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 4.1.2/16/16

AC R
ETALONY ODPORU PRO STŘÍDAVÝ PROUD

Neprodejné

Praha
Říjen 2016

Neprodejné

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 odporu rozsahu od 0,1 Ω do 10 MΩ na frekvenci 1 kHz až 1 MHz pro dvousvorkové, třísvorkové, čtyřsvorkové, pětisvorkové a čtyřpárové připojení.
Metodiku lze použít v rozsahu frekvence od 20 Hz až 50 Hz pro drátové etalony odporu.
Metodiku lze použít v rozsahu frekvence od 20 Hz do 10 kHz pro etalony Tinsey 5685A s hodnotou max. 10 k Ω.
Metodiku lze použít v rozsahu frekvence od 20 Hz do 1MHz pro etalony Meatest M530, s hodnotou max. 10 k Ω individuálně vyrobené s metal foil nebo metalized resistory vybraných typů nebo pro kalibrátor atest M 530.
Metodiku lze použít v rozsahu frekvence od 20 Hz do 10 MHz pro etalony řady 16380 nebo 42030 výroby Hewlett Packard, Agilent nebo Keysight.
Metodiku lze použít v rozsahu frekvence od 20 Hz do 100 MHz pro etalony Meatest M530
Pro hodnoty 0,1 Ω až 100 Ω se udává obvykle výsledek měření pro sériové náhradní zapojení.
Pro hodnoty nad 100 Ω se udává obvykle výsledek měření pro paralelní náhradní zapojení.
Metodika obsahuje i pokyny pro kalibraci etalonů impedance *Z* pro *Z* od 0,1 Ω do 10 kΩ, při frekvenci 50 Hz.

2 Související normy a metrologické předpisy

Agilent-(Keysifht)	Impedance Measurement Handbook A guide to measurement technology and techniques 4th Edition	[1]
Quad Tech	LCR measurement primer	[2]
NPL Velká Britanie	A Guide to measuring resistance and impedance below 1 MHz	[3]
MSL Technical Guide 27	Impedance (RLC) Standards, Measurement Standards Laboratory of New Zealand	[4]
KP 4.1.2/18/16	Etalony kapacity	[5]
KP 4.1.2/17/16	Etalony indukčnosti	[6]

3 Kvalifikace pracovníků provádějících kalibraci

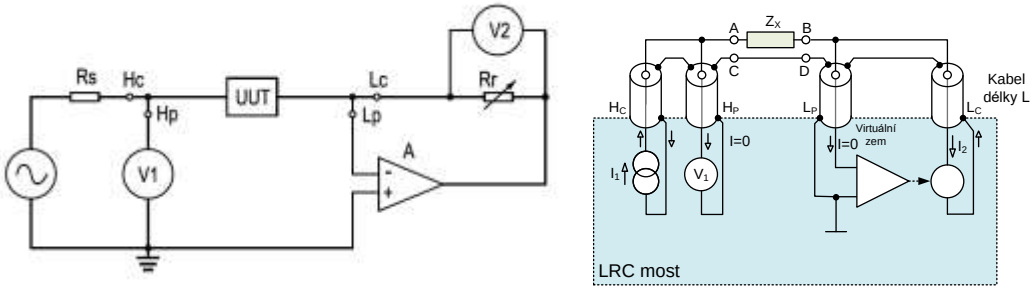
Kvalifikace pracovníků provádějících kalibraci etalonů odporu je dána příslušným předpisem organizace. Tito pracovníci se seznámí s kalibračním postupem upraveným na konkrétní podmínky kalibrační laboratoře nebo obdobného pracoviště provádějícího kontroly měřidel a souvisejícími předpisy. Proces udržování 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 impedance 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 připojuje obvykle čtyřsvorkově nebo čtyřpárově.
Prakticky všechny průmyslově vyráběné měřiče impedancí jsou řešeny na tomto principu.

neprodejné



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 převážné většiny kapesních měřičů RLC.

Nejmodernější velké a přesné přístroje bývají někdy specifikovány jako dvousvorkové s přípravkem na dvousvorkové připojení, protože to je nejbližší praxi, kdy se měří součástky s drátovými přívody.

Jako etalon pro dvousvorkové připojení můžeme použít vhodnou součástku s drátovými přívody, méně často v provedení SMD. Pro častější použití při užití SMD je vhodnější montovat etalon na vhodnou kontaktní plochu, jak ukazuje obrázek č. 2.

Obrázek č. 2: Ukázka provedení dvousvorkového etalonu pro měřič se vstupem 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. Je vhodné pro měření středních a velkých hodnot impedance. Nejčastěji se při střídavém měření používají k připojení koaxiální kabely.

Pro AC R s hodnotou pod 10kΩ není doporučeno.

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

Nerozdělí

se při střídavém měření starých klasických typů etalonů R při měření na 50 Hz používají zkroucené nebo stíněné vodiče.

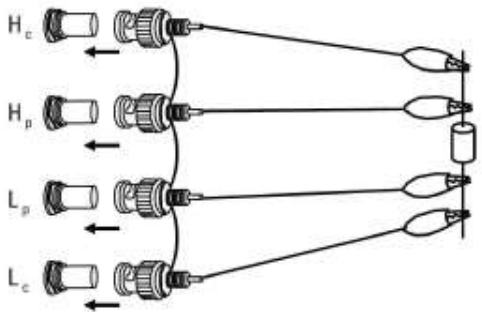
Pětisvorkové připojení - obdobně jako u čtyřsvorkového připojení jsou na měřený prvek připojeny napěťové a proudové přívody. Měřený prvek je ale navíc opatřen stíněním vyvedeným na pátou svorku. Toto připojení má lepší vlastnosti než čtyřsvorkové zapojení, protože měřený prvek je stíněný. Nejčastěji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

Dvoupárové připojení - používaná zkratka 2TP.
připojení se dvěma koaxiálními kabely, časté je toto použití v odporové termometrii nebo pro oblast revizních přístrojů.

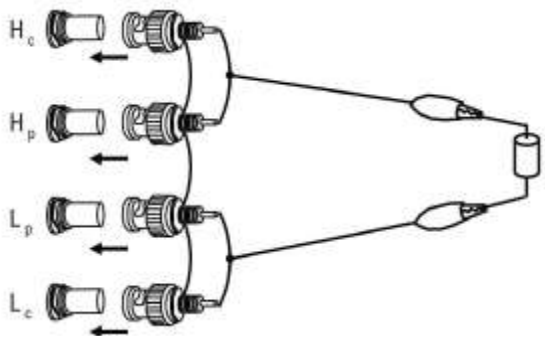
Čtyřpárové připojení - používaná zkratka 4TP (Terminal Pair). Nejdůležitější a nejčastěji používané připojení pro měření impedance k autobalančním mostům. Je vhodné pro nejširší rozsah měření impedancí ze všech uvedených zapojení. Měřený prvek je umístěn ve stínícím krytu a vyveden čtyřsvorkově na čtyři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

Obrázek č. 3: Etalony pro čtyřsvorkové a čtyřpárové připojení

Obrázek č. 4: Ultraširokopásmové etalony R Meatest



Obrázek č. 5: Přechod 4 TP na čtyřsvorkové připojení



Obrázek č. 6: Přechod 4 TP na dvousvorkové připojení

Obvyklé označení pro měřicí svorky autobalančního mostu

Hi Drive - (Hi I) budící 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. 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.

Obrázek č. 7: Čtyřpárové etalony připojené přímo na most bez kabelů.

Vyjádření měřené impedance

Impedance a admitance

Zjištění charakteru prvku znamená stanovit poměr mezi napětím a proudem u libovolného měřeného obvodu. Tento charakter vychází z fázového posunu mezi celkovým proudem a napětím, při čemž úhel se počítá od napětí k proudu. Podle převažující složky získáme tři typy charakteru reálného prvku, a to odporový ($\varphi = 0$), induktivní ($\varphi > 0$) a kapacitní ($\varphi < 0$).

Proto je pro střídavé parametry zaveden **pojem *impedance* a *admitance***. Impedance je poměr mezi střídavým napětím a proudem, je to určitá analogie odporu pro DC signál. Protože napětí i proud jsou komplexními čísly, musí být i impedance komplexním číslem, značíme ji *Z*, jednotkou je ohm (Ω). Setkáváme se s *Z* nejčastěji u přístrojů pro revizní techniky a v odporové termometrii.

Převrácenou hodnotou impedance je admitance, je to opět určitá analogie vodivosti pro

DC, označuje se *Y* a její jednotkou je siemens (S). Při měření reálných prvků pak tedy stanovujeme výsledný charakter prvku.

Náhradní zapojení

Nevýhodou impedančních měření v metrologii je, že nejsou k disposici ideální prvky a proto se musí měřit vlastnosti reálného prvku podle zvoleného náhradního zapojení, to je obvykle pro paralelní nebo sériovou kombinaci náhradních prvků a pro zvolené vyjádření složek jako impedance nebo admitance. Náhradní zapojení prvku je platné jen na určité frekvenci.

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

Například pro měřenou impedanci Z = 1000 Ω – j1000 Ω na frekvenci 1,5915 kHz můžeme použít dvě náhradní schémata, sériové zapojení odporu 1 kΩ a kapacity 0,1 μF, nebo paralelní zapojení odporu 2 kΩ a kapacity 0,05 μF. Pozor, udané náhradní zapojení platí jen pro danou frekvenci!

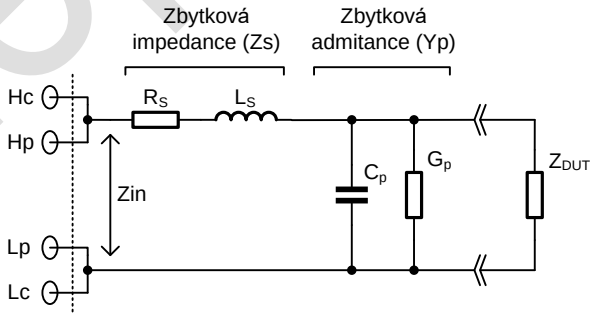
Etalon R a kalibrace RLC mostů

Ideální rezistor je frekvenčně nezávislý a i správně navržený etalon e skutečným odporovým prvkem má malou frekvenční závislost a proto umožňuje kalibraci RLC mostu na jednom rozsahu mostu na několika frekvencích. To je základní výhoda proti použití etalonů kapacity a etalonů indukčnosti, jejichž impedance se s frekvencí mění a proto při změně frekvence jedním etalonem kontrolujeme různé části rozsahů mostu. To může být někdy výhoda, ale většinou je to nevýhoda.

Kompenzace open a short pro střídavá měření impedancí

Kompenzaci *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.



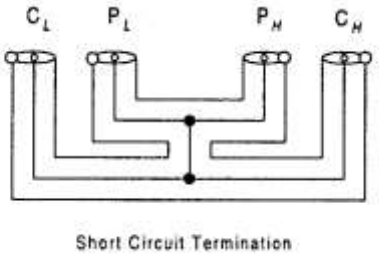
Obrázek č. 8: Open a short kompenzace. Z_{dut} = 0 (short), $Z_{dut} \to \infty$ (open), náhradní schéma

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

Neprodejné

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 1 mΩ.

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. 9: 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.

5 Obecné podmínky kalibrace

Měření probíhá obvykle v klimatizované laboratoři, kde teplota je udržována klimatizací na hodnotě $t = (23 \pm 2)$ °C.
Kalibrovaný etalon se zpravidla umísťuje na vzduchu.
Podmínky jsou monitorovány a zaznamenávány.
Doporučuje se monitorovat teplotu etalonu teploměrem přímo na etalonu.
Měřený etalon se nesmí výkonově přetěžovat velikostí měřeného signálu. U většiny RLC mostů to zajistí omezená velikost měřicího signálu 1 V, (max. 5 V) a jeho připojení do měřicího obvodu přes oddělovací odpor, obvykle 50 Ω.
Vlhkost může ovlivnit parametry etalonu poměrně málo, pro přesná měření může zvětšená vlhkost zvýšit ztráty, hlavně u nehermetických etalonů.
Pro kalibrované etalony plněné olejem, kde je možné a v praxi i používané umístění etalonu vývody nahoru i vývody na bok, je nutné zapsat do kalibračního listu zvolenou polohu.
Pro etalony se 4 BNC konektory, které se dají připojit na kalibrovaný most přímo bez kabelů, volíme přednostně polohu konektory na bok. Je to nezbytné uvést pro etalony vyrobené s foliovými odpory v pouzdře plněném olejem.

6 Prostředky potřebné pro kalibraci

Pro kalibrace popsané v tomto postupu, je nutné mít k dispozici:
Impedanční most s rozlišením nejméně 5 digit při měření odporu s kalibrační nejistotou, ne více než třetina tolerance odporu, který má být kalibrován. Tento můstek musí být schopen měřit odpor v kmitočtovém rozsahu kalibrace. Je žádoucí, aby můstek mohl měřit odpor s nejistotou měření zhruba 0,02 % ze čtení na referenční frekvenci 1 kHz.
Pokud bude měření provedeno porovnáním s etalony AC R, musí být tyto etalony k

Nekopírujte

disposici ve stejných jmenovitých hodnotách a v provedení pro stejný typ připojení, nebo se použijí korekční data podle kalibrace etalonového můstku.
Čtyři kusy koaxiálních připojovacích kabelů s kvalitními konektory BNC-BNC, délka 1m, (tato sada kabelů je obvykle příslušenství impedančních mostů).

Obrázek č. 10: T kus BNC v provedení Y (podle GES.cz)

Dva kusy T článek BNC, přednostně provedení typu Y (například GES BNC T Y)

Obrázek č. 11: Přechod BNC/ banánek

Dva kusy přechod BNC/ banánek.

DMM, nejméně 6,5 digit pro měření DC R.

Teploměr nebo lépe zapisovač teploty a relativní vlhkosti.

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

Neprodejné

7 Rozsah kalibrace

Princip kalibrace
Ke stanovení hodnoty neznámého odporu se v laboratoři používá:

- **substituční metoda,** kdy referenční etalon (ACR_E) se známou hodnotou odporu je změřen RLC mostem a stejné měření je provedeno i s kalibrovaným etalonem (ACR_X),
- **metoda přímého odečtu odporu kalibrovaného etalonu** na vhodném RLC měřidle. Je vhodná pro běžné etalony a odporové dekády (vzhledem ke specifikacím mostů).

Kalibrace zahrnuje jedno ze zvolených připojení, kterými jsou dvousvorkové, třísvorkové, čtyřsvorkové, dvoupárové a čtyřpárové připojení.
Kalibrace pro odpor pod 10 **Ω** se přednostně dělá pro sériové náhradní zapojení, pro nastavení R_S a L_S.

Kalibrace pro odpor nad 100 Ω se přednostně dělá pro paralelní náhradní zapojení, pro nastavení R_p a $C_{P.}$
Podrobněji viz kapitola 9.7.

8 Kontrola dodávky a příprava ke kalibraci

8.1 Přezkoumání smlouvy, kontrola dodávky a příprava ke kalibraci

Zakázka na kalibraci se při přebírání přezkoumává podle **ČSN EN ISO/IEC 17025, odst. 4.4** nebo po revizi normy v 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 zákazníka. Při přebírání přístroje 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.
Dále se provede předběžná kontrola, spočívající ve vnější prohlídce přístroje.
Podle WD2 ISO/IEC 17025 kapitola 7 a body:
7.1.1.1 Laboratoř musí vytvořit a udržovat postupy pro přezkoumání žádostí, výběrových řízení a smluv. Zásady a postupy pro tyto názory vedoucích ke smlouvě pro testování a/nebo kalibrace zajistí, aby:
a) požadavky byly odpovídajícím způsobem definovány, zdokumentovány a pochopeny (viz 7.2.2.2),
b) laboratoř měla schopnosti a zdroje, aby splňovaly požadavky zakázky,
c) příslušná kalibrační procedura byla vybrána a bude schopna vyhovět požadavkům zákazníků (viz 7.2.2.2). Jakékoli rozdíly mezi žádosti nebo nabídky a smlouvy musí být vyřešeny před započetím práce. Každá smlouva musí být přijatelná jak pro laboratoř tak pro zákazníka. Odchylky přání zákazníka nesmí ohrozit laboratorní integritu.
Poznámka 1: 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 2: 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, přezkum nemusí být provedeno pouze v počáteční fázi šetření nebo o udělení zakázky na pokračující rutinní práci vykonanou v rámci obecné dohodě se zákazníkem za předpokladu, že požadavky zákazníka zůstávají nezměněny. Pro novou, složitou nebo pokročilou kalibrační činnost, by měl být zachován obsáhlejší záznam.
7.1.1.3 Do přezkumu bude nutné rovněž zahrnovat všechny práce zadané subdodavatelům laboratoře.

Neprodejné

7.1.1.4 Zákazník musí být informován o každé odchylce od smlouvy.
7.1.1.5 Pokud je potřeba, aby zakázka, měla být změněna poté, co laboratoř zahájila činnost, musí být použit stejný proces přezkoumání smlouvy 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.). U dvousvorkových etalonů je obvykle etalonový prvek méně chráněný a prvek nebo kryt nesmí být poškozený. Etalon, u kterého se zjistí závada vylučující kalibraci, se nepřijme na kalibraci. Postup kontroly:

- zkontrolujte, že kalibrovaný odpor je identifikován značkou, číslem modelu a příslušné série, nebo na základě jedinečného interního kódu vlastníka. Kdyby to nebylo, tak bude přidělen identifikační kód kalibrační laboratoří, obvykle identifikovaný štítkem bezpečně přilepeným na kalibrovaný etalon,
- zkontrolujte návod k obsluze ke kalibrovanému etalonu tak, aby osoba provádějící kalibraci se mohla seznámit s jeho vlastnostmi a mohla být prozkoumána možnost splnění požadavků při kalibraci,
- etalony odporu, na které se používá tento kalibrační postup, se nejustují,
- stav a pevnost připojovacích svorek musí být kontrolovány, v případě potřeby se provádí jejich čištění. Zkontrolujte, že je umístěn zkrat mezi svorkami "LOW" a "GND" na kalibrovaném trojsvorkovém etalonu v provedení s přístrojovými svorkami a že zkratovací plíšek ani odpovídající kontaktní plochy svorek nejsou zkorodovány,
- etalon, 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 mostu a multimetru při kalibraci se před spuštěním měření provede pro tepelnou stabilizaci. Doba tepelné časové stabilizace závisí na typu přístroje, obvykle vyhoví nejméně 1 hodina.
c) Kalibrace se provádí v prostředí, kde se udržuje normální okolní teplotu mezi 22 °C a 24 °C, včetně vlivu nejistoty měření teploty etalonu a v mostech a multimetrech pro udržení jejich optimální specifikace.
Pokud není známa teplotní závislost kalibrovaného etalonu podle měření, používá se koeficient:
$1 \cdot 10^{-5}$/°C pro odpory z manganinu, zeraninu a evanohmu,
$2 \cdot 10^{-6}$/°C pro foliové odpory, jejichž specifikaci blíže neznáme,
$1 \cdot 10^{-4}$/°C nebo menší, pro metalizované odpory podle specifikace použitého prvku.
Pokud je specifikace známa, použijeme známou hodnotu při výpočtu nejistoty. Je možné provádět kalibraci v jiných než výše uvedených teplotách, ale v tomto případě bude třeba vzít v úvahu při přidělování kalibračních nejistot. Pro etalony impedance na 50 Hz s drátovými odpory z manganinu je obvyklé udávat závislost na teplotě včetně kvadratického členu,
d) Relativní vlhkost nesmí přesáhnout 70 %, i když v některých výjimečných případech se může povolit hodnoty až 80 %, pokud zákazník souhlasí (viz specifikace kalibrovaného prvku i mostu a multimetru). Kalibrovaný vícesvorkový etalon by měl být pokud možno hermeticky uzavřen, aby nebyl ovlivněn vlhkostí,

Neprodejné

e) Zkontrolujte, zda most pro měření impedance a multimetr jsou připojeny ke stejné sítové zásuvce (stejné fázi), která obsahuje ochranný vodič nebo země, jako základní míru ochrany.
Sítové kabely musí být nepoškozené a musí procházet pravidelnými revizemi.

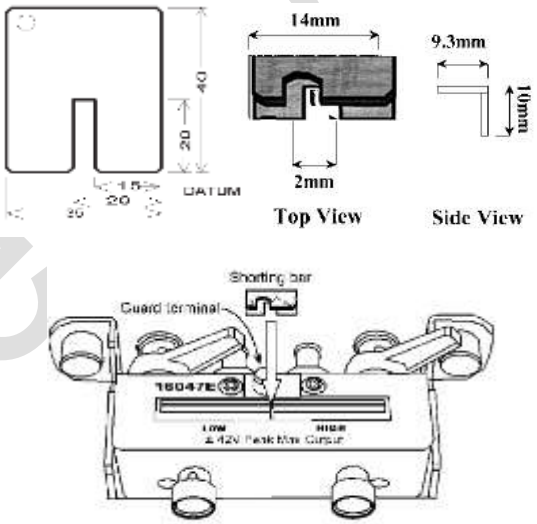
9 Postup kalibrace

9.1 Druhy zkratů při měření impedancí

V dnešní době se impedance měří zejména pomocí LCR měřičů, které pracují v širokém rozsahu frekvencí (DC až desítky MHz). Pro tyto měřiče však jsou dosavadní etalony a způsoby kalibrace velmi nedostatečné. Dosavadní starší metody kalibrace čtyřpárových měřičů impedance pro frekvence nad 10 MHz vycházely z vypočitatelných úseků koaxiálního vedení (GenRad, Hewlett Packard aj). Užívá se hlavně úsek vedení naprázdno pro etalony kapacity. To je však jen dvojpól a je realizovatelný jen pro horní část měřeného rozsahu (velké impedance). Problematika referenční roviny měření se tímto způsobem dále komplikuje přechodem mezi referenční rovinou měřiče a rovinou definice vstupní impedance vedení, která není jednoduše kompenzovatelná. Proto některé nejmodernější přístroje jsou specifikovány jako dvousvorkové (například některé typy Wayne kerr, Hioki aj.).

9.2 Dvousvorkový zkrat pro dvousvorkové přípravky s kontaktními ploškami

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



Obrázek č. 12: Příklad 2W short, provedení short fa. Agilent, - Keysight

Pro zkrat na obrázek č. 12 vlevo jsou zbytkové parametry 1mΩ a 20 nH.

9.3 Zkrat na konci kabelů

Etalonový prvek pro short můžeme nahradit dvěma T členy a spojkou na konci kabelů. Tento zkrat je univerzální pro frekvence do 10 MHz. Velká pozornost se musí věnovat propojení kabelů. Jedním T-kusem jsou propojeny proudové svorky, druhým T-kusem napěťové, a zkrat definuje propojka mezi nimi. Toto provedení je možné provést koaxiálními T-kusy a spojkou při měření s kabely, viz obrázek č. 13.

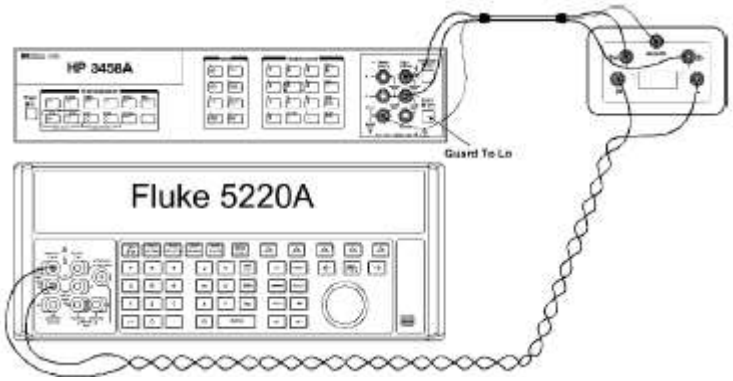
Nedělá

Obrázek č. 13: Příklad definice zkratu na konci kabelů

V případě referenční roviny přímo na svorkách mostu je nutno použít speciální etalon pro zkrat, například podle obr. 14, kde vlevo je provedení s koaxiálním vedením a vpravo s páskovým vedením (podle Keysight).

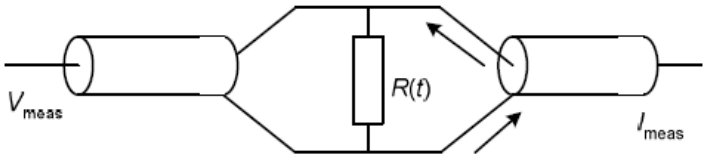
Obrázek č. 14: Zkrat provedený konstrukčně stejně jako zkraty na konci kabelů (HP 16074A a 42090A)

Použití klasických DC etalonů odporu jako etalon impedance pro 50 Hz ukazuje obr.15.



Obrázek č. 15: Provedení přívodů k etalonu s přístrojovými svorkami (přednostně jen pro 50 Hz)

Neprodejné



Obrázek č. 16: Provedení přívodů 2TP k etalonu s přístrojovými svorkami (přednostně používáme jen pro 50 Hz)

Dbáme na to, aby nebyla vazba mezi přívody. Toho dosahujeme umístěním vedení případně kroucenými přívody pro proud.

9.4 Příprava k měření

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

1. Zapnout RLC měřič do sítě a ponechat ustálit minimálně 30 minut, připojit měřící kabely, se kterými se bude provádět kalibrace - stíněné BNC kabely (+případný adapter), nebo kablíky s přechodem na připojení etalonů.
2. Nastavit RLC měřič na pomalou rychlost měření a větší počet vzorků pro průměrování, pokud to měřič umožňuje.
3. Po teplotním ustálení provést u RLC měřiče funkci „SHORT“ a „OPEN“ pro čtyřsvorkové a 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.

9.5 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 měřicím signálem na zvolené frekvenci (1 kHz) při napětí pro nejlepší specifikaci mostu (1V),
- podle požadavků zákazníka nebo technické specifikace měřeného objektu se provede měření na dalších frekvencích, případně při jiných hodnotách měřícího signálu,
- volíme měřicí kombinaci:
  - pro odpory pod 10 Ω sériovou *Rs* a *Ls*,
  - pro odpory nad 100 Ω paralelní *Rp* a *Cp*.

Je vhodné zapsat všechny hodnoty měřené při jednom nastavení měřicího signálu (napětí/proud, velikost, 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 přesně stejný, jak je zde popsáno, ale musí nejprve přizpůsobit měřící most na požadovanou frekvenci měření, kroky, tato úprava musí být v rozsahu použitelnosti etalonu, viz technické podklady výrobce.

9.6 Připojení etalonů

Spojení mezi svorkami měřicího mostu a měřeného etalonu AC R má být provedeno stíněnými koaxiálními kabely: Obvykle mosty k měření AC R mají své vlastní měřicí

Neprodejné

kabely, které se připojují přímo k měřenému etalonu AC R.
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 vodiče je měřicí svorka zapojení.
Banánky vnějšího vodiče musí být u mostů specifikovaných jako čtyřpárové, propojeny i na straně měřeného prvku.
Nejčastěji se používá most pro jejich přípravu na kroky měření, které jsou:

- zapněte přístroje a počkejte po dobu stanovenou v technické příručce pro stabilizaci teploty,
- nastavte měření AC R, měřte na frekvenci 1 kHz,
- proveďte korekce pro open (otevřený okruh) - kabely jsou v poloze jako při měření, ale měřený etalon není připojen.
- proveďte 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 AC R a indukčnost podle provedení, pro dvousvorkové provedení je to 10 nH až 30 nH (v případě potřeby je možné vypočítat) a je možné ji při malých hodnotách měřené AC R přepočíst jako korekci.
Poznámka: Je velmi důležité, že relativní poloha měřicích kabelů se nemění v průběhu procesu měření. Připojení ke čtyřsvorkovému nebo čytřpárovému mostu je takové, že 4 svorkové připojení koaxiálními kabely je pomocí 2 kusů 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 měřících adaptérů.

9.7 Princip kalibrace

Náhradní zapojení etalonů, používaná při kalibraci:

- dvousvorkové připojení, paralelní náhradní zapojení pro AC R do 100kΩ,
- třísvorkové připojení, paralelní náhradní zapojení pro AC R do 10MΩ,
- pětisvorkové připojení, paralelní náhradní zapojení pro AC R do 100MΩ,
- čtyřpárové připojení, paralelní náhradní zapojení pro AC R do 100MΩ,
- čtyřpárové připojení, sériové náhradní zapojení pro AC R pod 100Ω.

Kalibrace pro odpor pod 10 Ω se přednostně dělá pro sériové náhradní zapojení, pro nastavení R_s a L_S.
Kalibrace pro odpor nad 100 Ω se přednostně dělá pro paralelní náhradní zapojení, pro nastavení R_p a C_P.

K stanovení hodnoty neznámé AC R (dále jen AC R) se v laboratoři používá:
Substituční metoda, kdy referenční etalon (R_E) se známou hodnotou AC R je změřen RLC mostem a stejné měření je provedeno i s kalibrovaným etalonem (R_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 AC R. Metoda je vhodná pro nejpřesnější měření. Porovnání s referenčním etalonem odporu se provádí pro etalony, jejichž hodnoty se neliší o více než 5 %).

Metoda přímého odečtu AC R kalibrovaného etalonu na vhodném RLC měřiči (dále jen mostu) – vhodné především pro málo stabilní etalony a dekády AC R. Kalibrace zahrnuje jedno ze zvolených připojení, to je dvousvorkové, třísvorkové, čtyřsvorkové, dvoupárové a čtyřpárové připojení.

Kalibrovaný etalon se připojí k měřicímu zařízení buď přímo (pokud to konstrukce a typ

Neproměřené

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 měřením 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 vhodně 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.

9.8 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 měřením musí být minimálně dvě hodiny s maximálně pěti sadami měření za den. Vzhledem k tomu, že hmotnosti etalonu AC R a 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 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 etalonu,
- 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 uvedených v kapitole 7 rozhodne

Neověřená

vedoucí kalibrační laboratoře, zda kalibrovaný etalon vyhovuje nebo nevyhovuje všem požadavkům na něj kladeným.

10.3 Postup v případě neshody

V případě, že kalibrovaný etalon čerpal na od minulé rekalibrace více než 70 % specifikace, při interních kalibracích rozhoduje vedoucí kalibrační laboratoře, doporučuje se zkrátit dobu do rekalibrace. Při kalibraci externímu zákazníkovi má být zákazník informován

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.

10.4 Justování

Etalony AC R zásadně při kalibraci nejustujeme.

11 Kalibrační list

Výsledky měření by měly být uváděny v souladu s normou ČSN EN ISO 17025:2005 a jejího článku 5.10 – Uvádění výsledků.

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 etalonu 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 4.1.2/16/16),
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.

Neprodejné

v elektronické paměti). V tomto případě je vhodné, aby 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 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 kupní smlouvě se zákazníkem, nesmí kalibrační laboratoř uvádět na svém kalibračním štítku datum příští kalibrace, protože stanovení kalibrační lhůty měřidla je právem a povinností uživatele 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.**

.

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 chybné (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.

Neprodejné

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	Obdrží útvar	Jméno	Podpis	Datum

13.2 Úprava a schválení

Kalibrační postup	Jméno	Podpis	Datum
Upravil			
Úpravu schválil			

13.3 Revize

Strana	Popis změny	Zpracoval	Schválil	Datum

14 Stanovení nejistoty měření (příklad výpočtu)

Nejistota kalibrace se stanoví podle modelu EA-4/02 (příloha, příklad S2).

Kalibrace reálné složky etalonu odporu o nominální hodnotě 10 kΩ na frekvenci 10 kHz.

Kalibrace byla provedena pro etalon Meatest RP-10 porovnáním s referenčním etalonem M530 Meatest nebo Keysight 42038A.
Oba typy etalonů mají hodnotu blízkou nominální hodnotě 10 kΩ na frekvenci 10 kHz a i vedlejší složku impedance (vliv C_P je proti měřené R_P malý).

Neprodejné

Obrázek č. 17: Etalon M 530

Referenční etalon	$R_{ST.}$
• Etalon M 530 Meatest nebo Keysight 42038A	10 kΩ,
• nejistota kalibrace	0,014 % na 10 kHz,
• roční stabilita	0,005 % podle sledování driftu,
• teplotní závislost	<0,001 %/°C.

Doba od poslední kalibrace referenčního etalonu je 9 měsíců.

Obrázek č. 18: Etalon Meatest RP-10

Kalibrovaný etalon	$R_{x.}$
Meatest RP-10	10 kΩ.
Teplotní závislost	<0,000 1%/ °C.

Kalibrace byla provedena porovnáním, které bylo provedeno na mostu s dostatečnou stabilitou a rozlišením, například WK nebo Hioki nebo jiném, umožňujícím i přímé připojení etalonů bez kabelů k mostu.

Obrázek č. 19: Ukázka provedení RLC mostů- pro informaci

Paralelní složka náhradního zapojení pro odpor čtyřpárového etalonu odporu R_{px} je určena pomocí digitálního RLC metru s velkým rozsahem zobrazení (6 číslic) v režimu měření odporu *Rp* a *Cp* a kalibrovaného čtyřpárového etalonu odporu R_{PST} o stejné nominální hodnotě jako odpor, který je kalibrován jako etalon.

Neprozejné

Oba etalony jsou umístěny do dobře klimatizované laboratoři udržované na teplotě (23±1) °C, která je sledována blízko povrchu kalibrovaných etalonů teploměrem s malou sondou. Odpory jsou před měřením stabilizovány. Čtyřpárové BNC vývody každého z odporů jsou postupně připojovány přímo ke svorkám digitálního RLC metru.

RLC metr je před měřením nastaven na:

- frekvence 10 kHz,
- měřicí napětí 1 V,
- režim slow, průměrování z 16 měření,
- rozlišení 6 digit,
- open a short zapnuto a nastaveno etalony Keysight.

Etalon open, například Keysight 42090A.
Etalon short, například Keysight 42091A.

Bylo provedeno pět sad měření. Postupně pět měření $R_{ST,}$ pět měření $R_{x,}$ pět měření R_{ST} pět měření $R_{x,}$ pak kontrola stability nastavení open a short. Bezprostředně před a po měření na 1 MHz byla provedena kontrola R na DC pro sledování stability.
Měřicí proud na měřicím rozsahu 10 kΩ RLC metru i multimetru je dostatečně nízký, aby nezpůsobil žádné znatelné ohřátí odporů.
Měřicí postup současně zajišťuje, aby vlivy vnějších odporů na výsledek měření bylo možno považovat za nevýznamné.

Odpor R_x neznámého odporu je stanoven dle vztahu:

$$R_x = (R_S + \delta R_D + \delta R_{TS}) \cdot r_c \cdot r - \delta R_{TX} \qquad \text{(S3-1)}$$

Kde:
R_{ST} ... referenční odpor,
δR_{DST} ... drift hodnoty referenčního odporu od poslední kalibrace,
δR_{TST} ... teplotní změny referenčního odporu,
$r = R_{iX} / R_{iX}$ poměr zjištěných hodnot odporů,
r_C ... korekční faktor na parazitní napětí a rozlišení zařízení,
δR_{TX} ... teplotní změny neznámého odporu.

Referenční etalon (R_{ST}): Kalibrační list pro referenční etalon uvádí hodnotu odporu 10008,5 Ω ±1,4 Ω (koeficient rozšíření $k = 2$) pro paralelní náhradní zapojení, měřicí napětí 1 V, frekvenci 10 kHz a referenční teplotu 23,0 °C.

Drift hodnoty etalonu (δR_{DST}): Změna hodnoty odporu referenčního odporu od jeho poslední kalibrace je odhadnuta z jeho kalibrační historie ve výši +0,5 Ω s odchylkou v rozmezí ±1,2Ω.

.

Korekce na teplotu (δR_{TS}, δR_{TX}): Teplota je sledovaná kalibrovaným teploměrem byla v době měření 23,0 °C až 23,1 °C s nejistotu ±0,5°C.
Vzhledem k metrologickým charakteristikám použitého teploměru a teplotnímu gradientu prostředí v laboratoři je odhadnuto, že teplota okolí odporu je v souladu se sledovanou teplotou v rozmezí ± 0,6 °C.

Vliv ohřevu

Neprodejné

Most měří při napětí 1 V.
Pro měřený odpor 10 kΩ je proud ze zdroje mostu při výstupním odporu zdroje mostu R_i = 50 Ω:

$$I = 1/10000 + 50 = 0,09095 \text{ mA}.$$

Příkon na etalonu R $P = U \cdot I = 1 \text{ V} \cdot 0,09095 \text{ mA} = 0,09 \text{ mW}.$
Ohřev etalonů vlivem měřicího proudu je velmi malý, odhadneme na 0,1°C.

Referenční etalon (R_{ST})
Z toho vzhledem ke známé hodnotě teplotního součinitele odporu $1 \cdot 10^{-6}/^{o}C$ referenčního odporu vyplývá mez ± 6 mΩ pro odchylky hodnoty jeho odporu od hodnoty zjištěné při kalibraci vlivem možných odchylek od provozní teploty.

Kalibrovaný etalon R_D
Na základě údajů výrobce bylo odhadnuto, že teplotní součinitel odporu měřeného neznámého odporu s folie Z nepřesahuje $1 \cdot 10^{-6}$ K^{-1}. Z toho je pak odhadnut limit odchylek hodnot neznámého odporu ve výši ± 0,6 mΩ.

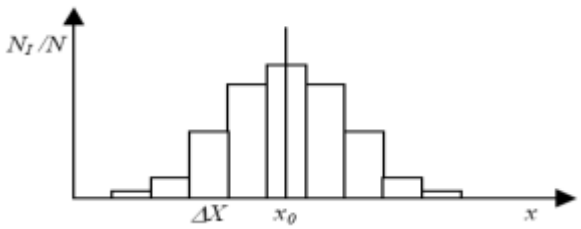
Měření odporu (r, r_C)
Protože jsou hodnoty obou odporů R_{iX} a R_{iS} zjišťovány stejným digitálním RLC metrem, jsou jejich příspěvky k nejistotě korelované. Korelace však v tomto případě ale způsobuje snížení nejistoty. Proto je pouze nezbytné uvažovat relativní odchylky čtení hodnoty odporů vzhledem k systematickým vlivům, jako jsou parazitní napětí a rozlišení zařízení. Limit těchto vlivů je odhadnut v rozmezí $\pm 1 \cdot 10^{-6}$ pro každý odečet. Výsledné rozdělení pro poměr hodnot r_C je trojúhelníkové s očekávanou hodnotou 1,0000000 a limitem $\pm 2,0 \cdot 10^{-6}$.

Korelace: Předpokládá se, že ostatní vstupní veličiny nejsou vzájemně významně korelované.

Měření: Poměr r byl stanovován pěti sadami pozorování.

Číslo měření	R_{iX}/R_{iS}
1	1,00104
2	1,00107
3	1,00106
4	1,00103
5	1,00105

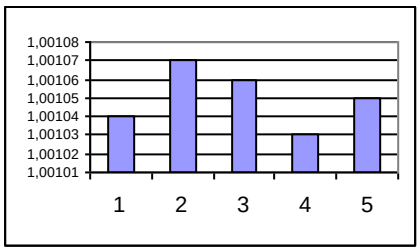
Výsledky opakovaného měření mají co nejvíce odpovídat normálnímu rozložení, viz obrázku č. 20



Obrázek č. 20: Rozložení výsledků opakovaných měření (příklad)

Neprodejné

Každá odchylka od tohoto rozložení signalizuje problém při měření. Zejména sledujeme, zda měření nemá systematickou složky driftu, která by ukazovala, že proces není ustálen. Pro uvedený příklad ukazuje graf, že systematická složka není nezanedbatelná.



Obrázek č. 21: Rozložení výsledků měření podle příkladu

Aritmetický průměr : R_{IX}/R_{IS},

$$\bar{r} = 1{,}00105$$

Výběrová standardní odchylka:

$$s(r) = 0{,}158 \cdot 10^{-4}$$

Standardní nejistota:

$$u(r) = s(\bar{r}) = \frac{0{,}158 \cdot 10^{-6}}{\sqrt{5}} = 0{,}0707 \cdot 10^{-6}$$

Neprodejné

Přehled nejistot *(R_X)*

veličina	odhad	standardní nejistota	pravděpodobnostní rozdělení	citlivostní koeficient	příspěvek k nejistotě
X_i	x_i	$u(x_i)$		c_i	$u_i(y)$
R_S	10010,5 Ω	2,5 mΩ	normální	1,0	2,5 mΩ

δR_D	0,020 Ω	5,8 mΩ	rovnoměrné	1,0	5,8 mΩ
δR_{TS}	0,000 Ω	1,6 mΩ	rovnoměrné	1,0	1,6 mΩ
δR_{TX}	0,000 Ω	3,2 mΩ	rovnoměrné	1,0	3,2 mΩ
r_C	1,0000000	$0{,}41 \times 10^{-6}$	trojúhelníkové	10000 Ω	4,1 mΩ
r	10008,5	$0{,}07 \times 10^{-6}$	normální	10000 Ω	0,7 mΩ
R_X	10010,178 Ω				8,33 mΩ

Rozšířená nejistota:

$$U = k \cdot u(R_X) = 2 \cdot 8{,}33 \ m\Omega \cong 17 \ m\Omega$$

Uvedený výsledek:
Naměřená hodnota paralelní složky odporu R_P na frekvenci 10 kHz s nominální hodnotou 10 kΩ pro nominální teplotu měření 23,0 °C a měřicí proud 100 μA je

$$\boldsymbol{R_{XP\,10\,kHz} = (10010{,}18 \pm 0{,}02)\ \Omega\ .}$$

Uvedená rozšířená nejistota měření je součinem standardní nejistoty měření a koeficientu ***k***, který odpovídá pravděpodobnosti pokrytí přibližně 95 %.

Interpretace výsledků
K dalšímu použití etalonu odporu pro střídavý proud 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 etalonu odporu pro střídavý proud je správné a v souladu s účelem pro hlavní použití.
Pokud platí že:

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

pak můžeme říci, že chování není správné a etalon odporu pro střídavý proud by měl být oddělen od normálního použití.

Rekalibrační doba
Obecně pro všechny etalony odporu pro střídavý proud je 12 měsíců. toto 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 etalonu odporu pro střídavý proud použitých pro kalibraci RLC mostů v laboratoři pro kalibraci, nejprve během prvních dvou nebo třech kalibrací se doporučuje snížit tuto dobu na šest měsíců, za účelem pro získání informací o

Neprodejné

jejích stabilitě a stárnutí. Pro etalonu odporu pro střídavý proud místo se středně 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 etalonu odporu pro střídavý proud u pověřit období rekalibraci a revidovat je-li to nutné, vzhledem k výsledkům týkajícím se kalibrace.
Základní výhodou etalonů odporu pro střídavý proud je to, že sledování stability může být prováděno při DC signálu, (včetně malých korekcí vlivem stárnutí) a plná AC rekalibrace může být provedena až po delším období, například 5 let.

15 Validace

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

Upozornění
Kalibrační postup je třeba považovat za vzorový. Doporučuje se, aby jej 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, ILAC a EA a revize normy 17025).

Neprodejné

16 Přílohy

Etalony elektrického odporu.

Etalony elektrického odporu dělíme zejména s ohledem na jejich použitelnost pro měření některým z druhů elektrického proudu. Tak tyto etalony dělíme na:

- etalony odporu použitelné jen na měření stejnosměrným proudem,
- etalony odporu použitelné na měření stejnosměrným i střídavým proudem.

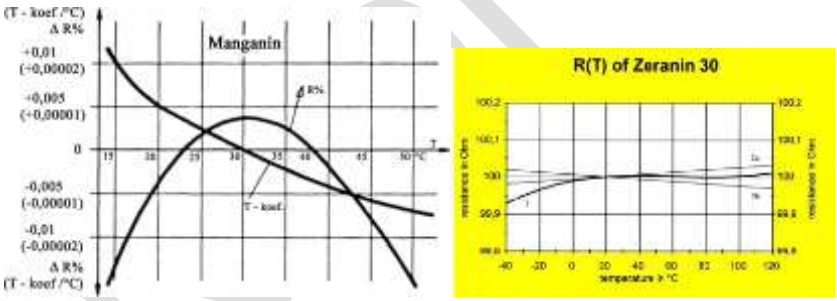
Etalony určeny pro měření pouze při stejnosměrném proudu jsou rozšířenější a vzhledem k tomu jsou komerčně zajímavější. Vyrábějí se v širokém rozsahu hodnot. Obvykle jsou dostupné v desítkových hodnotách, a to jako soupravy etalonů se jmenovitými hodnotami 10^n Ω, kde n je celé číslo. Nejčastěji od -4 do +12.

Konstrukce etalonů se pro malé nominální hodnoty, střední hodnoty a pro velké hodnoty odpory značně liší.

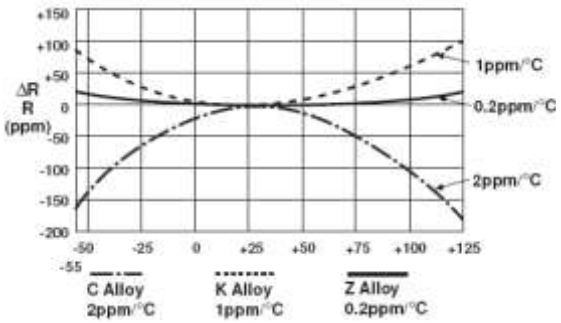
Etalony určené k měření střídavým proudem jsou zhotovovány pro omezenější rozsah hodnot, ale často jsou univerzálnější z hlediska použitelnosti a jsou vhodné i pro měření stejnosměrným proudem.

Etalony odporu jsou nejdůležitější a nezbytnou součástí pro kalibraci střídavých měřičů RLC. Podle provedení můžeme etalony odporu rozdělit na etalony:

- s vypočitatelnou frekvenční charakteristikou,
- drátové pro ss a nízké frekvence (50 Hz),
- foliové pro ss a akustické frekvence až do 1 MHz,
- typu metal film pro nejširší frekvenční rozsah,
- širokopásmové typu metal film pro nejširší frekvenční rozsah.



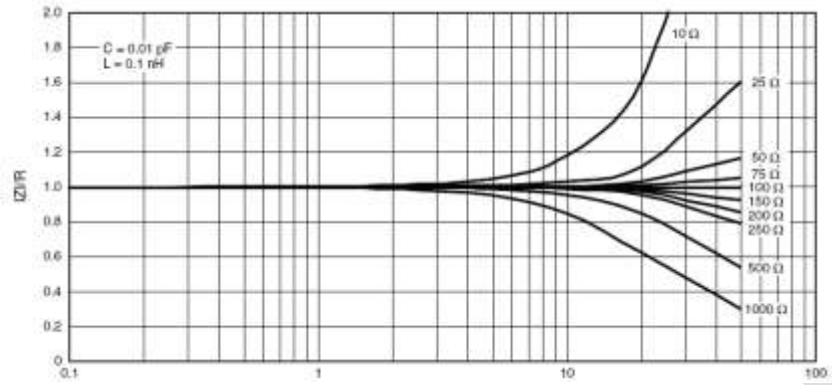
Obrázek č. 22: Základní slitiny pro drátové odpory



Obrázek č. 23: Základní slitiny pro foliové odpory

Etalony odporu pro střídavý signál

Etalony pro střídavý signál se obvykle realizují v rozsahu hodnot odporu od 1 Ω do 100 kΩ Pro akustické pásmo frekvencí a v některých případech až do 1 MHz lze použít etalony s vypočitatelnou frekvenční závislostí.
Také extrémně širokopásmové etalony Meatest M 530 jsou vypočteny pro velmi široký rozsah frekvencí až do řádu GHz.



Obrázek č. 24: Vypočitatelné vvf SMD odpory

Pro frekvence do přibližně 1MHz jsou vhodné pro etalony foliové rezistory pro svou malou teplotní závislost řádu jednotek ppm, velkou stabilitu a dobrými frekvenčními vlastnostmi.
Pro frekvence do asi 10 MHz se používají metalizované vrstvové rezistory. Je třeba volit provedení s vhodným poměrem délku a šířky tělíska (dlouhé a tenké), pokud možno bez spirální drážky. Lze najít typy s teplotní závislostí pod 15ppm/°C.
Příklad je sada Agilent 42030 kalibrovaná obvykle do 13 MHz.

V ČR jsou používány převážně následující typy etalonů:

Etalony odporu Metra RN
Byly vyráběné jako drátové manganinové odpory v rozsahu od 0,1 mΩ do 100 kΩ. Vinutí odporů bylo prováděno tak aby byla potlačena pokud možno frekvenční závislost. Malé hodnoty mají bifilární provedení, větší hodnoty vinutí v sekcích (asi Chaperonova typu). Odpory byly vyvinuty dávno před vynálezem autobalančních RLC mostů a nejsou proto svou konstrukcí, hlavně provedením vývodů, vhodné pro jejich kalibraci. Příliš tuhá konstrukce vinutí snižuje stabilitu při kolísání teploty. Nejsou hermetické, kovový kryt není připojen na svorky.

Ruské etalony P310, P321
Drátové odpory podobného provedení a určení jako etalony Metra, manganin, vyráběné ZIP Krasnodar. Jsou hermeticky opouzdřené. Pro DC kvalitní, pro AC nevhodné.

Ruské etalony P331
Drátové odpory podobného provedení jako etalony P310, P321s hodnotami, 100Ω, 1kΩ, 10kΩ, 100kΩ. Pro DC kvalitní, pro AC nevhodné.

Ruské etalony P3030
Etalony odporu ZIP Krasnodar Rusko foliového typu na sklokeramické podložce podobné provedení Vishay, ale větších rozměrů. Jsou určeny pro stejnosměrné i střídavé napětí a mají stabilitu srovnatelnou s drátovými odpory, frekvenční rozsah odpovídá foliovému

Neprodejné

provedení. ZIP Krasnodar Rusko nyní už neexistuje.
Existují 2 typy opouzdření. V ČR se vyskytují pouze starší provedení.

Etalony Tetex
Drátové etalony z manganinu používané dříve hlavně v podnicích energetiky při stejnosměrném signálu a frekvenci 50 Hz.

Tinsley 5685A
Kvalitní drátové etalony určené i pro práci na střídavém kmitočtu (NPL konstrukce „Wilkins design" z roku 1972). Zachovávají výborné vlastnosti drátových odporů v oblasti frekvence do 1 kHz popřípadě výše (10 kHz), kde mají velmi malou frekvenční závislost. Jsou plněné olejem, konstrukce umožňuje velmi vysokou stabilitu.

Etalony odporu Meatest MTE RP
Čtyřpárové etalony v kovové skříňce, uvnitř obsahující většinou vestavěný foliový rezistor. Mají velmi nízkou teplotní závislost a dobré frekvenční vlastnosti odporu. Jednotlivé etalony odporu v rozsahu 0.1 Ω až 10 GΩ s přístrojovými svorkami nebo koaxiálními konektory. Určeny ke kalibracím měřidel odporu, odporových rozsahů RLC měřičů, apod.. Přesnost: 0,002 % Nejistota kalibrace 0,005 %. Nízká časová konstanta.

Etalony Meatest M 530
Čtyřpárové etalony v kovové skříňce, uvnitř obsahující super vysokofrekvenční rezistor.
Sada etalonů M530 přestavuje širokopásové RF etalony odporu, použitelné ke kalibracím kmitočtových charakteristik širokopásových RLC metrů a analyzátorů impedance do 100 MHz. Etalony jsou osazeny koaxiálními BNC konektory s roztečí umožňující přímé nasazení na vstupní konektory kontrolovaného měřidla (vzdálenost ¾ palce). Odporovými prvky etalonů jsou vysokofrekvenční odporové přesné a stabilní čipy osazené v páskovém vedení. Mají i nízkou teplotní závislost a nejlepší frekvenční vlastnosti odporu dosažitelné na trhu.
Sada je doplněna referenčními prvky OPEN a SHORT, které jsou určené ke korekci nuly RLC měřidel.

Etalony HP 16380A Agilent
První typ etalonu pro hodnoty 1 Ω až 100 kΩ, který byl vyráběn ve čtyřpárovém provedení. Obsahuje rezistory s kovovou vrstvou a vnitřní stínění etalonu pro vyšší hodnoty odporu. Použitelné do 10 MHz. Vnitřní stínění etalonu zvyšuje frekvenční závislost.

Etalony HP 42030A Keysight
Novější provedení čtyřpárových etalonů odporu v menším a praktičtějším pouzdře. Vnitřní provedení je podobné HP 16380A, ale bez pomocného kompenzačního stínění pro 10 kΩ a 100 kΩ. Pro hodnoty pod 10 Ω je zlepšeno provedení propojení vnějších vodičů čtyř použitých konektorů BNC. Nejčastější typ pro kalibrace mostů do 10 MHz, pro hodnoty 1Ω až 100 kΩ s rezistory s kovovou vrstvou pro hodnoty 1mΩ až 100 mΩ z manganinové folie. Už nemají vnitřní stínění, které u etalonů **HP 16380A** zvyšovalo frekvenční závislost.

Individuální konstrukce mohou být obvykle
S nezapouzdřenými prvky:

- dvousvorkové,

Neprojeno

- dvousvorkové SMD,
- čtyřsvorkové,
- čtyřpárové se stíněním,
- čtyřpárové bez stínění.

Odpory s vypočitatelnou frekvenční charakteristikou
Tyto typy odporů existuji v koaxiálním, bifilárním provedeni a v provedení s přeloženou smyčkou (autor Gibbings). Zvlášť vhodné jsou konstrukce s mikrodrátem na pásku křemenného skla. Nejsou vyráběny sérově a nehodí s po běžná měření. Vypočteny jsou pro rozsah do několika kHz, výjimečně 1 MHz.
Odpory s vypočitatelnou frekvenční charakteristikou s rezistory s kovovou vrstvou. Jednalo se o speciální čtyřpárové (6 párové) rezistory koaxiálního typu vyrobené pro dekadické hodnoty 10 Ω až 100 kΩ a hodnotu 50 Ω. Technologie výroby je náročná a obtížná a velmi těžce lze získat stejnosměrné vlastnosti srovnatelné s jinými typy etalonů, vypočteny byly do cca 10 MHz.
Super vysokofrekvenční etalony s rezistory SMD 0402 byly vypočteny do 10 GHz (hodnoty od 100 Ω do 500 Ω).

Open a short
Při kalibraci se naměřené hodnoty vztahují ke definované kalibrační (referenční) rovině, ke které je teprve připojen měřený objekt. K této rovině se poté vztahují udaná přesnost měření a konfigurace zapojení. Referenční rovina kalibrace čtyřpárových mostů bývá zpravidla definována na svorkách přístroje nebo na konci připojovacích kabelů.
Dalším praktickým problémem je způsob provedení používaných etalonů. Etalon je možné vyrobit s konektory odpovídajícího typu a tvaru (4x BNC, rozteč 22 mm), ale běžnou součástku takto vyrobit a používat nelze.
Běžná měřená součástka je obvykle malých rozměrů a pro připojení je opatřena drátovými vývody nebo v provedení SMD kontaktními ploškami. Žádná součástka měřená v běžné technické praxi však neodpovídá čtyřpárové (4TP) definici. Používané RLC mosty jsou však často konstruovány pro 4TP měření prvků. To znamená, že praktické užití těchto RLC mostů je jiné, než jaké je při jeho kalibraci čtyřpárovým etalonem. Běžná součástka se musí měřit s pomocí kontaktního přípravku, kterých může být řada typů a jsou přizpůsobené rozměrům měřených součástek. Moderní mosty jsou kalibrovány na svorkách tohoto kontaktního přípravku.

Ideální zkrat - definice: Ideální zkrat mezi určitým počtem svorek nastane tehdy, když proud mezi libovolnou dvojicí svorek nevyvolá napětí mezi libovolně zvolenou dvojicí svorek. Pro DC užití a 4 přívody patentoval Hammon přes 30 možností provedení.

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.
U RLC metrů je obvyklá vzdálenost svorek od sebe kolem 22 mm. U méně přesných obvykle postačí spojení svorek silnějším vodičem. Zbytkové parametry zkratu bývají kolem 20 nH a 1 mΩ . Lépe je použít kontaktní přípravek.

Čtyřsvorkový zkrat: je takové propojení, kdy proud mezi libovolnými dvěma svorkami nevyvolá napětí mezi druhými dvěma svorkami. Čtyřsvorkový je zkrat často proveden pro dané zapojení svorek, jak ukazuje obr. 25 a obr. 26. Jedná se o nejběžnější provedení kdy

Nepodepíše

se provede spojení proudových svorek mezi sebou, napěťových svorek mezi sebou a jejich vzájemné propojení. Tím se zajistí, že proud procházející proudovými svorkami nevytvoří žádné napětí na napěťových svorkách.

Čtyřpárový zkrat
Je podobný čtyřpolovému zkratu, pozornost je ale věnována i propojení vnějších vodičů koaxiálních svorek BNC.

Obrázek č. 25: Provedení etalonu R jen pro DC a provedení pro DC a AC do 10 kHz

Obrázek č. 26: Provedení etalonu s metalizovanými R

Obrázek č. 27: Nyní již nepoužívané provedení s aktivním stíněním.

Kalibrátory

neprodejné

Kalibrátory určené pro DMM
Univerzální kalibrátory multimetru mají často i simulátor odporu, určený hlavně pro kalibraci odporových rozsahů multimetru a použitelný obvykle i pro AC R na nízkých frekvencích. Podrobněji viz specifikace jednotlivých typů kalibrátorů.

Kalibrátor určený 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. 28: 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 diskrétních dekadických hodnot. Obsahuje:

- **sadu etalonů odporu 0.1 Ω - 100 MΩ,**
- sadu etalonů kapacity 10 pF - 100 uF,
- sadu etalonů indukčnosti 1 uH - 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 rekalibraci 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.

Neprodejné

Obrázek č. 29: Kalibrace 4TP mostu s kalibrátorem impedance Meatest M 550

Neprodejné