



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 4.1.2/19/17

ETALONY VELKÝCH HODNOT ODPORŮ NAD 100 MΩ

Praha
říjen 2017



Vzorový kalibrační postup byl zpracován a financován ÚNMZ v rámci Plánu standardizace – Program rozvoje metrologie 2017.

Číslo úkolu: VII/1/17.

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

Uvedený pracovní postup je určen pro kalibraci etalonů odporu v rozsahu od 100 MΩ až 100 TΩ při stejnosměrném napájení pro třísvorkové (dvousvorkové ve stínícím krytu) připojení. Pro hodnoty nad 100 MΩ se udává obvykle výsledek měření pro napájecí napětí 10 V až 1000 V, jak je uvedeno u jednotlivých nominálních hodnot.

Tento postup platí pro kalibraci odporů níže uvedené hodnoty, což naznačuje rozsah obvyklých napětí, ve kterém jsou kalibrovány jednou ze dvou uvedených metod:

- 100 MΩ (10 V až 100 V),
- 1 GΩ (10 V do 1000 V),
- 10 GΩ (10 V do 1000 V),
- 100 GΩ (10 V do 1000 V),
- 1 TΩ (10 V do 1000 V),
- 10 TΩ (10 V do 1000 V),
- 100 TΩ (10 V do 1000 V).

Tento postup platí také pro sady odporů velkých hodnot vestavných do kalibrátorů nebo samostatné sady etalonů odporů velmi vysoké hodnoty.

Metodika se netýká měření mostem s binárním napěťovým děličem (most MI 6000).

Nepřímé metody kalibrace, jako modifikovaný potentiometrický a Wheatstonův most, nejsou popsány, neboť postup je u nich zcela odlišný od toho, co je popsáno v tomto postupu, a měly by být předmětem samostatného postupu.

2 Související normy a metrologické předpisy

<i>Low Level Measurements Handbook - 7th Edition</i>	Firemní literatura firmy Keithley	[L1]
<i>VDI VDE DGD DKD 2622 blatt 8,</i>	Kalibrieren von Messmitteln für elektrische Größen - Gleichstrom-Widerstände	[L2]
	<i>PROCEDIMIENTO EL- 008 PARA LA CALIBRACIÓN DE RESISTENCIAS DE ALTO VALOR</i> metodika m 008, CEM ŠPANĚLSKO	[L3]
<i>Practical Aspects of High Resistance Measurements</i>	Ing. Roman Honig, CalLab Magazine Jan. 2010.	[L4]
ČSN EN ISO/IEC 17025	Posuzování shody - Všeobecné požadavky na způsobilost zkušebních a kalibračních laboratoří	[L5]
TNI 010115, Slovník JCGM 200:2008	<i>International vocabulary of Metrology –Basic and general concepts and associated terms (VIM)</i>	[L6]
	<i>Mezinárodní slovník termínů v legální metrologii</i>	[L7]
	Vydání v roce 2000: OIML	
slovník IEC (IEC 60050)	International Electrotechnical Vocabulary	[L8]

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 6 i revize ISO/IEC DIS 17025:2016(E), bod 6.2.

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

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, 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). Speciální pojmy názvosloví pro měřiče impedance jsou uvedeny v této kapitole a v příloze.

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

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

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

Guard odporu – doplňkové stínění či obdobná konstrukční část odporového etalonu, kterou je možné připojit ke zdroji V_G .

Mikrodrát

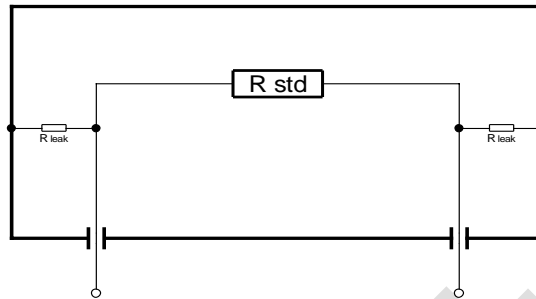
Mikrodráty jsou vyrobeny z manganinu ve skleněné izolaci. Průměr drátu (kov) je 6 až 10 mikrometrů, izolace je vrstva skla. Odpor 1 m drátu je cca 15 kΩ. Umožňují vyrábět etalony s vysokou hodnotou odporu při zachování výhod drátových etalonů.

Mikrodráty se skleněnou izolací se vyrábí litím metodou prof. Ulitovského.

Dvousvorkový nestíněný etalon odporu

Zde může působit vliv izolace mezi svorkami, pokud jsou upevněny na nějakém izolačním materiálu, ten se však bude při měření jevit jako nedílná součást hodnoty odporu.

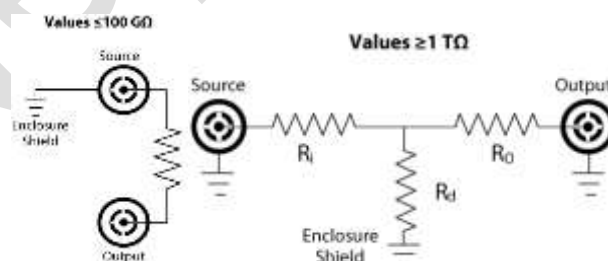
Dvousvorkový etalon odporu v kovovém stínícím krytu (např. typ GL 65206)



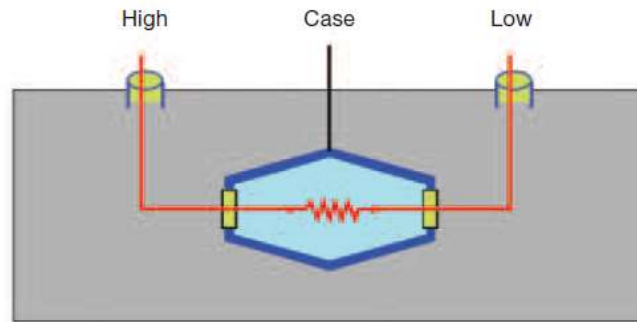
Obr. č. 1: Schematické zapojení etalonu odporu vysoké hodnoty (typu GL 65206)

V tomto případě uvažujeme vliv svodového odporu mezi svorkami a stínícím krytem. Ten je prakticky připojen paralelně k vlastnímu odporu. Zatímco se např. při měření na Teraohmmetru tento odpor nemusí uplatnit. Při měření mostem s binárním napěťovým děličem - mimo tuto metodiku - jej lze eliminovat, jen pokud na kovový kryt přivedeme shodný potenciál, jako je v měřeném bodě. Při jiných konfiguracích měření (uzemněný kryt nebo kryt nepřipojený k ničemu) je výsledek zatížen chybou.

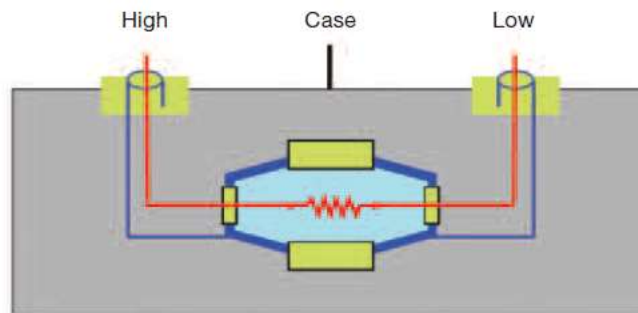
Trojsvorkové připojení - měřený prvek je umístěn ve stínícím krytu, který je připojen na třetí svorku. Třetí svorka musí být připojena na definovaný potenciál. Podrobněji viz příloha. Nejčastěji se při měření používají k připojení koaxiální kabely.



Obr. č. 2: Ukázka připojení triaxiálním kabelem



Obr. č. 3: Schéma třísvorkového etalonu s vestavěným hermetizovaným odporem a neděleným stíněním. Koaxiální konektory jsou připojeny ke svorce uzemnění



Obr. č. 4: Schéma třísvorkového etalonu s vestavěným hermetizovaným odporem a rozděleným stíněním. Koaxiální konektory jsou připojeny každý k polovině vnitřního pouzdra, svorka uzemnění je připojena k vnějšímu krytu.

Etalony pro vysoké hodnoty odporu - vlastnosti

Jsou obvykle tvořeny odpory s kovovou vrstvou a zapouzdřeny do skleněné ampulky plněné suchým inertním plynem a následně do uzavřeného prostoru. Mohou představovat jeden prvek pro každou hodnotu nebo sadu odporů ve společné krabici nebo kalibrátor s řadou z těchto hodnot.

Nejdůležitější vlastnosti etalonu, spolu s jeho hodnotou a přesností jsou následující:

Teplotní koeficient α : je to variace ohmické hodnoty odporu " R_x " s teplotou:

$$\alpha_{(R_x)} = X \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1} \cdot R_x \quad \Omega \text{ K}^{-1}$$

Kladná hodnota $\alpha (R_x)$ znamená, že odpor se zvyšuje s rostoucí teplotou. Hodnota X se může měnit v širokých mezích v závislosti na typu etalonu. Obvyklé hodnoty α jsou mezi 100 ppm/°C až 5000 ppm/°C.

Koeficient vlivu napětí Δ_V : Variace ohmického odporu s přiloženého napětí:

$$\Delta_{V(R_x)} = Y \cdot 10^{-6} \cdot R_x \quad \Omega \text{ V}^{-1}$$

Kladná hodnota naznačuje, že se zvyšuje odpor jako funkce přiloženého napětí. Hodnoty Y bývají mezi 1 ppm/V až 100 ppm/V jako rozdíl od hodnoty V , pro kterou je odpor kalibrován v normálních podmínkách.

Hodnota odporu může být závislá na polaritě přiloženého napětí, takže jeho kalibrace se může provádět pro napětí obou polarit, ale obvykle se udává průměrná hodnota pro obě polarity, (ale s ohledem na další složky nejistoty je tento koncept třeba uvažovat i dále).

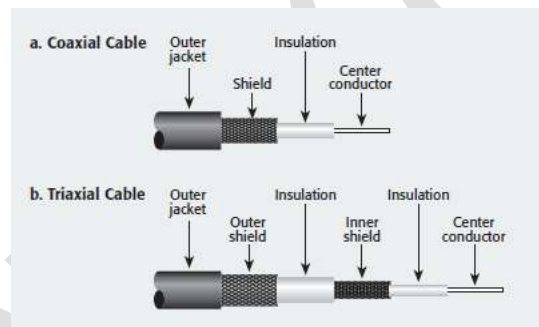
Piezoelektrický jev viz příloha.

Triboelektrický jev viz příloha.

Elektrochemický svod viz příloha.

Kabely

Kabely použité pro připojení jsou koaxiální kabely, jejichž nejcharakterističtější parametr je izolační odpor. K tomuto účelu se používá pro kabely pro teraohmometry téměř výhradně teflonová izolace, která má odpor vyšší než 10^{16} Ohmů (10^4 TΩ). Tím jsou pro izolaci získány vyhovující hodnoty. Vzhledem k tomu, že měřicí kabely jsou odnímatelné prvky, jsou i opatření k jejich použití důležitá, aby se zabránilo možnosti ovlivnit výsledek nesprávnými kabely nebo neshodným stavem kabelů. Speciální kabely mají potlačený triboelektrický jev a bývají i v triaxiálním provedení.



Obr. č. 5: Koaxiální a triaxiální kabel

Konektory.

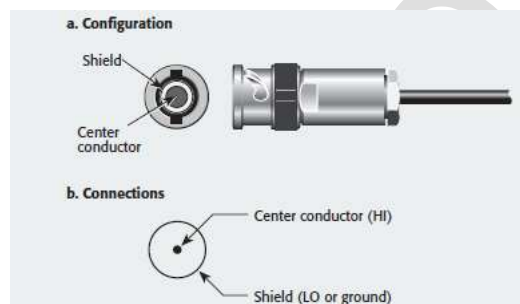
V závislosti na přesnosti odporů, které jsou kalibrovány, se v podstatě používají dva typy svorek:

- pro střední nebo nízké přesnosti rezistorů jsou používány kolíky od banánek 4mm. Odpor má tři svorky, dvě připojené k měřenému rezistoru a třetí připojenou k ochrannému krytu,
- pro konstrukci vysoce přesných odporů jsou používány nejčastěji konektory typ N (zřídka i BNC). Odpor má dva konektory, jejichž střední vývody jsou připojeny k odporu a vnější vývody ke stínění.

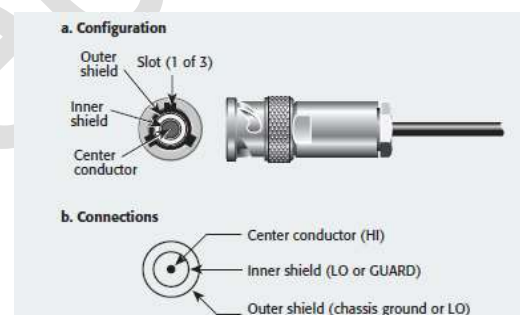
U obou typů používaných konektorů (N a BNC) by měl být jako izolační materiál použit "Teflon", pro získání velmi vysokého izolačního odporu. Specifikace konektoru často označují nižší limit pro izolační odpor ≥ 5 GΩ, (například pro N-typ konektorů), ale obvykle je jejich odpor mnohem vyšší a tento parametr je nutné, pokud je to možné, změřit.



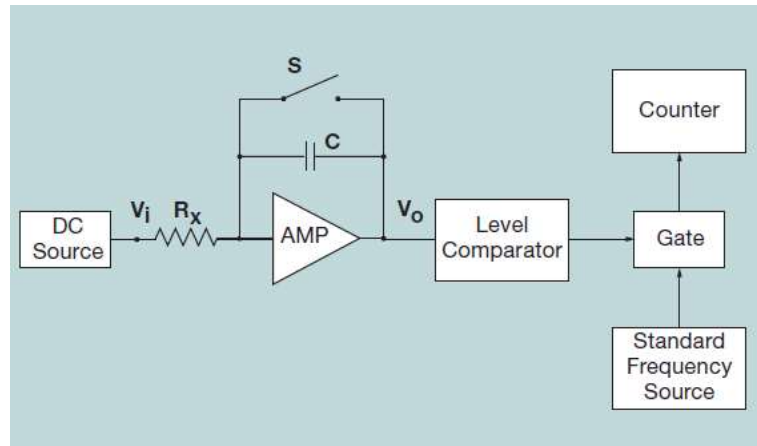
Obr. č. 6: Ukázka provedení, svorky etalonu pro banánky a svorky v konektoru N



Obr. č. 7: BNC konektor a jeho připojení



Obr. č. 8: Triaxiální konektor a jeho připojení

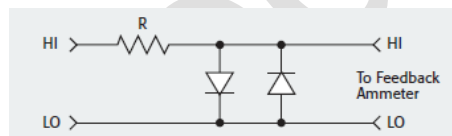


Obr. č. 9: Základní zapojení teraohmmetru

Princip měření teraohmmetru podle obrázku je dán vztahem.

$$R_X = -(1/C)(V_i/\Delta V_0)\Delta t$$

Extrémně citlivé vstupy pikoampérmetrů a teraohmmetrů je možné chránit obvodem podle následujícího obrázku.



Obr. č. 10: Základní zapojení ochrany citlivých vstupů (dioda je typu 1N3595)

5 Prostředky potřebné pro kalibraci

Pro kalibrace popsané v tomto postupu, je nutné mít k dispozici:

- **Teraohmmetr** s rozlišením nejméně 5 digitů při měření odporu s kalibrační nejistotou, ne větší než třetina tolerance odporu, který má být kalibrován,
- variantní řešení - kalibrátor s DC U od 10V do 1000V a picoampérmetr,
- **etalony odporu** stejných jmenovitých hodnot jako srovnávané, (při použití metody porovnání),
- **2 kusy koaxiálních připojovacích kabelů** s kvalitní izolací a konektory (nejčastěji typu N), délka 1m. Tato sada kabelů je obvykle příslušenství teraohmmetru,
- **kovová stínící skříň s teflonovými průchodkami** (doporučené, pokud se kalibruje častěji),
- **teploměr a vlhkoměr** pro monitorování prostředí v laboratoři,
- **bateriový teploměr s miniaturní sondou** pro kontrolu teploty přímo na kalibrovaném etalonu,
- **speciální čisticí prostředky (velmi čistý isopropylalkohol),**

Speciálně pro metody kalibrace popsané v tomto postupu je zapotřebí další následující přístrojové vybavení v závislosti na použité metodě:

Přímá metoda pro měření do 10 GΩ při 100V

- 8,5 dig DMM s funkcí High R (Fluke nebo Transmille) a 2 kusy koaxiální připojovací kabely.

Přímá metoda

- Megaohmmetr nebo teraohmmetr,
- 2 kusy koaxiálních připojovacích kabelů.

Substituční metoda

- Megaohmmetr nebo teraohmmetr,
- 2 kusy koaxiálních připojovacích kabelů,
- referenční skupinu odporů o stejné nominální hodnotě, jako ty, které jsou kalibrovány. Tyto odpory jsou kalibrovány pro stejné hodnoty napětí a mají koeficienty závislosti na napětí i koeficienty závislosti na teplotě použitelně malé.

Je třeba použít kabely s odpovídající úrovní izolace, aby se zabránilo průrazu (kabely, které jsou odolné alespoň 2000 voltů při 50 Hz). Podobně kabely musí mít, pokud je to možné, odpovídající svorky (N konektory nebo banánky, podle potřeby).

Sada měřicích kabelů, bez ohledu na použitou metodu, má být s následujícími charakteristikami:

- stíněné,
- s vysokým izolačním odporem kabelů,
- je-li to možné tak splétané,
- konektory s vysokým izolačním odporem,
- nízké termonapětí,
- triboelektrická odolnost
- piezoelektrická odolnost.

6 Obecné podmínky kalibrace

Obecné podmínky okolí pro měření velkých R:

Kalibrace se provádí v prostředí, které splňuje tyto požadavky:

- sucho,
- ochrana před povětrnostními vlivy,
- čistota a bezprašnost,
- dostatečné osvětlení,
- bez vibrací a otřesů,
- bez elektromagnetického rušení, které by mohlo ovlivnit měření.

Mezní doporučené podmínky:

- teplota prostředí má být v rozmezí $23\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$,
- pokud se teplota prostředí časem mění, rychlost změny nemá být větší než $0,2\text{ °C/h}$,
- vytápění a cirkulace vzduchu má být řešena tak, aby na měřicím pracovišti nedocházelo k jednostrannému ohřevu měřidel,
- relativní vlhkost prostředí má být menší než 65 %,
- stav napájecí sítě se kontroluje v rámci systému, cca jednou ročně,
- kontrola okolní teploty se provádí teploměry s rozlišením alespoň $0,1\text{ °C}$.

Kalibrace přesných etalonů se provádí přednostně za doporučených přesnějších následujících referenčních podmínek:

- teplota prostředí $23\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$,
- relativní vlhkost vzduchu 40 % RH až 50 % RH,
- referenční podmínky je nutné kontrolovat před zahájením kalibrace, v jejím průběhu i po jejím skončení,
- zaznamenává se i atmosférický tlak v době měření,
- je doporučeno, aby pracoviště splňovalo požadavky ESD pracoviště, hlavně neobsahovalo izolované plochy,
- pracoviště nesmí používat ionizátory,
- personál nemá mít oděv, který se snadno elektrostaticky nabije (z umělých vláken, například kravaty),
- doporučený je oděv určený pro ESD pracoviště,
- v době měření má být omezen jakýkoliv pohyb v laboratoři.

7 Rozsah kalibrace

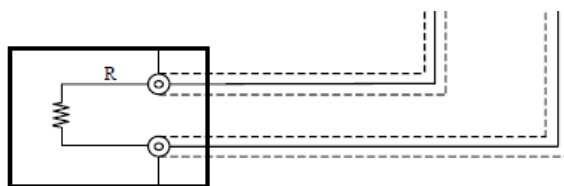
Ke stanovení hodnoty neznámého odporu se v laboratoři používá:

Metoda přímého odečtu odporu

Je vhodná pro běžné etalony a odporové dekády (vzhledem ke specifikacím měřidel, zejména pro ESD). Tato metoda je založena na přímém měření. Použije se měřicí přístroj pro vysoké hodnoty odporů, megaohmmetr nebo teraohmmetr, jak je znázorněno na obrázku.

Při použití metody přímého odečtu se odpor kalibrovaného etalonu (jeho odhadovaná konvenční hodnota) R_x pro i -té měření vypočítá podle vztahu:

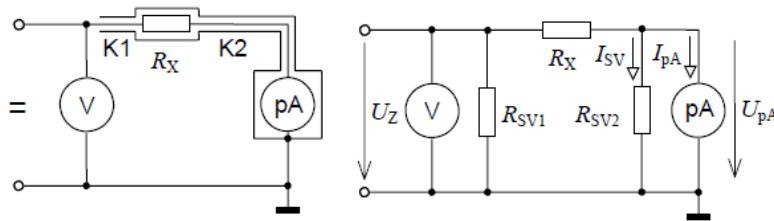
$$R_{x,i} = R_{x,m} + \delta R_{xm}$$



Obr. č. 11: Přímé měření

Varianta přímého měření podle Ohmova zákona se zdrojem napětí V a picoampérmetrem pA

Vliv svodových odporů přívodních kabelů ukazuje obr. č. 12:



Obr. č. 12: měření se zdrojem napětí V a picoampérmetrem pA
Kde:

R_{SV1} a R_{SV2} jsou parazitní svodové odpory,

R_{SV1} – je paralelně ke zdroji napětí – neuplatní se,

R_{SV2} – je paralelně k pA-metru a tedy pokud $U_{pA} \rightarrow 0$, neuplatní se, jinak $I_{SV} = U_{pA} / R_{SV2} \rightarrow$ chyba metody.

Pokud $U_{pA} \neq 0$, pak

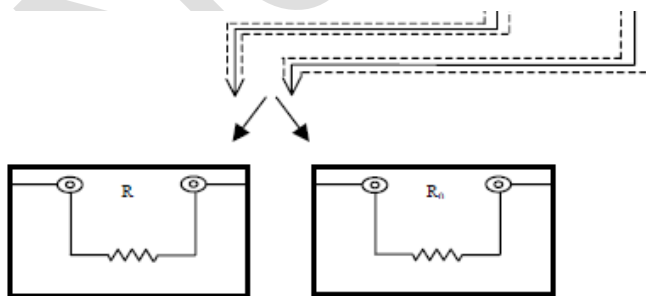
$$R_X = \frac{U_R}{I_R} = \frac{U_Z - U_{pA}}{I_{pA} + I_{SV}} = \frac{U_Z}{I_{pA}} \left(1 - \frac{U_{pA}}{U_Z} - \frac{I_{SV}}{I_{pA}} \right) = \frac{U_Z}{I_{pA}} \left(1 - \frac{U_{pA}}{U_Z} - \frac{R_{pA}}{R_{SV2}} \right)$$

a poslední dvě složky lze obvykle zanedbat.

Kalibrace měřením substitucí

Referenční etalon (R_E) se známou hodnotou odporu je změřen teraohmmetrem a stejné měření je provedeno i s kalibrovaným etalonem (R_X).

Tato metoda je založena na megaohmmetru nebo teraohmmetru, při použití referenčních etalonů rezistorů, jak je znázorněno na obrázku.



Obr. č. 13: Substitutece

Tento postup je velmi známý jako etalonový postup měření porovnáním s etalonem s certifikátem se známou hodnotou a s malou nejistotou a umožňuje změřením rozdílu mezi tímto etalonem a kalibrovaným odporem v době kalibrace dosažení minimální

nejistoty z důvodu korelace mezi oběma měřeními. Tím můžeme výrazně snížit dosaženou kalibrační nejistotu.

Při aplikaci substituční metody měření je hodnota výběrového průměru hodnoty odporu kalibrovaného etalonu (jeho odhadovaná konvenční hodnota) R_x pro jejím i -tém měření vypočítána podle vztahu:

$$R_{xi} = R_s \cdot \frac{R_x}{R_s}$$

Kde:

R_{xi} - hodnota odporu kalibrovaného etalonu odporu vypočítaná pro i -té měření,

R_s - konvenční hodnota odporu z referenčního etalonu,

R_x - naměřená hodnota odporu kalibrovaného etalonu odporu při i -tém měření,

R_s - naměřená hodnota odporu referenční sady při i -tém měření.

Z naměřených hodnot R_{xi} při aplikaci jak substituční metody měření odporu, tak i přímého či poměrového měření odporu lze skutečnou - pravou hodnotu kalibrovaného etalonu odporu vypočítat jako výběrový průměr podle vztahu:

$$R_x = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n R_{xi}$$

Kde:

R_x - výběrový průměr hodnoty odporu kalibrovaného etalonu odporu pro i -té měření;

R_{xi} - hodnota odporu kalibrovaného etalonu odporu pro i -té měření;

n - počet měření.

Pokud při zkoušení etalonu nebyla dodržena vztažná teplota t_0 , ale byla jiná ustálená teplota t , skutečná - konvenční hodnota etalonu se vypočítá pro tuto ustálenou teplotu t . Z ní se pak koriguje konvenční hodnota kalibrovaného etalonu odporu na teplotu t_0 aplikováním teplotní závislosti, pokud je tato známa. V opačném případě se jako výsledná hodnota uvádí naměřená pro teplotu t .

Odchylka zjištěné skutečné hodnoty odporu etalon R_0 od jeho nominální hodnoty R_N (δ) se vypočte v % podle následujícího vztahu:

$$\delta = \frac{R_0 - R_N}{R_N} \cdot 100$$

Poznámka: Odchylka δ nemá překračovat hodnoty vyplývající ze zařazení etalonu do třídy přesnosti.

Relativní meziroční časová změna hodnoty odporu etalonu τ_{dov} se zjišťuje porovnáním hodnot etalonu zjištěných při probíhající a předchozí kalibraci podle vztahu:

$$\tau_{dov} = \frac{R_{x1} - R_{x2}}{R_N \Delta_a}$$

Kde:

R_{x1} - konvenční hodnota etalonu zjištěná při probíhající zkoušce,

R_{x2} - konvenční hodnota etalonu zjištěná při předchozí zkoušce,

R_N - nominální hodnota odporu kalibrovaného etalonu,

Δa - období mezi provedenými zkouškami, v letech.

Poznámky

Relativní meziroční změna hodnoty odporu etalonu nemá překračovat hodnoty, které jsou přípustné pro etalony odporu uvedené v jejich dokumentaci.

Při substituční metodě mají mít R_s a R_x co nejbližší hodnotu, rozdíl do 5% vyhovuje.

Stabilita

Nové etalony odporu jsou obvykle podrobeny urychlenému stárnutí několika cykly před uvedením na trh. Přesto může během prvních dvou let používání hodnota odporu mít významný posun stárnutím, změny mohou dosáhnout až 1% od původní hodnoty. Za účelem kontroly tohoto driftu se doporučuje snížit počáteční kalibrační interval asi na polovinu z následně použité doby. Můžete také požádat o dodatečné stárnutí výrobce.

Přesnost hodnoty

Přestože se jedná o faktor, který závisí na uživateli a jeho potřebě, počáteční hodnoty jsou obvykle nastaveny v rozmezí 1% za nižší hodnoty (1 GΩ), a mohou dosáhnout až 10% pro vyšší hodnoty (100 TΩ).

Referenční teraohmmetr

Doporučuje se, aby nejistota kalibrace referenčního teraohmmetru byla nejméně čtyřikrát menší než nejistota kalibrovaného odporu při běžném použití, ale nepožaduje se překročení hranice 10 krát menší.

Kalibrace a šum

Nejistota kalibrace etalonů odporu se zvýšením jejich hodnoty zdatelně roste. Roste i šum měření, který je závislý na hodnotě odporu. To je neodstranitelná vlastnost odporu, že jejich šum závisí na hodnotě podle vztahu

$$E_N = 4 kTRdF$$

Kde:

E_N - RMS hodnota šumového napětí ve voltech.

R - odpor v ohmech,

k - Boltzmannova konstanta,

T - teplota v Kelvinech,

dF - je šířka pásma v Hz.

8 Kontrola dodávky a příprava ke kalibraci

8.1 Přezkoumání zakázky

Zakázka na kalibraci se při přebírání přezkoumává podle ČSN EN ISO/IEC 17025:2005, odst. 4.4 nebo po revizi normy ISO/IEC DIS 17025:2016(E) 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 etalonu ke kalibraci je třeba zjistit, zda typ, výrobní číslo a příslušenství dodaného etalonu odpovídá údajům uvedeným v objednávce nebo dodacím listu. Současně se provede jeho předběžná kontrola, spočívající ve vnější prohlídce a kontrole provozuschopnosti. 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 a podle ISO/IEC DIS 17025:2016(E) kapitola 7 má následující body.

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:

- požadavky jsou odpovídajícím způsobem definovány, zdokumentovány a pochopeny,
- laboratoř má schopnosti a zdroje, aby splňovaly požadavky zakázky,
- příslušná kalibrační procedura je vybrána a je schopna vyhovět požadavkům zákazníků. Jakékoli rozdíly mezi žádostí nebo nabídkou a smlouvou musí být vyřešeny před započítáním práce. Každá smlouva musí být přijatelná jak pro laboratoř, tak pro zákazníka. Odchyly přání zákazníka nesmí ohrozit laboratorní integritu.

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

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

POZNÁMKA: Pro posouzení rutinních a jiných jednoduchých úkolů, datum a identifikace (např. iniciály) osoby odpovědné v laboratoři za provedení sjednané práce jsou považovány za dostatečné. V případě opakovaných rutinních úkolů, přezkoumání nemusí být provedeno pouze v počáteční fázi šetření nebo o udělení zakázky na pokračující rutinní práci vykonanou v rámci obecné dohody se zákazníkem za předpokladu, že požadavky zákazníka zůstávají nezměněny. Pro novou, složitou nebo pokročilou kalibrační činnost, by měl být zachován obsáhlejší záznam.

Do přezkumu bude nutné rovněž zahrnovat všechny práce zadané subdodavatelům laboratoře.

Zákazník musí být informován o každé odchylce od smlouvy.

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 v praxi

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 jeho kryt nesmí být poškozený ani znečištěný na svorkách. Etalon, u kterého se zjistí závada vylučující kalibraci, se nepřijme na kalibraci. Postup kontroly zahrnuje:

- 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 laboratoři, obvykle identifikovaný štítkem bezpečně přilepeným na kalibrovaný etalon,
- návod k obsluze ke kalibrovanému etalonu je důležitý, 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 kontrolována. V případě potřeby se provede čištění svorek,
- zkontrolujte, že odpovídající kontaktní plochy svorek nejsou zkorodovány,
- etalon, který nevyhověl při vnější prohlídce a konstrukčnímu provedení dle výrobce, se vyřadí z dalších zkoušek,
- předem se stanoví kompletní tabulky sběru dat a počet měří,
- proveďte každé měření postupně pro různé napětí a dvě polaritu označené + a -.

8.3 Příprava kalibrace

- Referenční i kalibrované etalony, musí být umístěny v kalibrační místnosti nejméně čtyři hodiny před začátkem kalibrace,
- napájení teraohmmetru nebo multimetru při kalibraci se před spuštěním měření provede pro tepelnou stabilizaci. Doba tepelné časové stabilizace závisí na typu přístroje, obvykle vyhoví nejméně 1 hodina,
- kalibrace se provádí v prostředí, kde se udržuje normální okolní teplota mezi 22°C a 24°C, včetně vlivu nejistoty měření teploty etalonu a teraohmmetru pro udržení jejich optimální specifikace,
- relativní vlhkost nemá přesáhnout 70 %. Kalibrovaný etalon by měl být pokud možno hermeticky uzavřen, aby nebyl ovlivněn vlhkostí,
- síťové kabely musí být nepoškozené a musí procházet pravidelnými revizemi.

8.4 Uzemnění a vliv šumu

Uzemnění nebo stínění etalonů odporů nejen snižuje hladinu šumu, ale v některých případech je zřejmé, že se naměřená hodnota odporu změní. Proto musí být naprosto

přesně specifikováno, když mají kalibrované odpory požadavky na uzemnění. Například, pokud referenční (národní) laboratoř kalibrovala referenční etalon odporu, musí být v kalibračním listě uveden velmi podrobný popis podmínek a konfigurace používaných k dosažení nejlepšího výsledku. Uvedené nejistoty jsou platné pouze za uvedených podmínek, tak, že je nutné, aby podmínky měření byly i při použití kalibrovaného etalonu reprodukovány tak přesně, jak je to možné. V případě, že výrobce poskytl možnost užití stíněného uzavřeného prostoru pro uzemnění, měl by být používán.

8.5 Příprava etalonů

Je důležité vhodně připravit zkoušený etalon tak, aby nežádoucí paralelní svody byly sníženy co nejvíce, jako je to možné. Stav povrchu izolace mezi kontakty svorek je velmi kritický, protože to obvykle tvoří významný zdroj elektrického svodu. Povrch musí být suchý a bez vodivých solí nebo jiných usazenin.

8.6 Přezkoumání smlouvy, kontrola dodávky a příprava ke kalibraci

Aby nedošlo k nenapravitelné škodě, musí být dodržena všechna bezpečnostní opatření pro práci s napětím a pro řádný průběh operací v rámci tohoto postupu. V každém případě se respektují pokyny výrobce uvedené v technickém manuálu, aby nedošlo k ohrožení pracovníků provádějících kalibraci.

Před zahájením kalibrace se provedou následující předběžné operace:

- kontrola, zda odpor určený pro kalibraci je jednoznačně a permanentně identifikován, to je jeho značkou, typem a odpovídajícím pořadovým číslem nebo s jeho vlastním interním kódem. Pokud tomu tak není, přidělí laboratoř vlastní identifikační kód, který je třeba bezpečně připevnit na kalibrovaný odpor,
- analýza specifikace kalibrovaného odporu tak, že osoba provádějící kalibraci se seznámí s těmito specifikacemi,
- zajistí se technická příručka přístrojové techniky použité při kalibraci a zkontroluje se, zda osoba provádějící kalibraci je proškolená a pověřena pro tuto metodiku,
- kontrola kalibračního stavu přístrojového vybavení používaného při kalibraci. Zjistí se platnost jeho kalibračního certifikátu, a pokud certifikát doporučuje vhodná opatření, která mají být provedena v průběhu kalibrace k dosažení platné návaznosti a uvedené nejistoty, musí být použita,
- kontrola, zda jsou jmenovitá hodnota napájecího napětí a možné variace sítě vhodné pro provoz přístrojového vybavení používaného při kalibraci. Napětí 230 voltů $\pm 10\%$ bez impulsního rušení za normálních okolností je vhodné pro provoz většiny přístrojů. V každém případě, je třeba poradit se s návodem k obsluze,
- připojení k přístrojové napájecí síti použité v kalibrační místnosti je nutné před začátkem kalibrace tepelně stabilizovat. Čas teplotní stabilizace je zpravidla minimálně 30 minut,
- kontrola, zda je teplota v laboratoři udržována v mezích uvedených pro laboratorní provoz,
- kontrola, zda je relativní vlhkost v laboratoři udržována v mezích uvedených pro laboratoř. V tomto typu kalibrace za žádných okolností nedojde k překročení horní hranice 70 %, doporučuje se nižší hodnoty asi 40 % nebo 50 %,
- parametry prostředí ke kalibraci je nutné udržovat minimálně 24 hodin v laboratoři před zahájením kalibrace,
- nejméně 24 hodin před začátkem kalibrace je vhodné vyčistit konektory

teraohmmetru, referenčních odporů a použitých kabelů (obvykle isopropanolem). Kontrolujte odpor před a po čištění. Pokud je po čištění menší, je nutno nalézt chybu,

- kontrola, zda měřič použitý ke kalibraci je připojen do zásuvky, která obsahuje ochranný vodič jako základní míru ochrany proti nepřímému dotyku,
- neprovádějte žádnou operaci na svorkách teraohmmetru, pokud je přítomno na těchto svorkách napětí. Proto před provedením jakékoli manipulace stiskněte klávesu, která uvede přístroj do pohotovostního stavu (přístrojový pohotovostní režim) a zkontrolujte, zda není žádný signál na jeho svorkách.

9 Postup kalibrace

Proces kalibrace – možné kalibrační sekvence

Vzhledem k tomu, že kalibrovaný etalon je pasivní jediná hodnota bez nastavitelnosti, je proces kalibrace jedinečný úkol stanovit hodnotu odporu a jeho nejistoty. Výsledky po sobě jdoucích kalibrací umožňují navázat drift kalibrovaného odporu a aplikovat korekce v případě potřeby při používání.

V závislosti na výsledcích kalibrace může být výsledná nejistota měření stanovena jen v případě, že se odpor chová správně a kontroly, zda výsledky jsou v rozsahu přesnosti stanovené v jejich specifikacích.

Připojení a provádění měření

Připojte kabely používané v postupu pro kalibraci odporu, odpovídající kalibrační metodě. Je nutné přihlédnout k následujícím úvahám a doporučení výrobce:

- proveďte krátké spojení na vstupu měřiče a zkontrolujte zbytkový signál nebo je třeba provést nulování,
- použijte kabely a konektory dobře udržované a čisté,
- zkontrolujte správné připojení a snažte se vyhnout nadměrnému ohýbání kabelů.
- zkontrolujte, zda na svorkách používaných pro připojení v době manipulace není žádné napětí,
- vyhněte se zdrojům tepla, které ovlivňují teplotu kalibrovaného odporu buď zářením (například oslunění), nebo vedením tak, že umístíte kalibrovaný odporu co možné dále od takových vlivů,
- počkejte s odečítáním, až se podaří stabilizovat hodnotu před měřením,
- není-li přepólování prováděno automaticky, musí se provést ručně,
- je-li zvolena polarita, počkejte před přijetím měřené hodnoty, až se měření stabilizuje,
- v případě, že kalibrovaný odpor nemá k dispozici připojení ke stínění, jako je měření základních provedení dvousvorkových odporů, je třeba odpor chránit v maximální možné míře od vnějších zásahů v uzavřené plechové krabici. Průchod na svorky na povrchu krabice má být z methakrylátu nebo teflonu, pro zvýšení izolačního odporu,

- k zamezení vzniku zemní smyčky a šumu, které by mohly zkreslit výsledky kalibrace, je používán pouze jeden bod uzemnění. Vedení nesmí tvořit smyčky,
- k zabránění rušení, je třeba zajistit, aby kolem měřicího systému nepohybovaly žádné osoby,
- udržujte pracoviště používané při kalibraci zapnuté minimálně 30 minut teplotně stabilizované.

Vlastní kalibrace

Následující proces by měl být proveden kvalifikovaným pověřeným pracovníkem, s cílem nejprve charakterizovat vlastnosti měřiče vysokého odporu a používaných referenčních rezistorů.

Připojte etalonový referenční odpor k teraohmmetru a ponechte dostatek času ke stabilizaci. Obsluha musí být informována o časovém rámci, který je potřebný k dosažení stability. Je třeba zapisovat údaje z dlouhodobého měření (obvykle 12 hodin).

Po zkoušce je třeba analyzovat data, hledat vliv rušivých odečtů a driftu teraohmmetru, určeného pro přímé měření. Dále je vhodné použít etalonový odpor k určení chyby teraohmmetru, určeného pro přímé měření.

Stanovení chyby měřidla by se měla opakovat minimálně 5 krát za období jednoho dne. Zkontrolujte změnu hodnoty v průběhu času a určete náhodné chyby založené na driftu měřidla.

Toto určení denní chyby měřiče se opakuje 3x po sobě následujících dnech. Je třeba porovnávat jakékoliv změny v okolní teplotě, vlhkosti a zejména tlaku vzduchu, nedošlo-li ke změně způsobené omylem, což umožňuje potlačit předchozí náhodné chyby a nestability etalonu. Zejména je třeba určit, zda existuje souvislost mezi tlakem vzduchu a hodnotou etalonu, protože to není parametr pro laboratorní prostředí, který je obvykle řízen. Některé odpory budou mít nezanedbatelný koeficient tlaku vzduchu, vzhledem k tomu, že to nebude mít význam i pro ostatní měření. Zkušenosti ukázaly, že obvykle i teraohmmetr má zanedbatelný koeficient tlaku vzduchu. To bylo prokázáno tím, že se sleduje odpor vzhledem k tlaku vzduchu na odpor, který se zdá být citlivý na tlak vzduchu a srovnáním výsledků s referenčním odporem, který ukázal nepatrnou změnu odporu při různém tlaku vzduchu, za použití stejného modelu teraohmmetru.

9.1 Přímé měření

- Připojte teraohmmetr ke kalibrovanému rezistoru,
- **poznámka:** v záznamu sběru dat uveďte hodnotu kalibračního odporu při napětí aplikovaném při kalibraci,
- na základě pokynů uvedených v technické příručce měřidla pro měření, si poznamenejte hodnotu měřidla naměřenou pro různé hodnoty napětí.

Kalibrační metody

Dvě metody jsou obvykle k dispozici pro provedení měření odporu teraohmmetrem.

Jednou z metod je přímo změřit odpor testovaného etalonu a použít předtím kalibrovaného teraohmmetru a jeho dlouhodobé nejistoty měření. Druhá, přesnější, je metoda použití

metody substituce.

Metoda přímého odečtu R

Metoda používaná pro kalibrované etalony na vhodném měřiči (dále jen teraohmmetru) – vhodné především pro málo stabilní etalony a dekády R . Kalibrace zahrnuje jedno ze zvolených připojení, to je dvousvorkové a třísvorkové připojení.

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

Přímé měření R multimetrem (obvyklé do 1 GΩ, maximálně 10 GΩ)

Pro běžné kalibrace odporů do 1 GΩ lze využít přímé měření číslicovým multimetrem. Pro přesnější měření pak poměrovou metodu, kdy se měří poměr měřeného odporu a etalonového odporu. Multimetry pro měření ve většině rozsahů využívají metodu konstantního proudu a měří úbytku napětí. Přesnost měření velmi rychle klesá s velikostí měřeného odporu. U hodnot odporů do 1 GΩ již dosahuje jen řádu 0,1 %.

Lepší přesnosti lze dosahovat s multimetrem Fluke 8508A, kde je tzv. funkce HiV Ω, která umožňuje měřit odpory, až do hodnot 10 GΩ při nominálním napětí 100 V. Tím se výrazně zvyšuje přesnost a zlepšuje i čas ustálení při měření vysokých odporů. Totéž umožňuje DMM Transmille 8081.

Pro vyšší hodnoty odporů se pak již musí používat speciální přístroje, tzv. teraohmmetry (většinou pracují s měřicím napětím v řádu stovek V až kV), popřípadě elektrometry (měřidla velmi malých proudů). Charakteristické pro tyto přístroje je malý vstupní proud. Při vlastním měření je potřeba používat vodiče s dobrou izolací, omezit pohyb osob v blízkosti kalibrovaného objektu, důsledně dodržovat stínění a zemnění a počítat s dostatečně dlouhými ustalovacími časy před vlastním odečtem.

Substituční metoda

Substituční metoda, kdy referenční etalon (R_E) se známou hodnotou R je změřen teraohmmetrem a stejné měření je provedeno i s kalibrovaným etalonem (R_X) při požadované velikosti měřicího napětí. Hodnota kalibrovaného etalonu se určí ze známé hodnoty referenčního etalonu a poměru změřených hodnot referenčního a kalibrovaného R . Metoda je vhodná pro nejpřesnější měření. Porovnání s referenčním etalonem odporu se provádí pro etalony, jejichž hodnoty se neliší o více než 5 %.

Odpor kalibrovaného etalonu je měřen a porovnán se známým etalonem odporu, s minimální časovou mezerou mezi jednotlivými měřeními, a to následovně. Vždy používejte nejlepší etalony odporu, které jsou k dispozici v laboratoři. Při přenosu hodnoty odporu mají být oba rezistory uloženy do stíněného krytu společně dohromady, aby nedocházelo ke zpožděním, aby se oba stabilizovaly a po změření etalonu se mohlo pokračovat s měřením kalibrovaného odporu. Tím se urychlí cyklus měření a zkrátí doba potřebná k ustálení. Udržujte dobu měření cyklu raději delší, než kratší, protože urychlení měření bude mít za následek zvýšení šumu. Obsluze však nesmí měření trvat příliš dlouho

(mnoho vzorků), což poskytuje více času pro drift odporu. Provozovatel musí zajistit, aby odpor byl kalibrován při požadovaném napětí. V opačném případě musí být použit při stanovení chyby koeficient vlivu napětí měřiče na jiných místech, než je napětí pro kalibrovaný bod, což má za následek zvýšení nejistoty.

Opakování měření

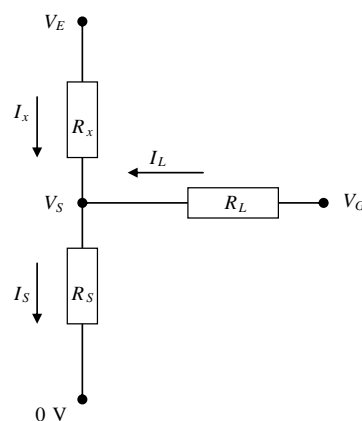
Doporučuje se provést několik sad měření, kdy každá sada měření sestává nejméně z 10 měření. Pro každou sadu měření zaznamenáváme výsledky měření a podmínky prostředí, v nichž byla měření provedena. Mezi každou sadou měření musí uplynout minimálně dvě hodiny a za den může být provedeno maximálně pět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

Simulovaný etalon s T článkem

Kromě výše uvedených konstrukcí odporových etalonů se ještě v praxi poměrně často používají etalony zapojené v třívorkové konfiguraci, tvořené „T“ článkem – dvěma odpory v sérii a třetím mezi jejich společným bodem a zemí (např. výrobní model GL9337 nebo ruské etalony řady P4085). Přímé měření těchto etalonů, které vlastně jen simulují odpor vysoké hodnoty, je možné jen pro třívorkové připojení. U některých konstrukcí, kde je možné změřit jednotlivé vnitřní odpory „T“ článku samostatně, může být takový etalon změřen po částech a simulovaná hodnota odporu určena výpočtem (včetně jeho nejistoty). Toto ale není jednoduše možné v případě, kdy ke společnému bodu všech tří odporů není z vnějšku přístup. Nicméně i zde je možné z hodnot naměřených mezi jednotlivými svorkami následně simulovaný odpor a jeho nejistotu vypočítat.

Výše zmíněná konfigurace měření, naznačená na obrázku, platí ovšem jen pro měření odporů, které jsou vybaveny děleným guardem - při plánování konkrétní konfigurace měření je nutné vzít samozřejmě v úvahu konkrétní konstrukční uspořádání jednotlivých etalonů, které budou měřeny (viz předcházející rozbor) a pro jejich kombinaci navrhnout takovou sestavu, která bude optimální.

Rozbor je možné ilustrovat na následujícím zjednodušeném schématu.



Obr. č. 14: Simulovaný etalon R

Pro toto schéma platí vztahy:

$$dV_G = V_G - V_S$$

$$I_x - I_S + I_L = 0$$

$$V_E - I_x \cdot R_x = V_S$$

$$I_L \cdot R_L = dV_G$$

$$I_S \cdot R_S = V_S$$

Z nich lze pak odvodit vztah pro relativní chybu měření odporu R_x způsobenou svodem R_L v důsledku odchylky mezi V_S a V_G :

$$E_{\text{RXL}} = - \frac{dV_G}{V_E} \cdot \frac{R_x + R_S}{R_L + R_x \cdot dV_G / V_E}$$

Při návrhu konkrétního zapojení je nutné zabránit připojení paralelních izolačních odporů přímo k měřeným odporům (nepoužívat čtyřvodičové kabely v zapojení pro měření velkých hodnot odporu, které je obvyklé při měření klasických čtyřsvorkových odporových etalonů nižších hodnot případně dvouvodičových kabelů u dvousvorkových etalonů). Paralelně připojený odpor není možné dodatečně eliminovat žádným stíněním či guardem.

Přednostně se použije stíněný dvouvodičový kabel pro každý pár svorek (**potencial1-current1**) P1-C1 a P2-C2. Pro připojení dvousvorkových etalonů je možné použít např. stíněný koaxiální kabel (je nutné neopomenout propojit svorky P1 a C1 a též P2 a C2 na příslušném vstupním kanálu mostu).

V případě zemnění je nutné vyhnout se vytváření zemních smyček – všechny země by měly být připojeny do jediného zemního bodu – na zemnicí desku na panelu teraohmmetru.

Dalším cílem je navržení takového zapojení, které nejlépe umožní potlačit vliv případného svodového či izolačního odporu na svorkách P1(R1) a P1(R2). Podle konstrukce jednotlivých připojených odporů volíme možnost zapojení pomocného zdroje GUARD tak, abychom pokud možno izolovali body P1(R1) a P1(R2).

Jak již bylo zmíněno dříve, toto se nejspíše dosáhne u odporů s děleným guardem, spojeným s vnějším pláštěm koaxiálních svorek – na napětí V_G zdroje GUARD připojíme guard P1(R1) a guard P1(R2) i vnější pláště konektorů P1(R1) a P1(R2) a též stínění kabelů přivedených na tyto svorky.

Tentýž postup lze volit i u etalonů s děleným guardem propojeným pomocným odporem – nízká impedance zdroje GUARD zajistí, že se vliv pomocného odporu na měření neuplatní. Toto ovšem platí jen v případě měření s aktivním zdrojem GUARD – pokud by se použil fixní externí zdroj GUARD, pak správná funkce bude zajištěna jen při měření poměru neznámého a etalonového odporu 1:1. V případě měření s jiným poměrem odporů dojde k chybám, neboť pomocné odpory mají stále stejnou hodnotu, takže napětí fixního zdroje GUARD se bude dělit vždy 1:1, nezávisle na poměru měřených odporů.

U odporů s neděleným vnitřním guardem se zapojí vnitřní guard ke zdroji GUARD.

U odporů pouze s jednoduchým stíněním (dvousvorkových i čtyřsvorkových) je vhodné připojit toto stínění ke zdroji GUARD. Pozor - napětí zdroje GUARD je na kovovém povrchu odporu!!!

Pozor je nutné dávat vždy při měření s využitím zdroje GUARD – jeho napětí může být na kovových částech konektorů, pláštích odporů, stínění kabelů – proto platí: Nikdy se nedotýkat kovových částí při měření.

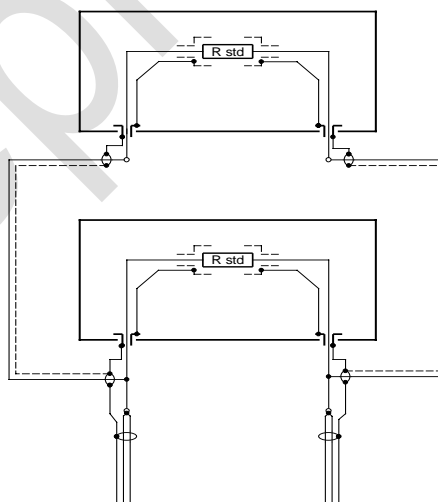
Měření v paralelní kombinaci

Jedná se o pomocnou, spíše nouzovou metodu, kdy je třeba změřit hodnotu nad rozsahem použitého měřiče.

Pro měření velmi vysokých hodnot odporů (nad 1 G Ω) nad rozsahem použitého přístroje se používá i měření v konfiguraci etalonu a neznámého odporu připojeného paralelně ke svorkám jednoho z nich (jeho hodnota se určí výpočtem ze změny odporu při paralelní kombinaci).

V této kombinaci samozřejmě izolační či svodové odpory hrají vysokou úlohu a jejich potlačení je kritické - například při měření v oblasti teraohmů jsou již srovnatelné s hodnotou měřeného odporu a jejich správné ošetření je tedy nezbytné.

Příklad propojení dvou odporových etalonů pro paralelní měření je na následujícím schématu.



Obr. č. 15: Schéma propojení pro měření paralelní kombinace dvou odporů

V tomto zapojení je snaha aplikovat již uvedená pravidla pro eliminaci vlivu izolací a svodů na kabelech a konektorech použitých odporů.

Kromě těchto podrobně diskutovaných vlivů izolačních a svodových odporů se na výsledné nejistotě změřené hodnoty odporu samozřejmě podílí celá řada dalších vlivů, jako:

- stabilita etalonů, doba od jejich kalibrace, znalost historie jejich chování a možnost predikce okamžité hodnoty,
- napěťové závislosti, teplotní a výkonové koeficienty odporů, stabilita teploty v termostatu, relativní vlhkost vzduchu,
- termonapětí na svorkách,
- statické náboje, mikrofonní efekt kabelů,
- správnost nastavení napětí V_G zdroje GUARD.

10 Vyhodnocení kalibrace

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

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

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

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

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

Kalibrace v období 12 měsíců je přiměřená pro rekalibraci vysoké hodnoty rezistorů. Tato doba může být upravena v závislosti na požadované metrologické vlastnosti odporů a jejich chování v závislosti na čase. Spodní hranice může být stanovena technickým manažerem laboratoře na základě dostupných informací a vzhledem k použití odporu, zdá nerozumné klesnout pod šest měsíců. Pokud jde o horní hranici je nastavena obvykle na 24 měsíců.

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,
- napětí nastavené na svorkách kalibrovaného etalonu,
- nejistotu 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 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 recalibrace více než 70 % z očekávané specifikace driftu při interních kalibracích rozhoduje vedoucí kalibrační laboratoře a doporučuje se zkrátit dobu do recalibrace. 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 Hi R zásadně při kalibraci nejjustujeme.

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 4.1.2/19/17),
- 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). V tomto případě je vhodné, aby kalibrační laboratoř zpracovala záznam o měření (s uvedenými měřeními 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 ukončení a vyhodnocení 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: 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 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

Výpočet nejistoty zjištěné hodnoty etalonu obecně - substituční metoda.

Celková nejistota měření vypočítaná pro realizované zkoušky, na základě kterých byla odhadnuta skutečná - konvenční hodnota kalibrovaného etalonu R_x , musí zohledňovat veškeré zdroje nejistot a to tak rozptyl výsledků zkoušky, tak i nejistoty způsobené aplikací srovnávací měřicí metody, nejistoty hodnot referenčních etalonů, jakož i všechny uplatňující se nejistoty způsobené ovlivňujícími veličinami.

Při aplikaci substituční metody měření mají referenční a kalibrovaný rezistor stejné jmenovité hodnoty. Při této metodě měření vycházejíc z EA 4/02 z tam uvedeného matematického modelu, jsou měřením zjištěné hodnoty:

$$R_x^i = R_{x_i} \cdot (1 + \delta R_x^i / R)$$

$$R_s^i = R_{s_i} \cdot (1 + \delta R_s^i / R)$$

Kde:

R_{x_i} , R_{s_i} - teraohmmetrem indikované hodnoty kalibrovaného resp. referenčního rezistoru,

δR_x^i , δR_s^i - zjištěné odchylky od jmenovité hodnoty pro R_x respektive R_s ,

R - jmenovitá hodnota srovnávaných rezistorů.

Poměr porovnávaných rezistorů vypočítaný z těchto vztahů je:

$$R_x^i / R_s^i = r \cdot r_c$$

Kde kalibrovaným indikován poměr rezistorů pro jednotlivé série měření je:

$$r = R_{x_i} / R_{s_i}$$

Korekční faktor vyjadřující odchylku od indikovaných hodnot pro tato měření je:

$$r_c = 1 + (\delta R_x^i - \delta R_s^i) / R$$

Vzhledem k tomu, že používáme substituční metodu měření, závislost měřené hodnoty od stupnice odporu realizované teraohmmetrem je zanedbatelná. Etalonová nejistota vyplývající z uplatnění korekčního členu je stanovena na předpokladu nekorelovaných odchylek vyúsťující z uplatňujících se parazitních vlivů a rozlišení použitého teraohmmetru. Pokud zvážíme, že za tohoto předpokladu je $u(\delta R_x) = u(\delta R_s) = u(\delta R)$,

následně pro nejistotu pro etalonový odpor platí:

$$u^2(r_c) = u^2(\delta R) / R^2 + u^2(\delta R) / R^2 = 2 \cdot u^2(\delta R) / R^2$$

Výsledný odpor kalibrovaného rezistoru je:

$$R_X = R_S \cdot r_c \cdot r$$

a po zvážení všech vlivů je:

$$R_X = (R_S + \delta R_D + \delta R_{TS}) \cdot r_c \cdot r - \delta R_{TX}$$

Kde:

R_S - hodnota odporu referenčního rezistoru,

δR_D - drift odporu referenčního rezistoru od poslední kalibrace (předpokládaný),

δR_{TS} - variace hodnoty referenčního odporu v závislosti na teplotě,

r - poměr srovnávacím indikovaných odporů R_X a R_S ,

r_c - korekční faktor pro parazitní napětí a rozlišovací schopnost teraohmmetru,

δR_{TX} - variace hodnoty odporu kalibrovaného rezistoru v závislosti na teplotě.

Na základě tohoto postupu je celková bilance nejistot pro případ substituční metody měření odporu zřejmá z následující tabulky:

Veličina	Odhad	etalonový nejistota	Předpokladané rozdělení	Citlivostní koeficient	Příspěvek nejistoty
X_i	X_i	$u(x_i)$		c_i	$u_i(y_i)$
R_S	Hodnota z certifikátu (v Ω)	z certifikátu	normální	1,0	u_1
δR_D	Hodnota známa z dlouhodobého sledování (v Ω)	z hranic driftu	rovnoměrné	1,0	u_2
δR_{TS}	Teplotní oprava referenč. etalonu	driftu R_S	rovnoměrné	1,0	u_3
δR_{TX}	Teplotní oprava kalibrov. etalonu	driftu R_X	rovnoměrné	1,0	u_4
r_c	1,000 opravný faktor pro rozlišitelnost	z rozlišitelnost i	trojúhelníkové	Vztáhnuté na měřenou hodnotu	u_5
r	Zjištěný aritmetický průměr	typu A	normální	Vztáhnuté na měřenou hodnotu	u_6
R_X	Výsledná hodnota kalibrovaného odporu		normální		Výsledná kombinovaná standardní nejistota u_c

Rozšířená nejistota pro normální rozdělení:

$$U = k \cdot u(R_X) = 2 \cdot u_c$$

Při aplikaci dalších uvedených metod je nejistota typu A - u_A rovná směrodatné odchylce výběrového průměru a je dána vztahem:

$$u_A = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \cdot \sum_{i=1}^n (R_{X_i} - R_X)^2}$$

Kde:

R_X - odhad skutečné - pravé hodnoty odporu kalibrovaného etalonu (její výběrový průměr),

R_{X_i} - skutečná - konvenční hodnota etalonu z i -tého měření,

n - počet měření etalonu.

Numerický příklad – přímé měření



Obr. č. 16: Příklad možných zařízení k numerickému příkladu, vlevo etalony 100 GΩ vpravo teraohmmetr

Kalibrace etalonu odporu 100 GΩ při ± 1000 V napětí přímým měřením:

- použitý přístroj – teraohmmetr,
- rozsah 100 GΩ má největší měřenou hodnotu 119,99 GΩ,
- specifikace teraohmmetru na rozsahu 100 GΩ:

$$U_{spec} = 1 \times 10^{-3} R$$

Výsledek kalibrace teraohmmetru na rozsahu 100 GΩ pro kalibrovanou hodnotu 100 GΩ je popsán kalibračním listem.

Údaje získané z kalibračního listu při měření na hodnotě 100 GΩ:

- naměřená odchylka od nominální hodnoty

$$\Delta R = 0,000 2 \text{ G}\Omega$$

- Nejistota měření

$$U_c = 3,10^{-4} \times R$$

Stanoveno pro $k = 2,37$ a úrovní spolehlivosti 95,45 %.

Kalibrační list rovněž uvádí, že počet efektivních stupňů volnosti této nejistoty je získán pro stupně volnosti uvedené na certifikátu a je $\nu = 8$ a teraohmmetr se používá v rámci své specifikace.

Sběr dat při měření

Níže uvedená tabulka ukazuje sérii 10 měření s výsledky získanými pro obě polarity.

Hodnota v kalibračním certifikátu může být uvedena samostatně pro pozitivní a negativní hodnoty aplikovaného napětí, i když je obvyklá praxe, že se udávají průměrné hodnoty výsledků získaných s obou polarit, a to:

$$R_{x,c} = [(R_{x,c})_+ + (R_{x,c})_-] / 2.$$

Pak po dosazení z níže uvedené tabulky:

$$R_{x,c} = (100.0285 + 100.0398) / 2 = 100,0342 \text{ G}\Omega.$$

Opakovatelnost složka nebo typ A:

Je určena směrodatná odchylka průměrné měřené hodnoty, pak:

$$u(R_{x,m}) = s(R_{x,m})_i / \sqrt{n}$$

V našem případě $s(R_{x,m})_i$ se bere jako průměrné hodnoty směrodatných odchylek získaných pro obě polarity:

$$s(R_{x,m})_i = (6,4 + 5,5) \cdot 10^{-3} / 2 = 5,95 \cdot 10^{-3} \text{ G}\Omega$$

pak

$$u_1 = 5,95 \times 10^{-3} / \sqrt{10} = 1,9 \times 10^{-3} \text{ G}\Omega$$

Nejistota složky " $R_{x,m}$ " naměřené hodnoty

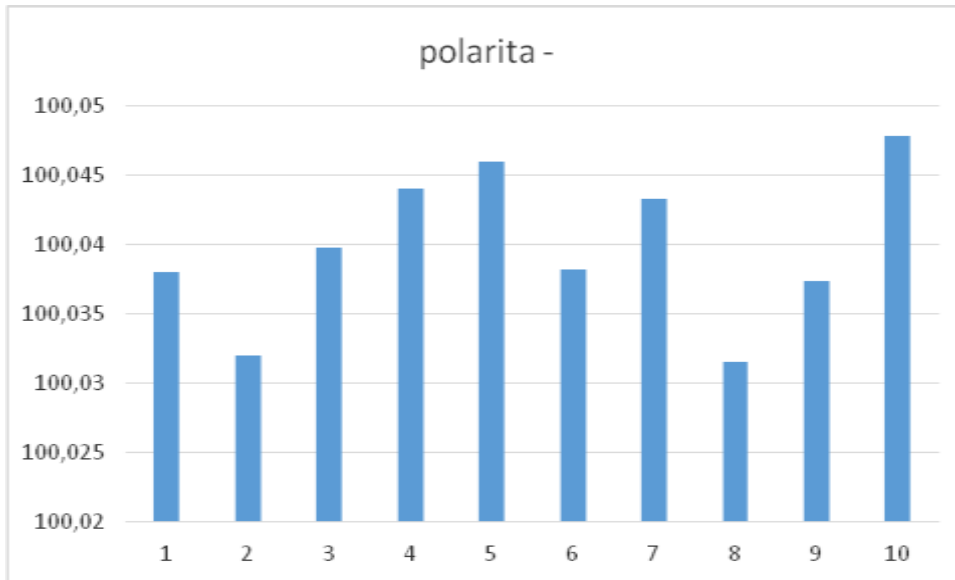
Nejistota kalibrace přístroje používané pro měření teraohmmetrem, v našem případě:

$$u_2 = 3 \times 10^{-4} R / k$$

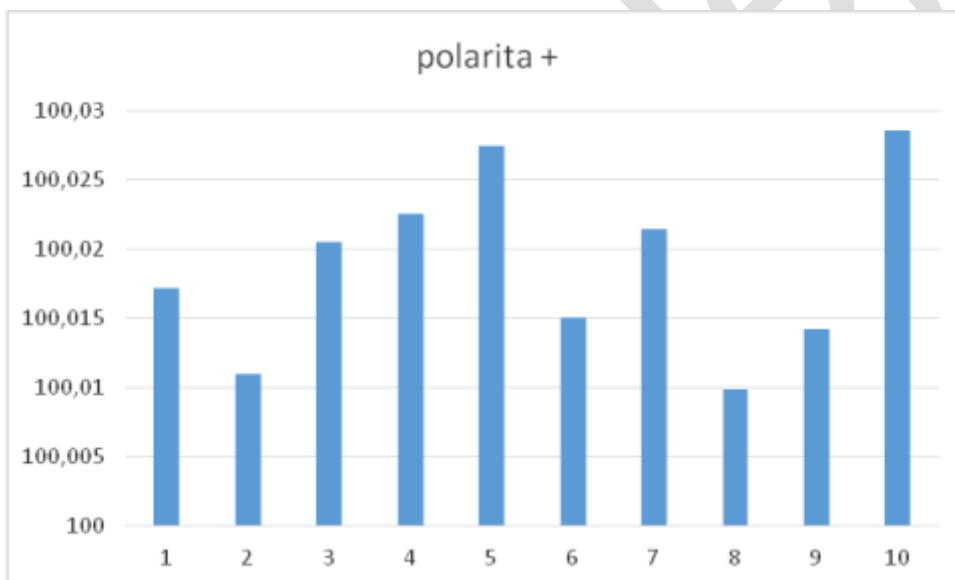
který pro 100 GΩ a $k = 2,37$ uvedené na kalibračním listě, nám dává hodnotu:

$$u_2 = 3 \times 10^{-4} \times 10^2 / 2,37 = 1,3 \times 10^{-2} = 13 \times 10^{-3} \text{ G}\Omega$$

Číslo měření N ^o $R_{x,i}$	Polarita + při napájení 1000V	Polarita – při napájení 1000V
1	100,0172	100,0380
2	100,0110	100,0320
3	100,0205	100,0398
4	100,0225	100,0440
5	100,0274	100,0460
6	100,0150	100,0382
7	100,0214	100,0433
8	100,0099	100,0315
9	100,0142	100,0374
10	100,0285	100,0478
R_{x10}	100,0285	100,0398
$s(R_{x,i})_{10}$	$6,4 \cdot 10^{-3}$	$5,5 \cdot 10^{-3}$
R_{x9}	100,01768	100,0389
$s(R_{x,i})_9$	$5,7 \cdot 10^{-3}$	$5,0 \cdot 10^{-3}$



Obr. č. 17: Polarita –



Obr. č. 18: polarita +

Rozložení výsledků opakovaných měření by mělo být co nejbližší normálnímu. Každá odchylka od tohoto rozložení signalizuje problém při měření. Zejména sledujeme, zda měření nemá systematické složky driftu, které by ukazovaly, že proces není ustálen. Pro uvedený příklad ukazuje graf, že položky 8 až 10 signalizují trend k růstu. Je nutné prověřit dalšími měřeními (11,12), jde-li opravdu o trend k růstu. Pokud se ukáže, že trend nepokračuje, je možné použít celý soubor 10 měření. Toto posouzení je jednodušší, než použití komplexnějších metod. Jak se změní výsledek vynecháním poslední složky měření č. 10 (předpoklad, že je již ovlivněna), ukazují poslední 2 řádky tabulky.

Korekce složka u_3 naměřené hodnoty:

$$u_3 = 1 \times 10^{-3} R / k$$

a za předpokladu obdélníkového rozložení s $k = \sqrt{3}$, jsou získány pro $R = 100 \text{ G}\Omega$

$$u_3 = 1 \times 10^{-3} \times 10^2 / \sqrt{3} = 58 \times 10^{-3} \text{ G}\Omega$$

Jak je uvedeno v zadání příkladu, je uvažován za etalon teraohmmetr s 5 1/2 číslicemi, to je na rozsahu 100 GΩ rozlišení 00 0001 tedy rozlišení měřicího přístroje, $u(\delta R_{x,m})$ res

$$U_4 = \pm 0,5 \times 10^{-4} / \sqrt{3} = 0,3 \times 10^{-4} = 0,03 \times 10^{-3} \text{ G}\Omega.$$

X_i	Měřená hodnota X_i (GΩ)	nejistota (x_i) (GΩ)	Rozložení pravděpodobnosti	Koeficient citlivosti c_i	Složka nejistoty $u_i(y) = c_i \cdot u(x_i)$ (GΩ)
$R_{x,m}$	100,0392	$u(X_1) = 1,9 \cdot 10^{-3}$	normální	$c_1 = 1,0$	$u_1(y) = 1,9 \cdot 10^{-3}$
		$u(x_2) = 13 \cdot 10^{-3}$	normální	$c_2 = 1,0$	$u_2(y) = 13 \cdot 10^{-3}$
$\delta R_{x,m}$	0	$u(x_3) = 58 \cdot 10^{-3}$	pravoúhlé	$c_3 = 1,0$	$u_3(y) = 58 \cdot 10^{-3}$
$(\delta R_{x,m})_{\text{res}}$	0	$u(x_4) = 0,03 \cdot 10^{-3}$	pravoúhlé	$c_4 = 1,0$	$u_4(y) = 0,03 \cdot 10^{-3}$
$R_{x,c}$	100,0392				$U_c(R_x) = 59,5 \cdot 10^{-3}$

Výpočet kombinované nejistoty

$$uc(R_x) = \sqrt{[u_1(y)]^2 + [u_2(y)]^2 + [u_3(y)]^2 + [u_4(y)]^2} = \sqrt{(1,9^2 + 13^2 + 58^2 + 0,03^2) \times 10^{-6}} = \sqrt{4176} \times 10^{-6} = 59,5 \times 10^{-6} \text{ G}\Omega.$$

Z tabulky a výpočtu je patrné, že dominantním prvkem je složka odpovídající specifikaci teraohmmetru používané s rovnoměrným rozdělením.

Výpočet rozšířené nejistoty

Je stanovena jako:

$$U_c(R_x) = k \times u_c(R_x).$$

Pro interval s úrovní spolehlivosti 95,45%.

Hodnota součinitele pro tuto úroveň pravděpodobnosti se získává ze stanovování efektivního počtu stupňů volnosti v souladu s postupem stanoveným v bodě 6.4 přílohy G

ISO Guide. Podle této části a použitím vzorce Welch-Satterthwaite:

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

po dosazení:

$$v_{ef} [u_c(y)] = 59,5^4 \times 10^{-12} / (1,9^4/9 + 13^4/8 + 58^4/\infty) \times 10^{-12} = 3509$$

tomu odpovídá k :

$$k = 2$$

Pak je rozšířená nejistota kalibrace:

$$U_c(R_x) = k \times u_c(R_x) = 2 \times 59,5 \times 10^{-3} \text{ G}\Omega = 0,119 \times \text{G}\Omega.$$

Tento výsledek ale předpokládá, že rozdělení pravděpodobnosti vyplývající z výstupní veličiny je normální nebo Gaussovo rozdělení, nicméně je třeba poznamenat, že údaje týkající u_3 složky pro teraohmmetr je jasně dominantní a rozložení v tomto případě je spíše obdélníkové a jak je ukázáno ve vzorci S9.14, odstavec S9.8 dokumentu EA-4/02-S2 (dodatek 2), je faktor krytí hladina spolehlivosti " p " je dána vztahem:

$$k(p) = p \sqrt{3}$$

Pak na hladině spolehlivosti 95,45%, je hodnota koeficientu rozšíření:

$$k = 0,9545 \sqrt{3} = 1,65.$$

Výsledná rozšířená nejistota je tedy:

$$U_c(R_x) = k \times u_c(R_x) = 1,65 \cdot 64,6 \text{ G}\Omega = 0,107 \times 10^{-3} \text{ G}\Omega,$$

Což se prakticky shoduje se specifikací teraohmmetru pro tuto hodnotu:

$$1 \times 10^{-3} R = 1 \times 10^{-3} \times 10^2 = 0,1 \text{ G}\Omega.$$

Výsledek kalibrace

Výsledkem je stanovení absolutní hodnoty kalibrovaného odporu a jeho nejistoty, v souladu s kritérii stanovenými v EA4/02 nebo ISO Guide ve vztahu k zaokrouhlování a počtu významných míst:

$$R_{x,c} = (100,04 \pm 0,11) \text{ G}\Omega.$$

To může také být vyjádřeno jako rozdíl od nominální hodnoty, tedy:

$$\Delta R_{x,c} = 0,04 \text{ G}\Omega \pm 0,11 \text{ G}\Omega$$

V obou případech je nutné stanovit, že rozšířená nejistota, jak je uvedeno, odpovídá kombinované nejistotě násobené koeficientem rozšíření $k = 1,65$ který odpovídá hladině spolehlivosti 95,45% pro pravoúhlé rozdělení.

Interpretace výsledků

K dalšímu použití etalonu odporu je třeba uvažovat:

- požadovanou a dosaženou 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 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 by měl být oddělen od normálního použití.

Rekalibrační doba

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

- požadované přesnosti,
- použití, pro které je etalon určen,
- pozorování dlouhodobého driftu.

Při vysokých požadavcích na kvalitu etalonu odporu použitých pro kalibraci jako etalon v laboratoři pro kalibraci, se doporučuje nejprve během prvních dvou nebo třech kalibrací snížit dobu rekalibrace na šest měsíců, za účelem pro získání informací o stabilitě a stárnutí. Pro etalon odporu pro použití se střední a nízkou přesností a v závislosti na výsledcích pozorovaných u předchozí kalibrace, lze toto období prodloužit až na 24 měsíců.

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

15 Validace

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

Upozornění

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 poslední revize normy 17025).

Tento kalibrační postup byl zpracován, revidován a posouzen v rámci úkolu rozvoje metrologie, řešeném pro Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví

pod číslem VII/1/17. Nesmí být rozmnožován ani předáván jiným organizacím a subjektům bez souhlasu ÚNMZ a ČMS.

Nepronodějně

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 v rámci programu vzdělávání seznámili a opakovaně udržovali znalosti uvedené v přílohách.

Příloha č. 1

Obecné základy měření velkých R .

Svodové proudy a stínění

Svodové proudy jsou generovány na bludných cestách mezi odporem a prvky mezi částmi měřicího obvodu a zdrojů blízkých napětí. Svodový proud je chybový proud, který teče přes izolační odpor při působení napětí. Obecně se stává problémem, když je impedance testovaného etalonu srovnatelná s odporem izolátorů ve zkušebním okruhu. Tento proud může značně snížit přesnost měření nízkých proudů. Chcete-li snížit svodové proudy, použijte všude kvalitní izolační látky, je nutné snížit úroveň vlhkosti v testovacím prostředí a používat stínění.

Použití kvalitní izolační látky při vytváření zkušebního obvodu je jeden způsob, jak snížit svodové proudy. Teflon, polyetylén a safír jsou příklady kvalitních izolantů, ale je nutné se vyhnout materiálům, jako jsou fenoly a nylon.

Vlhkost může také zhoršit výsledky směrem na nižší hodnoty měření odporu. Různé typy izolátorů budou absorbovat různé množství vody ze vzduchu, takže je nejlepší zvolit izolátor, na kterém vodní pára neumožní snadno tvořit souvislý film, takže je nejlepší provést měření v dobře klimaticky kontrolované místnosti. V některých případech může být snížena izolace vlivem iontové nečistoty, což může vést k falešným proudům, a to zejména ve vysoké vlhkosti.

Stínění je velmi účinný způsob, jak snížit svodové proudy. Na guardy je připojena nízká impedance bodu v obvodu, který je na téměř stejném potenciálu jako vysoké impedance vedení, které je určeno k měření a které je chráněno.

Čistota. Například, běžně používané epoxidové desky plošných spojů, pokud nejsou důkladně očištěny od leptacího roztoku nebo jiných nečistot, mohou generovat proudy několika nanoampérů mezi vodiči. Izolační odpor je možné výrazně snížit vysokou vlhkostí nebo vlivem iontové kontaminace.

Podmínky v laboratoři

Vysoká vlhkost, kdy dochází ke kondenzaci nebo absorpci vody a iontová kontaminace může být výsledkem působení solí nebo tavidla při výrobě nebo i tělesných tuků při doteku. I když primárním výsledkem těchto kontaminantů je snížení izolačního odporu, kombinace vysoké vlhkosti a iontového znečištění mohou tvořit vodivou cestu, nebo mohou dokonce působit jako elektrochemický článek s vysokou hodnotou sériového odporu. Buňka vytvořená tímto způsobem může vytvořit zdroj proudu v řádu picoampérů

nebo nanoampérů, funkční po dlouhou dobu. Aby se zabránilo účinkům znečištění a vlhkosti, vyberte izolátory, které odolávají nasákavosti, a je nutné udržovat vlhkost na nízké úrovni. Také se ujistěte, že všechny izolátory jsou udržovány v čistotě a bez kontaminace. Pokud na izolátorech může dojít ke kontaminaci, použijte čisticí prostředek, jako je například metanol nebo isopropylalkohol na všechny izolanty a všechny propojovací obvody. Je důležité spláchnout všechny nečistoty, jakmile jsou rozpuštěny v rozpouštědle. Používejte na čištění pouze velmi čistá rozpouštědla, rozpouštědla s nižším stupně čistoty mohou obsahovat látky, které zanechávají elektrochemický film, a snižují isolační odolnost. Z tohoto důvodu by měly být jakékoliv manipulace na izolátoru minimalizovány; za žádných se okolností se nesmíte izolátorů dotknout rukou nebo jakýmkoliv materiálem, který by mohl kontaminovat povrch. V případě, že se izolátor znečistí, a to například prostřednictvím neopatrné manipulace, musí být očištěn odmaštěním za účelem odstranění olejů, a deionizovanou vodou pro odstranění iontové kontaminace. Po vyčištění, by izolátor měl vyschnout po dobu několika hodin při nízké vlhkosti. Pokud nedojde ke zvýšení měřeného odporu, nebylo čištění dostatečné.

Odkazy na normy

Pouze pro informaci, citované dokumenty nejsou v ČR zavázané.

Dokument VDI VDE DGD DKD 2622 uvažuje měření odporu metodou mostovou, kompenzační, substituční a přímým porovnáním. Metodika se zabývá odpory od 10^{-1} ohm do 10^{14} ohm. Pro substituce požaduje používat etalony s odchylkou hodnoty do 0,005 % od nominální hodnoty, substituce doporučuje používat v úzkém rozsahu do 0,05 % mezi oběma etalony.

Pro štítky na etalonech odkazuje VDI VDE DGD DKD 2622 část 8 na DIN 43783-1 sekce 8, pro bezpečnostní zkoušky na DIN 43783-1 sekce 2 a 7 a na EN 6010-1, referenční podmínky měření na DIN 43783-1 sekce 5, a parametry etalonů podle DIN 43783. Norma pro měření odporů od $10^6 \Omega$ do $10^{14} \Omega$ uvádí napětí 10V až 100V.

Pro etalony nad 100 Ω má být podle kapitoly 3.3 v DKD 2622 část 8 isolační odpor mezi spojenými svorkami a kovovým krytem odporu nad 100 MΩ, pro nižší hodnoty nad 1MΩ. Měří se ohmmetrem při napětí 1000 V s přesností 10 %. Pro etalony nad 100 MΩ nejsou konstrukce a metody pro měření izolace v normě popsány.

Norma předepisuje klasické měření teplotní závislosti, měření v závislosti výkonu se uvažuje pro odpory pod 100 kΩ a závislosti na napětí pro odpory nad 100 kΩ.

Pro nulový odpor dekád norma předepisuje měření při proudu, který je menší než 30% z povoleného proudu prvního, nejnižšího přepínače dekády.

Tato metodika uvádí metodu substituční a přímým porovnáním při napětí 10V až 1000V bez návaznosti na požadavky VDI VDE DGD DKD 2622

Výběr nejlepšího izolátoru

Při posuzování izolačního materiálu, zvažte následující materiálové vlastnosti:

- objemový odpor: únik proudu přímo do materiálu,
- povrchový odpor: únik po povrchu, závisí v první řadě na nečistotě na povrchu,
- absorpce vody: únik závisí na množství vody, která byla absorbována do izolátoru,

- piezoelektrický účinek: vytvoření nerovnováhy (a tedy proud nebo napětí) v důsledku mechanického namáhání,
- triboelektrické účinky: vytvoření náboje nevyváženosti v důsledku účinků tření, kdy materiály se mohou třít proti sobě,
- dielektrická absorpce: tendence izolátoru pro ukládání / uvolnění náboje po dlouhou dobu.

Vlastnosti izolátorů jsou podrobněji popsány v následujících odstavcích.

Teflon®

Teflon je nejspokojivější a běžně používaný izolátor pro úrovně impedance, které se vyskytují při měření proudů až 10^{-14} A. Má vysoký objemový odpor a film z vodní páry se netvoří snadno na jeho povrchu. Jeho izolační vlastnosti proto nejsou vážně narušeny působením vlhkého vzduchu. Teflon je chemicky inertní, lze snadno obrábět, a izolátory mohou být snadno čištěny.

Teflon PTFE je typ teflonu nejčastěji používaný v elektronice. Hlavním nedostatkem Teflonu je, že se může porušit vnitřně, když se deformuje, což způsobuje rušivé napětí a proudy. S běžnou péčí však tyto změny charakteristiky nejsou vážné pro proudy větší než 10^{-13} A.

Polystyren

Polystyren je mnohem levnější než teflon a byl jako etalonový užíván pro obecný účel před tím, než byl Teflon k dispozici. Snadno se obrábí, ale často se vyvíjí vnitřní popraskání. Tato charakteristika nenarušuje jeho izolační vlastnosti, pokud praskliny nedosáhnou k povrchu. Objemový odpor polystyrenu je podobný teflonu, ale pro vodní páru tvoří filmy na svém povrchu, když vlhkost vzduchu se zvyšuje, což výrazně snižuje jeho povrchový odpor. Znečištění snižuje jeho odolnost. Z tohoto důvodu manipulace na izolátoru by měly být minimalizovány; za žádných okolností se nesmíme izolátoru dotknout rukou nebo jakýmkoliv materiálem, který by mohl kontaminovat povrch.

V případě, že se izolátor znečistí prostřednictvím neopatrné manipulace, může být čištěn odmašťovacím prostředkem za účelem odstranění olejů, a deionizovanou vodou pro odstranění iontové kontaminace. Po vyčištění, izolátor by měl být vyschnout po dobu několika hodin při nízké vlhkosti.

Polyethylen

Polyethylen má vynikající objemovou rezistivitu a povrchové vlastnosti podobné polystyrenu. Vzhledem k tomu, že je flexibilní, je používán značně pro izolaci pro koaxiální a triaxiální kabely. Tyto kabely jsou vynikající pro všeobecné účely, protože povrchové netěsnosti v této aplikaci jsou relativně nedůležité.

Skla a keramiky

Sklo a keramika také mají vysoký měrný odpor, ale špatné povrchové vlastnosti při vysoké vlhkosti vzduchu a často špatné piezoelektrické vlastnosti. Skleněné nebo keramické části lze čistit metanolem a ponořit do vařícího parafínu, pak má dobrý, ale ne trvanlivý, izolační povrch. Různé silikonové laky mohou být také vypékané nebo se suší vzduchem po nanesení na skleněné nebo keramické povrchy, ale i po tomto ošetření, může manipulace izolátory snadno zkazít.

Safír

Safír je jedním z nejlepších izolátorů. Je v něm generováno velmi málo náboje, když je namáhán mechanicky. Používá se nejčastěji v měření proudů do rozsahu 10^{-15} A. Použití safíru je omezeno jeho pořizovací cenou.

Křemen

Křemen má podobné vlastnosti jako safír, ale podstatně vyšší piezoelektrickou chybu, takže je zřídka použit v obvodech elektrometru.

Jiné izolační materiály

Prakticky všechny ostatní izolační materiály mají nepříjemně nízký měrný odpor nebo nevyhovující povrchové vlastnosti pro použití elektrometru.

Měření velkých odporů všeobecně

Příprava etalonů

Testovací prostředí

Okolní teplota, vlhkost vzduchu, tlak a testovací zařízení v okolí kalibrovaného etalonu mají vliv na jeho elektrické vlastnosti. Například odporové prvky, které jsou hermeticky uzavřené, jsou mnohem méně citlivé na změny vlhkosti a tlaku vzduchu. Stejně tak by neměl být přítomen v testovacím prostoru ionizátor vzduchu nebo jiný zdroj ionizujícího záření. Prostor, kde je umístěno testovací zařízení by mělo být řízené, aby se minimalizovaly tyto účinky a z toho vyplývající nejistoty měření, které indukují. Prostor by mělo být řízeno tak, aby bylo měření provedeno v rámci $45\% \pm 5\%$ relativní vlhkosti a teplotě $23^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$. Obvykle neexistuje žádná kontrola a řízení tlaku vzduchu. Zkoušený etalon je pokud možno nejméně jednou namontován do zvláštní komory, kde je tlak vzduchu regulován, a jsou stanovené konkrétní parametry pro posouzení tlaku vzduchu na zkoušený etalon. Aby bylo možné plně dokumentovat a započítat vliv okolního prostředí na měření zkoušeného etalonu, je nutné zaznamenat okolní teplotu, vlhkost a tlak vzduchu v okolí. Testovací zařízení tedy bude obsahovat teploměr, vlhkoměr a barometr. Umístění vlhkoměru a barometru nejsou kritické, rozdíl ve vlhkosti a tlaku vzduchu v prostoru testovacího pracoviště bude zanedbatelný. Umístění teploměru je důležitější, protože je často velmi obtížné, aby se zabránilo teplotním rozdílům a to i u dobře regulovaného zkušebního prostoru. Pro dosažení nejlepších informací o vlivu teploty, je nejlépe sledovat teplotu okolního prostředí v bezprostřední blízkosti zkoušeného etalonu. Platinový odporový teploměr, který dokáže změřit teplotu vzduchu uvnitř stíněného krytu, který obsahuje zkoušený etalon je optimum. Monitoring prostředí může sledovat všechny driftы teploty, vlhkosti a tlaku vzduchu okolního prostředí a zaznamenávat je na vyhodnocovacím zařízení. Tento monitoring prostředí poskytuje možnost automatického zaznamenávání okolních podmínek. Jádrem monitoru prostředí je datový logger, který je schopen přijímat vstupy z různých snímačů v oblasti prostředí a přenášená výsledná data může zobrazovat. Tato data se vyhodnotí přímo, stejně jako je možné je předat do osobního počítače s instalovaným vhodným programem. Softwarový program pro sběr dat je nutné sladit a ukládat tak průběžná data s daty ze současných zkušebních měření. Je to důležité, aby bylo možné ignorovat účinky rychlých změn teploty, zejména na zkoušený etalon. Například proto, aby byl stabilní, a z toho důvodu vhodnější pro běžné použití, jsou vzduchové odpory, které tvoří převážnou většinu odporů s vysokou hodnotou, navrženy s "tepelnou

setrvačností". V podstatě to znamená, že odpor není schopen se rychle změnit se změnami teploty vzduchu v okolí. I když je to žádoucí měřit teplotu během měření odporu, teplotě vzduchu v okolí musí být umožněno, aby se stačila stabilizovat (typicky až 90 minut). V ideálním případě, protože prostředí testovacího zařízení je homogenní, odpor vzduchu je připraven k použití kdykoliv. Nicméně to nemusí být skutečný stav. V případě, že prostor pro skladování rezistoru je na jiné teplotě, než při měření, pak je problém měření odporu v tom, že k měření dochází v nesprávné teplotě. Vzhledem k tomu, že bude pak vzduch přenášet pomalé změny teploty na odpor, je možné spustit měření až za 30 nebo 45 minut a nesmíme si být vědomi rozdílu teplot. Delší měření ukáže odpor v pohybu a usazování na hodnotu spojenou s teplotou pracoviště.

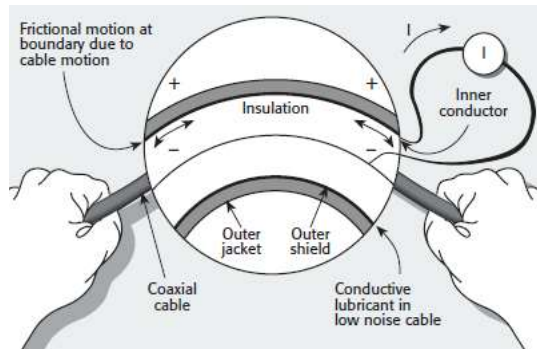
Dvě praktická řešení je třeba si vybrat sami. Buď udržet odpor vzduchu na pracovišti a umožnit odporu stabilizaci, nebo monitorovat teplotu na různých místech v testovacím zařízení a najít místo pro uložení, která úzce sleduje teplotu potřebnou na měření. V případě, že nejistoty způsobené teplotním koeficientem jsou stále ještě příliš velké pro aplikace testu, bude nutné použít nějaké formy zlepšení řízení teploty prostoru. Je důležité mít na paměti, že se mění proudění vzduchu v testovacím zařízení. Umístění etalonu může odklonit vzdušné proudy a způsobit teplé nebo studené místo. V takové poloze vzduchové rezistory se přizpůsobí nové teplotě. Stejný problém může nastat, pokud se zkušební zařízení bude posouvat a neposoudí se účinek výfukových plynů z chladicího ventilátoru přístrojů pracoviště. Například, jednoduchý kovový stíněný kryt, který je ponechán v proudu vzduchu ze vzduchové lázni, se může zahřát o (3-5)°C.

Soubor všech pracovních etalonů odporu požadované pro použití s měřičem vysokého odporu by měl být v laboratoři k dispozici při stejné okolní teplotě. Typický soubor těchto etalonů by měl zahrnovat všechny dekadické hodnoty od 100 MΩ až do 1 PΩ. Dohledatelné hodnoty pro tyto normy by měly být k dispozici v požadovaných hodnotách napětí. Například 100 MΩ odpor ke kalibraci je obvykle měřen digitálním multimetrem, přesnost (DMM), nízké napětí (obvykle méně než 10 V) bude použito u tohoto přístroje. Pokud se tento odpor bude kalibrovat, pak se aplikuje napětí, které je volitelné do 1000 V. Pokud ve specifikaci výrobce pro tento odpor je uveden koeficient napětí <0,5 ppm/V, mohli byste mít rozdíl 500 ppm mezi oběma měřicími systémy. Proto by mělo být použito pro měření požadované napětí, pokud je to možné, aby byl minimalizován vliv na koeficient napětí. Pokud aktuální koeficient napětí není znám, pak bude nezbytné zahrnout možnou hodnotu (maximální), jak je definováno ve specifikacích v rozpočtu nejistoty. Opět platí, že je důležité kalibrovat tento odpor na dvou nebo více napětích, protože je nutné znát skutečný koeficient vlivu napětí nebo aktuální hodnotu na obou místech, aby bylo možné minimalizovat nejistotu.

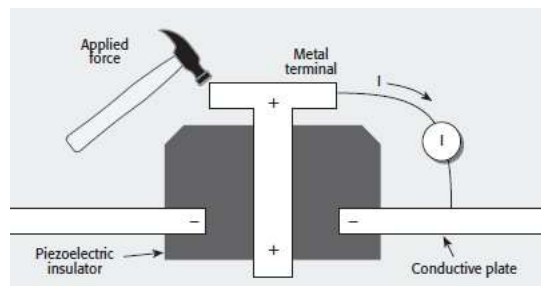
Parazitní jevy

Low Level Measurements Handbook - 7th Edition, Firemní literatura firmy Keithley.

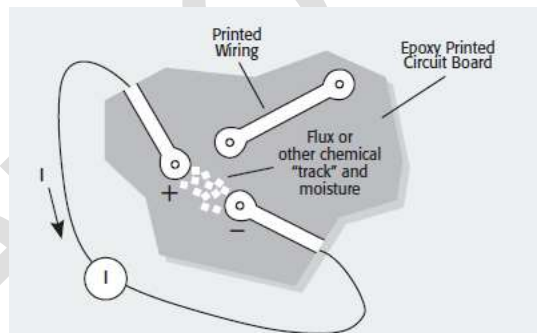
Kniha uvádí následující obrázky pro vysvětlení parazitních jevů.



Obr. č. 19: Triboelektrický jev



Obr. č. 20: Piezoelektrický jev



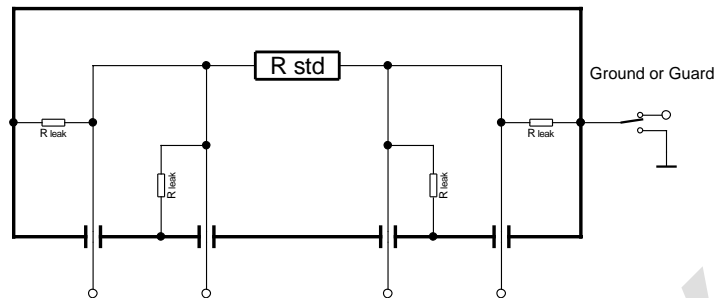
Obr. č. 21: Elektrochemický jev

Další možná zapojení etalonů odporu velkých hodnot

Čtyřsvorkový nestíněný odpor (např. Tinsley 5685A)

Uvažujeme pouze izolační odpory mezi jednotlivými páry svorek (C1, P1 a C2, P2), případně svod izolační desky svorek a kovového pouzdra odporu. Izolační odpor mezi svorkami se však bude při měření jevit jako nedílná součást hodnoty odporu. Pokud se kovové pouzdro spojí se zemí, tak se svod mezi svorkami a pouzdrům projeví přidavnou systematickou chybou. Obdobná situace nastane i pokud pouzdro zůstane nepřipojeno - svodové odpory budou paralelně k vlastnímu odporu a budou se při měření opět jevit jako nedílná součást hodnoty odporu. Pokud se na kovové pouzdro přivede aktivní potenciál shodný s potenciálem měřených svorek, tak lze přidavný vliv svodů eliminovat.

Čtyřsvorkový odpor v kovovém stínícím krytu (např. MIL 9331)

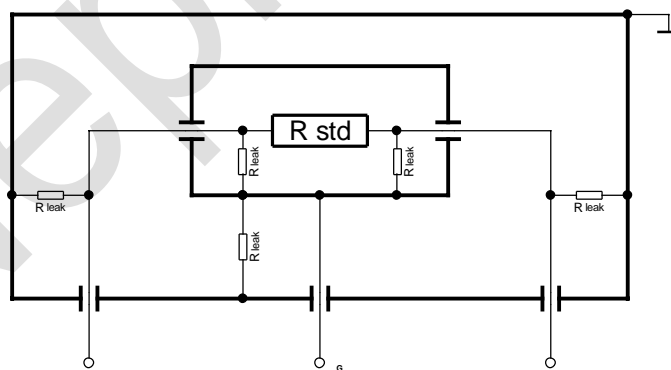


Obr. č. 22: Model svodů na odporu typu MIL 9331

Uplatňuje se vliv svodu párů kontaktů proti kovovému krytu. Při určité konstrukci se může uplatnit i izolační odpor mezi kovovým krytem a vlastním odporem – např. pokud jsou odpory přilepeny k tomuto kovovému krytu. Situace je tedy prakticky shodná s předchozím případem, s tím drobným rozdílem, že se prakticky výlučně uplatňují jen izolační vlastnosti materiálu mezi svorkami a krytem (v případě zmíněné nešťastně zvolené konstrukce i mezi vlastním odporem a krytem). Vše ostatní platí shodně jako v předchozím případě.

Dvousvorkový odpor v kovovém stínícím krytu s přidavným neděleným guardem (např. MIL 9331S)

Zde se uplatňuje izolační odpor svorek vůči přidavnému guardu a též izolační odpor svorek vůči stínicímu krytu – vnější plášť svorek typu BPO je spojen s kovovým stínicímu krytem.

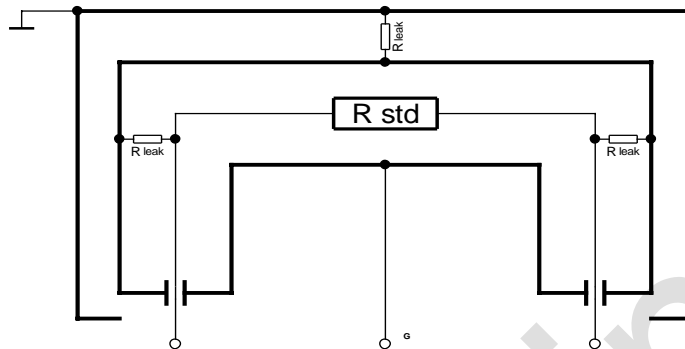


Obr. č. 23: Model svodů na odporu typu MIL 9331S

U této starší konstrukce je možné eliminovat vliv svodu svorek vůči přidavnému guardu připojením tohoto guardu na stejný potenciál, jako je potenciál měřené svorky, nicméně stále zůstává problém se svodem na BPO konektorech, jejichž vnější plášť je spojen s kovovým stínicímu krytem odporu. Jedinou možností, jak tento svod eliminovat při měření mostem s binárním napěťovým děličem, je přivedení stejného potenciálu jako na

přídavném guardu i na vnější stínící kryt odporu, který ale samozřejmě v takovém případě nesmí být uzemněný.

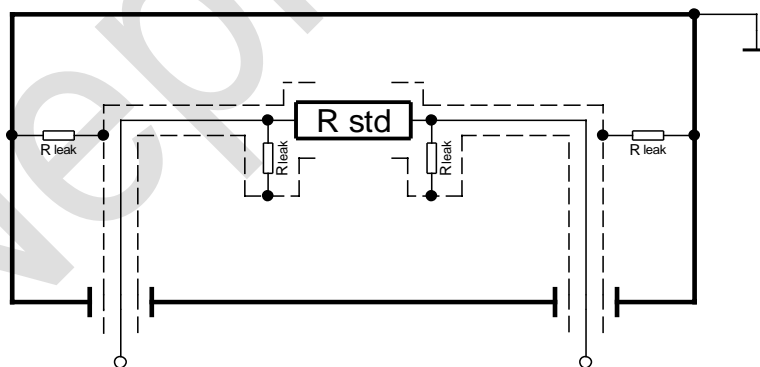
Dvousvorkový odpor v dvojitém kovovém stínícím krytu – vnitřní kryt slouží jako guard a nese svorky odporu (např. P4013).



Obr. č. 24: Model svodů na odporu typu P4013

Zde se uplatňuje izolační odpor svorek vůči vnitřnímu krytu – guardu a dále svod mezi vnitřním a vnějším krytem. Tato konstrukce se pro měření na mostě s binárním napěťovým děličem jeví jako velmi dobrá – svody mezi svorkami a vnitřním krytem lze eliminovat připojením tohoto krytu na stejný potenciál jako je potenciál právě měřené svorky, tedy na napětí V_G zdroje GUARD. Vnější kryt může být uzemněný a slouží jako elektrické stínění.

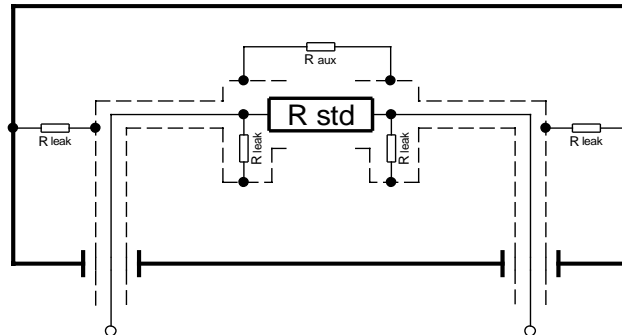
Dvousvorkový odpor v kovovém stínícím krytu s přídavným děleným guardem (např. MIL 9331G)



Obr. č. 25: Model svodů na odporu typu MIL 9331G

V tomto případě, který je konstrukčně proveden dle návrhu NIST, je vnější plášť N konektoru spojený s příslušnou částí vnitřního děleného guardu a je izolován od kovového stínícího krytu odporu. Svodové odpory mezi guardem a stínícím krytem jsou konstrukčně zajištěny na velmi vysoké hodnotě. Každá část vnitřního děleného guardu může být přivedena na jiný potenciál, což zlepšuje potlačení svodů a zjednodušuje připojení při měření. Nicméně izolovaný dělený guard může působit problémy při jiných metodách měření (např. na Teraohmmetru), kdy může být nutné obě části guardu vodivě propojit.

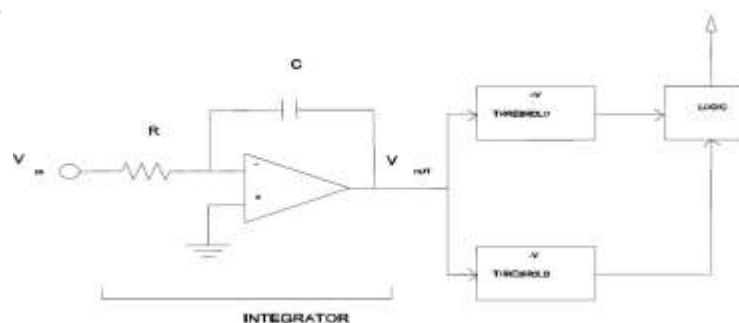
Dvousvorkový odpor v kovovém stínícím krytu s přidavným děleným guardem a pomocným odporem mezi částmi guardu (např. Ω-Labs)



Obr. č. 26: Model svodů na odporu typu Ω-Labs

V tomto případě je vnější plášť BPO konektoru spojený s příslušnou částí vnitřního děleného guardu a je izolován od stínícího krytu odporu. Jednotlivé části guardu jsou propojeny pomocným odporem vysoké hodnoty ($R_{aux} = 100 \text{ M}\Omega$). Uplatňují se izolační odpory mezi svorkami a guardem a na konektorech. Svodové odpory mezi guardem a stínícím krytem jsou konstrukčně zajištěny na velmi vysoké hodnotě. Použití tohoto typu odporu pro měření je shodné s předchozím případem. Přídavný odpor R_{aux} odstraňuje nutnost propojovat části vnitřního guardu při měření jinými metodami a může být využit i jako část pomocného děliče při měření s využitím pasivního externího zdroje guard – toto lze ale použít jen při měření odporů stejných hodnot (tedy poměru 1:1).

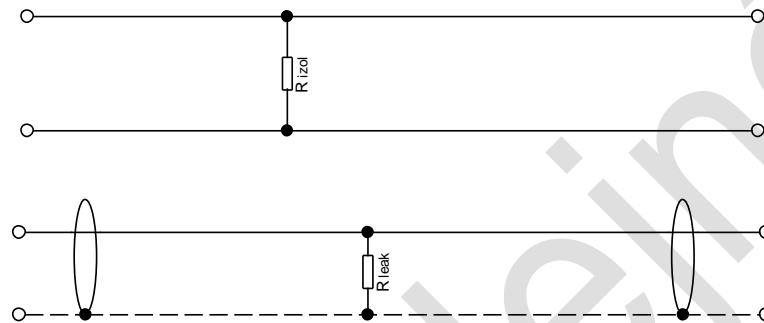
Kromě výše uvedených konstrukcí odporových etalonů se ještě v praxi poměrně často používají etalony zapojené v třísvorkové konfiguraci, tvořené „T“ článkem – dvěma odpory v sérii a třetím mezi jejich společným bodem a zemí (např. model GL9337 nebo starší ruské etalony řady P4085). Přímé měření těchto etalonů, které vlastně jen simulují odpor vysoké hodnoty, je na mostě s binárním napět'ovým děličem nemožné. U některé konstrukce, kde je možné změřit jednotlivé vnitřní odpory „T“ článku samostatně, může být takový etalon změřen po částech a simulovaná hodnota odporu být určena výpočtem (včetně jeho nejistoty). Toto ale není jednoduše možné v případě, kdy ke společnému bodu všech tří odporů není z vnějšku přístup. Nicméně i zde je možné z hodnot naměřených mezi jednotlivými svorkami následně simulovaný odpor a jeho nejistotu vypočítat.



Obr. č. 27: Základní princip teraohmmetru

Vliv svodových a izolačních odporů pro různé konstrukce kabelů a odporů

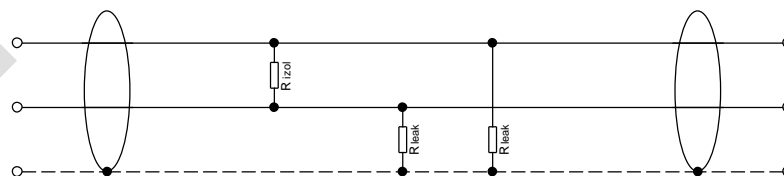
Zcela triviálním případem je propojení pouze jedním nestíněným vodičem. Zde se uplatňují pouze izolační vlastnosti okolního prostředí, tj. obvykle vzduchu. Tento způsob může být velmi dobrý, ale jen potud, pokud to konfigurace přístrojů v laboratoři umožní. Jakmile se vodič bude čehokoli dotýkat (ať již jiných vodičů, nebo kovových či izolovaných částí etalonových odporů nebo dalšího zařízení), tak se začne uplatňovat odpor izolace vodiče i předmětu, kterého se dotýká – jde o těžko definovatelné vlivy, obvykle s proměnnými vlastnostmi.



Obr. č. 28: Nestíněný dvouvodičový a stíněný jednovodičový kabel

Zde se uplatní izolační odpor mezi jednotlivými vodiči nebo svodový odpor mezi vnitřním vodičem a stíněním, daný materiálem izolace. Výhodou použití stíněného vodiče je jednak potlačení vnějších rušivých polí (např. vysokofrekvenčních signálů z vysílačů, mobilních telefonů apod.), ale zejména možnost aktivního potlačení svodů z vnitřního vodiče nastavením potenciálu stínění na stejnou hodnotu jako je potenciál vnitřního vodiče. Díky tomu příliš nezáleží na vlastnostech izolace vnitřního vodiče a stínění, takže lze použít běžné koaxiální kabely. Ze stejného důvodu nezáleží příliš ani na provedení použitých konektorů, neboť vlastnosti jejich izolačních materiálů se eliminují stejně jako u kabelu. Koaxiální kabel tedy může být optimální pro připojování jednotlivých svorek odporových etalonů ve dvouvodičovém provedení.

Stíněný dvouvodičový kabel



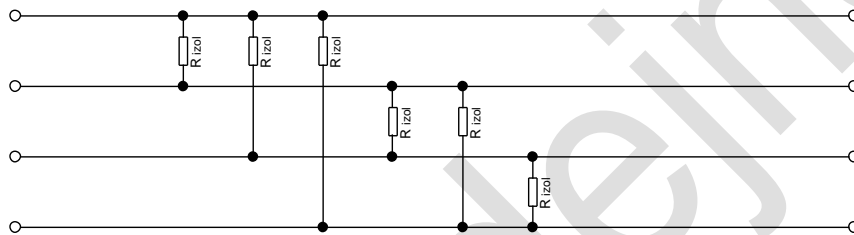
Obr. č. 29: Stíněný dvouvodičový kabel

Zde se uplatní izolační odpor mezi jednotlivými vodiči a též svodový odpor mezi jednotlivými vodiči a stíněním, daný materiálem izolace a konstrukčním provedením kabelu.

Pokud by se vnitřní vodiče použily k připojení dvou vodičového odporového etalonu, tak by se vlastně k němu paralelně připojila výsledná kombinace izolačního a svodových odporů. Připojením stínění na potenciál odpovídající potenciálu jednoho z vodičů se sice problém sníží, ale neodstraní, výsledek měření by v každém případě byl zatížen systematickou chybou.

Tento typ kabelu ale lze použít pro připojení jednoho páru proudové a napěťové svorky (např. C1 a P1) u odporu ve čtyřsvorkovém provedení. V takovém případě na hodnotě izolace mezi vodiči nezáleží, neboť tyto jsou uvnitř odporového etalonu prakticky zkratovány. Případný svod lze eliminovat stejně jako u jednovodičového stíněného kabelu.

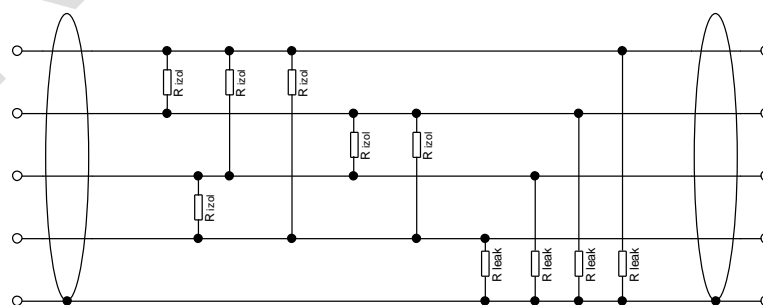
Nestíněný čtyřvodičový kabel



Obr. č. 30: Nestíněný čtyřvodičový kabel

Zde se uplatní izolační odpor mezi jednotlivými vodiči navzájem, daný materiálem izolace a konstrukčním provedením kabelu. Pokud by se takový kabel použil k připojení vysokoohmového etalonu ve čtyřsvorkovém provedení, tak by se vlastně k němu paralelně připojila výsledná kombinace izolačních odporů kabelu a výsledek měření by byl zatížen systematickou chybou. Tento typ kabelu je pro většinu případů vysokoohmových měření nevhodný (což je v protikladu k jeho velmi dobrým vlastnostem při nízkoohmových měřeních).

Stíněný čtyřvodičový kabel



Obr. č. 31: Stíněný čtyřvodičový kabel

Zde se uplatní izolační odpor mezi jednotlivými vodiči navzájem a též svodový odpor mezi

jednotlivými vodiči a stíněním, daný materiálem izolace a konstrukčním provedením kabelu. Ze stejných důvodů jako v předchozím případě je i tento typ kabelu pro vysokoohmová měření nevhodný.

Snad jedinou výjimkou by byl případ, kdy by se dva stíněné čtyřvodičové kabely použily pro připojení vždy jedné poloviny svorek dvou čtyřsvorkových odporů – jeden by byl použit pro svorky C1(R1), P1(R1), C1(R2) a P1(R2) a druhý kabel pro svorky C2(R1), P2(R1), C2(R2) a P2(R2). Svody kabelu by bylo možné eliminovat stejně jako v případě jednovodičového stíněného kabelu. (Bližší podrobnosti tohoto speciálního zapojení je možné promyslet s využitím schématu na obrázku). Nicméně takovéto zapojení klade velké nároky na opatrnost při připojování jednotlivých svorek a představuje jisté další komplikace dané poměrně malou délkou nestíněných konců kabelů vzhledem k vzdálenostem svorek obou měřených odporů.

Elektrostatický výboj (ESD)

Elektrostatický výboj (Electrostatic discharge, ESD) vznikne, pokud dojde k postupnému vytvoření elektrostatického napětí mezi předmětem a jeho okolím a poté k spontánnímu výboji v podobě impulzu elektrického proudu. Ve velmi krátkém čase dojde k přeskočení elektrického výboje a ke vzniku velkého napětí a proudu na měřené součástce. Pokud je místem takového výboje integrovaný obvod, může dojít k jeho poškození nebo zničení. ***Pokud výboj vznikne na pracovišti při měření, výboj generuje rušení.***

Podle původu můžeme zdroje ESD dělit na dvě skupiny:

- přírodní zdroje,
- zdroje uměle vytvořené lidskou činností.

Podle možností průchodu elektrostatického výboje pak na:

- elektrostatický výboj mezi nabitým předmětem (např. lidským tělem) a uzemněným obvodem. K tomu dochází např. v případech, kdy člověk manipuluje s elektrickým zařízením, nebo integrovaným obvodem
- elektrostatický výboj mezi nabitým obvodem a uzemněným zařízením. K tomu dochází např. v případech strojové manipulace s integrovanými obvody, při dotyku testovacím nástrojem apod.

Je možná zvláštní, že při každém dotyku kovového předmětu nevidíme jiskry nebo necítíme elektrický výboj. Je to proto, že úroveň elektrického náboje záleží na daných materiálech a na prostředí. V následující tabulce jsou uvedeny příklady. V praxi je elektrostatický výboj většinou spojen s lidskou interakcí. Pokud je jakýkoliv systém předmětem lidského působení, lze očekávat vytvoření elektrostatického výboje. Následkem elektrostatického výboje může dojít k rušení a i funkčnímu nebo parametrickému poškození citlivých částí měřicího obvodu. Následkem může být i latentní poškození, které nelze zjistit pomocí testovacích přístrojů, ale které se projeví až při následném použití v praxi (po čase).

Elektrostatické napětí jako funkce relativní vlhkosti (RV)	20% RV [kV]	80% RV [kV]
Chůze po vinylové podlaze	12	0,25
Chůze po syntetickém koberci	35	1,5
Zdvihnutí plastové tašky	20	0,6
Posun polystyrénové krabice po koberci	18	1,5
Odstranění krycí pásky z PC desky	12	1,5
Smršťovací fólie na PC desce	16	3,0
Zaměření odsavače cínu	8	1,0
Použití mrazicího spreje	15	5,0

Tabulka: Elektrostatické napětí jako funkce relativní vlhkosti

Zánik elektrostatických nábojů

Statická elektřina se projevuje jako volný náboj rozložený po tělesech, nebo jako náboj vázaný k povrchu polarizovaných izolantů. Náboje stejného znaménka se odpuzují a náboje nestejných znamének se přitahují. To tedy znamená, že kolem každého elementárního náboje se vytváří elektrostatické pole. Náboj je tedy jak příčinou pole, tak následkem. Z hlediska fyzikální podstaty jsou podmínky vzniku elektrostatického náboje velmi rozmanité a mechanismus vzniku a účinků je velmi složitý. V porovnání s jinými fyzikálními disciplínami lze říci, že právě pro svoji složitost a nesnadnost zjišťování nejsou tyto jevy dosud dostatečně prozkoumány.

Základním principem vzniku elektrostatického náboje je vznik elektrické elektrizovatelné dvojvrstvy. Tato dvojvrstva může vznikat při všech skupenstvích. Jedná se tedy o přírodní jev a musí být tedy pro vznik náboje splněny tyto podmínky:

- musí dojít k rozdělení elektrické dvojvrstvy,
- specifický odpor elektrizovatelné látky musí být (10^8 až 10^9) Ω,
- dalším fyzikálním jevem je i kumulace náboje při opakovaném tření, kde se nám materiály mohou nabít na vysoká napětí řádu až deseti tisíc voltů.

Elektrostatické náboje mohou být snadno eliminovány z vodivých materiálů uzemněním.

Toto uzemnění však nesmí být přímé, ale přes soustavu vybíjecích rezistorů, aby při vybíjení nedocházelo k jiskrovým výbojům nebo i ohrožení bezpečnosti. Energie těchto výbojů by mohla způsobit poškození elektrostaticky citlivých součástek. Vybíjecí rezistory tedy zajišťují pozvolné vybíjení vzniklých nebezpečných nábojů. Hodnoty rezistorů jsou dány normami tak, aby časové konstanty přechodových dějů byly optimální. Rezistory se zařazují nejen mezi elektrickou „zem“ a vybíjecí místo, ale i mezi jednotlivá vybíjecí místa pracoviště vzájemně. V nedávné minulosti některé normy předepisovaly odvádět náboje samostatným zemním vodičem. To přinášelo velké komplikace zejména tam, kde se antistaticky ošetřovala stávající pracoviště. Dnes je běžné použití zemního vodiče síťového rozvodu.

Omezení možnosti vzniku elektrostatického náboje úpravami pracoviště

Elektrostatické náboje lze odstraňovat uzemňováním vodivých součástí zařízení, zvyšováním vnitřní vodivosti zařízení, zvyšováním relativní vlhkosti vzduchu, antistatickými úpravami, ionizací vzduchu apod. V zásadě však tyto náboje nemohou primárně ohrozit bezpečnost obsluhy působením průchodu vybíjecího proudu, mohou ale poškodit citlivá zařízení pro měření malých proudů a velkých odporů a mohou ovlivnit nejistotu měření.

Nejlepším způsobem je předejít vzniku statické elektřiny. Vhodná je řízená vlhkost v laboratoři (kolem 50 %). Je potřebné, aby laboratoř měla na všech dílech pracoviště stejný potenciál jako její okolí. Tedy je třeba všechno, co je možné, uzemnit. Nejlépe je opatřit laboratoř speciální antistatickou podlahovou krytinou. Tyto krytiny se montují na síť z měděných pásků, která odvede možný náboj. Měřicí pracovní plocha, by měla mít povrch ze stejného antistatického materiálu a společný zemnicí bod. Oblečení, které by mohlo způsobit vznik elektrostatického náboje, musí být překryto antistatickým pracovním oděvem. Nedoporučuje se oblékat pod něj prádlo a oděvy z hedvábí, polyesteru nebo vlny. Tyto látky tvoří elektrostatický náboj. Je vhodné používat ochranu obuv proti elektrostatickému výboji ve spojení s polovodivou nebo antistatickou podlahou.

Elektrostaticky chráněné pracoviště (electrostatic protected area, EPA)

Prostor EPA musí být zřízen všude, kde se manipuluje s výrobky citlivými na ESD. Vstup do EPA prostorů musí být omezen pouze pro personál, který má ukončené příslušné ESD školení. Neškolení jednotlivci musí být v prostoru EPA doprovázeni školeným personálem. Ochrana před nebezpečnými elektrostatickými jevy je normativně zpracována zejména v normách řady IEC 61340 (pro evropské státy je to řada EN 61340), pod společným názvem: Elektrostatika.

Zřízením a správným použitím chráněné oblasti EPA nebo ESD, bude úroveň poruch během výroby a později v životě součástky minimalizována. Účelem je zajistit prostředí, kde práce s použitím elektronických součástek citlivých na ESD, podsestav, jako jsou desky s plošnými spoji a sestav ale i oprav se provádí v bezpečí před ESD.

Existuje mnoho různých opatření, která mohou být použita k zajištění bezpečného prostředí pro ESD, ale je třeba pečlivě analyzovat, jaká opatření jsou nutná. Základem je ESD pracovní stůl a přídatná zařízení. Používá se ESD pracovní stůl s ESD páskami, ESD sedadla, atd., s cílem zajistit, aby pracovní stůl, sedadlo i pracovník byl uzemněn (přes vysokou resistanci z bezpečnostních důvodů spíše disipativní). U mnoha typů oblečení z umělých vláken, se může generovat vysoká úroveň statické elektřiny. Kravaty, které nosí muži, jsou toho velmi dobrým příkladem. Často jsou vyrobeny z umělých vláken a generují velmi vysoké úrovně statické elektřiny.

Obuv s ESD pásky: Mnoho lidí bude chtít používat své vlastní boty a tudíž alternativou je použít popruh na boty, který poskytuje svodovou cestu k zemi. Jinou alternativou je použití ESD návleků na boty, které poskytují svodovou cestu k zemi.

Je obvykle možné ihned použít podsestavu v rámci konečné montáže, ale ne vždy. V důsledku toho je třeba skladovat mnoho součástí a podsestav. Aby se zabránilo poškození, je nezbytné, aby byla přijata během skladování preventivní opatření ESD. Použití skladovacích zásobníků ESD a jiných nádob, je stejně důležité jako použití ESD tašek.

Vyloučení materiálu generujícího statickou elektřinu je nutné a znamená to vyloučení mnoha materiálů, které se používají v každodenním životě, protože by mohly generovat velké množství statické elektřiny. Tyto materiály by měly být za každou cenu z EPA prostoru vyloučeny. Materiály, jako je pěnový polystyren vytváří velmi velké množství statické elektřiny a nesmí být nikdy dovoleny do EPA oblasti. Také některé formy bublinkové fólie nejsou dobré, i když byly vyvinuty některé typy pro použití jako ESD obalu.

Plastové kelímky jsou také velmi špatné, pokud jde o zachování statické elektřiny (nápoje by tak jako tak, nemělo být dovoleno konzumovat v pracovní oblasti) a mnoho dalších plastových položek není vhodné užívat, protože plast je velmi dobrý izolátor. Někteří lidé dokonce používají speciální ESD papír namísto běžného papíru pro tisk a poznámky, i když opatření, jako jsou tato, nejsou vždy prováděna. Proto všechny pro práci nedůležité izolanty (plasty a papíry), jako jsou hrnky na kávu, obaly obuvi a osobní předměty, musí být odstraněny z pracovního EPA prostoru nebo i ostatních míst, kde se manipuluje s nechráněnými součástkami (například opravy).

Ochrana před nebezpečnými elektrostatickými jevy je normativně zpracována v mezinárodních normách řady IEC 61340 a vychází z norem ANSI/ESD S20.20, pro evropské země je to řada EN 61340.

Pro Českou republiku to pak jsou normy ČSN EN 61340 pod společným názvem Elektrostatika

Aplikovat výše uvedené zásady ESD na kalibračním pracovišti pro měření velkých hodnot odporu pomůže významně omezit rušivé vlivy na měření.