



Česká metrologická společnost z.s.

Novotného lávka 5, 116 68 Praha 1

tel/fax: 221 082 254

e-mail: cms-zk@csvts.cz

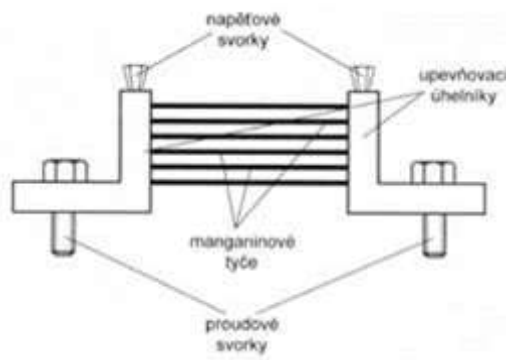
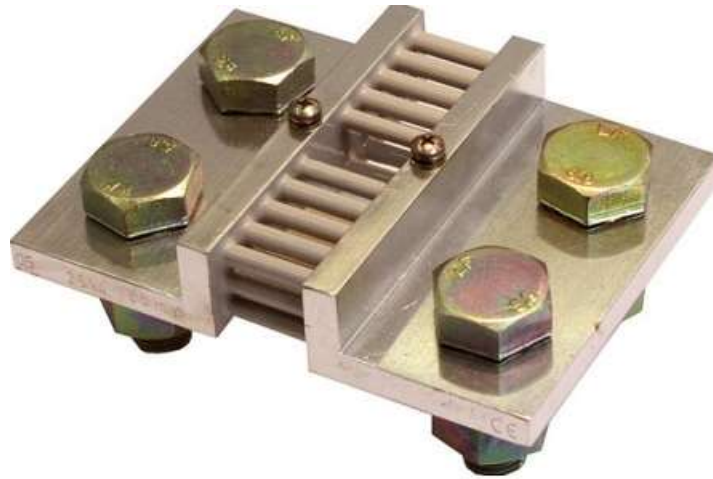
www.csvts.cz/cms

Kalibrační postup

KP 4.1.2/20/17

ETALONY MALÝCH HODNOT ODPORŮ POD $0,1\Omega$
(bočníky pro střídavý a stejnosměrný proud)

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 a odporových bočniců v rozsahu do 0,1 Ω při stejnosměrném napájení a na frekvenci 50 Hz (Z) pro čtyřsvorkové připojení. Bočnice, konstruované podle zásad v příloze se mohou kalibrovat v širším rozsahu frekvence (podle hodnoty a podle provedení).

Postup se netýká etalonů vodivosti z nemagnetických kovových materiálů, které jsou vyžadovány pro kalibraci měřičů vodivosti s vířivými proudy.

2 Související normy a metrologické předpisy

	<i>PROCEDIMIENTO EL - 006 PARA LA CALIBRACIÓN DE SHUNTS DE CORRIENTE CONTINUA</i> metodika m 10 CEM ŠPANĚLSKO	[L1]
<i>VDI VDE DGD DKD 2622 blatt 8</i>	<i>Kalibrieren von Messmitteln für elektrische Größen - Gleichstrom-Widerstände</i>	[L2]
<i>A Guide to Low Resistance Measurement</i>	Firemní literatura firmy Cropico	[L3]
<i>Low Level Measurements Handbook - 7th Edition</i>	Firemní literatura firmy Keithley	[L4]
ČSN EN ISO/IEC 17025	Posuzování shody - Všeobecné požadavky na způsobilost zkušebních a kalibračních laboratoří	[L5]

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 i revize ISO/IEC DIS 17025:2016, bod 6.

Doporučuje se potvrzení odborné způsobilosti těchto pracovníků prokázat vhodným způsobem, například osvědčením o odborné způsobilosti, osobním certifikátem apod. Minimální potřebný obsah a rozsah znalostí je shrnut v přílohách tohoto postupu.

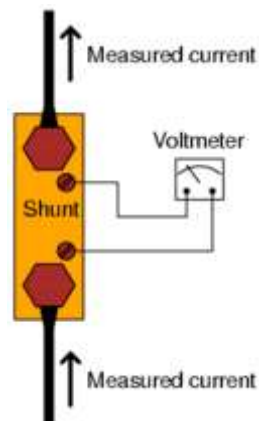
4 Názvosloví, definice

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

Názvosloví pro připojení měřeného prvku

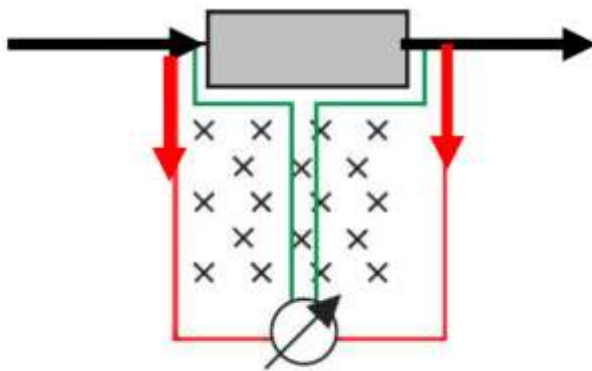
Čtyřsvorkové připojení - na prvek jsou připojeny měřicí proudové a napěťové přívody. Smyslem čtyřsvorkového připojení je odstranit vliv přechodového odporu a odporu připojovacích kabelů. Je vhodné pro měření malých a středních hodnot odporu. Nejčastěji se

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



Obr. č. 1: Napětové vývody jsou v konstrukci etalonu vždy umístěny uvnitř.

Vazba mezi přívody



Obr. č. 2: Plocha smyčky

Plocha smyčky tvořené napětovými přívody musí být co nejmenší. Obvykle se proto napětové přívody zkroucují. Obvykle se proto napětové přívody, pokud je to možné, vedou také kolmo na přívody proudové.

Ztrátový výkon v etalonech při jejich metrologických zkouškách se volí podle konstrukce etalonů a výrobcem předepsaného zatížení s ohledem na očekávanou přesnost.

S ohledem na referenční etalony a jejich zatížení obvyklé při měření volí maximálně:

0,05 W - pro etalony s nominálními hodnotami odporu od $10^{-1} \Omega$,

0,1 W - pro etalony s nominálními hodnotami odporu od $10^{-3} \Omega$ do $10^{-2} \Omega$,

1 W - pro etalony s nominální hodnotou odporu $10^{-4} \Omega$,

10 W - pro etalony s nominální hodnotou odporu $10^{-5} \Omega$.

Vliv teploty a příkonu na hodnotu odporu

Proud, procházející odparem etalonu vytváří vlastní oteplení etalonu, které mění hodnotu odporu.

Teplotní koeficient odporu se nebude výrazně měnit v průběhu času, proto se teplotní koeficient nemusí měřit opakovaně. Pro etalony z manganinu je teplotní závislost

parabolická s vrcholem paraboly mezi 20°C až 70°C, podle technologie výroby etalonu. Alfa (α) koeficient je změna odporu s teplotou při 23 °C, beta (β) je koeficient zakřivení této změny.

Pro teploty blízké teplotě (18 - 30 °C), může být odpor etalonu přesně vyjádřen jako:

$$R_t = R_{23} [1 + \alpha (t - 23) + \beta (t - 23)^2]$$

Kde:

R_t = odpor při teplotě 't',

R_{23} = Odpor při 23 °C,

t = teplota rezistoru.

Každý etalon odporu je dodáván s tabulkou odporu v závislosti na teplotě na základě referenční hodnoty při 23,0 °C.

Jako vizuální pomůcka, jsou také často tato data prezentována v grafu.

Teplotní závislost materiálů odporu

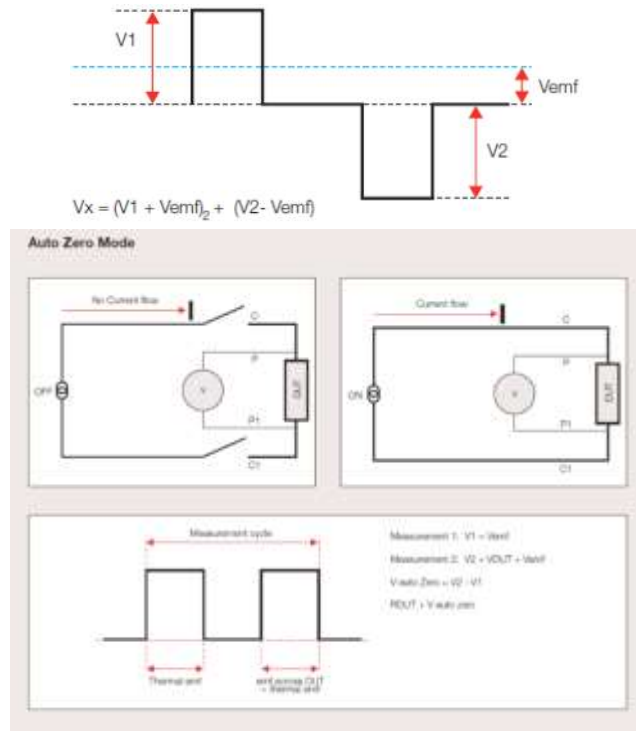
Materiál	Teplotní koeficient odporu (°C)
Nikl	0,0059
Železo	0,0060
Molybden	0,0044
Wolfram	0,0044
Hliník	0,0041
Měď	0,0040
Stříbro	0,0038
Platina	0,0038
Zlato	0,0037
Zinek	0,0038
Manganin	±0,000015
Konstantan	-0,000074

Teplotní závislost - termonapětí

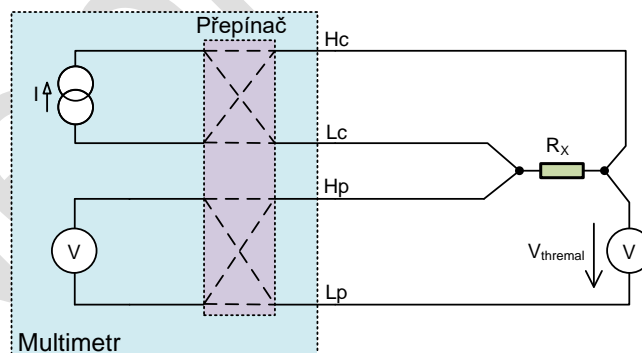
Spoj z materiálů	Seebeckův koeficient, Q_{AB}
Cu - Cu	$\leq 0.2 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Cu - Ag	$0,3 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Cu - Au	$0,3 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Cu - Pb/Sn	$1-3 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Cu - Si	$400 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Cu - Kovar	$\sim 40-75 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Cu - CuO	$\sim 1000 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$

Termoelektrické napětí (termoelektrické EMP) je nejčastějším zdrojem chyb při měření nízkého napětí na odporu.

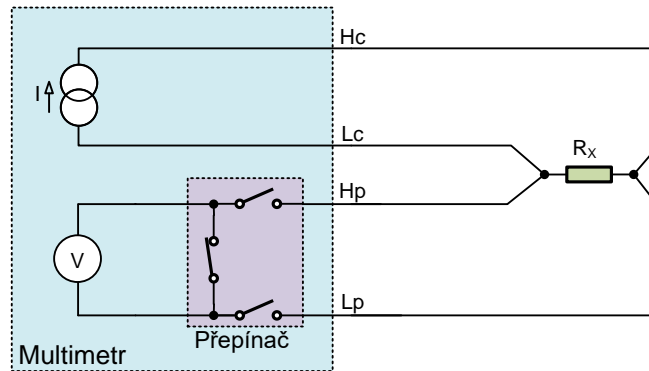
Kompence termonapětí s přepínáním polaroty napájení



Obr. č. 3: Potlačení vlivu termonapětí automatickým nulováním



Obr. č. 4: Příklad řešení funkce true ohm (u firmy Fluke)



Obr. č. 5: Příklad zapojení funkce Autozero



Obr. č. 6: Ukázka provedení externího nuceného chlazení (podle AKL ESZ, Německo)

5 Měřidla a pomocná měřicí zařízení pro kalibraci

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

Mikroohmmetr, Multimetr nebo DC číslicový milivoltmetr s rozlišením nejméně 6,5 digit při měření odporu s kalibrační nejistotou, ne více než třetina tolerance odporu, který má být kalibrován. Tento přístroj musí být schopen měřit odpor v kmitočtovém rozsahu kalibrace. Je žádoucí, aby mohl měřit odpor s nejistotou měření zhruba 0,02% s rozsahem ne větším než je 0,199 999 V.

Zdroj proudu do 100A, nastavitelný a dostatečně stabilní, například kalibrátor (Meatest).

Etalony R, pokud bude měření provedeno porovnáním, pak musí být tyto etalony k dispozici ve stejných jmenovitých hodnotách jako kalibrované etalony.

2 kusy výkonové připojovací kabely s kvalitními konektory, délka 1m, pro připojení proudových svorek, dimenzované pro proud, použitý při měření.

Pokud mají etalony proudové svorky se šrouby, použije se na matice a šroub stejný materiál, například křemíkový bronz. Točivý moment utažení připojení bývá cca (15 - 20)nm.

2 kusy napěťové přípojovací vodiče pro připojení napěťových svorek, délka podle potřeby, toto připojení může být provedeno i s měděným drátem, nebo postříbřeným, nebo z pozlacené mědi. Pokud jsou použity banánky, měly by mít pozlacené provedení.

K propojení je třeba používat propojovací vodiče s malou hodnotou EMF. Zpravidla se použije nejméně na povrchové vrstvě telluriová měď, stříbro nebo zlato.

Cínované, niklované nebo chromované vodiče nelze v žádném případě použít.

Teploměr pro monitorování prostředí v laboratoři.

Teploměr se sondou pro monitorování teploty na měřeném etalonu. Bývá vhodný 10 KΩ termistor nebo miniaturní RTD 100 Ω.

Čistící prostředky na kontakty.

Poznámka:

Pokud dochází k podstatnému ohřevu etalonů při měření, je doporučeno zvážit chlazení nucenou cirkulací vzduchu. (Podobně jako v počítačích. Aplikace této metody vyžaduje použití vhodného ventilátoru a zhotovení tunelu pro vedení vzduchu podle potřeby.)

6 Obecné podmínky kalibrace

- Teplota $t = (23 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$,
- pokud se teplota prostředí časem mění, rychlost změny nemá být větší než 0,2 °C/h,
- kalibrovaný etalon se zpravidla umísťuje na vzduchu,
- podmínky jsou monitorovány a zaznamenávány kalibrovanými měřidly,
- doporučuje se monitorovat teplotu etalonu teploměrem přímo na etalonu,
- měřený etalon se nesmí výkonově přetěžovat velikostí měřeného signálu,
- vlhkost může ovlivnit parametry etalonu poměrně málo, relativní vlhkost prostředí má být menší než 75%.

7 Rozsah kalibrace

Upozornění:

Etalony nesmí být v žádném případě přetěžovány. Měřením s konstantním proudem vyšším než trojnásobkem referenční hodnoty, může dojít k přehřátí a k trvalé změně odporu etalonů.

7.1 Princip kalibrace

Obecně

Ke stanovení hodnoty neznámého odporu se v laboratoři používá:

A - Přímé měření

B - Substituční metoda,

kdy referenční etalon (R_E) se známou hodnotou odporu je změřen DMM a stejné měření je

provedeno i s kalibrovaným etalonem (R_X).

C - voltampérová metoda výpočtu kalibrovaného etalonu

z hodnoty nastaveného proudu z externího zdroje (kalibrátoru) a změřeného napětí.

Kalibrace se provádí vždy pro **čtyřsvorkové připojení**.

Kalibrace na 50 Hz se přednostně dělá pro impedanci Z, pokud by se stanovovaly složky impedance, pak se volí pro sériové náhradní zapojení, pro nastavení R_s a L_s (není předmětem tohoto postupu).

8 Kontrola dodávky a příprava ke kalibraci

8.1 Přezkoumání smlouvy, kontrola dodávky a příprava ke kalibraci

Zakázka na kalibraci se při přebírání přezkoumává podle ČSN EN ISO/IEC 17025:2005, odst. 4.4. nebo po revizi normy v 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.

Podle ISO/IEC DIS 17025:2016(E) kapitola 7 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 č. 1: 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 č. 2: Pro posouzení rutinních a jiných jednoduchých úkolů, data a identifikace (např. iniciály) osoby odpovědné v laboratoři za provedení sjednané práce, jsou považovány za dostatečné. V případě opakovaných rutinních úkolů, přezkum nemusí být proveden pouze v počáteční fázi šetření nebo při 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.

Mezi neopominutelné požadavky patří dohoda se zákazníkem na proudtech pro měření a na způsobu chlazení při měření.

8.2 Kontrola dodávky

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

Postup kontroly zahrnuje:

- zkontroluje se, 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, tak aby nezhoršoval možnosti chlazení,
- návod k obsluze ke kalibrovanému etalonu tak, aby osoba provádějící kalibraci se mohla seznámit s jeho vlastnostmi a mohla být prozkoumána možnost splnění požadavků při kalibraci,
- etalony odporu, na které se používá tento kalibrační postup, se nejustují,
- stav a pevnost připojovacích svorek musí být kontrolovány, v případě potřeby se provádí jejich čištění. Zkontroluje se, že kontaktní plochy svorek nejsou zkorodovány,
- etalon, který nevyhověl při vnější prohlídce a konstrukčnímu provedení dle výrobce, se vyřadí z dalších zkoušek.

8.3 Příprava kalibrace

- Referenční i kalibrované etalony, musí zůstat v kalibrační místnosti nejméně čtyři hodiny před začátkem kalibrace,
- napájení přístrojů při kalibraci se před spuštěním měření provede pro tepelnou stabilizaci. Doba tepelné časové stabilizace závisí na typu přístroje. Obvykle vyhoví nejméně 0,5 h. U zdrojů proudu se tepelná stabilizace zvažuje individuálně,
- kalibrace se provádí v prostředí, kde se udržuje normální okolní teplotu mezi 22°C a 24°C, včetně vlivu nejistoty měření teploty etalonu pro udržení jejich optimální

- specifikace,
- pokud není známa teplotní závislost kalibrovaného etalonu podle měření, použije se koeficient podle specifikace,
 - pokud je specifikace známa, použije se známá hodnota při výpočtu nejistoty. Je možné provádět kalibraci také v jiných než výše uvedených teplotách, ale v tomto případě to bude třeba vzít v úvahu při přidělování kalibračních nejistot. Pro etalony odporu z manganinu je obvyklé udávat závislost na teplotě včetně kvadratického členu,
 - relativní vlhkost nesmí přesáhnout 70%, i když v některých výjimečných případech se může povolit hodnoty až 80%, pokud zákazník souhlasí (viz specifikace kalibrovaného etalonu i měřidel),
 - zkontroluje se, zda zdroj proudu i multimetr jsou připojeny ke stejné síťové zásuvce (stejně fázi), která obsahuje ochranný vodič nebo země, jako základní míru ochrany,
 - síťové kabely musí být nepoškozené a musí procházet pravidelnými revizemi.

9 Postup kalibrace

Kalibraci lze provést třemi více zmíněnými postupy.

9.1 A - Kalibrace etalonu odporu - přímé měření

Etalony

Mikroohmmetr nebo digitální multimetr.

Princip metody:

Podle dokumentace výrobce při zachování pokynů podle tohoto postupu.

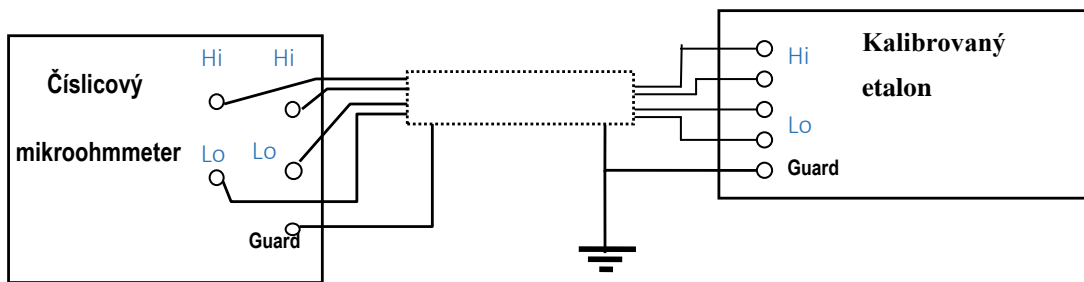
Obecné zásady:

Přímé měření na výstupních svorkách etalonu. Měření hodnoty odporu kalibrovaného etalonu na vhodném měřiči je vhodné především pro málo přesné etalony a dekády R .

Kalibrovaný etalon se připojí k měřicímu zařízení přímo pomocí kabelů s vhodnými konektory. Pokud má kalibrovaný etalon jiný typ konektoru, případně i jiný typ připojení, než je provedení měřiče, je nutno provést převod mezi těmito typy pomocí vhodné redukce. Proudové obvody musí být dostatečně dimenzované.

Mikroohmmetr se zapíná v souladu s návodem výrobce nejméně 30 min až 2 hodiny před vlastním měřením a nechá se tepelně ustálit. Před vlastním měřením je nutno provést korekce na zbytkové parametry měřiče a kabelů kontrolou zbytkových termonapětí bez signálu v případě že to přístroj umožňuje.

Metoda se používá, pokud má laboratoř vhodný mikrovoltmetr s rozsahy a přístrojovou nejistotou postačující požadavkům pro kalibraci. Etalonový mikrovoltmetr by měl obsahovat obvody pro potlačení termonapětí, jak je psáno v kapitole o názvosloví.



Obr. č. 7: Kalibrace etalonu odporu - přímé měření

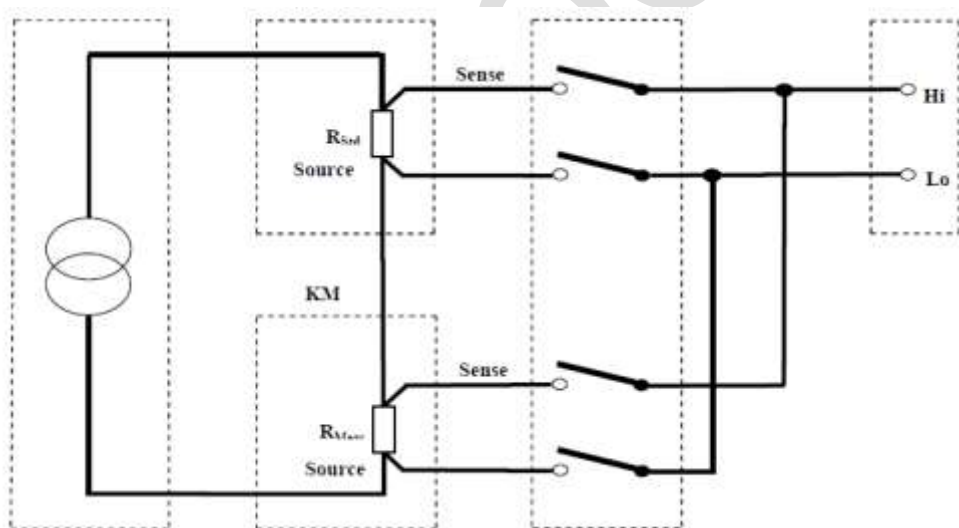
9.2 B - Substituční metoda

Etalony

- Referenční etalon (R_E) stejné jmenovité hodnoty jako měřený R se známou hodnotou odporu,
- kalibrátor jako zdroj proudu,
- přepínač měřicích míst (může nahradit přepínač vstupů DMM),
- digitální multimetr nebo mikrovoltmetr.

Princip metody

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



Obr. č. 8: Schéma zapojení

Dnešní 7,5 a 8,5místné digitální multimetry jsou schopny s dostatečnou přesností měřit i malé hodnoty odporu, pokud se neměří extrémně nízké hodnoty odporů, s velkou rozlišovací schopností a výbornou linearitou.

Příprava

- Digitální multimetr nastavit do funkce poměrového měření nebo V – módu,
- na jeho vstupy připojit kalibrovaný a referenční etalon

- odečíst naměřenou hodnotu a zapsat ji do tabulky,
- měření opakovat pro všechny požadované proudy,
- zpracování naměřených dat.

Při každém měření vyplnit v záhlaví tabulky následující položky: typ měřidla, výrobní číslo, datum kalibrace, kalibrace zařízení (jméno kalibračního technika), teplotu prostředí teplotu etalonů, použité etalony a provedení přívodů.

Postup

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

Při kalibraci postupujeme podle uživatelské příručky kalibrovaného etalonu R a etalonového voltmetru a rezistoru. Zároveň pracujeme s údaji, které máme k dispozici v kalibračních certifikátech etalonového voltmetru a etalonového rezistoru. Na displeji kalibrátoru nastavíme příslušnými ovládacími prvky požadovanou hodnotu proudu I_E . Jeho etalonovou hodnotu proudu získáme ze specifikace nebo výpočtem ze vztahu,

$$R_X = R_E \cdot U_E / U_X$$

U_E a U_X jsou hodnoty napětí měřené voltmetrem na etalonovém rezistoru R_E a měřeném R_X . Nastavenou hodnotu zapíšeme do "Záznamu o měření" jako hodnotu kalibrované míry (R_E), hodnotu odečtenou z etalonového voltmetru jako naměřenou hodnotu napětí na etalonového rezistoru U_E . Zapíšeme minimálně 10 opakovaných měření téže hodnoty nastavené na kalibrované míře a vypočteme aritmetický průměr, který představuje průměrnou naměřenou etalonové hodnotu, uvedenou v certifikátu o kalibraci. Při výpočtu kombinované standardní resp. rozšířené nejistoty měření hodnoty proudu kalibrovaného etalonu postupujeme podle tohoto pracovního postupu. Při návrhu konkrétního zapojení je třeba omezit vliv nejvýznamnějších zdrojů systematických chyb a vhodným výběrem spojovacích vodičů, jejich rozměrů apod. omezit na minimum. Nejčastěji se vyskytující zdroje systematických chyb při kalibraci mír stejnosměrného proudu vycházejí z chyb použitého kalibračního zařízení:

- chyba způsobená nejistotou při navázání etalonového rezistoru,
- chyba způsobená teplotním součinitelem etalonového rezistoru,
- chyba způsobená tepelnými ztrátami v rezistoru v důsledku proudu jím procházejícího,
- chyba způsobená časovou nestabilitou etalonového rezistoru,
- vliv termonapětí,
- chyba způsobená Peltierovým efektem u rezistorů pod 1 Ω. V místě přívodů k rezistoru vzniká na jednom z nich oteplení, na druhém ochlazení. Při změně směru stejnosměrného proudu protékajícího rezistorem se vymění konce vzájemně i oteplování i ochlazování,
- u vyšších hodnot rezistorů chyba způsobená svodovými proudy a navlhání (mimo rozsah tohoto postupu),

- elektromagnetické rušení. Silná elektromagnetická pole mohou vyvolat elektromagnetické rušení v měřicích obvodech. Jejich vliv omezíme použitím co nejkratších propojovacích vodičů se stíněním pro napěťové přívody a pro proudové provedení, kde vodiče ke svorkám $I+$ a $I-$ jsou zkroucené tak, aby plocha smyčky mezi vodiči byla minimální při zachování dostatečně velkého svodového odporu mezi vodiči. V prostředích s velmi silným elektromagnetickým rušením se kalibrace měřidel provádí v kabinách s elektromagnetickým stíněním.

9.3 C - VA metoda výpočtu odporu kalibrovaného etalonu

VA metoda výpočtu odporu kalibrovaného etalonu z hodnoty nastaveného etalonového proudu z externího zdroje (kalibrátoru) a změřeného napětí na odporu.

Etalony

- kalibrátor jako zdroj proudu,
- digitální multimetr nebo mikrovoltmetr,

Princip metody:

Přímé měření napětí na napěťových výstupních svorkách etalonu při napájení proudových svorek z kalibrátoru proudu.

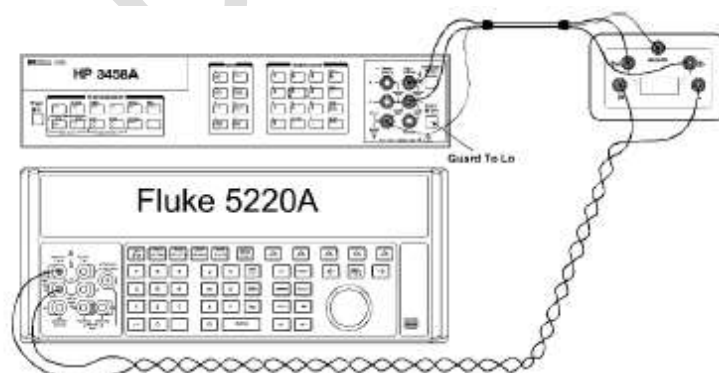
Hodnota měřeného etalonu (R_X) se vypočte z měřené hodnoty napětí na odporu U_X při napájení odporu z proudu kalibrátoru proudem I_E ,

$$R_X = U_X / I_E$$

Kalibrace se provádí vždy pro čtyřsvorkové připojení.

Kalibrace na 50 Hz se přednostně dělá pro impedanci Z

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



Obr. č. 9: Provedení přívodů k etalonu s přístrojovými svorkami (pro DC, pro AC přednostně jen pro 50 Hz)

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

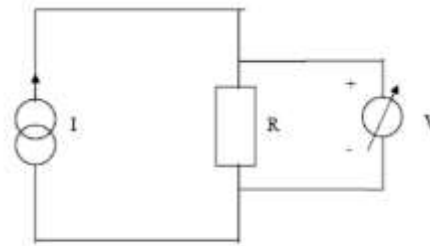


Figura 1

Obr. č. 10: VA metoda výpočtu odporu kalibrovaného etalonu z hodnoty nastaveného proudu z externího zdroje (kalibrátoru) a změřeného napětí.

Použitá měřidla a pomůcky

Na kalibraci je třeba následující měřidla a pomůcky:

- digitální multimetr,
- kalibrátor jako zdroj proudu.

Příprava k měření

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

- zapnout DMM do sítě a ponechat ustálit minimálně 30 minut, připojit měřicí kabely, se kterými se bude provádět kalibrace - zkroucené kabely (+případný adapter), nebo kablíky s přechodem na připojení etalonů,
- nastavit DMM na pomalou rychlost měření a větší počet vzorků pro průměrování, pokud to měřič umožňuje. Zkusit vhodnost analogového filtru,
- po teplotním ustálení provést u DMM měřiče funkci „zero“ pro měření a kompenzování offsetů,
- měření se provede měřicím signálem na zvolené hodnotě proudu pro měření a DMM při napětí pro nejlepší specifikaci mostu (obvykle rozsah 0,1V),
- podle požadavků zákazníka nebo technické specifikace měřeného objektu se provede měření případně na dalších proudech a frekvencích, v rozsahu, který konstrukce etalonů umožňuje použít a podle požadavků zákazníka.

Polarita

Pokud použitý měřič nepoužívá postupy potlačení vlivu termonapětí, musí se měření provádět při DC napájení pro obě polarity napájení.

Počet měřených bodů

Počet nastavených proudů se dohodne se zákazníkem při přezkoumání smlouvy současně s dalšími upřesněními o chlazení a prodlevách k ustálení.

Měření při proudu doporučeném výrobcem je doporučeno.

Pokud zákazník nepožádá jinak, měří se ve 3 bodech, při 10%, 30% a 100% z doporučeného/jmenovitého příkonu.

Opakování měření

Doporučuje se provést několik sad měření, kdy každá sada měření sestává nejméně z 10 měření. Pro každou sadu měření zaznamenáváme výsledky měření a podmínky prostředí, v nichž byla provedena měření. Mezi každou sadou měření mají být minimálně dvě hodiny s maximálně pěti sadami měření za den. Vzhledem k tomu, že hmotnosti etalonu R a změna

teploty v něm je pomalá, doporučuje se minimální čas mezi měřeními v rámci jedné sady měření. Měření se má opakovat nejméně 2 dny. Měření se provádí pro obě polarity napájecího proudu.

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 opravovat, musí být uvedeny výsledky kalibrace získané před a po opravě, pokud jsou k dispozici.

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

10.1 Postup vyhodnocení

Kalibrační laboratoř vede záznamy, v nichž kromě jiného uvádí:

- konkrétní udání použitého zdroje specifikace,
- měřicí rozsahy, na nichž je kalibrace prováděna,
- frekvence a výstupní napětí nastavené na použitém měřidle,
- nejistota kalibrace.

10.2 Rozhodnutí o výsledku kalibrace

V organizacích, v nichž vedoucí kalibrační laboratoře vykonává současně funkci metrologa organizace, na základě vyhodnocení zkoušených bodů uvedených v kapitole 7 rozhodne 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 vyčerpá od minulé recalibrace více než 70 % specifikace, rozhoduje o následné kalibraci při interních kalibracích vedoucí kalibrační laboratoře. Doporučuje se zkrátit dobu do recalibrace. Při kalibraci externímu zákazníkovi má být zákazník o neshodě informován a o dalším postupu rozhoduje metrolog objednavatele.

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 malých hodnot odporu R zásadně při kalibraci nejistujeme.

11 Kalibrační list

Výsledky měření musí 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:

- název a adresu kalibrační laboratoře,
- pořadové číslo kalibračního listu, očíslování jednotlivých stran, celkový počet stran,
- jméno a adresu zadavatele, popř. zákazníka,
- název, typ, výrobce a identifikační číslo kalibrovaného etalonu,
- datum přijetí etalonu ke kalibraci (nepovinné), datum provedení kalibrace a datum vystavení kalibračního listu,
- určení specifikace uplatněné při kalibraci nebo označení kalibračního postupu (v tomto případě KP 4.1.2/20/17),
- podmínky, za nichž byla kalibrace provedena (hodnoty ovlivňujících veličin apod.),
- měřidla použitá při kalibraci,
- obecné vyjádření o návaznosti výsledků měření (etalony použité při kalibraci),
- výsledky měření a s nimi spjatou rozšířenou nejistotu měření a/nebo prohlášení o shodě s určitou metrologickou specifikací,
- jméno pracovníka, který měřidlo kalibroval, jméno a podpis odpovědného (vedoucího) pracovníka, razítko kalibrační laboratoře.

Vyjádření o nejistotě měření, které podle ILAC-P14:01/2013 bod 6.3 může mít tvar:

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

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

Pokud provádí kalibrační 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 měřenými hodnotami) a archivovala jej.

11.2 Protokolování

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

11.3 Umístění kalibrační značky

Po provedení kalibrace může kalibrační laboratoř označit kalibrované měřidlo kalibrační značkou, popř. kalibračním štítkem nejčastěji s uvedením čísla kalibračního listu, datem provedení kalibrace, případně s logem laboratoře. Pokud to není výslovně uvedeno v některém interním podnikovém metrologickém předpisu nebo kupní smlouvě se zákazníkem, nesmí kalibrační laboratoř uvádět na svém kalibračním štítku datum příští kalibrace, protože stanovení kalibrační lhůty měřidla je právem a povinností uživatele. Po provedení kalibrace se etalon opatří kalibrační značkou – štítkem, který ale nesmí bránit chlazení etalonu. Kalibrační štítek je třeba na přístroj umístit viditelně.

Na štítku je uvedeno:

- číslo kalibračního listu,
- datum provedené kalibrace podpis pracovníka, který prováděl kalibraci,
- 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 Zápis při 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 Reklamacce

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.

Pokud nebyly při analýze shledány závady, je o tom objednavatel 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)

Kalibrace etalonu nominální hodnoty 0,1 Ω pro teplotu 23 °C porovnáním s etalonem

Při kalibraci použijeme substituční metodu měření na číslicovém multimetru HP 3458 A. Měříme odporový etalon metra Rn0,1 Ω a jako referenční etalon použijeme etalon

nominální hodnoty 0,1 Ω, ZIP, typ P 321. Měřicí obvod bude podle obr. č. 12 v čtyřvodičovém zapojení. Na termostatizaci etalonů pro 23,00 °C použijeme například olejový termostat Meatest s chybou nastavené teploty nepřekračující ±0,01 °C a s její stálostí nepřekračující ±0,01 °C. Na měření teploty v termostatu použijeme teploměry s dělením 1/100 °C s platnými certifikáty.

Proud, kterým měří multimetr je 10 mA a u etalonů v olejové lázni nezpůsobí nezanedbatelný ohřev.



Obr. č. 11: Etalony R podle řešeného příkladu, vlevo etalon Metra R_n , vpravo P321

Údaje etalonů:

Měřený odpor R_x

$R_x = 0,1 \Omega$. METRA, typ R_n , výr. č. 370811

Etalonový odpor R_E

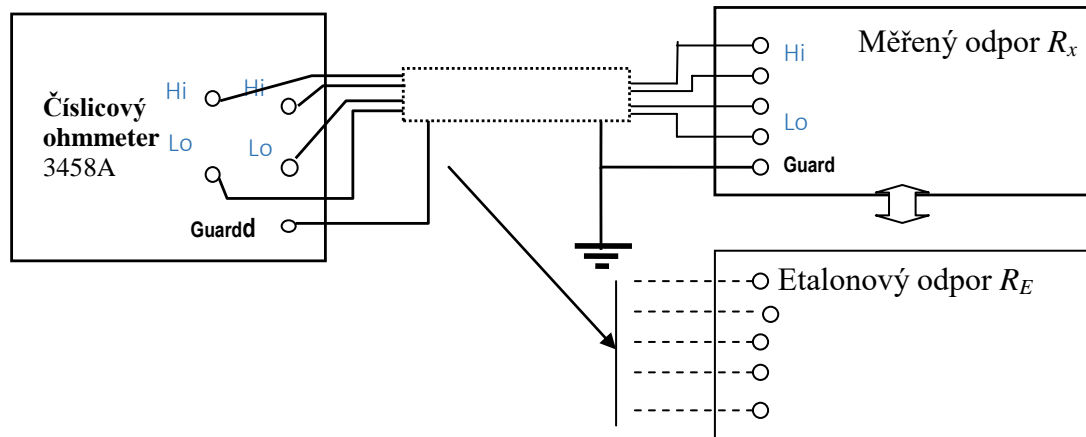
$R_E = 0,1 \Omega$ ZIP Krasnodar, Rusko, typ P 321, výr. č. 136017

Porovnáváno na DMM Keysight EU 3458A

Měřeno PT čidlem s digitálním DMM, rozlišení pod 0,01°C.

Podmínky měření

- Teplota okolí 23,0°C ± 0,5°C,
- relativní vlhkost 40% ± 0,5%,
- měřeno na DMM Keysight EU 3458A, při nastavení:
 - NPLC 100,
 - Acal ±1°C,
 - Tcal ±1°C,
 - rozsah 10 ohm.
 - proud při měření $I = (10,0 \pm 0,3) \text{ mA}$,
- etalony odporu byly umístěny v olejovém termostatu Meatest, (popsat podrobněji použitý olej, ponor, polohu etalonů v lázni),
- chyba nastavené teploty nepřekračuje ±0,01 °C podobu měření,
- teplota měřena PT čidlem s DMM, rozlišení pod 0,01°C.



Obr. č. 12: Blokové schéma zapojení pro substituční metodu měření (čtyřvodičové zapojení)

Výsledný odpor kalibrovaného rezistoru je:

$$R_X = R_S \cdot r_C \cdot r$$

a po zvážení všech vlivů je:

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

kde:

- R_S je 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 multimetrem indikovaných odporů R_X a R_S ,
- r_C korekční faktor pro parazitní napětí a rozlišovací schopnost multimetru,
- δR_{TX} variace hodnoty odporu kalibrovaného rezistoru v závislosti na teplotě.

Konkrétní specifikace úkolu:

Číslicovým multimetrem (v 8 a půl digitové konfiguraci) substituční metodou srovnáváme dva rezistory jmenovité hodnoty 0,1 Ω. Porovnávané rezistory jsou během měření umístěny v olejové lázni a jsou udržovány při teplotě 23,00°C ± 0,01°C. Jejich teplota je kontrolována teploměrem umístěným v centrální části koupele. Měření se realizuje v laboratoři, kde je udržována teplota 23,0°C ± 0,5°C a relativní vlhkost 40 % ± 0,5 %. Na kontrolu jak teploty rezistoru (koupele) jakož i laboratoře a vlhkosti vzduchu v laboratoři jsou použity teploměry a hygrometr s platným kalibračním listem. Je použit DMM EU KEYSIGHT 3458A, který má pro zvolený rozsah měření 10 Ω pracovní proud 10 mA. Měření se provádí na rozsahu 0,01 kΩ. Měřicí proud multimetru je tak malý, že se může zanedbat ohřev porovnávaných rezistorů vlivem proudu při měření. Rezistory se připojují na měřicí svorky multimetru čtyřvodičově, což umožňuje neuvažovat chyby způsobeným přídavnými odpory přívodních vodičů.

Naměřené hodnoty, analýza nejistot a jejich celková bilance:

Hodnoty porovnávaných rezistorů po opakovaném připojení k multimetru změříme nejméně pětkrát. Měření se provede v rozmezí dvou pracovních dnů a nejméně ve 2 skupinách měření, mezi kterými je nejméně 1 hodina.

Naměřené hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce:

Naměřené hodnoty:	R_{Xi} Ω	R_{Si} Ω	$r = R_{Xi} / R_{Si}$
1	0,100 001 5	0,100 000 2	1,000 013 4
2	0,100 001 7	0,100 000 3	1,000 014 2
3	0,100 001 4	0,100 000 1	1,000 013 2
4	0,100 001 6	0,100 000 3	1,000 013 6
5	0,100 001 4	0,100 000 0	1,000 014 0

aritmetický střed: $r_{stř} = 1,000 013 68$

směrodatná odchylka: $s(r) = 0,371 \times 10^{-6}$

standardní nejistota: $u_A = s(r) / \sqrt{5} = 0,371 \times 10^{-6} / \sqrt{5} = 0,166 \times 10^{-6}$

Další údaje pro výpočet hodnoty a stanovení nejistoty její zjištění:**Referenční rezistor:**

Z kalibračního certifikátu při teplotě 23°C má etalonový odpor hodnotu 0,100 000 5Ω ± 0,8 μΩ (rozšířená nejistota pro k = 2),

Referenční odpor má platný kalibrační list, vydaný v rámci akreditace (nebo dohody kcdb v případě národního metrologického institutu). Kontrolou v databázi kcdb na www.bipm.org zkontrolujeme, že udaná nejistota kalibrace referenčního odporu není menší než odsouhlasené CMC poskytovatele kalibrace, které je pro tento numerický příklad rovno 0,5 ppm.

Drift hodnoty referenčního rezistoru:

Na základě dlouhodobějšího sledování referenčního etalonového rezistoru je odhadovaný roční trend jeho hodnoty -0,82 μΩ s odchylkami ±0,5 μΩ

Porovnání se realizuje cca 1 rok po kalibraci rezistoru.

Variace měřených hodnot vlivem změn teploty:

Teplota olejové lázně je monitorována kalibrovaným teploměrem - aritmetický střed teploty je 23,00°C. Na základě proměření vlastností lázně a vlastních měření teploty v procesu srovnání, odchylky od této teploty nepřekročí ±0,02°C, v čem jsou zahrnuty i teplotní gradienty lázně.

Referenční rezistor:

Teplotní součinitel $\alpha = 5 \times 10^{-6} 1/K$. Potom největší odchylky jeho hodnoty změnou teploty jsou $5 \times 10^{-6} \times 0,02 = 1 \times 10^{-7}$ z hodnoty odporu, to je jen ±0,01 μΩ.

Standardní nejistota hodnoty R_E v procesu srovnání od změn jeho teploty (předpokládáme rovnoměrné rozdělení) je $0,01/\sqrt{3} \mu\Omega = 0,058 0,006 \mu\Omega$.

Kalibrovaný rezistor:

Pro teplotní součinitel α předpokládáme $\alpha \leq 15 \times 10^{-6} \text{ 1/K}$ a $\beta \leq 0,1 \times 10^{-6} \text{ 1/K}$. Potom největší odchylky jeho hodnoty změnou teploty jsou $15 \times 10^{-6} \times 0,02 = 3 \times 10^{-7}$ z hodnoty, to je jen $\pm 0,03 \mu\Omega$.

Standardní nejistota hodnoty R_E v procesu srovnání od změny jeho teploty (předpokládáme rovnoměrné rozdělení) je $0,03/\sqrt{3} \mu\Omega = 0,02 \mu\Omega$.

Variace měřených hodnot

Vlivě dalších změn okolních podmínek: předpokládáme jejich zanedbatelný vliv.

Vlastní srovnání

Protože ke srovnání rezistorů je použit tentýž číslicový multimetr, jsou naměřené hodnoty v korelaci, ale tento efekt je pro každé měření redukován tím, že je vypočítán jejich poměr. Ve vlastním procesu měření se s ohledem na nejistotu měření uplatní zejména efekt zahrnující parazitní termonapětí a použité rozlišení multimetru. S ohledem na výše uvedené úvahy a použité rozlišení multimetru předpokládáme, že tyto vlivy jsou limitovány hodnotou $\pm 0,2 \times 10^{-6}$ pro každou čtenou hodnotu. Z toho za předpokladu rovnoměrného rozdělení je standardní nejistota pro jedno čtení rovná $0,116 \times 10^{-6}$. Vzhledem k tomu, že jedna série měření obsahuje dvě čtení měřených hodnot (R_X a následně R_S) je standardní nejistota této série přes jejich kvadratický součet rovná $0,164 \times 10^{-6}$.

Celková bilance uplatňujících se složek nejistoty měření pro tento příklad je v následující tabulce:

Bilance nejistot:

Veličina X_i	Odhad X_i	Standardní nejistota $u(x_i)$	Předpokládané rozdělení	Citlivostní koeficient c_i	Příspěvek nejistoty $u_i(y_i)$
R_S	0,100 000 5 Ω	0,40 μΩ	normální	1,0	0,40 μΩ
δR_D	- 0,000 8 Ω	0,25 μΩ	rovnoměrné	1,0	0,25 μΩ
δR_{TS}	0 Ω	0,058 μΩ	rovnoměrné	1,0	0,058 μΩ
δR_{TX}	0 Ω	0,17 μΩ	rovnoměrné	1,0	0,17 μΩ
r_c	1,0	$0,164 \times 10^{-6}$	rovnoměrné	1 000 mΩ	0,164 μΩ
r	0,1000 013 68	$0,166 \times 10^{-6}$	normální	1 000 mΩ	0,166 μΩ
R_X	0,099 999 9 Ω				0,556 μΩ

Rozšířená nejistota:

$$U = k \cdot u(R_X) = 2 \times 0,556 \mu\Omega \cong 1,11 \mu\Omega,$$

Výsledná hodnota:

Výsledná naměřená hodnota rezistoru při teplotě 23 °C je:

$$\underline{\underline{R = 0,099\ 999\ 9\ \Omega \pm 1,1\ \mu\Omega.}}$$

Měřeno při teplotě lázně ($23,00 \pm 0,01$)°C a proudu při měření ($10,00 \pm 0,3$) mA.

Interpretace výsledků

K dalšímu použití etalonu odporu je třeba uvažovat:

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

Z toho pak vyplývá, 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

Doba rekalibrace 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,
- je-li pozorován dlouhodobý drift.

Při vysokých požadavcích na kvalitu etalonu odporu, nejprve během prvních dvou nebo třech kalibrací se doporučuje snížit tuto dobu na šest měsíců, za účelem získání informací o jejich stabilitě a stárnutí. Etalony odporu pro užití se střední nebo nízkou přesností a v závislosti na výsledcích pozorovaných u předchozí kalibrace, lze toto období prodloužit až na 24 měsíce.

V každém případě je uživatel vždy povinen po rekalibraci etalonu odporu pro střídavý proud pověřit období rekalibrací a revidovat je, je-li to nutné, vzhledem k výsledkům 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 její organizace přizpůsobila svým požadavkům s ohledem na své metrologické vybavení a konkrétní podmínky. V případě, že střediskem provádějícím kalibraci je akreditovaná kalibrační laboratoř, měl by být kalibrační postup navíc upraven podle příslušných předpisů (zejména MPA, ILAC a EA a normy ISO/IEC17025).

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/2/17. Nesmí být rozmnožován ani předáván jiným organizacím a subjektům bez souhlasu ÚNMZ a ČMS.

Neprodejné

16 Přílohy

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

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

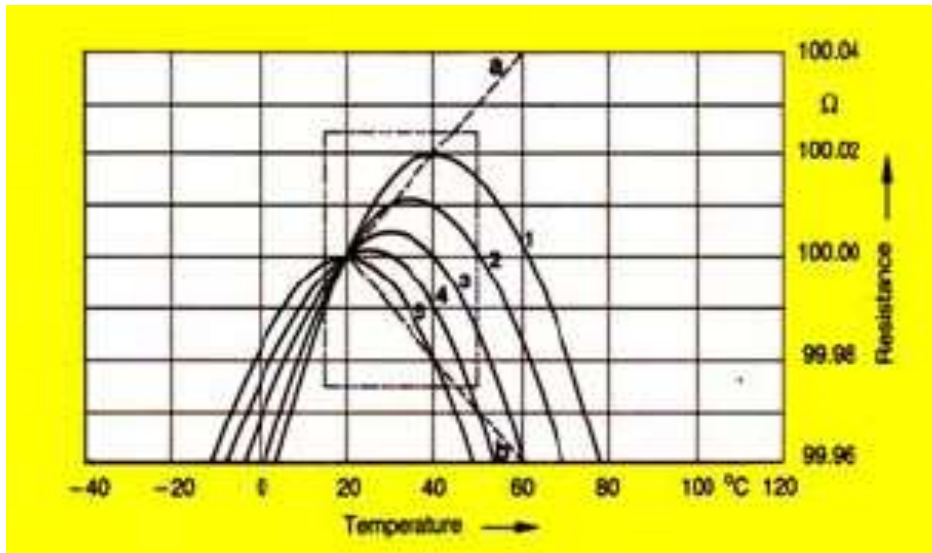
Příloha č. 1

Termoelektrické napětí (termoelektrické EMP) je nejčastějším zdrojem chyb při měření nízkého napětí při měření odporů. Tato napětí jsou generována v různých částech obvodu a při různých teplotách a pro vodiče vyrobené z odlišných materiálů. Jsou spojeny dohromady, jak je znázorněno na obrázku. Několik mikrovoltů tepelných napětí může být generováno pomocí teplotních gradientů v zkušební obvodu způsobené střídáním teplot v laboratoři nebo v blízkosti citlivých obvodů. Konstrukce obvodů s použitím stejného materiálu pro všechny vodiče minimalizuje termoelektrickou generaci EMF. Například přípojky ze strany lisování měděných spojek nebo výstupky měděných drátů vedou měď-to-měď uzly, které vytvářejí minimální termoelektrické EMP. Spoje musí být udržovány v čistotě a bez oxidů. Mačkané měď-měděné spoje, zvané "za studena svařované," nedovolují pronikání kyslíku a mohou mít koeficient Seebeck $\leq 0,2 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$. Cu-CuO spoje ale mohou mít koeficient vysoký, až $1\text{mV}/^\circ\text{C}$.

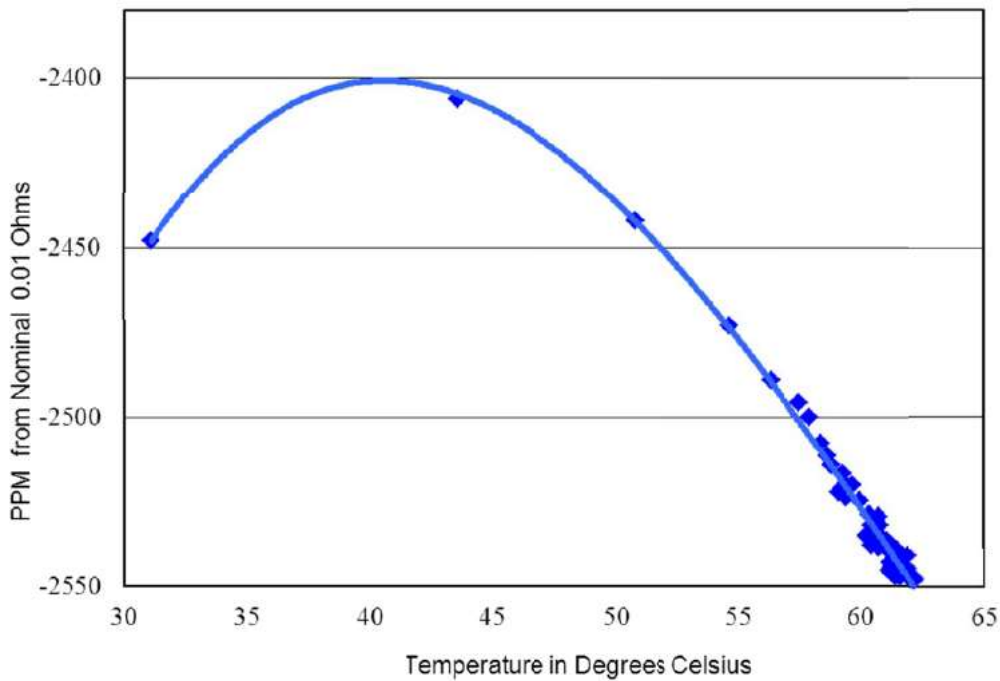
Minimalizaci teplotních gradientů v obvodu také snižuje možnost termoelektrických napětí. Pro minimalizaci těchto přechodů je vhodné umístit odpovídající páry uzlů do těsné blízkosti k sobě navzájem pro zajištění dobrého tepelného spojení a umístit je do společného, masivního chladiče.

Musí být použity elektrické izolátory, které mají vysokou tepelnou vodivost, ale vzhledem k tomu, že většinou elektrické izolátory nevedou dobře teplo, užívají se speciální izolační látky, jako je tvrdý eloxovaný hliník, oxid berylia, speciálně plněné epoxidové pryskyřice, safír nebo diamant, které musí být použity na chladič, což umožňuje zkušební zařízení zahřát a dosáhnout tepelné rovnováhy v konstantní teplotě k okolí a také minimalizuje termoelektrické účinky EMF. Přístrojová nulová funkce může kompenzovat zbývající termoelektrické EMF, za předpokladu, že je relativně konstantní. Chcete-li zachovat okolní teploty konstantní, mělo by zařízení být uchováváno mimo dosah přímého slunečního světla, ventilátorů a podobných zdrojů proudění tepla nebo pohybujícího se vzduchu. Balicí spoje z izolační pěny (například polyuretan) také minimalizují kolísání okolní teploty způsobené pohybem vzduchu.

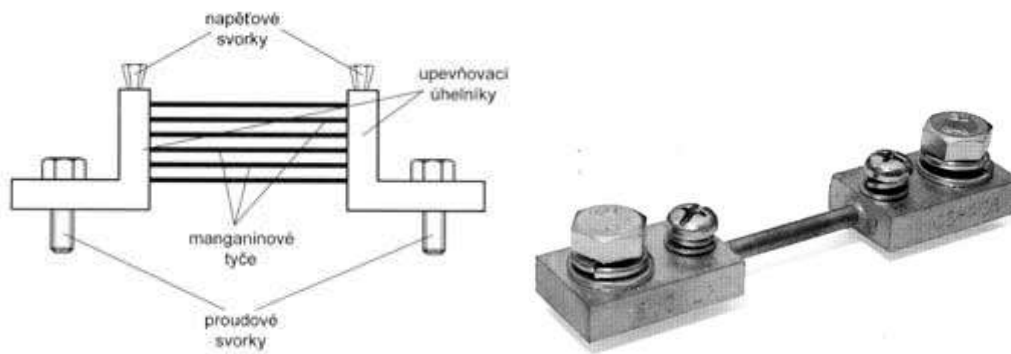
Pokud jsou všechny spoje vyrobeny z jednoho kovu, je množství termoelektrického EMF přidané k měření zanedbatelné. Nicméně, toto nemusí být vždy možné.



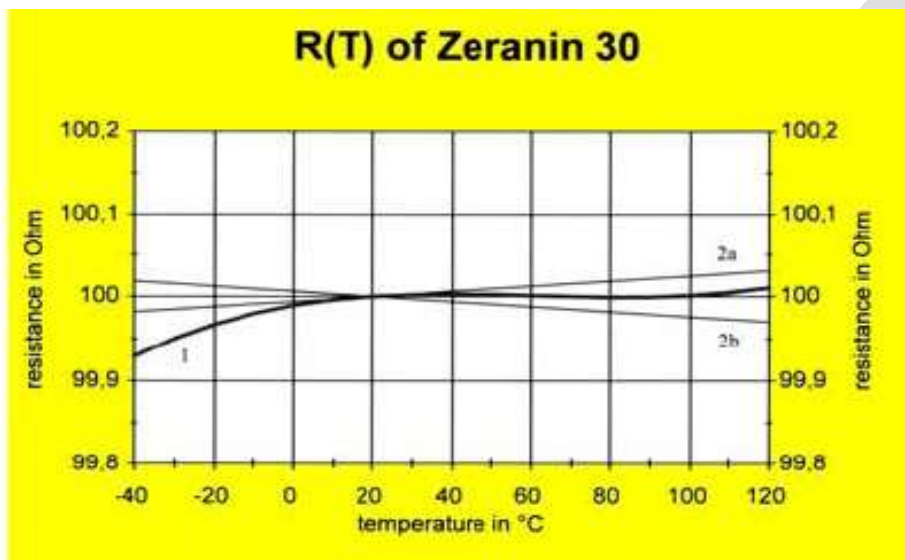
Obr. č. 13: Manganin byl vyvinut Edvardem Westonem již v roce 1889. Obsahuje 84 % mědi, 12% manganu a 4% niklu. Má malou teplotní závislost a malé termonepětí. Obrázek ukazuje varianty provedení, které se liší vrcholem paraboloy teplotní závislosti



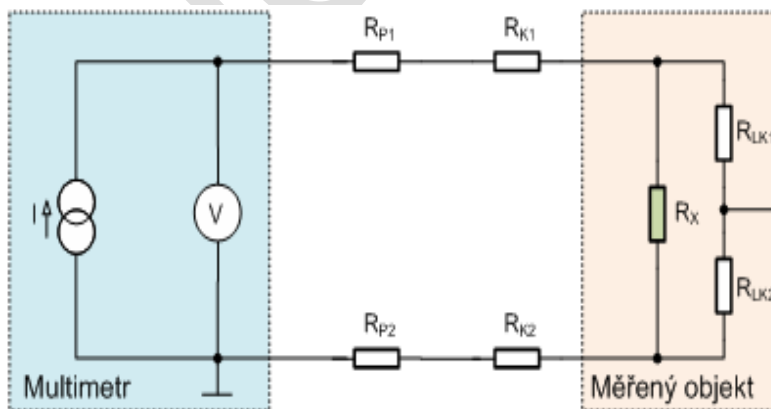
Obr. č. 14: Příklad závislosti odporu na teplotě pro etalon 0,01 ohm vyrobený z manganinu



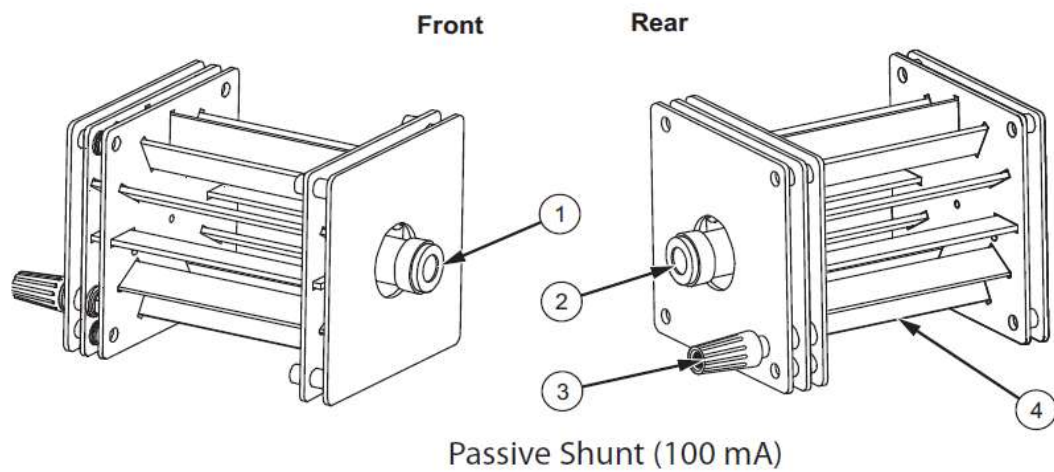
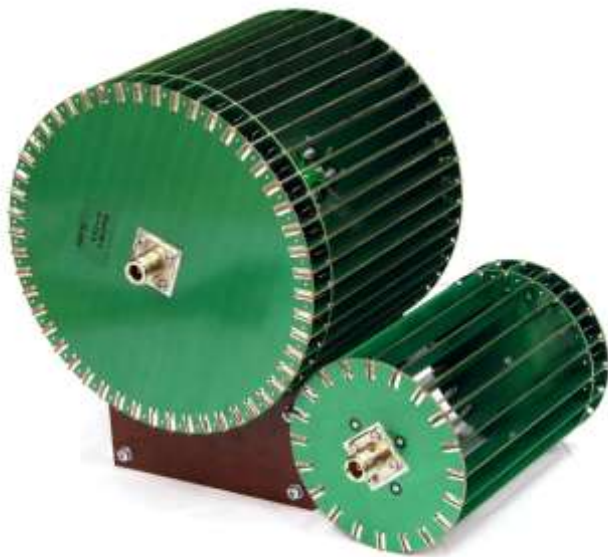
Obr. č. 15: Pokud je etalon tvořen paralelní kombinací prvků, nemůže mít lepší frekvenční závislost, než mají použité prvky samostatně (odvozeno ve VNIIM, Petrohrad)



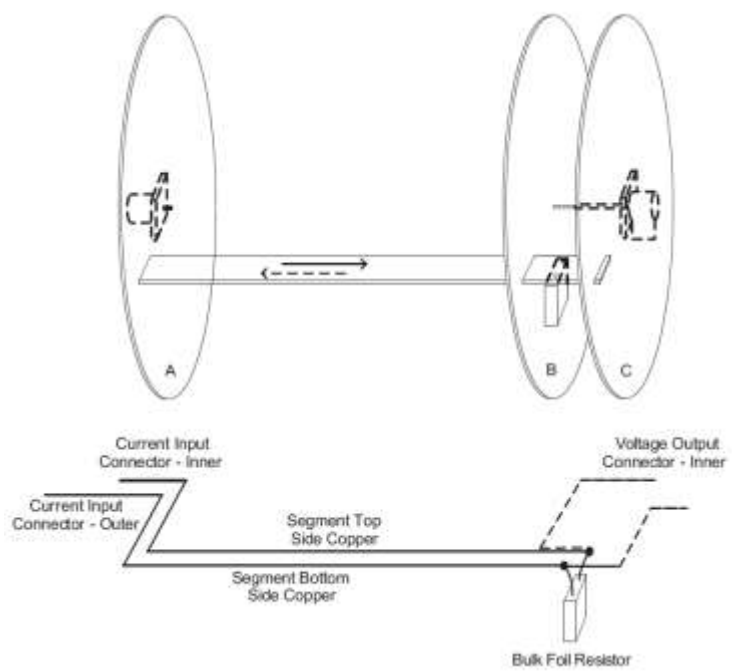
Obr. č. 16: Zeranin (Evanohm a další slitiny) byly vyvinuty pro snížení teplotní závislosti proti manganinu



Obr. č. 17: Pro etalony malé nominální hodnoty R se odpory ke stínění neuplatní



Obr. č. 17: Širokopásmové etalony R se nejnáze realizují paralelní kombinací foliových odporů podle konstrukce navržené v Rusku



Obr. č. 18: Správné provedení etalonů je důležité

Neprodejné

Příloha č. 1a

Bočníky s odporovými plechy

Poznámky k individuální realizaci.

Materiály

Na odporový materiál pro bočník by bylo potřebné zajistit manganin nebo zeranin, ale hlavní světový výrobce Isabellenhütte Heusler GmbH & Co. KG, přestal nabízet odporové materiály, dodává jen rezistory.

- manganinové folie tloušťky pod 0,1 mm jsou málo stabilní,
- pájka – speciální cínová pájka s 2% AG,
- isolační proklad – skelná tkanina 0,05 mm,
- lepidlo - epoxidové.

Konstrukce

Konstrukce musí vyjít z materiálu, který bude k dispozici. Z toho vyjdou i rozměry. Před návrhem je nutné rozhodnout, pro jaký výkon má být odpor realizován.

Připojení

Bočníky mohou být navrženy pro klasické měření proudu nebo proudu při měření páce a výkonu. V tomto případě je optimální na vstupní straně dostatečně výkonový koaxiální konektor, kterým bývá:

- N pro malé proudy pod 1A,
- UHF pro proudy do cca 20 A tam, kde nejsou extrémní požadavky na širokopásmovost (UHF nemá definovanou impedanci),
- C pro větší proudy.

Bočník jako etalon malých hodnot odporu

Pro čtyřpárové provedení pro malé příkony je standardní rozteč BNC konektorů 22 mm. Při běžném propojení přímými vodiči je indukčnost kolem 20 nH. Při použití materiálu pro plošný spoj ze skelné tkaniny sycené polyphenyloxidem, s permitivitou pod $2 \cdot 10^{-3}$ do 10 GHz a velmi pečlivém provedení přívodů je možno potlačit vzájemné indukčnosti mezi přívody pod 3 nH. Vedení napětových a proudových přívodů se nejnáze prověří experimentálně na modelech, kde odporová folie bude nahrazena měděnou, porovnáním se čtyřpárovým koaxiálním zkratem HP 16034.

Bočníky pro širokopásmové měření

Koaxiální bočníky pro měření impulsních proudů o vysoké amplitudě ve středofrekvenčním a vysokofrekvenčním pásmu bývají zhotoveny z manganinu s pláštěm z mědi. Výstup je vyveden na BNC nebo N konektor. Jen provedení pro přizpůsobený výstup s výstupním odporem 50 Ω bývají širokopásmová s šířkou pásma (-3dB) až stovky MHz. Prostorové oddělení vstupní a výstupní zemní svorky dané rozměry bočníku a zabudovaný přizpůsobovací odpor 50 Ω na výstupu bočníku, předurčují jejich měření výkonovou metodou se sestavou:

- vf generátor, (přizpůsobovací odpor 50 Ω),
- vstupní svorky (konektor nebo šrouby podle typu bočníku),
- výstupní konektor bočníku,

- oddělovací ochranný přechod,
- výkonové čidlo,
- měřič vf výkonu.

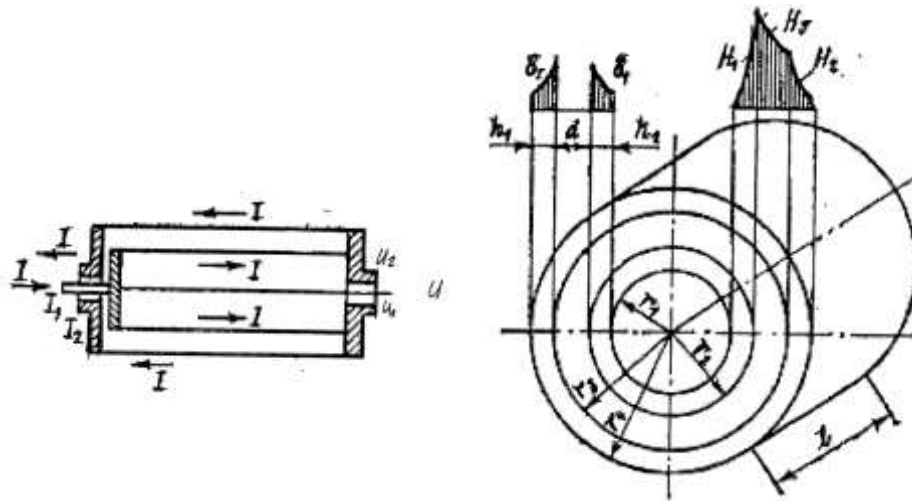
Podobně jako koaxiální, ale ještě s lepšími vlastnostmi, by se měly chovat bočníky klecového provedení, které se již nejméně 20 let používají pro nejpřesnější etalonové bočníky. Princip jejich činnosti je založen na myšlence převést optimální vlastnosti odporových prvků s hodnotami v řádu desítek ohmů i do oblasti malých hodnot odporu jejich paralelním řazením při věnování velké pozornosti vedení a rozdělení proudů do jednotlivých ramen. Tyto bočníky nejsou vypočitatelného charakteru, ale z principu mají velmi dobré frekvenční vlastnosti.

Neprodejně

Příloha č. 1b

Návrh bočnicků z hlediska frekvenční charakteristiky

Koaxiální provedení bočnicku



Obr. č. 19: Koaxiální bočník - princip a rozložení proudu, kde $h1$ je tloušťka vnějšího válce a $h2$ tloušťka vnitřního válce, d je vzdálenost mezi válci a l je délka odporového válce

Induktivní složka časové konstanty

$$\tau_L = \frac{\mu h_1^2}{3\rho} \left(1 + \frac{h_2}{h_1} + \frac{3a}{h_1} \right)$$

Kapacitní složka časové konstanty

$$\tau_C = \frac{2\varepsilon\rho l^2}{ah_1}$$

Vliv povrchového jevu

$$\tau_n = -\frac{\mu h_1^2}{6\rho}$$

Impedance

$$Z = R \left[1 + \omega^2 \left(\frac{\tau_C^2}{15} - \frac{\tau_L \tau_C}{3} + \frac{3\tau_n}{10} \right) + j\omega \left(\tau_L - \frac{\tau_C}{3} + \tau_n + \tau_M \right) \right]$$

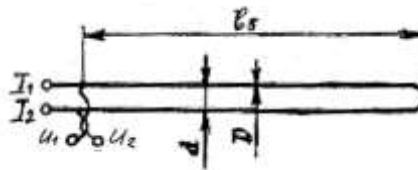
Odchylka modulu impedance

$$\gamma = \frac{\Delta R}{R} + \frac{\psi^2}{2} = \omega^2 \left[\frac{\tau_C^2}{15} - \frac{\tau_L \tau_C}{3} + \frac{3\tau_n^2}{10} + \frac{1}{2} (\tau_L - \tau_C/3 + \tau_n + \tau_M)^2 \right]$$

Odchylka fáze impedance

$$\psi = \omega\tau = \omega \left(\tau_L - \frac{\tau_C}{3} + \tau_n + \tau_M \right)$$

Bifilární provedení bočníku



Obr. č. 20: Bifilární bočník s přehnutým vodičem – princip

značení: D je průměr vodiče d vzdálenost mezi vodiči, l_s délka odporového vodiče měřená od napěťových vývodů

Induktivní složka časové konstanty

$$\tau_L = \frac{\mu D^2}{8\rho} \left(\ln \frac{2d}{D} + 0,25 \right)$$

Kapacitní složka časové konstanty

$$\tau_C = \frac{8\epsilon\rho l_s^2}{D^2 \ln \frac{2d}{D}}$$

Vliv povrchového jevu

$$\tau_n = \frac{\mu D^2}{32\rho}$$

Impedance

$$Z = R \left[1 + \omega^2 \left(\frac{\tau_C^2}{15} - \frac{\tau_L \tau_C}{3} + \frac{3\tau_n^2}{10} \right) + j\omega \left(\tau_L - \frac{\tau_C}{3} + \tau_n + \tau_M \right) \right]$$

Odchylka modulu impedance

$$\gamma = \frac{\Delta R}{R} + \frac{\psi^2}{2} = \omega^2 \left[\frac{\tau_C^2}{15} - \frac{\tau_L \tau_C}{3} + \frac{3\tau_n^2}{10} + \frac{1}{2} (\tau_L - \tau_C/3 + \tau_n + \tau_M)^2 \right]$$

Odchylka fáze impedance

$$\psi = \omega\tau = \omega \left(\tau_L - \frac{\tau_C}{3} + \tau_n + \tau_M \right)$$

Chyba induktivní složky časové konstanty vlivem výrobních tolerancí

$$\Delta\tau_L/\tau_L = \Delta L/L + \Delta R/R = \frac{\Delta d/d + \Delta D/D}{\ln 2d/D + 0,25} + \Delta l_\sigma/l_\sigma + \Delta R/R.$$

Chyba kapacitní složky časové konstanty vlivem výrobních tolerancí

$$\Delta\tau_C/\tau_C = \Delta C/C + \Delta R/R + \frac{\Delta d/d + \Delta D/D}{\ln 2d/D} + \Delta l_\sigma/l_\sigma + \Delta R/R.$$

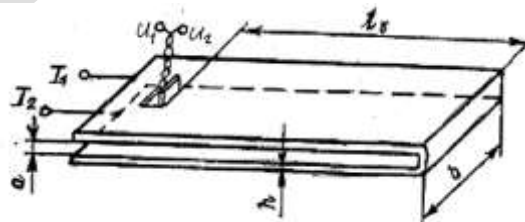
Chyba složky časové konstanty vlivem výrobních tolerancí

$$\Delta\tau_n/\tau_n = 2\Delta D/D + \Delta\rho/\rho,$$

Celková chyba časové konstanty

$$\frac{\Delta\tau}{\tau} = \frac{\tau_L}{\tau} \frac{\Delta\tau_L}{\tau_L} + \frac{\tau_C}{\tau} \frac{\Delta\tau_C}{\tau_C} + \frac{\tau_n}{\tau} \frac{\Delta\tau_n}{\tau_n}.$$

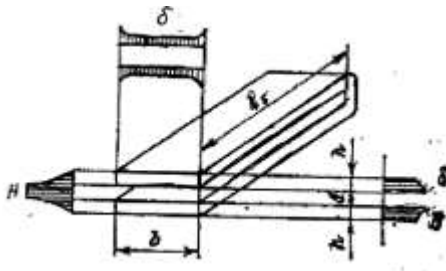
Bifilární etalon s plochým pásovým vodičem



Obr. č. 21: Bifilární bočník s plochým vodičem – princip

značení: l_s je délka odporového pásu odporového vodiče měřená od napěťových vývodů, b šířka odporového pásu, a šířka mezery mezi pásy, h tloušťka pásu

Rozložení proudu



Obr. č. 22: Bifilární bočník s plochým vodičem – rozložení proudu.
Použité symboly δ rozložení proudové hustoty, H rozložení magnetického pole.

Induktivní složka časové konstanty

$$\tau_L = \frac{\mu h^2}{2\rho} \left(1 + \frac{a}{h}\right)$$

Kapacitní složka časové konstanty

$$\tau_C = \frac{2\varepsilon\rho l^2}{ah}$$

Vliv povrchového jevu

$$\tau_n = \frac{\mu h^2}{3\rho}$$

Impedance

$$Z = R \left[1 + \omega^2 \left(\frac{\tau_C^2}{15} - \frac{\tau_L \tau_C}{3} + \frac{3\tau_n}{10} \right) + j\omega \left(\tau_L - \frac{\tau_C}{3} + \tau_n + \tau_M \right) \right]$$

Odchylka modulu impedance

$$\gamma = \frac{\Delta R}{R} + \frac{\psi^2}{2} = \omega^2 \left[\frac{\tau_C^2}{15} - \frac{\tau_L \tau_C}{3} + \frac{3\tau_n}{10} + \frac{1}{2} (\tau_L - \tau_C/3 + \tau_n + \tau_M)^2 \right]$$

Odchylka fáze impedance

$$\psi = \omega\tau = \omega \left(\tau_L - \frac{\tau_C}{3} + \tau_n + \tau_M \right)$$

Celková chyba časové konstanty

$$\frac{\Delta\tau}{\tau} = \frac{\tau_L}{\tau} \frac{\Delta\tau_L}{\tau_L} + \frac{\tau_C}{\tau} \frac{\Delta\tau_C}{\tau_C} + \frac{\tau_n}{\tau} \frac{\Delta\tau_n}{\tau_n}$$

Chyba induktivní, kapacitní složky časové konstanty složky časové konstanty vlivem výrobních tolerancí

$$\Delta\tau_L/\tau_L = \Delta l_0/l_0 + \Delta b/b + 2\Delta h/h + \Delta a/a + \Delta R/R;$$

$$\Delta\tau_C/\tau_C = \Delta l_0/l_0 + \Delta b/b + \Delta a/a + \Delta R/R;$$

$$\Delta\tau_n/\tau_n = 2\Delta h/h + \Delta\rho/\rho,$$

Nepronádejně

Příloha 2

Tato metodika se netýká měření vodivosti kovových vzorků pro brzdy na principu vířivých proudů. Jedná se o kovové vzorky s velmi malým odporem řádu $\mu\Omega$.

Podrobnější informace k těmto měřením jsou například v
<http://www.npl.co.uk/measurement-services/dc-lf/ac-conductivity-standards>

Kalibrační schopnosti jsou uvedeny v
http://kcdb.bipm.org/appendixC/country_list_search.asp?CountSelected=CN,DE,TR,GB&i service=EM/Mater.12.1.1

Podrobnosti o měření jsou ve zprávě EUROMET Project 427, EUROMET.EM-S7.

Další informace je možné najít ve zprávě o pracích CPEM Final report (open version) on activities within the RTD Project G6RD-CT-2000-00210 “Techniques and materials for the measurement of DC and AC conductivity of non-ferrous metals and alloys”, “Conductivity“ z roku 2003.