -\frac{1}{D} = \frac{X_S}{R_S} = \frac{G_P}{B_P} = \tan \theta$$

$$D = -\frac{1}{Q} = \frac{R_S}{X_S} = \frac{B_P}{G_P} = \tan(90^\circ - \theta) = \tan \delta$$

$$\theta = -\phi$$

$$\phi = -\theta$$

Tab.1: 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 obr. 6. 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.

c. Principy AC měřičů impedancí

Autobalanční RLCG mosty představují nejrozšířenější typ měřidel impedancí. V principu pracují tak, že neznámá impedance je zapojena mezi zdroj měřicího signálu a virtuální zem, tvořenou invertujícím vstupem invertujícího operačního zesilovače. Přepínáním odporu ve zpětné vazbě tohoto zesilovače se mění měřicí rozsahy mostu. Přístroj měří reálnou a imaginární složku impedance a podle nastavení počítá požadované parametry (R, L, C, G, Q, D, Φ ...) pro sériové nebo paralelní náhradní zapojení. Měřená impedance se připojuje u velmi drahých a přesných měřičů čtyřpárově (4TP). Referenční rovina pak může být buď na připojovacích svorkách mostu (čtyři BNC konektory), nebo na konci měřicích kabelů definované délky. Referenční rovina může být také na vstupu připojovacích adapterů, kterými se připojení mostu (4TP, dvou, tří, čtyř, nebo pěti svorkové) přizpůsobuje, v případě potřeby, ke připojení měřeného objektu.

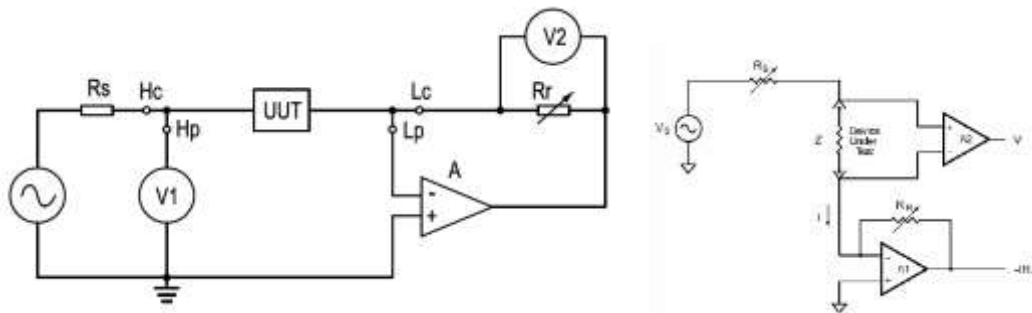
Velká skupina přesných měřičů je i čtyřsvorková

Některé moderní přesné a velmi drahé přístroje se kalibrují jako dvousvorkové, na adapteru pro připojení dvousvorkových součástek, protože to je nejbližší k jejich užití.

Největší skupina jsou kapesní dvousvorkové RLC měřiče, které poskytují dostatečnou přesnost za nejvýhodnější cenu.

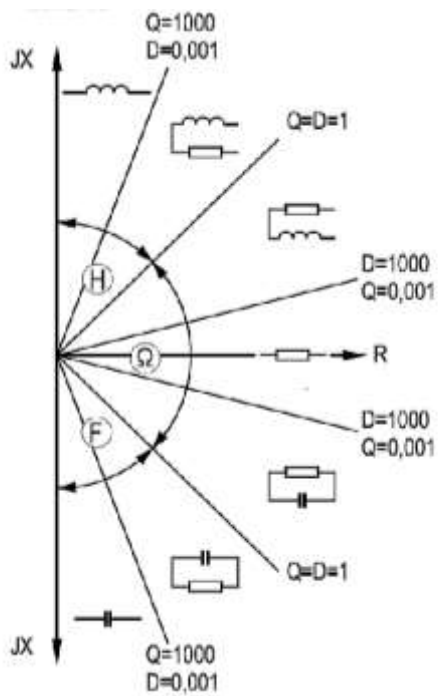
Všechny tyto přístroje je možné a vhodné kalibrovat metodou funkčních bloků, která vede k omezení počtu kalibračních bodů a přitom umožňuje s určitou pravděpodobností předpokládat správnou funkci přístroje v širším rozsahu hodnot, než jsou hodnoty etalonů.

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.



Obr ukazuje, že autobalanční most je vhodný i 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.



Různá používaná vyjádření prvku v impedanční rovině



Ukázky vnitřního provedení měřičů RLC a jejich svorkového pole

d. Etalony používané v praxi

Z výše uvedeného jsou nejdůležitější a nezbytnou součástí pro kalibraci střídavých měřičů RLC.

Podle provedení můžeme etalony odporu rozdělit na etalony

- s vypočítatelnou frekvenční charakteristikou
- drátové pro stejnosměrné a nízké frekvence (50 Hz)
- foliové pro stejnosměrné a akustické frekvence
- širokopásmové typu metal film pro širší frekvenční rozsah.

Provedení etalonů závisí na jejich určení (na požadované přesnosti, stabilitě a frekvenčním rozsahu měření).

Materiály pro kondenzátory pro etalony kapacity

Vlastnosti etalonů kapacity jsou do značné míry určeny vlastnostmi dielektrika

Slídové

Elektrody jsou napařené na tenké destičky z jakostní slídy (výborné dielektrikum) a jsou spojeny paralelně na požadovanou hodnotu kapacity. Kondenzátory mají malé ztráty, úzké tolerance, časová i teplotní stabilita je velmi dobrá. Teplotní součinitel kapacity je mezi 0 až 35 ppm/°C. Jsou vhodné pro hodnoty kapacity do 1 000 000 pF.

Keramické

Keramické kondenzátory jsou teplotně stálé a nahradily slídkové kondenzátory. Mají teplotní závislost do 35ppm/°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 etalonu kapacity od 1μF do 100μF se používají foliové 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. Nástřikem kontaktů dojde ke zkratování jednotlivých závitů kondenzátorů a tím se dosáhne velmi nízké vlastní indukčnosti a vysoké rezonanční frekvence kondenzátoru.

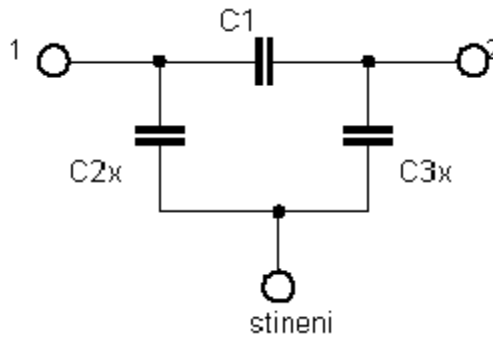
Dielektrikem jsou polyesterová fólie, nebo metalizovaná polyesterová fólie (kondenzátory označované MKT), polypropylénová fólie nebo metalizovaná polypropylénová fólie pro kondenzátory označované jako MKP, MKPI a KPI impulsní kondenzátory. Tab.5. uvádí porovnání parametrů kondenzátorů.

Type	MKT	MKP
Relativní dielektrická konstanta ϵ	3,2	2,2
DF na 1 kHz, $\tan \delta$	0,005	0,0005
Ris [$G\Omega \times \mu F$]	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 [°C]	100 - 125	85 - 100
Tc [ppm/°C], [$10^{-6}/^{\circ}C$]	+400, ± 200	-200, ± 100

Tab.1: vlastnosti dielektrik, vhodných pro etalony kapacity nad 10 nF

Třísvořkové a dvojsvořkové zapojení etalonu kapacity

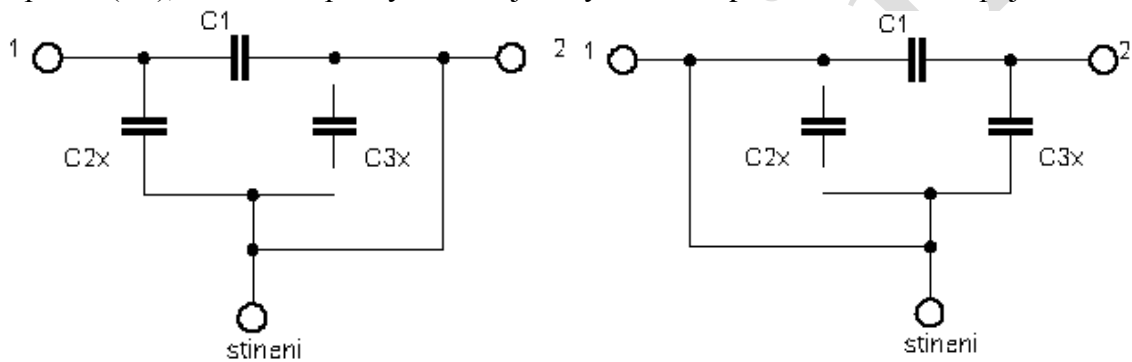
Etalony kapacity jsou obvykle kalibrovány v třísvořkovém nebo čtyřpárovém zapojení. Při měření průchozí kapacity stíněného kapacitního etalonu je měřená kapacita ovlivněna ještě parazitními kapacitami mezi jednotlivými elektrodami kondenzátoru a jeho stíněním (X). Kondenzátor se tedy jeví jako 3 kondenzátory, z nichž jeden (C1) je průchozí kapacita (to je ta, kterou chceme měřit) a zbývající dvě (C2x a C3x) jsou parazitní kapacity proti stínění (X).



Obr.13: Třísvorkový etalon kapacity s parazitními kapacitami

dvojsvorkové zapojení

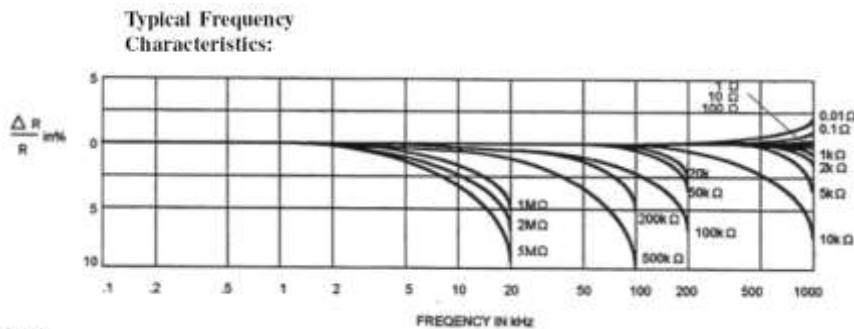
Při připojení stínění na jeden z vývodů kondenzátoru, vznikne dvojsvorkové zapojení a jedna z kapacit proti stínění je zkratována, ale druhá je zapojena paralelně k průchozí kapacitě (C1), hodnota kapacity etalonu je tedy větší než při třísvorkovém zapojení.



Obr.14: dvojsvorkové zapojení třísvorkového etalonu kapacity

Použití odporové dekády pro AC měření

e. Příklad vlastností R dekády se sériovým řazením odporů



Obr.15: frekvenční závislost, ukázka je pro dekádu QT 1433

Vedlejší parametry prvků D, Q a ESR

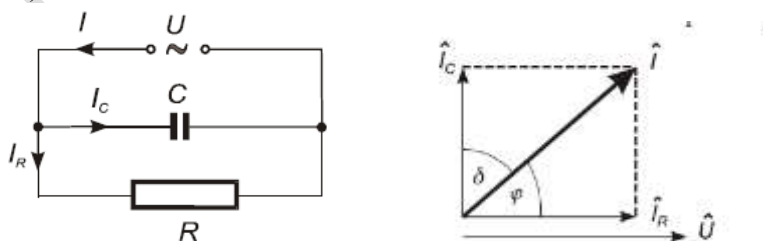
Kondenzátor se v elektrickém obvodu chová jako zásobník energie elektrického pole. Je tvořen dvěma elektrodami, mezi nimiž je dielektrikum (vzduch, slída apod.). Při průchodu střídavého proudu každý kondenzátor vykazuje ztráty, které jsou způsobeny nedokonalou izolací dielektrika, ohmickým odporem elektrod i ztrátami v dielektriku při střídavé polarizaci. Ztráty se projeví ohříváním dielektrika. Proto si lze skutečný kondenzátor představit jako bezztrátový kondenzátor *C*, obr. 17, 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 δ , pro nějž platí:

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

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

$$\text{tg } \delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{1}{\omega CR} .$$

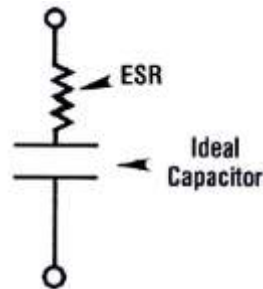
Velmi často se používá místo $\text{tg } \delta$ jednodušší symbol *D* (bez nutnosti používat řecká písmena).



Obr.16: Kondenzátor a jeho ztráty

f. ESR

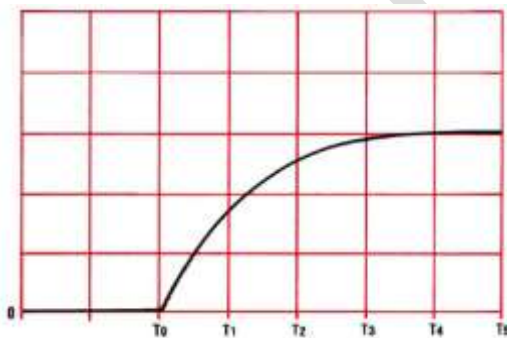
Pro vyšší frekvence a pro větší hodnoty kapacity může být podstatný sériový odpor, často označovaný jako ESR.

**Obr.17:**

Náhradní schéma kondenzátoru se sériovým ekvivalentním odporem ESR

Například pro filtrační kondenzátor síťového zdroje s hodnotou 20mF uvažujeme-li sériový odpor 0,5 Ω , 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 nashopovanou 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 etalony.

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. 19.

**Obr.18:**

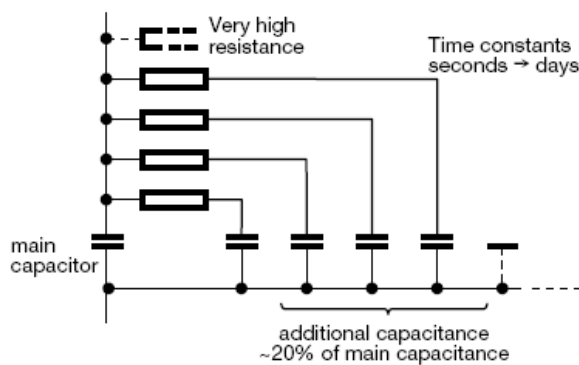
Nabíjení ideálního kondenzátoru a C se sériovým odporem ESR

g. 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 etalony se vždy volí kvalitní dielektrika, u kterých je dielektrická absorpce malá. Dielektrická absorpce je důležitá hlavně u kondenzátorů měřicích integrátorů, například v číslicových multimetrech. Náhradní zapojení pro

dielektrickou absorpci je řada RC členů paralelně k ideálnímu kondenzátoru viz obr. 19. Teoreticky je těchto RC členů nekonečný počet, 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 záleží na poměru kapacit těchto dvou kondenzátorů, odpor určuje dobu do dosažení rovnovážného stavu.



Náhradní zapojení pro vyjádření dielektrické absorpce kondenzátoru

Činitel jakosti Q

h. 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 etalonů odporů se často udává pro střídavé etalony, určené ke kalibraci měřičů impedancí. Pro nízké kmitočty a drátové etalony odporů se dříve udávala časová konstanta, pro vrstevné a fóliové etalony se více používá Q .
- Q u etalonů kapacity se vžilo pro SMD kondenzátory určené pro vysoké frekvence až do 2GHz.

i. Q u etalonu indukčnosti

Pro malé a střední hodnoty indukčnosti se používá sériové náhradní schéma, viz obr. 21.



Sériové náhradní schéma indukčnosti

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

Pro činitel jakosti a ztrátový činitel platí

$$Q = \omega L / r$$

$$D = 1 / \omega CR.$$

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 etalonů indukčnosti na akustických kmitočtech je vliv sériového odporu cívky velký. Tyto cívky mají malé Q , často menší než 1 a chovají se tedy jako etalony obecné impedance, vzdálené od ideální indukčnosti. Protože drát vinutí má odpor s velkou teplotní závislostí, pro měř' kolem $0,4^\circ\text{C}$, nebývá většinou Q na nízkých frekvencích měřeno, protože pro netermostatované etalony je velmi závislé na teplotě měřené cívky.

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