



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 4.1.3/01/17

NÍZKOFREKVENČNÍ MĚŘIČE RLC

(čtyřsvorkové a čtyřpárové RLC měřiče)

Praha

říjen 2017



Vzorový kalibrační postup byl zpracován a financován ÚNMZ v rámci Plánu standardizace – Program rozvoje metrologie 2017
Číslo úkolu: VII/2/17

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

Řešitel: Česká metrologická společnost, z.s.

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

Tento kalibrační postup je určen pro kalibraci autobalančních měřičů RLCG na frekvenci 1kHz nebo v rozsahu frekvence od 10Hz do 1MHz. Týká se kalibrace ve funkci měření odporu, kapacity a indukčnosti. Kalibrační postup se týká autobalančních měřičů RLCG, což jsou prakticky všechny novější typy měřičů impedancí.

Postup se netýká:

- kalibrace transformátorových mostů ani klasických čtyřramenných mostů, ale uvedené zásady a postupy mohou být použity i pro tyto typy přístrojů,
- měření odporu pro chemickou konduktometrii,
- kalibrace pro revizní přístroje.

Kalibrační postup zahrnuje 3 varianty vybavení laboratoře etalony (A,B,C) a dvě varianty přístupu (Black box a funkčních bloků).

Jsou popisovány dvě základní metody přístupu ke kalibraci:

- **metoda BB – metoda black box** se týká měřičů, jejichž vnitřní zapojení není známo ani blokově,
- **metoda FB – funkčních bloků** se týká měřičů, u nichž je známé zapojení alespoň na úrovni funkčních bloků a je používána tam, kde je možné tuto znalost využít ke zjednodušení kalibračního postupu a omezení opakovaných a nadbytečných kontrol.

Metodu BB používáme i pro klasické víceramenné impedanční mosty a pro většinu mostů s transformátorovými rameny.

Metoda FB je využívána pro elektrické mosty autobalančního typu, což je naprosto převažující většina vyráběných mostů, Fluke PM 6303 a jiné, Quad Tech, Zentech, Danabridge, Escort, Grundig, TESLA BM 595 a řada dalších výrobců.

Tento kalibrační postup popisuje dvě samostatné metody užívané pro kalibraci měřičů RLCG, lišící se připojením měřeného objektu. Je to pro **čtyřpárové připojení**, používané zejména v měřících HP, Agilent a Keysight. Z často kalibrovaných přístrojů se jedná např. o přístroje TESLA Brno (BM 591, BM 595, HP/Agilent/ Keysight 4263B, 4268A, 4274A, 4275A, 4284A, 4276A, 4277A, E4980A, 4192A, WAYNE-KERR 3255B, 6425, 6430, 6440, 6450, 6500B.

Druhá možnost je pro **čtyřsvorkové připojení**, jak je například v mostech GenRad, Quadtech, Chroma, série QT 1600, QT 1700, QT 7000, WK řady 44xx aj.

2 Související normy a metrologické předpisy

	<i>Impedance Measurement Handbook</i> , A guide to measurement technology and techniques, 4th Edition Agilent technology (Keysight).	[1]
EURAMET cg - 15 Version 3.0 (02/2015)	<i>Guidelines on the Calibration of Digital Multimeters</i>	[2]
HORSKY J., HORSKY P.	<i>Calibration of Multifunction and Multirange Instruments by Method of Functional Blocks</i> , Cal Lab, International Journal of metrology, USA, 3-4/1997	[3]
Henderson, L C A,	<i>A guide to measuring resistance and impedance below 1 MHz</i> , publikace NPL, UK.	[4]
Williams J.	<i>LCR Measurement Primer</i> , 1st Edition, April 2012, IET Labs Inc.	[5]
KP 4.1.2/15/15	<i>Dvousvorkový kapesní měřič RLC</i>	[6]
KP 4.1.2/16/16	<i>Etalony odporu</i>	[7]
KP 4.1.2/18/16	<i>Etalony kapacity</i>	[8]
KP 4.1.2/17/16	<i>Etalony indukčnosti</i>	[9]
	M 002 PROCEDIMIENTO EL- 002 PARA LA CALIBRACIÓN DEL P UENTE NUMÉRICO PARA LA MEDIDA DE INDUCTANCIA, CAPACIDAD Y RESISTENCIA, CEM Španělsko.	[10]
Henry P. Hall	<i>A History of Impedance Measurements</i>	[11]
Operation manual Meatest Brno	<i>M550 Impedance Calibrator</i>	[12]

3 Kvalifikace pracovníků provádějících 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 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 dlouho 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.

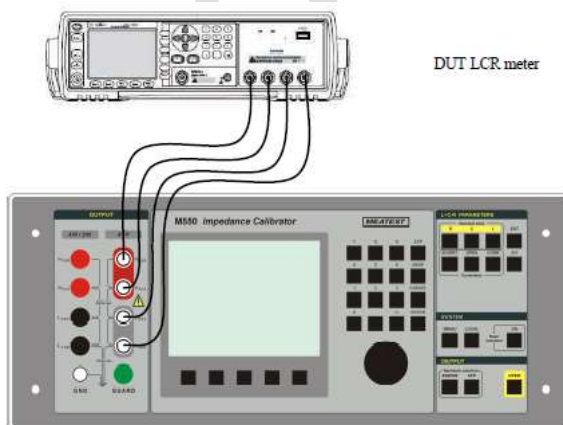
Minimální potřebný obsah a rozsah znalostí je shrnut v přílohách tohoto postupu.

4 Názvosloví a 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 www.unmz.cz v části <http://www.unmz.cz/urad/sborniky-aktualni> a názvosloví pro elektrické veličiny je podrobněji uvedeno v slovníku IEV (IEC 60050 - International Electrotechnical Vocabulary).

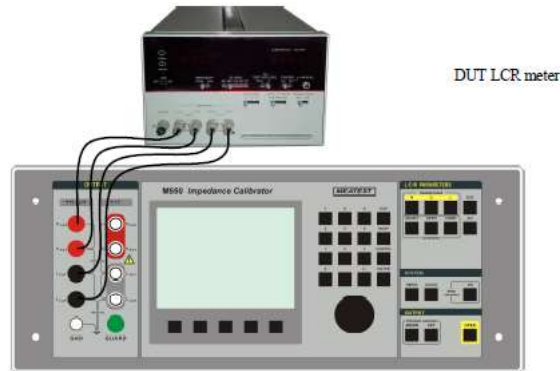
Pod pojmem **autobalanční mosty** se označují měřiče, které měří reálnou a imaginární část impedance (admittance) a ze změřeného vypočítávají požadovanou veličinu. Kalibrační postup je použitelný pro analogové měřiče s fázovými detektory i pro digitální se vzorkováním a následném početním vyhodnocením signálu.

Jak bylo uvedeno v článku 1, tento kalibrační postup popisuje dvě samostatné metody užívané pro kalibraci měřičů RLCG, lišící se připojením měřeného objektu. Je to pro **čtyřpárové připojení**, používané zejména v měřících HP, Agilent a Keysight. Z často kalibrovaných přístrojů se jedná např. o přístroje TESLA Brno (BM 591, BM 595) HP/Agilent (4263B, 4268A, 4274A 4275A, 4284A, 4276A, 4277A, E4980A, 4192A) WAYNE-KERR (3255B, 6425, 6430, 6440, 6450, 6500B).



Obr. č. 1: čtyřpárové připojení

Druhá možnost je pro čtyřsvorkové připojení, jak je například v mostech GenRad, Quadtech, Chroma, série QT 1600, QT 1700 a QT 7000, WK řady 44xx.



Obr. č. 2: čtyřsvorkové připojení

Jsou popisovány dvě základní metody přístupu ke kalibraci:

- **Metoda BB – metoda black box** se týká měřičů, jejichž vnitřní zapojení není známo ani blokově.
- **Metoda FB – funkčních bloků** se týká měřičů, u nichž je známé zapojení alespoň na úrovni funkčních bloků a je používána tam, kde je možné tuto znalost využít ke zjednodušení kalibračního postupu a omezení opakovaných a nadbytečných kontrol.

Metodu BB používáme i pro klasické víceramenné impedanční mosty a pro většinu mostů s transformátorovými rameny.

Metoda FB je využívána pro elektrické mosty autobalančního typu, což je naprosto převažující většina vyráběných mostů, Fluke PM 6303 a jiné, Quad Tech, Zentech, Danabridge, Escort, Grundig a řada dalších výrobců.

Zkratky všeobecně:

- LCR most: přístroj pro měření indukčnosti, kapacity nebo odporu na zvolené frekvenci,
- L : indukčnost,
- C : kapacita,
- R : odpor,
- Q : činitel kvality,
- d : ztrátový faktor,
- Z : impedance (komplexní impedance): Komplexní hodnota rozdílu potenciálů dělena komplexní hodnotou proudu $Z = |Z| e^{j\varphi} = R + jX$,

- modul impedance: Je definován následující rovnicí: $|Z| = \sqrt{R^2 + X^2}$
- AC odpor R : reálná část impedance,
- reactance X : imaginární část impedance,
- pro induktivní reaktanci; $X = \omega L$
- pro kapacitní reaktanci; $X = -1 / \omega C$
- ω je úhlová frekvence; $\omega = 2\pi f$
- admittance: je definována jako převrácená hodnota impedance
 - $Y = 1 / Z$

$$\blacksquare Y = |Y|e^{-j\varphi} = G + jB$$

- modul admitance: $|Y| = \sqrt{G^2 + B^2}$,
- konduktance G (vodivost) reálná část admitance,
- susceptance: imaginární část admitance,
- činitel kvality Q : pro systémy, kde $Z = R + jX$, je Q definován jako $Q = |X| / R$,
- ztrátový faktor d : je ztrátový faktor d definován jako převrácená hodnota činitele kvality $d = 1 / Q$.

Vysvětlení použitých pojmů speciálních pro oblast impedancí

Klasický impedanční most – přístroj mostového typu obsahující nejméně 4 ramena s impedančními prvky, ve kterém měříme impedanci vyvážením mostu pro měřenou a kvadraturní složku.

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

Autobalanční most - elektronický měřicí přístroj pro měření impedancí, kde neznámá impedance je zapojena mezi zdroj měřicího signálu a virtuální zem. Ta je na nízkých kmitočtech tvořena převodníkem proudu na napětí s inventující operačním zesilovačem. Na vstupu tohoto zesilovače je virtuální zem, přepínáním odporu ve zpětné vazbě se mění rozsahy přístroje. Přístroj měří reálnou a imaginární složku impedance a podle nastavení z nich počítá požadovaný parametr ($R, L, C, G, Q \dots$) pro sériové nebo paralelní náhradní zapojení. Měřená impedance se připojuje čtyřsvorkově nebo čtyřpárově. Prakticky všechny průmyslově vyráběné měřiče impedancí jsou řešeny na tomto principu.

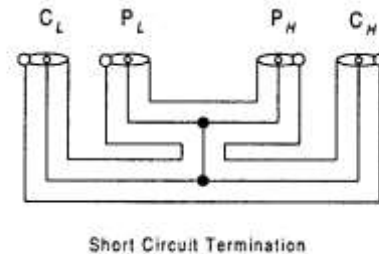
Dvousvorkové připojení - měřený prvek je připojen pouze svými dvěma svorkami. Pokud obsahuje i stínění je připojeno k jedné ze svorek, zpravidla k té, která je připojena ke zdroji měřicího signálu. Dvousvorkově se nejčastěji připojují etalony indukčnosti. Měřený prvek musí být co nejdále od zdrojů rušení a ovlivňujících veličin (kovových předmětů u měřených indukčností). Je nejvíce ovlivňováno okolím a nejméně vhodné pro přesné měření. Dvousvorkové jsou i některé kapesní mosty, které kalibrujeme s dodanými kablíky z příslušenství přístroje.

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.

Čtyřsvorkové připojení - na prvek jsou připojeny jen dva měřicí proudové a dva napěťové přívody. Smyslem čtyřsvorkového připojení, je odstranit 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 zapojení, protože měřený prvek je stíněný.

Čtyřpárové připojení - používaná zkratka 4TP (Terminal Pair). Nejdůležitější a nejčastěji používané připojení 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. Je důsledně použito u mostů HP (Agilent). Stínění kabelů musí být bezpodmínečně spojeno i na straně měřeného objektu.



Obr. č. 3: Různá provedení zkratu (short)

Měřicí svorky autobalančního mostu

- Hi Drive – Hi I budicí proudová – svorka, na kterou je připojen zdroj měřicího signálu, U důsledně čtyřpárových mostů je vyvedena na koaxiální konektor (BNC). Vnitřním vodičem je napájen měřený objekt, vnějším vodičem se měřený proud vrací,
- 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 U budicí napěťová – svorka pro měření napětí na napájecí straně měřeného objektu,
- Lo Sense - Lo U napěťová svorka, kterou se kontroluje napětí na straně virtuální země. Potlačuje vliv odporu přívodu a nedokonalosti virtuální země.

Impedance zdroje měřicího signálu - převážná část autobalančních mostů má zdroj signálu s definovaným vnitřním odporem. Ten sice chrání přístroj při zkratu, ale má i za následek snížení napětí na měřeném objektu podle velikosti měřené impedance.

Náhradní zapojení - při měření impedancí je nutné udat zvolené náhradní zapojení. To má vliv na udávané parametry a uplatní se tím více, čím je měřený objekt více vzdálený od ideálního R , L , nebo C .

BB - Kalibrace metodou Black box (černé skříňky) - Při stanovení kalibračních bodů a postupů se vychází ze specifikace přístroje bez znalosti jeho vnitřní skladby. Kalibrace platí jen v rozsahu kalibrovaných parametrů. Tato metodika vychází z této metody. Jedná se o obvyklý postup kalibrace.

FB - Kalibrace metodou funkčních bloků - kalibrační postup vychází ze znalosti blokového zapojení přístroje. Kalibrační body jsou stanoveny tak, aby byl alespoň jedenkrát kontrolován každý prvek a každá poloha přepínače ovlivňující přesnost přístroje. Metoda vede k omezení počtu kalibračních bodů a umožňuje s určitou pravděpodobností předpokládat správnou funkci přístroje v širším rozsahu hodnot než je počet etalonů. Na příklad u autobalančních mostů se obvykle při této metodě omezuje počet kalibračních bodů na rozsazích měření indukčnosti. Jedná se o metodu kalibrací, která zvláště u autobalančních RLC mostů, které pracují v širším počtu rozsahu kmitočtů, zjednodušuje kalibraci a nastavení přístroje.

Referenční rovina - místo, ve kterém jsou definovány parametry přístroje. Obvykle jsou to vstupní svorky na panelu nebo na konci přívodních kabelů definované délky a typu.

Zkrat (short - obvykle se nepřekládá) - 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 koaxiální vsuvkou.

Rozpojený obvod (open - obvykle se nepřekládá) - většina přístrojů vyžaduje, aby byly vzájemně spojeny svorky Hi Drive s Hi Sense a Lo Drive s Lo Sense. Propojení lze provést dvěma stíněnými kablíky nebo lépe dvěma spojkami na koncích obvykle 1 m dlouhých koaxiálních kabelů, které se používají při měření. (použije se vsuvka BNC-BNC).

Poznámka: etalon open u originální sady pro mosty GenRad a QT není optimální, má nezanedbatelnou parazitní kapacitu.

5 Prostředky potřebné zařízení pro kalibraci

Pro kalibraci jsou potřebné následující etalony a zařízení:

- multimetr s rozsahy AC U a AC I,
- čítač nebo multimetr s funkcí měření frekvence,
- etalony impedancí podle **varianty A, B nebo C tohoto postupu**, podle možností a vybavení laboratoře,
- přípravek „Short“,
- přípravek „Open“,
- osciloskop (není nezbytný),
- měřič zkreslení (není nezbytný).

Varianta A

Pro laboratoře vybavené impedančním kalibrátorem, například Meatest M 550, kde hodnoty pro tyto funkce jsou kalibrované pro použité připojení a frekvence a náhradní zapojení shodné s potřebnými pro kalibraci, je to popsáno jako varianta A. Postup kalibrace provádíme podle kapitoly 7. *Calibration of LCR meter*, str. 27 literatury [12].

Varianta B

Jako etalony použita sada speciálních etalonů impedance podle popisu dále, to je varianta B, nejbližší běžnému použití měřiče.

Varianta C

Většina metrologických pracovišť nemá k dispozici impedanční kalibrátor, ani dostatečně rozsáhlou sadu etalonů, 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.

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

Varianta A a B jsou doporučené varianty.

Upozornění:

Autobalanční měřiče jsou určeny k měření elektrických prvků, které nejsou propojeny s elektrickým napájením přístrojů z rozvodné sítě. Pokud je měřený přístroj napájen ze sítě a i etalon je vložen do přístroje, napájeného ze sítě, nemusí být jeho měření možné a nepoužíváme tento etalon v práci podle tohoto postupu (tato poznámka se týká například options v Transmille řada 3000).

Parametry zdroje v měřiči napájecího měřicí obvod mohou ovlivnit parametry měření zvláště, je-li zkreslení signálu zdroje neúměrně velké. Kontroluje se napětí případně proud, který zdroj poskytuje jeho frekvenci případně i nelineární zkreslení.

Multimetr - alespoň 4,5 místný se používá se pro kontrolu napětí, proudu (a frekvence) běžných RLC metrů.

Čítač - alespoň 6,5 místný se používá pro kontrolu frekvence.

Měřič zkreslení - umožňuje změřit nelineární zkreslení generátoru kalibrovaného mostu - není nezbytné. Pokud není k dispozici, doporučuje se zkontrolovat tvar signálu osciloskopem. Signál nesmí mít viditelné zkreslení.

Etalony RLC pro kalibraci**Varianta A**

- impedanční kalibrátor Meatest M550. Vyhoví pro čtyřpárové i čtyřsvorkové připojení.

Varianta B

- sada etalonů odporu. Například Agilent 42030A nebo individuálně vyrobená.
- sada etalonů kapacity. Například Agilent 16380A nebo individuálně vyrobená.
- sada etalonů kapacity. Například RFT 0187 nebo individuálně vyrobená, nejlépe v simulovaném provedení.

Poznámky k realizaci etalonů varianta B, diskretní etalony RLC

Pro kalibraci se používají diskretní etalony, nejlépe v čtyřpárovém provedení s konektory BNC. Pro měření indukčnosti je možné použít i běžné etalony dvousvorkové. Použití dekád je omezeno jen na kalibrace pro přístroje nižší přesnosti.

Etalony odporu (varianta individuálně vyrobených etalonů)

Optimální jsou etalony zhotovené z foliových odporů nebo z odporů s kovovou vrstvou. Drátové odpory jsou málo vhodné, je možné použít jen některé typy určené pro střídavý proud za předpokladu, že byly kalibrovány na pracovní frekvenci.

Etalony kapacity (varianta individuálně vyrobených etalonů).

Pro hodnoty kapacity do 1000 pF se používají etalony se vzduchovým, výjimečně s keramickým dielektrikem. Pro vyšší hodnoty do 1 μ F se používají etalony se slídovým dielektrikem nebo se s keramikou typu NPO. Pro vyšší hodnoty je nutné používat pokovenou folii. U těchto etalonů je nutné respektovat sníženou stabilitu a vysokou teplotní závislost. Perspektivní je použít hermetizované kondenzátory z Metalizovaného Polypropylen Sulfidu (MPPS).

Etalony indukčnosti (varianta individuálně vyrobených etalonů).

Používají se etalony tvořené toroidními nebo válcovými cívkami bez magnetického jádra. Je možné použít simulované etalony vytvořené z T článku se dvěma odpory v podélné větvi a kondenzátorem v příčné větvi.

Etalony okrajových hodnot (varianta individuálně vyrobených etalonů).

Velké hodnoty odporu se vytváří jako T články pro hodnoty odporu přibližně do 100 M Ω . **Velké hodnoty kapacity** je možné vytvořit speciálními etalony s polystyrénovým kondenzátorem 10 μ F a transformátory, které umožňují transformovat hodnotu kapacity až na hodnotu 1 F.

Velké hodnoty indukčnosti lze simulovat pouze se speciálními elektronickými etalony. Etalony okrajových hodnot jsou mimo rozsah tohoto kalibračního postupu a jsou uvedeny pouze pro informaci.

Varianta C

Univerzální kalibrátor s funkcí simulovaného odporu a kapacity.

Pro kalibraci se používají diskretní etalony v čtyřpárovém provedení s konektory BNC.

Dvousvorkové etalony

Pro měření indukčnosti je možné použít i etalony dvousvorkové, nejčastěji RFT 0187 (které připojujeme od měřeného mostu čtyřsvorkově až na svorky etalonu).

Dekády R, L, C

Použití dekád je omezeno jen na přístroje nižší přesnosti.

Konstrukce etalonů- všeobecné vlastnosti

Poznámky se týkají etalonů provedených diskretně nebo vestavěných do sad nebo kalibrátorů, netýkají se elektronických simulací.

Etalony odporu

Optimální jsou etalony zhotovené z odporů s kovovou vrstvou nebo z foliových odporů v čtyřpárovém provedení s konektory BNC. Drátové odpory jsou málo vhodné, je možné použít některé typy určené pro střídavý proud za předpokladu, že byly kalibrovány na pracovní frekvenci. Čtyřpárové etalony zhotovené z odporů s kovovou vrstvou jsou použitelné v širokém frekvenčním rozsahu do 100 kHz. Nemají tak vysokou stabilitu jako drátové etalony a mají větší teplotní závislost, než nejlepší drátové etalony a při náročnějším měření jsou vždy před použitím stejnosměrně kontrolovány. Stejněsměrně se kontroluje i stabilita jejich hodnoty. Frekvenční charakteristika musí být stanovena při kalibraci a je relativně časově stálá, proto se etalony sledují (pokud je to pro laboratoř jednodušší) v rámci validace měřením stejnosměrného odporu s kratší periodou, než je stanovena pro kalibrace při střídavém signálu. Etalony odporu se speciálními typy SMD odporů jsou použitelné pro hodnoty kolem 100 Ω až do více než 100 MHz. Velké hodnoty odporu se vytváří jako T články pro hodnoty odporu přibližně do 100 M Ω . Etalony okrajových hodnot nejsou pro kalibraci nezbytné.

Etalony kapacity

Etalony kapacity 10 pF až 1 μ F se používají čtyřpárové nebo třisvorkové, konstruované pro co nejnižší frekvenční závislost. Etalony nad 1000 nF mají obvykle foliové dielektrikum a sníženou teplotní závislost a proto je třeba sledovat teplotu etalonu.

Pro vyšší hodnoty 10 μ F a 100 μ F je nutné vždy používat pokovenou folii.

U těchto etalonů je nutné respektovat vyšší teplotní závislost.

Pozor! U etalonů s plynným dielektrikem hodnota kapacity v malé míře závisí i na poloze etalonu vůči zemskému gravitačnímu poli, po otočení o 90° se hodnota trochu změní (cca řádu 10⁻⁵). Proto je třeba pro nejpřesnější měření udávat i polohu etalonu (např. HP 16383A, poloha konektory nahoru nebo poloha konektory na bok). Velké hodnoty kapacity se vytváří velmi speciálními etalony pro hodnoty přibližně do 1F a používají se jen velmi výjimečně.

Etalony okrajových hodnot nejsou pro kalibraci nezbytné.

Etalony indukčnosti

Velmi rozšířené jsou etalony RFT 0187 s otevřeným polem, tvořené válcovými cívkami. Výhodou je nižší a lineárnější frekvenční závislost než je u toroidních etalonů. Nejsou vhodné pro velmi přesná měření.

Velké hodnoty indukčnosti se vytváří jako T články pro hodnoty přibližně do 20H.

Etalony okrajových hodnot nejsou pro kalibraci nezbytné.

Okrajové hodnoty (možná realizace etalonů).

Velké hodnoty kapacity C je možné vytvořit speciálními etalony s polystyrénovým kondenzátorem 10 μ F a transformátory, které umožňují transformovat hodnotu kapacity, až na hodnotu 1 F. Vzhledem k náročnosti stanovení vedlejších parazitních vlivů se transformátorové etalony kapacity většinou nepoužívají.

Pro velké hodnoty indukčnosti L je možné použít simulované etalony vytvořené z T článku se dvěma odpory v podélné větvi a kondenzátorem v příčné větvi, pro malé L speciální etalony s opatřením pro potlačení vlivu přívodů (obvykle provedené pro dvě měření, v jednom se měří jen indukčnost přívodů, při druhém i s přidanou hodnotou etalonu malé hodnoty L).

Zkrat a rozpojený obvod

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. Korekce open a short se provádí v referenční rovině, která může být přímo na svorkách kalibrovaného přístroje nebo na konci kabelů definované délky, nejčastěji 1m.

Další vybavení

- teploměr (rozlišení 0,1 °C),
- vlhkoměr,

Propojovací vodiče:

- 4ks kabel BNC-BNC 30 cm,
- 4ks kabel BNC-BNC 100 cm,

Adaptéry a příslušné zkušební pomůcky:

- 2 ks T kus BNC,
- 4 ks spojka BNC,
- 2 ks přechod BNC na 2 banánky,
- čisticí prostředky.

Výše uvedené měřicí přístroje lze nahradit rovnocennými ekvivalenty. Největší dovolená nejistota stanovení hodnoty etalonu má být v každém proměřovaném bodě minimálně 4x menší než je dovolená nejistota kalibrovaného měřidla. Pokud nejsou uvedené podmínky splněny je to třeba zohlednit při stanovování nejistoty.

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:

- čtyřsvorkové nebo čtyřpárové připojení, podle připojení u kalibrovaného měřiče,
- na frekvenci potřebné při kalibraci,
- pro 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). Volba náhradního zapojení se uplatní tím více, čím je etalon více vzdálený od ideálního R , C nebo L .

6 Obecné podmínky kalibrace

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

Pro mosty základní přesnosti 0,01% a lepší je referenční teplota $(23 \pm 1)^\circ\text{C}$.

Přesnost měření teploty má být lepší než 0,5 °C.

Teplotu měříme kalibrovaným teploměrem s rozlišením 0,1 °C v místě kalibrace.

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

Teplotní závislost – poznámka:

Rozhodující je teplota použitého etalonu a kalibrovaného mostu. Při měření je třeba respektovat nejistotu stanovení teploty a teplotní závislost etalonů. Pokud není změřena, lze orientačně předpokládat u použitých etalonů následující hodnoty.

Etalony odporu

S kovovou fólií	do ± 3 ppm / $^{\circ}\text{C}$
S kovovou vrstvou	od ± 10 ppm/do ± 100 ppm / $^{\circ}\text{C}$

Etalony kapacity

Elektrody invarové plněné dusíkem	± 5 ppm / $^{\circ}\text{C}$
Elektrody hliníkové, mosazné, izolace vzduch	± 50 ppm / $^{\circ}\text{C}$
Elektrody slída, keramika NPO	± 35 ppm / $^{\circ}\text{C}$
Fóliové, podle druhu fólie	± 200 ppm / $^{\circ}\text{C}$

Etalony indukčnosti

Teplotní závislost indukčnosti závisí na provedení a materiálu jádra.

Teplotní závislost sériového odporu je asi 0,4 % / $^{\circ}\text{C}$.

L závisí nezanedbatelně i na relativní vlhkosti.

Je doporučeno sledovat vlhkost hlavně při měření indukčnosti, protože etalony indukčnosti mohou být závislé na změnách vlhkosti. Vliv vlhkosti je omezen impregnací, proto se projevuje se zpožděním a je tím obtížně vyčíslitelný.

Při kalibraci etalony indukčnosti s otevřeným polem (na příklad typ RFT 0187) nesmí být v blízkosti etalonu, to je nejméně 60 cm, vodivé, zejména elektromagnetické předměty a v laboratoři nesmí být zdroje rušivého magnetického pole. Přítomnost rušivého pole odhalíme nejnázve změnou orientace (polohy) měřeného etalonu.

Opatření proti rušení

V laboratorním prostředí by nemělo být nutné tato opatření používat. Pokud ale podle experimentu povedou ke snížení šumu údaje, je vhodné je použít.

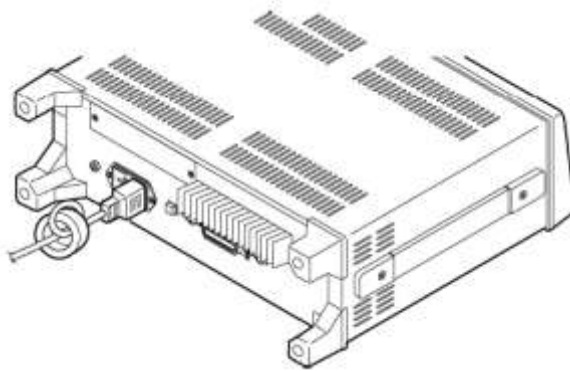
Snížení vlivu rušení ze sítě

Protáhněte napájecí kabel skrz komerčně dostupné antiinterferenční feritové jádro, a připevněte jej na napájecí kabel co nejbližší k síťovému vstupu kalibrovaného mostu.

Další přínos je možné často získat osazením dalšího antiinterferenčního feritového jádra na napájecím kabelu na druhém konci, tak blízko, jak je možné k zástrčce, která se připojuje k zásuvce napájení.

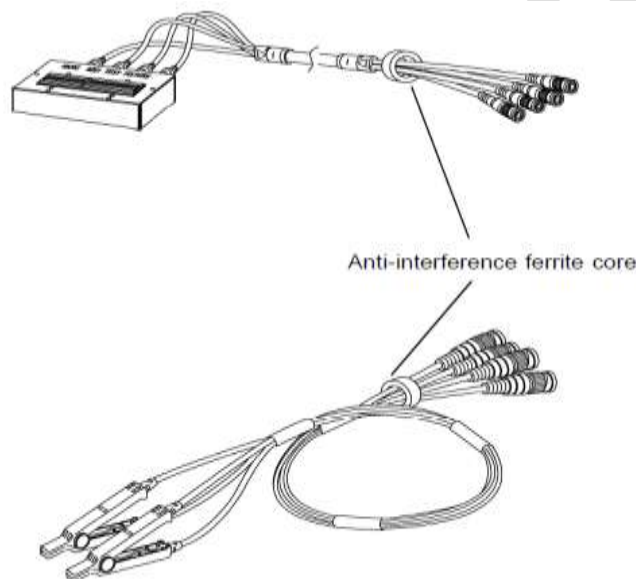
Kromě toho, pokud to vnitřní průměr feritového jádra umožňuje, ovinutí napájecího kabelu několikrát kolem feritového jádra může dále snížit množství šumu.

Různé typy takových feritových jader nebo feritové korálky jsou dostupné na trhu od specializovaných výrobců.



Obr. č. 4: Potlačení poruch ze sítě koaxiální tlumivkou

Rušení do měřicích kabelů



Obr. č. 5: Potlačení poruch indukovaných do přívodů koaxiální tlumivkou

V případě, že rušení produkuje šum v testovaných kabelech, jeho vliv může být snížen také použitím toroidních tlumivek, jak ukazuje obrázek. Kromě toho, pokud to vnitřní průměr feritového jádra umožňuje, navijíme testovací kabely několikrát kolem feritového jádra (například s napájecím kabelem jak je popsáno výše), může to dále snížit i množství šumu. Pokud popsaná opatření prokáží snížení vlivu rušení, měla by následovat interní prověrka v laboratoři k identifikaci a odstranění zdroje rušení.

7 Rozsah kalibrace

Při kalibraci měřičů RLCG se používají 2 základní metody. Je to **metoda černé skříňky (BB-black box)** a **metoda funkčních bloků (FB)**. Metoda BB slouží ke kalibraci přístroje

v rozsahu hodnot omezeném hodnotami použitých etalonů. Kontrolují se jednotlivé rozsahy a linearita v rámci rozsahu. Mimo kalibrovanou oblast nelze soudit nic o vlastnostech měřeného přístroje. Metoda FB vychází z funkčních bloků přístroje. Tato metoda se používá převážně pro autobalanční měřiče RLCG. Na tomto principu jsou založeny prakticky všechny měřiče RLCG pro všeobecné použití. Při této metodě se kontrolují všechny rozsahy etalonů odporu a nejméně jeden reaktanční rozsah etalonem kapacity většinou 10 000 pF. Metoda umožňuje kalibrovat přístroj v rozsahu celé specifikace, přičemž samozřejmě spolehlivost kalibrace mimo přímo měřené rozsahy může být nižší a proto může být metoda doplněna kalibrací metodou BB pro zákazníkem používané nebo požadované rozsahy. Metoda FB většinou odpovídá doporučením výrobců, která jsou uváděna v dokumentaci výrobce.

Při obou metodách kalibrace je první část měření od přípravy po kontrolu zdrojem měřicího signálu společná.

Rozsah kalibrace - kalibrace podle doporučení výrobce.

Metoda kalibrace podle doporučení výrobce je vhodná tam, kde výrobce skýtá záruku kvalitně navrženého a validovaného kalibračního postupu. Jsou to například všechna doporučení ke kalibraci pro mosty Hewlett Packard (Agilent, Keysight) a z ostatních například postup podle výrobce pro most TESLA BM 595, validovaný při státních zkouškách tohoto mostu v SSSR. Kalibrace podle doporučení výrobce je obvykle navržena podle metody funkčních bloků.

Stanovení referenční roviny

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

Open a short

Nastavení SHORT a OPEN:

- nastavit měřicí signál na hodnotu podle pokynů výrobce.

Nastavení short určuje nejnižší hodnotu, od které se měří.

Mohou nastat následující případy:

- nastavujeme short na rozsahu, na kterém se měří,
- nastavení platí pro několik rozsahů,
- nastavení není možné, se zbytkovou hodnotou musíme počítat při vyhodnocení.

Při správném nastavení není zbytková hodnota nula. (Naměřenou hodnotu zapíšeme do záznamu). Pokud výrobce specifikuje na některém rozsahu pro short jinou hodnotu než nula, zaznamenáme zaměřenou hodnotu, která by měla ležet v rozmezí, specifikovaném výrobcem.

Poznámka:

Podle provedení vyhodnocovací části kalibrovaného mostu mohou nastat případy:

- nejnižší rozsah měří od nuly, není zdola omezen,
- nejvyšší rozsah měří impedanci do určité hodnoty, je shora omezen,
- nejvyšší rozsah měří admitanci do určité hodnoty, není omezen.

Kalibrace pro vedlejší složky měřené impedance

Je doporučena, není však nezbytná. Je náročnější, protože etalony pro specifikaci vedlejší složky (D , Q , R_s , R_p) nejsou obvykle dostupné v dostatečném rozsahu vedlejší veličiny. Pokud je u etalonu pro hlavní složku impedance specifikována i její vedlejší složka, využíváme ji i při kalibraci.

Poznámka:

Z vedlejších složek je nejdůležitější **ztrátový činitel kapacity D** . Pro kondenzátory s plynným dielektrikem je D pod hranicí měřitelnosti autobalančních mostů, rovná se tedy přibližně nule. U kondenzátorů s pevným dielektrikem je nejmenší pro styroflexové dielektrikum (ale jen pro provedení dokonalými - přivařenými přívody), řádu 10^{-4} a to je na hranici měřitelnosti autobalančních mostů. Proto můžeme kondenzátory s plynným nebo styroflexovým dielektrikem používat pro kontrolu nuly pro ztrátový činitel kapacity.

Z principu autobalančních mostů vyplývá, že most může pro nízkoztrátové kondenzátory ukazovat i zápornou hodnotu ztrát.

Doplňkové testy

Některé typy mostů mohou pracovat s kabely různé délky a mají zaváděné korekce na délku kabelů. Ke kontrole těchto korekcí navrhuje výrobci testy spočívající v měření s kabely různé délky nebo vložením útlumu nebo zátěže do některého z kabelů téhož etalonu. Pro kalibraci na 1 kHz není délka přívodů do několika metrů omezující.

8 Kontrola dodávky a příprava ke kalibraci

8.1 Kontrola dodávky

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

8.2 Vnější prohlídka - předběžná kontrola přístroje

Zkontrolovat:

- vzhled přístroje, stav připojovacích vodičů a konektorů, mechanickou funkci ovládacích prvků,
- mechanickou nepoškozenost a správnou pružnost připojovacích konektorů a jejich čistotu, v případě potřeby vyčistit,
- správnou činnost displeje, včetně údaje desetinné čárky.

Čištění a předběžná kontrola

Před vlastní přípravou kalibrace se kontroluje čistota měřidla, čistota a pružnost svorek a všech funkčních částí přístroje. *Konektory musí mít čistou izolaci a nepoškozené pružící kontakty.* K čištění se obvykle používá čistý isopropylalkohol.

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 pro přístroj napájený z baterií 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.

8.3 Příprava přístroje ke kalibraci

Kalibrovaný přístroj se umístí v prostředí laboratoře po dobu nejméně 8 hodin. Před kalibrací se musí přístroj po zapnutí ustalovat v referenčních podmínkách po dobu doporučenou výrobcem, minimálně 30 minut. Funkční kontrola a provozuschopnost se kontroluje autotesty, pokud je jimi přístroj vybaven. Pokud jsou při autotestech specifikovány údaje a jejich toleranční limity (například u BM 595), zaznamenají se údaje do záznamu o měření. Úspěšné provedení autotestu je podmínkou pro pokračování kalibrace.

Pokud přístroj není autotesty vybaven, kontroluje se úplnost údajů displeje a funkčnost všech ovládacích prvků, stav přípojovacích konektorů a kabelů, pokud jsou použity. Nepřípustná je nespolehlivost tlačítek (BM 595), nespolehlivost otočných přepínačů (BM 559), nespolehlivost a nestabilita analogových nastavení, pokud je jimi přístroj vybaven, chyby indikátorů jako jsou nesvítící segmenty.

8.4 stanovení referenční roviny

Určení referenční roviny se upřesní se zákazníkem při převzetí přístroje ke kalibraci

8.5 Kalibrační sekvence

Kalibrační proces bude pokračovat ze tří sekvencí, popsanych níže:

- sekvence 1 - Počáteční kalibrace, nastavení, finální kalibrace,
- sekvence 2 - Kalibrace bez dostavení,
- sekvence 3 - Nastavení, finální kalibrace.

Sekvence 1

Je normální sekvencí: první počáteční kalibrace je prováděna, a je-li jako výsledek tohoto prvního kalibračního měření konstatováno, že přístroj vyžaduje seřízení, pak se provádí toto seřízení a následuje konečná kalibrace. První kalibrace poskytuje informace o stavu přístroje před provedením úprav a seřízení. Tato informace je velmi důležitá, protože to umožní srovnání s předchozím stavem nebo předchozí kalibrací, a tedy posouzení stability přístroje. Ověří, že přístroj je udržován v rámci specifikace zavedené během přiděleného časového období mezi kalibracemi. Konečná kalibrace kontroluje, zda jsou nastavení správná a zajišťuje návaznost. V tomto případě se zaznamenává jak počáteční kalibrace jako konečný stav, který bude zachován. Kalibrace podle této sekvence vyžaduje velmi dobrou znalost přístroje a je možná jen tehdy, kdy je kalibrační laboratoř plně vybavena ke kompletní kontrole v souladu s požadavky výrobce kalibrovaného přístroje.

Poznámka: Je nutné vždy tuto variantu konzultovat se zákazníkem

Sekvence 2

Sekvence 2 může být považována za variantu sekvence 1. Použije se, pokud zjištěné chyby v počáteční kalibraci jsou pod povolenými limity, nebo když zákazník nevyžaduje dostavení nebo dostavení není možné.

Sekvence 3

Sekvence 3 by měla být použita pouze tehdy, když je stav mostu před kalibrací neumožní získání dat, například proto, že je nutno jej opravit, nebo protože to je nový, protože to byl dříve mimo provoz, atd.

9 Postup kalibrace

Rozsah kalibrace – přehled zkoušených parametrů

Při kalibraci RLC měřiče se provádí následující zkoušky:

- stanovení referenční roviny (bod 9.1 této metodiky),
- předběžné nastavení (bod 9.2 této metodiky),
- kontrola generátoru (bod 9.3 této metodiky),
- kontrola hlavních složek a vedlejších složek měřené impedance,
- metoda funkčních bloků (bod 9.4 této metodiky),
- kontrola hlavních složek a vedlejších složek měřené impedance,
- metoda černé skříňky (bod 9.5 této metodiky).

9.1 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 měřicích adaptérů příslušejících k danému přístroji. Pro frekvenční rozsah do 1 kHz není při středních hodnotách měřené impedance umístění referenční roviny kritické. Mosty Keysight, Agilent a HP se kalibrují nejlépe s referenční rovinou i etalony přímo na svorkách přístroje. Pokud má přístroj korekce přepínatelné pro různou délku kabelu, provádějí se alespoň ve vybraných bodech kontrola této funkce kabely příslušné délky. Měřiče T6ESLA provedením a roztečí výstupních svorek neumožňují přímé připojení etalonů HP na svorky přístroje. Proto je referenční rovina zvolena na konci příslušných adaptérů nebo přívodů, které jsou dlouhé obvykle 30 cm a neměly by být delší než 1 m. Délka kabelů má tím větší vliv, čím je frekvenční rozsah mostu širší.

Zvolí-li se referenční rovina na konci připojovacích kabelů nebo kabelových adaptorů kontroluje se nejprve mechanický stav kabelů včetně měření stálosti průchozího odporu kabelu při ohybech a stav konektorů na kabelu. Zvolenou referenční rovinu zaznamenáváme do záznamu o měření.

9.2 Předběžné nastavení

Všechna měření provádíme po nastavení přístroje na zkrat a rozpojený obvod. 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. Požadavek k přijetí je, aby po dobu měření nebyla změna nastavení open a short tak velká, aby to ovlivnilo přesnost měření.

9.3 Kontrola generátoru

Generátor signálu napájecího měřicí obvod je obvykle přístupný na svorce Hi Drive. Kontrolujeme specifikované napětí, proud a frekvenci. Dále kontrolujeme, pokud má laboratoř potřebné vybavení, nelineární zkreslení měřicího signálu alespoň pro dvě hodnoty napětí a jednu hodnotu proudu. Zkreslení obvykle není ve specifikaci kalibrovaných přístrojů uvedeno, proto naměřenou hodnotu porovnáváme s hodnotou podle prokazatelně vyhovujícího přístroje. Obvykle je hodnota do 0,5 % vyhovující. Zvýšené zkreslení má za následek obtížně odhalitelné vlivy na přesnost měření. Zkreslení lze orientačně posoudit i zobrazením signálu na osciloskopu, kde nesmí být znatelné zkreslení.

Upozornění:

Při všech měřeních důsledně zaznamenáváme:

- teplotu a její tolerance v době a místě měření,
- výsledky autotestů,
- referenční rovinu a její umístění,
- úroveň a frekvenci měřicího signálu a provedení korekcí naprázdno a nakrátko,
- zda se jedná o paralelní nebo sériové náhradní zapojení,
- délku přívodních kabelů,
- způsob připojení mostu k etalonu (zvláště důležité je to pro připojení dvousvorkových etalonů L ke čtyřsvorkovým mostům),
- naměřené hodnoty pro generátor signálu,
- naměřené hodnoty při měření impedancí,
- při měření se zaznamenávají, i pokud bylo prováděno další nastavení v kterékoliv funkci nebo rozsahu, uvádí se údaje před i po nastavení.

9.4 Kontrola hlavních složek měřené impedance

Metoda podle funkčních bloků

9.4.1 Odpor

U kalibrace metodou funkčních bloků je kontrola etalony odporu základní kalibrační procedura hlavně pro kontrolu převodníku proud napětí a provádí se v celém frekvenčním rozsahu, na kterém most měří.

Kontrolují se jednotlivé rozsahy na dekadických hodnotách danými dostupnými etalony. Alespoň na jednom rozsahu se kontroluje linearita etalony pro začátek a pro konec stupnice.

9.4.2 Kapacita

U kalibrace metodou funkčních bloků někdy postačí kontrola na jednom kapacitním rozsahu.

9.4.3 Indukčnost

U kalibrace metodou funkčních bloků se někdy kontrola indukčností neprovádí, nebí se provádí jen v jednom bodě.

9.4.4 Kalibrace pro vedlejší složky měřené impedance

Kontrola fázové detektoru. Kontroluje se nejméně jedním etalonem. Přednostně se používá etalon kapacity 1 nF nebo 10 nF nebo 100 nF. Etalon slouží kontrole fázového detektoru a vzhledem k jeho nízkému ztrátovému činiteli umožní i kontrolu nastavení vedlejší složky fázového detektoru. To je důležité proto, že některé mosty mají tuto složku nastavenou pomocí analogových trimrů. Fázové detektory používané v autobalančních mostech mají vysokou linearitu. Proto stačí kontrola linearity rozsahu na jednom rozsahu pro plný rozsah a hodnotu blízkou počátku rozsahu, obvykle 0,1 x rozsahu. Provádí se většinou etalony R , je možné i provedení kontroly s etalony C . Doplnkové testy slouží ke zvýšení spolehlivosti kalibrace na důležitých rozsazích z hlediska používání zákazníkem nebo tam kde to blokové zapojené přístroje vyžaduje s ohledem na vnitřní zesilovače nebo děliče případně analogové dostavovací prvky přístroje.

Poznámka:

Při kalibraci metodou funkčních bloků se kalibruje na rozsahu indukčnosti nejvýše pouze jedna nebo dvě hodnoty L . Přitom se předpokládá na základě funkční analýzy přístroje, že vyhoví i ostatní hodnoty.

Metoda funkčních bloků**9.4.5 Volba kalibrovaných bodů**

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. Procenta 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, ale v případě, že jsou požadovány další body a jejich nejistota, musí být kalibrace adekvátní. 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 .

9.4.6 Doporučené kalibrační body ukazuje následující tabulka

funkce	Rozsah měřiče RLC impedance	Kalibrované body / Ω /		
		Začátek rozsahu	Střed rozsahu	Plný rozsah
R	nejnižší	zkrat		90 %
R	všechny ostatní	10 %		90 %
R	jeden (střední)	10 %	50 %	90 %
R	nejvyšší *	10 %		90 %
R	nejvyšší **	2x hranice rozsahu		10x hranice rozsahu
C_1	vybraný		50%-90%	
D_1			vedlejší složka D pro C_1	

* když je rozsah omezen shora

** když není rozsah neomezen shora

9.4.7 Varianta kalibrace A, B, C. Odpor

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 u mostů s dvojkovými rozsahy na rozsahu do 200 Ω (2 k 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.

Na každém rozsahu kontrolujeme koncové body rozsahu a linearitu minimálně na jednom rozsahu etalonem pro plnou hodnotu a desetinu rozsahu.

9.4.8 Varianta kalibrace A, B, kapacita

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.

Při variantě kalibrace C kontrolujeme etalonem 1 nF ze sady etalonů impedance.

Pokud je k dispozici více etalonů kapacity, mohou se použít k doplnění kalibrace, není ale nezbytné. Kapacita je výhodná pro kontrolu vysokých impedancí. Kontrolujeme koncové body rozsahů etalonů příslušné hodnoty. Alespoň na jednom rozsahu kontrolujeme linearitu minimálně etalonem pro plnou hodnotu a pro desetinu rozsahu.

9.4.9 Indukčnost

Obvykle se u RLC měřičů kontroluje jen v jednom bodě nebo se samostatně nekontroluje. Pokud jsou k dispozici vhodné etalony, je možné kalibraci pro kontrolu provést. Toroidní etalony připojíme přímo (měřič nebo etalon je při tom podložen vhodnou nevodivou krabicí, aby příводы 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. Kontrolujeme obdobně jako u odporu nebo kapacity.

Poznámka:

Při kalibraci metodou funkčních bloků se kalibruje na rozsahu indukčnosti pouze jedna nebo dvě hodnoty. Přitom se předpokládá na základě funkční analýzy přístroje, že vyhoví i ostatní hodnoty

9.4.10 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 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 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 23polystyrénovým (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 se vkládanými nebo nedokonale přivařenými přívody časem podstatně zhoršují své ztráty).

9.4.11 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).

9.5 Metoda podle principu černé skřínky

9.5.1 Metoda podle principu černé skřínky

- kontrola hlavních složek měřené impedance,
- kalibrace pro vedlejší složky měřené impedance.

Metoda funkčních bloků. Doporučené kalibrační body podle principu černé skřínky

funkce	Rozsah měřiče RLC impedance	Kalibrované body /Ω/		
		Začátek rozsahu	Střed rozsahu	Plný rozsah
R	nejnižší	zkrat	-	90 %
R	všechny ostatní	10 %	-	90 %
R	jeden (střední)	10 %	50 %	90 %
R	nejvyšší *	10 %	-	90%
R	nejvyšší **	2x hranice rozsahu	-	10x hranice rozsahu
C_1	vybraný		50 % - 90 %	-
D_1	-	-	vedlejší složka D pro C_1	-
C	všechny	-	50 %	-
L	všechny	-	50 %	-

* když je rozsah omezen shora

** když rozsah není omezen shora

Je doporučena, není však nezbytná. Je náročnější, protože etalony pro specifikaci vedlejší složky (D , Q , R_s , R_p) nejsou obvykle dostupné. Pokud je u etalonu pro hlavní složku specifikována i vedlejší složka využíváme ji i při kalibraci.

Poznámka:

Z vedlejších složek je nejdůležitější ztrátový činitel kapacity D . Pro kondenzátory s plynným dielektrikem je D pod hranicí měřitelnosti autobalančních mostů, rovná se tedy přibližně nule. U kondenzátorů s pevným dielektrikem je nejmenší pro styroflexové dielektrikum, ale jen pro kondenzátory s přivařenými elektrodami, řádu 10^{-4} a to je na hranici měřitelnosti autobalančních mostů. Proto můžeme kondenzátory s plynným nebo styroflexovým dielektrikem používat pro kontrolu nuly pro ztrátový činitel kapacity. Z principu činnosti autobalančních mostů vyplývá, že most může pro nízkoztrátové kondenzátory ukazovat i zápornou hodnotu ztrát. Pozor na ztráty u kapacit velkých hodnot, tam se uplatní všechny nedokonalosti připojení.

Kalibrace čtyřsvorkových mostů kalibrovaných na frekvenční charakteristiku jako dvousvorkové.

Kalibrace běžných mostů s dvousvorkovým připojením je popsána v KP 4.1.2/15/15, Dvousvorkový kapesní měřič RLC. Skupina kapesních měřičů RLC se vyznačuje tím, že má jen dvě připojovací svorky, případně kontaktní pole, které může být zapojeno jako čtyřsvorkové (mosty GenRad) nebo dvousvorkové.

9.6 Speciální doplňkové testy

Některé typy mostů mohou pracovat s kabely různé délky a mají zaváděné korekce na délku kabelů. Ke kontrole těchto korekcí navrhuje výrobci testy spočívající v měření s kabely různé délky nebo vložením útlumu nebo zátěže do některého z přívodních kabelů, obvykle podle doporučení výrobce mostu.

9.7 Kritéria schválení / zamítnutí

Popisovaná metodika umožňuje hodnotit parametry přístrojů pouze v rozsahu, ve kterém bylo provedeno měření. Hodnotí se splnění specifikace výrobce. Kritériem splnění specifikovaného limitu je požadavek, aby naměřená hodnota ležela uvnitř specifikovaného limitu zmenšeného o nejistotu hodnoty etalonu v době a podmínkách měření.

Poznámka: za předpokladu normálního rozdělení znamená tento požadavek riziko odběratele 2,5 % pro přijetí vadného měřidla jako správného.

9.8 Záznamy

Při měření se zaznamenává:

- teplota a její tolerance v době a místě měření,
- výsledky autotestů,
- referenční rovina a její umístění,
- úroveň měřicího signálu a provedení korekcí naprázdno a nakrátko,
- zda se jedná o paralelní nebo sériové náhradní zapojení,
- délka přívodních kabelů,
- způsob připojení mostu k etalonu (zvláště důležité je to pro připojení dvousvorkových etalonů L ke čtyřsvorkovým mostům),

- naměřené hodnoty pro generátor signálu,
- naměřené hodnoty při měření impedancí.

Pokud bylo prováděno nastavení v kterékoli funkci nebo rozsahu, uvádí se údaje před i po nastavení.

9.9 Postup vyhodnocení, pro odhad nejistoty

Při vyčíslení nejistoty je nutno uvažovat nejméně:

- nejistotu kalibrace etalonu,
- časový drift etalonu od doby kalibrace,
- teplotní závislost etalonu včetně nejistoty stanovení teploty,
- rozlišení přístroje, který je kalibrován,
- nejistoty typu A při kalibraci.

9.10 Varianta kalibrace s kalibrátorem impedance M 550

Varianta kalibrace B.

Kalibrátor impedance Meatest M 550 pro čtyřsvorkové 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. 6: Kalibrátor impedance Meatest M 550

Kalibrátor umožňuje různé druhy připojení měřené impedance, čtyřsvorkové, čtyřpárové i dvousvorkové připojení impedance z kalibrátoru ke kalibrovanému přístroji. Dvousvorkový způsob připojení impedančního kalibrátoru k testovanému LCR měřidlu je nejjednodušší, metoda závisí však na mnoha faktorech, které mají horší přesnost 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. Uvažuje se vhodné pro použití pouze do 1 kHz. Ke kalibrátoru připojíme kalibrovaný měřič podle obrázku.



Obr. č. 7: Připojení RLC měřiče s čtyřpárovým připojením ke kalibrátoru M 550



Obr. č. 8: Připojení RLC měřiče s čtyřsvorkovým připojením ke kalibrátoru M 550

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 přístroj, 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,
- frekvence a výstupní napětí nastavené na kalibrovaném generátoru,
- odpovídající konvenční hodnota napětí a frekvence tj. napětí udávané multimetrem a frekvence udávaná čítačem,
- zjištěná hodnota činitele harmonického zkreslení nebo obsahu harmonických,
- uvede se poznámka, které jsou převažující složky zkreslení (2. nebo 3. harmonická, šum nebo rušení na násobcích 50 Hz),
- dovolené chyby parametrů zkoušeného RLC metru v jednotlivých kontrolních bodech vyjádřené v procentech,
- zjištěné chyby parametrů zkoušeného RLC metru v jednotlivých kontrolních bodech vyjádřené v procentech,
- nejistota kalibrace.

10.2 Rozhodnutí o výsledku kalibrace

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

10.3 Postup v případě neshody

V případě, že kalibrovaný přístroj 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 přístroj jiným požadavkům, předává vedoucí kalibrační laboratoře objednateli kalibrace návrh na opravu nebo na vyřazení přístroje.

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 přístroje.

11. Kalibrační list

Výsledky měření by měly být uváděny v souladu s normou ČSN EN ISO/IEC 17025:2005 a jejího článku 5.10 – Uvádění výsledků. Jednou z forem je kalibrační list, nebo podle DIS ISO/IEC DIS 17025:2016(E), článek 7.8.

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 mostu,
- e) datum přijetí přístroje 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 4.1.3/01/17),
- 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 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), ale kalibrační laboratoř vždy musí zpracovat 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 může kalibrační laboratoř označit kalibrované měřidlo kalibrační značkou, popř. 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 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 měřidla).

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**.

11.4 Dokumentace o převzetí ke kalibraci a předání kalibrovaného přístroje

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

Po skončení kalibrace přístroje 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 přístroje, 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 17025:2005 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, 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	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 při kalibraci

Výpočet nejistot

Při určování a vyjádření nejistot se musí splňovat kritéria EA-4/02.

Kalibrace RLC mostu, když most je bez funkce paměti nastavení nuly.

Obecná rovnice je:

$$e_X = Z_X + \delta_{ZX} - (\delta_{ZX0} + Z_{X0}) - (Z_S + \delta Z_{SD} + \delta Z_{ST})$$

Kde:

e_x - chyba při čtení mostu v každém kalibračním bodě,

Z_X - čtení mostu, když je použit etalon,

Z_{X0} - indikace můstku při aplikaci přípravku short,

δ_{ZX} - korekce v důsledku konečného rozlišení můstku, když je připojen etalon,

δ_{ZX0} - korekce v důsledku konečného rozlišení můstku, když je připojen short,

Z_S - hodnota etalonu podle jeho kalibrace,

δZ_{SD} - korekce kalibrované hodnoty etalonu vlivem dlouhodobému driftu hodnoty,

δZ_{ST} - korekce kalibrované hodnoty etalonu v důsledku vlivu teploty.

Numerický příklad**Most s nastavením nuly**

Příklad kalibrace ukazuje uplatňování postupu v jednom z kalibračních bodů pro kalibraci RLC mostu, jak je uvedeno výrobcem.

Kalibrovaný most má specifikace $\pm (0,25 \% + 1 \text{ digit})$ a kalibrace je provedena, pokud $d > 10$ pro odpory a $Q > 10$ pro indukčnosti a kapacity.

Specifikovaná referenční teplota je $23 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$.

Most pracuje na **frekvenci 1 kHz** s aplikováním měřicího napětí 1 V.

Kalibrovaný most má také funkci "nula", která se provádí před měřením a kontroluje po měření.

Kalibrace se provádí v laboratoři, kde je teplota $23 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$, vliv vlhkosti na etalony používané při kalibraci je zanedbatelný. (V opačném případě budeme muset uvažovat o provedení oprav a nejistoty spojené s nimi).

V tomto příkladě se vyhodnocuje **kalibrační bod 1 k Ω** etalonem odporu.

Chybová funkce pro měření odporu je:

$$e_x = R_x + \delta R_x - (R_s + \delta R_{SD} + \delta R_{ST})$$

Přiřazení složek nejistoty.

a) Nejistota **kalibrace použitého etalonu odporu** je $u(R_s)$.

Podle kalibračního listu má odpor při teplotě $23 \text{ }^\circ\text{C}$ a frekvenci 1 kHz následující hodnotu:
 $1,000\ 02 \text{ k}\Omega \pm 0,50 \text{ }\Omega$

Platí pro $k = 2$, při referenční teplotě ($23 \text{ }^\circ\text{C}$). Víme, že tento odpor má $D > 100$.
nejistota podle kalibračního listu je

$$u(R_s) = 0,50 \text{ }\Omega / 2.$$

b) Nejistota **spojená s driftem hodnoty etalonu** je $u(\delta R_{SD})$

Historické záznamy kalibrací etalonu odporu ukazují, že jeho hodnota roste lineárně s časem a odhaduje se, že drift od poslední kalibrace, byl $+0,1 \text{ }\Omega$ s nejistotou $0,1 \text{ }\Omega$.

Tato hodnota je proti nejistotě kalibrace $u(R_s) = 0,50 \text{ }\Omega$ zcela zanedbatelná
 $(\delta R_{SD}) = 0,10 \text{ }\Omega / \sqrt{3}$.

c) Nejistota spojená s **vlivem teploty etalonu** $u(\delta R_{ST})$.

Teplotní koeficient odporu je $0,02 \text{ }\Omega \text{ K}^{-1}$.

To představuje maximální odchylku odporu vlivem teploty $\pm 0,04 \text{ }\Omega$.

$$u(\delta R_{ST}) = 0,04 \text{ }\Omega / \sqrt{3}.$$

d) Nejistota vlivem **rozptylu čtení na mostu** $u(R_x)$.

Naměřená hodnota (čtení) je $1,000\ 1 \text{ k}\Omega$.

Naměřené hodnoty byly stabilní s maximálním dosahem kolísání ± 1 dílek.

Ekvivalent pro kolísání ± 1 dílek je $\pm 0,1 \Omega$, proto je rozlišení $0,05 \Omega$,

$$u(Rx) = 0,05\Omega / \sqrt{3}.$$

e) Nejistota způsobená **rozlišením mostu** ke kalibraci $u(\delta Rx)$ Rozlišení mostu je $\pm 0,1 \Omega$.

$$u(\delta Rx) = 0,1\Omega / \sqrt{3}.$$

složka	Označení X_i	hodnota	nejistota (Ω)	Rozložení	koeficient citlivosti	nejistota (Ω)
$u_1(y)$	R_s	1,000 03 k Ω	0,50/2	normální	-1	-0,25
$u_2(y)$	δR_{SD}	0,01 Ω	0,10/ $\sqrt{3}$	pravoúhlé	-1	-0,06
$u_3(y)$	δR_{ST}	0 Ω	0,04/ $\sqrt{3}$	pravoúhlé	-1	-0,023
$u_4(y)$	R_x	1,000 1 k Ω	0,10/ $\sqrt{3}$	pravoúhlé	1	0,06
$u_5(y)$	δR_x	0 Ω	0,05/ $\sqrt{3}$	pravoúhlé	1	0,03
$u(e_x)$	e_x	0,07 Ω				$u(e_x) = 0,27$

Výpočet rozšířené nejistoty

Všechny vstupní veličiny jsou nezávislé, a proto by se neměly brát v úvahu korelační koeficienty, a standardní nejistota vzhledem k jedné dominantní složce byla přijata jako blízká k obdélníkovému rozdělení a počtu efektivních stupňů volnosti $\rightarrow \infty$.

Rozšířená nejistota odpovídá hladině spolehlivosti přibližně 95 % a $k = 2$.

$$U = 2 u(e_x) = 0,54 \Omega.$$

Vyjádření výsledku kalibrace

Výsledky kalibrace jsou obvykle uvedeny ve formě tabulky pro každou funkci, kde se udává hodnota etalonu, čtení přístroje, chyby přístrojů a nejistoty spojené s kalibrací, provozní podmínky přístroje během měření, realizace nulové funkce, provádějící měření teploty, kabely nebo typy kabelů používaných atd.

Funkce:	Měření R_p			
Nastavení:	1 kHz, paralelní náhradní zapojení, rychlost mostu slow, přívody 1m, nulováno			
Jmenovitá hodnota	Hodnota etalonu Při 1 kHz	Údaj kalibrovaného mostu	chyba	Nejistota ($k = 2$)
1 k Ω	1,000 03 k Ω $d > 100$	1,000 1 k Ω	0,07 k Ω	0,54 Ω

Rozšířená nejistota kalibrace, odpovídá hladině spolehlivosti přibližně 95 %, což pro normální rozdělení odpovídá standardní nejistotě násobené faktorem $k = 2$. Nejistota měření byla určena v souladu s publikací EA - 4/02.

Analýza výsledků

Získané výsledky ukazují, že přístroj je v daných tolerancích, a proto není nutné nastavení. V tomto případě je relativní nejistota kalibrace 0,054 %, která je téměř pětkrát nižší, než je uvedeno výrobcem ve specifikaci kalibrovaného mostu.

Zjištěná odchylka je v mezích kalibračním nejistoty, které by splňovaly jakákoliv kritéria v plnění specifikace, proto se most nedostavuje.

15 Validace

Kalibrační metody podléhají validaci v souladu s normou ČSN EN ISO/IEC 1702:2005 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

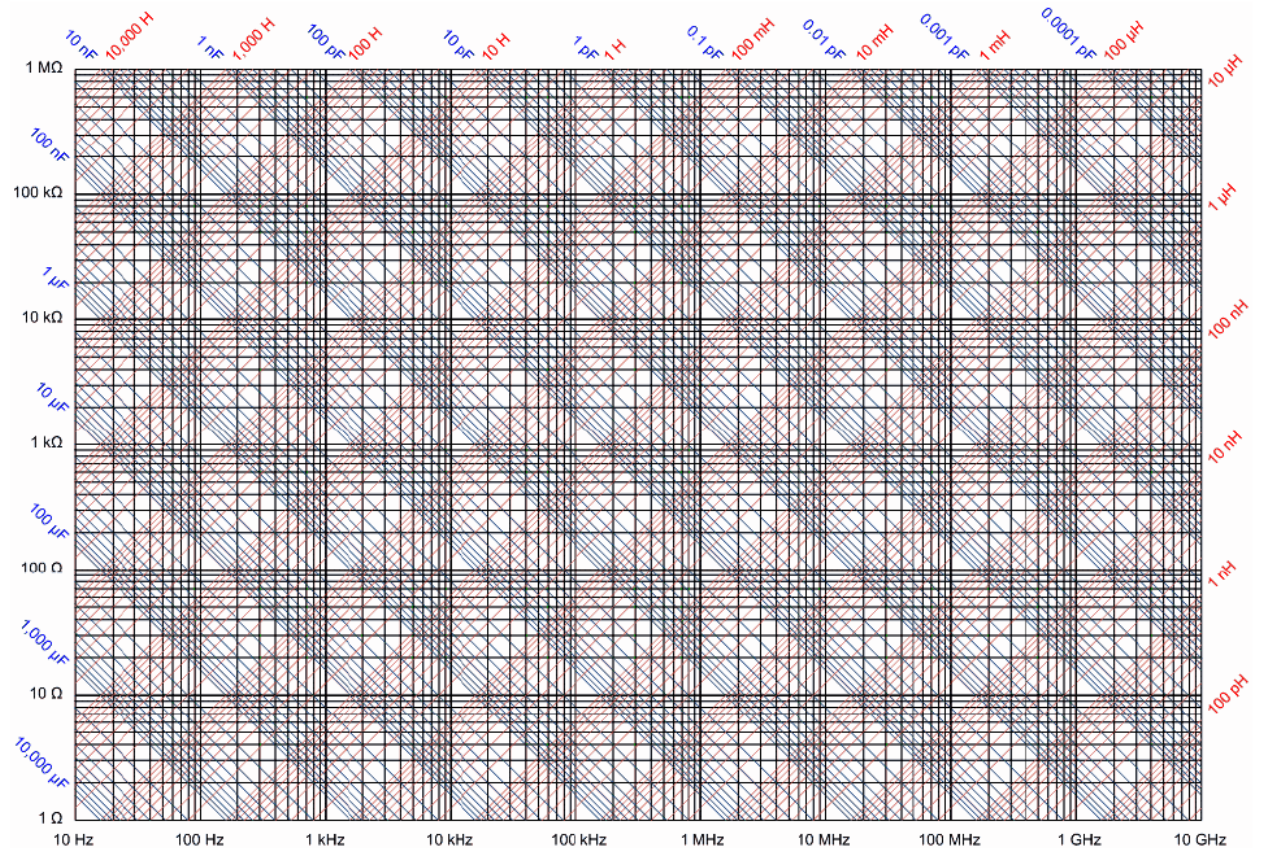
Přílohy nejsou přímou součástí kalibračního postupu.

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.

Rozsah příloh je v tomto případě omezen, protože k uvedené problematice je k dispozici snadno dostupně obsáhlá literatura, uvedená v článku 2 této metodiky.

Impedanční diagram



Obr. č. 9: Impedanční diagram je základní pomůcka pro rychlou orientaci o velikosti měřené impedance a její závislosti na frekvenci.

Poznámka

Metallized Polypropylene Sulfide (MPPS) je perspektivní materiál pro etalony kapacity nad 100 nF.

Orientační přehled vlastností M550 podle dokumentu:
Impedance Calibrator Operation manual „Meatest Brno“

Mode	Output terminals	Type of standard	R/C/L range	Applicable frequency range ^{1,2}	Connection	Calibration values	Displayed parameter pairs	Application
4TP	4 TP H _{CCX} - H _{POC} L _{FOR} - L _{CCX}	Resistance	0.1Ω to 100MΩ	20 Hz to 1 MHz	Coaxial 4 x BNC	Separated for CORR ON and CORR OFF	Rs-Ls, Rs-Cs Rp-Cp, Rp-Lp G-B, R-X Z-θ, Y-θ	4 terminal coaxial LCR meters calibration
		Capacitance	100pF to 100μF	20 Hz to 1 MHz			Cp-Rp, Cp-Gp Cs-Rs, Cp-D, Cs-D Z-θ, Y-θ	
		Inductance	10μH to 10H	20 Hz to 100 kHz			Ls-Rs, Ls-Q	
4W	4W/2W H _{CCX} - H _{POC} L _{FOR} - L _{CCX}	Resistance	0.1Ω to 100MΩ	20 Hz to 100 kHz ^{1,3}	4 x banana	Separated for CORR ON and CORR OFF	Rs-Ls, Rs-Cs Rp-Cp, Rp-Lp G-B, R-X Z-θ, Y-θ	4 terminal banana LCR meters calibration
		Capacitance	100pF to 100μF	20 Hz to 100 kHz ^{1,3}			Cp-Rp, Cp-Gp Cs-Rs, Cp-D, Cs-D Z-θ, Y-θ	
2W	4W/2W H _{CCX} - L _{CCX}	Resistance	0.1Ω to 100MΩ	1 kHz ^{1,4}	2 x banana	No correction available	R	2 terminal banana LCR meters calibration
		Capacitance	100pF to 100μF	1 kHz ^{1,4}			C	

Tab. F. Modes of operation

Nepronádejte!