



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

Kalibrační postup

KP 4.1.2/18/16

ETALONY KAPACITY

Praha
Říjen 2016

Vzorový kalibrační postup byl zpracován a financován ÚNMZ v rámci Plánu standardizace – Program rozvoje metrologie 2016

Číslo úkolu: VII/1/16.

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

Uvedený pracovní postup je určen pro kalibraci etalonů kapacity v rozsahu od 1 pF do 10 μ F na frekvenci 1 kHz pro dvousvorkové, třísvorkové, pětisvorkové a čtyřpárové připojení (udává se pro paralelní náhradní zapojení).

2 Související normy a metrologické předpisy

Agilent- Keysight	Impedance Measurement Handbook A guide to measurement technology and techniques 4th Edition	[1]
Quad Tech	LCR measurement primer,	[2]
NPL	A Guide to measuring resistance and impedance below 1 MHz,	[3]
Centro Español de Metrología, Tres Cantos, Madrid Španělsko	PROCEDIMIENTO EL-012 PARA LA CALIBRACIÓN DE PUNTOS FIJOS DE CAPACIDAD	[4]
Measurement Standards Laboratory of New Zealand	MSL Technical Guide 27, Impedance (RLC) Standards,	[5]
KP 4.1.2/16/16	AC R, Etalony odporu pro střídavý proud	[6]
KP 4.1.2/17/16	L, Etalony indukčnosti	[7]
GUM	Příručka pro stanovení nejistoty měření	[8]

3 Kvalifikace pracovníků provádějících kalibraci

Kvalifikace pracovníků provádějících kalibraci etalonů kapacity 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 souvisejícími předpisy. Proces udržování a rozvoje kvalifikace má být soustavný a dokumentovaný, jak to předepisuje ČSN EN ISO/IEC 17025:2005 bod 5.2.2 i revize CD2 ISO/IEC 17025.

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

4 Názvosloví, definice

Používané názvosloví musí být podle VIM 3 a slovníku IEV, speciální pojmy pro názvosloví pro měřiče kapacity jsou uvedeny v této kapitole a v příloze 1.

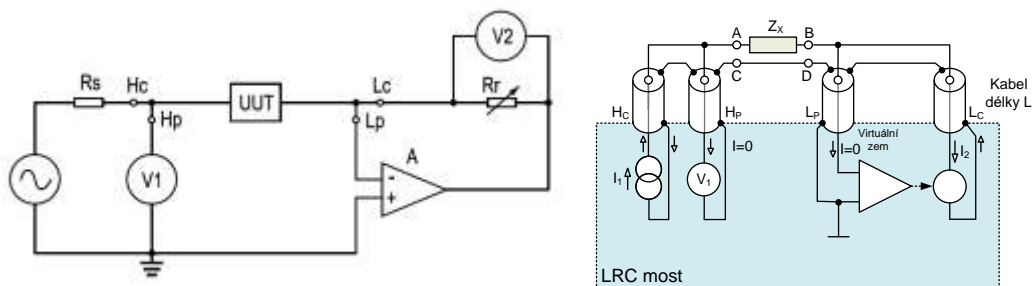
Názvosloví pro měřiče

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 obvykle připojuje čtyřsvorkově nebo čtyřpárově.

Prakticky všechny průmyslově vyráběné měřiče impedancí jsou řešeny na tomto principu.



Obrázek č. 1: Základní princip autobalančního mostu a 4 TP provedení mostu

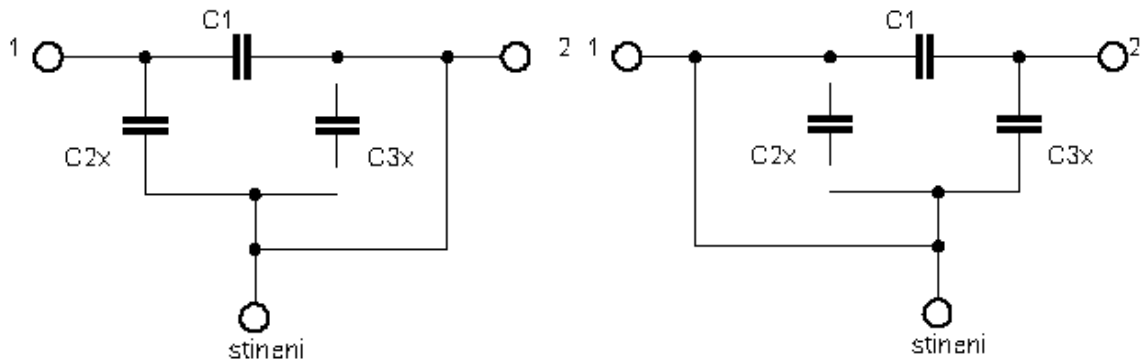
Názvosloví pro připojení měřeného prvku

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 etalony 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 používají při střídavém měření na nízkých frekvencích (50 Hz) zkroucené vodiče, aby byl omezen vliv rušení.

Při připojení nenulového potenciálu na vodič stínění nedojde k eliminaci vlivu parazitní kapacity mezi elektrodami kapacitního etalonu a stínícím krytem a měření bude ovlivněno velikostí parazitní kapacity. V limitním případě, kdy bude potenciál stínění shodný s napětím na vstupu průchozí kapacity etalonu, bude měřená hodnota součtem průchozí kapacity etalonu a parazitní kapacity C_{2x} nebo C_{3x} (podle způsobu zapojení přívodů).

Zapojení v limitních případech budou vypadat následovně, jak ukazuje obrázek č. 2:

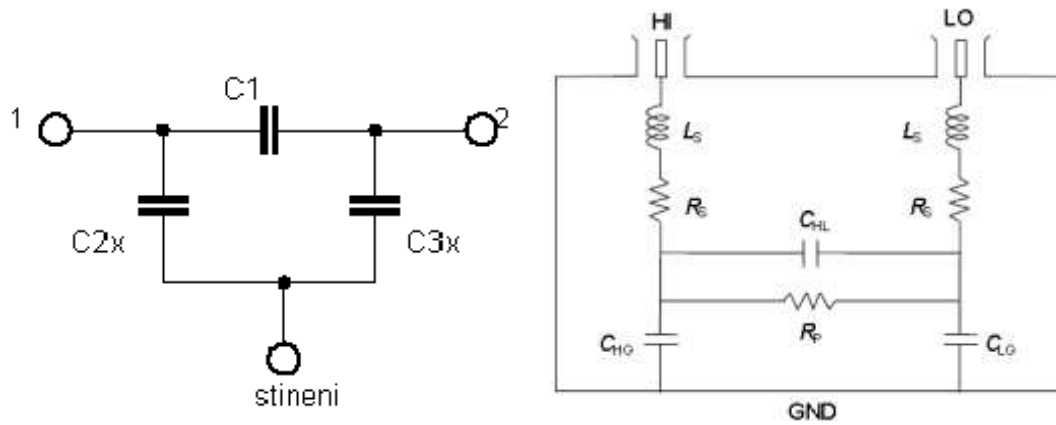


Obrázek č. 2: Dvě možnosti zapojení třísvorkového etalonu kapacity při užití jako dvousvorkový

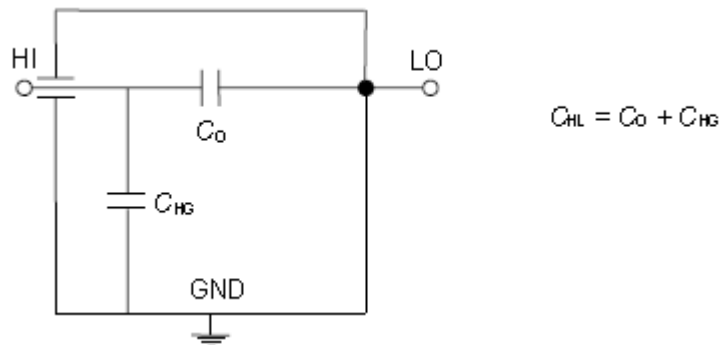


Obrázek č. 3: Ukázka provedení dvouvorkového etalonu pro měřič s kleštinami

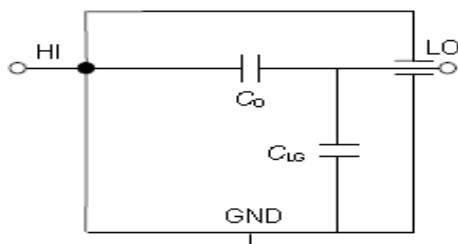
Trojsvorkové připojení - měřený prvek je umístěn ve stínícím krytu, který je připojen na třetí svorku. Používá se nejčastěji u etalonu kapacity malých a středních hodnot kapacity. Je vhodné pro měření středních a velkých hodnot impedance. Nejčastěji se při střídavém měření používají dva koaxiální kabely.



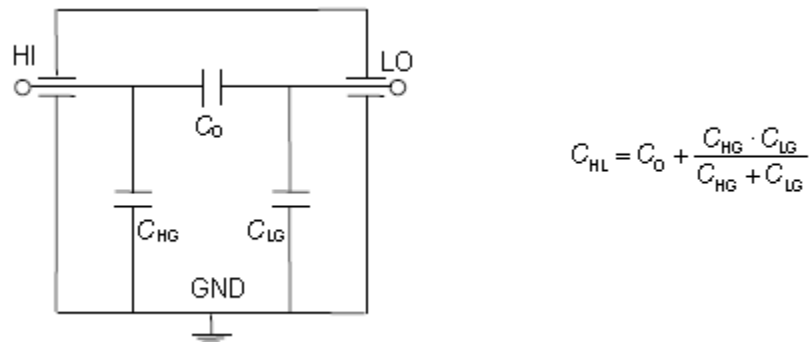
Obrázek č. 4: Zjednodušené náhradní zapojení třísvorkového provedení kapacitního etalonu a náhradní schéma s vyznačenými dalšími parazitními veličinami



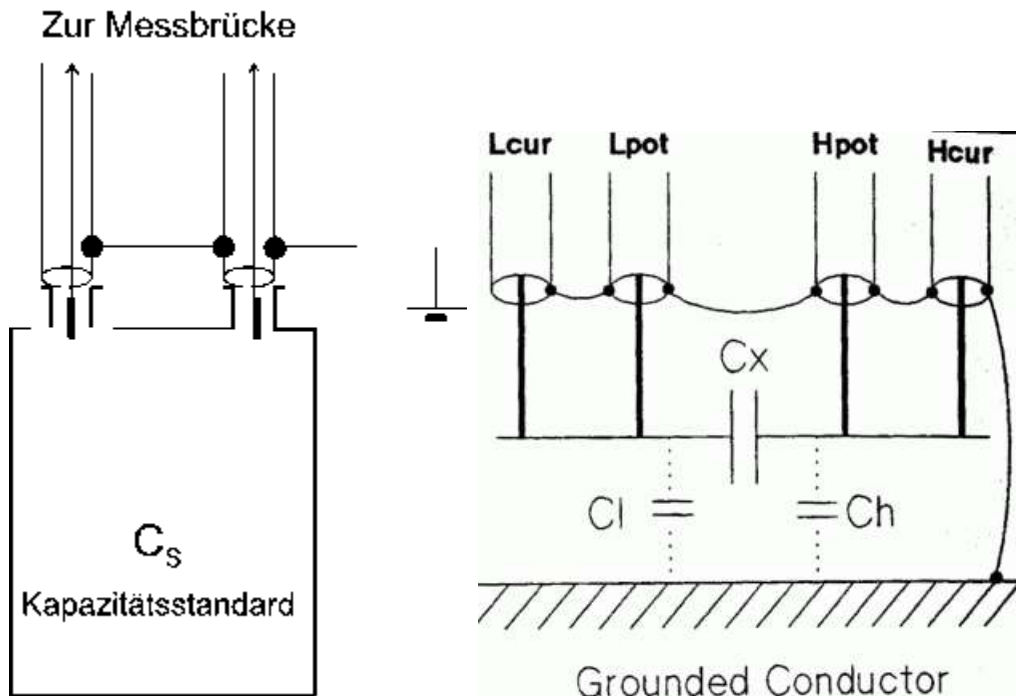
Obrázek č. 5: Třísvorkový etalon zapojený dvousvorkově, spojeno Lo a GND



Obrázek č. 6: Třísvorkový etalon zapojený dvousvorkově, spojeno Hi a GND



Obrázek č. 7: Třísvorkový etalon



Obrázek č. 8: Připojení etalonu dvoupárově a čtyřpárově

Čtyřsvorkové připojení - na prvek jsou připojeny měřicí 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 stíněné koaxiální 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 pátoú 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 nejširší rozsah měření impedancí ze všech uvedených zapojení. Měřený prvek je umístěn ve stínícím krytu a vyveden čtyřsvorkově na čtyři koaxiální kabely.

Pozor! Vnější vodiče koaxiálních kabelů musí být propojeny i na straně měřené impedance. Poznámka: Autobalanční most nám pomůže poznat jeho provedení, když jsou všechny konektory na panelu upevněny izolovaně.

Označení pro měřicí svorky autobalančního mostu

Hi Drive - (Hi I) - svorka, na kterou je připojen zdroj měřícího signálu. U důsledně čtyřpárových mostů je vyvedena na koaxiální konektor (BNC). Vnitřním vodičem je napájen měřený objekt, vnějším vodičem se měřený proud u 4TP mostu vrací. Na této svorce měříme signál, napájející měřený objekt.

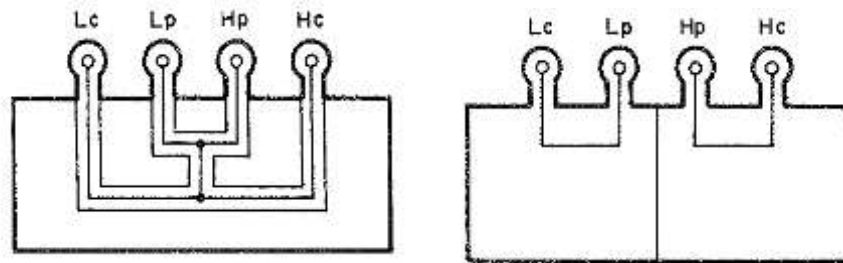
Lo Drive - (Lo I) svorka vytvářející virtuální zem, do které vtéká měřený proud určený připojenou impedancí. Proud se vrací vnějším vodičem a stínícím krytem připojené impedance ke svorce Hi Drive.

Hi Sense - (Hi V) - svorka pro měření napětí na napájecí straně měřeného objektu.

Lo Sense - (*Lo V*) napěťová svorka, kterou se kontroluje napětí na straně virtuální země. Potlačuje vliv odporu přívodu a nedokonalosti virtuální země.

Kompence open a short pro střídavá měření impedancí

Každé měření impedancí je relativní měření proti nastavenému zkratu a rozpojenému obvodu. Na provedení těchto prvků závisí i přesnost a použitý frekvenční rozsah měření, 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.



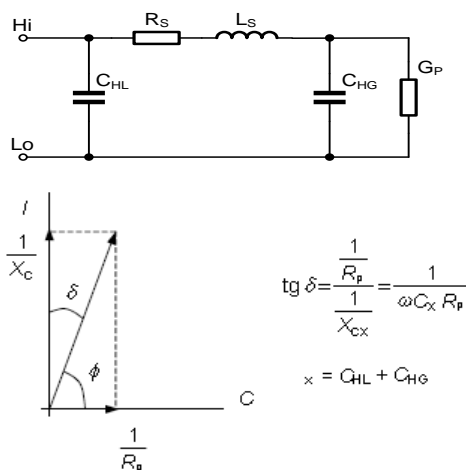
Obrázek č. 9: Kompence Open a short. $Z_{dut} = 0$ (short), $Z_{dut} \rightarrow \infty$ (open),

Dvousvorkový zkrat: Dvousvorkový zkrat je spojení dvou svorek s téměř nulovým odporem. Pokud jsou svorky v určité vzdálenosti od sebe (a to je vždy), má každý vodič mezi nimi, (pokud nepracujeme v supravodivém stavu při velmi nízkých teplotách), vždy nějaký odpor a ideální dvousvorkový zkrat tedy není realizovatelný. Pro běžné provedení mostů je obvyklá vzdálenost svorek od sebe kolem 22 mm, a pokud je propojíme drátem o průměru nejméně 1 mm má propojka zbytkovou indukčnost cca 20 nH a odpor 1mΩ.

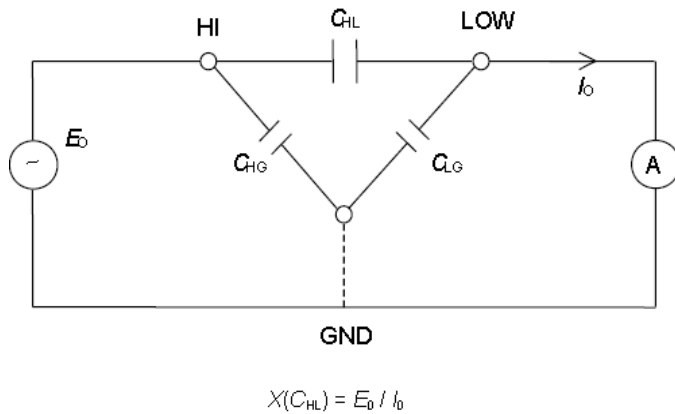
Čtyřpárové korekce open a short (zkrat)

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

Etalony kapacity



Obrázek č. 10: Náhradní schéma dvousvorkového provedení etalonu



Obrázek č. 11: Obvyklé varianty značení kapacit u etalonu kapacity

Vedlejší složka měřené impedance, činitel ztrát "D"

Žádná skutečná elektrická součástka nemá charakter jen odporu, kapacity nebo indukčnosti, vždy má parazitní vlastnosti. Mimo hlavní měřenou složku má etalon kapacity i nezanedbatelnou vedlejší složku vlivem ztrát. Ztráty se obvykle vyjadřují parametrem $\text{tg } \delta$, často psané pro zjednodušení jako D. Činitel jakosti "Q" je převrácenou hodnotou pro D. Nf etalony kapacity mají malé $\text{tg } \delta$, obvykle podstatně menší než jedna. Kvalitní kondenzátor s plynným dielektrikem má $\text{tg } \delta$ na 1 kHz pod 0,000 01:

$$D = \text{tg } \delta = 1/Q = 1/ \omega R_p C_p$$

charakterizující ztráty kondenzátoru. Jeho hodnota je stanovena ze vztahu mezi výkonem rozptýleném v odporových prvcích kondenzátoru a energie uložené v kapacitě kondenzátoru.

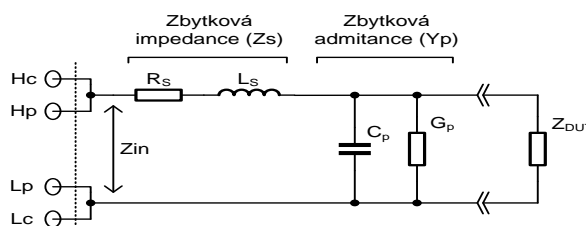
Náhradní zapojení etalonu kapacity

Obvykle měříme etalony kapacity od 1 pF do 10 μF pro paralelní náhradní zapojení (C_p a D paralelně) a pro C nad 1 μF pro sériové náhradní zapojení (C_s v sérii s R_s).

Kompence open a short pro střídavá měření impedancí

Kompencaci *open* je především důležité provést při měření velké hodnoty impedance, kdy se projeví nejčastěji vliv kapacity mezi přívody. V tomto případě je důležité zachovat vzdálenosti mezi přívody měřeného prvku při měření stejné jako při provedení kompenzace *open*.

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 k měřenému prvku. Je také nutné zachovat způsob provedení připojení měřené součástky.

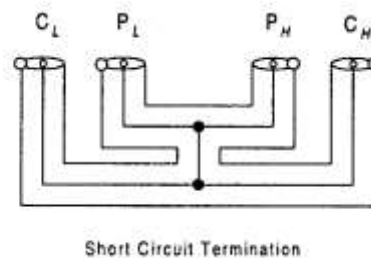


Obrázek č. 12: Open a short kompenzace. $Z_{dut} = 0$ (short), $Z_{dut} \rightarrow \infty$ (open), náhradní schéma

Dvousvorkový zkrat: Dvousvorkový zkrat je spojení dvou svorek s nulovým odporem. Pokud jsou svorky v určité vzdálenosti od sebe (a to je vždy), má každý vodič mezi nimi, pokud nepracujeme v supravodivém stavu při velmi nízkých teplotách, vždy nějaký odpor a ideální dvousvorkový zkrat tedy není realizovatelný. Pro běžné provedení mostů je obvyklá vzdálenost svorek od sebe kolem 22 mm, a pokud je propojíme drátem o průměru nejméně 1 mm má propojka zbytkovou indukčnost cca 20 nH.

Čtyřpárové korekce open a short (zkrat)

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



Obrázek č. 13: Čtyřpárový zkrat

Zkrat pro frekvence do 1 MHz

Je třeba definovat místo definice zkratu, pro přívody delší než 1 m klesá využitelný rozsah měřených impedancí. Proto kalibraci provádíme s přívody ne delšími než 1m, přednostně s kabely délky 30 cm nebo bez kabelů, pokud to provedení mostu a etalonů umožňuje.

5 Prostředky potřebné ke kalibraci

Pro kalibraci popsanou v tomto postupu, je nutné mít k dispozici:

Impedanční most s rozlišením nejméně 5 digit při měření kapacity a s nejistotou kalibrace, ne více než třetina tolerance kapacity, která má být kalibrována. Tento můstek musí být schopen měřit kapacity v kmitočtovém rozsahu kalibrace. Je žádoucí, aby můstek mohl měřit kapacitu po zavedení korekcí s nejistotou měření zhruba 0,02 % z čtení na referenční frekvenci 1 kHz. Pokud bude měření provedeno porovnáním s etalony C, musí být tyto etalony k dispozici ve stejných jmenovitých hodnotách nebo se použijí korekční data pole kalibrace etalonového můstku.

4 kusy koaxiální přípojovací kabely s kvalitními konektory BNC-BNC, délka 1m (lépe je používat jen 30 cm). Tato sada kabelů je obvykle příslušenství impedančních mostů.



Obrázek č. 14: T kus BNC v provedení Y (podle GES.cz)

2 kusy T článku BNC, přednostně typu Y (například GES BNC T Y), doporučené

provedení viz obr. č. 14.

2 kusy přechod BNC/ banánek, doporučené provedení viz obr. č. 15.

Přechod banánek-BNC.

Teploměry nebo zapisovače teploty a relativní vlhkosti .

Poznámka: Všechna použitá měřidla a pomocná měřicí zařízení musí být navázány na etalon vhodného rozsahu a přesnosti a musí mít platnou kalibraci.



Obrázek č. 15: Přechod banánek-BNC a T kus BNC v provedení Y (výhodnější než obvyklé provedení T)

6 Obecné podmínky kalibrace

Měření probíhá v laboratoři, obvykle klimatizované teplota i vlhkost je, pokud je to možné, udržována automaticky na hodnotách:

Teplota $t = (23 \pm 2) ^\circ\text{C}$, [doporučeno, pokud je to dosažitelné $t = (23 \pm 1) ^\circ\text{C}$,]

Relativní vlhkost $RH = (50 \pm 20) \%$.

Referenční i kalibrovaný etalon se zpravidla umísťuje na vzduchu. Pasivní termostat je doporučen.

Podmínky jsou monitorovány a zaznamenávány.

Vlhkost může ovlivnit parametry etalonu poměrně málo, pro přesná měření může zvětšená vlhkost zvýšit ztráty, hlavně u nehermetických etalonů.

Pro etalony se 4 BNC konektory, které se dají připojit na kalibrovaný most přímo bez kabelů, volíme přednostně polohu konektory na bok, toto je to nezbytné uvést vždy pro kondenzátory řady Agilent 16380A.

7 Rozsah kalibrace

Princip kalibrace

Ke stanovení hodnoty neznámé kapacity (dále jen kapacity) se v laboratoři používá:

- **Substituční metoda**, kdy referenční etalon (C_E) se známou hodnotou kapacity je změřen RLC nebo C mostem a stejné měření je provedeno i s kalibrovaným etalonem (C_X) při požadovaném kmitočtu a velikosti měřicího napětí. Hodnota kalibrovaného etalonu se určí ze známé hodnoty referenčního etalonu a poměru změřených kapacit na referenčním a kalibrovaném kondenzátoru. Tato metoda je vhodná pro nejpřesnější měření. Porovnání s referenčním etalonem kapacity se provádí pro etalony, jejichž hodnoty kalibrované kapacity se neliší o více než 5 %.

- **Metoda přímého odečtu kapacity** kalibrovaného etalonu na vhodném C nebo RLC měřidle. Je vhodná pro běžné etalony a kapacitní dekády (vzhledem ke specifikacím mostů).

Kalibrace zahrnuje jedno ze zvolených připojení:

dvousvorkové, třísvorkové, čtyřsvorkové a čtyřpárové připojení.

Kalibrace pro kapacitu pod $10\mu\text{F}$ se přednostně dělá pro paralelní náhradní zapojení, pro nastavení měřených parametrů na C_p a D .

8 Kontrola dodávky a příprava ke kalibraci

8.1 Přezkoumání smlouvy

Zakázka na kalibraci se při přebírání přezkoumává podle ČSN EN ISO/IEC 17025, odst.

4.4, nebo po revizi této normy podle WD2 ISO/IEC 17025 kapitola 7.

Přezkoumání má potvrdit, že laboratoř má nezbytné fyzické, lidské a informační zdroje a že pracovníci laboratoře mají dovednosti a odborné znalosti potřebné k provádění příslušných kalibrací. Laboratoř musí vytvořit a udržovat postupy pro přezkoumávání poptávek, nabídek a smluv. Jakékoli rozdíly mezi poptávkou nebo nabídkou a smlouvou musí být dořešeny před zahájením prací. Každá smlouva musí být přijatelná jak pro laboratoř, tak pro zákazníka. Při přebírání etalonu ke kalibraci je třeba zjistit, zda typ, výrobní číslo a příslušenství dodaného etalonu odpovídá údajům uvedeným v objednávce nebo dodacím listu. Současně se provede jeho předběžná kontrola, spočívající ve vnější prohlídce a kontrole provozuschopnosti přístroje. Kontroluje se mechanická nepoškozenost připojovacích konektorů a jejich čistota (v případě potřeby se vyčistí).

Při přebírání etalonu ke kalibraci je třeba, aby odpovědný pracovník kalibrační laboratoře posoudil, zda typ, výrobní číslo a příslušenství dodaného etalonu odpovídá údajům uvedeným na objednávce nebo dodacím listu. Současně se provede přezkoumání smlouvy z pohledu požadavků zákazníka a možností laboratoře.

Podle **WD2 ISO/IEC 17025 kapitola 7** má následující body:

7.1.1.1 Laboratoř musí vytvořit a udržovat postupy pro přezkoumání žádostí, výběrových řízení a smluv. Zásady a postupy pro tyto názory vedoucí ke smlouvě pro kalibrace zajistí, aby:

- a) požadavky jsou odpovídajícím způsobem definovány, zdokumentovány a pochopeny (viz 7.2.2.2),
- b) laboratoř má schopnosti a zdroje, aby splňovala požadavky,
- c) příslušná kalibrační procedura je vybrána a je schopna vyhovět požadavkům zákazníků (viz 7.2.2.2). Jakékoli rozdíly mezi žádostí nebo nabídkou a smlouvou musí být vyřešeny před započítím práce. Každá smlouva musí být přijatelná jak pro laboratoř tak i pro zákazníka. Odchylykly přání zákazníka nesmí ohrozit laboratorní integritu.

Poznámka: Pro interní zákazníky, hodnocení žádostí, výběrových řízení a smluv mohou být provedeny zjednodušeným způsobem.

7.1.1.2 Záznamy o hodnocení, včetně jakýchkoli významných změn, musí být udržovány. Záznamy musí být zachovány i z případných jednání se zákazníkem týkajících se požadavků zákazníka nebo výsledků práce během období plnění smlouvy.

Poznámka: Pro posouzení rutinních a jiných jednoduchých úkolů, datum a identifikace (např. iniciály) osoby odpovědné v laboratoři za provedení sjednané práce jsou považovány za dostatečné. V případě opakovaných rutinních úkolů, přezkoumání nemusí být

proveden pouze v počáteční fázi šetření nebo udělení zakázky na pokračující rutinní práci vykonanou v rámci obecné dohody se zákazníkem za předpokladu, že požadavky zákazníka zůstávají nezměněny. Pro nové, složité nebo pokročilé kalibrační činnosti, by měl být zachován obsáhlejší záznam.

7.1.1.3 Do přezkumu bude nutné rovněž zahrnovat všechny práce zadané subdodavatelům laboratoře,

7.1.1.4 Zákazník musí být informován o každé odchylce od smlouvy,

7.1.1.5 Pokud je potřeba zakázku, která má být změněna poté, co laboratoř zahájila činnost, musí být stejný proces přezkoumání smlouvy opakovat, a případné změny se sdělují všem zainteresovaným pracovníkům.

8.2 Kontrola dodávky

Při převzetí etalonů ke kalibraci od uživatele je třeba provést vnější prohlídku (úplnost štítkových údajů, jmenovitá hodnota, mechanická pevnost svorek, poškození, nečistota atd.) Etalon, u kterého se zjistí závada vylučující kalibraci, se nepřijme na kalibraci. Postup kontroly zahrnuje:

- a) Zkontrolujte, že kalibrovaný etalon kapacity je identifikován značkou, číslem modelu a příslušné série, nebo na základě jedinečného interního kódu vlastníka etalonu. Kdyby to nebylo tak bude přidělen identifikační kód kalibrační laboratoří, obvykle identifikovaný štítkem bezpečně přilepeným na kalibrovaný etalon,
- b) návod k obsluze popisující vlastnosti kalibrovaného etalonu, tak, že osoba provádějící kalibraci je obeznámena s jeho typickými očekávanými vlastnostmi,
- c) etalony kapacity, na které se používá tento kalibrační postup, se nejistují,
- d) stav a pevnost připojovacích svorek musí být kontrolovány, v případě potřeby se provádí jejich čištění. Zkontrolujte, že u provedení dvojsvorkových etalonů s přístrojovými svorkami je umístěn zkrat mezi svorkami na kalibrovaném etalonu a že zkratovací plíšek ani odpovídající kontaktní plochy svorek nejsou zkorodovány.

Etalon kapacity, který nevyhověl při vnější prohlídce a konstrukčnímu provedení dle výrobce, se vyřadí z dalších zkoušek.

8.3 Příprava kalibrace

- a) Referenční i kalibrované etalony musí zůstat v kalibrační místnosti nejméně čtyři hodiny před začátkem kalibrace,
- b) napájení impedančního mostu při kalibraci se zapne před měřením pro tepelnou stabilizaci na potřebnou dobu. Tepelná časová stabilizace závisí na typu přístroje, obvykle vyhoví nejméně 1 hodina,
- c) kalibrace se provádí v prostředí, kde se udržuje normální okolní teplota mezi 22 °C a 24 °C, včetně vlivu nejistoty měření teploty pro udržení jejich optimální specifikace. Je možné provádět kalibraci v jiných než výše uvedených teplotách, ale v tomto případě bude třeba vzít v úvahu při přidělování kalibračních nejistot,
- d) relativní vlhkost nemá přesáhnout 70 %, i když v některých výjimečných případech může povolit hodnoty až 80 %, pokud zákazník souhlasí (viz specifikace kalibrované kapacity a mostu). Kalibrovaný etalon by měl být v tomto případě hermeticky uzavřen, aby nebyl ovlivněn vlhkostí.

9 Postup kalibrace

9.1 Předběžné nastavení

Všechna měření provádíme po nastavení přístroje na zkrat a rozpojený obvod (open a

short). Toto nastavení obvykle závisí na měřené frekvenci a může záviset i na nastavené úrovni signálu. Postupujeme podle dokumentace kalibrovaného mostu. Nastavení v průběhu kalibrace opakovaně kontrolujeme, nemusí být dlouhodobě stabilní.

9.2 Zkrat a rozpojený obvod, realizace

Referenční rovina

Všechny údaje měření se vztahují k referenční rovině. Ta může být na svorkách přístroje nebo na koncích připojovacích kabelů definované délky, případně na svorkách měřících adaptérů příslušejících k danému přístroji. Pro frekvenční rozsah do 1 kHz není při středních hodnotách měřené impedance umístění referenční roviny kritické. Pokud má přístroj korekce přepínatelné pro různou délku kabelu, provádějí se pro kabely délky max. 1 m s příslušným nastavením mostu.

Zvolí-li se referenční rovina na konci připojovacích kabelů nebo kabelových adaptorů použijí se kabely, u kterých se kontroluje periodicky mechanický stav kabelů včetně měření stálosti průchozího kabelu při ohybech a stav konektorů na kabelu.

Zvolenou referenční rovinu zaznamenáváme do záznamu o měření.

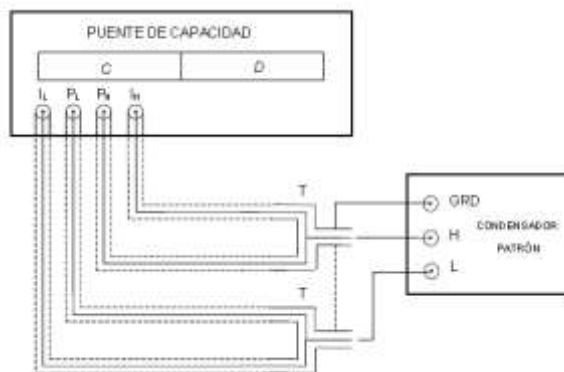
Všechna měření autobalančních RLCG mostů jsou prováděna po nastavení mostu při zapojeném zkratu a rozpojeném obvodu. Proto záleží na správném provedení etalonů pro tyto hodnoty, které má být řešeno v souvislosti s provedením etalonů pro ostatní hodnoty.

9.3 Zkrat (short) pro čtyřsvorkové a čtyřpárové připojení

Definuje nulu. Obvykle jsou propojeny svorky Hi Drive a Lo Drive, Hi Sense a Lo Sense a mezi těmito propojeními je zkratovací spojka. Pokud není k dispozici speciální prvek, lze použít přípravek se dvěma koaxiálními spojkami T a vsuvkou.

9.4 Rozpojený obvod (open)

Většina přístrojů vyžaduje, aby byly vzájemně spojeny svorky Hi Drive a Hi Sense a Lo Drive a Lo Sense. Propojení provedeme na příklad stíněnými krátkými kablíky.



Obrázek č. 16: Připojení 4TP mostu k třísvorkovému etalonu kapacity podle [4]

9.5 Příprava k měření

Postup kalibrace procesu je stanoven pro měření bez možnosti justace a zahrnuje pouze přímé kalibrační korekce vyplývající z nominální hodnoty, spojené s nejistotou výpočtu kalibračních bodů:

- zapnout RLC měřič do sítě a ponechat ustálit minimálně 30 minut, připojit měřicí kabely, se kterými se bude provádět kalibrace - stíněné BNC kabely (+ případný adapter), nebo kablíky s přechodem na připojení etalonů,
- nastavit na RLC měřič na pomalou rychlost měření a větší počet vzorků pro průměrování, pokud to měřič umožňuje,

- po teplotním ustálení provést u RLC měřiče funkci korekce „SHORT“ a „OPEN“ pro čtyřsvorkové nebo čtyřpárové měření,
- Trojsvorkové měření při použití kabelů s přechodem na banánky je propojení následující: SHORT – banánky zkratovány, OPEN – banánky rozpojeny ve vzájemné vzdálenosti odpovídající přibližně jejich vzdálenosti při připojení na měřený prvek,
- dvousvorkové s kontaktními ploškami- open svorky naprázdno, short s přípravkem.

9.6 Volba měřících frekvencí a úrovní

Na měřicím zařízení nastavíme požadovaný kmitočet a měřicí napětí a nastaví se vhodný měřicí rozsah buď pomocí funkce AUTORANGE nebo manuálně (pokud to měřicí zařízení umožňuje):

- měření se provede obvykle nejprve měřicím signálem 1 V/1 kHz,
- podle požadavků zákazníka nebo technické specifikace měřeného objektu se provede měření na dalších frekvencích, případně při jiných hodnotách měřicího signálu,
- volíme měřicí kombinaci C_p a D .

Je vhodné zapsat všechny hodnoty měřené při jednom nastavení měřicího signálu (napětí/proud, náhradní zapojení, frekvence) do jednoho souboru. Pro další měření pak otevřít nový soubor. Je možné provádět měření v jiných kmitočtových bodech, například 100 Hz. Způsob měření je pak přesně stejný, jak je zde popsáno, ale musí nejprve přizpůsobit měřicí most na požadovanou frekvenci měření, provést nutné kroky, jako je korekce open a short, tato úprava musí být v rozsahu použitelnosti etalonu, viz technické podklady výrobce.

9.7 Připojení etalonů

Spojení mezi svorkami měřicího mostu a měřené kapacity musí být provedeno stíněnými koaxiálními kabely: Obvykle mosty k měření kapacity mají své vlastní měřicí kabely, které se připojují přímo k měřenému etalonu kapacity.

Kabely připojené ke svorkám P_H a I_H jsou na konce spojeny T článkem BNC (typ Y).

Kabely připojené ke svorkám P_L a I_L jsou na konce spojeny T článkem BNC (typ Y).

Na T články na konci kabelů je připojen adaptor BNC - banánky.

Banánek vnitřního vodniče je měřicí svorka zapojení.

Banánky vnějšího vodniče musí být u mostů specifikovaných jako čtyřpárové propojeny i na straně měřeného prvku.

Nejčastěji se používá most. Kroky měření jsou:

- zapněte přístroje a počkejte po dobu stanovenou v technické příručce pro stabilizaci teploty,
- nastavit měření $C_{paralelní}$, měřit na frekvenci 1 kHz,
- provést korekce pro open (otevřený okruh) kabely jsou v poloze jako při měření, ale měřený etalon není připojen,
- provést korekce pro short (krátké spojení), jsou v poloze jako při měření, měřený etalon je připojen a na svorkách tohoto etalonu je proveden zkrat.

Zkratovací spojka má obvyklé rozměry etalonů kapacity a indukčnost podle provedení 10nH až 30nH (v případě potřeby je možné vypočítat) a je možné ji při malých hodnotách měřené kapacity přepočítat jako korekci.

Poznámka: Je velmi důležité, že relativní poloha měřících kabelů se nemění v průběhu procesu měření. Připojení ke čtyřsvorkovému nebo čtyřpárovému mostu je takové, že 4 svorkové připojení koaxiálními kabely je pomocí 2 kusu T kusu převedeno na 2 svorkové. Korekce Open a Short se provádí v místě připojení na svorkách etalonu.

Všechny údaje měření se vztahují k referenční rovině. Ta je na koncích připojovacích kabelů, případně na svorkách měřicích adaptérů.

9.8 Princip kalibrace

Náhradní zapojení etalonů, používaná při kalibraci:

- Dvousvorkové připojení, paralelní náhradní zapojení pro C do $10\mu\text{F}$.
- Třísvorkové připojení, paralelní náhradní zapojení pro C do $10\mu\text{F}$.
- Pětisvorkové připojení, paralelní náhradní zapojení pro C do $10\mu\text{F}$.
- Čtyřpárové připojení, paralelní náhradní zapojení pro C do $10\mu\text{F}$.
- Čtyřpárové připojení, sériové náhradní zapojení pro C nad $10\mu\text{F}$.

K stanovení hodnoty neznámé kapacity (dále jen kapacity) se v laboratoři používá:

Substituční metoda, kdy referenční etalon (C_E) se známou hodnotou kapacity je změřen RLC mostem a stejné měření je provedeno i s kalibrovaným etalonem (C_X) při požadovaném kmitočtu a velikosti měřicího napětí. Hodnota kalibrovaného etalonu se určí ze známé hodnoty referenčního etalonu a poměru změřených kapacit referenční a kalibrované kapacity. Metoda je vhodná pro nejpřesnější měření.

Metoda přímého odečtu kapacity kalibrovaného etalonu na vhodném RLC měřiči (dále jen mostu) – vhodné především pro málo stabilní etalony a dekadý kapacity.

Kalibrovaný etalon se připojí k měřicímu zařízení buď přímo (pokud to konstrukce a typ připojovacích konektorů umožňuje), nebo pomocí koaxiálních kabelů s konektory BNC. Pokud má kalibrovaný etalon jiný typ konektoru, případně i jiný typ připojení (dvou, třísvorkové, ...) než je provedení mostu, je nutno provést převod mezi těmito typy pomocí vhodné redukce.

Most se zapíná v souladu s návodem výrobce nejméně 30 min až 2 hodiny před vlastním měřením a nechá se teplotně ustálit. Při měření na mostech je nutno před vlastním měřením provést korekce na zbytkové parametry mostu a kabelů pomocí přípravků OPEN a SHORT v případě připojení čtyřmi BNC konektory. Při připojení pomocí banánků nebo jiných typů svorek pak pomocí vhodné realizovaného zkratu (SHORT) a rozpojeného obvodu (OPEN) ideálně přímo na vstupních svorkách kalibrovaného etalonu. Např. u klasických cívek s banánky je vhodné nechat můstek připojený a pouze pod svorky přitáhnout zkratovací plech.

9.9 Opakování měření

Doporučuje se provést několik sad měření, kdy každá sada měření sestává nejméně z 10 měření, Pro každou sadu měření zaznamenáváme výsledky měření a podmínky prostředí, v nichž byla provedena měření. Mezi každou sadou měření musí být minimálně dvě hodiny s maximálně pěti sadami měření za den. Vzhledem k tomu, že hmotnosti etalonu kapacity jsou poměrně velké a proto změna teploty v něm je pomalá, doporučuje se minimální čas mezi měřeními v rámci jedné sady měření. Měření se má opakovat nejméně 2 dny.

10 Vyhodnocení kalibrace

Kalibrační list se musí vztahovat pouze k veličinám a výsledkům kalibrací a funkčních zkoušek. Jestliže bylo vypracováno vyjádření o souladu se specifikací, musí být identifikováno, které články specifikace jsou splněny a které nejsou splněny, podle ILAC - G08:03/2009 Pokyny k uvádění shody se specifikací (Guidelines on the Reporting of

Compliance with Specification, 2009).

Pokud je vypracováno vyjádření o shodě se specifikací, přičemž jsou vynechány výsledky měření a s nimi spojené nejistoty, musí laboratoř tyto výsledky zaznamenat a udržovat jejich záznamy pro další možnou potřebu.

Pokud jsou vypracována vyjádření o shodě, musí být vzata v úvahu nejistota měření.

Jestliže se etalon, který se má kalibrovat, bude justovat nebo opravovat, musí být uvedeny výsledky kalibrace získané před a po justování nebo opravě, pokud jsou k dispozici.

Kalibrační list nesmí obsahovat žádné doporučení týkající se intervalu kalibrace s výjimkou doporučení, které bylo odsouhlaseno zákazníkem.

10.1 Postup vyhodnocení

Kalibrační laboratoř vede záznamy, v nichž kromě jiného uvádí:

- konkrétní udání použitého zdroje specifikace,
- měřicí rozsahy, na nichž je kalibrace prováděna,
- náhradní zapojení,
- frekvence a výstupní napětí nastavené na kalibrovaném etalonu,
- nejistota kalibrace.

U velmi přesných měření je výhodou dělat současně sledování změn teploty etalonu.

10.2 Rozhodnutí o výsledku kalibrace

V organizacích, v nichž vedoucí kalibrační laboratoře vykonává současně funkci metrologa organizace, na základě vyhodnocení zkoušených bodů uvedených v kapitole 7 rozhodne vedoucí kalibrační laboratoře, zda kalibrovaný přístroj vyhovuje nebo nevyhovuje všem požadavkům na něj kladeným. Výsledek rozhodnutí je uveden v kalibračním listu.

10.3 Postup v případě neshody

V případě, že kalibrovaný etalon čerpal na některém měřicím rozsahu více než 70 % specifikace, při interních kalibracích rozhoduje vedoucí kalibrační laboratoře, zda je možná a vhodná justace nebo zda je možné přístroj dále provozovat, ale doporučuje se zkrátit dobu do rekalibrace. Při kalibraci externímu zákazníkovi má být zákazník informován.

Nejsou-li splněny výše uvedené podmínky nebo nevyhověl-li kalibrovaný etalon jiným požadavkům, předává vedoucí kalibrační laboratoře objednateli kalibrace návrh na opravu nebo na vyřazení.

Postup uváděný v bodech 10.2 a 10.3 se používá v organizacích, v nichž vedoucí kalibrační laboratoře vykonává současně funkci metrologa organizace. V jiných případech provádí příslušná rozhodnutí zástupce (obvykle metrolog) organizace, která objednala kalibraci etalonu.

10.4 Justování

Mnoho komerčně dodávaných etalonů má možnost dostavení kapacity vestavěným kapacitním trimrem. Každý kapacitní trimr je potenciálně nejméně stabilním prvkem etalonu. Doporučuje se proto, pokud k tomu nevedou závažné důvody, etalon kapacity nejjustovat. Každé analogově provedené justování (kapacitním trimrem) vyžaduje následné sledování ustálení hodnoty kapacity.

10.5 Vyhodnocení měření

Kapacitu kalibrovaného etalonu stanovíme podle vztahu:

$$C_X = P \times C_E$$

Kde:

C_X je hledaná hodnota kapacity,

P je hodnota poměrů střední hodnoty dílčích odečtů C_E a C_X ,
 C_E je aktuální hodnota referenčního etalonu.

Pro nižší požadavky na přesnost je možné použít přímo údaj mostu.

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:

- a) název a adresu kalibrační laboratoře,
- b) pořadové číslo kalibračního listu, očíslování jednotlivých stran, celkový počet stran,
- c) jméno a adresu zadavatele, popř. zákazníka,
- d) název, typ, výrobce a identifikační číslo kalibrovaného etalonu,
- e) datum přijetí teploměru ke kalibraci (nepovinné), datum provedení kalibrace a datum vystavení kalibračního listu,
- f) určení specifikace uplatněné při kalibraci nebo označení kalibračního postupu (v tomto případě KP 4.1.2/18/16),
- g) podmínky, za nichž byla kalibrace provedena (hodnoty ovlivňujících veličin apod.),
- h) měřidla použitá při kalibraci,
- i) obecné vyjádření o návaznosti výsledků měření (etalony použité při kalibraci),
- j) výsledky měření a s nimi spjatou rozšířenou nejistotu měření a/nebo prohlášení o shodě s určitou metrologickou specifikací,
- k) jméno pracovníka, který měřidlo kalibroval, jméno a podpis odpovědného (vedoucího) pracovníka, razítko kalibrační laboratoře.

Vyjádření o nejistotě měření, které podle ILAC-P14:01/2013 bod 6.3 může mít tvar:
„Uvedená rozšířená nejistota měření je součinem standardní nejistoty měření a koeficientu k , který odpovídá pravděpodobnosti pokrytí přibližně 95 %“.

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. 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 je vhodné kalibrační laboratoř zpracovala záznam o měření (s uvedenými měřenými hodnotami) a archivovat jej.

11.2 Protokolování

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 se přístroj opatří kalibrační značkou – štítkem. Kalibrační štítek je třeba na přístroj umístit viditelně.

Na štítku je uvedeno číslo kalibračního listu, datum provedené kalibrace podpis pracovníka, který prováděl kalibraci a identifikace kalibrační laboratoře.

V případě, že je výsledek kalibrace nevyhovující, označí se měřidlo štítkem - NEVYHOVUJE.

V případě, že je výsledek kalibrace nepokrývá měření v celém rozsahu specifikací, použije se štítek s označením NEÚPLNÁ KALIBRACE.

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. Stanovení kalibrační lhůty měřidla je právem a povinností uživatele.

11.4 Převzetí ke kalibraci a předání kalibrovaného etalonu

Převzetí etalonu ke kalibraci stvrzuje pracovník kalibrační laboratoře svým podpisem na kopii objednávky nebo na formuláři k tomu určenému.

Po skončení kalibrace etalonu stvrzuje zákazník svým podpisem na příslušném formuláři nebo do knihy zakázek jeho převzetí.

V obou případech se k podpisům připojují příslušná data.

11.5 Reklamace

V případě, že objednatel kalibrace podá stížnost na provedenou kalibraci, tuto přebírá vedoucí kalibrační laboratoře, v době nepřítomnosti jeho zástupce. Stížnost se může týkat rozsahu nebo správnosti provedené kalibrace, úplnosti nebo správnosti předaného kalibračního listu, úplnosti vráceného etalonu, případně výše fakturace za provedenou kalibraci.

Povinností vedoucího kalibrační laboratoře je analyzovat stížnost, na jejím základě učinit příslušná opatření a s nimi bez prodlení seznámit objednatele kalibrace.

Nebyly-li při analýze shledány závady, je o tom objednatel kalibrace informován také.

Pokud je stížnost oprávněná a jedná se o rozsah nebo správnost kalibrace, provede laboratoř novou, bezplatnou kalibraci a vystaví nový kalibrační list. V ostatních případech oprávněné stížnosti se provedou příslušná opatření.

11.6 Neshodné výsledky kalibrace

Pokud laboratoř zjistí, například při rekalibraci etalonu, že prováděla neshodné kalibrace, je její povinnost provést nápravná opatření a informovat také zákazníka, pro kterého mohly být neshodné práce provedeny, viz také ČSN EN ISO/IEC 17025 bod 4.9 a 4.11.

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 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

Kalibrační postup		Převzal		
Výtisk číslo	Obdržel 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)

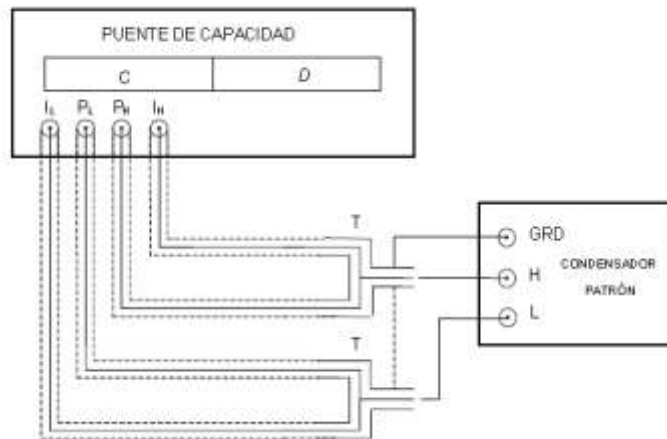
Praktická aplikace postupu stanovení nejistoty. Nejistoty jsou uváděny v souladu s předpisem EA 4/02. Hodnoty v příkladu odpovídají číselně hodnotám v příkladu uvedeném v příloze II lit 4.

Kalibrace 1000 pF kondenzátoru při 1 kHz, (například etalon P 596 Rusko nebo Tetex) na frekvenci 1 kHz a při 1 V, paralelní náhradní zapojení.

Měření bylo provedeno přímým měřením s měřicím můstkem kapacity.

Poznámka - impedance kondenzátoru 1000 pF na 1 kHz je 159 k Ω , jedná se tedy o poměrně vysokoimpedanční měření.

Kalibrace je prováděna pro dvou a třísvorkové zapojení pro *C*, zatímco pro *D* se provádí jen pro dvousvorkové.



Obrázek č. 17: Zapojení pro třísvorkové měření etalonu kapacity podle [4]

Specifikace kalibrovaného kondenzátoru 1 000 pF:

- Jmenovitá hodnota: 1000 pF
- Ztrátový činitel: <0,001 do 1 kHz
- Přesnost při 1 kHz: $\pm (0,5 \% + 5 \text{ pF})$
- Teplotní koeficient: $-140 \cdot 10^{-6} \text{ C}/^\circ\text{C}$
- Dvou nebo třísvorkové zapojení:

Použité přístroje

Přímé měření na digitálním RLC mostu:

Specifikace mostu:

Nejistota měření mostu pro kapacitu: $U_C = 200 \cdot 10^{-6} \text{ C}$

To pro $C = 1000 \text{ pF}$ je: $U_C = 0,2 \text{ pF}$

Ztrátový činitel: $U_G = 0,1\% + 1D$

Protože indikace mostu je ve tvaru: $1 \cdot 10^{-3} \text{ XXX } \mu\text{S}$, je to:

Pevná složka nejistoty, $1 D = 1 \cdot 10^{-6} \mu\text{S}$

Variabilní část specifikace (0,1 %) se měří od střední hodnoty G :

$G = 1,4 \cdot 10^{-3} \mu\text{S}$,

má hodnotu: $x (\mu\text{S}) = 1,4 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-1} / 10^2 \mu\text{S} / = 1,4 \cdot 10^{-6} \mu\text{S}$

Pak:

$U_G = 2,4 \cdot 10^{-6} \mu\text{S}$.

V relativních hodnotách je to:

$U_G \% = 2,4 \cdot 10^{-6} \cdot 10^2 \mu\text{S} / 1,4 \cdot 10^{-3} \% = 0,17\%$.

Frekvence měření mostu: nastavitelná mezi 10 Hz až 100 kHz

- měřicí napětí: nastavitelné mezi 5 mV a 1,275 V
- měřicí rychlost: nastavitelné nízká, střední a vysoká
- rozlišení mostu: $4 \frac{1}{2}$ číslice pro C. $3 \frac{1}{2}$ číslice D

Maximální přesnost je pro nastavení rychlosti na nízkou rychlost měření (slow).

Nejistoty uvedené v kalibračním listě mostu jsou pro nízké rychlosti měření (slow).

Nastavení nuly mostu

Předem je nutno změřit nebo opravit nastavení nuly mostu:

K tomu je zapnuto nulování mostu na open a short zapnuto a nastaveno etalony Keysight

Open - Otevřený obvod:

Eliminuje zbytkové a vodivosti v paralelním náhradním zapojení.
Etalon pro open, například Keysight 42090A.

Short - nakrátko:

Eliminuje účinky indukčnosti a distribuované sériové odpory.
Etalon short, například Keysight 42091A.

Kalibrace mostu byla provedena:

Základní nejistota kalibrace kapacity, v daných podmínkách, je:

$$U_{ccal} = \pm 50 \cdot 10^{-6} \text{ C.}$$

To je pro 1000 pF:

$$\pm 50 \cdot 10^{-3} \text{ pF.}$$

Tato hodnota zahrnuje odchylku od nominální hodnoty nebo korekci provedenou v průběhu kalibrace.

Pro ztrátový činitel:

$$U_D = \pm 0,000 \text{ 05.}$$

Nejistota kalibrace mostu pro $k = 1$

Jak to bylo uvedeno:

$$u_{2C3T} = U_0(C_x) / k = 50 \cdot 10^{-6} \text{ C} / 2 = 25 \cdot 10^3 \text{ pF.}$$

$$u_{2.C2T} = U_0(C_x) / k = 50 \cdot 10^{-6} \text{ C} / 2 = 25 \cdot 10^3 \text{ pF.}$$

$$u_{2.D 2T} = U_0(D_x) / k = 5 \cdot 10^{-5} / 2 = 2,5 \cdot 10^{-5}.$$

Okolní laboratorní podmínky (podmínky prostředí)

- Teplota: $23 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C.}$
- Relativní vlhkost vzduchu: $50 \% \pm 10 \%.$

Podmínky měření

$$f = 1 \text{ kHz}$$

$$U = 1 \text{ V}$$

Poznámka: (důležité) - pokud je kondenzátor v provedení s plynným dielektrikem, udáváme také polohu kondenzátoru (svorky směrem nahoru nebo svorky směrem na bok).

Sběr dat a získání hodnoty měření

Bylo provedeno 10 měření pro 2 svorkové C a 10 měření pro třisvorkové C a jedna sada měření pro D . Série byla provedena během jednoho dne dopoledne. Mezi sadami měření byly intervaly 30 minut. Hodnota C_0 byla nastavena vždy na začátku sady měření a kontrolována na konci téže sady měření.

Hodnoty D se získají z měřeného G za použití vztahu:

$$D_x = G_x / \omega C_x$$

Výpočet standardní nejistoty kalibrace

Tabulka pro (3T) a (2T) měření kapacity a tabulka pro ztrátového činitele, ukazují různé složky nejistoty přítomné v provedené kalibraci. To pak umožňuje získat v nich obsažené různé hodnoty.

Složka nejistoty typu A vlivem opakovatelnosti:

Standardní nejistota A je stanovena jako standardní odchylka počtu kroků prováděných podle vzorce:

$$u(C_{x,c}) = s(C_{x,i}) / \sqrt{n}$$

nebo pro kapacitu:

$$u_{1C3T} = 0,0696 / \sqrt{10} = 22 \cdot 10^{-3} \text{ pF},$$

$$u_{1C2T} = 0,134 / \sqrt{10} = 42 \cdot 10^{-3} \text{ pF},$$

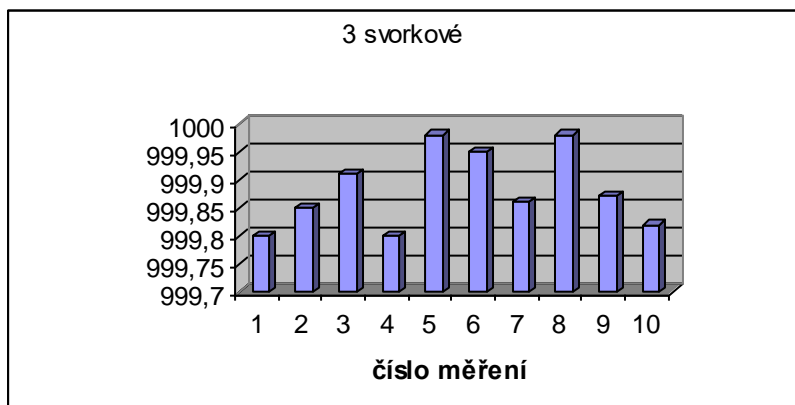
a podobně pro ztrátového činitele:

$$u_{1DX2T} = 1,52 \cdot 10^{-5} / \sqrt{10} = 0,48 \cdot 10^{-5}.$$

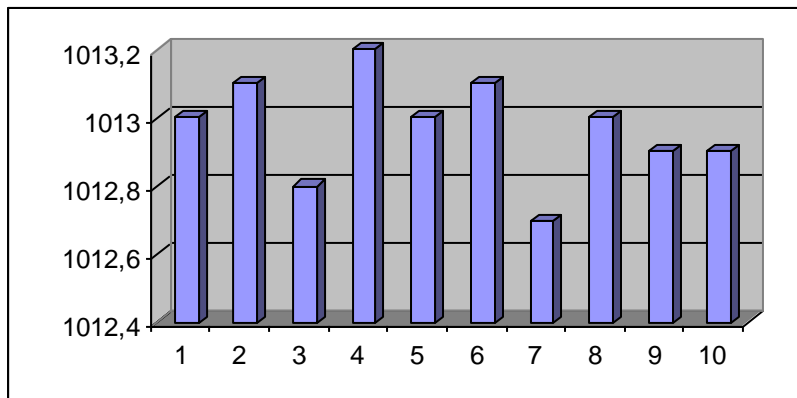
Číslo měření	C třísvorkové pF	C dvousvorkové pF	D dvousvorkové ---
1	999,85	1013,0	0,000 190
2	999,91	1013,1	0,000 178
3	999,80	1012,8	0,000 169
4	999,98	1013,2	0,000 203
5	999,95	1013,0	0,000 207
6	999,86	1013,1	0,000 191
7	999,98	1012,7	0,000 185
8	999,87	1013,0	0,000 175
9	999,82	1012,9	0,000 218
10	999,80	1012,9	0,000 191
$\bar{\delta G_{x,c}} // \bar{D_{x,c}}$	999,882	1012,97	0,000 191
$s(G_{x,i}) // s(D_{x,i})$	0,0696	0,134	$1,52 \cdot 10^{-6}$

Tabulka č. 1: Naměřené hodnoty

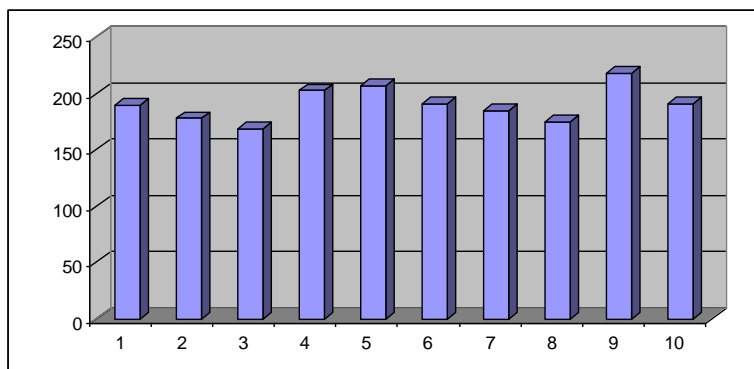
Jednotlivá měření zobrazená v grafech



Obrázek č. 18: Třísvorkové měření C



Obrázek č. 19: Dvousvorkové měření C



Obrázek č. 20: Ztráty, svislá osa $\cdot 10^6$

Kontrola

Rozptyl měření, který ukazují grafy, neukazuje žádnou systematickou složku driftu: vyhovuje, sada měření se může použít.

Pokud je pro měření sestaven program, doporučuje se uvážit použití Chauvenetova kritéria pro vyloučení odlehlých výsledků měření. Také při aplikaci Chauvenetova kritéria jsou všechny výsledky jednotlivých měření použitelné.

Poznámka: Pro etalon s plynným dielektrikem s hodnou do 1000 pF často nemívá opakované měření charakter šumu, ale typu tzv. náhodné procházky a je nutné místo nejistoty typu A použít hodnocení podle mezí této náhodné procházky.

Nejistota měření kapacity

S využitím korekce indikace měření složek:

$$U_{3 \delta C_{x,c}} = U_{SPEC.Cx} / \sqrt{3} = 200 \cdot 10^{-6} \text{ C} / \sqrt{3} = 115,5 \cdot 10^{-3} \text{ pF}$$

Nejistota pro měření ztrátového činitele:

platí, že:

$$u^2(D_x) = u^2(G_x) + u^2(C_x)$$

Hodnota po dosazení je:

$$u^2(D_x) = 0,17^2 / 3 + 0,02^2 / 3 = 0,17^2 / 3,$$

tj.: nebo

$$u(D_x) = U(G_x) = (0,17 / \sqrt{3}) \% = 0,1 \%,$$

a v absolutních jednotkách s průměrnou hodnotou získanou v tabulce:

$$u_3(\delta D_{x,c})_{\text{spec}} = 0,019 \cdot 10^{-5}.$$

Složka vlivem rozlišení měřicího přístroje " $u_{\text{res}}(\delta_{R x, m})_{\text{res}}$ ":

Měřicí most má pro kapacitu rozlišení 4 ½ číslice na rozsahu pro měření: třisvorkové měření ($C < 1\,000$ pF), to je rozlišení $10 \cdot 10^{-3}$ pF, dvousvorkové měření ($C > 1000$ pF) je rozlišení $100 \cdot 10^{-3}$ pF.

Kalibrace třisvorkově:

$$u_4(\delta C_{x,c})_{\text{res}} = 0,5_{\text{res}} / \sqrt{3} = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ pF}.$$

Kalibrace dvousvorkově:

$$u_4(\delta C_{x,c})_{\text{res}} = 0,5_{\text{res}} / \sqrt{3} = 29 \cdot 10^{-3} \text{ pF}.$$

Pro ztrátového činitele:

$$u_4(\delta C_{x,c})_{\text{res}} = 0,5_{\text{res}} / \sqrt{3} = 0,5 \cdot 1 \cdot 10^{-6} / \sqrt{3} = 0,29 \cdot 10^{-5} \mu\text{S}.$$

Složka vlivem teploty laboratoře na kalibrovaný kondenzátor:

Pro hodnoty laboratorní teploty a teplotní koeficient kondenzátoru jak je uvedeno ve specifikaci a v podmínkách měření:

$$u(\sqrt{C_{x,c}})_T = \pm \Delta T \alpha_T(Cx) \cdot 10^{-6} \cdot C_{x,m} = \pm 2 \cdot 10^{-6} \cdot 140 \cdot 10^3 \text{ pF} = 280 \cdot 10^{-3} \text{ pF}$$

a nejistota této složky, za předpokladu, že je trojúhelníkové rozložení:

$$u_5(\delta C_{x,c})_T = U(\delta C_{x,c})_T / \sqrt{6} = 280 \cdot 10^{-3} / \sqrt{6} = 114 \cdot 10^{-3} \text{ pF}.$$

Přehled nejistot (C_x) pro třisvorkové měření kapacity

Veličina X_i	odhad x_i pF	nejistota $u(x_i)$ 10^{-3} pF	rozložení	koeficient citlivosti c_i	příspěvek k nejistotě $u_i(y) = c_i(x_i)$ 10^{-3} pF
$C_{x,c}$	999,882	22	normální	1	22
$(\delta C_{x,c})_{\text{esp}}$		25	normální	1	25
$(\delta C_{x,c})_{\text{res}}$	0	115,5	pravoúhlé	1	115,5
$(\delta C_{x,c})_T$	0	2,9	pravoúhlé	1	2,9
$(\delta C_{x,c})$	0	114	trojúhelníkové	1	114
$\Delta C_{x,c}$	$-118 \cdot 10^{-6}$				166

Poznámka: Citlivostní koeficienty se vypočítají jako odvozeny parciální derivace funkce " C_x, c " pro každou hodnotu veličiny hodnocené v uvažovaném kalibračním bodě, za předpokladu, že je použit uvedený postup kalibrace, Tyto koeficienty nabývají hodnoty

vedené tabulce, přičemž jejich hodnoty jsou +1 nebo -1.
Poznámka: $u_i(y) = c_i u(x_i)$.

Přehled nejistot (C_X) pro dvousvorkové měření kapacity

Veličina X_i	odhad x_i pF	nejistota $u(x_i)$ 10^{-3} pF	rozložení	koeficient citlivosti c_i	příspěvek k nejistotě $u_i(y) = c_i(x_i)$ 10^{-3} pF
$C_{X,c}$	1012,97	42	normální	1	42
$(\delta C_{X,c})_{esp}$		25	normální	1	25
$(\delta C_{X,c})_{res}$	0	115,5	pravoúhlé	1	115,5
$(\delta C_{X,c})_T$	0	29	pravoúhlé	1	29
$(\delta C_{X,c})$	0	114	trojúhelníkové	1	114
$\Delta C_{X,c}$	+12,97				172

Poznámka: Citlivostní koeficienty se vypočítají jako odvozeny parciální derivace funkce " C_X, c " pro každou hodnotu veličiny hodnocené v uvažovaném kalibračním bodě, za předpokladu, že je použit uvedený postup kalibrace, Tyto koeficienty nabývají hodnoty uvedené tabulce, přičemž jejich hodnoty jsou +1 nebo -1.

POZNÁMKA: $u_i(y) = c_i u(x_i)$.

Přehled nejistot (D_X) dvousvorkové měření ztrát

Veličina X_i	odhad x_i $\cdot 10^{-5}$	nejistota $u(x_i)$	rozložení	koeficient citlivosti c_i	příspěvek k nejistotě $\cdot 10^{-5}$ $u_i(y) = c_i(x_i)$
$D_{X,c}$	0,000191	0,48	normální	1	0,48
		2,5	normální	1	2,5
$(\delta D_{X,c})_{esp}$	0	0,019	pravoúhlé	1	0,019
$(\delta D_{X,c})_{res}$	0	0,03	pravoúhlé	1	0,03
$D_{X,c}$	0,000191				2,55

Poznámka: Citlivostní koeficienty se vypočítají jako odvozeny parciální derivace funkce " D_X, c " pro každou hodnotu veličiny hodnocené v uvažovaném kalibračním bodě, za předpokladu, že je použit uvedený postup kalibrace, Tyto koeficienty nabývají hodnoty uvedené tabulce, přičemž jejich hodnoty jsou +1 nebo -1.

POZNÁMKA: $u_i(y) = c_i u(x_i)$.

Výpočet kombinované standardní nejistoty kalibrace

Pro třísvorkové měření:

$$u_c(C_{X,c}) = \sqrt{[u_1(y)]^2 + [u_2(y)]^2 + [u_3(y)]^2 + [u_4(y)]^2 + [u_5(y)]^2} =$$

$$= \sqrt{(22^2 + 25^2 + 116^2 + 3^2 + 114^2) \cdot 10^{-6}} = \sqrt{27\,579} \cdot 10^{-6} = 166 \cdot 10^{-3} \text{ pF}$$

pro dvousvorkové měření

$$u_c(C_{X,c}) = \sqrt{[u_1(y)]^2 + [u_2(y)]^2 + [u_3(y)]^2 + [u_4(y)]^2 + [u_5(y)]^2} =$$

$$= \sqrt{(42^2 + 25^2 + 116^2 + 29^2 + 114^2) \cdot 10^{-6}} = \sqrt{29\,682} \cdot 10^{-6} = 172 \cdot 10^{-3} \text{ pF}.$$

Ve vztazích je vidět, že dominantní komponenty nejistoty jsou ty, které odpovídají specifikaci měření kapacity na mostu.

Pro měření ztrátový činitel je získaná hodnota:

$$\begin{aligned} u_c(D_{x,p}) &= \sqrt{[u_1(y)]^2 + [u_2(y)]^2 + [u_3(y)]^2 + [u_4(y)]^2} = \\ &= \sqrt{[0,48]^2 + [2,5]^2 + [0,019]^2 + [0,03]^2} \cdot 10^{-5} = \\ &= 2,55 \cdot 10^{-5}. \end{aligned}$$

Výpočet rozšířené nejistoty

Ta je stanovena pro měření kapacity, jako je například:

$$U(C_{x,c}) = U(\Delta C_{x,c}) = k \cdot u(C_{x,c})$$

$$U(D_{x,c}) = k \cdot u(D_{x,c}).$$

Udává se pro interval spolehlivosti s úrovní spolehlivosti 95 % (95,45 %).

Hodnota k pro tuto úroveň spolehlivosti se získá ze stanovení efektivního počtu stupňů volnosti, v souladu s postupem uvedeným v odstavci 6.4 Příloha G Příručky k vyjádření nejistoty měřen GUM [8]. Podle tohoto oddílu a použitím Welch-Satterthwaitova vzorce:

$$\nu_{\text{eff}} = [u_c(y)]^4 / \sum [u_i(y)]^4 / \nu_i$$

Po dosazení:

$$\nu_{\text{eff}}[u_c(y)] = 166^4 \cdot 10^{-12} / (22^4/9 + 25^4/9 + 116^4/\infty + 3^4/\infty + 114^4/\infty) \cdot 10^{12} = 10\,936,$$

Rozšířená nejistota měření pro kalibraci pak je:

Třísorkové měření:

$$U_c(C_{x,m}) = k \cdot u_c(C_{x,m}) = 2 \cdot 166 \cdot 10^{-3} \text{ pF} = 0,332 \text{ pF}$$

a dvousorkové měření:

$$U_c(C_{x,m}) = k \cdot u_c(C_{x,m}) = 2 \cdot 172 \cdot 10^{-3} \text{ pF} = 0,344 \text{ pF}.$$

Výsledná nejistota může být vyjádřena také jako:

Třísorkové měření:

$$U_c(C_{x,m}) = 332 \cdot 10^{-6} \cdot C_{x,p},$$

a dvousorkové měření:

$$U_c(C_{x,m}) = 344 \cdot 10^{-6} \cdot C_{x,p}.$$

pro hodnotu ztrátového činitele je výsledek pro stupně volnosti:

$$v_{\text{eff}} = [u_c(y)]^4 / \sum [u_i(y)]^4 / v_i =$$

$$= 2,55^4 \cdot 10^{-10} / (0,48^4/9 + 2,5^4/9 + 0,019^4/\infty + 0,03^4/\infty) \cdot 10^{-10} =$$

$$= 9,7.$$

$$u_c(D_{x,c}) = \sqrt{[u_1(y)]^2 + [u_2(y)]^2 + [u_3(y)]^2 + [u_4(y)]^2} =$$

$$= \sqrt{[0,48]^2 + [2,5]^2 + [0,019]^2 + [0,03]^2} \cdot 10^{-5} =$$

$$= 2,55 \cdot 10^{-5}.$$

Zadání této hodnoty v tabulce G.2 přílohy G příručky pro vyjádření nejistoty GUM, reference [8], pro stejnou úroveň spolehlivosti 95 % dostaneme hodnotu k :

$$k = 2,28.$$

Rozšířená nejistota měření kalibrace pro ztrátový činitel pak je:

Tyto výsledky předpokládají, že rozložení pro výslednou pravděpodobnost výstupní veličiny jsou normálního rozdělení, které je v těchto případech mohou být přijímány jako konvoluce dvou distribucí obdélníkového a trojúhelníkového a vedou k vlivu na zbývající tři, dva normální a jeden trojúhelníkový, mohou vest v souhrnu k normálnímu rozložení.

Vyjádření výsledků kalibrace

Kalibrační výsledek je nastaven jako hodnota absolutní kalibrace kondenzátoru a jeho nejistoty, podle kritérií stanovených v pokynech pro vyjádření nejistoty měření, reference [8] s ohledem na zaokrouhlení a počet číslic:

třísvorkové měření:

$$C_x, 3sv = 999,88 \text{ pF} \pm 0,33 \text{ pF}.$$

To může být také vyjádřeno jako rozdíl od nominální hodnoty:

$$\Delta C_x, c = -0,12 \pm 0,33 \text{ pF pF}.$$

Dvousvorkové měření:

$$C_x, 2sv = 1\,012,97 \text{ pF} \pm 0,35 \text{ pF}$$

To může být také vyjádřeno jako rozdíl od nominální hodnoty:

$$\Delta C_x, c = +12,97 \pm 0,35 \text{ pF pF}$$

Ztrátový činitel:

$$D_{x,c} = 0,000\,191 \pm 0,000\,058$$

Také v tomto případě lze uvést, že:

$$D_{x,c} < 0,000\,25.$$

Ve všech třech případech by mělo být upřesněno, že rozšířená nejistota je udaná pro standardní nejistoty vynásobené koeficientem rozšíření $k = 2$, což odpovídá hladině

spolehlivosti 95,45% pro normální rozložení.

Interpretace výsledků

K dalšímu použití kondenzátoru je třeba uvažovat:

- požadovanou nejistotu kalibrace,
- dlouhodobou stabilitu a drift,
- teplotní koeficient.
- historii kalibrace.

Z toho pak vyplyne, zda je nejistota pro doporučené kalibrace postačující.

Kalibrační výsledky se používají pro určení, zda chování kondenzátoru je správné a v souladu s účelem.

Pokud platí že:

- získaná nominální odchylka překročí specifikace výrobce,
- se ukáže nadměrný drift mezi kalibracemi.

Pak můžeme říci, že chování není správné a kondenzátor by měly být oddělen od normálního použití.

Rekalibrační doba

Obecně pro všechny kondenzátory je 12 měsíců. Tento interval se může měnit zejména v závislosti na:

- požadované přesnosti,
- použití, pro které je kondenzátor určen,
- je-li pozorován dlouhodobý drift.

Při vysokých požadavcích na kvalitu kondenzátorů použitých pro kalibraci mostů v laboratoři pro kalibraci pro měření kapacity, nejprve během prvních dvou nebo třech kalibrací se doporučuje snížit tuto dobu na šest měsíců, za účelem získání informací o jejich stabilitě a stárnutí. Pro kondenzátory se střední a nízkou přesností, a v závislosti na výsledcích pozorovaných u předchozí kalibrace, lze toto období prodloužit až na 24 měsíce.

V každém případě je uživatel vždy povinen po rekalibraci kondenzátoru prověřit období rekalibrace a revidovat je, je-li to nutné, vzhledem k výsledkům týkajícím se provedené kalibrace.

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

Tento kalibrační postup byl zpracován, revidován a posouzen v rámci úkolu rozvoje metrologie, řešeném pro Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví pod číslem VII/1/16. Nesmí být rozmnožován ani předáván jiným organizacím a subjektům bez souhlasu ÚNMZ a ČMS.

Kalibrační postup je třeba považovat za vzorový. Doporučuje se, aby jej organizace přizpůsobila svým požadavkům s ohledem na své metrologické vybavení a konkrétní podmínky. V tomto případě je třeba kalibrační postup znovu validovat.

16 Přílohy

KONDENZÁTOR A JEHO VLASTNOSTI, ETALONY C

Ideální kondenzátor

Kondenzátor je charakterizován fyzikální veličinou zvanou elektrická kapacita C . Jednotkou kapacity je farad F.

1 Farad - je kapacita elektrického kondenzátoru, který při napětí 1 voltu pojme náboj 1 coulombu. Kondenzátor je charakterizován závislostí mezi elektrickým napětím a elektrickým nábojem, tj. voltcoulombovou (V-C) charakteristikou $u = f(q)$:

$$q = Cu \quad , \quad (1)$$

$$C_d = \frac{dq}{du} \quad . \quad (2)$$

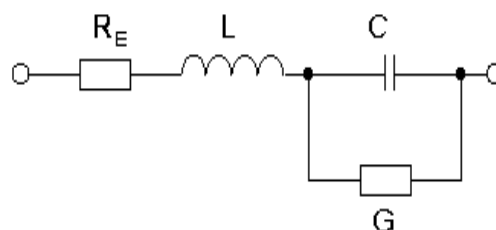
Vztah mezi časově proměnnými okamžitými hodnotami napětí $u(t)$ a proudem je u ideálního kondenzátoru dán rovnicemi:

$$i(t) = C \frac{du(t)}{dt} \quad , \quad (3)$$

Tento obvodový prvek patří mezi pasivní dvojpóly. Je schopen též akumulovat elektromagnetickou energii ve formě pole, u klasického kondenzátoru je to elektrické pole. Fázový posuv mezi napětím a proudem je -90° .

Reálný kondenzátor

Reálný kondenzátor při nižších kmitočtech (pokud rozměry kondenzátoru a délky cest, jimiž procházejí proudy, zůstávají zanedbatelné vzhledem k odpovídajícím vlnovým délkám $\lambda = c/f$) lze s postačující přesností nahradit obvodem podle obr. V něm C představuje skutečnou kapacitu kondenzátoru (tedy jeho hlavní parametr), R_E sériový odpor systému elektrod a přívodů, L indukčnost systému elektrod a přívodů a G v sobě zahrnuje dielektrické ztráty a vodivost dielektrika kondenzátoru (jeho parametry zbytkové). Náhradní obvod kondenzátoru má tedy dva ztrátové členy R_E a G .



Obrázek č. 21: Náhradní obvod reálného kondenzátoru.

Celková impedance obvodu na obrázku je:

$$Z = R_E + j\omega L + \frac{G - j\omega C}{G^2 + \omega^2 C^2} = R_S + jX \quad (4)$$

a její ekvivalentní sériové složky jsou zakreslené v obr. č. 22:

$$R_S = R_E + \frac{G}{G^2 + \omega^2 C^2} \quad (5) \quad , \quad X = \omega \left(L - \frac{C}{G^2 - \omega^2 C^2} \right) \quad (6)$$

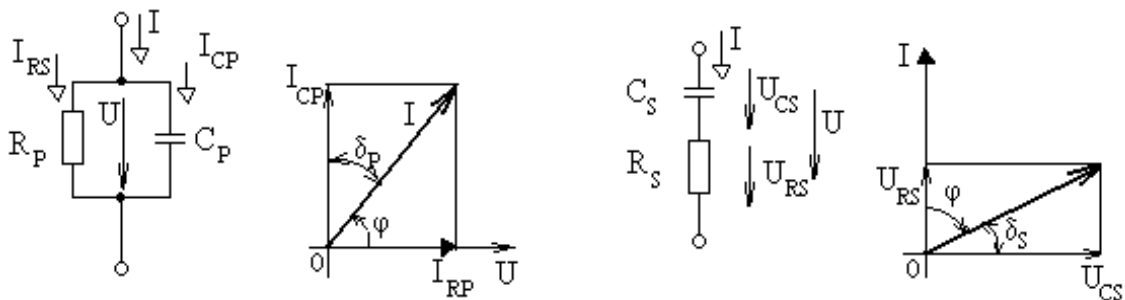
Aby kondenzátor představoval kapacitní vlastnosti, musí být složka $X < 0$. To je splněno, když $C > LG^2$. Potom existuje vlastní rezonanční kmitočet kondenzátoru ω_r , při němž $X = 0$:

$$\omega_r = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{G^2}{C^2}} \quad (7)$$

$$C_s = \frac{G^2 + \omega^2 C^2}{\omega^2 [C - L(G^2 + \omega^2 C^2)]} \quad (8)$$

Nad rezonančním kmitočtem se součástka již nechová jako kondenzátor

Ztrátový činitel $tg \delta$ je mírou výkonových ztrát reálného kondenzátoru, které jsou způsobeny odporem přívodů a vlastnostmi dielektrika. Veškeré ztráty se zahrnují do ekvivalentního ztrátového odporu, který může být připojen buď paralelně, nebo sériově ke kondenzátoru obrázek č. 22.



Obrázek č. 22: Náhradní obvod reálného kondenzátoru. Vlevo s paralelním ekvivalentním ztrátovým odporem, vpravo se sériovým ekvivalentním ztrátovým odporem.

Ztrátový činitel vyjádříme vztahem:

- paralelní zapojení $tg \delta = \frac{I_{RP}}{I_{CP}} = \frac{1}{\omega R_P C_P} \quad (9)$

- sériové zapojení $tg \delta = \frac{U_{RS}}{U_{CS}} = \omega R_S C_S \quad (10)$

Při udaném $tg\delta$ je možno stanovit z těchto vztahů parazitní ztrátový odpor R_p nebo R_s .

Materiály pro etalony kapacity

Vlastnosti etalonů kapacity jsou do značné míry určeny vlastnostmi dielektrika a elektrod.

Křemenné dielektrikum

Závisí na čistotě křemenného skla, kvalitní křemeny zajišťují teplotní závislost kolem $10 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$, stabilitu kolem $0,4 \text{ ppm/rok}$ a D asi $0,000\ 001$. Jsou vhodné pro hodnoty kapacity do 100 pF .

Invarové elektrody

Díky své malé teplotní roztažnosti umožňuje Invar konstruovat kondenzátory s teplotní závislostí do $5 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$, stabilitou lepší než 1 ppm/rok a D okolo $0,000\ 001$. Většinou jsou konstruovány jako hermetické etalony plněné dusíkem. Jsou vhodné pro hodnoty kapacity do 1000 pF .

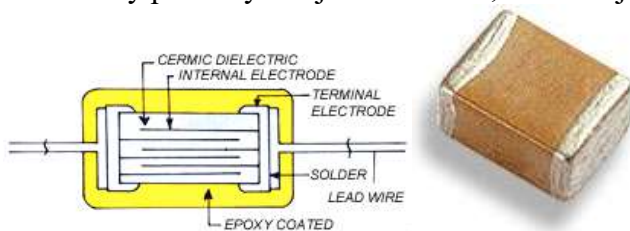
Slídivé dielektrikum

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 $35 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$. Jsou vhodné pro hodnoty kapacity do $1\ 000\ 000 \text{ pF}$.

Keramické dielektrikum

Keramické kondenzátory jsou teplotně stálé a nahradily slídivé kondenzátory. Mají teplotní závislost do $35 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$, stabilitu menší než 10 ppm/rok , D okolo $0,0001$. Jsou vhodné pro hodnoty kapacity do $1\ 000\ 000 \text{ pF}$.

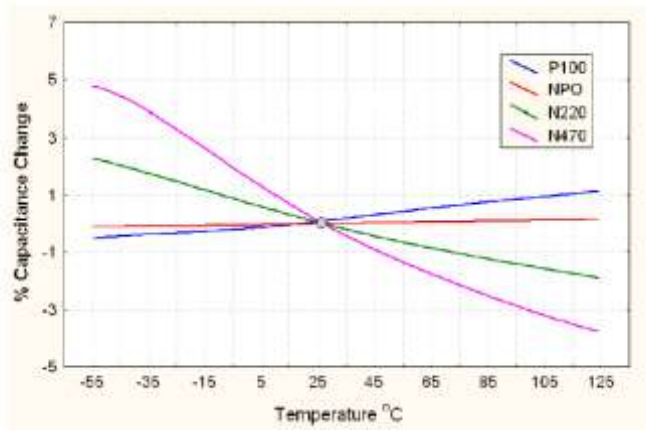
Dielektrikum pro velmi kvalitní kondenzátory tvoří keramika C0G (NPO). Pro hodnoty nad stovky pF se vyrábí jako vrstvé, které mají až 80 vrstev, jak ukazuje obr. č. 23.



Obrázek č. 23: Konstrukce a vzhled keramického kondenzátoru

Hodnoty nad 1 nF jsou obtížně vyrobitelné, a proto se vyskytují velmi vzácně. Kondenzátory C0G (NPO) se řadí do skupiny keramických dielektrik typu I. Základní materiál je oxid TiO_2 . Dielektrická konstanta je menší než 150 .

Malým přídavkem ferroelektrických oxidů jako CaTiO_3 nebo SrTiO se získají materiály, jejichž dielektrická konstanta je až kolem 500 .



Obrázek č. 24: Vlastnosti keramických dielektrik

Obr. č. 24 ukazuje vlastnosti jednotlivých typů dielektrik třídy I. P značí pozitivní, N negativní sklon charakteristiky teplotní závislosti. Číslo značí velikost teplotní závislosti v ppm/°C, tedy pro “N220” – 220 ppm/°C, a pro “P100” + 100 ppm/°C. “NPO” označení “O” je použito místo “0”, a vyjadřuje stabilní s teplotou.

Keramické kondenzátory založené na Ba₂TiO₃ mají dielektrika třídy II. Výhodou je velká dielektrická konstanta (až 18 000). Kondenzátory jsou však mnohem méně stabilní a pro použití v metrologii se nehodí, například kondenzátor z hmoty X7R má 15 % nelineární změnu kapacity pro –55 °C až +125 °C a pro kondenzátory z hmoty Z5U je teplotní závislost velmi velká, viz obr. 24.

Časová stabilita keramických dielektrik, která obsahují bariumtitanát (to je hlavně X7R a Z5U) je předpověditelná. Po ochlazení z teploty Curie bodu (125°C) klesá dielektrická konstanta v závislosti na čase logaritmicky, to znamená, že změna za 0 hod až 1 hod po ochlazení je stejná jako za 10 hod až 100 hod, pak za 100 hod až 1000 hodin atd. Výchozí stav lze zopakovat nahřáním kondenzátoru na 150 °C po dobu 1 hodiny. Pro keramiku COG je časová stabilita velmi velká a závisí na více vlivech.

Fóliové kondenzátory - základní informace

Pro realizaci etalonu kapacity od 1 μF do 100 μF 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 kapacity 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. Následující tabulka uvádí porovnání parametrů kondenzátorů.

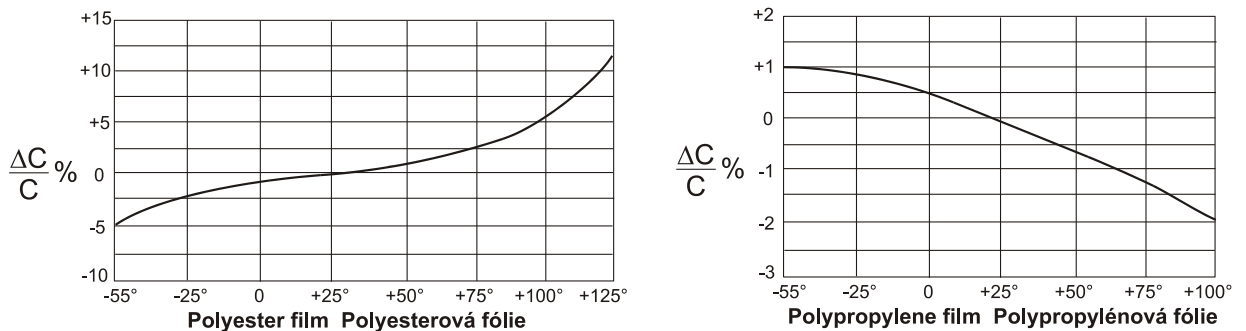
Dielektrické vlastnosti kondenzátorů s folií MKT nebo MKP

Typ	MKT	MKP
Relativní dielektrická konstanta ε	3,2	2,2
DF na 1 kHz, $tg \delta$	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 [$^{\circ}C$]	100 - 125	85 - 100
T_c [ppm/ $^{\circ}C$], [$10^{-6}/^{\circ}C$]	+400, ± 200	-200, ± 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 α_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 na obr. č. 25.



Obrázek č. 25: Teplotní závislost kapacity fóliových kondenzátorů

Ztrátový činitel vyjadřuje ztráty v materiálu dielektrika, v odporu kontaktů a izolačním odporu. Ztrátový činitel je poměr mezi odporovou a kapacitní složkou impedance kondenzátoru, vyjádřený jako $tg \delta$.

Polystyrenové dielektrikum

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 $^{\circ}C$) je vytlačila z nových konstrukcí. Některé výrobní typy, jako na obr., měly vývody jen vložené a nepřivařené k fólii a časem, zvláště když nebyly dostatečně hermetické, se zhoršoval jejich ztrátový

činitel.



Obr. č. 26: 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.

VLASTNOSTI ETALONŮ KAPACITY

Orientační přehled

Kalibrace se provádí v laboratorních podmínkách při teplotě $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$.

Pro mosty základní přesnosti 0,05 % a lepší je referenční teplota $(23 \pm 1)^\circ\text{C}$.

Přesnost měření teploty má být lepší než $0,5^\circ\text{C}$.

Teplotu měříme kalibrovaným teploměrem s rozlišením $0,1^\circ\text{C}$ v místě kalibrace. Rozhodující je teplota použitého etalonu. Při měření je třeba respektovat nejistotu stanovení teploty a teplotní závislost etalonů. Pokud není změřena, lze orientačně předpokládat následující hodnoty teplotní závislosti:

- | | |
|--------------------------------------|------------------------------|
| • invarové plněné dusíkem | 5 ppm / $^\circ\text{C}$, |
| • hliníkové, mosazné, izolace vzduch | 50 ppm / $^\circ\text{C}$, |
| • slída, keramika NPO | 35 ppm / $^\circ\text{C}$, |
| • fóliové, podle druhu fólie | 200 ppm / $^\circ\text{C}$. |

Etalony malých hodnot kapacity od zlomků pF do 10000 pF (100000 pF) jsou většinou s plynným dielektrikem (vzduch, dusík, argon). Nejznámější jsou konstrukce PTB (Prof Giebe) a Gen Rad. Velmi malé hodnoty kapacity bývají určeny clonkami s otvorem. Malé hodnoty C bývají provedeny s válcovými nebo deskovými elektrodami. Elektrody mohou být z hliníku, mosazi (stříbřené), u kvalitních typů z invaru. Izolátory keramika nebo křemenné sklo.

Pro hodnoty od 10 000 pF do 1 μF se užívá kvalitní, vybraná slída. I tyto etalony mohou mít velmi dobré parametry. Nad 1 μF je nutné z cenových a rozměrových důvodů přecházet na fólie z plastických hmot a na etalony s převodními transformátory (GR 1417). Pro navazovací etalon 10 pF je nejvhodnější izolace křemenným sklem. Křemenný kondenzátor GR 1408 se již nevyrobí, ale řada kondenzátorů této konstrukce byla realizována v TESLA Brno.

Pro vf kmitočty byly určeny dovousvorkové koaxiální kondenzátory GR 1405 a GR 1406, hodnoty 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500 pF a 1nF. Původně byly určeny pro kalibraci HP 4271B, ale již se nevyrobí. Kapacita byla určena v referenční rovině konektoru GR 950. Kapacity do 20 pF měly změnu menší než 0,1 pro frekvence min. do 30 MHz.

Etalony kapacity do 10 000 pF s plynným dielektrikem

Etalony kapacity do 1000 pF, maximálně do 10 000 pF lze vyrobit s plynným dielektrikem při zachování dostatečně malých rozměrů. Tyto etalony mají vlivem plynného dielektrika malé ztráty. Dělí se podle konstrukce na přesné etalony, které se vyrábí hermetické, plněné suchým plynem, obvykle dusíkem a s elektrodami z invaru s velmi malou teplotní závislostí.

Méně přesné etalony mají elektrody mosazné nebo hliníkové a nejsou hermetické.

PŘESNÉ ETALONY**Etalony GENRAD (QUADTECH), IET Lab**

Etalony kapacity firmy GENRAD, později zvané QUADTECH a nyní vyráběné jako kondenzátory IET Labs. Patří mezi nejstabilnější etalony kapacity. Vyrábí se hodnoty 1pF, 10 pF, 100 pF a 1000 pF. Jsou plněné dusíkem, elektrody jsou z invaru.

Používají se obvykle ve svislé poloze v polystyrénovém krytu.

Konektory mají typu GR 874 nebo BNC.

Provedení je třísvorkové, ale jeden konektor není uzemněn!! Nutno propojit při měření.

Při přesném měření je nutné udat teplotu přímo na etalonu.

Při měření na kvalitním mostě u těchto etalonů převládá nad vlivem šumu drift typu náhodné procházky a vliv vyrovnávání teploty částí etalonu, která se stále mění v malém rozmezí po nepravidelné křivce.

Etalony General Radio (nyní IET Labs)

Velmi stabilní a velmi drahé etalony 1 pF, 10 pF, 100 pF a 1000 pF. Jsou provedeny s invarovými elektrodami, tím je potlačena teplotní závislost na hodnoty menší než 5 ppm/°C, dielektrikem je dusík, jsou hermetické (obr. č. 27).



Obrázek č. 27: Kondenzátory IET Labs plněné dusíkem s invarovými elektrodami

MÉNĚ PŘESNÉ ETALONY**Válcové etalony Ulrich a P597**

Jsou to staré, rozměrné etalony válcové konstrukce, používané s podstavcem. Vyskytují se v ČR v omezeném počtu a nejsou perspektivní pro širší frekvenční rozsah. Dielektrikum je vzduch, elektrody jsou z mosazi nebo hliníku. Kalibrují se třísvorkově i s podstavcem.

Válcově provedené etalony používané s podstavcem jsou v ČR k dispozici hlavně od firmy Ulrich z Německa a typu P 597 z Ruska. Etalony Ulrich se vyráběly v několika velikostech. Elektrody jsou obvykle hliníkové. Největší kapacita bývá 100 000 pF. Používají se jen ve svislé poloze s podstavcem, který umožní definované připojení etalonů ve stálé poloze. Provedení je třísvorkové. Podstavec má zanedbatelnou kapacitu, obvykle pod 0,001 pF.

Ruské válcové etalony P 597

Jako vzduchové se vyrábí do 4000 pF, při čemž kondenzátory 1 pF až 10 pF a 10 pF až 100 pF jsou provedeny jako clonkové (to je mezi elektrody se vkládá stínění s otvorem, jehož velikost určuje průchozí kapacitu).

Sada 22 kusů etalonů umožňuje měřit v trojsvorkovém zapojení vkládáním etalonů na speciální podstavce. Hodnoty do 4 000 pF jsou vyrobeny ve vzduchovém provedení, vyšší hodnoty se slídovým dielektrikem. V ČR se vyskytují omezeně. Výhodou sady je možnost složit libovolnou hodnotu mezi 1 pF až 1 μ F s rozlišením 1 pF a vysoká stabilita etalonů v sadě.

Etalony Tettex

Jsou rozměrné, protože jsou navrženy pro pracovní napětí do 2 000 V. Vyráběly se hodnoty od 1 pF do 10 000 pF. Provedení je třísvorkové. Konektory jsou atypické. Elektrody jsou hliníkové a plněny vzduchem, který je vysoušen vestavěným sáčkem silikagelu (nutno kontrolovat jeho stav).

Vzduchové kondenzátory vyráběné v hodnotách do 10 000 pF velkých rozměrů jsou určeny hlavně pro mosty v energetice pracující na 50 Hz.

Užívají se obvykle v poloze konektory vzhůru. Při kalibraci zapisujeme polohu etalonu.

Etalony kapacity Meatest

Různé hodnoty podle požadavku zákazníka (většinou do 10 nF), slídové nebo keramické. Podrobněji viz kontakt na výrobce, který je schopen splnit i speciální požadavky.

Etalony HP 16380A

Tyto etalony jsou určeny hlavně pro širokopásmové RLC mosty. Mají nižší přesnost i stabilitu. Jsou citlivé na mechanický tlak v oblasti konektorů. Užívají se buď v poloze konektory vzhůru, většinou uložené v přepravním a tepelně izolačním kufru, nebo s konektory na boku při přímém připojení k měřiči. Vyrábí se hodnoty 1 pF až 1 000 pF. Konektory mají BNC. Připojení je čtyřpárové. Etalony kapacity HP16380A, jsou určeny pro kontrolu autobalančních mostů s širokým frekvenčním rozsahem. Sada HP16380A obsahuje kondenzátory 1, 10, 100 a 1000 pF se vzduchovým dielektrikem, teplotní závislostí 40 ppm/ $^{\circ}$ C a roční stabilitou < 300 ppm. Výhodou je čtyřpárové připojení přes BNC konektory, nevýhodou nízká stabilita. Frekvenční závislost dosahuje 0.01 % pro 600 kHz u 1000 pF, 2 MHz u 100 pF a 3 MHz pro 10 pF. Kondenzátory jsou citlivé na mechanické namáhání při propojování konektorů. Kapacity C_{13} a C_{23} jsou kolem 30 pF, podrobněji viz údaje výrobce.

Čtyřpárové etalony kapacity s hodnotami 1 pF, 10 pF, 100 pF a 1000 pF. Nižší hodnoty jsou v provedení se vzduchovým dielektrikem, etalony 10 nF, 100 nF a 1000 nF jsou slídové. Základní etalony pro kalibrace širokopásmových mostů, mají však nižší přesnost a stabilitu než etalony General Radio.

Nejdůležitější v současné době vyráběný typ etalonů. Elektrody jsou hliníkové, etalony nejsou hermetické, hodnota kapacit záleží na poloze etalonu a na tlaku přívodů na konektory.

Tyto etalony jsou určeny hlavně pro širokopásmové RLC mosty. Mají nižší přesnost i stabilitu. Jsou značně citlivé na mechanický tlak v oblasti konektorů. Užívají se buď v poloze konektory vzhůru, většinou uložené v přepravním a tepelně izolačním kufru, nebo s konektory na boku při přímém připojení k měřiči.

Sada HP16380A obsahuje kondenzátory 1 pF, 10 pF, 100 pF a 1000 pF se vzduchovým dielektrikem, teplotní závislostí 40 ppm/°C a roční stabilitou < 300 ppm. Výhodou je čtyřpárové připojení přes BNC konektory, nevýhodou nízká stabilita. Frekvenční závislost dosahuje 0,01 % pro 600 kHz u 1000 pF, 2 MHz u 100 pF a 3 MHz pro 10 pF. Kondenzátory jsou citlivé na mechanické namáhání při propojování konektorů. Kapacity C_{13} a C_{23} jsou kolem 30 pF, podrobněji viz údaje výrobce u etalonu.

Etalony kapacity HP 16380A,C nejsou, jak je zřejmé z uvedeného, vhodné pro nejpřesnější etalonáž kapacity na $f = 1$ kHz. Jsou to etalony speciálně navržené pro kontrolu čtyřpárových autobalančních mostů se čtyřmi BNC přívody s roztečí Agilent (22 mm). Jsou jediné vhodné dostupné etalony pro kontrolu autobalančních mostů s širokým frekvenčním rozsahem s čtyřpárovým připojením bez nutnosti použití přechodů nebo kabelů. Kalibrovat s nimi lze proto přímo na referenční rovině na svorkách mostu. Při kalibraci je třeba udat jejich polohu, konektory nahoru nebo konektory na bok.

ETALONY S PEVNÝM DIELEKTRIKEM

Etalony kapacity HP16380C

Sada HP16380C obsahuje 3 slídivé kondenzátory s postrěbřenými elektrodami 0.01 μ F, 0.1 μ F a 1 μ F. Nastaveny jsou v toleranci ± 0.1 %, stabilita je < 50 ppm/rok, teplotní závislost -5 až +35 ppm/°C, $\text{tg } d < 4 \cdot 10^{-4} / 0.01 \mu\text{F}$; $< 5 \cdot 10^{-4} / 0.1 \mu\text{F}$; $< 7 \cdot 10^{-4} / 1 \mu\text{F}$. Frekvenční závislost je udávána orientačními grafy. Je výrazná a závisí na nominální hodnotě kondenzátoru. Výrobce kondenzátory měřil (± 0.01 %) na 120 Hz a 1 kHz. Grafy a údaje viz dokumentace výrobce.

Etalony kapacity HP16380A,C nejsou, jak je zřejmé z uvedeného, vhodné pro kvalitnější etalonáž kapacity na $f = 1$ kHz. Jsou to etalony speciálně navržené pro kontrolu autobalančních mostů se čtyřmi BNC přívody. Jejich stabilita a teplotní závislost je nečiní vhodné pro přesnější měření. Je nevýhodné, že frekvenční závislost je udávána výrobcem informativním způsobem a byla výrobcem měřena jen ve velmi omezeném rozsahu kmitočtů (120 Hz, 1 kHz, 10 kHz).

Etalony kapacity 10 nF až 1 μ F

V tomto rozsahu hodnot jsou etalony realizovány se slídivým nebo keramickým dielektrikem a jsou velmi stabilní, s hodnotou nezávislou na poloze etalonu. Teplotní závislost je obvykle menší než ± 35 ppm/°C. Pro přesné měření je třeba udat teplotu přímo na kondenzátoru. U etalonů s koaxiálními svorkami (BMC) nevznikají speciální problémy. Hodnota kapacity s frekvencí nejprve klesá. Strmost poklesu závisí na ztrátách a je větší pro kondenzátor s většími ztrátami. Při vyšší frekvenci hodnota roste vlivem kapacity přívodů. Čím vyšší je hodnota kapacity, tím při nižší frekvenci se projeví vliv kapacity.



Obrázek č. 28: Staré provedení etalonů se svorkami

Válcové etalony P 597

Jsou vyráběny pro malé kapacity jako vzduchové, od 10 nF do 400 nF ve slídivém provedení. Sada umožní nastavit hodnotu kapacity 1 pF až 1000 nF. Sada patří mezi nejstabilnější dostupné etalony.



Obrázek č. 29: Třisvorkové etalony se vršily nad sebe

Etalony kapacity Meatest

Etalony kapacity typu MTE CP jsou určeny ke kontrolám parametrů měřičů RLC, multimetrů a k zabezpečení metrologické návaznosti měření. Nízký ztrátový činitel etalonů umožňuje jejich použití v širokém kmitočtovém pásmu. Etalony kapacity jsou vybaveny koaxiálními konektory BNC pro tři a čtyřsvorkové a čtyřpárové připojení.

Vyrábí se typy CP-1 1 nF, CP-10 10 nF, CP-100 100 nF s teplotní závislostí 15 ppm/°C a malými ztrátami < 0,000 2.



Obrázek č. 30: Moderní provedení etalonu Meatest

Etalony kapacity 1 μF až 100 μF

Etalony kapacity pro kapacity 1 μF až 100 μF nejsou běžně nabízeny. Na zakázku je vyrobí například Meatest. Pro tyto hodnoty jsou již kondenzátory se slídovým nebo keramickým dielektrikem příliš rozměrné a drahé, proto je nutné použít plastovou izolaci, což zase přináší problémy s teplotní závislostí kapacity. Tu je možné omezit kombinací plastů MKP a MKT, viz kapitola o materiálech pro etalony kapacity, nebo drahým termostatováním.

Etalony kapacity nad 100 μF

Etalony kapacity nad 10 μF je možné konstruovat z etalonů kapacity menší hodnoty, např. 10 μF a transformátorů, které transformují hodnotu kapacity na požadovanou velikost. Vyrábí se až do hodnot 1F. V ČR existují etalony tohoto typu od firmy Quadtech a z bývalé fy TESLA Brno. U těchto typů etalonů mají značný vliv parazitní parametry, hlavně u použitých transformátorů. Jsou provedeny jako čtyřsvorkové a jejich možnost použití závisí i na konkrétním typu kalibrovaného RLC mostu. Nejsou vhodné pro kalibraci kapacitních rozsahů multimetrů.

Dekády C

Dekády C vyrábí řada výrobců, proto popíšeme jen některé významnější typy.

P 5025 je šestimístná dekáda třídy 0,1 % výroby SNS pro 40 Hz až 60 kHz zajímavá tím, že obsahuje kondenzátory až do 100 μF , při čemž poslední nejvyšší dva řády mají kvalitní kolíkový přepínač.

Danabridge vyrábí čtyřmístné dekády Dk4 pro hodnoty do 10 μF třídy 0,5 % až 2,5 % s graficky udanou frekvenční závislostí. Kondenzátory jsou polystyrenové v řadě hodnot 1-2-2-5. Změna hodnoty o 1 % nastává při frekvenci 5 kHz pro 10x1 μF až 1 MHz pro 10x1nF.

Tetex dodával dekády řady 1200 a třídy 0,1 % se slídovými kondenzátory s t_k 30 ppm/ $^{\circ}\text{C}$, pro C 50 pF až 1,1111 μF .

Quad Tech nabízí dekádu s polystyrenovými kondenzátory třídy 0,5 % typu 1412 pro C do 1,11115 μF , přesnou dekádu 1413 třídy 0,05 %, s tímž rozsahem se vzduchovými a slídovými kondenzátory šestimístnou a čtyřmístnou označenou 1423-A.

Pro hodnoty 1 μF až 1 F nabízí jako jediný výrobce transformátorový etalon základní třídy přesnosti 0,25 % t_c -140 ppm/ $^{\circ}\text{C}$, $D = 0,01$; určený pro 100, 120 a 1000 Hz.

Kalibrátory

Kalibrátory určené pro DMM

Univerzální kalibrátory multimetru mají často i simulátor kapacity, určený hlavně pro kalibraci kapacitních rozsahů multimetru. Podrobněji viz specifikace jednotlivých typů kalibrátorů.

Kalibrátory s vestavěnými etalony kapacity

Některé kalibrátory, jako například výrobky Transmille, mají vestavěno několik etalonů medence. U kalibrátorů Transmille není definována parazitní impedance mezi vestavěnými etalony a ostatními částmi kalibrátoru a proto se hodí převážně jen pro kalibraci pro méně přesné měřiče napájené z baterií.

Kalibrátory určené pro kalibraci měřičů impedance

Meatest M 550

Jediný univerzální kalibrátor na světě s rozsahy AC R , L , C je Meatest M 550. Umožňuje kalibraci pro různé zapojení v širokém rozsahu funkcí i hodnot.



Obrázek č. 31: Kalibrátor impedance Meatest M 550

Kalibrátor impedance M550 je přístroj určený ke kalibraci a nastavování měřičů RLC v kmitočtovém pásmu do 1 MHz. Obsahuje sady odporových, kapacitních a induktivních etalonů diskretních dekadických hodnot. Obsahuje:

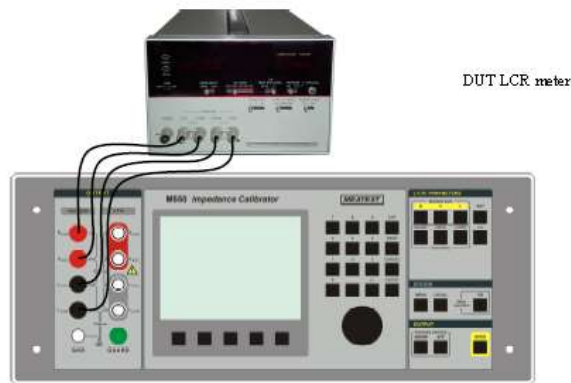
- sadu etalonů odporu 0.1Ω - $100 M\Omega$,
- **sadu etalonů kapacity 10 pF - $100 \mu\text{F}$,**
- sadu etalonů indukčnosti $1 \mu\text{H}$ - 10 H ,
- umožňuje čtyřpárové, čtyřsvorkové a dvousvorkové připojení,
- uchovává kalibrační data do 1 MHz,
- přesnost: $0,005 \%$... $0,1 \%$,
- má sběrnice GPIB a RS-232.

Kalibrátor impedance M550 je přístroj určený ke kalibraci a nastavování měřičů RLC. Pro vyloučení vlivu přívodních kabelů a vlastního pozadí kontrolovaného měřiče RLC je kalibrátor vybaven referenčními polohami svorek nakrátko "SHORT" a naprázdno "OPEN". Kalibrátor M-550 lze připojit ke kontrolovanému měřiči koaxiálně **čtyřpárově** nebo **čtyřsvorkově** a **dvousvorkově**. Velký LCD displej umožňuje zobrazit všechny potřebné informace o nastavení kalibrátoru. Kalibrační data jsou uchována v interní

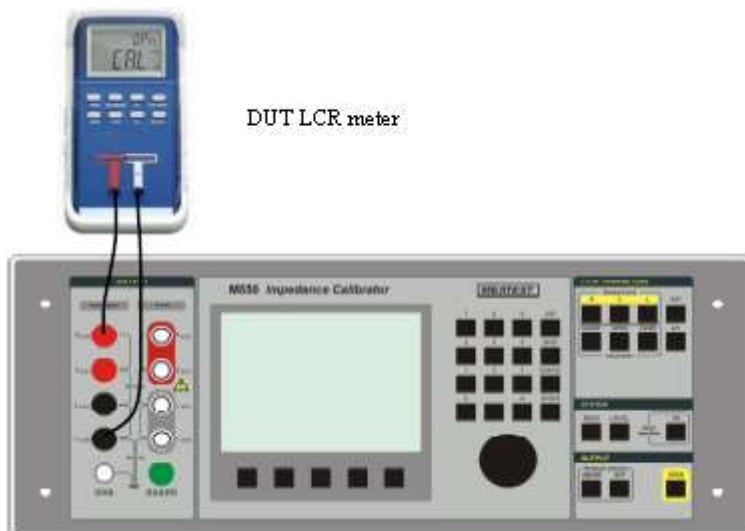
paměti, včetně historie a jejich přepis při recalibraci se provádí přímo z klávesnice přístroje. Všechny funkce přístroje lze ovládat po sběrnici GPIB nebo RS-232. Jedná se o jediný univerzální kalibrátor impedancí na světě.



Obrázek č. 32: Kalibrace 4TP mostu s kalibrátorem impedance Meatest M 550



Obrázek č. 33: Kalibrace čtyřsvorkového mostu s kalibrátorem impedance Meatest M 550



Obrázek č. 34: Kalibrace 2svorkového mostu s kalibrátorem impedance Meatest M 550