

ТЕМАТИКÁ
ПРÍЛОНА . 4/2008

METROLOGIE

VĚDECKÁ
LEGÁLNÍ
PRAKTICKÁ



INFORMACE PRO ČTENÁŘE ČASOPISU METROLOGIE

Vážení čtenáři, do rukou se Vám dostává druhá část Tematické přílohy zaměřené na metrologii měření elektrických prvků (odpor, kapacita a indukčnost), která navazuje na první část, otištěnou v Tematické příloze k Metrologii č. 4/2007, která vyšla právě před rokem.

Uvnitř je vložena vyjímatelně ještě samostatná příloha o Mezinárodní teplotní stupnici 1990 (ITS-90). Zahrnuta revize rozdílů mezi ITS-90 a IPTS-68. (Změna se netýká ITS-90.)

Praktická metrologie teploty odporovými teploměry má mnoho společného s problematikou měření odporu, popsaného v příloze o měření elektrických prvků.

ÚMČMZ

**ETALONÁŽ ELEKTRICKÉHO ODPORU,
KAPACITY, INDUKČNOSTI;
KALIBRACE RCL MOSTŮ**

Ing. Lubomír Harich	
5 Etalonáž elektrického odporu	2
5.1 Etalonáž elektrického odporu pod 0,1 Ω	3
Doc. Ing. Jiří Horský, CSc.	
5.2 Etalonáž odporu 0,1 Ω až 10 kΩ	8
Ing. Lubomír Harich	
5.3 Etalonáž odporu nad 10 kΩ	10
Doc. Ing. Jiří Horský, CSc.	
6 Etalonáž elektrické kapacity	13
6.1 Etalonáž kapacity v ČR	13
6.2 Používané typy etalonů a jejich měření.....	14
6.2.1 Etalony kapacity do 10 000 pF	14
6.2.2 Testy stability plynem plněných etalonů C.....	15
6.2.3 Etalony kapacity 10 nF až 1 μF	15
6.2.4 Etalony kapacity 1 μF až 100 μF	16
6.2.5 Etalony kapacity nad 100 μF	16
6.3 Ztrátový činitel etalonu kapacity	16
6.3.1 Etalony a návaznosti	17
6.3.2 Primární etalony pro měření činitele ztrát kondenzátorů	17
6.3.3 Etalony s nastavitelnými ztrátami pro etalonáž činitele ztrát D	17
7 Etalonáž indukčnosti	17
7.1 Etalonáž indukčnosti v ČMI	17
7.1.1 Rezonanční metoda	18
7.1.2 Kalibrace etalonů velkých hodnot indukčnosti přímým měřením záporné kapacity.....	18
7.1.3 Použití T-článku	18
7.2 Vlastnosti kalibrovaných etalonů.....	19
7.2.1 Základní vlastnosti etalonů RFT 0187.....	19
7.2.2 Základní vlastnosti etalonu RFT 0199.....	19
7.2.3 Připojení etalonů	19
7.2.4 Etalony a měření vzájemné indukčnosti.....	20
7.2.5 Etalony velkých hodnot indukčnosti.....	20
8 Kalibrace RLC mostů	20
8.1 Princip činnosti mostu.....	20
8.2 Referenční podmínky kalibrace	21
8.3 Metody kalibrace.....	22
8.4 Kalibrace multimetrů na kapacitních rozsazích	22
9 Možnosti kalibrace v ČR	23
10 Literatura souhrnná.....	24

**METROLOGY OF ELECTRICAL RESISTANCE,
CAPACITANCE AND INDUCTANCE;
CALIBRATION OF RCL BRIDGES**

Ing. Lubomír Harich	
5 Resistance.....	2
5.1 Resistance below 0,1 Ω	3
Doc. Ing. Jiří Horský, CSc.	
5.2 Resistance from 0,1 Ω to 10 kΩ.....	8
Ing. Lubomír Harich	
5.3 Resistance above 10 kΩ	10
Doc. Ing. Jiří Horský, CSc.	
6 Capacitance.....	13
6.1 Metrology of Capacitance in the Czech Republic	13
6.2 Standard Types and their Measurement used in Metrology Practice	14
6.2.1 Capacitance Standards below 10 000 pF.....	14
6.2.2 Stability Tests of the Gas Filled C-Standards	15
6.2.3 Capacitance Standards in the Range from 10 nF to 1 μF	15
6.2.4 Capacitance Standards in the Range from 1 μF to 100 μF	16
6.2.5 Capacitance Standards above 100 μF.....	16
6.3 Capacitance Standard Loss Factor	16
6.3.1 Standards and Traceability	17
6.3.2 Primary Standards for Capacitor Loss Factor.....	17
6.3.3 Standards with Adjustable Loss Factor	17
7 Inductance	17
7.1 Inductance in the Czech Metrology Institute.....	17
7.1.1 Resonance Method	18
7.1.2 High Inductance Standards Calibration using Direct Measurement of Negative Capacitance.....	18
7.1.3 Use of the T-network	18
7.2 Properties of Calibrated Standards.....	19
7.2.1 Basic properties of RFT 0187 Standard	19
7.2.2 Basic properties of RFT 0199 Standard	19
7.2.3 Connection to the Standards	19
7.2.4 Mutual Inductance Standards and their Measurement.....	20
7.2.5 Standards of High Inductance Value	20
8 Calibration of RLC Bridges	20
8.1 Bridge Operation Principle	20
8.2 Calibration Reference Conditions.....	21
8.3 Calibration Methods	22
8.4 Calibration of Multimeters on Capacitance Scale Ranges	22
9 Calibration capabilities in the Czech Republic	23
10 References	24

5 ETALONÁŽ ELEKTRICKÉHO ODPORU

Základy

Najvyšším rádom etalonáže elektrického odporu je rád, ktorý predstavuje primárny medzinárodný etalón. Ten je realizovaný v BIPM (Bureau international des poids et mesures) v Paríž-Sèvres. Základ primárnych etalónov väčšiny významných metrologických ústavov je dnes tvorená reprezentáciou ohmu, ktorá je založená na využití kvantového Hallovho javu. Niektoré z nich ako napr. NIST, PTB, NSL, NPL a ďalšie súčasne majú možnosť odvodzovať jednotku odporu z hodnoty vypočítateľného kondenzátora. Neistota definovania ich jednotky elektrického odporu je v ráde 10^{-9} do niekoľkokrát 10^{-8} . Tým sa tieto ústavy stávajú v oblasti jednotky a stupnice elektrického odporu relatívne nezávislými na BIPM. Pritom činnosť BIPM pre celosvetové zabezpečenie jednotnosti merania aj v oblasti elektrického odporu je bezpodmienečne nutná. Ich výskumno-koordináčna činnosť zameraná aj na vyhodnocovanie výsledkov dosiahnutých v rôznych metrologických ústavoch je zárukou jednotnosti merania odporu na celom svete. Súčasťou tejto činnosti sú aj pravidelné porovnania referenčných etalónov odporu v BIPM. Vychádzajúc z týchto výsledkov bola pre Klitzingovu konštantu od 1.1.1990 prijatá konvenčná hodnota $R_{K-90} = 25\,812,807\ \Omega$. V nadväznosti na ňu bola upravená na celom svete hodnota referenčných etalónov odporu, a teda aj jednotky elektrického odporu o $-1,90\ \mu\Omega$.

S ohlásením objavenia kvantového Hallovho efektu, Klausom von Klitzingom, v roku 1980 začala intenzívna činnosť metroológov na využití tohto javu pre metrologiu elektrického odporu. Odvtedy vývoj veľmi rýchle postupoval a kombinovaná štandardná neistota meraní kvantového Hallovho odporu $R_H(i)$, ktorý je rovný:

$$R_H(i) = \frac{R_K}{i} = \frac{h}{i e^2}, \quad (5.1)$$

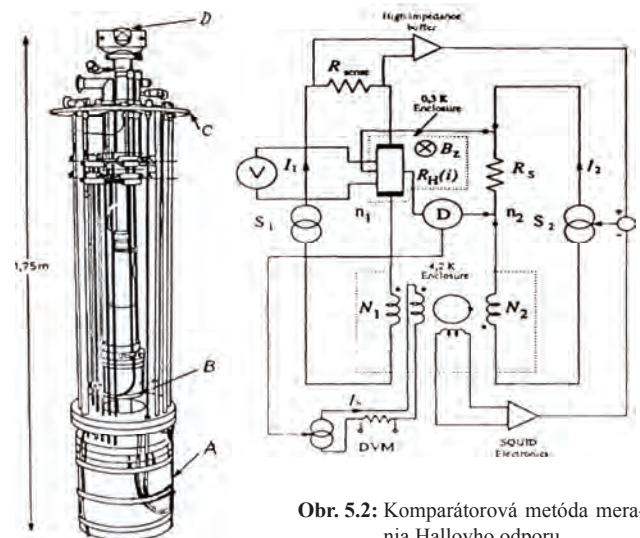
kde $R_K = h/e^2$ je von Klitzingova konštant a i je celé číslo = 1, 2, 3 atď., h/e^2 je základná fyzikálna konštant, kde h je Plankova konštant a e je elementárny elektrický náboj, poklesla z $5 \cdot 10^{-6}$ v roku 1980 na $2,4 \cdot 10^{-8}$ v roku 1989. Neskôr s platnosťou od 1. januára 1990 konvenčne dohodnutá hodnota pre R_K , ktorá sa označila R_{K-90} , bola použitá ako reprezentácia ohmu. Táto umožňuje tradičný etalón odporu (jeho hodnotu) definovať na základe kvantového Hallovho javu s neistotou $\leq 1 \cdot 10^{-8}$.

Fyzikálne vysvetlenie kvantového Hallovho efektu aj so stručným popisom vzoriek, supravodivých častí zariadenia včítane supravodivého magnetu, kryostatu a popisu použitej metodiky porovnania je v časti 2.2.

Pri meraní kvantového Hallovho odporu je napríklad v SMU používaná zostava supravodivého magnetu so závesom pre vzorku MOSFETU a héliovým chladiacim zariadením, ktorá je schématicky zobrazená na obr. 5.1. V obrázku je použité nasledujúce označenie:

- A – supravodivý magnet (magnetická indukcia $B=13,5\ T$),
- B – He chladiace časť zariadenia (He kryostat),
- C – nosný rám zariadenia,
- D – vstupná – konektorová časť zariadenia.

Zostava MOSFETu, pre kvantový Hallov jav je pripojená na 8 pinový konektor, ktorý sa umiestňuje do teplotne kontrolovanej oblasti supravodivého magnetu. Zostava He chladiaceho zariadenia, so základnou teplotou okolo 0,3 K, je umiestnená v strede supravodivého magnetu, ktorého maximálne dosažiteľná indukcia pri teplote 4,2 K je 13,5 T. Na prepojenie k meraciemu zariadeniu sú použité PTFE -Polytetra- fluóretylénové vodiče, ktorých izolačný odpor je minimálne 10 T Ω .



Obr. 5.1: Zostava magnetu a héliového chladiaceho zariadenia (kryostatu)

Obr. 5.2: Komparátorová metóda merania Hallovho odporu

Pri meraní kvantového Hallovho odporu je používaný kryogenný prúdový komparátor. Jeho zjednodušená schéma zapojenia je na obr. 5.2. Prúd I_1 z primárneho elektrického zdroja konštantného prúdu S_1 tečie cez vzorku a zároveň cez v sérii s ňou zapojené vinutie N_1 prúdového komparátora. Sekundárny prúd $I_2 \approx (N_1/N_2) \cdot I_1$, zo zdroja S_2 , odvodený z napätia generovaného prúdom I_1 , je zapojený do obvodu tak, aby tiekol jedným (alebo dvoma) 100 ohmovými etalónami R_s a sekundárnym vinutím N_2 kryogenného prúdového komparátora. Vinutia N_1 a N_2 sú zapojené tak, aby ich výsledný tok, ktorý je indikovaný SQUIDom, bol blízky nule. Relatívna presnosť pomeru vinutí N_1/N_2 , meraná binárnou technikou, je lepšia ako $1 \cdot 10^{-10}$, takže každá odchýlka v pomere prúdov I_2/I_1 z pomeru vinutí je korigovaná pomocou spätnej väzby SQUIDu výstupným signálom, spôsobeným nevyrovnanosťou toku, na S_2 . Pomer $R_H(i)/R_s$ môže byť stanovený z výstupu nulového detektora D. Tento výstup môže byť tiež použitý na vytvorenie vyrovnávajúceho prúdu I_b , ktorý tečie pomocným vinutím komparátora s N_2 závitmi a pracuje tak, aby vyrovnával výchylku nulového detektora na nulu. Z toho vyplýva záver, že pre meranie úrovne stability a linearity nulového detektora nie je významná. Pre vyrovnávaný detektor komparátora platí:

$$R_{H(i)} \cdot I_1 - R_2 \cdot I_2 = 0 . \quad (5.2)$$

Podobne pre vyrovnaný prúdový komparátor platí:

$$(N_1/N_2)I_1 + I_b - I_2 = 0 . \quad (5.3)$$

Z toho platí:

$$\frac{R_{H(i)}}{R_s} = \frac{N_1}{N_2} \left(1 + \frac{I_b}{I_2} \right) . \quad (5.4)$$

Vzťah platí za predpokladu, že I_b je malé. Prúd I_b je meraný pomocou digitálneho voltmetra (DVM) meraním úbytku napätia na odpore a kalibračný signál je vytvorený šuntovaním odporu R_s rezistorom hodnoty 100 M Ω . Pri uvádzanej metóde môže byť dosiahnutá vysoká presnosť merania za predpokladu eliminovania uplatňujúcich sa zvodových prúdov.

Pri tejto metóde merania kvantového Hallovho odporu sa používa napojenie komparátora na personálny počítač, ktorý zabezpečuje kontrolu reverzovaných prúdov I_1 a I_2 a súčasne čítanie údajov digitálneho voltmetra. Výsledky porovnania je možné získať v priebehu piatich minút. Pri zaťažení odporu R_s prúdom zodpovedajúcim výkonu 1 mW, relatívne náhodné neistoty sa pohybujú okolo $2 \cdot 10^{-9}$. Kvantový Hallov odpor, ako už bolo uvedené závisí od čísla i , ktorý vystupuje aj v jeho základnom vzťahu.

Od 1. januára 1990 je jednotka odporu na základe medzinárodnej dohody založená na kvantovom Hallovom efekte, podľa ktorého je odpor vyjadrený vo vzťahu k základným konštantám h/e^2 . Hodnota kvantového Hallovho odporu definovaného vzťahom (5.1) je závislá od platô i . Vychádzajúc z odporúčania č. 2 Medzinárodnej komisie pre váhy a miery (Comité International des Poids et Mesures) z roku 1988, bola 18. Generálnou konferenciou pre váhy a miery prijatá rezolúcia 6, ktorá okrem iného odporúča:

- prijať hodnotu 25 812,807 Ω ako konvenčnú hodnotu, označenú R_{K-90} , pre Klitzingovu konštantu R_K .
- túto hodnotu používať od 1. januára 1990 vo všetkých laboratóriách, ktorých základné meranie odporu vychádza z kvantového Hallovho odporu
- k tomu istému dátumu vo všetkých ostatných laboratóriách upraviť hodnoty referenčných etalónov elektrického odporu tak, aby boli v súlade s R_{K-90}

Toto odporúčanie vzniklo na základe rozsiahlych štúdií výsledkov dosiahnutých vo významných metrologických ústavoch. Hodnota 25 812,807 Ω , pre Klitzingovu konštantu R_K , je podiel Hallovho napätia $U_H(i)$ a prúdu I pre platô $i = 1$. Kvantový Hallov jav, spolu s hodnotou R_K , podľa záverov týchto analýz uskutočnených do roku 1988, sa dá využiť na vytvorenie reprezentácie ohmu s neistotou na úrovni neprekračujúcej $2 \cdot 10^{-7}$, pričom jeho reprodukovateľnosť je značne lepšia.

Metrologické ústavy, ktoré nemajú možnosť realizovať jednotku elektrického odporu na základe kvantového Hallovho efektu, ani nadviazaním na hodnotu Thomsonovho-Lampardovho kondenzátora, majú presnosť a správnosť svojej jednotky zabezpečenú len pomocou jej nadviazania na hodnotu ohmu v BIPM, prípadne niektorom ďalšom ústave majúcom základné meranie odporu. V medziobdobiach (me-

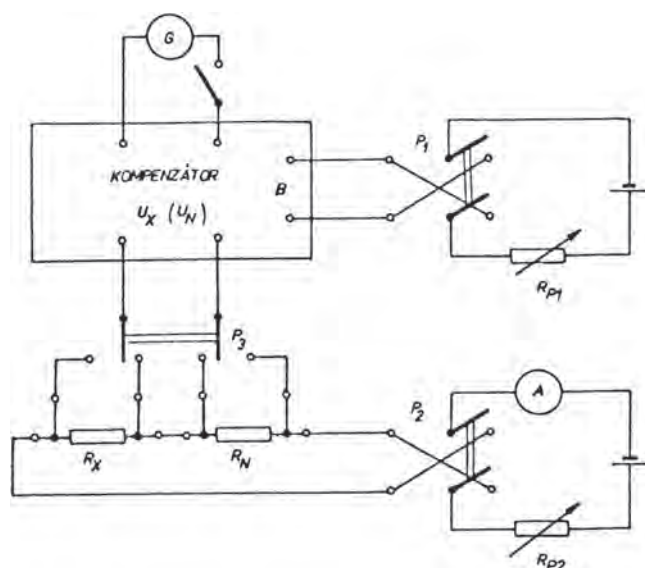
dzi jednotlivými nadviazaniami) sa v týchto ústavoch pokladá stredná hodnota ich primárneho skupinového etalóna za nemennú. S ohľadom na časovú stálosť strednej hodnoty sa volí interval jej nadviazovania. Ten býva obvykle dvoj až päťročný. V niektorých ústavoch je dostatočné množstvo informácií o vývoji strednej hodnoty primárneho skupinového etalónu v nadväznosti na jednotku odvodenú na základe absolútnych meraní. Ak na základe rozborov sa zistí, že trend strednej hodnoty vykazuje určitú pravidelnosť, je možné prognózovať jej vývoj a každoročne zavádzať korekciu na predpokladanú zmenu.

Na základe uvádzaného odporúčania 2 Medzinárodného výboru pre váhy a miery (CIPM) bola k 1. 1. 1990 upravená hodnota jednotky odporu a preto je treba starú históriu hodnôt referenčných etalónov korigovať o zmenu v roku 1990.

5.1 Etalonáž elektrického odporu pod 0,1 Ω

Neistota merania malých odporov je ovplyvňovaná predovšetkým prechodovými odpormi častí meracieho obvodu, odpormi prívodov a termoelektrickými napätiami. Pri meraniach v tejto oblasti je nutným predpokladom úspešnosti správneho merania pripojenie meraných rezistorov k meraciemu obvodu v štvorvodičovej konfigurácii.

Jedna zo základných metód, ktorá sa na meranie odporov malých hodnôt možno použiť je *porovnávací metóda* so sériovým zapojením porovnávaných odporov do prúdového obvodu meracej zostavy. Úbytky napätia medzi napäťovými svorkami porovnávaných etalónov, môžu byť merané napr. jednosmerným napäťovým kompenzátorom, ako je to zobrazené na **obr. 5.1.1**, číslicovým voltmetrom, alebo nejakým iným zariadením.



Obr. 5.1.1: Principiálne zapojenie aplikácie kompenzačnej metódy

Pomocou uvedených zariadení sa postupne zmerajú úbytky napätí U_x a U_N . Ak sa na meranie použije kompenzátor, pri meraní sa nevyžaduje správne nastavenie pomocného prúdu kompenzátoru, ale záleží len na jeho dobrej časovej stálosti a na dobrej časovej stálosti prúdu v obvode porovnávaných odporov.

Zjednodušený postup pri porovnávaní odporov malých hodnôt kompenzátorom v zapojení podľa **obr. 5.1.1** je nasledujúci:

- Prepínačom P_2 sa pripoja porovnávané rezistory na prúd. Ten sa pomocou regulačnej dekády R_{p2} a ampérmetra A nastaví taký, aby neprekračoval dovolenú hodnotu zaťaženia žiadneho z porovnávaných rezistorov.
- Prepínačom P_1 sa pripojí kompenzátor na pomocný prúd. Ten sa pomocou regulačnej dekády R_{p1} nastaví taký, aby sa pomocou neho približne kompenzoval úbytok napätia na porovnávaných rezistoroch. Pritom je najvhodnejšie dosiahnuť stav, aby prvá dekáda kompenzátora bola nastavená v polohe 10, prípadne inej polohe, nie však nižšej ako 1. Nastavený prúd nesmie prekročiť hodnotu najvyššieho dovoleného pomocného prúdu kompenzátora.
- Po pripojení rezistora R_N ku kompenzátoru, pomocou prepínača P_3 , sa kompenzátorom zmeria úbytok napätia na ňom, a to najskôr pre smery prúdov vyplývajúce z polarít pripojených zdrojov, a potom pre ich zmenené smery. Polaritu prúdov, s cieľom vylúčiť termoelektrické napätia, meníme prepínačmi P_1 a P_2 .
- Následne sa analogicky ako pri meraní úbytku napätia na R_N pomocou prepínača P_3 sa pripojí ku kompenzátoru rezistor R_x a zmerajú sa na ňom úbytky napätia pre obidva smery prúdov.
- So zámerom preverenia stability zapojenia sa ku kompenzátoru znovu pripojí rezistor R_N a pri nezmenených nastaveniach regulačných odporov sa zmerajú na ňom úbytky napätia.

Z nameraných hodnôt úbytkov napätí tak pre U_x ako aj U_N pre rôzne polarít berieme stredné aritmetické hodnoty. Výslednú hodnotu odporu R_x vypočítame podľa vzťahu (5.1.1).

$$R_x = \frac{U_x}{U_N} \cdot R_N \quad (5.1.1)$$

Neistota určenia hodnoty R_x závisí predovšetkým od chýb použitého kompenzátora a od neistoty hodnoty referenčného etalóna R_N . Hodnotu R_x určíme najpresnejšie vtedy, ak porovnávané rezistory majú rovnaké menovité a blízke konvenčne skutočné hodnoty. V takom prípade, pri meraní úbytkov napätia pomocou kompenzátora, sa údaj prvých dekád kompenzátora nemení a tým vylučujeme chyby týchto dekád. Na zníženie chýb výslednej hodnoty môžeme výhodne aplikovať zavedenie korekcií na hodnoty dekád kompenzátora.

Táto metóda merania, ktorú nazývame aj *kompenzačnou metódou* merania odporov, je vhodná na meranie menších odporov, a to maximálne do 100 Ω . V tomto rozsahu, pri porovnávaní rezistorov v štvorvodičovom zapojení, môžeme dosiahnuť relatívne chyby výsledných hodnôt nepresahujúce $1 \cdot 10^{-4}$ a pri použití kvalitnejšieho kompenzátora, prípadne aj zavedenia korekcií nepresahujúce až niekoľkokrát 10^{-5} .

Hlavnou výhodou metódy je, že vo vyrovnanom stave, napäťovými svorkami etalónov a teda ani spojovacími vodičmi pripájajúcimi etalóny ku kompenzátoru netečie žiadny prúd. Tým sú vylúčené tak odpory prívodov, ako aj prechodové odpory napäťových svoriek. Na vylúčenie vplyvu termoelektrických

napätí postačí robiť merania pri zmenených polaritách napájacích zdrojov a ako výsledok brať aritmetický priemer. Nevýhodou tohoto zapojenia je, že sa vyžaduje stálosť prúdového pomeru medzi prúdom tečúcim odpormi a pomocným prúdom kompenzátora aspoň na úrovni minimálnej zmeny meranej hodnoty napätia potrebnej pre najmenšiu čitateľnú výchylku. Pri kvalitných meraniach je táto zmena prípustná len v ráde 10^{-6} . Na takejto vysokej úrovni zabezpečiť stálosť pomeru prúdov je prakticky nemožné. S ohľadom na túto skutočnosť sa v tejto oblasti kompenzátor dá použiť v najlepšom prípade len na merania s neistotami niekoľkokrát 10^{-5} .

Pri porovnávačnej metóde sa na meranie úbytkov napätia miesto kompenzátora často používajú číslicové voltmetry. Tým odpadá zložitý obvod kompenzátora a meranie sa zjednoduší. Často sa takéto merania robia pre viac rezistorov zapojených v sérii s jedným alebo dvoma referenčnými odpormi. Prepojovanie číslicového voltmetra, na postupné meranie úbytkov napätí na jednotlivých rezistoroch, je obvykle zabezpečované pomocou scanera (prepínača meracích miest), ktorý by mal mať primerane znížené termonapätia a mal by byť riadený personálnym počítačom.

Väčší význam pre správne meranie malých odporov majú *Thomsonove alebo Kelvinove (niekedy nazývané aj dvojité) odporové mostíky*. Pri nich prechádza porovnávanými odpormi taktiež rovnaký prúd, ako v prípade kompenzačnej metódy, ale pomer úbytkov napätí sa určuje pomocou vyrovnaní odporových deličov, ktoré sú pripojené na napäťové svorky porovnávaných odporov.

Základné zapojenie takéhoto mostíka je na **obr. 5.1.2**. Odpor R_1 a R_2 majú malé hodnoty, zatiaľ čo odpory R_3 , R_4 , R_3' a R_4' sú podstatne väčších hodnôt. Odpor R_5 zahrňuje odpor spojovacieho vedenia medzi odpormi R_1 a R_2 a prechodové odpory na prúdových svorkách týchto odporov, a to S_2 a S_3 . Tieto nie sú konštantné, ale sú závislé od stavu svoriek (od akosti povrchu svoriek, tlaku pôsobiaceho na pripojené vodiče, nečistôt styčných plôch atď.). Porovnávané odpory sú zapojené v sérii, takže nimi tečie rovnaký prúd I . Napäťové vývody porovnávaných odporov sú pripojené k pomerovým vetvám mostíka. Nulovým indikátorom je tu obvykle galvanometer, ktorého vnútorný odpor sa volí obvykle okolo 50 Ω , aby mal čo najväčšiu napäťovú citlivosť. Pri väčších nárokoch na citlivosť je galvanometer pripojený k mostíku cez fotoelektrický zosilňovač.

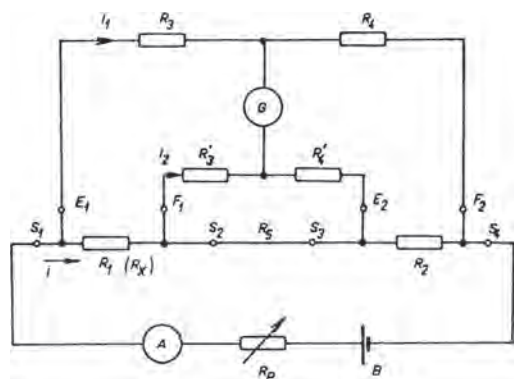
Transfiguráciou odporového trojuholníka zloženého z odporov R_3' , R_4' a R_5 do hviezdy, môžeme z tohoto mostíka vytvoriť jednoduchý mostík Wheatstoneovho typu. Pre takýto mostík platí nasledujúca podmienka rovnováhy:

$$R_1 = R_2 \cdot \frac{R_3}{R_4} + \frac{R_4 \cdot R_5}{R_3 + R_4 + R_5} \cdot \left(\frac{R_3'}{R_4'} - \frac{R_3}{R_4} \right) = R_2 \cdot \frac{R_3}{R_4} + K, \quad (5.1.2)$$

kde:

$$K = \frac{R_4 \cdot R_5}{R_3 + R_4 + R_5} \cdot \left(\frac{R_3'}{R_4'} - \frac{R_3}{R_4} \right) \quad (5.1.3)$$

je takzvaný korekčný člen.



Obr. 5.1.2: Principiální schéma zapojení Thomsonova mostíka

Pretože vzťah vyjadrujúci podmienku rovnováhy pre Thomsonov mostík je veľmi zložitý a okrem toho správnu hodnotu odporu spojky medzi porovnávanými odpormi je veľmi ťažké určiť, je nutné na zjednodušenie rovnice, aby sa korekčný člen rovnal, alebo aspoň bol veľmi blízky nule. Z tohto dôvodu sú odpory R_3 a R_3' konštruované ako simultánne pracujúce dvojité odporové dekády, pre ktoré pri každom nastavení platí $R_3 = R_3'$. Keď si ešte pri meraní zvolíme $R_4 = R_4'$, vo vzťahu pre korekčný člen dostaneme rovnosť výrazov v zátvorke a tým sa celý korekčný člen rovná nule a zmizne. Potom vzťah na výpočet hodnoty meraného etalóna R_X , ktorý sa do mostíka zapája miesto odporu R_1 , je rovnaký ako pri Wheatstoneovom mostíku:

$$R_X = R_2 \cdot \frac{R_3}{R_4} \quad (5.1.4)$$

Pri meraniach odporu, ak sa chceme vyhnúť chybám, je treba presne dodržať podmienky $R_3 = R_3'$ a $R_4 = R_4'$. To je však s ohľadom na problémy s bezchybným dojustovaním odporových prvkov mostíka prakticky nedosiahnuteľné. Vychádzajúc z tejto skutočnosti, pri prísnejšom posudzovaní chýb merania nemôžeme korekčný člen zanedbať.

Rozbor neistoty merania odporu na mostíku vplyvom chýb dojustovania odporových prvkov hlavných (vonkajších) a vnútorných pomerových ramien mostíka je v [5.1.1].

Thomsonovým mostíkom priamo meriame odpor s chybami okolo 0,1 % (v najlepšom prípade okolo 0,05 %). To pre kvalitnejšie merania nie je dostatočné. Preto pri meraní volíme niektorú zo zložitejších metód merania. Najčastejšie je to dvojnásobné alebo viacnásobné vyvažovanie mostíka so zámenami niektorých odporov, prípadne volíme zapojenie umožňujúce elimináciu vplyvu odporu spojky medzi porovnávanými odpormi.

Najbežnejšia je metóda vzájomnej zámény porovnávaných rezistorov. Metóda predpokladá porovnanie rezistorov rovnakých nominálnych hodnôt. Pri jej aplikácii porovnáваме odpor R_X s odporom R_2 pri oboch smeroch prúdu, najskôr v normálnom a potom pri vzájomne zamenenom zapojení odporov R_X a R_2 . Výsledok získame ako aritmetický stred týchto dvoch meraní (v normálnom a vzájomne zamenenom zapojení porovnávaných rezistorov). Účelom metódy je zmenšiť hodnotu korekčného člena uplatňujúcu sa pri výpočte hodnoty R_X . Keďže výsledok získavame ako aritmetický stred dvoch porovnaní (pre vzájomne vymenené odpory R_X a R_2), mala by byť

stredná hodnota korekčných členov z oboch meraní $K_s = (K_1 + K_2)/2$ rovná nule, alebo by mala byť čo možno najmenšia. Pre strednú hodnotu korekčného člena z uvedených dvoch meraní, po zavedení určitých zjednodušujúcich predpokladov, podľa literatúru [5.1.2], platí:

$$K_s = \frac{1}{2} \cdot \frac{R_5}{R_3 + R_4 + R_5} \cdot \left[\Delta R_4' \cdot \left(\frac{\Delta R_4'}{R_4} + \frac{\Delta R_3}{R_3} \right) \right], \quad (5.1.5)$$

kde ΔR_3 a $\Delta R_4'$ sú odchýlky voči nominálnym hodnotám odporov (nastaveným pri vyvážení mostíka) pre ramená R_3 a R_4' .

Zo vzťahu je vidieť, že táto metóda skutočne znižuje hodnotu korekčného člena, pretože v hranatej zátvorke sú len malé veličiny. Ak pri meraní je $R_3 = R_4' = 1000 \Omega$ s pomernými odchýlkami od nominálnej hodnoty $2 \cdot 10^{-4}$ a odpor spojky $R_5 = 0,1 \Omega$, je hodnota korekčného člena $K_s \approx 2 \cdot 10^{-9} \Omega$.

Pre prípad, že sa uplatnia odchýlky všetkých odporov meracieho obvodu mostíka od ich nominálnej hodnoty, je, podľa [5.1.2], najväčšia možná hodnota korekčného člena daná vzťahom:

$$|K_s| = 4 \delta_{R'}^2 \cdot R_s, \quad (5.1.6)$$

kde $\delta_{(R)}$ sú najväčšie možné pomerné odchýlky odporov v meracom obvode.

Ak je odpor spojky $R_5 = 0,1 \Omega$, $\delta_{(R)} = 2 \cdot 10^{-4}$, pre hodnotu korekčného člena vychádza: $K_s \approx 1,6 \cdot 10^{-8} \Omega$.

Pomocou tejto metódy sa výrazne zníži vplyv korekčného člena a vplyv chýb pomerových vetiev mostíka. Pri dvojitých mostíkoch triedy presnosti 0,02 sa touto metódou dosahujú relatívne chyby merania odporu neprekračujúce $5 \cdot 10^{-4}$.

Pri vyšších nárokoch na dosiahnutie malých chýb merania odporu Thomsonovým mostíkom sa používa *substitučná metóda merania*. Pri nej sa uplatňujúci vplyv zvyškovej hodnoty korekčného člena dá zanedbať. Táto metóda aplikovaná na Thomsonov mostík je analogická ako pri meraní odporu Wheatstoneovým mostíkom. Pri oboch smeroch prúdu zmeriame najskôr odpor rezistora R_X a potom odpor rezistora R_N . Porovnávané rezistory obvykle zapájame do mostíka miesto odporu R_1 . Porovnávací odpor R_2 , ktorý má rovnakú menovitú hodnotu ako odpory R_X a R_N , zostáva v priebehu meraní nezmenený. Ak sú hodnoty R_X a R_N dostatočne blízke, vylučujú sa touto metódou chyby niektorých častí pomerových vetiev. Pri takomto meraní však treba počítať s uplatnením chýb od zmien prechodových odporov na potenciálnych svorkách rezistorov, ktoré vznikajú pri zámene rezistorov. Na výpočet hodnoty meraného etalóna je možné použiť známy vzťah:

$$R_X = R_N \cdot \frac{R_X'}{R_N'} \quad (5.1.7)$$

Neistota hodnoty odporu R_X zistenej pri použití tejto metódy je závislá od neistoty hodnoty referenčného etalóna R_N , od uplatňujúcich sa chýb odporových poddekad mostíka, a to tých, ktoré sú v priebehu vyrovnávania mostíka prestavované, od citlivosti mostíka s galvanometrom, od neistôt spôsobených zmenou okolitých podmienok, od zmien prechodových odporov na potenciálnych svorkách etalónov,

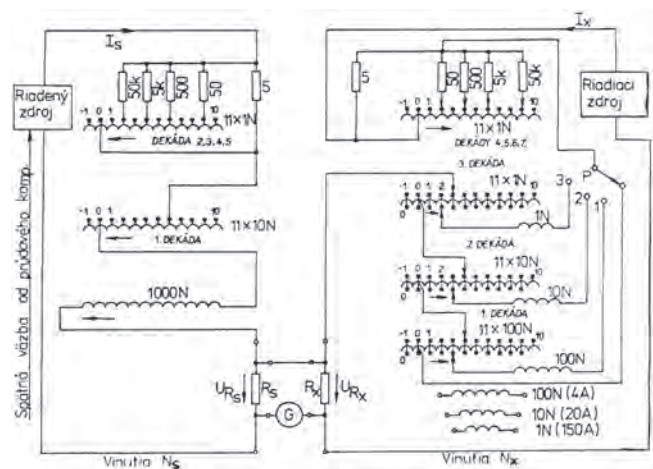
METROLOGIE VLASTNOSTÍ ELEKTRICKÝCH PRVKŮ

ktoré vznikajú pri ich pripájaní porovnávaných rezistorov k mostíku a od niektorých ďalších vplyvov. Pri kvalitnejších dvojitých mostíkoch možno touto metódou dosiahnuť, v závislosti od meranej hodnoty, relatívnu výslednú neistotu výsledku niekoľkokrát 10^{-4} až niekoľkokrát 10^{-5} .

Menšie chyby merania malých odporov majú niektoré špeciálne upravené Thomsonove mostíky, ktoré umožňujú odstrániť vplyv kolísania prechodových odporov na napäťových svorkách rezistorov a zmenšiť vplyv odporu spojky R_s na chyby merania, alebo niektoré ďalšie špeciálne mostíky (napr. aj presné číslicové mikroohmmetre).

Doteraz uvedené konvenčné metódy merania malých odporov v štvorvodičovom zapojení sú založené na porovnávaní úbytkov napätí na porovnávaných rezistoroch, za predpokladu, že rezistormi tečú rovnaké prúdy. Pomer hodnôt odporov je potom odvodený z pomeru napätí na nich. Tento postup je používaný tak pri porovnávaní odporov na kompenzátore, či pri meraní úbytkov napätí číslicovými voltmetrami, ako aj pri meraní dvojitým odporovým mostíkom. Presnejšie porovnanie v oblasti malých odporov je možné robiť pomocou jednosmerného prúdového mostíka komparátora. Pri porovnávaní odporov na takomto mostíku sa v procese merania nastavuje na porovnávaných odporoch rovnaký úbytok napätia a pomer hodnôt odporov sa určuje z pomeru hodnôt odporní pretekajúcich prúdov.

Základný popis, tak princípu činnosti, ako aj postupu merania odporu na mostíku s jednosmerným prúdovým komparátorom je v časti 3.2.2. Na mostíku je možné použiť tak metódu priameho merania odporu, ako aj substitučnú metódu, prípadne tarovacia metódu, pri ktorej postupne zmeriame odchýlky hodnôt meraných etalónov od hodnoty etalóna, ktorý je zapojený ako referenčný. Pre oblasť malých odporov je na mostíku s výhodou možné použiť meranie v určitom pomere od 1000:100 až do 1000:1.

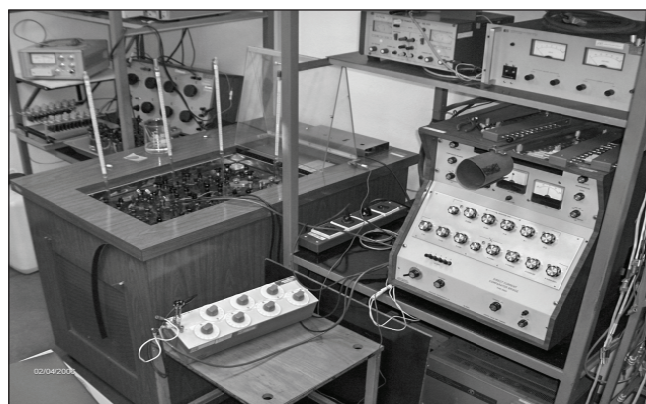


Obr. 5.1.3: Zjednodušená schéma vinutí prúdového mostíka komparátora

Hlavným zdrojom chýb väčšiny odporových mostíkov je chyba linearity meracích dekád, ktorá je spôsobená nepresným dojustovaním hodnôt členov týchto dekád a ich časovou nestálosťou. Zjednodušene zobrazené vinutia jednosmerného prúdového mostíka komparátora Guildline 9920 pre stranu R_s a R_x sú na obr. 5.1.3. V prípade takéhoto mostíka linearita

prvých hodnotou najvyšších dekád však nezávisí od hodnôt odporu, ale od pomeru počtu závitov, ktorý je mimoriadne správny a stály. Na kontrolu linearity dekád sú v mostíku zabudované referenčné vinutia 100, 10 a 1 závit, ktoré slúžia na kontrolu linearity prvých dekád a súčasne sa používajú pri pomerových meraniach. Chyby linearity prvých troch dekád strany R_x a prvej dekády strany R_s sú podstatne menšie ako $1 \cdot 10^{-7}$ (a je ich už ťažko odlišiť od šumu, ktorý je $3 \cdot 10^{-8}$ z maximálnej hodnoty meracieho rozsahu). Chyby ďalších dekád (na strane R_x je to štvrtá až siedma a na strane R_s druhá až piata) sú taktiež dané počtom závitov, ale tu už zlomkových, ktoré sú vytvorené odporovými deličmi. Vzájomná nadväznosť týchto dekád závisí od pomeru odporov (ohmickej hodnôt v Ω) 5 : 50 : 500 : 5 k : 50k. Aby mostík mal zaručené relatívne chyby neprekračujúce $1 \cdot 10^{-7}$, je potreba pri štvrtej dekáde R_x a pri druhej dekáde R_s zaručiť relatívne chyby menšie ako $1 \cdot 10^{-4}$ a v nadväznosti na ne aj relatívne chyby ďalších – hodnotou nižších dekád. Na to slúžia dojustovateľné rezistorové prvky, ktoré sú v mostíku zabudované a umožňujú dojustovanie dekád mostíka na úrovni jeho hladiny šumu. Táto justáž je mierne skomplikovaná skutočnosťou, že hodnoty odporových deličov vytvárajúcich zlomkové vinutia sú ovplyvňované aj zmenami prechodových odporov prepínačov týchto dekád. Mostík je konštruovaný tak, že relatívne chyby odporovými deličmi vytváraných zlomkových vinutí je možné dosiahnuť na úrovni lepšej ako $1 \cdot 10^{-4}$.

Jednosmerný mostík komparátor Guildline 9920 okrem porovnávaní odporov rovnakých menovitých hodnôt, umožňuje porovnávať odporové etalóny aj rôznych menovitých hodnôt, a to v pomere 1000:100; 1000:10 a 1000:1. Tento pomer je vytváraný nahradením základného vinutia prvej dekády 11 x 100 N (N = závit, závitov) za pevných 100 N; resp. 10 N či 1 N. Takéto pomerové merania, ktorých chyby je možné presne analyzovať, sa s výhodou využívajú na správne odvodenie desiatkových dielov a násobkov Ω . Ďalšie podrobnosti o mostíkovom komparátore sú v literatúre [5.1.4], [5.1.5] a [5.1.6].



Obr.: 5.1.4: Zostava meracieho zariadenia na meranie malých odporov s prúdovým komparátorom Guildline 9920, prúdovým zdrojom HP 6260A do 100 A, komutačným prepínačom a olejovým termostatom Guildline 9730 CR

Mostíkovým komparátorom sa porovnávajú priamo dva etalóny odporu R_s a R_x (obr. 3.2.2). V prípade pomerových meraní odporov pod $0,1 \Omega$ je to obvykle v pomere, ktorým môže-

me porovnať odpor s vyššou hodnotou (napr. etalón hodnoty $0,01 \Omega$ sa porovná v pomere 1000:100 s referenčným etalónom hodnoty $0,1 \Omega$ pri prúdoch $300 \text{ mA} : 3 \text{ A}$). Porovnávané etalóny sú zapojené v dvoch samostatných obvodoch so samostatnými zdrojmi prúdu JP_s (riadený zdroj) a JP_x (riadiaci zdroj). Pomer odporov určujeme z pomeru nimi tečúcich prúdov I_s a I_x , a to po vyrovnaní úbytkov napätia na týchto odporoch (U_{R_s}) a (U_{R_x}). Na kontrolu rovnosti úbytkov napätia na odporoch slúži galvanometer G. Pomer prúdov tečúcich porovnávanými odpormi meriame pomocou jednosmerného prúdového komparátora.

Pri nulovej výchylke galvanometra platí:

$$U_{R_s} = U_{R_x} \Rightarrow I_s \cdot R_s = I_x \cdot R_x \Rightarrow \frac{R_s}{R_x} = \frac{I_x}{I_s} \quad (5.1.8)$$

Ak aj detektor indikuje nulovú výchylku platí:

$$I_s \cdot N_s = I_x \cdot N_x \Rightarrow \frac{I_s}{I_x} = \frac{N_x}{N_s} \quad (5.1.9)$$

Z rovníc (5.1.8) a (5.1.9) vyplýva:

$$\frac{R_x}{R_s} = \frac{I_s}{I_x} = \frac{N_x}{N_s} \quad (5.1.10)$$

Na zjednodušenie vyrovňovanie komparátora sa vyrovňovanie magnetického toku v jadre komparátora robí riadením veľkosti prúdu I_s pomocou spätnej väzby. To sa robí automaticky po predchádzajúcom hrubom ručnom nastavení veľkosti tohto prúdu a jeho počiatočnom vyvážení.

Mostíkový komparátor je konštruovaný tak, že vinutie na strane referenčného etalóna má 1000 závitov a od nich môže byť zväčšené, alebo zmenšené o 11,1110 závitov, ktoré sú označené ako n_s . Pomocou takto vytvorených závitov $\pm (11,1110)$ sa pri meraní zavedie do komparátora známa odchýlka referenčného etalóna od jeho menovitej hodnoty s relatívnou chybou neprekračujúcou $1 \cdot 10^{-7}$. Ak vyjdeme zo vzťahov (5.1.8) až (5.1.10) výsledná rovnica mostíka dostane nasledujúcu podobu:

$$R_x = \frac{N_x}{1000} \cdot \frac{R \cdot (1 + \Delta_s)}{1 + N_s} \quad (5.1.11)$$

Ak pri meraní na mostíku nastavíme $\Delta_s = n_s$, po vyrovnaní mostíka aj pri pomerových meraniach platí vzťah:

$$R_x = R \cdot \frac{N_x}{1000} \quad (5.1.12)$$

a na komparátore priamo čítame výslednú konvenčne skutočnú hodnotu porovnávaného odporu aj pri pomerových meraniach v ohmoch.

V obvode kalibrovaného odporu je sedemdekádové porovnávacie rameno mostíka, z ktorého sú pri pomerových meraniach využiteľné len dekády 4, 5, 6 a 7. Prvé tri dekády tohto ramena sú pri pomerových meraniach nahradené pevnými neregulovateľnými vinutiami o 100, 10 alebo 1 závite zaťažiteľné prúdmi 4 A, 20 A a 150 A. Mostík obsahuje štvorpólový prepínač, ktorý súčasne komutuje obidva porovnávané rezistory, a to tak vzhľadom k mostíku, ako aj k napájacím zdrojom. Veľké prúdy sú komutované externým komutačným prepínačom dimenzovanom na 100 A.

Maximálna citlivosť mostíka je obmedzená hladinou šumu, ktorá odpovedá asi 3 mikroampérzávitom. Pri prúde 100 mA a zapojených 1000 závitoch je veľkosť šumu asi $3 \cdot 10^{-8}$ z maximálnej hodnoty použitého rozsahu. Napät'ová citlivosť mostíka závisí od použitého galvanometra. Pri citlivom galvanometri s fotoelektrickým zosilňovačom sa ľahko dosiahne citlivosť $0,01 \mu\text{V}$. Pri úbytku napätia 1 V na porovnávaných rezistoroch sa pri takejto citlivosti galvanometra dosiahne rozlíšenie $1 \cdot 10^{-8}$ z meranej hodnoty odporu.

Neistota hodnoty odporu R_x zistená pri použití tejto metódy je závislá od neistoty hodnoty referenčného etalóna R_N , od uplatňujúcich sa chýb použitého pomeru, od chýb odporových deličov vytvárajúcich zlomkové závitov mostíka, a to tých, ktoré sú v priebehu merania prepájované, od citlivosti mostíka s galvanometrom, od neistôt spôsobených zmenou okolitých podmienok, od zmien prechodových odporov a od niektorých ďalších vplyvov. Použitím tohto komparátora možno dosiahnuť v závislosti od porovnávaných hodnôt odporu, relatívnu rozšírenú neistotu výsledku v rozsahu odporových hodnôt od $0,1 \Omega$ do $0,001 \Omega$ okolo $3 \cdot 10^{-5}$ až niekoľko ppm. V prípade pomerových meraní 1000:10 pri nadväzovanej hodnote $1 \text{ m}\Omega$ je to okolo $1 \cdot 10^{-4}$ až $5 \cdot 10^{-5}$.



Obr. 5.1.5: Nízkoohmový etalón ZIP typ P 323 hodnoty $0,0001 \Omega$ pre prúdy 320 A (max. do 1000 A)



Obr. 5.1.6: Nízkoohmové etalóny Metra, typ RN hodnôt $0,1 \Omega$ a $0,0001 \Omega$ a Leeds & Northrup, typ 4222-B $0,01 \Omega$ a typ 4223-B $0,001 \Omega$

Literatúra:

- [5.1.1] Boháček, J.: Teórie měření. ČVUT Praha. 1988.
- [5.1.2] Fajt, V., Jakl, M.: Presná měření elektrických veličin. SNTL-ALFA, Praha. 1979.
- [5.1.3] Firemná literature Guildline Instruments Limited. (www.guildline.ca).

METROLOGIE VLASTNOSTÍ ELEKTRICKÝCH PRVKŮ

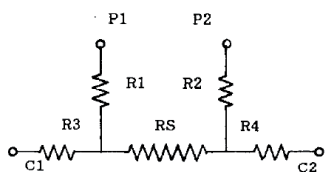
- [5.1.4] MacMartin, M. P., Kusters, N. L.: A direct-current-comparator ratio bridge for fourterminal resistance measurement. IEEE Trans. On Instr. and Meas. Vol IM-15, 1966, pp. 212 – 220.
- [5.1.5] Basu, S. K., Kusters, N. L.: Comparison of standard resistors by the d.c. current comparator. IEEE Trans. on Instrum. and Meas., Vol. IM 14, 1963, pp. 149-156.
- [5.1.6] Manuál k DC Current Compator Bridge 9920. Guildline.
- [5.1.7] Firemná literature Measurement International. (www.mintl.com).

5.2 Etalonáž odporu 0,1 Ω až 10 kΩ

Vlastnosti a měření etalonů odporu pro stejnosměrný signál

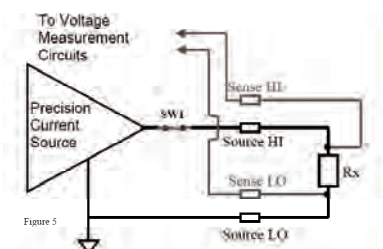
Měření etalonů při stejnosměrném proudu na sekundární úrovni jsou prováděna prakticky ve všech laboratořích. Měření se obvykle provádí porovnáním s etalonem R. Pokud jsou oba etalony umístěny v olejové lázni, sniží se tím podstatně problémy s teplotní závislostí odporu i vlivy termonapětí.

Odpory do 10 kΩ se měří čtyřsvorkově za účelem potlačení vlivu přívodů, viz **obr. 5.2.1**



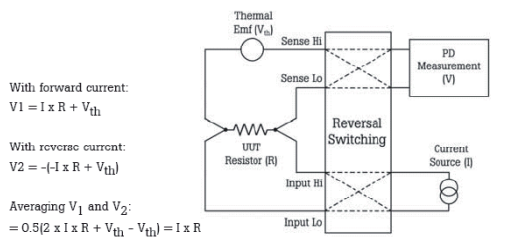
Obr. 5.2.1: Při měření etalonu odporu R_s se nesmí zapomenout na odpory přívodů ke svorkám.

Základní zapojení číslicového ohmmetru je na **obr. 5.2.2**



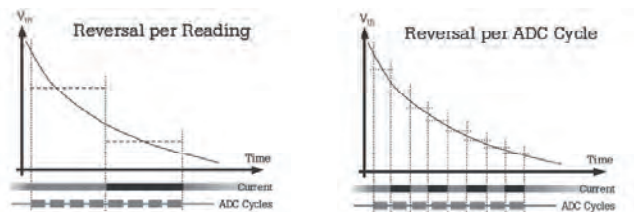
Obr. 5.2.2: Základní zapojení číslicového ohmmetru

Vliv termonapětí potlačují moderní multimetry užitím speciální funkce obvykle nazývané „True Ohm“. Podstatou této funkce je odstranění termonapětí tím, že se měří ve dvou krocích. Buď se otočí ve druhém kroku polarita zdroje proudu a výsledná hodnota R se získá jako průměr z měření v obou polaritách a nebo multimetr měří v prvním cyklu hodnotu R a ve druhém kroku je zdroj proudu odepnut a měří se pouze termonapětí, jak ukazuje **obr. 5.2.3**



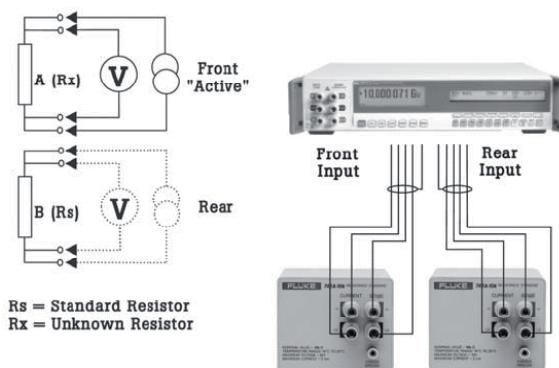
Obr. 5.2.3: Princip potlačení termonapětí (funkce true ohm), podle firmy Fluke

Přepínat může multimetr ve funkci true ohm různým způsobem, jak ukazuje **obr. 5.2.4**



Obr. 5.2.4: Příklady přepínacích cyklů u funkce true ohm, podle firmy Fluke

Nejjednodušší a pro praktické použití nejpřesnější a nejrychlejší je při kalibraci měření odporu přímé porovnání s etalonu odporu, při čemž se s výhodou využívají oba vstupy multimetru, pokud je jimi multimetr vybaven.



Obr. 5.2.5: Základní zapojení pro kalibraci etalonů odporu v běžné laboratorní praxi

Etalony odporu pro střídavý signál

Pro akustické pásmo frekvencí a v některých případech až do 1 MHz lze použít etalony s vypočitatelnou frekvenční závislostí.

Etalony pro střídavý signál se obvykle realizují v rozsahu hodnot odporu od 1 Ω do 100 kΩ. Pro frekvence přibližně do 1MHz jsou vhodné pro etalony foliové rezistory pro svou malou teplotní závislost řádu jednotek ppm, velkou stabilitu a dobrými frekvenčními vlastnostmi. Pro frekvence do asi 10 MHz se používají metalizované vrstevové rezistory. Je třeba volit provedení s vhodným poměrem délky a šířky tělíska, pokud možno bez spirální drážky. Lze najít typy s teplotní závislostí pod 15ppm/°C. V ČMI se používá sada Agilent 42030 kalibrovaná do 13 MHz.

Vlastnosti a měření drátových etalonů odporu pro střídavý signál

V případě že R je použit jako bočník, obvykle pro měření na 50Hz nebo při kalibraci revizních přístrojů, je zapotřebí znát modul impedance Z na pracovní frekvenci. Ten je možné určit pomocí speciálních RLC měřičů nebo voltampérovou metodou. Obvykle je zapotřebí znát Z_{50Hz} na frekvenci 50 Hz, ne R_{50Hz} a L_{50Hz} . Pro širší frekvenční rozsah se parametry etalonu R udávají dvěma složkami, reálnou hodnotou R a imaginární složkou vyjádřenou jako X, případně C nebo L. Tyto parametry se měří pomocí různých typů RLC metrů, při jejichž nastavení je třeba neopomenout uvést zvolené náhradní schéma.

Literatury týkající se frekvenční závislosti etalonů R je velmi málo. Pro etalon R výroby Metra publikoval prof. Boháček frekvenční závislost od 400 Hz do 1600 Hz v roce 1974. Později nebyly frekvenční závislosti ani pro R Metra a ani pro R ruské výroby změřeny a publikovány přesto, že jde o etalony používané velmi široce ve všech kalibračních zařízeních i v průmyslu. Drátové etalony R typu P310 P321, P331, stejně tak jako RN Metra byly určeny pro měření při stejnosměrném signálu a nemají připojovací svorky řešené pro měření střídavým signálem. Zvláště citlivé na připojení je měření malých a velkých hodnot R, jak je uvedeno v kap. 2.

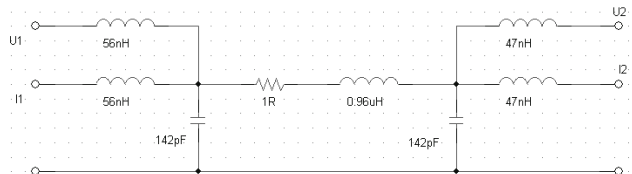
Provedení přívodů hraje důležitou roli, danou zvláště tím, že drátové etalony odporu nemají svorky konstruované pro střídavé měření. To se především projevuje při měření malých hodnot odporu, kde definice zkratu může podstatně ovlivnit naměřenou hodnotu. Nejméně vhodné jsou etalony Metra, kde přívody etalonu ke svorkám jsou dlouhé. U etalonů ZIP a Tinsley je konstrukce o něco lepší.

Čtyřpárové mosty (Agilent) jsou dále citlivé na vedení zemních spojů přívodních koaxiálních kabelů, protože měřené proudy protékají i vnějšími vodiči kabelů. Proto jsou malé hodnoty R ovlivněny způsobem spojení vnějších vodičů koaxiálních kabelů. Porovnáním měření pro klasický čtyřpárový short a short pro připojení čtyřpárového mostu na etalony ZIP se ukazuje, že pro frekvence do 1 kHz plně vyhoví provedení připojení, kde zemní propojení je provedeno na přípravku ve tvaru desky plošného spoje, na které jsou umístěny konektory BNC, od kterých jsou drátové krátké přívody na kontaktní plošky pod šrouby měřeného etalonu.

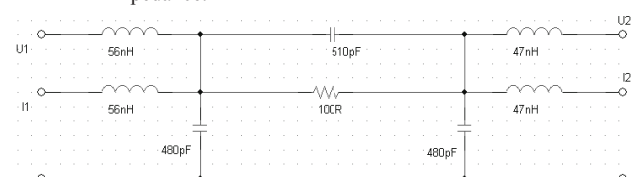
Náhradní zapojení drátových etalonů při měření při střídavém signálu.

Pro střídavé napájení je třeba definovat připojení kovového stínícíhopouzdraetalonu. To může být spojeno s jednou svorkou, pak je etalon dvousvorkový, nebo uzemněno a etalon je třísvorkový. Jako příklad bylo zvoleno třísvorkové zapojení a porovnány rozdíly dvou a třísvorkového zapojení. Dále jsou uvedena náhradní zapojení pro frekvenci 1 kHz podle měření etalonů.

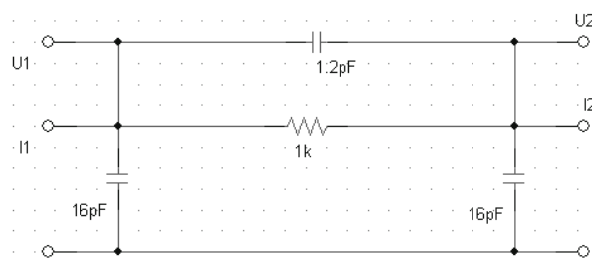
Etalony ZIP jsou vinuty těsně na kovovém pouzdře a tak je indukčnost a kapacita rozložena po celé ploše etalonu. Proto má střídavé náhradní schéma s diskretními prvky omezenou platnost jen pro danou frekvenci. Na obr. 5.2.6 až obr. 5.2.9 jsou ukázána náhradní zapojení pro různé typy etalonů R na frekvenci 1 kHz.



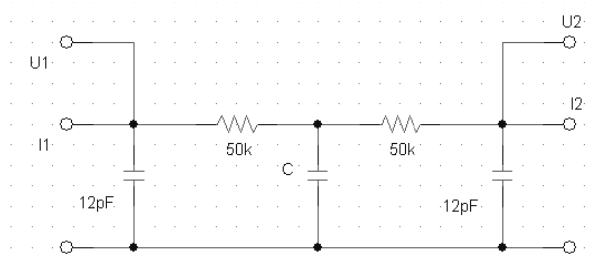
Obr. 5.2.6: Etalon ZIP 1 Ω má očekávanou sériovou induktivní složku impedance.



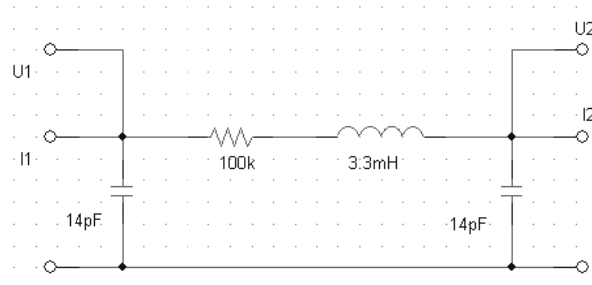
Obr. 5.2.7: U etalonu ZIP 100 Ω převládá již vliv kapacity



Obr. 5.2.8: Etalon Metra 1kΩ má kapacitní charakter



Obr. 5.2.9: U etalonu 100 kΩ podle obrázku 2.5.9 v tematické příloze č. 4/2007 se projevuje vliv konstrukční kapacity C



Obr. 5.2.10: Překreslené náhradní schéma z obr. 5.2.9

Podle naměřených hodnot a jejich zpracování byla stanovena diference impedance Z proti DC hodnotě odporu. Výsledky měření pro celou řadu výroby ZIP ukazuje tabulka 5.2.1

$$Z_{50\text{Hz}} = DC R \cdot (1 + AC/DC \text{ diference } Z_{50\text{Hz}})$$

Typ etalonu	Jmenovitá hodnota Ω	AC/DC diference $Z_{50\text{Hz}}$ μΩ/Ω	Nejistota μΩ/Ω
P310	0,01	+200	200
P321	0,1	+30	80
P321	1	+10	50
P321	10	-20	50
P331	100	+40	90
P331	1000	+20	90
P331	10 000	+20	90
P331	100 000	+40	90

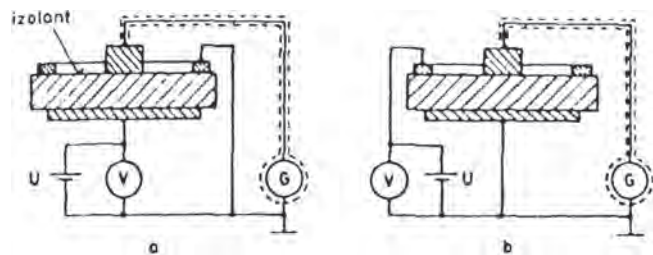
Tab. 5.2.1: Změna impedance etalonu na frekvenci 50 Hz proti stejnosměrné (DC) hodnotě

5.3 Etalonáž odporu nad 10 kΩ

5.3.1 Obecně

Pri meraní veľkých odporov je najväčším problémom vylúčenie vplyvu zvodových prúdov uplatňujúcich sa v celej meracej zostave, ktorých pôvod je v nedokonalnej izolácii jednotlivých prvkov zostavy. Meranie veľkých odporov je v podstate problémom merania extrémne malých prúdov. Z metód vhodných na meranie veľkých odporov sú najpoužívanejšie: výchylkové metódy, nulové metódy využívajúce Wheatstoneov mostík upravený na meranie veľkých odporov a rôzne modifikované dvojamenné mostíky, metódy využívajúce meradlá veľkých odporov s číslícovým výstupom a metódy využívajúce meradlá s analógovým či číslícovým výstupom na meranie izolačných odporov. Meradlá veľkých odporov vo všeobecnosti je možné charakterizovať spoločnou vlastnosťou, a to, že ich chyby merania odporu s veľkosťou meranej hodnoty stúpajú. V oblasti odporov od $10^{13} \Omega$ do $10^{15} \Omega$ sa chyby meraní pohybujú na úrovni okolo 0,3 % až do 10 % v závislosti od meranej hodnoty.

Výchylkové metódy pri meraní veľkých odporov sú analogické ako pri meraní stredných odporov. Využívajú sa najmä pri meraní hodnôt izolačných odporov izolantov a na kontrolu stavov izolácie elektrických obvodov, buď s ohľadom na ich funkčnosť, ale predovšetkým z hľadiska kontroly ich bezpečnosti. Na **obr. 5.3.1** je základné zapojenie na meranie: a) vnútorného izolačného odporu a b) povrchového izolačného odporu izolačných materiálov. Napätie pripojené k meranému objektu je merané voltmetrom, kým izolantom tečúci prúd obvykle galvanometrom G. Je to vlastne Ohmova metóda a hodnoty izolačných odporov vypočítame podľa vzťahu uvedeného pri výchylkových metódach pre stredné odpory (5.3.1).



Obr. 5.3.1: Meranie merného a povrchového odporu izolačných materiálov

Voltmeter meria nielen úbytok napätia na izolante, ale aj úbytok napätia na vnútornom odpore galvanometra. Správna hodnota izolantu R_{iz} , nezaťažená chybou od úbytku napätia na vnútornom odpore galvanometra, je:

$$R_{iz} = \frac{U_V - U_G}{I_G} = \frac{U_V}{I_G} - R_G, \quad (5.3.1)$$

kde: U_V je údaj voltmetra,
 U_G úbytok napätia na galvanometri,
 I_G údaj galvanometra,
 R_G vnútorný odpor galvanometra.

Neistota zistenia hodnoty R_{iz} je daná chybou meracej metódy a presnosťou použitých meracích prístrojov. Chyby spôsobené meracími prístrojmi závisia jednak od ich neistoty merania,

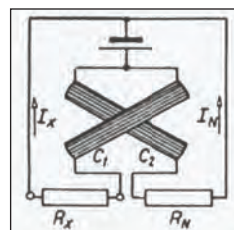
ktorá je pre výchylkové meracie prístroje vyjadrená triedou ich presnosti, ale aj od veľkosti výchyliek, ktoré prístroje pri meraní ukazujú. Ak pri meraní neuvažujeme s vnútorným odporom galvanometra, je výsledná hodnota odporu R_{iz} zaťažená chybou metódy, ktorá spočíva v tom, že namiesto napätia na izolačnom materiáli U_x meriame celkové napätie $U_V = U_x + U_G$. Potom chyba metódy vyjadrená v percentách je:

$$\delta_m = \frac{U_x + U_G - U_x}{U_x} \cdot 100 = \frac{U_G}{U_x} \cdot 100 = \frac{R_G}{R_{iz}} \cdot 100. \quad (5.3.2)$$

Chyba metódy vyjadrená v absolútnej hodnote je rovná $\Delta_m = +R_G$. Ak očakávame pri meraní neistotu zistenia hodnoty R_{iz} na úrovni do 0,1 %, musí byť úbytok napätia na galvanometri $U_G \leq 0,001 U_{iz}$. Vzhľadom na skutočnosť, že vnútorný odpor galvanometra je obvykle okolo 1000Ω , je zapojenie vhodné najmä na meranie izolačných odporov hodnôt väčších ako $1 M\Omega$, na ktoré bude mať vnútorný odpor galvanometra malý vplyv.

Na meranie veľkých odporov sa často používajú ohmmetre s magnetoelektrickým meracím systémom. Jeho použitím sa údaj meracieho prístroja v určitom rozmedzí stáva nezávislým od kolísania pripojeného napätia. Skrížené cievky otočného zariadenia sú pripojené na napätie podľa **obr. 5.3.2**. V sérii s cievkou C_1 , ktorej odpor je R_I , je zapojený neznámy meraný odpor R_X . V sérii s druhou cievkou C_2 s odporom R_2 je porovnávací odpor R_N . Pre prúdy v cievkach platí:

$$I_X = \frac{U}{R_X + R_I}; \quad I_N = \frac{U}{R_N + R_2}. \quad (5.3.3)$$



Obr. 5.3.2: Ohmmeter nezávislý na napätí zdroja na meranie veľkých odporov

Odpory cievok R_I a R_2 možno voči odporom porovnávaných rezistorov zanedbať. Pretože výchylka α meracieho zariadenia je úmerná pomeru prúdov tečúcich cievkami, pre jej hodnotu platí:

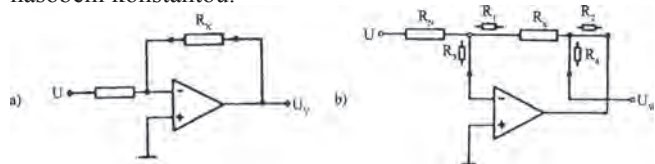
$$\alpha \approx \frac{I_X}{I_N} \approx \frac{R_N}{R_X}. \quad (5.3.4)$$

Pre konštantnú hodnotu R_N je prístroj ociahovaný v jednotkách odporu. Stupnica je rovnomerná a má hyperbolický priebeh. Ako napájacie zdroje sa pri laboratórnych prístrojoch používajú elektronické zdroje. V prípade prevádzkových meradiel sú to často aj batérie.

Výraznejší význam pre merania elektrického odporu s menšími chybami majú číslícové ohmmetre, ktoré dnes pokrývajú rozsah až do oblasti vysokoohmových odporov do $1 G\Omega$. Ich výstupom je priamy číslícový údaj. Tieto sa obvykle vyrábajú ako univerzálne prístroje na meranie elektrických veličín nazývané multimetre, ktoré okrem odporových rozsahov majú aj napät'ové a prúdové rozsahy. Ich chyby merania odporu sú často dostatočne nízke a pri aplikovaní

vhodnej metódy merania, je ich možné použiť aj pri vyšších nárokoch na správnosť meraní elektrického odporu.

Číslicové ohmmetre sú dvojakého druhu. Základom prvého druhu je číslicový voltmeter, ktorý je doplnený o lineárny prevodník odporu na jednosmerné napätie. Na prevod sa používa operačný zosilňovač v zapojení ako pri násobení konštantou.



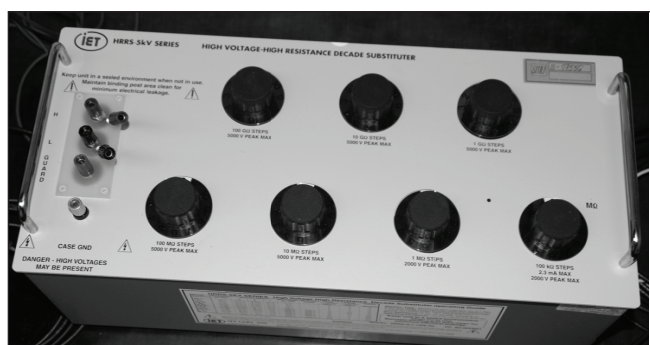
Obr. 5.3.3: Princíp číslicového ohmmetra

V najjednoduchšom prípade sa meraný odpor R_X zapája ako spätnoväzobný (podľa obr. 5.3.3) a do série so vstupom sa zapojí referenčný odpor R_N . Výstupné napätie operačného zosilňovača je priamo úmerné meranému odporu. Pre toto napätie platí:

$$U_V = -\frac{U}{R_N} \cdot R_X \quad (5.3.5)$$

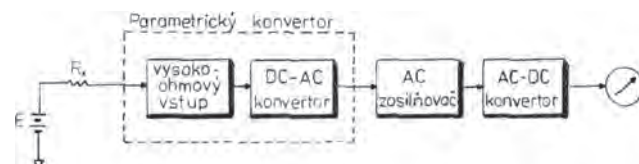
Ak pomer U/R_N je číselne rovný celistvej mocnine desiatich, číselná hodnota výstupného napätia bude mať rovnakú číselnú hodnotu ako meraný odpor R_X , a konštanta U/R_N určuje len polohu desatinnej čiarky. Výstupné napätie operačného zosilňovača sa meria jednosmerným číslicovým voltmetrom, ktorý indikuje hodnotu meraného odporu v Ω , k Ω prípadne M Ω . Meracie rozsahy sa obvykle prepínajú automaticky spolu s referenčnými odporami. Chyby merania závisia od neistôt hodnôt referenčných rezistorov, od chyby a stálosti napätia U , od vlastností použitého operačného zosilňovača, od metrologických parametrov číslicového voltmetra a prípadných ďalších vplyvov (včítane ovplyvnenia okolitými podmienkami).

Zvláštnym prevedením ohmmetrov na meranie veľkých odporov sú meradlá izolačných odporov. Tie sú podobného prevedenia ako uvádzané ohmmetre až na to, že umožňujú merať izolačné odpory aj pri vyšších napätiach (100, 500 a 1000) V, niekedy aj plynule v rozsahu do niekoľkých kV až do 10 kV resp. až do 15 kV. Tieto sa dnes vyrábajú buď s vibračným meničom prípadne s elektronickým zdrojom napätia. Problémom je ich kalibrácia pri vysokých prúdoch, keďže referenčné vysokoohmové odporové dekády sú obvykle dostupné len pre oblasť do 5 kV. Chyby týchto meradiel izolačných odporov sú závislé od meracieho rozsahu. Obvykle sú na úrovni od 5 % až do 20 % (pre hodnoty 1 T Ω).



Obr. 5.3.4: Presná vysokoohmová odporová dekáda MI HRRS-5kV určená na kalibrácie v rozsahu do 1,111 1 T Ω pri napätiach do 5 kV

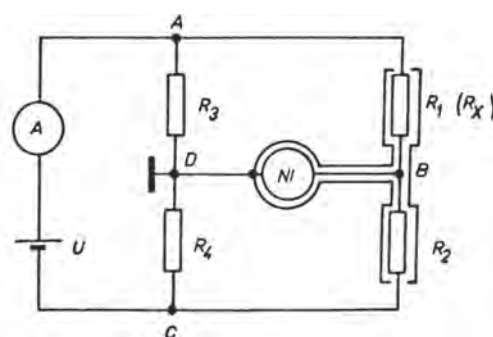
Na meranie veľkých odporov s mierne menšími chybami ako uvedené meradlá izolačných odporov, s rozsahmi merania až do $10^{16} \Omega$, sú na trhu dostupné špeciálne elektronické meradlá veľkých odporov. Tieto využívajú merací obvod známy ako parametrický konvertor impedancie s vlastným kmitaním. Takýto obvod vytvára veľkú vstupnú impedanciu pre vstupný signál a striedavý výstup vhodný pre zosilnenie extrémne slabého signálu. Základná bloková schéma takejto meradla je na obr. 5.3.5. Použitý konvertor (alebo vibrátor) má za cieľ odstrániť chyby pri zosilňovaní signálov takej malej úrovne, ako vznikajú pri meraní veľkých odporov.



Obr. 5.3.5: Základná bloková schéma meradla veľkých odporov

Z blokovej schémy je vidieť ako meradlo kombinuje vysokoohmový vstup s konverziou malého jednosmerného prúdu na striedavý prúd a po jeho zosilnení opätovnú premenu na jednosmerný prúd, ktorý je meraný citlivým jednosmerným ručičkovým prístrojom. Prístroj má obvykle viac rozsahov, ktoré sú ciachované v Ω a sú platné pre rôzne pripojené napätia. Ako parametrický prvok slúži mostíkový obvod s dvojicou kapacitných diód, so známou charakteristikou stykovej kapacity, ktorá sa mení s napätím diódy. Tento umožňuje prevod nepatrných jednosmerných prúdov na striedavé kmitanie. Prístroj je možné použiť aj na meranie malých prúdov a ak použijeme prídavné zariadenie pre vzorky izolačných materiálov, aj na meranie vnútorného a povrchového odporu izolantov.

Na takomto princípe pracujúce meradlo veľkých odporov je meradlo typu 4329 A od firmy Hewlett Packard. Jeho špecifikácia je nasledujúca: rozsah merania 500 k Ω až $2 \cdot 10^{16} \Omega$, presnosť merania odporu do 10 % z čítanej hodnoty odporu (chyby merania závisia od výchylky ručičky – na konci stupnice pre malý odpor 3 %, v strede stupnice 5 %).



Obr. 5.3.6: Základná schéma zapojenia mostíka na meranie veľkých odporov

Na meranie veľkých odporov s výrazným potlačením chýb merania je možné použiť upravený Wheatstoneov odporový mostík, ktorého principiálna schéma zapojenia je na obr. 5.3.6. Ten, podobne ako Wheatstoneov mostík pre stredné odpory, sa skladá z rezistorov R_1 až R_4 . Rezistory R_1 a R_2 sú hodnotami väčšie (obvykle vysokoohmové – minimálne 1M Ω) a odpory

METROLOGIE VLASTNOSTÍ ELEKTRICKÝCH PRVKŮ

R_3 a R_4 sú z oblasti stredných odporov (maximálne do 1 M Ω). Vysokoohmová časť mostíka aj vetva s nulovým indikátorom sú tienené. Tienenie je vodivo spojené s uzlom D. Ako nulový indikátor sa obvykle používa elektrometer s veľkým vstupným odporom (okolo 10¹⁴ Ω) a veľkou napät'ovou citlivosťou. Citlivosť mostíka závisí od pripojeného napätia a od pomeru odporov R_1/R_2 . Mostík má najvyššiu citlivosť pri pomere odporov $R_1/R_2 = 1$. So zvyšujúcim sa pomerom týchto odporov citlivosť klesá. To obmedzuje použitie mostíka na porovnávanie rezistorov rovnakých hodnôt (maximálne s pomerom do 10). Do mostíka miesto R_1 zapájame rezistor R_X , ktorého hodnotu meriame a miesto R_2 zapájame referenčný etalónový odpor R_S . Mostík vyvažujeme regulovateľnou odporovou dekadou R_4 . Pri vyváženom mostíku pre R_X platí známy vzťah:

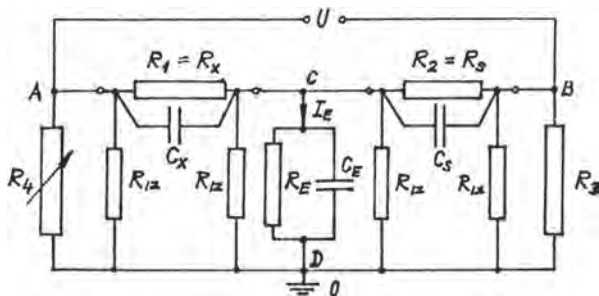
$$R_X = R_2 \cdot \frac{R_3}{R_4} \quad (5.3.6)$$

Zjednodušená náhradná schéma mostíka, zahrňujúca pri meraní uplatňujúce sa izolačné odpory, je na obr. 5.3.7. Medzi uzlami C a D je zapojený elektrometer, ktorý sa v zapojení uplatní vlastnou kapacitou C_E a vstupným odporom R_E . Hodnoty izolačných odporov R_{iz} sú vytvárané tak zvodmi porovnávaných odporov R_X a R_S ako aj izolačnými odpormi uzlov mosta a príslušných vodičov. Izolačné odpory pripojené paralelne k ramenám R_3 a R_4 znižujú hodnotu ich odporu, čím vnášajú do meraní chyby. Izolačné odpory pripojené paralelne k vstupnému odporu elektrometra R_E znižujú jeho citlivosť.

Vychádzajúc zo vzťahov pre Wheatstoneov mostík, v nasledujúcom, uvedieme niektoré podrobnosti okolo citlivosti mostíka a jeho chýb. Pri rozvážení mostíka o pomernú zmenu meracieho ramena $\varepsilon \ll 1$, medzi uzlami C a D sa objaví napätie:

$$\Delta U_E = \Delta I_E \cdot R_E \cong \frac{U \cdot [R_3 \cdot (1 + \varepsilon) R_S - R_4 \cdot R_X]}{R_3 \cdot R_S \cdot \sum R + 2 \cdot R_E \cdot R_3 \cdot R_S + R_E \cdot (R_3 \cdot R_X + R_4 \cdot R_S)} \quad (5.3.7)$$

kde $\sum R = R_X + R_S + R_3 + R_4$.



Obr. 5.3.7: Náhradná schéma zapojenia vysokoohmového mostíka

Úpravou vzťahu (5.3.7), so zohľadnením základnej rovnice pre vyvážený mostík, dostávame zjednodušený vzťah:

$$U \cdot \left(\sum \frac{R}{R_E} + k \right) \cong \frac{\varepsilon U}{k}; \quad \text{kde } k = 2 + \frac{R_X}{R_S} + \frac{R_S}{R_X} \quad (5.3.8)$$

Pre ďalej uvedené pomery porovnávaných odporov R_X/R_S dosahuje k nasledujúce hodnoty:

- pre $R_X/R_S = 1$ je $k = 4$;
- pre $R_X/R_S = 10$ je $k = 12$;
- pre $R_X/R_S = 100$ je $k = 102$ atď..

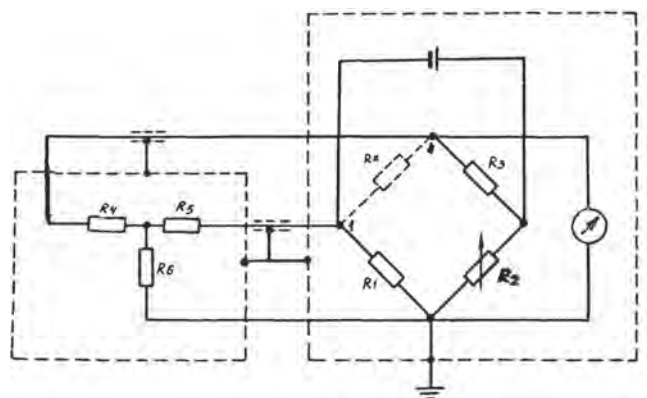
Z vzťahu (5.3.8) vidieť výraznú závislosť zmeny napätia na elektrometri vo vzťahu k napätiu zdroja, od pomeru porovnávaných rezistorov. Kým pri pomere $R_X/R_S = 1$ je táto zmena rovná 1/4 εU , pri $R_X/R_S = 10$ je to už len 1/12 εU .

Pri meraní veľkých odporov na upravenom Wheatstoneovom mostíku možno použiť tak metódu priameho merania, ako aj substitučnú metódu. Pri priamom meraní, ak miesto rezistora R_2 použijeme primerane správny odpor, môžeme v rozsahu od 1 M Ω do 10 G Ω dosiahnuť relatívne chyby merania neprekračujúce 5·10⁻⁴. Pri použití substitučnej metódy merania môžeme v tomto rozsahu dosiahnuť relatívne chyby merania neprekračujúce 1·10⁻⁴. Chyby merania rezistorov hodnôt nad 10 G Ω , ak nemáme k dispozícii kvalitné etalóny vyšších hodnôt, výrazne stúpajú.

Niekedy sa kombinuje Wheatstoneov odporový mostík s využitím kapacitného vibračného meniča, pomocou ktorého sa zosilní nízkoúrovňový jednosmerný signál, podobne ako v prípade už opísaného meradla veľkých odporov HP typ 4329 A. Takým je napríklad aj Wheatstoneov mostík v minulosti vyrábaný Závodom izmeriteľných prístrojov, Krasnodar, Rusko, na meranie veľkých odporov typ P 4053. Jeho rozsah merania je od 100 Ω do 10¹⁵ Ω , pričom na meracích rozsahoch od 100 Ω do 10G Ω má triedu presnosti 0,05, na rozsahu 100 G Ω triedu presnosti 0,1 a na rozsahu 1 T Ω triedu presnosti 0,5. Jeho chyby merania, podľa výrobcu, ďalej klesajú až na úroveň 10 % pri meraniach odporu okolo 10¹⁵ Ω .

Na kontrolu základnej chyby mostíka vo vysokoohmovej oblasti kde už nie sú primerane kvalitné etalóny, je možné použiť kombinované etalóny imitujúce veľké hodnoty odporu. Zapojenie, ktoré využíva takýto etalón pri kontrole vysokoohmového mostíka je na obr. 5.3.8. Vychádzajúc z neho pre hodnotu meraného odporu platí:

$$R_X = R_4 + R_5 + \frac{R_4 \cdot R_5}{R_6} \quad (5.3.9)$$



Obr. 5.3.8: Zisťovanie chyby mostíka s pomocnou rezistorov zapojených do hviezdy

TEMATICKÁ PŘÍLOHA
METROLOGIE 4/2008

**MEZINÁRODNÍ TEPLOTNÍ STUPNICE 1990
(ITS-90)**

Zahrnuta revize rozdílů mezi ITS-90 a IPTS-68.
(Změna se netýká ITS-90.)

Jiří Kryl

jkryl@volny.cz

OBSAH

TEPLOTA JAKO ZÁKLADNÍ FYZIKÁLNÍ VELIČINA MEZINÁRODNÍ SOUSTAVY JEDNOTEK – SI3

I. MEZINÁRODNÍ TEPLOTNÍ STUPNICE 19903

1.	Jednotky teploty	3
2.	Princip Mezinárodní teplotní stupnice 1990	3
3.	Definice Mezinárodní teplotní stupnice 1990	4
3.1	Rozsah teploty od 0,65 K do 5,0 K	4
3.2	Rozsahy teplot od 3,0 K do 24,5561 K	4
3.2.1	Rozsah teploty od 4,2 K do 24,5561 K	4
3.2.2	Rozsah teploty od 3,0 K do 24,5561 K	4
3.3	Rozsahy teplot od 13,8033 K do 961,78 °C	6
3.3.1	Rozsahy teplot od 13,8033 K do 273,16 K	7
3.3.1.1	Rozsah teploty od 24,5561 K do 273,16 K	7
3.3.1.2	Rozsah teploty od 54,3584 K do 273,16 K	7
3.3.1.3	Rozsah teploty od 83,8058 K do 273,16 K	7
3.3.2	Rozsahy teplot od 0 °C do 961,78 °C	7
3.3.2.1	Rozsah teploty od 0 °C do 660,323 °C	8
3.3.2.2	Rozsah teploty od 0 °C do 419,527 °C	8
3.3.2.3	Rozsah teploty od 0 °C do 231,928 °C	8
3.3.2.4	Rozsah teploty od 0 °C do 156,5985 °C	8
3.3.2.5	Rozsah teploty od 0 °C do 29,7646 °C	8
3.3.3	Rozsah teploty od – 38,8344 °C do 29,7646 °C	9
3.4	Rozsah teploty nad 961,78 °C	9
4.	Doplňkové informace a odlišnosti předchozích stupnic	11

II. DODATEK11

Mezinárodní teplotní stupnice 1927 (ITS-27)	11
Mezinárodní teplotní stupnice 1948 (ITS-48)	11
Mezinárodní praktická teplotní stupnice 1948 (doplněné vydání 1960) (IPTS-48)	11
Mezinárodní praktická teplotní stupnice 1968 (IPTS-68)	11
Mezinárodní praktická teplotní stupnice 1968 (doplněné vydání 1975) (IPTS-68)	12
Provizorní teplotní stupnice 0,5 K až 30 K z roku 1976 (EPT-76)	12

CONTENTS

THE TEMPERATURE AS THE BASIC PHYSICAL QUANTITY OF THE INTERNATIONAL SYSTEM OF UNITS – SI3

I. THE INTERNATIONAL TEMPERATURE SCALE 19903

1.	Units of Temperature	3
2.	Principles of the International Temperature Scale of 1990 (ITS-90)	3
3.	Definition of the ITS-90	4
3.1	The Range from 0,65 K to 5,0 K	4
3.2	The Ranges from 3,0 K to 24,5561 K	4
3.2.1	The Range from 4,2 K to 24,5561 K	4
3.2.2	The Range from 3,0 K to 24,5561 K	4
3.3	The Ranges from 13,8033 K to 961,78 °C	6
3.3.1	The Ranges from 13,8033 K to 273,16 K	7
3.3.1.1	The Range from 24,5561 K to 273,16 K	7
3.3.1.2	The Range from 54,3584 K to 273,16 K	7
3.3.1.3	The Range from 83,8058 K to 273,16 K	7
3.3.2	The Ranges from 0 °C to 961,78 °C	7
3.3.2.1	The Range from 0 °C to 660,323 °C	8
3.3.2.2	The Range from 0 °C to 419,527 °C	8
3.3.2.3	The Range from 0 °C to 231,928 °C	8
3.3.2.4	The Range from 0 °C to 156,5985 °C	8
3.3.2.5	The Range from 0 °C to 29,7646 °C	8
3.3.3	The Range from – 38,8344 °C to 29,7646 °C	9
3.4	The Range Above 961,78 °C	9
4.	Supplementary Information and Differences from Earlier Scales	11

II. APPENDIX11

The International Temperature Scale of 1927 (ITS-27)	11
The International Temperature Scale of 1948 (ITS-48)	11
The International Practical Temperature Scale of 1948 (Amendet Edition of 1960) (IPTS-48)	11
The International Practical Temperature Scale of 1968 (IPTS-68)	11
The International Practical Temperature Scale of 1968 (Amendet Edition of 1975) (IPTS-68)	12
The 1976 Provisional 0,5 K to 30 K Temperature Scale (EPT-76)	12

TEPLOTA JAKO ZÁKLADNÍ FYZIKÁLNÍ VELIČINA MEZINÁRODNÍ SOUSTAVY JEDNOTEK – SI

Jednotka kelvin – K je konvenčně pátou základní jednotkou fyzikální veličiny Mezinárodní soustavy jednotek – SI (Système International d'Unités). Měření teploty není možné subjektivně (i když tento pocit máme), neboť jako stavová veličina charakterizuje určitou kvalitu probíhajících jevů a existujících stavů, i když v podstatě jde vždy o měření nepřímé. Při měření teploty se volí některé význačné fyzikální stavy, kterým se pak na základě termodynamické teplotní stupnice přiřazují příslušné teplotní hodnoty.

Energetické stavy látek jsou základem pro definování termodynamické teplotní stupnice jako základní fyzikální veličiny. Teplotu pokládáme za míru kinetické energie pohybujících se molekul. Termodynamická teplotní stupnice může být všeobecně vyjádřena jednoduchým zákonem pro ideální plyn:

$$pV = RT$$

kde: p – je tlak

V – je objem

R – je plynová konstanta

T – je teplota s respektováním absolutní nuly

Na tomto základě je realizován plynový teploměr pro definování termodynamické teplotní stupnice. V praxi je teplotní stupnice definována pevnými body teploty, jejichž číselné hodnoty jsou určeny plynovým teploměrem. Hodnoty dalších stavů se určují interpolací a extrapolací mezi definovanými pevnými body, použitím interpolačních a extrapoláčních rovnic a přístrojů, to je teploměru.

Jeden z pevných bodů teploty, trojný bod vody, je určen k definování jednotky termodynamické teploty kelvin „K“. Energetický stav jednotky termodynamické teploty kelvin je realizován v baňce trojného bodu vody a určuje přesnou teplotu $T_{90} = 273,16$ K. Teplota tuhnutí čisté vody je o 0,01 K nižší než její trojný bod. V Celsiově stupnici je bod tuhnutí vody $t = 0$ °C ve shodě s $T = 273,15$ K v absolutní stupnici. Vztah mezi Celsiovou stupnicí (symbol t) a kelvinovou stupnicí (symbol T) je dán vztahem:

$$T = t + 273,15$$

To znamená, že v nynější Celsiově stupnici máme pouze posunutou nulu, čímž se vytváří i záporné hodnoty °C.

I. MEZINÁRODNÍ TEPLITNÍ STUPNICE 1990

Mezinárodní teplotní stupnice 1990 (ITS-90) byla přijata Mezinárodním výborem pro váhy a míry na jeho zasedání v roce 1989, ve shodě s požadavkem obsaženým v sedmé Rezoluci osmnácté Generální konference pro míry a váhy v roce 1987. Tato stupnice nahrazuje Mezinárodní praktickou teplotní stupnicí 1968 (doplňně vydání z roku 1975) a Provizorní teplotní stupnicí 0,5 K až 30 K z roku 1976.

1. Jednotky teploty

Jednotka základní fyzikální veličiny termodynamické teploty (se symbolem T) je kelvin (značený K), defino-

vaný jako 273,16tý díl termodynamické teploty trojného bodu vody.

V historii byly teplotní stupnice definovány rozdílným způsobem. V praxi byla používána definice teplotní stupnice vztažená k bodu tání ledu se současnou hodnotou 273,15 K. Termodynamická teplota vyjádřená tímto způsobem je známa jako Celsiova teplota se symbolem t a je dnes definována následovně:

$$t = T - 273,15 \quad (1)$$

Jednotkou Celsiovy teploty je stupeň Celsia se symbolem °C, který je roven svou velikostí kelvinu, se symbolem K. Rozdíl teploty může být vyjádřen v kelvinech, nebo ve stupních Celsia.

Mezinárodní teplotní stupnici 1990 je možno definovat jako „Mezinárodní kelvinovu teplotu“, symbol T_{90} a „Mezinárodní Celsiovu teplotu“, symbol t_{90} . Vztah mezi T_{90} a t_{90} je stejný jako mezi T a t , to je:

$$t_{90} = T_{90} - 273,15 \quad (2)$$

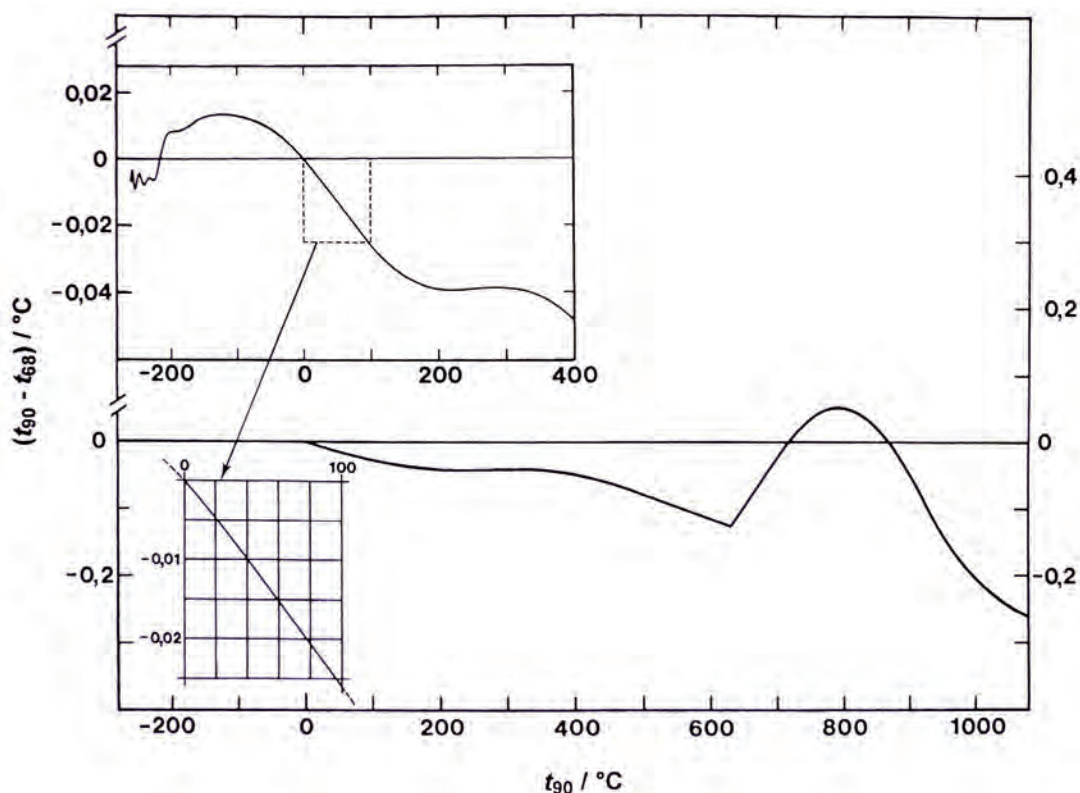
Jednotka fyzikální veličiny T_{90} je kelvin, symbol K a jednotka fyzikální veličiny t_{90} je stupeň Celsia, symbol °C. Stejně jako pro termodynamickou teplotu T a Celsiovu teplotu t .

2. Princip Mezinárodní teplotní stupnice 1990

ITS-90 se rozšiřuje od 0,65 K do nejvyšších teplot prakticky měřitelných v podmínkách Planckova radiačního zákona při monochromatické radiaci. ITS-90 obsahuje více rozsahů, ve kterých je T_{90} definována. Několik těchto rozsahů, se překrývá, a tak se stává, že existují různé definice T_{90} , avšak tyto různé definice mají stejné postavení. Pro vysoce přesná měření je možné najít číselné rozdíly mezi měřeními stejné teploty, ale ve shodě s rozdílnou definicí. Podobně při použití příslušné definice mezi pevnými definičními body a při použití dvou přijatelných interpolačních přístrojů (například odporové teploměry), můžeme odhalit rozdílné číselné hodnoty T_{90} . Ve všech případech tyto rozdíly jsou zanedbatelné, jsou minimální a ve shodě se stupnicí. Další informace o této problematice viz „Doplňkové informace pro ITS-90“ [2].

ITS-90 je realizována tak, že v rozsazích teplot číselné hodnoty T_{90} se těsně přibližují k číselným hodnotám T ve shodě s nejlepším odhadem v době, kdy byla tato stupnice přijata. Měření T_{90} v porovnání s přímými měřeními termodynamických teplot jsou plynulejší, přesnější a vysoce reprodukovatelné.

Významné jsou číselné rozdíly mezi hodnotami T_{90} a hodnotami T_{68} měřeními v Mezinárodní praktické teplotní stupnici 1968 (IPTS-68) viz **obr. 1 a tabulku 6**. Podobné jsou rozdíly mezi IPTS-68 a Mezinárodní praktickou teplotní stupnicí 1948 (IPTS-48) a mezi Mezinárodní teplotní stupnicí 1948 (ITS-48) a Mezinárodní teplotní stupnicí 1927 (ITS-27). Viz „Dodatek“ a pro podrobnější informace viz „Doplňkové informace pro ITS-90“ [2] a revidovaný rozdíl ITS-90 a IPTS-68 [5].



Obr. 1: Teplotní rozdíly $(t_{90} - t_{68}) / ^\circ\text{C}$ – revidované [5]

3. Definice Mezinárodní teplotní stupnice 1990

Mezi 0,65 K a 5,0 K je T_{90} definována v podmínkách teploty a tlaku par ^3He a ^4He .

Mezi 3,0 K a trojným bodem neonu (24,5561 K) je T_{90} definována prostřednictvím plynového teploměru kalibrovaného ve třech experimentálně realizovaných teplotách, majících významné číselné hodnoty (definované pevné body), s použitím specifických interpolačních postupů.

Mezi trojným bodem rovnovážného vodíku (13,8033 K) a bodem tuhnutí stříbra (961,78 °C) je T_{90} definována prostřednictvím platinového odporového teploměru kalibrovaného v souboru specifických definičních pevných bodů s použitím specifických interpolačních postupů.

Nad bodem tuhnutí stříbra (961,78 °C) je T_{90} definována pomocí definičního pevného bodu a Planckovým radiačním zákonem.

Definiční pevné body ITS-90 jsou v **tabulce 1**. Vliv tlaku a hloubky ponoru čidla na teplotu většiny těchto bodů je uveden v **tabulce 2**.

3.1 Rozsah teploty od 0,65 K do 5,0 K

V tomto rozsahu T_{90} je definována v podmínkách tlaku par ^3He a ^4He použitím rovnice:

$$T_{90} / \text{K} = A_0 + \sum_{i=1}^9 A_i \left[(\ln(p / \text{Pa}) - B) / C \right]^i \quad (3)$$

Hodnoty konstant A_0, A_i, B a C jsou uvedeny v **tabulce 3** pro ^3He v rozsahu 0,65 K do 3,2 K a pro ^4He v rozsahu od 1,25 K do 2,1768 K (λ bod) a od 2,1768 K do 5,0 K.

3.2 Rozsahy teplot od 3,0 K do 24,5561 K

V těchto rozsazích T_{90} je definována v podmínkách ^3He nebo ^4He použitím plynového teploměru konstantního objemu kalibrovaného při třech teplotách. Jsou to trojný bod neonu (24,5561 K), trojný bod rovnovážného vodíku (13,8033 K) a teplota v rozsahu mezi 3,0 K a 5,0 K. Tato poslední teplota je určena měřením tlaku par ^3He nebo ^4He , jak je uvedeno v části 3.1.

3.2.1 Rozsah teploty od 4,2 K do 24,5561 K

V tomto rozsahu T_{90} je definována vztahem:

$$T_{90} = a + bp + cp^2, \quad (4)$$

kde p je tlak v plynovém teploměru, a, b a c jsou číselné hodnoty koeficientů, které obdržíme z měření při třech definičních pevných bodech daných v části 3.2, ale s tím omezením, že nejnižší z těchto bodů leží mezi 4,2 K a 5,0 K.

3.2.2 Rozsah teploty od 3,0 K do 24,5561 K

Pro ^3He plynový teploměr a pro ^4He plynový teploměr, použitý pod 4,2 K, musí být výslovně počítáno s neideálností plynu a s použitím příslušných sekundárních viriálních koeficientů $B_3(T_{90})$ nebo $B_4(T_{90})$. T_{90} je v tomto rozsahu definována vztahem:

Tabulka 1: Definiční pevné body ITS-90

Číslo	Teplota		Látka ^a	Stav ^b	$W_r(T_{90})$
	T_{90}/K	$t_{90}/^{\circ}\text{C}$			
1	3 až 5	-270,15 až -268,15	He	V	
2	13,8033	-259,3467	e-H ₂	T	0,001 190 07
3	≈17	≈-256,15	e-H ₂ nebo He	V nebo G	
4	≈20,3	≈-252,85	e-H ₂ nebo He	V nebo G	
5	24,5561	-248,5939	Ne	T	0,008 449 74
6	54,3584	-218,7916	O ₂	T	0,091 718 04
7	83,8058	-189,3442	Ar	T	0,215 859 75
8	234,3156	-38,8344	Hg	T	0,844 142 11
9	273,16	0,01	H ₂ O	T	1,000 000 00
10	302,9146	29,7646	Ga	M	1,118 138 89
11	429,7485	156,5985	In	F	1,609 801 85
12	505,078	231,928	Sn	F	1,892 797 68
13	692,677	419,527	Zn	F	2,568 917 30
14	933,473	660,323	Al	F	3,376 008 60
15	1234,93	961,78	Ag	F	4,286 420 53
16	1337,33	1064,18	Au	F	
17	1357,77	1084,62	Cu	F	

^a Všechny látky kromě ³He jsou v přirozeném isotopickém složení; e-H₂ je vodík v rovnovážné koncentraci orto- a para- molekulární formě

^b Úplné definice viz „Doplňkové informace pro ITS-90“ [2]

Symbole mají význam:

V: parní bod (bod tlaku par)

T: trojný bod (teplota rovnováhy všech tří skupenství látky – pevná, tekutá a plynná fáze)

G: bod plynového teploměru

M, F: bod tání, bod tuhnutí (teplota rovnováhy pevné a tekuté fáze při tlaku 101 325 Pa)

Tabulka 2: Vliv tlaku na teplotu některých definičních pevných bodů

Látka	Hodnoty rovnovážných teplot T_{90}/K	Vliv tlaku	
		(dT/dp) $(10^{-8} \text{ K} \cdot \text{Pa}^{-1})^*$	(dT/dl) $(10^{-3} \text{ K} \cdot \text{m}^{-1})^{**}$
e-Vodík (T)	13,8033	34	0,25
Neon (T)	24,5561	16	1,9
Kyslík (T)	54,3584	12	1,5
Argon (T)	83,8058	25	3,3
Rtuť (T)	234,3156	5,4	7,1
Voda (T)	273,16	-7,5	-0,73
Gallium	302,9146	-2,0	-1,2
Indium	429,7485	4,9	3,3
Cín	505,078	3,3	2,2
Zinek	692,677	4,3	2,7
Hliník	933,473	7,0	1,6
Stříbro	1234,93	6,0	5,4
Zlato	1337,33	6,1	10
Měď	1357,77	3,3	2,6

* Ekvivalent $10^{-3} \text{ K} = \text{cca mK na bar}$ (přesně: $\text{mK}/1,01325 \text{ bar}$)

** Ekvivalent $10^{-3} \text{ K} = \text{mK na metr tekutiny}$

Referenční tlak pro tuhnutí a tání (M, F) je standardní atmosférický tlak ($p_o = 101 325 \text{ Pa}$ či $1013,25 \text{ hPa}$)

Pro trojné body (T) pouze hydrostatický tlak kapaliny v kyvetě/kelímku

Tabulka 3: Hodnoty konstant pro tlak par helia pro rovnici (3) a teplotní rozsah, pro který je platná každá rovnice identická se souborem konstant.

	³ He 0,65 K až 3,2 K	⁴ He 1,25 až 2,1768 K	⁴ He 2,1768 K až 5,0 K
A0	1,053 447	1,392 408	3,146 631
A1	0,980 106	0,527 153	1,357 655
A2	0,676 380	0,166 756	0,413 923
A3	0,372 692	0,050 988	0,091 159
A4	0,151 656	0,026 514	0,016 349
A5	- 0,002 263	0,001 975	0,001 826
A6	0,006 596	- 0,017 976	- 0,004 325
A7	0,088 966	0,005 409	- 0,004 973
A8	- 0,004 770	0,013 259	0
A9	- 0,054 943	0	0
B	7,3	5,6	10,3
C	4,3	2,9	1,9

$$T_{90} = \frac{a + bp + cp^2}{1 + B_x(T_{90})N/V}, \quad (5)$$

kde:

- p je tlak v plynovém teploměru,
 a, b, c jsou koeficienty, jejichž číselné hodnoty lze obdržet z měření při třech definičních teplotách, které jsou uvedeny v části 3.2.
 N/V je hustota plynu,
 N je množství plynu,
 V je objem měřicí nádoby,
 x je 3 nebo 4 podle použitého izotopu

Hodnoty sekundárních viriálních koeficientů jsou dány vztahem:

 Pro ³He:

$$B_3(T_{90})/m^3 \text{ mol}^{-1} = \{16,69 - 336,98 (T_{90}/K)^{-1} + 91,04(T_{90}/K)^{-2} - 13,82 (T_{90}/K)^{-3}\} 10^{-6} \quad (6a)$$

 Pro ⁴He:

$$B_4(T_{90})/m^3 \text{ mol}^{-1} = \{16,708 - 374,05 (T_{90}/K)^{-1} - 383,53(T_{90}/K)^{-2} + 1799,2 (T_{90}/K)^{-3} - 4033,2(T_{90}/K)^{-4} + 3252,8 (T_{90}/K)^{-5}\} 10^{-6} \quad (6b)$$

Přesnost, se kterou může být realizována T_{90} použitím rovnice (4) a (5), závisí na konstrukci plynového teploměru a hustoty použitého plynu. Konstrukční kritéria a běžné postupy pro dosažení vybraných přesností viz „Doplňkové informace pro ITS-90“ [2].

3.3 Rozsahy teplot od 13,8033 K do 961,78 °C

V těchto rozsazích je T_{90} definována prostřednictvím odporového teploměru kalibrovaného v souboru uvedených definičních pevných bodů a s použitím stanovených referenčních a odchylkových funkcí pro interpolaci příslušných teplot.

Jednoduchý platinový odporový teploměr nemůže poskytnout vysokou přesnost, tak jako nemůže být úspěšně po-

užit v celém teplotním rozsahu od 13,8033 K do 961,78 °C. Volbu teplotního rozsahu, nebo více z uvedených rozsahů pro které mohou být použity odporové teploměry, omezuje jejich konstrukce.

Praktické podrobnosti, běžné praktické postupy u jednotlivých dostupných typů teploměrů, přijatelné pracovní rozsahy, pravděpodobné přesnosti, dovolené svody odporu, odporové hodnoty a tepelné zatížení jsou uvedeny v „Doplňkových informacích pro ITS-90“ [2]. Je důležité mít na paměti vhodnost dlouhodobé expozice při vysokých teplotách, zvláště pak rychlost ochlazování platinového odporového teploměru vystaveného teplotám v okolí a nad 420 °C.

Teploty použití jsou určeny podmínkami poměru odporu $R(T_{90})$ teploty T_{90} a odporu $R(273,16 \text{ K})$ při teplotě trojného bodu vody. Tento poměr $W(T_{90})$ je ¹⁾:

$$W(T_{90}) = R(T_{90})/R(273,16 \text{ K}) \quad (7)$$

Přijatelný platinový odporový teploměr musí být z čisté platiny bez pnutí a musí vyhovět alespoň jednomu z následujících vztahů:

$$W(29,7646 \text{ °C}) \geq 1,118 07 \quad (8a)$$

$$W(-38,8344 \text{ °C}) \leq 0,844 235 \quad (8b)$$

Použití platinového odporového teploměru do teploty bodu stříbra je podmíněno vztahem:

$$W(961,78 \text{ °C}) \geq 4,2844 \quad (8c)$$

T_{90} získáme v každém rozsahu odporových teploměrů z $W_r(T_{90})$, dané vhodné referenční funkce [rovnice (9b) nebo (10b)] a odchylky $W(T_{90}) - W_r(T_{90})$. Odchylku získáme v definičních pevných bodech přímo z teplot

¹⁾ Poznamenáváme, že tato definice $W(T_{90})$ se liší od odpovídající definice použité v ITS-27, ITS-48, IPTS-48 a IPTS-68. ve kterých $W(T)$ bylo definováno ve vztahu k referenční teplotě 0 °C, která je od roku 1954 definována jako 273,15 K.

kalibrovaných teploměrů obdrženy prostřednictvím vhodných odchylkových funkcí [rovnice (12), (13) a (14)].

(i) – Pro rozsahy 13,8033 K až 273,16 K referenční funkce jsou definovány:

$$\ln [W_r(T_{90})] = A_0 + \sum_{i=1}^{12} A_i \left[\frac{\ln(T_{90}/273,16 \text{ K}) + 1,5}{1,5} \right]^i \quad (9a)$$

Inverzní funkce rovnocenná rovnici (9a) v rámci 0,1 mK je:

$$T_{90}/273,16 \text{ K} = B_0 + \sum_{i=1}^{15} B_i \left[\frac{W_r(T_{90})^{1/6} - 0,65}{0,35} \right]^i \quad (9b)$$

Hodnoty konstant A_0 , A_i , B_0 a B_i jsou v **tabulce 4**.

Teploměr může být kalibrován v celém rozsahu, nebo s použitím progresivně menším počtem kalibračních bodů pro rozsahy se spodní teplotní hranicí: 24,5561 K, 54,3584 K nebo 83,8058 K, přičemž mají všechny horní hranici 273,16 K.

(ii) – Pro rozsahy 0 °C až 961,78 °C je referenční funkce definována takto:

$$W_r(T_{90}) = C_0 + \sum_{i=1}^9 C_i \left[\frac{(T_{90}/\text{K}) - 754,15}{481} \right]^i \quad (10a)$$

Inverzní funkce rovnocenná rovnici (10a) v rámci 0,13 mK je:

$$T_{90}/\text{K} - 273,15 = D_0 + \sum_{i=1}^9 D_i \left[\frac{W_r(T_{90}) - 2,64}{1,64} \right]^i \quad (10b)$$

Hodnoty konstant C_0 , C_i , D_0 a D_i jsou v **tabulce 4**.

Teploměr může být kalibrován též v celém rozsahu, nebo s použitím menšího počtu kalibračních bodů pro rozsahy s horní hranicí 660,323 °C, 419,527 °C, 231,928 °C, 156,5985 °C nebo 29,7646 °C, přičemž mají všechny spodní hranici 0 °C.

(iii) – Teploměr může být kalibrován též v rozsahu od 234,3156 K (−38,8344 °C) do 29,7646 °C při použití těchto bodů a v trojném bodu vody. Oběma referenčními funkcemi [rovnice (9) a (10)] je potřebné pokrýt tento rozsah.

Definiční pevné body a odchylkové funkce pro různé rozsahy jsou uvedeny v souhrnné **tabulce 5**.

3.3.1 Rozsahy teplot od 13,8033 K do 273,16 K

Odporový teploměr je kalibrován v trojném bodu rovnovážného vodíku (13,8033 K), v neonu (24,5561 K), v kyslíku (54,3584 K), v argonu (83,8058 K), ve rtuti (234,3156 K) a v trojném bodu vody (273,16 K) a v dalších dvou teplotách blízkých k 17,0 K a 20,3 K. Tyto dvě teploty mohou být určeny použitím plynového teploměru popsaného v části 3.2, přičemž teploty musí být v rozsahu 16,9 K až 17,1 K a 20,2 K až 20,4 K, nebo použitím vztahu tlak – teplota par rovnovážného vodíku, přičemž teploty musí být v rozsahu 17,025 K až 17,045 K a 20,26 K až 20,28 K s přesnými hodnotami určenými z rovnic (11a) a (11b):

$$T_{90}/\text{K} - 17,035 = (p/\text{kPa} - 33,3213)/13,32 \quad (11a)$$

$$T_{90}/\text{K} - 20,27 = (p/\text{kPa} - 101,292)/30 \quad (11b)$$

Odchylková funkce²⁾ je:

$$W(T_{90}) - W_r(T_{90}) = a [W(T_{90}) - 1] + b [W(T_{90}) - 1]^2 + \sum_{i=1}^5 c_i [\ln W(T_{90})]^{i+n} \quad (12)$$

Hodnoty pro koeficienty a , b a c_i budou získány z měření v definičních pevných bodech a $n = 2$.

Pro tento rozsah a pro rozsahy 3.3.1.1 až 3.3.1.3 požadované hodnoty $W_r(T_{90})$ obdržíme z rovnice (9a) nebo z **tabulky 1**.

3.3.1.1 Rozsah teploty od 24,5561 K do 273,16 K

Odporový teploměr je kalibrován v trojném bodu rovnovážného vodíku (13,8033 K), v neonu (24,5561 K), v kyslíku (54,3584 K), v argonu (83,8058 K), ve rtuti (234,3156 K) a trojném bodu vody (273,16 K).

Odchylková funkce je dána rovnicí (12) s hodnotami koeficientů a , b , c_1 , c_2 a c_3 získanými z měření v definičních pevných bodech a s $c_4 = c_5 = n = 0$

3.3.1.2 Rozsah teploty od 54,3584 K do 273,16 K

Odporový teploměr je kalibrován v trojném bodu kyslíku (54,3584 K), argonu (83,8058 K), rtuti (234,3156 K) a trojném bodu vody (273,16 K).

Odchylková funkce je dána rovnicí (12) s hodnotami koeficientů a , b , a c_1 , získanými z měření v definičních pevných bodech s $c_2 = c_3 = c_4 = c_5 = 0$ a $n = 1$.

3.3.1.3 Rozsah teploty od 83,8058 K do 273,16 K

Odporový teploměr je kalibrován v trojném bodu argonu (83,8058 K), rtuti (234,3156 K) a trojném bodu vody (273,16 K).

Odchylková funkce je:

$$W(T_{90}) - W_r(T_{90}) = a [W(T_{90}) - 1] + b [W(T_{90}) - 1] \ln W(T_{90}) \quad (13)$$

Hodnoty a a b získáme z měření v definičních pevných bodech.

3.3.2 Rozsahy teplot od 0 °C do bodu stříbra (961,78 °C)

Odporový teploměr je kalibrován v trojném bodu vody (0,01 °C) a v bodu tuhnutí cínu (231,928 °C), zinku (419,527 °C), hliníku (660,323 °C) a stříbra (961,78 °C).

Odchylková funkce je:

$$W(T_{90}) - W_r(T_{90}) = a [W(T_{90}) - 1] + b [W(T_{90}) - 1]^2 + c [W(T_{90}) - 1]^3 + d [W(T_{90}) - W(660,323 \text{ °C})]^2 \quad (14)$$

²⁾ Tato odchylková funkce [a též tyto rovnice (13) a (14)] mohou být vyjádřeny v podmínkách W_r raději než W . Tento postup viz „Doplňkové informace pro ITS-90“[2]

Tabulka 4: Konstanty $A_0, A_1; B_0, B_i; C_0, C_i; D_0$ a D_i v referenčních funkcích rovnic (9a); (9b); (10a) a (10b)

		B_0	0,183 324 722
		B_1	0,240 975 303
		B_2	0,209 108 771
		B_3	0,190 439 972
		B_4	0,142 648 498
		B_5	0,077 993 465
		B_6	0,012 475 611
		B_7	-0,032 267 127
		B_8	-0,075 291 522
		B_9	-0,056 470 670
		B_{10}	0,076 201 285
		B_{11}	0,123 893 204
		B_{12}	-0,029 201 193
		B_{13}	-0,091 173 542
		B_{14}	0,001 317 696
		B_{15}	0,026 025 526
A_0	-2,135 347 29	D_0	439,932 854
A_1	3,183 247 20	D_1	472,418 020
A_2	-1,801 435 97	D_2	37,684 494
A_3	0,717 272 04	D_3	7,472 018
A_4	0,503 440 27	D_4	2,920 828
A_5	-0,618 993 95	D_5	0,005 184
A_6	-0,053 323 22	D_6	-0,963 864
A_7	0,280 213 62	D_7	-0,188 732
A_8	0,107 152 24	D_8	0,191 203
A_9	-0,293 028 65	D_9	0,049 025
A_{10}	0,044 598 72		
A_{11}	0,118 686 32		
A_{12}	-0,052 481 34		
C_0	2,781 572 54		
C_1	1,646 509 16		
C_2	-0,137 143 90		
C_3	-0,006 497 67		
C_4	-0,002 344 44		
C_5	0,005 118 68		
C_6	0,001 879 82		
C_7	-0,002 044 72		
C_8	-0,000 461 22		
C_9	0,000 457 24		

Pro teploty do bodu tuhnutí hliníku je $d = 0$, hodnoty a , b a c určíme z měření odchylek od $W_r(T_{90})$ v tuhnutí cínu, zinku a hliníku. Od bodu tuhnutí hliníku do bodu tuhnutí stříbra hodnoty a , b a c jsou podrženy a hodnota d je určena z měření odchylky od $W_r(T_{90})$ v bodu tuhnutí stříbra.

Pro tento rozsah a pro rozsahy 3.3.2.1 až 3.3.2.5 požadované hodnoty pro $W_r(T_{90})$ obdržíme z rovnice (10a) nebo z tabulky 1.

3.3.2.1 Rozsah teploty od 0 °C do 660,323 °C

Odporový teploměr je kalibrován v trojném bodu vody (0,01 °C) a v bodech tuhnutí cínu (231,928 °C), zinku (419,527 °C) a hliníku (660,323 °C).

Odchylková funkce je dána rovnicí (14) s hodnotami a , b a c , které určíme z měření v definičních pevných bodech s $d = 0$.

3.3.2.2 Rozsah teploty od 0 °C do 419,527 °C

Odporový teploměr je kalibrován v trojném bodu vody (0,01 °C), v bodu tuhnutí cínu (231,928 °C) a zinku (419,527 °C).

Odchylková funkce je dána rovnicí (14) a hodnoty a a b obdržíme z měření v definičních pevných bodech s $c = d = 0$.

3.3.2.3 Rozsah teploty od 0 °C do 231,928 °C.

Odporový teploměr je kalibrován v trojném bodu vody (0,01 °C), v bodu tuhnutí india (156,5985 °C) a cínu (231,928 °C).

Odchylková funkce je dána rovnicí (14) a hodnoty a a b obdržíme z měření v definičních pevných bodech, přičemž $c = d = 0$.

3.3.2.4 Rozsah teploty od 0 °C do 156,5985 °C

Odporový teploměr je kalibrován v trojném bodu vody (0,01 °C) a v bodu tuhnutí india (156,5985 °C).

Odchylková funkce je dána rovnicí (14) a hodnotu a obdržíme z měření v definičních pevných bodech s $b = c = d = 0$.

3.3.2.5 Rozsah teploty od 0 °C do 29,7646 °C

Odporový teploměr je kalibrován v trojném bodu vody (0,01 °C) a v bodu tání gallia (29,7646 °C).

Odchylková funkce je dána rovnicí (14) a hodnotu a obdržíme z měření v definičních pevných bodech s $b = c = d = 0$.

3.3.3 Rozsah teploty od $-38,8344$ °C do $29,7646$ °C

Odporový teploměr je kalibrován v trojném bodu rtuti ($-38,8344$ °C), trojném bodu vody ($0,01$ °C) a v bodu tání gallia ($29,7646$ °C).

Odchylková funkce je dána rovnicí (14) a hodnoty a a b získáme z měření v definičních bodech s $c = d = 0$.

Potřebné hodnoty $W_r(T_{90})$ obdržíme z rovnice (9a) a (10a) měřením pod a nad $273,16$ K, nebo z **tabulky 1**.

3.4 Rozsah teploty nad $961,78$ °C

Nad bodem tuhnutí stříbra je teplota T_{90} definována rovnicí:

$$\frac{L_\lambda(T_{90})}{L_\lambda[T_{90}(X)]} = \frac{\exp(c_2[\lambda T_{90}(X)]^{-1}) - 1}{\exp(c_2[\lambda T_{90}]^{-1}) - 1}, \quad (15)$$

kde $T_{90}(X)$ se vztahuje na jeden z bodů tuhnutí.³⁾ Buď stříbra $\{T_{90}(\text{Ag}) = 1234,93 \text{ K}\}$, nebo zlata $\{T_{90}(\text{Au}) = 1337,33 \text{ K}\}$, případně mědi $\{T_{90}(\text{Cu}) = 1357,77 \text{ K}\}$, přičemž $L_\lambda(T_{90})$ a $L_\lambda[T_{90}(X)]$ jsou hodnoty spektrální hustoty záře, emitované černým tělesem (ve vakuu) na vlnové délce λ při T_{90} a při $T_{90}(X)$ a $c_2 = 0,014488 \text{ m}\cdot\text{K}$.

Pro praktické podrobnosti a běžné postupy pro optickou pyrometrii viz „Doplňkové informace pro ITS-90“ [2].

Tabulka 5: Odchylkové funkce a kalibrační body pro platinové odporové teploměry v různých rozsazích pro T_{90}

a) Rozsahy s horní hranicí $273,16$ K

Část	Spodní hranice	Odchylková funkce		Kalibrační body (viz tab. 1)
3.3.1	13,8033 K	$a [W(T_{90}) - 1] + b [W(T_{90}) - 1]^2 + \sum_{i=1}^5 c_i [\ln W(T_{90})]^{i+n}$	$n = 2$	2 až 9
3.3.1.1	24,5561 K	jako 3.3.1 s $c_4 = c_5 = n = 0$		2, 5 až 9
3.3.1.2	54,3584 K	jako 3.3.1 s $c_2 = c_3 = c_4 = c_5 = 0$	$n = 1$	6 až 9
3.3.1.3	83,8058 K	$a [W(T_{90}) - 1] + b [W(T_{90}) - 1] \ln W(T_{90})$		7 až 9

b) Rozsahy s dolní hranicí 0 °C

Část	Horní hranice	Odchylková funkce		Kalibrační body (viz tab. 1)
3.3.2*	961,78 °C	$a [W(T_{90}) - 1] + b [W(T_{90}) - 1]^2 + c [W(T_{90}) - 1]^3 + d [W(T_{90}) - W(660,323 \text{ °C})]^2$		9, 12 až 15
3.3.2.1	660,323 °C	jako 3.3.2 s $d = 0$		9, 12 až 14
3.3.2.2	419,527 °C	jako 3.3.2. s $c = d = 0$		9, 12, 13
3.3.2.3	231,928 °C	jako 3.3.2. s $c = d = 0$		9, 11, 12
3.3.2.4	156,5985 °C	jako 3.3.2. s $b = c = d = 0$		9, 11
3.3.2.5	29,7646 °C	jako 3.3.2. s $b = c = d = 0$		9, 10

c) Rozsah od $234,3156$ K ($-38,8344$ °C) do $29,7646$ °C

Část	Horní hranice	Odchylková funkce		Kalibrační body (viz tab. 1)
3.3.3		jako 3.3.2. s $c = d = 0$		8 až 10

* Kalibrační body 9, 12 až 14 jsou použity s $d = 0$ pro $t_{90} \leq 660,323$ °C hodnoty a , b a c jsou ponechány i pro $t_{90} \geq 660,323$ °C s d určeným z kalibračního bodu 15

TEMATICKÁ PŘÍLOHA - METROLOGIE 4/2008

Tabulka 6: Revidované rozdíly mezi ITS-90 a EPT-76 a mezi ITS-90 a IPTS-68 [5]

$(T_{90} - T_{76})/\text{mK}$										
T_{90}/K	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0						-0,1	-0,2	-0,3	-0,4	-0,5
10	-0,6	-0,7	-0,8	-1,0	-1,1	-1,3	-1,4	-1,6	-1,8	-2,0
20	-2,2	-2,5	-2,7	-3,0	-3,2	-3,5	-3,8	-4,1		
$(T_{90} - T_{68})/\text{K}$										
T_{90}/K	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10					-0,006	-0,003	-0,004	-0,006	-0,008	-0,009
20	-0,009	-0,008	-0,007	-0,007	-0,006	-0,005	-0,004	-0,004	-0,005	-0,006
30	-0,006	-0,007	-0,008	-0,008	-0,008	-0,007	-0,007	-0,007	-0,006	-0,006
40	-0,006	-0,006	-0,006	-0,006	-0,006	-0,007	-0,007	-0,007	-0,006	-0,006
50	-0,006	-0,005	-0,005	-0,004	-0,003	-0,002	-0,001	0,000	0,001	0,002
60	0,003	0,003	0,004	0,004	0,005	0,005	0,006	0,006	0,007	0,007
70	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008
80	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008
90	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,009	0,009	0,009
T_{90}/K	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
100	0,009	0,011	0,013	0,014	0,014	0,014	0,014	0,013	0,012	0,012
200	0,011	0,010	0,009	0,008	0,007	0,005	0,003	0,001		
$(t_{90} - t_{68})/^{\circ}\text{C}$										
$t_{90}/^{\circ}\text{C}$	0	-10	-20	-30	-40	-50	-60	-70	-80	-90
-100	0,013	0,013	0,014	0,014	0,014	0,013	0,012	0,010	0,018	0,018
0	0,000	0,002	0,004	0,006	0,008	0,009	0,010	0,011	0,012	0,012
$t_{90}/^{\circ}\text{C}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	0,000	-0,002	-0,005	-0,007	-0,010	-0,013	-0,016	-0,018	-0,021	-0,024
100	-0,026	-0,028	-0,030	-0,032	-0,034	-0,036	-0,037	-0,038	-0,039	-0,039
200	-0,040	-0,040	-0,040	-0,040	-0,040	-0,040	-0,040	-0,039	-0,039	-0,039
300	-0,039	-0,039	-0,039	-0,040	-0,040	-0,041	-0,042	-0,043	-0,045	-0,046
400	-0,048	-0,051	-0,053	-0,056	-0,059	-0,062	-0,065	-0,068	-0,072	-0,075
500	-0,079	-0,083	-0,087	-0,090	-0,094	-0,098	-0,101	-0,105	-0,108	-0,112
600	-0,115	-0,118	-0,122	-0,125	-0,11	-0,10	-0,09	-0,07	-0,05	-0,04
700	-0,02	-0,01	0,00	0,02	0,03	0,03	0,04	0,05	0,05	0,05
800	0,05	0,05	0,04	0,04	0,03	0,02	0,01	0,00	-0,02	-0,03
900	-0,05	-0,06	-0,08	-0,10	-0,11	-0,13	-0,15	-0,16	-0,18	-0,19
1 000	-0,20	-0,22	-0,23	-0,23	-0,24	-0,25	-0,25	-0,25	-0,26	-0,26
$t_{90}/^{\circ}\text{C}$	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900
1 000		-0,026	-0,30	-0,35	-0,39	-0,44	-0,49	-0,54	-0,60	-0,66
2 000	-0,72	-0,79	-0,85	-0,93	-1,00	-1,07	-1,15	-1,24	-1,32	-1,41
3 000	-1,50	-1,59	-1,69	-1,78	-1,89	-1,99	-2,10	-2,21	-2,32	-2,43

4. Doplnkové informace a odlišnosti předcházejících stupnic

Přístroje, metody a postupy, které slouží pro realizaci ITS-90 jsou popsány v „Doplnkové informace pro ITS-90“ [2]. Mnoho použitých postupů k realizaci ITS-90 je uvedeno v „Technika pro přiblížení ITS-90“ [3].

„Doplnkové informace pro ITS-90“ [2] a „Technika pro přiblížení ITS-90“ [3] byly připraveny Konzultativním výborem pro teplotu (CCT), jsou publikovány BIPM a opakovaně vydávány.

Revidované rozdíly $T_{90} - T_{68}$ a $t_{90} - t_{68}$ jsou zobrazeny na obr. 1 (revidované v roce 1994 [5]) a nové číselné hodnoty rozdílů uvedeny v tabulce 6.

Revize se týkala rozsahu 630,615 °C až 1 064,18 °C a nové rozdíly stupnic v tomto rozsahu jsou popsány polynomem:

$$(t_{90} - t_{68}) / ^\circ\text{C} = 7,868\,720\,9 \times 10^{-1} - 4,713\,599\,1 \times 10^{-1} (t_{90} / ^\circ\text{C}) + 1,095\,471\,5 \times 10^{-3} (t_{90} / ^\circ\text{C})^2 - 1,235\,788\,4 \times 10^{-6} (t_{90} / ^\circ\text{C})^3 + 6,773\,658\,3 \times 10^{-10} (t_{90} / ^\circ\text{C})^4 - 1,445\,808\,4 \times 10^{-13} (t_{90} / ^\circ\text{C})^5$$

Výpočty významných odchylek s použitím interpolací lze pomocí tabulky 6 provádět snadněji, nutno však zdůraznit, že opakovatelnost IPTS-68 je v mnohých rozsazích podstatně horší než chyba, která je zahrnuta v tomto výpočtu.

V dokumentu je zdůrazněno, že revize se týká jen rozdílů mezi stupnicemi a stupnice ITS-90 se netýká!!

II. DODATEK

Mezinárodní teplotní stupnice 1927 (ITS-27)

Mezinárodní teplotní stupnice 1927 (ITS-27) byla přijata sedmou Generální konferencí pro váhy a míry na překonání praktických komplikací s přímou realizací termodynamické teploty plynovým teploměrem, a jako všeobecně přijatelná náhrada za rozdíly existujících národních teplotních stupnic. ITS-27 byla formulována tak, aby dovolovala měření teploty přesněji a reprodukovatelněji s těsnou aproximací termodynamických teplot jak byly určeny v té době. Mezi bodem varu kyslíku a bodem tuhnutí zlata bylo realizováno množství reprodukovatelných teplot, nebo pevných bodů, jejichž číselné hodnoty byly určeny a byly též realizovány dva interpolační přístroje. Každý z těchto interpolačních přístrojů byl kalibrován v několika pevných bodech, které dávají konstanty pro interpolační vztahy v příslušných teplotních rozsazích.

³⁾Hodnoty T_{90} bodu tuhnutí stříbra, zlata a mědi jsou považovány za navzájem konzistentní v takové míře, že náhrada vztažné teploty $T_{90}(X)$ kteroukoliv z této skupiny nezpůsobí významné rozdíly v měřených hodnotách T_{90} .

Platinový odporový teploměr byl použit pro nižší rozsahy a termoelektrický článek platina-rhodium/platina nad 660 °C. Pro oblast nad bod tuhnutí zlata byla teplota definována v podmínkách Wienova zákona.

V praxi to definitivně rozhodlo o výběru optického pyrometru jako realizačního přístroje.

Mezinárodní teplotní stupnice 1948 (ITS-48)

Mezinárodní teplotní stupnice 1948 (ITS-48) byla přijata na deváté Generální konferenci pro váhy a míry. Změny proti ITS-27 byly: dolní hranice rozsahu platinového odporového teploměru byla změněna z -190 °C na bod varu kyslíku -182,97 °C a pro spojení rozsahů platinového odporového teploměru a termoelektrického článku se stala odporovým teploměrem změřená teplota bodu tuhnutí antimonu (asi 630 °C), místo 660 °C (teplota tuhnutí Al). Bod tuhnutí stříbra byl definován jako 960,8 °C místo 960,5 °C. Bod tuhnutí zlata nahradil původní bod tání zlata (1063 °C). Planckův radiační zákon nahradil Wienův zákon a novou sekundární radiační konstantou určena hodnota $1,438 \times 10^{-2} \text{ m}\cdot\text{K}$ místo $1,432 \times 10^{-2} \text{ m}\cdot\text{K}$. Stanoven přípustný rozsah pro interpolační vztah pro etalonový odporový teploměr a termoelektrický článek. Dále byla upravena hranice pro optický pyrometr ($\lambda T < 3 \times 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{K}$) a použití viditelného záření.

Mezinárodní praktická teplotní stupnice 1948 (IPTS-48)

(doplňně vydání 1960)

Mezinárodní praktická teplotní stupnice 1948, doplňně vydání 1960, bylo přijato jedenáctou Generální konferencí; desátá Generální konference už přijala trojný bod vody jako jediný bod definující kelvin jako jednotku termodynamické teploty. V dodatku bylo doplněno slovo „praktická“ jako úprava ITS-48. Trojný bod vody s hodnotou 0,01 °C, nahradil bod tání ledu jako kalibrační bod v této oblasti; bod tuhnutí zinku byl definován jako 419,505 °C a byl upřednostněn jako kalibrační bod za bod varu síry (444,6 °C). Dovolené rozsahy konstant interpolačního vzorce pro etalonový odporový teploměr a termoelektrický článek byly upraveny, omezení optického pyrometru pro „viditelné“ záření bylo odstraněno.

Číselné hodnoty teplot IPTS-48 zůstaly stejné jako ITS-48, nebyla to revize stupnice 1948, ale bylo to pouze doplnění.

Mezinárodní praktická teplotní stupnice 1968 (IPTS-68)

V roce 1968 Mezinárodní výbor pro váhy a míry vyhlásil Mezinárodní praktickou teplotní stupnici 1968. Byl

tak zmocněn třináctou Generální konferencí 1967–1968. IPTS-68 způsobila rozsáhlé změny v IPTS-48. Ty zahrnují číselné změny se záměrem zabezpečit bližší shodu s termodynamickými teplotami, což bylo dostatečně velké a zřejmé pro mnohé uživatele. Další změny: nižší hranice stupnice - byla rozšířena až do 13,81 K; dokonce pro nižší teploty (0,5 K až 5,2 K), bylo doporučeno používat stupnici tlaku par helia. Dále bylo zavedeno šest nových definičních pevných bodů – trojný bod rovnováhy vodíku (13,81 K), bod přechodu rovnovážného vodíku (17,042 K), bod varu normálního rovnovážného vodíku (20,28 K), bod varu neonu (27,102 K), trojný bod kyslíku (54,361 K) a bod tuhnutí cínu (231,9681 °C), který se stal alternativou k bodu varu vody a bod varu síry byl úplně vyčleněn. Hodnoty pro pevné body byly změněny – bod varu kyslíku (90,188 K), bod tuhnutí zinku (419,58 °C), bod tuhnutí stříbra (961,93 °C) a bod tuhnutí zlata (1064,43 °C). Interpolační vztahy pro rozsah odporového teploměru se staly ucelenějšími. Hodnota pro sekundární radiační konstantu c_2 byla stanovena na $1,4388 \times 10^{-2} \text{ m}\cdot\text{K}$. Dovoleno rozsah konstanty pro interpolační vztah pro odporový teploměr a termoelektrický článek byl znovu upraven.

Mezinárodní praktická teplotní stupnice 1968 (IPTS-68)

(doplňné vydání 1975)

Mezinárodní praktická teplotní stupnice 1968 (IPTS-68), doplňné vydání 1975, bylo přijato na patnácté Generální konferenci v roce 1975. Stejně tak, jak v případě IPTS-48 se zřetelem na ITS-48, nezavedla IPTS-68(75) nové číselné hodnoty. Největší textové změny byly zaměřeny na vyjasnění a zjednodušení použití. Bylo více podstatných změn: bod kyslíku byl definován jako bod kondenzace, přednostně před bodem varu; trojný bod argonu (83,768 K) byl zaveden jako dovolená alternativa k bodu kondenzace kyslíku. U neonu byly přijaty nové hodnoty přirozeného izotopického složení a bylo doporučeno používání hodnot T daných v roce 1958 pomocí ^4He . Stupnice tlaku par ^3He z roku 1962 byla odvolána.

Provizorní teplotní stupnice 0,5 K až 30 K z roku 1976 (EPT-76)

Provizorní teplotní stupnice 0,5 K až 30 K 1976 (EPT-76) byla zavedena pro spojení dvou důležitých požadavků: byla to příprava podstatně redukovat chybu (s ohledem na odpovídající termodynamické hodnoty) pod 27 K, což bylo známé v existující IPTS-68 a v teplotním rozsahu ^4H a ^3He stupnice tlaku par z roku 1958 a 1962 a pro přemostění mezery mezi 5,2 K a 13,81 K, ve které nebyla provizorní mezinárodní stupnice. Další objektivita v odkazu EPT-76 „aby byla termodynamicky hladká a kontinuální s IPTS-68 při 27,1 K a že by souhlasila s termodynamickou teplotou T tak těsně, jak to tyto dvě podmínky dovolují“. Na rozdíl od IPTS-68 a pro rychlé zavedení několika

metod byla realizace EPT-76 schválena. Zahrnovalo to: použití termodynamických interpolačních přístrojů; jednoho nebo více z jedenácti přidělených referenčních bodů a odstranění rozdílů z IPTS-68 nad 13,81 K; odstranění rozdílů ze stupnice tlaku par helia pod 5 K a odstranění rozdílů určitých dobře stanovených stupnic. Protože byla určitá „potřeba vnitřní shody“ bylo přijato, že „nepatrná dvojznačnost mezi realizacemi“ může být předložena. Ovšem výhoda získání přijatelné EPT-76 jako pracovní stupnice až do té doby, než IPTS-68 bude revidována a rozšířena, vyvažuje tyto nevýhody.



Obr. 2: Mezinárodní teplotní stupnice ITS-90 pro ČR realizovaná v Primární laboratoři ČMI v Praze

Literatura

- [1] The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90), H. Preston-Thomas, Metrologia, 1990, **27**, 3-10.
- [2] Supplementary Information for the International Temperature Scale of 1990, BIPM, Pavillon de Breteuil, F-92310 SÈVRES (Obsahuje též definice ITS-90) – „Červená kniha“.
- [3] Techniques for Approximating the International Temperature Scale of 1990, BIPM, Pavillon de Breteuil, F-92310 SÈVRES, – „Modrá kniha“.
- [4] Mezinárodní teplotní stupnice 1990 (ITS-90), Ing. Milan Borovička, CSc. Příloha Československé standardizace, 1990, **15**, č. 7.
- [5] Revise Values for $(t_{90} - t_{68})$ from 630 °C to 1 064 °C, R. L. Rusby, R. P. Hudson and M. Durieux Metrologia, 1994, **31**, 149-153.
- [6] Metrologie teploty v ČR, Jiří Kryl, Metrologie, 1995, **4**, č. 3, 7-10. (Pozor! Tiskové chyby v některých číselných údajích!)



Niektoré ďalšie podrobnosti, v súvislosti s použitím upravených Wheatstoneových mostíkov a rôznych modifikácií dvojramenných mostíkov na meranie veľkých odporov, sú v literatúre [5.3.1]. V literatúre [5.3.2] sú podrobne popisované meradlá veľkých odporov pracujúce v režime vnúteného napätia a vnúteného prúdu, ktoré využívajú elektrometrické zosilňovače s vysokým vstupným odporom a veľkým zosilnením.

Menšie chyby merania a väčšiu citlivosť ako pri odporových meradlách veľkých odporov dosahujú kapacitné alebo odporovo-kapacitné meradlá veľkých odporov. Jedným z typických predstaviteľov tohto typu meradiel je automatický číslicový teraohmmeter firmy Guildline typ 9520. Jeho bloková schéma je na obr. 5.3.9, pričom R_x je meraný odpor.

Pri takýchto meradlách je proces merania odporu založený na analógovo integračnej technike využívajúcej vysokokvalitný, spoľahlivý elektrometer a spätnoväzobný kondenzátor. Integrovaný proces je iniciovaný otvorením prepínača pri kondenzátore C . Nato otvorí časové hradlo, počas časového intervalu Δt , porovnávanie výstupného napätia V_o s dvoma referenciami V_1 a V_2 . Pre hodnotu neznámeho odporu platí jednoduchý vzťah:

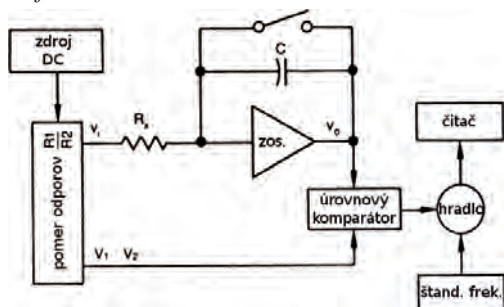
$$R_x = \frac{\Delta t}{C} \cdot \frac{V_i}{-\Delta V}, \quad (5.3.10)$$

kde $\Delta V = V_2 - V_1$.

Podľa zobrazenej blokovej schémy pomer $(V_i / -\Delta V)$ môže byť nahradený odporovým pomerom R_1/R_2 . Potom hodnota R_x môže byť vyjadrená v nasledujúcej číslicovej podobe:

$$R_x = \left(\frac{R_1}{R_2} \cdot \frac{I}{f \cdot C} \right) \cdot n, \quad (5.3.11)$$

kde: n je stredná hodnota registrovaných impulzov v digitálnom sumátore pre reverzovaný jednosmerný prúd a f etalónová frekvencia v Hz.



Obr. 5.3.9: Bloková schéma číslicového teraohmmetra

Popísaný model číslicového teraohmmetra 9520 dosahuje v rozsahu merania od $10\text{M}\Omega$ do $1\text{G}\Omega$ presnosť $2 \cdot 10^{-4}$ až $5 \cdot 10^{-4}$ z čítanej hodnoty, pri rozlišovacej schopnosti z použitého rozsahu $1 \cdot 10^{-5}$. Relatívne chyby teraohmmetra smerom k vyšším hodnotám klesajú na rozsahu $10\text{T}\Omega$ na úroveň 0,3 % a na rozsahu $10^{16}\Omega$ až na úroveň okolo 10 %.

Medzi jedno z najpresnejších zariadení na priame a aj pomerové zariadenie veľkých odporov patrí komparačné zariadenie od firmy Measurement International Model 6000B, ktorý dopĺňa DC zdroj do 100 V Model 1000A a štvorsvokový scanner Model 4210A. Zostava, ktorá je na obr. 5.3.10, je riadená personálnym počítačom.



Obr. 5.3.10: Zostava meracieho zariadenia MI Model 6000B na meranie veľkých odporov

Táto zostava, ktorá je používaná aj v SMÚ, umožňuje presné porovnávanie odporov priamo a pomerovo v rozsahu od $1\text{k}\Omega$ do $1\text{G}\Omega$ a pri použití špeciálnej konfigurácie odporov až do $1\text{T}\Omega$ pri napätiach do 100 V. Základom zostavy je binárny prúdový komparátor ktorého vyrovňovanie je automatizované a riadené aj pomocou scanera s nízkou úrovňou termonapätí. Neistoty priameho merania (pre 95 % pravdepodobnosť) a merania v pomere 0,1 a 10 v rozsahu hodnôt od $1\text{k}\Omega$ do $10\text{M}\Omega$ sú menšie ako 0,1 ppm. V rozsahu pre $10\text{M}\Omega$ a $100\text{M}\Omega$ sú menšie ako 0,5 ppm a pre hodnoty $100\text{M}\Omega$ a $1\text{G}\Omega$ menšie ako 5 ppm. Pri použití špeciálnej konfigurácie (paralelného zapojenia rezistorov) sa mostík dá použiť aj na merania odporov v rozsahu $10\text{G}\Omega$ (s neistotou 20 ppm), $100\text{G}\Omega$ (s neistotou 200 ppm) a $1\text{T}\Omega$ (s neistotou 500 ppm).

Literatúra:

- [5.3.1] Fajt, V., Jakl, M.: Presná měření elektrických veličin SNTL-ALFA, Praha. 1979.
- [5.3.2] Boháček, J.: Teorie měření. ČVÚT Praha. 1988.
- [5.3.3] Firemná literature Guildline Instruments Limited. (www.guilddline.ca).
- [5.3.4] Firemná literature Measurement International. (www.mintl.com).
- [5.3.5] Technical manual k High resistance ratio bridge Model 6000B. Measurement International.
- [5.3.6] Brown Duane: An Automatic DC Current Comparator Bridge. Measurement International Ltd.

6 ETALONÁŽ ELEKTRICKÉ KAPACITY

6.1 Etalonáž kapacity v ČR

Jednotka kapacity

Uchovávať jednotku kapacity je možné pouze pomocí vhodných etalonů. Nejvhodnější jsou etalony kapacity s křemenným dielektrikem.

Křemenné kondenzátory TESLA BRNO o kapacitě 10 pF byly vytvořeny z taveného křemene, vybroušeného do tvaru

METROLOGIE VLASTNOSTÍ ELEKTRICKÝCH PRVKŮ

kruhového kotouče o tloušťce 10 mm. Do boční stěny kotouče byla vybrušena drážka. Tento tvar byl předmětem vynálezu Ing. Rippera, vedoucího metrologie v TESLA BRNO. Tvar drážky umožňuje extrémně snížit vliv nedokonalosti izolačních mezer na dlouhodobou stabilitu kapacity.

Křemenné těleso bylo ze všech stran pokoveny, přičemž na obvodových hranách je pokovení přerušeno, aby vznikly dvě mezery. Tím jsou vytvořeny tři elektrody, z nichž elektrody na čelních plochách jsou měřicí a elektroda v boční drážce je stínící.

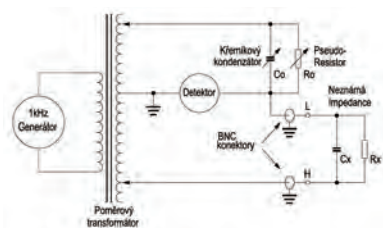
Specifický tvar drážky způsobuje, že změny izolace v mezích ovlivňují pouze elektrické pole mezi měřicí a stínící elektrodou a nikoli pole mezi oběma měřicími elektrodami. Tím je vyloučena častá příčina nestability křemenných kondenzátorů.

Etalony Andeen Hagerling typu AH 11A se skládají ze dvou částí. První částí je rám AH 1100, druhou část tvoří vlastní etalon AH 11A. Rám AH 1100 je proveden jako samostatný přístroj nebo jako zásuvná jednotka do skříně. Tento rám může obsahovat až čtyři křemenné etalony AH 11A. Rozvod v rámu zajišťuje napájení přesných termostatů pro každý etalon AH 11A. Rám také obsahuje měřicí přístroje na kontrolu napájení a teploty. Třívorkové připojení každého etalonu je provedeno nezávisle. Etalon AH 11A má za základní prvek disk z taveného křemene, který je proveden tak, že může vytvářet sadu kapacit s binárními hodnotami. Konečné nastavení na přesnou hodnotu se docílí jemným nastavením teploty. Tímto se vylučuje použití samostatného dojustování na přesnou hodnotu (trimování) a s trimováním vznikajícími nestabilitami. Dielektrikum etalonu je tavený křemen. Disk z taveného křemene je hermeticky uzavřen do hermetického pouzdra plněného suchým dusíkem. Pouzdro je tepelně dobře odizolované od vnějšího pouzdra etalonu. Teplota křemene je měřena dvěma přesnými teplotními čidly, která jsou připojena ke dvěma zcela nezávislým monitorovacím obvodům. Střední hodnota výstupu z těchto dvou obvodů je použita pro regulaci teploty tohoto termostatu. Za normálních okolností musí být rozdíl mezi výstupy obou monitorovacích obvodů blízký nule. Čím menší je tento rozdíl, tím je větší důvěryhodnost ve stabilitu teploty v termostatu. Proto je údaj o rozdílu monitorovacích obvodů vyveden na panel jako pomocné měřítko při sledování stability etalonu.

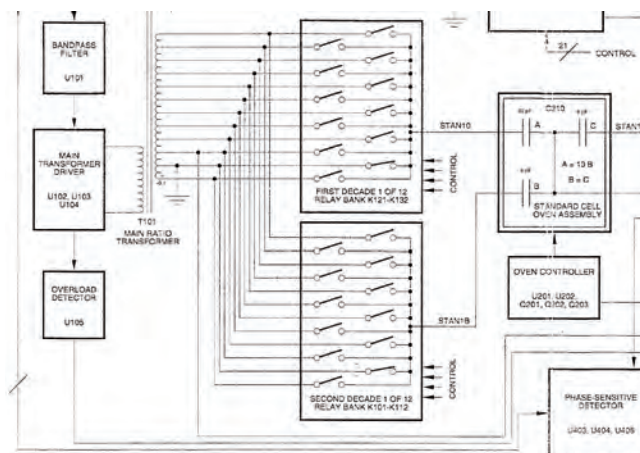
Každý etalon AH 11A obsahuje jednotku pro měření teploty a regulační odvody potřebné pro vlastní termostat. Spojení etalonu je provedeno pomocí tří konektorů. Dva jsou BNC konektory a jeden 16-ti kolíkový pro napájení termostatu.

Odvození stupnice kapacity

Pro odvození jiných hodnot kapacity na frekvenci 1 kHz se používá přesný transformátorový most podle principiálního zapojení na **obr. 6.1.1**



Obr. 6.1.1: Princip transformátorového kapacitního mostu



Obr. 6.1.2: Základní bloky transformátorového kapacitního mostu AH 2500 jsou indukční dělič a tři křemenné etalony kapacity v termostatu

Vysoké přesnosti měření řádu jednotek ppm se dosahuje použitím indukčního děliče v mostu a sady 3 kusů termostatizovaných křemenných etalonů v mostu. Tím je možné odvodit kapacitu až do 1 μF na 1 kHz. Vyšší hodnoty kapacity se odvozují autobalančními mosty.

Frekvenční závislost kapacity je pro 1 pF až 1000 pF zajištěna zahraničními navázáním etalonů pro frekvence až do 15 MHz.

6.2 Používané typy etalonů a jejich měření

6.2.1 Etalony kapacity do 10 000 pF

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

Přesné etalony:

Etalony GENRAD (QUADTECH), IET Lab

Etalony kapacity firmy GENRAD, později zvané QuadTech a nyní vyráběné jako kondenzátory IET Lab. patří mezi nejstabilnější etalony kapacity. Vyrábí se hodnoty 1 pF, 10 pF, 100 pF a 1000 pF. Jsou plněné dusíkem, elektrody jsou z invaru. Používají se obvykle ve svislé poloze v polystyrénovém krytu. Konektory mají typu GR 874 nebo BNC. Provedení je třívorkové, ale jeden konektor není uzemněn !! Při přesném měření je nutné udat teplotu přímo na etalonu. Při měření na kvalitním mostě u těchto etalonů převládá nad vlivem šumu drift typu náhodné procházky a vliv vyrovnávání teploty částí etalonu, která se stále mění v malém rozmezí po nepravidelné křivce.

Méně přesné etalony:

Etalony TETTEX

Jsou rozměrné, protože jsou navrženy pro pracovní napětí do 2 000 V. Užívají se obvykle v poloze konektory vzhůru.

Vyrábí se hodnoty od 1 pF do 10 000 pF. Provedení je třísvorkové. Konektory jsou atypické. Elektrody jsou hliníkové a plněny jsou vzduchem, který je vysoušen vestavěným sáčkem silikagelu (nutno kontrolovat jeho stav).

Válcové etalony Ulrich a P 597

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

Válcové etalony P 397

Jako vzduchové se vyrábí do 4000 pF, při čemž kondenzátory 1 pF až 10 pF a 10 pF až 100 pF jsou provedeny jako clonkové.

Etalony HP 16380A

Nejdůležitější v současné době vyráběný typ etalonů. Elektrody jsou hliníkové, etalony nejsou hermetické, hodnota kapacity závisí na poloze etalonu a na tlaku přivodů na konektory.

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

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

Etalony kapacity HP16380A, C nejsou, jak je zřejmé z uvedeného, vhodné pro nejpřesnější etalonáž kapacity na $f = 1$ kHz. Jsou to etalony speciálně navržené pro kontrolu čtyřpárových autobalančních mostů se čtyřmi BNC přívody s roztečí Agilent (22 mm). Jsou jediné vhodné dostupné etalony pro kontrolu autobalančních mostů s širokým frekvenčním rozsahem s čtyřpárovým připojením bez nutnosti použití přechodů nebo kabelů. Kalibrovat s nimi lze proto přímo na referenční rovině na svorkách mostu.

Při kalibraci je třeba udat jejich polohu, to je konektory směrem nahoru nebo konektory na bok.

6.2.2 Testy stability plynem plněných etalonů C

Plynem plněné etalony tvoří základ pro velmi přesné měření kapacity. Jejich stabilita je určující pro přenos jednotky kapacity z ČMI na kalibrační pracoviště uživatelů. Vyrábí se v rozsahu hodnot kapacity 1 pF až 10 000 pF. Testy stability pomohou určit, jak se ovlivní přesnost kalibrace transportem etalonů na kalibraci a zpět (jak se ovlivní hodnota etalonu transportem k zákazníkovi).

Test v ČMI zahrnuje tyto zkoušky: Vnější prohlídka, Izolace, Konektory, Orientace, Malý náklon, Otočení, Měkký úder, Tvrdý úder, Pád, Tlak na konektory.

Testy Izolace a Konektory slouží ke kontrole stavu etalonu kapacity před měřením.

Testy Orientace, Malý náklon, Otočení, Měkký úder, Tvrdý úder, Pád, Tlak na konektory napodobují podmínky, kterým může být etalon vystaven při dopravě ke kalibraci. Jsou měřítkem dosažitelné stability přenosu jednotky kapacity tímto etalonem.

Všechny testy jsou nedestruktivní a nepřekračují namáhání při běžné dopravě.

Je zajímavé, že nejvíce problému bylo u testu s malým náklonem, který simuluje běžné odchylky od vodorovné roviny pracovních stolů. Výsledky měření stability v ČMI shrnuje **tabulka 6.2.1**.

Test	Přípustná mez v ppm	% poruch z celku
Orientace	10	23
Malý náklon	0,2	48
Otočení	0,2	5
Měkký úder	0,2	14
Tvrdý úder	0,2	13
Pád	0,2	14

Tab. 6.2.1: Mechanické testy pro invarové kondenzátory

Pro méně přesné etalony HP 16380A ukazují testy dosažitelné vlastnosti kondenzátorů.

Z měření etalonů ČMI byly vyhodnoceny dvě základní charakteristiky kondenzátorů:

- Změna kapacity mezi výchozími polohami po provedení testu (polohy normal – normal)
- Změna kapacity mezi polohou konektory vzhůru a konektory dopředu, důležitá při připojování etalonu HP na mosty při kalibraci.

Etalon	A [ppm]	B [ppm]
HP 16381A 1 pF	+ 2	+ 18
HP 16382A 10 pF	-3	+16
HP 16383A 100 pF	-1	+2
HP 16384A 1000 pF	-2	+12
GR 1404 1000 pF	+ 0.1	+ 0.7

Tab. 6.2.2: Stabilita etalonů HP 16380A, ve sloupci A je změna kapacity mezi výchozími polohami po provedení testu (polohy normal – normal) a ve sloupci B je změna kapacity mezi polohou konektory vzhůru a konektory dopředu, důležitá při připojování etalonu HP na mosty při kalibraci.

Měření ukázalo, že pro běžný provoz se musí u kondenzátorů řady HP 16380 počítat se složkou nejistoty do 20 ppm pro vliv změny polohy.

6.2.3 Etalony kapacity 10 nF až 1 μF

V tomto rozsahu hodnot jsou etalony realizovány se sliďovým nebo keramickým dielektrikem a jsou velmi stabilní, s hodnotou nezávislou na poloze etalonu. Teplotní závislost je obvykle menší než ± 35 ppm/°C. Pro přesné měření je třeba udat teplotu přímo na kondenzátoru. U etalonů s ko-

axiálními svorkami (BNC) nevznikají speciální problémy. Hodnota kapacity s frekvencí nejprve klesá. Strmost poklesu závisí na ztrátách a je větší pro kondenzátor s většími ztrátami. Při vyšší frekvenci hodnota roste vlivem indukčnosti přívodů. Čím vyšší je hodnota kapacity, tím při nižší frekvenci se projeví vliv indukčnosti.

HP16380C

Sada HP16380C obsahuje 3 slídkové kondenzátory s postříbenými elektrodami 0,01 μF , 0,1 μF a 1 μF . Nastaveny jsou v toleranci $\pm 0,1 \%$, stabilita je $< 50 \text{ ppm/rok}$, teplotní závislost $-5 \text{ až } +35 \text{ ppm/}^\circ\text{C}$, $\text{tg } \delta < 4 \cdot 10^{-4}/0,01 \mu\text{F}; < 5 \cdot 10^{-4}/0,1 \mu\text{F}; < 7 \cdot 10^{-4}/1 \mu\text{F}$. Frekvenční závislost je výrobcem udávána orientačními grafy. Je výrazná a závisí na nominální hodnotě kondenzátoru.

Válcové etalony P 397

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

Etalony kapacity Meatest

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

Vyrábí se typy CP-1 1 nF, CP-10 10 nF, CP-100 100 nF s teplotní závislostí 15 ppm/°C a malými ztrátami $< 0,0002$.

6.2.4 Etalony kapacity 1 μF až 100 μF

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

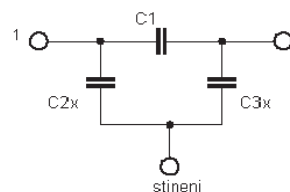
6.2.5 Etalony kapacity nad 100 μF

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

Použití etalonu kapacity pro dvousvorkové připojení

Při měření průchozí kapacity stíněného kapacitního etalonu je měřená kapacita ovlivněna navíc parazitními kapacitami mezi jednotlivými elektrodami kondenzátoru a jeho

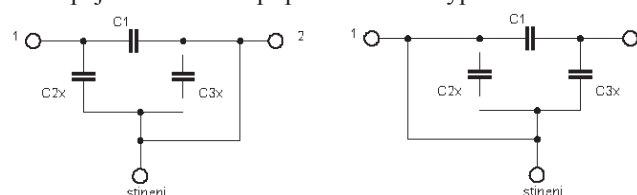
stíněním. Kondenzátor představuje ve skutečnosti 3 kondenzátory, z nichž C1 představuje průchozí kapacitu (tu, kterou chceme měřit) a zbývající dvě C2x a C3x jsou parazitní kapacity svorek proti stínění viz **obr. 6.2.3**.



Obr. 6.2.3: Náhradní zapojení třísvorkového provedení kapacitního etalonu

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

Zapojení v limitních případech budou vypadat následovně:



Obr. 6.2.4: Dvě možnosti zapojení třísvorkového etalonu kapacity při užití jako dvousvorkový

6.3 Ztrátový činitel etalonu kapacity

Kapacita C je definována jako poměr mezi nábojem Q a napětím U mezi deskami kondenzátoru:

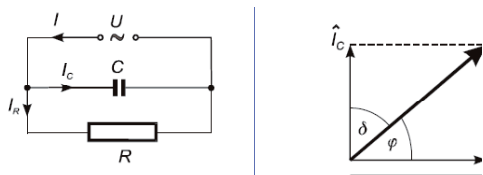
$$C = \frac{Q}{U} \quad (6.3.1)$$

Kondenzátor se v elektrickém obvodu chová jako zásobník energie elektrického pole. Je tvořen dvěma elektrodami, mezi nimiž je dielektrikum (vzduch, slída apod.). Při průchodu střídavého proudu každý kondenzátor vykazuje ztráty, které jsou způsobeny nedokonalou izolací dielektrika, ohmickým odporem elektrod i ztrátami v dielektriku při střídavé polarizaci. Ztráty se projeví ohříváním dielektrika. Proto si lze skutečný kondenzátor představit jako bezztrátový kondenzátor C , **obr. 6.3.1**, k němuž je paralelně připojen svodový odpor R , jehož velikost je nepřímo úměrná ztrátám. V praxi se však pro posouzení kvality kondenzátoru uvažuje tzv. ztrátový úhel δ , pro nějž platí:

$$\delta = \frac{\pi}{2} - \phi \quad (6.3.2)$$

z něhož se určuje ztrátový činitel $\text{tg } \delta$:

$$\text{tg } \delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{1}{\omega CR} \quad (6.3.3)$$



Obr. 6.3.1: Model reálného kondenzátoru

6.3.1 Etalony a návaznosti

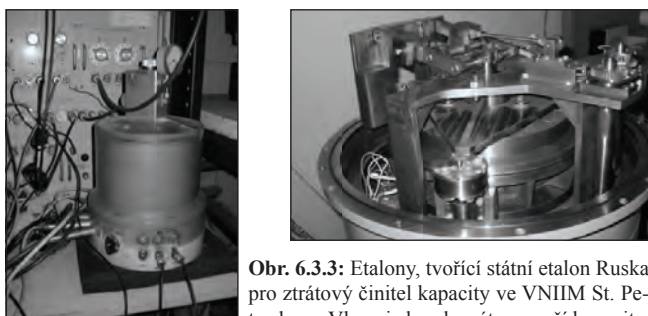
Ve světě měří 37 metrologických institutů kapacitu C a z nich jen 10 i ztrátový činitel kapacity D . Nejpřesnější a v nejširším frekvenčním rozsahu je měření D ve VNIIM v Petrohradě, na který je navázáno i ČMI. Ostatní dostupná navázání jsou přibližně o řád horší, což je pro měření nízkoztrátových kondenzátorů nedostačující. Jednotka ztrátového činitele kapacity se na VNIIM navazuje křemenným kondenzátorem 100 pF AH 11 s nejistotou 0,7 ppm na frekvenci 1 kHz. Toto navázání je optimální, protože tyto kondenzátory potom mohou realizovat skupinový etalon pro jednotku kapacity i referenční etalon pro ztrátový činitel. Navázány na VNIIM jsou ztráty D pro 50 Hz až 20 kHz. V ČMI je k dispozici skupina čtyř křemenných kondenzátorů AH11 100 pF a jeden další kondenzátor s nízkými ztrátami typ GR1404B 100 pF upravený na třísvorkové provedení s konektory typu BNC. Tím bylo možné vytvořit skupinový etalon ztrát činitele realizující jednotku velmi nízkých ztrát. Tuto skupinu je možné navazovat na VNIIM a je udržována na frekvenci 1 kHz (z důvodu možnosti přesného měření jen na této frekvenci pomocí mostu AH 2500E). Transportní etalony 100 pF pro přenos jednotky D z VNIIM jsou na **obr. 6.3.2**



Obr. 6.3.2: Transportní etalony pro navázání měření činitele ztrát kondenzátorů. Upravené cestovní etalony AH 11 (vlevo) se speciálním zdrojem GR 1404 (vpravo)

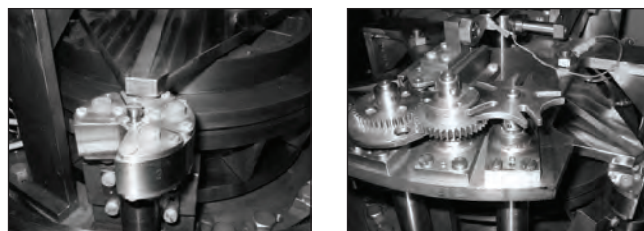
6.3.2 Primární etalony pro měření činitele ztrát kondenzátorů

Primární etalony pro stanovení ztrát kondenzátorů se realizují podle principu popsaného v třicátých letech minulého



Obr. 6.3.3: Etalony, tvořící státní etalon Ruska pro ztrátový činitel kapacity ve VNIIM St. Petersburg. Vlevo je kondenzátor menší kapacity, vpravo odkrytovaný kondenzátor 10 pF až 40 pF – ukázka mechanické konstrukce jednoho ze 2 primárních etalonů pro činitele ztrát D ve VNIIM

století. Vychází z předpokladu, že u speciálně konstruovaného kondenzátoru, u kterého se změní kapacita kondenzátoru posuvem polohy elektrod (změna mezery mezi elektrodami) se ztráty nezmění. Aby se odstranil vliv vlhkosti a mikrovrstev na povrchu elektrod, jsou elektrody obvykle zlacené a kondenzátor se měří ve vakuu. Dva takové kondenzátory, tvořící státní etalon Ruska ve VNIIM St. Petersburg, ukazuje **obr. 6.3.3**



Obr. 6.3.4: Ukázka distančních podložek z křemenného skla (vlevo) a části mechanismu na posun desek kondenzátoru etalonu 10 pF až 40 pF (vpravo)

6.3.3 Etalony s nastavitelnými ztrátami pro etalonáž činitele ztrát D

Takové speciální etalony byly vyráběny pouze v Rusku. Jinou možností je nastavit činitele ztrát externím odporem. Obvyklejší a snazší je použít malý odpor v sérii s nízkotátovým kondenzátorem než velký připojený paralelně. Velká pozornost musí být věnována tomu, aby mezi spojem kondenzátoru a dostavovacího odporu byla zanedbatelná kapacita. Pro toto užití jsou konstruovány etalony IET Lab řady 1430, v hodnotách 1 pF, 10 pF, 100 pF a 1000 pF.

S VNIIM bylo provedeno i mezinárodní porovnání měření ztrátového činitele D v ČMI v rozsahu celé používané stupnice od nejnižších hodnot řádu 10^{-6} až 1. Porovnání bylo provedeno na hodnotě kapacity 10 nF, od této hodnoty klesá přesnost měření přesného transformátorového mostu AH 2500E. Proto bylo nutné vyvinout a realizovat nový etalon. Etalon jsem řešil s keramickými kondenzátory, vyrobenými na Taiwanu. Nejprve byl kompenzován ztrátový činitel vlastních kondenzátorů tak, že byl zhotoven etalon kapacity 10 nF s činitelem ztrát kolem 0,000 000. Pomocí přepínače byl vřazován přepínatelný T článek měnící ztrátový činitel etalonu v dekadických hodnotách. V T článku byly použity rezistory Beckman a typu RR, všechny s teplotní závislostí pod 50 ppm na °C. Rozsahy pro D 0,1 a 1 byly řešeny samostatnými rezistory připojovanými na svorky rezistoru. Etalon byl po realizaci uměle stárnut při teplotě 55 °C a sledován. Dosažená hodnota teplotní závislosti je pod 7 ppm/°C a pro D je menší než 1 až 3 ppm/°C podle rozsahu D .

7 ETALONÁŽ INDUKČNOSTI

7.1 Etalonáž indukčnosti v ČMI

Pro zajištění měření indukčnosti na referenční úrovni je k dispozici řada možností.

- ČMI má přesný Maxwell-Wienův most pro měření indukčností 10 mH a 100 mH.

- Etalony 1 H a 10 H lze měřit na přesném kapacitním mostu rezonanční metodou.
- Etalony 10 H a vyšší lze měřit také přímo jako zápornou kapacitu.
- Na přesném kapacitním mostě lze měřit i celý rozsah od 1 μH do 1H pomocí zapojení s články T, které převádí měření L na měření C.

7.1.1 Rezonanční metoda

Hodnotu etalonu indukčnosti lze odvodit z měření rezonanční metodou. Rezonanci je možné indikovat přesným kapacitním mostem AH 2500E. Rezonanci lze indikovat s vysokou přesností, přesnost celého měření snižují značné ztráty měřené indukčnosti. Jedná se o klasickou, široce používanou metodu (včetně ČMI). Zde je uvedena pro úplnost a pro porovnání výsledků při validaci.

Z měřené indukčnosti a přidavných paralelních kondenzátorů se vytvoří paralelní rezonanční obvod, jehož impedance se měří impedančním mostem. Paralelní rezonanční obvod je naladěn co nejlépe k rezonanci nastavením kapacitní dekády. Zbytkové parametry rezonančního obvodu jsou měřeny automatizovaným systémem mostem AH 2500E. Měří se přitom zbytková kapacita i ztrátová složka impedance rezonančního obvodu.

Ve druhém kroku se měří kapacita a ztrátová složka kondenzátoru použitého k vyladění rezonance. Z podmínky rezonance vychází hodnota indukčnosti.

Po přepočtu z paralelního měření rezonančního obvodu na sériové náhradní schéma měřené indukčnosti je:

$$L_s = \frac{C_r}{(\omega_r C_r)^2 + (G_r - G_c)^2} \quad (7.1.1)$$

kde:

L_s je hodnota indukčnosti pro sériové náhradní zapojení

C_r je hodnota kapacity při rezonanci

G_r je hodnota vodivosti rezonančního obvodu

G_c je hodnota vodivosti použitého kondenzátoru

Rozsah měřených indukčností je omezen rozsahem měření přesného kapacitního mostu. Pro indukčnosti pod 100 mH vychází již kapacita pro rezonanci příliš velká. Velké hodnoty kapacity se obtížně realizují s dostatečnou stabilitou. Protože most AH 2500E měří kapacity jen do 1 μF, je měření rezonanční metodou s tímto mostem omezeno hodnotou 100 mH a vyšší. Protože simulované indukčnosti od 10 H výše lze snadno a přesně měřit jako zápornou kapacitu, je rezonanční metoda vhodná pro přesná měření toroidních etalonů indukčnosti 100 mH, 1H, a 10 H. Pro měření etalonů s otevřeným polem není vhodná, protože etalon působí jako rámová anténa a ruší své signály znemožní měření i ve stíněné laboratoři.

L	100 mH	1 H	10 H
C	253 300 pF	25 330 pF	253,3 pF

Tab. 7.1.1: Hodnoty kapacity pro rezonanci na frekvenci 1 kHz

Ladící kapacita rezonančního obvodu může být realizovaná kapacitní dekadou.

Kapacitu 25 nF a 250 pF lze měřit s mostem AH 2500E velmi přesně, proto je tato metoda pro měření etalonů 1 H a 10 H velmi vhodná. Pro 100 mH je ladící kapacitou již 250 nF, což znamená užití kapacitní dekády s nižší stabilitou a nižší přesností měření kapacity mostem AH 2500E a větší vliv šumu a rušení, protože měření probíhá při malé úrovni signálu. Pro nižší hodnoty indukčnosti vychází hodnota kapacity již příliš velká. Pokud se povede odvození pomocí speciálního přípravku s kvalitními kondenzátory s nízkou teplotní závislostí, lze touto metodou jednotku L na hodnotě 100 mH nebo 1 H odvodit s nejistotou pod 100 μH/H (50 až 80 μH/H).

7.1.2 Kalibrace etalonů velkých hodnot indukčnosti přímým měřením záporné kapacity

Pro kalibraci etalonů velkých hodnot indukčnosti je třeba použít přesný transformátorový most. Přesné transformátorové mosty pro měření indukčnosti se ale nevyrábí a jen některé laboratoře mají speciálně vyvinuté vlastní mosty. Kapacitní most AH 2500E je ale ve standardním vybavení laboratoří a je pro přesné měření velkých indukčností jako záporné kapacity velmi vhodný.

Uvažujeme-li pro informaci měření simulovaných etalonů L s činitelem jakosti $Q = 10$ nebo více, pak pro most AH 2500E vychází přesnost měření velmi vysoká. Pro informaci je v **tabulce tab. 7.1.2** uvedena ekvivalentní měřená záporná kapacita, napětí, při kterém most tuto kapacitu měří a přesnost měření podle specifikace mostu (nejistota typu B pro obdélníkové rozdělení).

L	-C v pF	Měřicí napětí mostu ve V	U mostu v ppm
1H	25 330	0,003	17
10H	2 533	0,03	14
100H	253,3	0,25	14
1 kHz	25,33	3	14
10 kHz	2,533	7,5	13

Tab. 7.1.2: Parametry mostu AH 2500E při měření – L

7.1.3 Použití T-článku

Existují metody pro stanovení vztahů mezi impedance-mi objektů, vycházející z transformace trojúhelník – hvězda, kde se po transformaci změní charakter impedance. Bylo nalezeno použití velmi jednoduchého zapojení, umožňujícího měřit indukčnost s velkou přesností, pokud máme možnost měřit přesně kapacitu, odpor a frekvenci. Měřicí obvod má tvar článku T, v němž podélné členy tvoří rezistory a příčný člen tvoří měřená cívka. Na přesném kapacitním mostu se změří přenosová admitance tohoto T-článku a vypočte se hodnota impedance měřeného objektu. Náhradní schéma měřicího obvodu je ve tvaru T. Podélný člen (větev 1) má admitanci $Y_1 = G_1 + j\omega C_1$, obdobně admitance podélné větve 2 je $Y_2 = G_2 + j\omega C_2$. Příčná větev 3 je tvořena impedancí měřeného objektu v sérii se zbytkovou impedancí Z_0 převážně vytvářenou impedancí plášťů přírodních kabelů mostu AH. Paralelně ke svorkám, k nimž je připojován měřený objekt, uplatňuje se parazitní kapacita C_3 , jež je dána mechanickým uspořádáním měřicího přípravku. Impedance měřeného

objektu zapojeného mezi měřicí svorky je definována jako $Z_x = R_x + j\omega L_x$. Obdobně naměřená impedance příčné větve při ideálním zkratu svorek je $Z_0 = R_0 + j\omega L_0$.

Odpory pro T-články volíme přednostně v dekadických hodnotách pro lepší možnost jejich měření porovnáním s dekadickými hodnotami odporu. Po transformaci L na C získáme oblast použití konstrukce T-článku. Pro ztráty sériovým odporem menším než 10 kΩ most neměří a automatika mostu znemožní měření. Pro C po transformaci menší než 0,1 pF není také vhodné tyto články pro měření L používat, protože přesnost měření se snižuje. Měřicí napětí určuje most v rozmezí od 0,5 mV do 15 V podle měřené C a ztrát. Pro aktivní T-články bylo uvažováno maximální napětí 3 V, aby nebyly zbytečně zvyšovány požadavky na napájecí napětí a použitý výkon zesilovače.

Odpor v T článku	100Ω	1kΩ	10kΩ	100kΩ
Označení T článku	T4	T3	T2	T1
Měřená L	C [pF]	C [pF]	C [pF]	C [pF]
1 H	příliš velké ztráty	příliš velké ztráty	3500	100
100 mH	příliš velké ztráty	příliš velké ztráty	1000	10
10 mH	příliš velké ztráty	10000	100	1
1 mH	příliš velké ztráty	1000	10	0,1
100μH	10000	100	1	Příliš malé C
10 μH	1000	10	0,1	Příliš malé C
1 μH	100	1	Příliš malé C	Příliš malé C

Tab. 7.1.3: Měření L na kapacitním mostě s články T

7.2 Vlastnosti kalibrovaných etalonů

V ČR je omezený počet typů etalonů. Toroidní etalony ruské výroby P597 a P5115 se vyskytují jen v omezeném množství několika sad. Všechny ostatní používané etalony jsou etalony s otevřeným polem RFT 0187, případně malé množství RFT 0186 a RFT 0199. Etalonů RFT 0187 je velmi velké množství, asi vzhledem k jejich snadné dostupnosti v minulosti a velmi dlouhé době výroby. U etalonů indukčnosti je zvykem udávat indukčnost pro sériové náhradní zapojení. Odpor nebo činitel jakosti se obvykle neudávají, protože cívky etalonů jsou vinuty měděným drátem, potom sériový odpor cívky se stává teplotně závislým a jeho smysl je pouze při umístění etalonu v termostatu.

7.2.1 Základní vlastnosti etalonů RFT 0187

Etalony RFT 0187 jsou etalony s otevřeným polem, vinuté na porcelánové kostře. Vzhledem k otevřenému poli se musí při měření umísťovat na vhodnou nekovovou podložku dostatečně daleko od kovových a feromagnetických předmětů. Základní vlastnosti etalonů ukazuje **tabulka 7.2.1**. Tabulka ukazuje parazitní kapacitu etalonu C, sériový odpor R a max. přípustný proud cívkou I_{max} .

L	C [pF]	R [Ω]	I_{max} [A]
2 mH	60	1,9	0,5
5 mH	55	3,7	0,5
10 mH	56	13	0,5
20 mH	50	28	0,35
50 mH	60	43	0,3
100 mH	50	120	0,15
200 mH	55	190	0,15
500 mH	66	120	0,15
1 H	70	250	0,12
2 H	60	680	0,07
5 H	70	1 k	0,05
10 H	60	4 k2	0,03

Tab 7.2.1: Základní vlastnosti etalonů RFT 0187

Tyto etalony tvoří převážnou část požadavků na kalibraci.

Teplotní závislost výrobce neudával, podle orientačního měření je v oblasti desítek ppm/°C. Pro velké hodnoty L se naměřená teplotní závislost blížila 100 ppm/°C. (Naměřeno bylo u jedné sady +18ppm/°C pro 10 mH, -28ppm/°C pro 100 mH, -13ppm/°C pro 1H, +95ppm/°C pro 10 H).

7.2.2 Základní vlastnosti etalonu RFT 0199

K etalonům RFT 0199 se nezachovala v žádné laboratoři dokumentace. Podle provedení jde zřejmě o toroidní etalony, vinuté asi na feromagnetické kostře. Pro měřicí signál do 10 mA není zřejmá závislost indukčnosti na signálu, ale pro 100 mA je již zřetelná nelinearita.

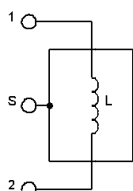
7.2.3 Připojení etalonů

Etalon při měření umísťujeme nejméně 60 cm od vodičů předmětů nejlépe položením např. na velkou papírovou krabici. Korekce Open a Short se provádí v místě připojení na svorkách etalonu. Zkratovací spojka má pro obvyklé rozměry etalonů indukčnosti 10 nH až 30 nH a je možné ji při malých hodnotách měřené indukčnosti připočíst jako korekci.

Etalony indukčnosti hrají při kalibraci RLC mostů malou úlohu, často mohou být nahrazeny simulovanými induktory. Obvykle se při kalibraci používá pouze jedna hodnota pro ověření funkčnosti indukční funkce mostu. Kalibrace v celém rozsahu vychází z kalibrací etalonů kapacity nebo odporu. Měří se obvykle tam, kde dosahují etalony optimálních vlastností 1 H až 10 H na 100 Hz, nižší hodnoty od 1mH do 1 H na 1 kHz, hodnoty pod 1 mH na pracovní frekvenci, která bývá od 10 kHz výše.

Při kalibraci etalonů indukčnosti nad 1 H je třeba věnovat velkou pozornost kapacitě mezi přívody, protože například kapacita 1 pF změní hodnotu etalonu 10 H na frekvenci 1 kHz o 40ppm.

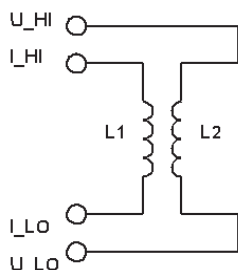
Etalony indukčnosti v toroidním provedení mají obvykle velmi výraznou frekvenční závislost a nejsou vhodné pro práce v širším frekvenčním rozsahu. Etalony s otevřeným polem válcové konstrukce mají lépe sledovatelnou frekvenční závislost, mohou se používat v rozsahu nejméně jedné dekády frekvence.



Obr. 7.2.1: Toroidní etalony se vyrábí se stíněním a podle zapojení stínění je možné je měřit jako dvou nebo tří svorkové

7.2.4 Etalony a měření vzájemné indukčnosti

Pro měření vzájemné indukčnosti pomocí autobalančních RLC metrů je možno použít zapojení podle **obr. 7.2.2**.

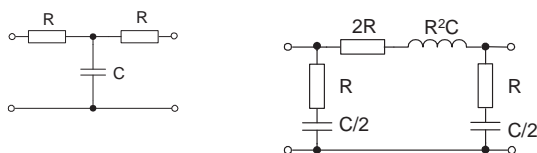


Obr. 7.2.2: Etalon vzájemné indukčnosti se skládá ze 2 cívek na jednom jádře.

Jednou cívkou je pouštěn proud z RLCG měřiče a je vyhodnocováno napětí indukované do druhé z cívek. Druhá možnost je použít dvě měření s oběma vinutími v sérii a s obráceným pořadím sekundárního vinutí.

7.2.5 Etalony velkých hodnot indukčnosti

Etalony indukčnosti pro hodnoty nad 1 H pro frekvenci 1 kHz je obtížné realizovat klasickými principy. Cívky vychází již příliš velké a vlivem kapacity vinutí při velkých hodnotách indukčnosti se příliš snižuje rezonanční kmitočet etalonu. Pro kalibraci měřičů impedancí pro velké hodnoty indukčnosti je nejlépe použít etalony se simulovanými induktory složenými z odporů a kapacit. Klasickým řešením je T článek s odpory v podélné větvi a kapacitou v příčné větvi, viz **obr. 7.2.3**.



Obr. 7.2.3: Pasivní simulovaný induktor, jeho náhradní schéma po transformaci náhradního zapojení z T na Π

Pro simulovanou indukčnost s T článkem se dvěma rezistory stejné hodnoty a bezstrátovou kapacitou C platí pro impedanci Z_{12} mezi vstupem a výstupem po transformaci z článku T na článek Π

$$Z_{12} = U_1 / I_2 \quad (7.2.1)$$

při výstupu nakrátko $U_2=0$ je

$$Z_{12} = 2R + j\omega RC. \quad (7.2.2)$$

To znamená že zapojení má při seriovém náhradním zapojení indukčnost L_s , seriový odpor R_s a činitel jakosti Q_s dané vztahy

$$L_s = R^2 C \quad R_s = 2R \quad Q_s = \omega RC. \quad (7.2.3)$$

Tím získáme simulovaný induktor vhodný pro realizaci etalonů ve velmi širokém rozsahu hodnot od 10 H až do 20 kH.

8 KALIBRACE RLC MOSTŮ

8.1 Princip činnosti mostů

Všechny v praxi používané širokopásmové elektronické měřiče impedancí pracují na stejném základním principu (autobalanční mosty).

Frekvenční rozsah těchto přístrojů je od 10 Hz do 10 MHz, nejdůležitější oblast je od 100 Hz do 1 kHz.

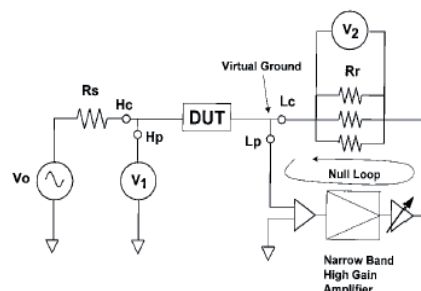
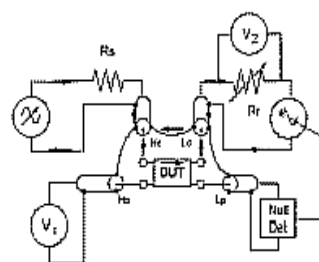


Figure 1: Circuit Diagram of the Auto-Balancing-Bridge Method

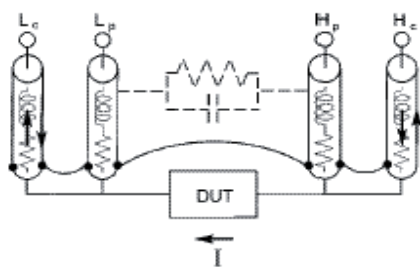
Obr. 8.1.1: Základní zapojení autobalančního mostu

Most na **obr. 8.1.1** je v principu most čtyřsvorkový. Mosty HP (Agilent) jsou čtyřpárové. Princip zapojení čtyřpárového mostu Agilent ukazuje **obr. 8.1.2**



Obr. 8.1.2: Princip čtyřpárového připojení u mostů Agilent

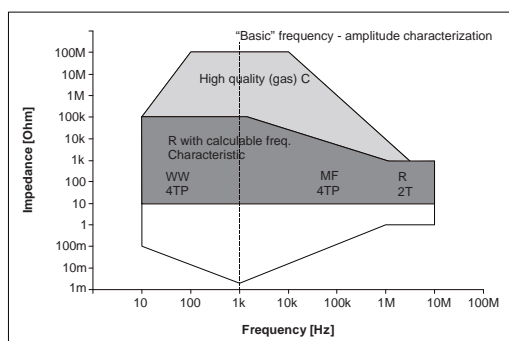
Čtyřpárové mosty vyžadují propojení stínění na konci měřicích kabelů, jak ukazuje **obr. 8.1.3**.



Obr. 8.1.3: Připojení měřeného etalonu k čtyřpárovému mostu vyžaduje propojení stínění přívodních kabelů na straně měřeného prvku.

Rozsah měřené impedance je mezi 1 mΩ až 100 MΩ a mosty ho mohou vyjádřit v libovolně zadané sériové nebo paralelní konfiguraci (jako R, L, C, Z, φ, Q, B, G a D). Autobalanci RLCG most má základní funkční blok převodník proud napětí, který je tvořen operačním zesilovačem s rezistorem ve zpětné vazbě, nebo pro širší frekvenční rozsah složitějším zapojením simulujícím stejnou funkci jako zmíněný operační zesilovač. Základní rozsahy mostu jsou určeny přepínáním zpětnovazebního rezistoru tohoto zesilovače. Je proto nanejvýš žádoucí kalibrovat mosty tohoto typu pomocí rezistorů s minimální a známou frekvenční závislostí, protože jedině tímto způsobem lze prověřit frekvenční závislost převodníku proudu na napětí bez dalších vlivů.

Pro kalibraci autobalancičních mostů není třeba znát frekvenční závislost etalonu odporu s takovou přesností jaká je nutná pro etalony odporu používané pro kalibraci teploměrných transformátorových mostů a pro velmi přesné impedanční mosty sloužící nejčastěji pro převod mezi jednotkou kapacity a jednotkou indukčnosti. Tam jsou požadovány přesnosti řádu ppm, ale jen pro omezený rozsah frekvence, obvykle maximálně do 1,6 kHz a jen pro některé diskrétní hodnoty R. Pro kalibraci RLC mostů postačí znát meze, kdy frekvenční závislost etalonů překročí některé zvolené hranice, kterými jsou v oblasti nižších kmitočtů do 100 kHz cca 20 ppm. V oblasti frekvencí nad 1 MHz je rozhodující provedení etalonů tak, aby byl co nejvíce potlačen vliv přívodů a dají se zde použít prakticky pouze speciálně konstruované čtyřpárové etalony vyrobené tak, aby mohly být k mostům připojeny přímo na referenční rovinu mostu, bez přívodů. Rozteče a provedení svorek se liší, naštěstí ale široký frekvenční rozsah mají hlavně mosty HP (Agilent) s jednotným provedením přívodů.



Obr. 8.1.4: Etalony vhodné pro kalibrace autobalancičního mostu v závislosti na hodnotě impedance a na frekvenci. Velké impedance není možné realizovat spolehlivě etalonovými odpory a proto jsou v této oblasti výhodnější k použití etalony kapacity.

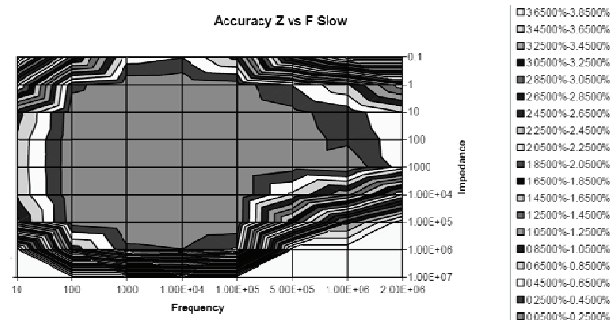
Pro vyšší hodnoty impedance nelze realizovat odporový etalon s dostatečně malou frekvenční závislostí. Proto je nutné v této oblasti používat etalony kapacity. Impedance kapacitního etalonu se s frekvencí mění, proto při přeladování měřící frekvence jeden konkrétní etalon kalibruje různé části rozsahů mostů. Tím je méně zřejmá frekvenční závislost vlastního přístroje.

Jak již bylo uvedeno etalony odporu jsou nejdůležitější a nezbytnou součástí pro kalibraci střídavých měřičů RLC.

Etalony indukčnosti hrají při kalibraci RLC mostů malou úlohu, často mohou být nahrazeny simulovanými induktory. Obvykle se při kalibraci používá pouze jedna hodnota pro ověření funkčnosti indukční funkce mostu. Kalibrace v celém rozsahu vychází z kalibrací etalonů kapacity nebo odporu, viz literatura [4], [5].

Komplikovanost specifikace ukazuje rovnice a obrázek 8.1.5, platné pro jeden z typů mostů Quadtech.

$$A\% = \pm \left[0.025 + \left(0.025 + \frac{.05}{|Z_m|} + \left(|Z_m| \times 10^{-7} \right) \right) \times \left(\frac{.02}{V_s} + .08 \times \frac{V_{fs}}{V_s} + \frac{(V_s - 1)^2}{4} \right) \times \left(0.7 + \frac{F_m}{10^5} + \frac{300}{F_m} \right) \right] \times K_1$$



Obr. 8.1.5: Specifikace mostu QT v grafické formě

8.2 Referenční podmínky kalibrace

Kalibrace se obvykle provádí v laboratorních podmínkách při teplotě (23 ± 2)°C. Přesnost měření teploty má být lepší než 0,5 °C.

Teplotu měříme kalibrovaným teploměrem s rozlišením 0,1 °C v místě kalibrace. Rozhodující je teplota použitého etalonu. Při měření je třeba respektovat nejistotu stanovení teploty a teplotní závislost etalonů. Pokud není změřena, lze orientačně předpokládat následující hodnoty.

Etalony odporu

S kovovou fólií do 3 ppm / °C
S kovovou vrstvou do 100 ppm / °C

Odpor nehermetizovaných etalonů R (například etalony Metra RN) závisí také na relativní vlhkosti, což je těžce sledovatelná nestabilita.

Etalony kapacity

Invarové plněné dusíkem 5 ppm / °C
Hliníkové, mosazné, izolace vzduch 50 ppm / °C

Slída, keramika NPO	35 ppm / °C
Fóliové, podle druhu fólie	200 ppm / °C

Etalony indukčnosti

Teplotní závislost indukčnosti závisí na provedení a materiálu jádra

Teplotní závislost sériového odporu je asi 0,4 % na °C
L závisí na relativní vlhkosti

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

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

Zkrat a rozpojený obvod

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

Zkrat (short)

Definuje nulu. Obvykle jsou propojeny svorky Hi Drive a Lo Drive, Hi Sense a Lo Sense a mezi těmito propojeními je zkratovací spojka. Pokud není k dispozici speciální prvek, lze použít přípravek se dvěma koaxiálními spojkami T a vsuvkou. Na provedení zkratu závisí přesnost při měření malých impedancí. Měření se musí provést s polohou kabelů jako při jejich použití aby se potlačila zbytková indukčnost mezi přívody.

Rozpojený obvod (open)

Většina přístrojů vyžaduje, aby byly vzájemně spojeny svorky Hi Drive s Hi Sense a Lo Drive s Lo Sense. Propojení lze provést například stíněnými krátkými kablíky. Open odstraňuje hlavně vliv zbytkové kapacity mezi přívody.

8.3 Metody kalibrace

Při kalibraci měřičů RLCG se používají 2 základní metody. Je to metoda black box a metoda funkčních bloků.

Metoda black box slouží ke kalibraci přístroje v rozsahu hodnot omezeném hodnotami použitých etalonů. Kontrolují se jednotlivé rozsahy a linearita v rámci rozsahu. Mimo kalibrovanou oblast nelze soudit nic o vlastnostech měřeného přístroje.

Metoda funkčních bloků vychází z funkčních bloků přístroje. Tato metoda se používá převážně pro autobalanční měřiče RLCG. Na tomto principu jsou založeny prakticky všechny měřiče RLCG pro všeobecné použití v kmitočtovém rozsahu max. do 10 MHz. Při této metodě se kontrolují všechny rozsahy s využitím etalonů odporu a nejméně jeden reaktanční rozsah etalonem kapacity, většinou 10 000 pF. Metoda umožňuje ka-

librovat přístroj v rozsahu celé specifikace, přičemž samozřejmě spolehlivost kalibrace mimo přímo měřené rozsahy může být nižší a proto může být metoda doplněna kalibrací metodou black box pro zákazníkem používané nebo požadované rozsahy. Metoda funkčních bloků většinou odpovídá doporučením výrobců, která jsou uváděna v dokumentaci výrobce.

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

Kalibrace podle výrobce

Jak již bylo řečeno prakticky všechny měřiče RLCG jsou založeny na stejném principu tzv. autobalančních mostů. Základním znakem tohoto principu je připojení měřené impedance na virtuální zem, tvořenou vstupem převodníku proud napětí. Na rozdíl od oblasti multimetrů není řešení těchto mostů a zejména provedení svorek a připojení daného přístroje sjednoceno. Klasická metrologie je zařízena na připojování třísvorkových nebo čtyřpárových etalonů ke kalibrovanému mostu. Stále častěji se setkáváme s tím, že mosty nejenže nemají v některých případech definované třísvorkové nebo čtyřpárové připojení, ale často jsou uzpůsobeny jen pro měření součástek, nejčastěji s drátovými vývody. Tak je řešena řada měřičů z východní Asie, jako je MIC 4070 a podobně, typickými představiteli jsou i mosty DIGI BRIDGE řady 1657 a 1659. Mosty bez svorek neumožní připojit stínění běžných etalonů a je možné je kalibrovat pouze sadou přesně změřených stabilních součástek nebo etalony, kalibrovanými pro dvousvorkové připojení. Další nevýhodou je, že výrobce nedoloží dokumentaci mostu, v tomto případě nejsou známy přepínací úrovně rozsahů a proto nelze rozumně stanovit pracovní postup pro metodu funkčních bloků.

U mostu nové řady QT 7000 jsou etalony pro kontrolu rozsahů požadovány v hodnotách 24,9 Ω, 374 Ω, 5k97 a 95k3. Jsou to hodnoty odporů, které u této řady mostů jsou použity u převodníku proud napětí s operačním zesilovačem AD 845. Protože tyto mosty se v ČR vyskytují, bylo nutné takovou řadu etalonů realizovat z odporů VISHAY S102K, protože originální sada od výrobce je velmi drahá.

Rozpracování metody funkčních bloků až do extrémů je zřejmé na měřiči WK 3425 firmy Wayne Kerr. Přesto, že se jedná o autobalanční RLCG most, je měřič specifikován jako analyzátor indukčnosti. Pro vlastní kalibraci není přítomno použít žádný etalon indukčnosti. Kalibrace se provádí sadou rezistorů 80 Ω, 640 Ω a 5k12 a sadou kondenzátorů 385 pF a 3,68 nF a 24,6 nF. Dále je nutný kondenzátor 20 nF s malými ztrátami. U přístroje WK 3425 navíc výrobce vyžaduje v některých testech velmi obsáhlého kalibračního postupu provádět měření i na deskách uvnitř rozkrytovaného přístroje.

Podle našich zkušeností a publikovaných údajů Hewlett Packard (Agilent) není ani při výrobě zajištěna kalibrace metodou Black Box.

8.4 Kalibrace multimetrů na kapacitních rozsazích

U multimetrů s funkcí měření kapacit zpravidla nelze připojit stínění, a proto se projevuje parazitní kapacita mezi při-

vody kondenzátoru a kovovým pouzdem. Parazitní kapacita má největší hodnotu u etalonu 10 pF (asi 25 pF) u ostatních je její hodnota nižší (asi 15 pF). Tyto přístroje ale většinou měří kapacity až od několika nF, kdy již je vliv parazitních kapacit malý (na 10 nF je asi 0,15 %). Vzhledem k nízké dosahované přesnosti těchto přístrojů, lze vliv parazitních kapacit zanedbat, stejně tak jako lze zanedbat chybu měření způsobenou použitím jiných měřicích principů, než jakými jsou navázány etalony.

Při měření zkontrolujeme na jaké frekvenci přibližně multimetry měří a jako hodnotu etalonu považujeme hodnotu etalonu na frekvenci blízké pracovní frekvenci. Vzhledem k tomu, že často multimetry pracují s neharmonickým signálem, je přesnost měření menší než při kalibraci klasických měřičů impedance. Protože multimetry často měří i vysoké hodnoty kapacity, nezbyvá, než použít ke kalibraci i elektrolytické kondenzátory změřené bezprostředně před použitím ke kalibraci na autobalančním mostu. Při měření použijeme malé napětí nebo bipolární elektrolytické kondenzátory. Použití elektrolytických kondenzátorů je nouzové řešení, použité proto, že kvalitnější kondenzátory ve svitkovém provedení jsou příliš rozměrné a nedostupné.

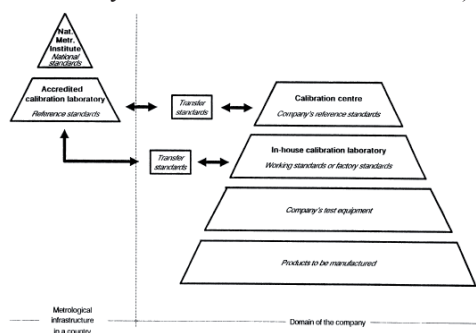
9 MOŽNOSTI KALIBRACE V ČR

Kalibrace v oblasti měření elektrických prvků zajišťuje v ČR řada laboratoří.

Většina organizací má zavedený systém jakosti. Tyto organizace mají pro kalibraci užívat jen organizace s adekvátním systémem jakosti. Mohou použít akreditované kalibrační laboratoře, nebo musí umět prokázat, že neakreditovaný poskytovatel kalibračních služeb zajišťuje nezbytné požadavky na systém jakosti. Pro akreditované kalibrační laboratoře platí metodický pokyn ČIA MPA 30-02-03 Návaznost měření.

Politika ČIA týkající se návaznosti měření v České republice vychází obecně z normy ČSN EN ISO/IEC 17025 a z obecné politiky návaznosti měření EA a ILAC. ILAC publikoval k návaznosti dokument ILAC-G2:1994 Traceability of Measurements, který je uveden např. na http://juat.gov.yu/dok/00100_ILAC%20G2%201994.pdf

Podle tohoto dokumentu tvoří národní systém národní institut, to je u nás ČMI a akreditované laboratoře (u nás působí v oblasti elektro více než 20 kalibračních laboratoří akreditovaných ČIA a 1 akreditovaná UKAS).



Obr. 9.1: Organizace metrologie v rámci jednoho státu podle str. 15 dokumentu ILAC G-2,

Pokud je potřebné nebo nezbytné prokázat návaznost k státním etalonům jiné země, je zpravidla požadováno, aby návaznost byla prokázána prostřednictvím zahraničních akreditovaných laboratoří ze země, které podepsaly multilaterální dohodu EA (MLA EA) (popř. mají uzavřenou bilaterální dohodu s MLA EA) nebo dohodu ILAC (MRA ILAC) nebo prostřednictvím zahraničních národních metrologických institutů, které podepsaly příslušné dohody o vzájemném uznávání (CIPM MRA).

Při hledání dosažitelných nejistot kalibrace pro oblast impedancí je potřebné uvážit, jaký je modul dané složky impedance na požadované frekvenci a jedná-li se o hlavní nebo vedlejší měřenou složku. Z toho pak vychází dosažitelné parametry. Při zadání kalibrace měřičů RLC je velmi důležitá metodika kalibrace. Často se setkáváme s neúplným rozsahem kalibrace. Je vhodné, požadovat rozsah kalibrace alespoň podle doporučení výrobce, je-li dostupné, a kalibrace by měla pokrýt i rozsah měřených impedancí při použití měřiče.

Kalibrační laboratoře může podle svých požadavků nalézt zákazník u ČIA na

<http://www.cai.cz/default.aspx?id=18&scopeId=8>

nebo v databázi více zemí, členů EA na

<http://www.european-accreditation.org/content/mla/what.htm>

V seznamu akreditovaných laboratoří je možné nalézt i nejlepší schopnosti měření (BMC) laboratoře, které mají ukázat zákazníkovi rozsah měření a nejlepší dosažitelnou nejistotu akreditované laboratoře.

Úlohu národního metrologického institutu pro ČR plní Český metrologický institut (ČMI).

ČMI má primární laboratoř pro DC R v OI Praha, pro ostatní oblast impedancí v OI Brno.

Mezinárodně uznaný rozsah měření nabízený běžným zákazníkům (CMC) je možné najít na

<http://kcdb.bipm.org/AppendixC/default.asp>

ČMI zajišťuje návaznost pro DC R od kvantového etalonu odporu. Pro kapacitu zajišťuje návaznost také od kvantového etalonu odporu, ale prostřednictvím mezinárodního úřadu pro míry a váhy BIPM. Pro frekvenční závislost kapacity (do 15 MHz) od INRIM Itálie, pro činitel ztrát kapacity D je návaznost od primárního etalonu VNIIM St. Petersburg, Rusko, a pro frekvenční závislost odporu (do 15 MHz) od akreditované laboratoře DERA, Velká Británie.

Vyjádření měřicích schopností v oblasti impedancí je složité, závisí nejen na veličině, ale i její vedlejší složce a velmi značně na frekvenci:

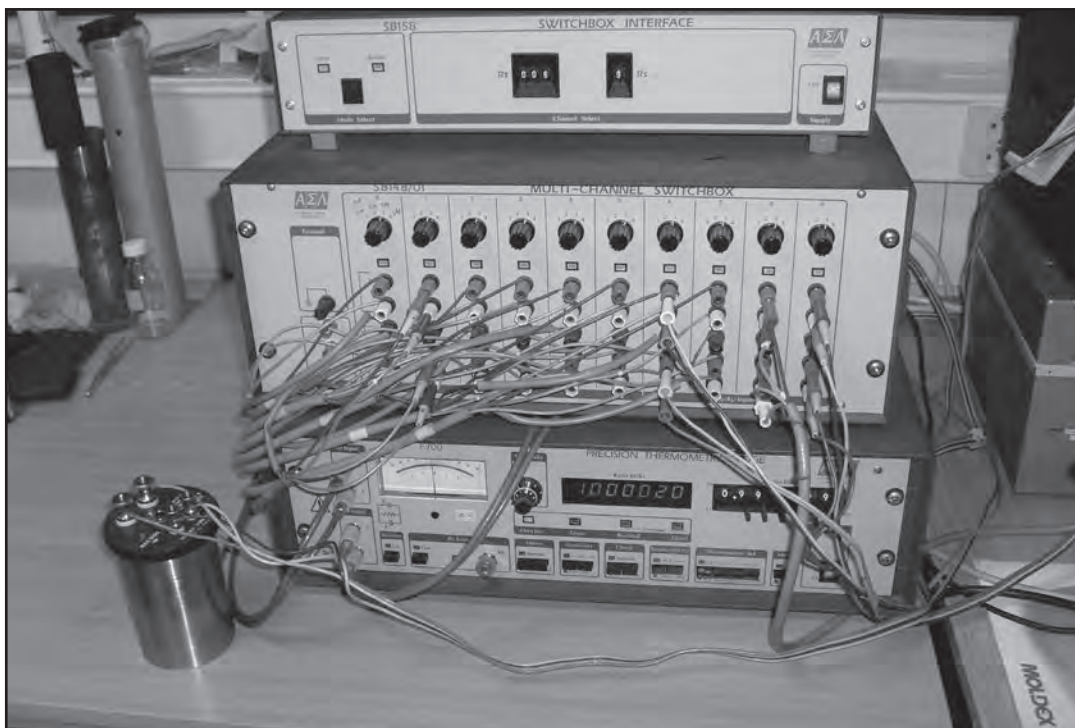
Kapacita	C
Rozsah měření na 1 kHz	0,002 pF až 1 F
Nejistota kalibrace od	0,5 ppm
Rozsah frekvence měření	20 Hz – 20 (50) MHz
Ztrátový činitel kapacity	D
Rozsah měření na 1 kHz pro C 2 aF až 1 F	10 ⁻⁶ až 10 000
Nejistota kalibrace od	0,5 ppm
Rozsah frekvence měření	20 Hz – 10 (50) MHz

Indukčnost	L
Rozsah měření na 1 kHz	1 μ H až 20 000 H
Nejistota kalibrace od	50 ppm
Rozsah frekvence měření	20 Hz – 10 (50) MHz,
Střídavý odpor	R
Rozsah měření na 1 kHz	1 m Ω – 10 G Ω ,
Nejistota kalibrace od	10 ppm,
Rozsah frekvence měření	20 Hz – 15 (50) MHz,
(AC/DC dif. R)	
Rozsah měření na 1 kHz	1 Ω , 100 Ω , 1 k Ω , 10 k Ω
Nejistota kalibrace od	0,2 ppm
Rozsah frekvence měření	0 až 50 kHz
Nf poměr napětí	pro indukční děliče
Rozsah měření na 1 kHz	0,000 001 až 1
Nejistota kalibrace od	0,05 ppm
Rozsah frekvence měření	50 Hz až 10 kHz
Nf poměr odporů	pro odporovou termometrii
Rozsah měření na 75 Hz	0,000 001 až 4
Nejistota kalibrace od	0,05 ppm
Rozsah frekvence měření	DC, 75 Hz, 375 Hz

10 LITERATURA SOUHRNNÁ

- [1] Horský, J. a kolektiv: Metrologie vlastností elektrických prvků, (Měření odporu, kapacity a indukčnosti v pásmu kmitočtu 0 až 10 MHz), příloha časopisu Metrologie 4/2007.
- [2] Agilent: Impedance measurement handbook. Firemní literatura.
- [3] Quad Tech: LCR measurement primer. Firemní literatura.
- [4] NPL: A Guide to measuring resistance and impedance below 1MHz.
- [5] Boháček, J.: Teorie měření. ČVUT Praha. 1988.
- [6] Horsky, J., Horsky, P.: Calibration of Multifunction and Multirange Instruments by Method of Functional Blocks. Cal Lab, International journal of metrology, USA, 3/1997.
- [7] Horsky, J.: Calibration of Autobalance RLC Meters. 9. congrés International Métrologie 99, Bordeaux, France 10/1999.
- [8] Horsky, J., Volny, K.: Resistance Standards with Calculable Frequency Characteristic for Calibration of Autobalance RLC bridges. CPEM 2000, Sydney, Australia.
- [9] Horsky, J., Ripper, L., Horska, J.: Long Term Stability of TESLA Fused Silica 10 pF Standards. CPEM 2002 Ottawa, June 2002, Canada.
- [10] Horsky, J., Horska, J.: Simulated Inductance Standards. CPEM 2002 Ottawa, June 2002, Canada.
- [11] Horsky, J.: Traceability chains of CMI with regards to impedance standards. AdMet 2003, Delhi, India. MAPAN, Journal of Metrology Society of India 2003.
- [12] Horsky, J.: Standards of inductance and RLC meters calibration. AdMet 2003, Delhi, India, MAPAN, Journal of Metrology Society of India 2003.
- [13] Horsky, J.: Resonant method of inductance measurement with inductive divider calibration set. MAPAN, Journal of Metrology Society of India 2003.
- [14] Ripper, L., Horsky, J., Horska, J.: Precision Inductance Measurement. Metrology and Assurance, Sozopol, Bulgaria, 2004.
- [15] Horsky, J., Horska, J.: Impedance Metrology in Czech Metrology Institute. Metrology and Assurance, Sozopol, Bulgaria, 2004.
- [16] Horský, J.: 5 let rozvoje metrologie impedancí v ČMI. Metrologie, č. 2/2003 str. 1.
- [17] Horsky, J.: Precision impedance measurement on high precision capacitance bridge. Metrology and Metrology and Assurance 2006, Sozopol, Bulgaria,
- [18] Horsky, J., Horska, J.: Внедрение неопределенности измерений в Чешской республике. 2. seminář (UM-2005) сборник ВИРТ-2004 (выпуск 8). Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Украјина 2005, а časopis СТАНДАРТИЗАЦІЯ, СЕРТИФІКАЦІЯ, ЯКІСТЬ Харьков, Украјина 2006.
- [19] Horska, J., Ripper, L.: A Set for Calibration of Inductance Voltage Dividers. Metrologie 2003, Congress Proceedings (CD-ROM), Toulon, France.
- [20] Horsky, J., Horska, J.: Calibration of RLC Meters in Ranges for Measuring of High Inductance Values. Metrology and Assurance, Sozopol, Bulgaria, 2005
- [21] Horsky, J.: Metrology of Electrical Quantities in Czech Republic Metrologija 99, Veliko Trnovo, Bulgaria 5/99. Metrology and Assurance, Sozopol, Bulgaria, 2004.
- [22] Horsky, J., Horska, J.: Precision inductance measurement on high precision commercial capacitance bridge. CPEM 2008, Boulder USA.
- [23] Semenov, Y., Horsky, J.: Optimization of the Precise Inductive Voltage Windings. CPEM 2002 Ottawa, Canada.
- [24] Horsky, J., Horska, J.: Simulated Inductance Standards. CPEM 2002 Ottawa, June 2002, Canada.
- [25] Horsky, J.: Неопределенность в практике и обзор документов. seminář Неопределенность измерения: научные, прикладные, нормативные и методические аспекты (UM-2008), Sudak, Крым, Украјина 2008.
- [26] Horsky, J., Horsky, P.: Calibration of Multifunction and Multirange Instruments by Method of Functional Blocks. CPEM 1998, Washington, USA.
- [27] Horsky, J., Horska, J.: Calibration of very high precision resistance bridges. Metrology and Assurance, Sozopol, Bulgaria, 2007.
- [28] Horsky, J.: Precision Inductance measurement on capacitance bridge, Metrology and Assurance, Sozopol, Bulgaria, 2006.
- [29] Abrasimov, E., Horsky, J., Horska, J.: International comparison of 1pF, 10 pF, 100 pF and 1000 pF capacitance standards frequency dependence. Metrology and Assurance, Sozopol, Bulgaria, 2008.

Měření vlastností elektrických prvků a měření teploty mohou mít i mnoho společného. Přesné měření teploty odporovými (platinovými) teploměry je měření elektrického odporu, které se často provádí pomocí přesných poměrových impedančních mostů porovnáním s etalonem odporu. Na obrázku je ukázka přepínače měřicích míst, přesného mostu pro měření odporů ASL F 700 a etalonu odporu Tinsley 5685 A se kterým je odpor měřeného PT teploměru porovnáván na pracovišti ČMI OI Brno.



Redakční rada:

Ing. Emil Grajciar (předseda), Ing. František Jelínek, CSc. (místopředseda), Ing. Jiří Kraus, Doc. Ing. Jiří Horský, CSc., Ing. Zdeněk Tůma, Ing. Milan Badal, Prof. Ing. Jaroslav Boháček, DrSc., Ing. Otokar Buzek, CSc., Ing. Pavel Ducháček, CSc., Ing. Jiří Kazda, Bc. Kateřina Čábelová, Ing. Jindřich Mlejnek, RNDr. Klára Popadičová, Jitka Hrušková.
PhDr. Bořivoj Kleník – šéfredaktor.

Časopis vychází 4 x ročně. Cena výtisku 80,- Kč, roční předplatné 320,- Kč + 9 % DPH + poštovné a balné. Vydavatel: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví (ÚNMZ) ve spolupráci s Českým metrologickým institutem a Českou metrologickou společností. Sídlo vydavatele: ÚNMZ, Gorazdova 24, 128 01 Praha 2. IČO: 48135267. Povolení tisku: registrace MK ČR 6111, MIČ 46 676, ISSN 1210-3543. Místo vydávání: Praha. Datum vydání: prosinec 2008. Nakladatelský servis, předplatné a inzerce: PhDr. Bořivoj Kleník, Bezdědice 19, 294 25 Katusice, tel./fax: +420 326 394 888, mobil: 603 846 527, e-mail: klenik@q-art.cz. Nevyžádané materiály se nevracejí. Za původnost a správnost příspěvků odpovídají autoři. Tato Tematická příloha je součástí č. 4/2008 časopisu Metrologie. © ÚNMZ

Foto na obálce:

Obrázek na titulní straně ukazuje měření vysokofrekvenčních etalonů indukčnosti při mezinárodním porovnání měření indukčnosti pro frekvence do 30 MHz mezi ČMI a Sibiřským Institutem metrologie SNIIM Novosibirsk, Rusko. Je to první mezinárodní porovnání měření indukčnosti pro vysoké frekvence mezi metrologickými instituty na světě.

Photo on the front page:

The front-page picture shows a measurement setup for high frequency inductance standard measurement comparison (first international interlaboratory comparison for high frequency inductance measurement between metrology institutes). This international inductance measurement comparison for frequency range up to 30 MHz is done between Czech Metrology Institute and Siberian Metrology Institute SNIIM Novosibirsk, Russia.

