



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

## AUTOMATICKÁ KONTROLA VYSOKOOHMOVÉ ODPOROVÉ DEKÁDY V KALIBRÁTORU 9010

AUTOMATIC CONTROL OF THE HIGH-RESISTANCE RESISTOR DECADE IN CALIBRATOR 9010

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Petr Bilík

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Soňa Šedivá, Ph.D.

BRNO 2019

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

**Student:** Petr Bilík

**ID:** 191970

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2018/19

## NÁZEV TÉMATU:

### **Automatická kontrola vysokoohmové odporové dekády v kalibrátoru 9010**

#### POKyny PRO VYPRACOVÁNÍ:

Téma je vypisováno ve spolupráci s firmou Meatest s.r.o.

1. Nastudujte práci s programem Caliber firmy Meatest s.r.o. pro automatizovanou práci s přístroji.
2. Proveďte literární průzkum v oblasti předpokládaných specifikací vysokoohmové odporové dekády v kalibrátoru 9010 a jeho komunikačních příkazů.
3. Definujte běžně používané hlavní a vedlejší parametry dekád.
4. Navrhněte metodiku pro stanovení parametrů dekády. Sestavte proceduru v programu Caliber.
5. Doporučte body, které se budou testovat při výrobě a následně při kalibraci odporové dekády kalibrátoru 9010.
6. Proveďte praktická měření vybraných parametrů dekád dle bodu zadání č. 3 a 4 s využitím vytvořené procedury v programu Caliber.
7. Proveďte rozbor nejistot, které vstupují do měření parametrů dekády při kalibraci, a pro provedenou kalibraci nejistoty vyčístele.
8. Dosažené výsledky měření zhodnoťte.

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Uživatelská příručka programu Caliber

[2] Manuál k přístroji Meatest 9010

**Termín zadání:** 4.2.2019

**Termín odevzdání:** 20.5.2019

**Vedoucí práce:** Ing. Soňa Šedivá, Ph.D.

**Konzultant:** Ing. Jan Bartoň

**doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.**  
*předseda oborové rady*

#### UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Tato práce se zabývá automatickou kalibrací vysokoodporové odporové dekády kalibrátoru 9010.

Teoretická část se věnuje multifunkčnímu kalibrátoru 9010 vyvinutého firmou Meatest, zejména jeho vysokoodporovou dekádou. Dále se práce zabývá programem Caliber, jenž slouží pro kalibrace měřicích přístrojů. V práci je uveden přehled metod pro stanovení odporu dekády a výpočtové vztahy chyb přístrojů a nejistot měření.

Výsledkem praktické části je vytvoření procedury kalibrace vysokoodporové odporové dekády a výstupní protokol generovaný programem Caliber pojednávající o správné funkci dekády kalibrátoru 9010.

## **Klíčová slova**

Automatická kalibrace, vysokoodporová dekáda, kalibrátor 9010, Caliber, Meatest s.r.o.

## **Abstract**

This bachelor thesis deals with automatic calibration of high-voltage resistance decade of calibrator 9010.

The theoretical part deals with multifunctional calibrator 9010 developed by Meatest company, mainly with its high-voltage resistance decade. The other part of this work deals with Caliber. This is program for calibration of instruments. List of methods for determination of resistance decade and equations for device errors and uncertainty of measurement is included.

The procedure of calibration high-voltage resistance decade is the result of the practical part. Output protocol from Caliber points to functionality of decade calibrator 9010.

## **Keywords**

Automatic calibration, high-voltage resistance decade, calibrator 9010, Caliber, Meatest s.r.o.

## **Bibliografická citace:**

BILÍK, Petr. *Automatická kontrola vysokoohmové odporové dekády v kalibrátoru* 9010. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/119001>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce Soňa Šedivá.

## **Prohlášení**

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Automatická kontrola vysokoohmové odporové dekády v kalibrátoru 9010 jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: **16. května 2019**

.....  
podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucí bakalářské práce Ing. Soně Šedivé, Ph.D. a konzultantu Ing. Janu Bartoňovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: **16. května 2019**

.....  
podpis autora

# Obsah

1	Úvod.....	13
2	Multifunkční kalibrátor 9010 .....	14
3	Vysokoohmová odporová dekáda kalibrátoru 9010 .....	16
3.1	Princip funkčnosti dekád.....	16
3.2	Parametry odporových dekád.....	16
3.3	Specifikace vysokoodporové dekády kalibrátoru 9010 .....	18
4	Program Caliber .....	20
4.1	Procedury .....	21
4.2	Karty přístrojů .....	23
4.2.1	Karta přístroje kalibrátoru 9010.....	24
4.3	Uživatelské funkce .....	24
5	Komunikační rozhraní.....	26
5.1	Sériová sběrnice RS 232 .....	26
5.2	GPIB (IEEE 488) .....	27
5.3	USB (Universal Serial Bus) .....	28
5.4	LAN (Ethernet) .....	29
5.5	VISA .....	29
5.6	SCPI .....	30
5.7	Srovnání komunikačních sběrnic .....	30
6	Komunikační příkazy vysokoohmové odporové dekády kalibrátoru 9010 .....	31
7	Metody pro stanovení hodnoty elektrického odporu dekády.....	33
7.1	Substituční metoda měření odporu.....	33
7.2	Voltampérová metoda měření odporu.....	34
8	Chyby měřicích přístrojů a nejistoty měření .....	36
8.1	Chyby měřicích přístrojů.....	36
8.2	Výpočet nejistot měření .....	37
8.2.1	Standardní nejistota typu A – $u_A(x)$ .....	37
8.2.2	Standardní nejistota typu B – $u_B(x)$ .....	38
8.2.3	Standardní kombinovaná nejistota – $u_C(x)$ .....	39
8.2.4	Rozšířená nejistota – $U(x)$ .....	40
8.2.5	Nejistoty nepřímých měření.....	40

9	Návrh procedury pro kalibraci .....	42
9.1	Schéma procedury .....	42
9.2	Funkce Resistance High Voltage (RHV) .....	42
9.3	Body kalibrace .....	44
9.4	Výpočty odporu a nejistot měření .....	47
9.4.1	Výpočet odporu.....	47
9.5	Výpočet nejistot měření kalibrace vysokoodporové dekády kalibrátoru 9010	47
9.6	Výpočet odporu a nejistot pro jeden bod kalibrace.....	48
9.7	Celkový výsledek kalibrace vysokoodporové dekády kalibrátoru 9010.....	53
10	Závěr .....	58



# Seznam symbolů a zkratk

## ZKRATKY:

FEKT	-	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
GPB	-	General Purpose Interface Board
LAN	-	Local Area Network
RHV	-	Resistance High Voltage
SCPI	-	Standard Commands for Programmable Instruments
SMD	-	Surface Mount Device
TCR	-	Thermal Coefficient of Resistance
TTL	-	Transistor Transistor Logic
USB	-	Universal Serial Bus
UUT	-	Unit Under Testing
VISA	-	Virtual Instrument Software Architecture
VUT	-	Vysoké učení technické v Brně

## SYMBOLY A VELIČINY:

$\delta_{CMP}$	-	základní chyba číslicového měřicího přístroje
$\delta_M$	-	mezní chyba z měřené hodnoty
$\delta_{MC}$	-	relativní chyba měřicího přístroje
$\delta_R$	-	chyba z největší hodnoty měřicího rozsahu
$\Delta_{MC}$	-	absolutní chyba měřicího přístroje
$\Delta_{Rx}$	-	absolutní chyba měření
$\chi$	-	koeficient odp. typu rozdělení náhodné veličiny
d	-	chyba v počtu jednotek posl. místa zobrazovače
hp3458a(2).uncertainty	-	nejistota přístroje HP3458a [A]
hp3458a(2).value	-	změřená hod. proudu multimetrem HP3458A [A]
I	-	elektrický proud [A]
$k_F$	-	koeficient rozšíření (nejistoty)
$k_S$	-	koeficient závislý na počtu měření (nejistoty)
m142(3).uncertainty	-	nejistota přístroje M142 [V]
m142(3).value	-	nastavená hodnota napětí na kalibrátoru M142 [V]
n	-	počet měření
Odchylka	-	absolutní chyba měření (program Caliber)
Povoleno	-	povolený interval odporů dekády (prog. Caliber)
R	-	elektrický odpor [ $\Omega$ ]
$R_0$	-	odpor při teplotě $T_0$
$R_1$	-	naměřený odpor při teplotě $T_1$
$\overline{s_x}$	-	výběrová směrodatná odchylka výběr. průměru
TCR	-	teplotní koeficient odporu [ppm / °C]

$U$	-	elektrické napětí [V]
$u_A(x)$	-	standardní nejistota typu A
$u_B(x)$	-	celková standardní nejistota typu B
$u_{BZ}(x)$	-	standardní nejistota typu B určitého zdroje nejistot
$u_C(x)$	-	standardní kombinovaná nejistota
$u_c(I)$	-	kombinovaná nejistota proudu [A]
$u_c(R)$	-	kombinovaná nejistota odporu [ $\Omega$ ]
$u_c(U)$	-	kombinovaná nejistota napětí [V]
$U_{sa}$	-	standardní nejistota měření odporu [ $\Omega$ ]
$U(x)$	-	rozšířená nejistota
$\bar{x}$	-	aritmetický průměr z naměřených hodnot
$x_i$	-	i-tá naměřená hodnota
$X_M$	-	naměřená hodnota
$X_R$	-	rozsah měřicího přístroje
$X_s$	-	standardní hodnota odporu [ $\Omega$ ]

## Seznam obrázků

Obr. 2.1: Multifunkční kalibrátor 9010 [2].....	14
Obr. 2.2: Pohled na svorky a ovládací prvky v čelním panelu kalibrátoru [3].....	15
Obr. 2.3: Zadní panel kalibrátoru 9010 [3].....	15
Obr. 3.1: Zjednodušené schéma odporové dekády.....	16
Obr. 3.2: Závislost poměrného zatížení na teplotě pro rezistory [24].....	17
Obr. 4.1: Znázornění hlavního okna programu Caliber.....	20
Obr. 4.2: Struktura programu Caliber.....	21
Obr. 4.3: Modul procedury.....	22
Obr. 4.4: Modul Karty přístrojů.....	23
Obr. 4.5: Makro SET vysokoodporové dekády kalibrátoru 9010.....	24
Obr. 4.6: Funkce RHV (Resistance High Voltage).....	25
Obr. 5.1: Typy komunikačních rozhraní využívající program Caliber.....	26
Obr. 5.2: Konektor RS 232 [6].....	26
Obr. 5.3: Princip komunikace přes RS 232 [7].....	27
Obr. 5.4: Konektor GPIB [12].....	28
Obr. 5.5: Konektory USB, typ A a typ B [9].....	28
Obr. 5.6: Zapojení síťového konektoru RJ-45 [14].....	29
Obr. 7.1: Kalibrace ohmmetru pomocí kalibrátoru 9010 [3].....	33
Obr. 7.2: Schéma zapojení pro kalibraci voltampérovou metodou [15].....	34
Obr. 7.3: Kalibrace dekády M194 voltampérovou metodou [12].....	35
Obr. 9.1: Schéma procedury kalibrace vysokoodporové dekády.....	42
Obr. 9.2: Funkce RHV.....	43
Obr. 9.3: Makro SET funkce RHV kalibrátoru 9010.....	43
Obr. 9.4: Makro MEASURE funkce RHV kalibrátoru 9010.....	44

## Seznam tabulek

Tab. 3.1: Specifikace dekády kalibrátoru 9010: [3].....	18
Tab. 3.2: Rozsahy vysokohmové odporové dekády kalibrátoru 9010 [3] .....	19
Tab. 5.1: Napět'ové úrovně při komunikaci přes RS 232 .....	27
Tab. 5.2: Srovnání různých typů komunikačních rozhraní.....	30
Tab. 8.1: Tabulka závislostí koeficientů $k_s$ na počtu měření $n$ [16].....	38
Tab. 8.2: Příklady hodnot koeficientů rozšíření (nejistoty) .....	40
Tab. 9.1: Jednotlivé rozsahy použité v kartě přístroje 9010 ve funkci RHV [3] .....	44
Tab. 9.2: Body kalibrace vysokohmové odporové dekády kalibrátoru 9010 .....	46
Tab. 9.3: Použité přístroje .....	48
Tab. 9.4: Podmínky měření.....	48
Tab. 9.5: Bod kalibrace, pro který je proveden výpočet.....	49
Tab. 9.6: Naměřené hodnoty programem Caliber .....	49
Tab. 9.7: Specifikace kalibrátoru M142 ve funkci zdroje napětí [21] .....	50
Tab. 9.8: Specifikace multimetru HP3458A ve funkci měřidla proudu [22] .....	51
Tab. 9.9: Teoreticky vypočtené hodnoty odporu a nejistot měření .....	52
Tab. 9.10: Srovnání hodnot pro bod kalibrace 100 k $\Omega$ , 100 V.....	52

# 1 ÚVOD

Tato práce se věnuje automatizované kalibraci měřicích přístrojů, speciálně kalibraci vysokoohmové odporové dekády nacházející se v multifunkčním kalibrátoru 9010 od firmy Meatest.

Kalibrace přístrojů je v současnosti velmi důležitým aspektem pro správnou práci celých systémů v oblasti měření a regulace. Termín kalibrace znamená souhrn úkonů, při kterých se určí metrologické charakteristiky přístroje na základě jeho přímého srovnání s etalony. Firma Meatest a její software Caliber se snaží tuto činnost zefektivnit a zautomatizovat za pomoci výpočetní techniky [1], [2].

Firma MEATEST s. r. o. byla založena roku 1991. Tato firma se specializuje na výrobu a prodej produktů spadajících do oblasti „měřicí a regulační techniky“. Mezi produkty firmy Meatest patří kalibrační přístroje, testery bezpečnosti, průtokoměry, měřicí přístroje a mnoho dalšího [2].

Kromě přístrojů vyvíjí Meatest i vlastní software pro kalibraci měřicích přístrojů. Mezi tyto programy patří program Caliber pro automatizovanou kalibraci přístrojů, kde se využívá databáze přístrojů a kalibrací WinQbase. Dalšími programy firmy Meatest je program FlowAssistant pro konfiguraci průtokoměrů M9x0, a programy Power a PowerAssistant pro automatizovanou kalibraci převodníků výkonu [2].

Bakalářská práce se věnuje kalibrátoru 9010, zejména popisu jeho vysokoohmové odporové dekády, jejím vlastnostem a parametrům. Dále je bakalářská práce zaměřena na seznámení se s programem Caliber od firmy Meatest používající se na automatizovanou kalibraci široké škály měřicích přístrojů.

Hlavním cílem práce je vytvoření procedury v programu Caliber pro automatickou kalibraci vysokoohmové odporové dekády kalibrátoru 9010 a vyčíslení nejistot při kalibraci. Procedura kalibrace má za úkol nahradit lidskou jednotku ve stereotypní práci kalibrace měřicích přístrojů. Procedura kalibrace vysokoohmové odporové dekády kalibrátoru 9010 nastavuje přes program Caliber na kalibrátoru jeho funkce, rozsahy a proměřuje jednotlivé body kalibrace přítomné v proceduře. Na konci každé kalibrace je výstupní protokol s podrobnostmi proměrování kalibrátoru a stavem, zda-li je možno kalibrátor bez dalších změn uvést na trh. Díky tomuto automatizovanému procesu je kalibrace měřicích přístrojů mnohem rychlejší a efektivnější.

## 2 MULTIFUNKČNÍ KALIBRÁTOR 9010

Multifunkční kalibrátory se využívají především v kalibračních laboratořích jako přesná etalonová měřidla pro kalibraci elektrických veličin. Hlavní výhodou multifunkčních kalibrátorů je jejich univerzálnost, protože je lze využít ke kalibračním měřidel z různých oblastí (napětí, proud, odpor, kapacita, výkon, energie, kmitočet, teplota apod.). Dále s nimi lze provádět kontroly převodníků různých typů, regulátorů a vyhodnocovacích jednotek bez potřeby dalších měřicích přístrojů [2], [3].

V případě multifunkčního kalibrátoru 9010 se jedná o nový produkt firmy Meatest. Multifunkční kalibrátor 9010 má nahradit starší kalibrátory M140 a M142. Mezi hlavní výhody tohoto kalibrátoru patří především jeho univerzálnost.

Kalibrátor 9010 splňuje požadavky na kalibrace většiny přístrojů (multimetry, ohmmetry, měřiče a analyzátory výkonu, měřiče energie, převodníky, testery izolace, procesní měřidla apod.). Díky proudové zatížitelnosti napěťového výstupu až 50 mA lze kalibrátor 9010 použít i pro kalibrace analogových měřidel s vysokou spotřebou. V porovnání s dřívějšími kalibrátory řady M14x lze kalibrátor 9010 využít ke kalibraci 400 MHz osciloskopů, 1,5 kV testerů izolace či 1 MW měřičů výkonu [4].

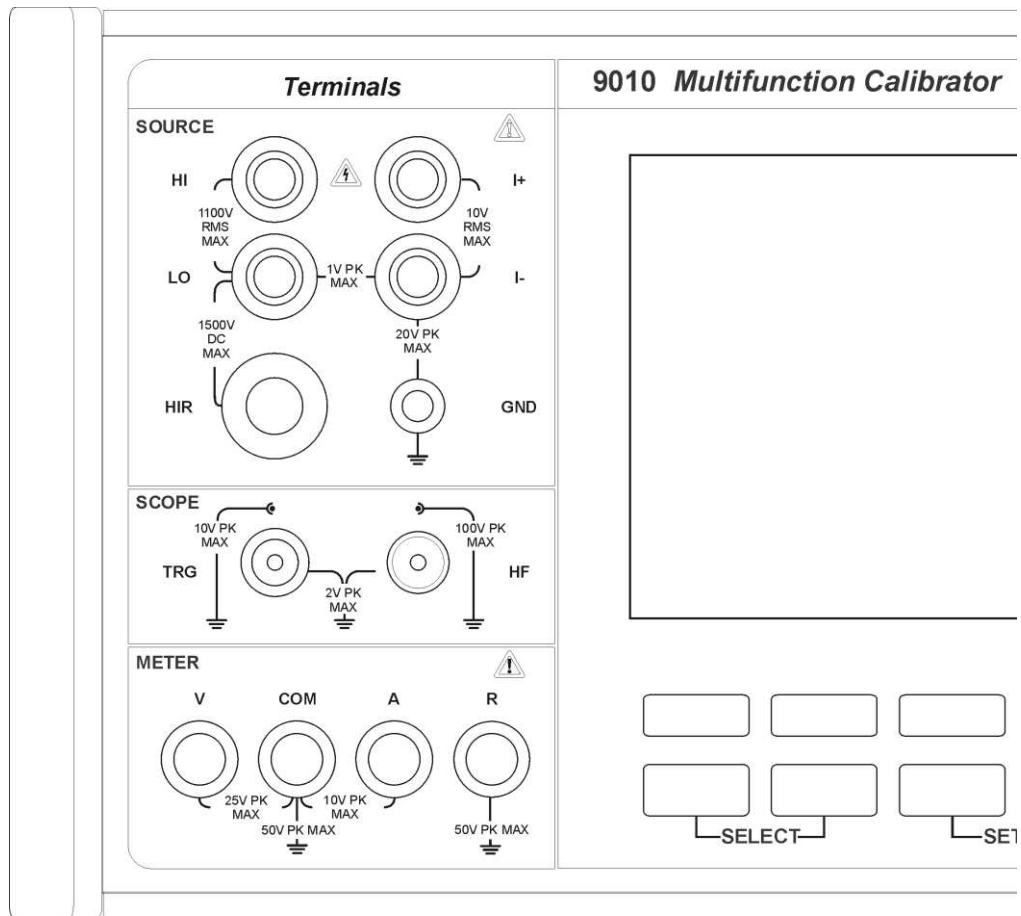
Kalibrátor 9010 lze využít pro kalibraci napětí, proudu, odporu, kapacity, výkonu, energie, fázového posunu, frekvence a termočlánků. Dále disponuje možností připojení dalších modulů ke kalibraci dalších fyzikálních veličin. Základní nejistota kalibrátoru je 35 ppm [4].

Tato práce se věnuje především vysokoohmové odporové dekádě kalibrátoru. Kromě této dekády ale kalibrátor 9010 disponuje také další (nižší) odporovou a kapacitní dekádou. Dále se dá kalibrátor využít jako přesný zdroj napětí či proudu [4].

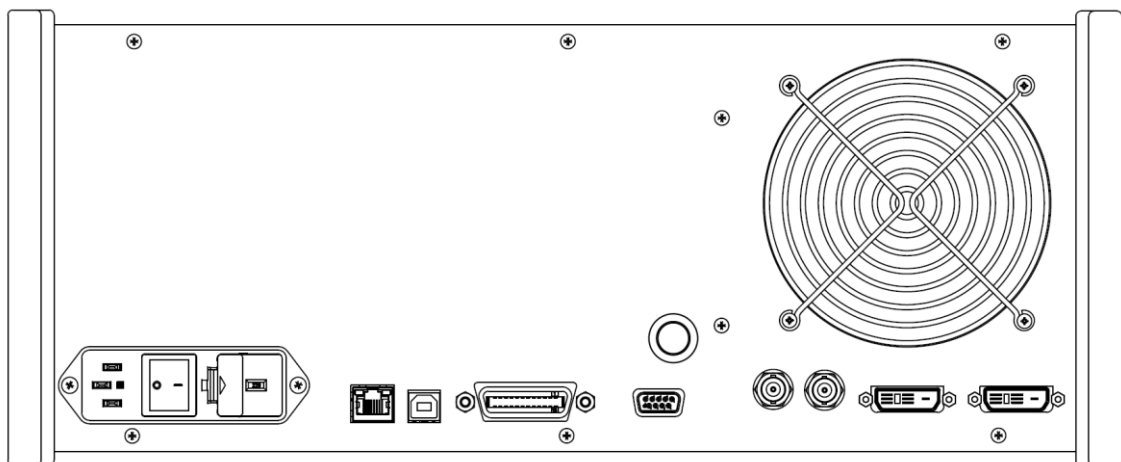
Na obr. 2.1 lze vidět pohled na kalibrátor 9010. Kalibrátor nabízí uživatelsky příjemné ovládání.



Obr. 2.1: Multifunkční kalibrátor 9010 [4]



Obr. 2.2: Pohled na svorky a ovládací prvky v čelním panelu kalibrátoru [4]



Obr. 2.3: Zadní panel kalibrátoru 9010 [4]

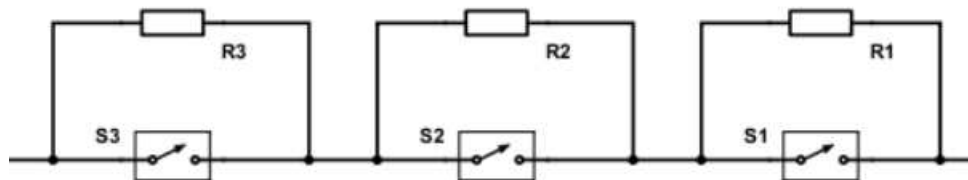
## 3 VYSOKOOHMOVÁ ODPOROVÁ DEKÁDA KALIBRÁTORU 9010

Vysokoohmové odporové dekády se využívají ke kontrolám parametrů měřičů izolačních odporů a megaohmmetrů. Dále se využívají pro opravy a kalibraci měřících přístrojů určených pro revizní techniky [5].

### 3.1 Princip funkčnosti dekád

Ve vysokoohmové odporové dekádě kalibrátoru 9010 je přítomno třicet odporových segmentů od  $51 \Omega$  do  $8,3 \text{ G}\Omega$ . Každý odporový segment lze připojit či zkratovat k dosažení požadované hodnoty odporu pomocí relé (obr. 3.1). Vysokoohmová odporová dekáda navíc disponuje diskretní součástkou o hodnotě  $100 \text{ G}\Omega$ . Tento segment ale ještě nebyl v kalibrátoru funkčně zprovozněn [2], [4], [6].

Každý odporový segment je tvořen několika do série řazenými rezistory, jejichž výsledná hodnota odporu je dána součtem jejich hodnot odporů. Hodnoty odporových segmentů jsou voleny tak, aby se na uvedených rozsazích (Tab. 3.1) dosáhlo požadované přesnosti.



Obr. 3.1: Zjednodušené schéma odporové dekády

Jako relé jsou zde využita relé firmy MEDER (MRE12 1A85, LI12 1A85, SIL12 1A72 71L).

### 3.2 Parametry odporových dekád

#### Rozsah odporu ( $R_d$ ) [ $\Omega$ ]

Hlavní a nejdůležitější parametr odporových dekád. Rozsah odporu dekády udává nejmenší a nejvyšší hodnotu odporu, kterou lze na odporové dekádě nastavit. Typické hodnoty pro vysokoohmové dekády jsou řádově od desítek  $\text{k}\Omega$  do jednotek až desítek  $\text{G}\Omega$ .



### Jmenovitý odpor ( $R_r$ ) [ $\Omega$ ]

Základní údaj rezistorů, z nichž jsou dekády sestaveny. Odpor zjištěný měřením při 25°C.

Spojováním jednotlivých rezistorů vznikají v dekádě odporové segmenty, které jsou základem odporových dekád. Jednotlivé segmenty se vybírají či zkratují vnitřní logikou dekád.

### Tolerance odporu ( $\delta_R$ ) [%]

Hodnota v procentech, o kolik se může lišit skutečná hodnota odporu součástky oproti hodnotě odporu dané výrobcem. Typické hodnoty tolerance odporu jsou 0,1 %, 1 % a 5 %.

$$\delta_R = \frac{\mp \Delta_R}{R} 100 \quad [\%] \quad (3.1)$$

$\Delta_R$  – absolutní chyba odporu,  $\delta_R$  – tolerance odporu

### Maximální napětí ( $U_{Max}$ ) [V]

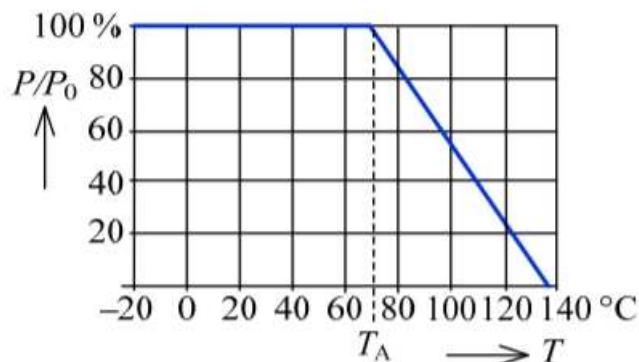
Maximální napětí, které lze přiložit na vývody rezistoru, aniž by došlo k jeho zničení (maximální napětí, na které je rezistor konstruován). Typické hodnoty jsou 150 V a 300 V, Surface Mount Device (SMD) rezistory mají nižší maximální napětí (desítky V).

SMD součástky jsou určeny pro povrchovou montáž plošných spojů. Pro osazení SMD součástek není potřeba vrtat díry, mají menší rozměry než drátové součástky, a proto mají velké využití.

### Jmenovité zatížení ( $P_0$ ) [W]

Maximální elektrický příkon, který jde trvale na rezistor přivést, aniž by došlo k jeho zničení. Typické hodnoty pro klasické vývodové rezistory jsou 0,6 W, pro SMD rezistory to jsou setiny až desetiny W.

V datasheetech se často uvádějí v podobě grafů závislosti poměrného zatížení rezistoru na teplotě okolního prostředí.



Obr. 3.2: Závislost poměrného zatížení na teplotě pro rezistory [7]

### Teplotní koeficient odporu (TCR) [ppm/K]

Pomocí tohoto koeficientu garantuje výrobce maximální závislost odporu na teplotě, tzn. udává vratnou změnu odporu vlivem teploty. Jednotkou teplotního koeficientu odporu je ppm/K. Kvalitní rezistory mají TCR menší než 15 ppm/°C.

$$TCR = \frac{R_1 - R_0}{R_0(T_1 - T_0)} 10^6 \quad [ppm/^\circ C] \quad (3.2)$$

$R_0$  – odpor při teplotě  $T_0$ ,  $R_1$  – naměřený odpor při teplotě  $T_1$

### Pracovní rozsah teplot ( $T_F$ ) [°C]

Taková oblast teplot, při nichž rezistor neztrácí vlastnosti udávané výrobcem. Nejčastěji se pracovní rozsah teplot pohybuje v rozmezí 5 – 40 °C.

### Závislost na vlhkosti ( $Q_r$ ) [Ω/%]

Stejně jako je hodnota odporu rezistoru závislá na teplotě, je závislá i na vlhkosti. Jednotkou závislosti odporu na vlhkosti je Ω/%.

## 3.3 Specifikace vysokoodporové dekády kalibrátoru 9010

Pomocí výše uvedených parametrů lze definovat vysokoohmovou odporovou dekádu kalibrátoru 9010. Parametry dekády lze nalézt v dokumentaci ke kalibrátoru 9010 nebo v Tab. 3.1 [2], [3], [4], [6].

Vysokoohmová odporová dekáda kalibrátoru 9010 nabízí rozsah odporu od 10 kΩ až do 100 GΩ s maximálním pracovním napětím 1500 V. Dekáda je konstruovaná pro napájení stejnosměrným napětím a pouze pro dvou vodičové připojení [4].

**Tab. 3.1: Specifikace dekády kalibrátoru 9010: [4]**

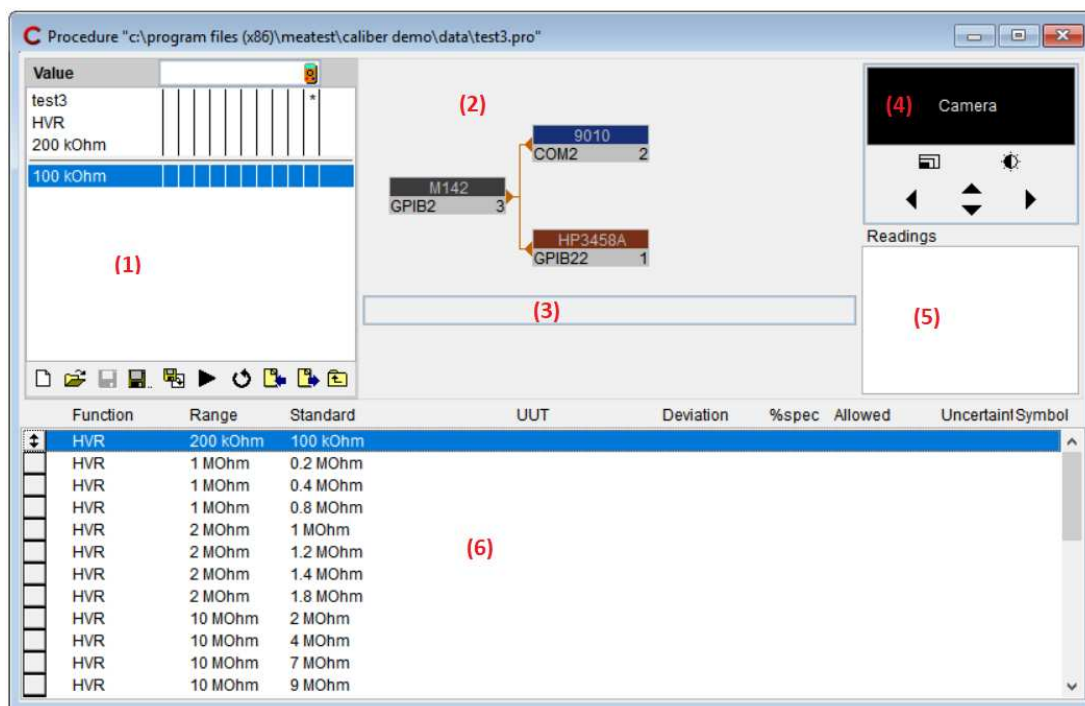
Rozsah odporu	10 kΩ - 10 GΩ (+100 GΩ diskretní hodnota)
Rozlišení	3 ½ digit
Maximální napětí	315 – 1500 VDC (záleží na hodnotě odporu)
Teplotní závislost: (pro teploty 13 – 33 °C)	0,1 x přesnost odporu / °C
Závislosti na vlhkosti: (pro rozsah 100 MΩ - 9,99 GΩ) (pro rozsah 10 GΩ - 100 GΩ)	0,02 x přesnost odporu / % RH 0,05 x přesnost odporu / % RH pro okolní vlhkost v rozsahu 50 – 70 % RH

**Tab. 3.2: Rozsahy vysokoohmové odporové dekády kalibrátoru 9010 [4]**

<b>Odporové rozsahy</b>	<b>Přesnost [%]</b>	<b>Povolené napětí [V]</b>
100 - 999,9 k $\Omega$	0,1	315
1 - 1,999 M $\Omega$	0,1	1250
2 - 9,999 M $\Omega$	0,1	1500
10 - 99,99 M $\Omega$	0,1	1500
100 - 499,9 M $\Omega$	0,2	1500
500 - 999,9 M $\Omega$	0,2	1500
1 - 9,999 G $\Omega$	0,5	1500
10 - 19,99 G $\Omega$	1	1500
20 - 100 G $\Omega$	1	1500

## 4 PROGRAM CALIBER

Program CALIBER je určen pro automatizovanou kalibraci měřicích přístrojů. Jeho výstupem je protokol o provedení kalibrace – tabulka s naměřenými a referenčními hodnotami, nejistoty měření, odchylky a stav přístroje, zda-li přístroj kalibrací prošel úspěšně. Na obr. 4.1 lze vidět hlavní okno programu Caliber Demo 2.51.



Obr. 4.1: Znáznornění hlavního okna programu Caliber

Popis hlavního okna programu Caliber (obr. 4.1):

- 1) Okno procedury – nastavení funkcí procedury, rozsahy a body kalibrace, výpočetní vztahy a nejistoty
- 2) Schéma procedury – schéma, dle kterého se procedura provádí, lze vidět signálový tok mezi zařízeními a typ komunikace
- 3) Stavový řádek – zobrazení příkazů
- 4) Okno ovládání kamery – k ovládání kamery pro odečet hodnot na přístrojích
- 5) Readings – ukazuje poslední přečtené hodnoty na zařízeních
- 6) Protokol – okno zobrazuje jednotlivé body kalibrace, naměřené hodnoty, nejistoty a zhodnocení, zda bod kalibrací prošel

V programu CALIBER musí být vždy přítomen kalibrovaný přístroj (UUT – Unit Under Testing) a etalon (ve většině případů se jedná o multifunkční kalibrátor). Dále se zde mohou vyskytovat zdroje, převodníky, přepínače a popř. kombinace jednotlivých

typů zařízení. Zdroje slouží jako zdroj signálu (zdroje napětí, proudu apod.). Velké využití v programu mají i převodníky, sloužící pro převod veličiny na jinou veličinu (např. pro převod napětí na proud nebo odpor) nebo sloužící jako multiplikátor (např. pro násobení konstantou, převedení na jiný rozsah apod.) [5].

Přístroje lze ovládat manuálně nebo automatizovaně přes počítač. Počítač se zařízeními komunikuje přes sběrnice RS232, GPIB, USB, Ethernet, RS485 apod. [5].

V programu Caliber lze nalézt čtyři základní moduly:

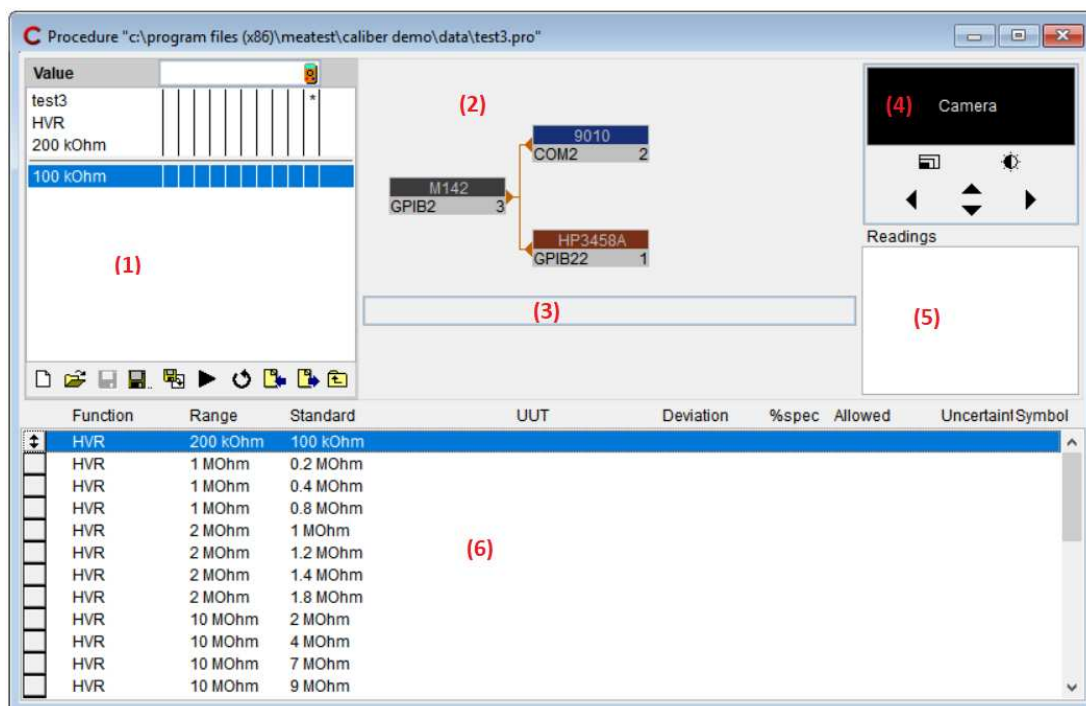


**Obr. 4.2: Struktura programu Caliber**

Každý přístroj je specifikován v jeho kartě přístroje. V kartě přístroje se vyskytují i makra (komunikační příkazy) pro ovládání zařízení (nastavení hodnoty, zapnutí/vypnutí výstupu apod.). Při kalibraci se postupně proměřují jednotlivé body kalibrace. V každém bodě se zdroje nastaví na požadovanou hodnotu a na měřicích přístrojích se odečte hodnota sloužící pro ověření správné funkčnosti testovaného přístroje. Výpočty probíhají automatizovaně, přičemž výsledky se zobrazují v okně protocol [5].

## 4.1 Procedury

Kalibrace měřicích přístrojů probíhá podle kalibračních procedur. K vytvoření kalibrační procedury slouží modul PROCEDUREY (obr. 4.3). V tomto modulu lze i přímo provádět kalibrace.



**Obr. 4.3: Modul procedury**

Popis hlavního okna programu Caliber (obr. 4.1):

- 1) Okno procedury – nastavení funkcí procedury, rozsahy a body kalibrace, výpočetní vztahy a nejistoty
- 2) Schéma procedury – schéma, dle kterého se procedura provádí, lze vidět signálový tok mezi zařízeními a typ komunikace
- 3) Stavový řádek – zobrazení příkazů
- 4) Okno ovládání kamery – k ovládání kamery pro odečet hodnot na přístrojích
- 5) Readings – ukazuje poslední přečtené hodnoty na zařízeních
- 6) Protokol – okno zobrazuje jednotlivé body kalibrace, naměřené hodnoty, nejistoty a zhodnocení, zda bod kalibrací prošel

V okně PROCEDURE lze vidět schéma zapojení kalibrace s jednotlivými přístroji. UUT (kalibrovaný přístroj) je zobrazen modře, standardy (etalony) červeně a zdroje černě. Každému přístroji je přiřazen určitý druh komunikace, kterou lze vidět v levém dolním rohu každého přístroje. Vazby mezi přístroji znázorňují signálový tok mezi nimi [5].

V levé horní části modulu jsou zobrazeny základní informace o proceduře, její název, použité funkce, rozsahy a body samotné kalibrace.

Dolní část okna slouží jako protokol, který se během kalibrace postupně doplňuje. Lze v něm vidět jednotlivé body kalibrace, rozsahy a použité funkce měřicích přístrojů. Po provedení kalibrace se doplňují naměřená data, odchylky, nejistoty a stav zařízení, jestli prošel kalibrací v daném bodě. Funkce a rozsahy pro jednotlivé přístroje

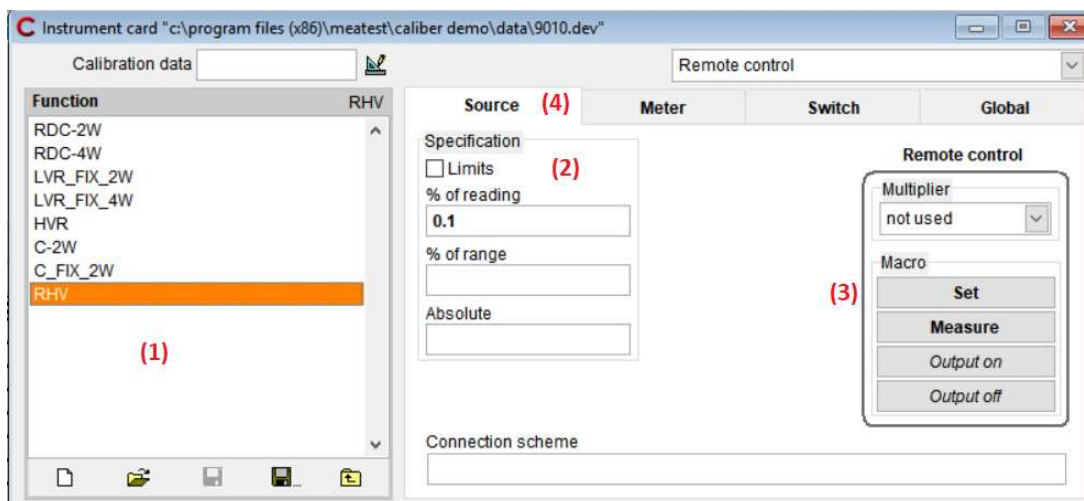
jsou definované v jeho kartě přístroje. Body kalibrace lze automaticky v okně procedury vygenerovat, což ale v některých případech nemusí stačit ke správné kalibraci. U odporových dekád program zná pouze rozsahy dekády, a proto nedokáže správně otestovat všechny odporové segmenty nacházející se v dekádě a je nutný zásah uživatele. V okně procedury lze přidávat další funkce, rozsahy i body kalibrace.

Používané symboly značící stav kalibrace ve výstupním protokolu:

- ok      vyhovuje
- ?      chyba naměřená je v interval mezní chyba +/- nejistota měření
- \*      nevyhovuje

## 4.2 Karty přístrojů

Každý přístroj použitý v programu Caliber musí být definován svou kartou přístroje. Kartu přístroje lze vytvořit v modulu KARTY PŘÍSTROJŮ (obr. 4.4).



Obr. 4.4: Modul Karty přístrojů

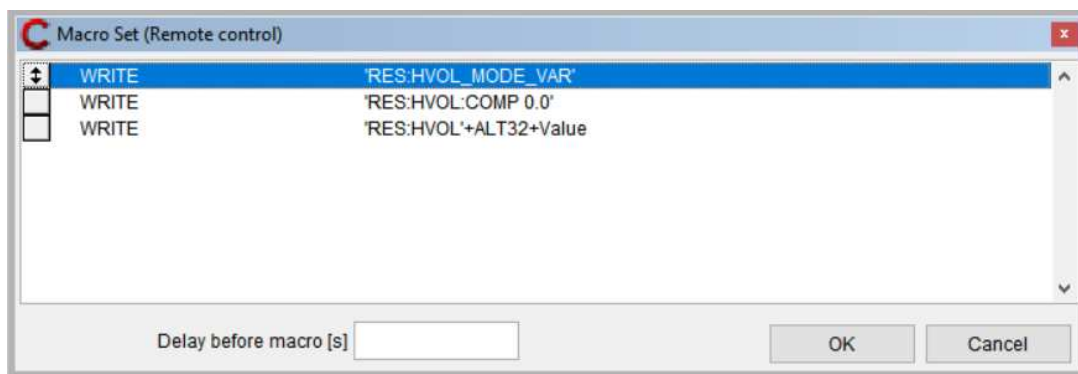
Popis okna Karty přístrojů (obr. 4.4):

- 1) Okno sloužící pro definování funkcí a rozsahů přístroje
- 2) Okno pro definování přesností na jednotlivých rozsazích
- 3) Makra pro komunikaci s přístrojem (komunikační příkazy přístrojů)
- 4) Přepínání mezi funkcemi zdroj, měření a přepínač

V kartě přístrojů se nachází veškerý popis přístroje. Lze zde najít seznam jeho podporovaných funkcí, definice rozsahů, přesnosti, specifikace a ovládání přístroje. Dále se v tomto modulu nachází nastavení komunikace přístroje s počítačem a její vlastnosti (typ komunikace, porty, rychlosti přenosu apod.).

Jakmile je jednou karta daného přístroje vytvořena, lze ji využívat i pro další kalibrace bez nutnosti jejího opětovného vytvoření [5].

Vytvořit novou kartu přístroje lze v modulu karta přístroje. V okně (1) na obr. 4.4 lze vybrat funkci pro přístroj a nadefinovat rozsahy. Jednotlivým rozsahům se v části (2) nastaví přesnosti přístroje dle specifikace. Pro správnou funkci přístroje v proceduře je nutno nadefinovat makra (část (3)). V makrech se nachází komunikační příkazy (obr. 4.5) pro daný přístroj, které lze najít v datasheetu.



Obr. 4.5: Makro SET vysokoodporové dekády kalibrátoru 9010

### 4.2.1 Karta přístroje kalibrátoru 9010

Každý přístroj přítomný ve schématu zapojení procedury musí mít definovanou v programu Caliber svou kartu přístroje. V kartě přístroje jsou přítomny funkce přístrojů, které lze v proceduře využívat. Funkcím je dále nutné přiřadit měřicí rozsahy, nadefinovat komunikační příkazy a přesnosti jednotlivým měřicím rozsahům. Názvy funkcí by měly odpovídat veličinám či zařízením, která kalibrují (např. RDC-2W je funkce pro dvouvodičové přímé měření odporu – Resistance Direct Current – 2 Wires). Pro kalibrátor 9010 již byly firmou Meatest navrženy funkce:

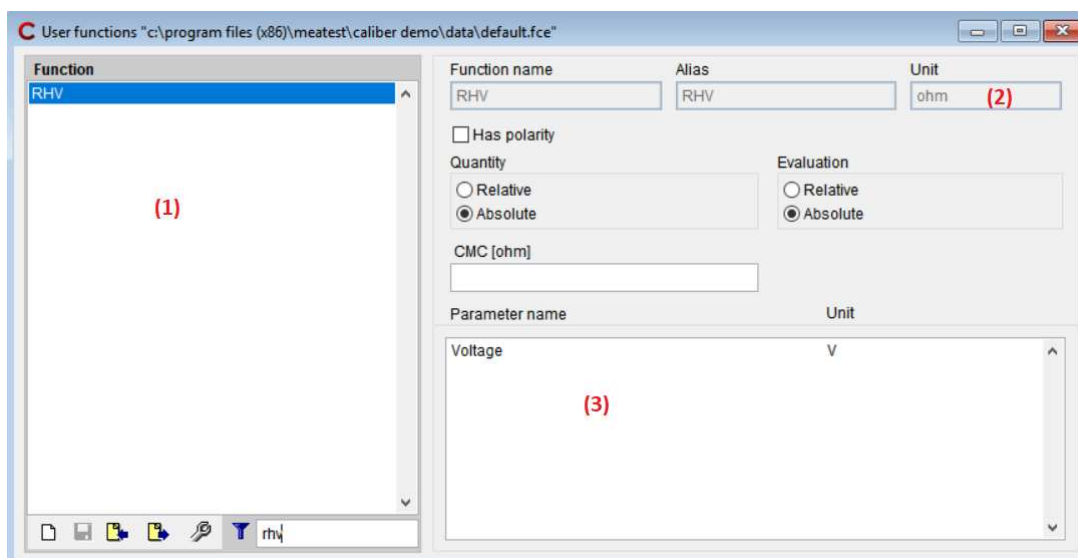
RDC-2W	Dvouvodičové měření odporu (variable mode)
RDC-4W	Čtyřvodičové měření odporu (variable mode)
LVR_FIX_2W	Dvouvodičové měření odporu (fixed mode)
LVR_FIX_4W	Čtyřvodičové měření odporu (fixed mode)
C-2W	Dvouvodičové měření kapacity (variable mode)
C_FIX_2W	Dvouvodičové měření kapacity (fixed mode)
HVR	Přímé měření odporu vysokoodporové dekády

Všechny zde zmíněné funkce předpokládají přímé měření odporu, resp. kapacity [4].

### 4.3 Uživatelské funkce

Modul UŽIVATELSKÉ FUNKCE slouží k vytváření nových či úpravě stávajících funkcí. Mezi funkce patří například měření napětí, proudu, odporu atd. [5].





**Obr. 4.6: Funkce RHV (Resistance High Voltage)**

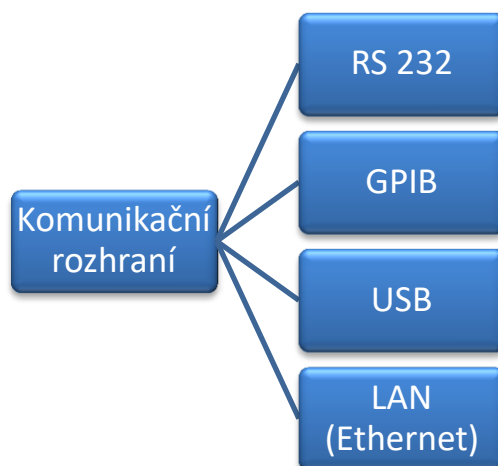
Popis okna Uživatelské funkce (obr. 4.6):

- 1) Okno pro výběr či vytvoření funkce
- 2) Nastavení jména a jednotek funkce
- 3) Nastavení parametrů funkce

Na obr. 4.6 lze vidět vytvoření funkce RHV (Resistance High Voltage) pro voltampérové měření odporu dekád. V části (1) se vytváří funkce. Druhá část okna slouží k definici funkce (název, jednotky apod.). Důležitým údajem při vytváření nové funkce je část (3) sloužící pro nastavení parametrů funkce. Ve funkci RHV se jedná o napětí. V bodech kalibrace se poté musí definovat nejen hodnota odporu, ale i napětí.

## 5 KOMUNIKAČNÍ ROZHRAŇÍ

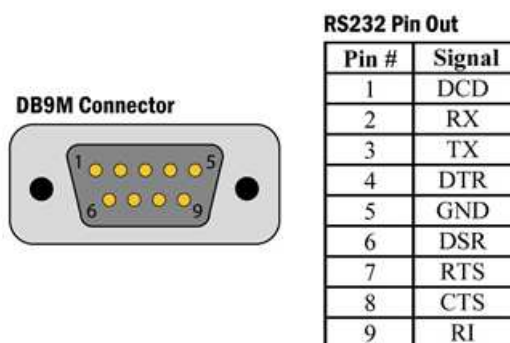
Pro komunikaci s kalibrátorem 9010 a tím i pro komunikaci s vysokoohmovou odporovou dekádou lze využít několika komunikačních rozhraní. Mezi tyto rozhraní patří sériová sběrnice RS232, GPIB, USB a LAN (obr. 5.1).



Obr. 5.1: Typy komunikačních rozhraní využívající program Caliber

### 5.1 Sériová sběrnice RS 232

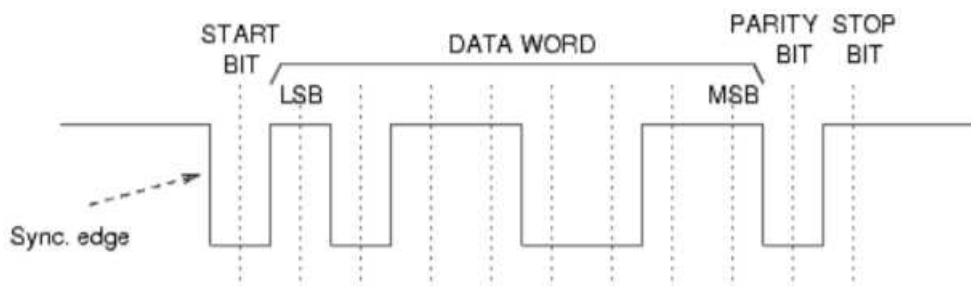
Sériová sběrnice RS 232 je komunikační rozhraní, které zajišťuje asynchronní typ komunikace pomocí pevně nastavené přenosové rychlosti. Na obr. 5.2 lze vidět konektor sběrnice RS 232.



Obr. 5.2: Konektor RS 232 [8]

Princip komunikace přes RS 232 lze vidět na obr. 5.3. Komunikace začíná vždy sestupnou (tzv. synchronizační) hranou. Po synchronizační hraně následuje Start bit, Datové slovo, Paritní bit a jeden nebo více Stop bitů. Stop bit nastaví komunikaci na původní úroveň, ve které se čeká na další synchronizační hranu a Start bit.

Pro komunikaci s vysokohmovou odporovou dekádou se využívá 8 Datových bitů a 1 Stop bit. Paritní bit se nevyužívá [4].



**Obr. 5.3: Princip komunikace přes RS 232 [9]**

Pro komunikaci mezi zařízeními je potřeba, aby obě zařízení měla nastavenou stejnou přenosovou rychlost (Baudrate), počet Datových a Stop bitů a stejný typ parity. Parita slouží k zabezpečení přenosu dat. Rozlišuje se sudá a lichá parita. Ve vysílacím zařízení se sečte počet jedničkových bitů. Výsledek se doplní paritním bitem tak, aby byla zachována podmínka sudého či lichého počtu jedničkových bitů [10].

RS232 používá dvě napěťové úrovně (Tab. 5.1). Logická 1 je reprezentována zápornou úrovní signálu, logická 0 kladnou úrovní signálu.

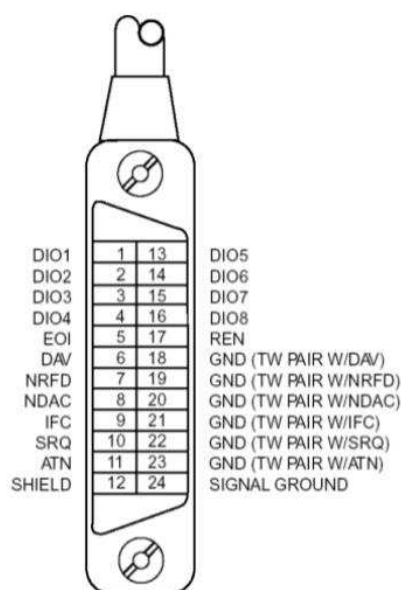
**Tab. 5.1: Napěťové úrovně při komunikaci přes RS 232 [10]**

Úroveň	Napěťová úroveň pro vysílač	Napěťová úroveň pro přijímač
Log. 1	+5 V do +15 V	+3 V do +25 V
Log. 0	-5 V do -15 V	-3 V do -25 V
nedefinováno	-3 V do 3 V	

## 5.2 GPIB (IEEE 488)

GPIB (General Purpose Interface Board) vytvořila firma Hewlett Packard. Často se používá k propojení měřicích systémů. Jedná se o paralelní sběrnici umožňující propojení maximálně 15 zařízení. Maximální délka sběrnice je 20 m, kterou lze ale mnohonásobně prodloužit použitím tzv. extenderů (zesilovačů) [11].

Konektory GPIB obsahují 24 pinů – 8 datových bitů (DI01 – DI08), 3 bity pro „handshaking“, 5 bitů pro vysílání jednovodičových zpráv a 8 zemních vodičů (obr. 5.4).



Obr. 5.4: Konektor GPIB [6]

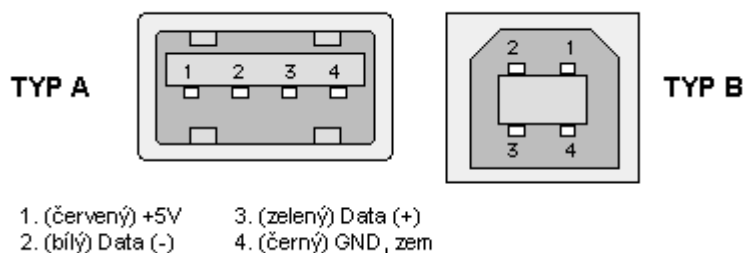
GPIB využívá negativní TTL logiky. Logická 1 je reprezentována úrovní signálu menší než 0,8 V, logická 0 úrovní signálu vyšší než 2 V [11].

### 5.3 USB (Universal Serial Bus)

USB je univerzální sériová sběrnice, která se stala jedním z nejpoužívanějších způsobů připojení periférií. USB rozhraní se vyznačuje velmi vysokou rychlostí přenosu dat oproti např. RS 232. Existuje několik verzí tohoto rozhraní lišících se především svou přenosovou rychlostí.

Data se vysílají v tzv. rámcích v krátkých (8 bajtů) nebo dlouhých paketech (256 bajtů). Všechny aktivity pro komunikaci vycházejí z řídicího počítače [6].

USB používá několik typů konektorů (obr. 5.5). Ploché USB typ A lze najít na téměř všech dnešních počítačích. USB typ B je určen pro periferní zařízení. Při komunikaci počítače s kalibrátorem 9010 je kalibrátor vybaven právě konektorem USB typu B [12].



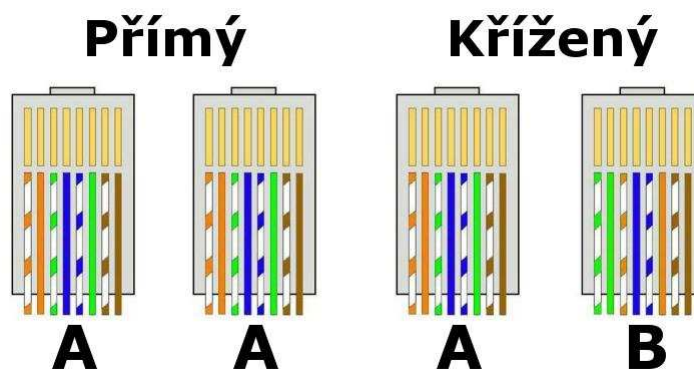
Obr. 5.5: Konektory USB, typ A a typ B [12]

## 5.4 LAN (Ethernet)

Ethernet je technologie používající se v kabelových lokálních sítích pro komunikaci počítačů a jiných elektronických zařízení vyskytujících se na malé ploše (místnost, popř. budova).

Pro využívání kabelové sítě Ethernet je nutno mít zařízení pro připojení disponující ethernetovým adaptérem nebo síťovou kartou, routery, rozbočovače a kabely UTP (kroucené páry) zakončené konektorem RJ-45 (obr. 5.6).

Pokud zařízení připojené do sítě chce vyslat data jinému zařízení, snímá sběrnici, jestli neprobíhá již komunikace mezi jinými zařízeními. Pokud je cesta volná, pošle datový paket do sítě. Všechny zařízení kontrolují paket, zdali nejsou příjemci. Příjemce data spotřebuje a odstraní ze sběrnice [13].



Obr. 5.6: Zapojení síťového konektoru RJ-45 [14]

## 5.5 VISA

VISA (Virtual Instrument Software Architecture) je průmyslový standard vzniklý roku 1995 několika společnostmi. Tento standard zajišťuje komunikaci mezi aplikačním programem a fyzickým zařízením. Jedná se o účinný nástroj, který umožňuje programovat přístroje jednotným způsobem, aniž by záleželo na výrobci použitého rozhraní.

Za použití VISA ovladačů je každé zařízení automaticky detekováno a má přiděleno identifikační řetězec. Poté již dochází k posílání jednotlivých SCPI příkazů [15].

## 5.6 SCPI

Konsorcium firem SCPI (Systém Command for Programmable Instruments) vzniklé roku 1990 připravilo jednotný systém pro definování přístrojových zpráv. Díky programování přístrojů standardem SCPI lze přístroje z hlediska použitého programového vybavení libovolně zaměňovat, pokud přístroj umožňuje požadovanou funkci provést [6].

Příkazy SCPI lze rozdělit na příkazy společné a příkazy specifické pro daný přístroj. Všechny přístroje musí obsahovat společné příkazy, od specifických příkazů se rozlišují začátečním znakem „\*“, specifické příkazy má každý přístroj vlastní a lze je vyhledat v technické dokumentaci přístroje.

Příklad SCPI příkazu pro vysokoodporovou dekádu kalibrátoru 9010 nastavující dekádu na hodnotu 1 GΩ:

```
RES:HVOL 1e6
```

## 5.7 Srovnání komunikačních sběrnic

V Tab. 5.2 jsou zobrazeny vybrané vlastnosti jednotlivých komunikačních sběrnic. Z tabulky vyplývá, že nejefektivnější je Ethernet, naopak sériová komunikace je již na ústupu.

**Tab. 5.2: Srovnání různých typů komunikačních rozhraní**

	Rychlost	Odolnost proti mag. rušení	Max. počet přístrojů	Dosah [m]
<b>RS 232</b>	kb/s	nízká	2	20
<b> GPIB</b>	Mb/s	dobrá	15	20
<b> USB</b>	Gb/s	dobrá	127	5
<b> Ethernet</b>	Gb/s	dobrá	-	1000

## 6 KOMUNIKAČNÍ PŘÍKAZY VYSOKOOHMOVÉ ODPOROVÉ DEKÁDY KALIBRÁTORU 9010

K ovládání vysokoohmové odporové dekády kalibrátoru 9010 programem Caliber je nutno znát její komunikační příkazy. Pomocí těchto příkazů lze nastavit mód nastavování (fixní, proměnný) nebo odečítání popř. nastavování příslušného odporu na dekádě.

Pro vysokoohmovou odporovou dekádu kalibrátoru 9010 se využívá sekvence příkazů:

```
[ :SOURce ] :RESistance :HVOLtage
```

Popis jednotlivých příkazů:

```
[ :SOURCE ]
```

Nepovinný příkaz pro nastavení kalibrátoru 9010 jako zdroje.

```
[ RESistance ]
```

Povinný příkaz, kalibrátor 9010 pracuje s odporovými dekádami.

```
[ HVOLtage ]
```

Povinný příkaz, kalibrátor 9010 pracuje s vysokoodporovou dekádou

Příkazy lze zkrátit zápisem částí příkazů označenými velkými písmeny. Dále je možné vynechat příkazy nacházející se v hranatých závorkách, jedná se o nepovinné příkazy.

Přehled základních komunikačních příkazů vysokoohmové odporové dekády kalibrátoru 9010: [4]

```
[ :SOURce ] :RESistance :HVOLtage [ :AMPLitude ]
```

Popis:

**Nastavuje hodnotu odporu. V módu FIXED je nastavena nejbližší hodnota a vrácena kalibrovaná hodnota.**

Syntaxe:

```
[ :SOURce ] :RESistance :HVOLtage [ :AMPLitude ]
```

```
<DNPD> [ <UNIT> ]
```

```
[ :SOURce ] :RESistance :HVOLtage [ :AMPLitude ]
```

Parametry:

<DNPD>                   Rozsah 1e4 ... 1e10 (defaultní 1e6)

<UNIT>                   {OHM}

Příklady:

```
RES :HVOL 1e6
```

```
RES :HVOL?               Odezva: 1.000000E+06 OHM
```

### **[ :SOURce ] :RESistance:HVOLtage:COMPensation**

Popis:

#### **Kompenzace odporu drátu.**

Syntaxe:

```
[ :SOURce ] :RESistance:HVOLtage:COMPensation  
<DNPd> [ <UNIT> ]  
[ :SOURce ] :RESistance:HVOLtage:COMPensation?
```

Parametry:

```
<DNPd>          Rozsah 0.0 ... 100.0 (defaultní 0.0)  
<UNIT>          {OHM}
```

Příklady:

```
RES:HVOL:COMP 0.0  
RES:HVOL:COMP?      Odezva: 0.000000E+00 OHM
```

### **[ :SOURce ] :RESistance:HVOLtage:FIXed**

Popis:

#### **Nastavení pevné hodnoty odporu**

Syntaxe:

```
[ :SOURce ] :RESistance:HVOLtage:FIXed <CPD>
```

Parametry:

```
<CPD>          {100G} (defaultní 100G)
```

Příklady:

```
RES:HVOL:FIX 100G  
RES:HVOL:FIX?      Odezva: 100G
```

### **[ :SOURce ] :RESistance:HVOLtage:MODE**

Popis:

#### **Nastavení módu odporu**

Syntaxe:

```
[ :SOURce ] :RESistance:HVOLtage:MODE <CPD>  
[ :SOURce ] :RESistance:HVOLtage:MODE?
```

Parametry:

```
<CPD>          {FIXed|VARiable} (defaultní FIX)
```

Příklady:

```
RES:HVOL:MODE FIX  
RES:HVOL:MODE?      Odezva: FIX
```



## 7 METODY PRO STANOVENÍ HODNOTY ELEKTRICKÉHO ODPORU DEKÁDY

Elektrický odpor dekády je základní parametr všech odporových dekád. Jeho hodnotu lze určit různými metodami, Každá z metod má své výhody a oblasti využití.

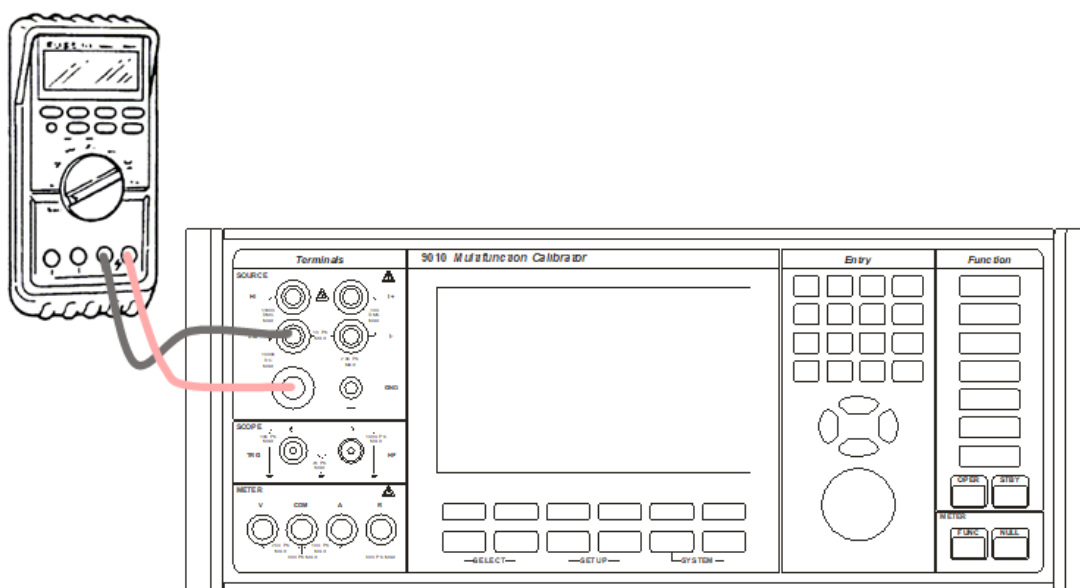
Nejpoužívanějšími metodami měření odporu jsou substituční metoda a voltampérová metoda měření odporu. Dále lze využít metodu měření odporu Wheatstoneovým můstkem či Thomsonovým můstkem, které se ale používají především pro měření malých odporů, proto je zde dále nebudu uvažovat.

Výběr správné metody měření odporu závisí především na velikosti odporu, který máme měřit. Dále jsou popsány substituční metoda a voltampérová metoda měření odporu, jelikož se jedná o vhodné metody pro měření i velkých odporů.

### 7.1 Substituční metoda měření odporu

Přímé měření odporu je nejjednodušší metoda pro stanovení parametrů dekád. Metoda je založena na vzájemném porovnávání hodnot testovaného přístroje (testované odporové dekády) a etalonu (standardu).

Etalon musí být časově i teplotně co nejvíce stálý a přesnější alespoň o řád, než testovaná dekáda. Pro kalibraci dekád metodou přímého měření odporu se využívá přesných ohmmetrů. Je vhodná kombinace metody přímého měření odporu s metodou založenou na jiném principu (např. voltampérová metoda měření odporu). Při kombinaci metod ale výrazně narůstá počet členů a čas kalibrace.



Obr. 7.1: Kalibrace ohmmetru pomocí kalibrátoru 9010 [4]

## 7.2 Voltampérová metoda měření odporu

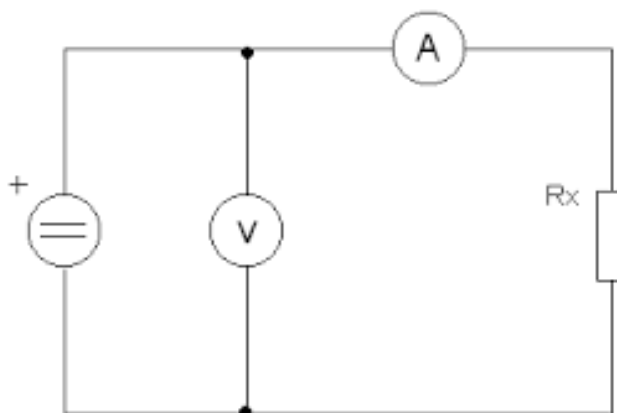
Jedná se o metodu založenou na aplikaci Ohmova zákona (obr. 6.1). Z naměřených hodnot elektrického napětí na dekádě a elektrického proudu, který dekádou protéká, lze vypočítat odpor dekády (Rovnice 6.1, v obr. 6.1 je odpor označen  $R_x$ ).

$$R = \frac{U}{I} \quad [\Omega] \quad (7.1)$$

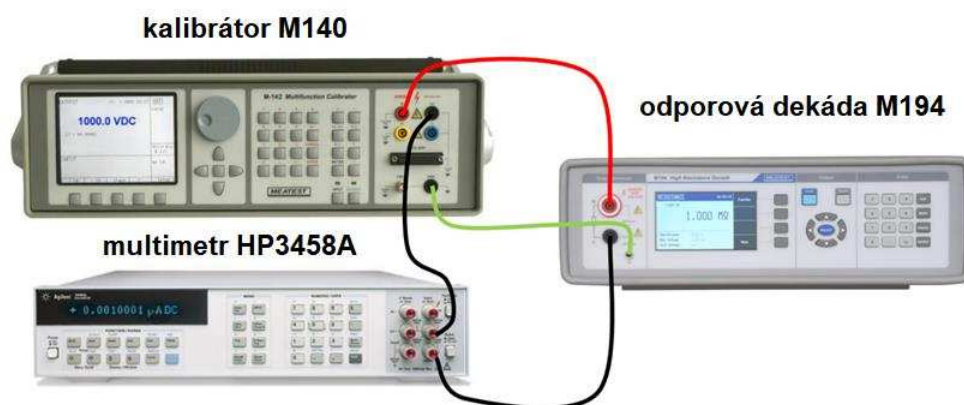
$R$  – elektrický odpor  $[\Omega]$ ,  $U$  – elektrické napětí  $[V]$ ,  $I$  – elektrický proud  $[A]$

Pro kalibraci dekády voltampérovou metodou je nutné mít přesný zdroj napětí a přesné měřidlo proudu. Pro větší přesnost a efektivitu kalibrace je vhodné testovat i zdroj napětí a ampérmetr.

Tuto metodu lze rozdělit do dvou skupin. Obě možnosti se liší způsobem zapojení měřicích přístrojů. Zapojení, kdy ampérmetr měří proud protékající přes odpor a voltmetr, se využívá k měření malých odporů. Naopak zapojení, kdy voltmetr měří napětí na ampérmetru a měřeném odporu současně (obr. 7.1), se využívá k měření velkých odporů. V tomto zapojení je chyba metody minimalizovaná malým vnitřním odporem ampérmetru v poměru s velkým odporem dekády  $R_x$ .



Obr. 7.2: Schéma zapojení pro kalibraci voltampérovou metodou [16]



**Obr. 7.3: Kalibrace dekády M194 voltampérovou metodou [6]**

Na obr. 7.2 lze vidět konkrétní použité zapojení přístrojů pro kalibraci vysokoodporové dekády M194. Obdobné zapojení je i pro kalibraci vysokoohmové odporové dekády kalibrátoru 9010. V levém horním rohu se nachází zdroj napětí (kalibrátor M140, pro kalibraci dekády kalibrátoru 9010 bude použit kalibrátor M142 s nejvyšším možným napětím na výstupu 1 kV). Vpravo je testovaná odporová dekáda. V levém dolním rohu se vyskytuje přesný měřič proudu (8 ½ místný ampérmetr HP 3458A).

# 8 CHYBY MĚŘICÍCH PŘÍSTROJŮ A NEJISTOTY MĚŘENÍ

## 8.1 Chyby měřicích přístrojů

Jedná se o chyby způsobené nedokonalostmi měřicího přístroje vznikající při výrobě, montáži, ale také stárnutím přístroje. Tyto chyby lze nalézt v dokumentaci přístroje udávané výrobcem.

Při kalibraci vysokoodporové dekády kalibrátoru 9010 jsou použity pouze digitální měřicí přístroje, proto chyby analogových přístrojů nejsou v této práci zahrnuty.

### Výpočet chyb číslicových měřicích přístrojů

Základní chybu přístroje lze nalézt v jeho dokumentaci nejčastěji ve tvaru součtu dvou chyb – mezní chyby z měřené hodnoty  $\delta_M$  a chyby z největší hodnoty měřicího rozsahu  $\delta_R$ . Možné způsoby zápisu chyb digitálních měřicích přístrojů lze vidět v rovnicích 8.1 a 8.2 [17].

$$\delta_{\text{CMP}} = \pm(\delta_M + \delta_R) \quad [\%] \quad (8.1)$$

$$\delta_{\text{CMP}} = \pm(\delta_M) + |d| \quad [\%] \quad (8.2)$$

$\delta_{\text{CMP}}$  – základní chyba číslicového měřicího přístroje,  $\delta_M$  – mezní chyba z měřené hodnoty,  $\delta_R$  – chyba z největší hodnoty měřicího rozsahu,  $d$  – chyba udaná v počtu jednotek posledního místa zobrazovače

Pokud je v manuálu k přístroji udaná chyba v počtu digitů, existuje přepočítání na chybu z největší hodnoty měřicího rozsahu (rovnice 8.3).

$$\delta_R = \frac{d}{D} 100 \quad [\%] \quad (8.3)$$

$D$  – počet indikovaných míst zobrazovače

Absolutní a relativní chyba údaje číslicového měřicího přístroje je dána vztahem 8.4, resp. 8.5 [17].

$$\Delta_{\text{MC}} = \pm \frac{\delta_M X_M + \delta_R X_R}{100} \quad [\text{jed. měř. veličiny}] \quad (8.4)$$

$$\delta_{MC} = \pm \frac{\Delta_{MC}}{X_M} 100 \quad [\%] \quad (8.5)$$

$\Delta_{MC}$  – absolutní chyba měřicího přístroje,  $\delta_{MC}$  – relativní chyba měřicího přístroje,  $\delta_M$  – mezní chyba z měřené hodnoty,  $X_M$  – naměřená hodnota,  $\delta_R$  – chyba z největší hodnoty měřicího rozsahu,  $X_R$  – rozsah měřicího přístroje

### Výpočet procenta čerpání specifikace

Procento čerpání specifikace %spe je jedním z parametrů ve výstupním protokolu kalibrace. Procento čerpání specifikace se vypočítá jako podíl odchylky a mezní povolené chyby kontrolovaného přístroje. Pokud je čerpání specifikace vyšší než hodnota 999%, je do výstupního protokolu kalibrace zapsána hodnota 999% [5].

$$\%spe = \frac{\Delta_M}{\Delta_{MC}} 100 = \frac{\text{Odchylka}}{\text{Povoleno}} 100 \quad [\%] \quad (8.6)$$

%spe – procento čerpání specifikace,  $\Delta_M$  – odchylka, absolutní chyba měření,  $\Delta_{MC}$  – povoleno, absolutní chyba měřicího přístroje

## 8.2 Výpočet nejistot měření

Program Caliber dokáže pracovat i s nejistotami měření, díky kterým se stává kalibrace objektivní.

Nejistota měření je parametr přidružený k výsledku měření, který charakterizuje rozptyl hodnot, které by mohly být přisuzovány měřené veličině. Tímto parametrem může být směrodatná odchylka nebo jiná část intervalu, který vymezuje určitý konfidenční rozsah [18].

Existuje více druhů nejistot měření – nejistota měření typu A, typu B, kombinovaná nejistota měření a rozšířená nejistota měření.

### 8.2.1 Standardní nejistota typu A – $u_A(x)$

Standardní nejistota typu A  $u_A(x)$  se zjišťuje experimentálně opakovanými měřeními. Opakované měření jsou prováděny za stejných podmínek. Standardní nejistota typu A představuje rozptyl hodnot opakovaných měření, přičemž měření by se mělo opakovat alespoň desetkrát [19], [20].

Mírou nejistoty typu A je výběrová směrodatná odchylka výběrového průměru  $s_x$  (viz. rovnice 8.7)

$$s_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad [\text{jednotka měř. veličiny}] \quad (8.7)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad [\text{jednotka měř. veličiny}] \quad (8.8)$$

$s_{\bar{x}}$  - výběrová směrodatná odchylka výběrového průměru,  $n$  - počet měření,  $x_i$  -  $i$ -tá naměřená hodnota,  $\bar{x}$  - aritmetický průměr z naměřených hodnot

Standardní nejistotu typu A lze spočítat dle rovnice 8.9 a je závislá na počtu měření. Pokud je počet měření menší než deset, je nutno provést korekci (viz. koeficient  $k_s$  v Tab. 8.1).

$$u_A(x) = k_s s_{\bar{x}} \quad [\text{jednotka měř. veličiny}] \quad (8.9)$$

$u_A(x)$  - standardní nejistota typu A,  $s_{\bar{x}}$  - výběrová směrodatná odchylka,  $k_s$  - koeficient závislý na počtu měření (viz. Tab. 9.1)

**Tab. 8.1: Tabulka závislostí koeficientů  $k_s$  na počtu měření  $n$  [21]**

<b>n</b>	9	8	7	6	5	4	3	2
<b><math>k_s</math></b>	1,2	1,2	1,3	1,3	1,4	1,7	2,3	7

## 8.2.2 Standardní nejistota typu B – $u_B(x)$

Standardní nejistota typu B se určuje jinými než statistickými metodami naměřených hodnot opakovaného měření. Vyhodnocuje se z identifikace možných zdrojů, které mohou nejistotu tohoto typu způsobilovat [20].

Mezi zdroje nejistot typu B lze zařadit [19]:

- Chyby použitých měřicích přístrojů
- Chyba metody měření
  - chyba způsobená nedokonalostí použité měřicí metody
- Chyba instalace
  - nedokonalé zapojení měřicích přístrojů
- Vliv okolního prostředí
  - nestálost parametrů okolního prostředí (např. změny teploty, vlhkosti, magnetické pole)

- Vliv operátora
  - chyby způsobené člověkem (např. špatné odečítání hodnot z měřicích přístrojů, chybný postup měření, nesoustředění se)
- Chyby vlivem zpracování
  - chyby způsobené zpracováním naměřených hodnot (např. zjednodušení výpočetních vztahů, zaokrouhlování výsledků, linearizace)

Výpočet standardní nejistoty typu B se provádí pro každý zdroj nejistot podle vzorce 8.10. Hodnota  $\Delta_{MAX}$  lze nalézt v technické dokumentaci přístroje či určit odhadem ze zkušenosti.

$$u_{BZ}(x) = \frac{\Delta_{MAX}}{\chi} \quad [\text{jednotka měř. veličiny}] \quad (8.10)$$

$u_{BZ}(x)$  – standardní nejistota typu B určitého zdroje nejistot,  $\Delta_{MAX}$  – v intervalu  $\pm \Delta_{MAX}$  se nachází s největší pravděpodobností měřená veličina,  $\chi$  – koeficient odpovídající typu rozdělení náhodné veličiny (pro normální rozdělení  $\chi = 2$ , pro rovnoměrné rozdělení  $\chi = \sqrt{3}$ )

Celkovou standardní nejistotu typu B lze určit geometrickým součtem nejistot jednotlivých zdrojů.

$$u_B(x) = \sqrt{\sum_{Z=1}^n u_{BZ}(x)^2} \quad [\text{jednotka měř. veličiny}] \quad (8.11)$$

$u_B(x)$  – celková standardní nejistota typu B,  $u_{BZ}(x)$  – standardní nejistota typu B určitého zdroje nejistot

### 8.2.3 Standardní kombinovaná nejistota – $u_C(x)$

Standardní kombinovaná nejistota  $u_C(x)$  se získá geometrickým součtem standardních nejistot typu A a typu B podle vzorce 8.12 [17], [20].

$$u_C(x) = \sqrt{u_A^2(x) + u_B^2(x)} \quad [\text{jednotka měř. veličiny}] \quad (8.12)$$

$u_C(x)$  – standardní kombinovaná nejistota,  $u_A(x)$  – standardní nejistota typu A,  $u_B(x)$  – standardní nejistota typu B

Naměřená veličina leží v intervalu udaném standardní kombinovanou nejistotou  $u_c(x)$  s pravděpodobností 68% pro normální a 58% pro rovnoměrné rozdělení.

## 8.2.4 Rozšířená nejistota – $U(x)$

Jedná se o rozšíření standardní kombinované nejistoty tak, aby naměřená veličina ležela v daném intervalu s vyšší pravděpodobností, než udává standardní kombinovaná nejistota. Výpočet rozšířené nejistoty lze vidět v rovnici 8.13 [17], [20].

$$U(x) = k_r u_c(x) \quad [\text{jednotka měř. veličiny}] \quad (8.13)$$

$U(x)$  – rozšířená nejistota,  $u_c(x)$  – standardní kombinovaná nejistota,  $k_r$  – koeficient rozšíření (viz. Tab. 9.2)

**Tab. 8.2: Příklady hodnot koeficientů rozšíření s pravděpodobnostmi výskytu měřené veličiny v daném intervalu (normální rozdělení) [20]**

$k_r$	1	2	3
$P(x)$ [%]	68	95	99,7

## 8.2.5 Nejistoty nepřímých měření

U nepřímých měření je výsledek dán výpočtem na základě známých fyzikálních zákonů z přímých měření  $N$  vstupních veličin  $X_N$  [19], [20], [22], [23].

$$\begin{aligned} Y &= f(X_1, X_2, \dots, X_N) \\ \bar{y} &= f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_N) \\ \bar{x}_N &= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{Nj} \end{aligned} \quad (8.14)$$

$Y$  – výstupní veličina,  $\bar{y}$  – odhad výstupní veličiny  $Y$ ,  $X_N$  – vstupní veličina měřená přímo,  $\bar{x}_N$  – odhad vstupní veličin  $X_N$  (výběrový průměr),  $x_{Nj}$  – aktuální měřená hodnota dané vstupní veličiny  $X_N$ ,  $N$  – počet vstupních veličin  $X$  nepřímého měření veličiny  $Y$ ,  $n$  – počet opakovaných měření

Nejistotu nepřímého měření  $u(\bar{y})$  odhadu veličiny  $Y$  lze vypočítat dle vzorce (8.15).



$$\begin{aligned}
 u(\bar{y}) &= \sqrt{\sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial f}{\partial X_i} u(\bar{x}_i) \right)^2} = \\
 &= \sqrt{\sum_{i=1}^N A_i^2 u^2(\bar{x}_i)} \quad [\text{jednotka m\u011br. veli\u010diny}]
 \end{aligned}
 \tag{8.15}$$

$$A_i = \frac{\partial f(X_1, X_2, \dots, X_N)}{\partial X_i} \quad [-]
 \tag{8.16}$$

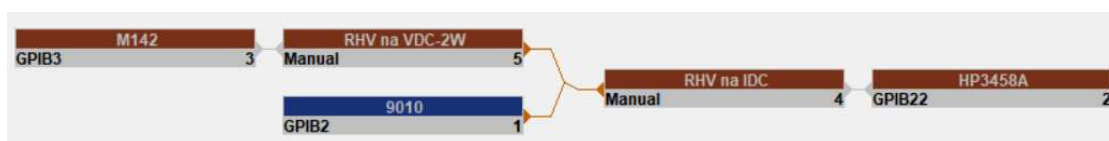
$f$  – funk\u010dn\u00ed z\u00e1vislost pro v\u00fdstupn\u00ed veli\u010dinu  $Y$ ,  $A_i$  – citlivostn\u00ed koeficient,  $u(\bar{x}_i)$  – nejistota odhadu vstupn\u00ed veli\u010diny  $X_i$

## 9 NÁVRH PROCEDURY PRO KALIBRACI

Pro vytvoření procedury ke kalibraci vysokoohmové odporové dekády v kalibrátoru 9010 bylo využito programu Caliber Demo 2.51.

### 9.1 Schéma procedury

Schéma procedury pro kalibraci vysokoodporové dekády kalibrátoru 9010 lze vidět na obr. 9.1. Každý blok ve schématu má ve svém pravém dolním rohu identifikační číslo.



Obr. 9.1: Schéma procedury kalibrace vysokoodporové dekády

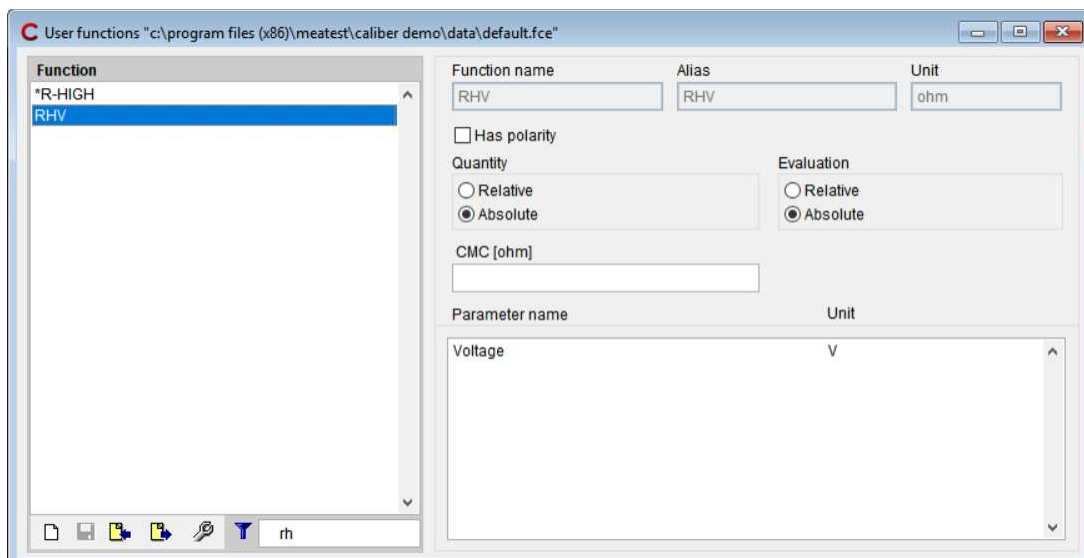
Popis jednotlivých bloků dle identifikačního čísla (obr. 9.1):

1. 9010 – UUT, testovaná vysokoohmová odporová dekáda
2. HP3458A – multimetr HP3458A ve funkci přesného ampérmetru
3. M142 – kalibrátor M142 ve funkci přesného zdroje napětí
4. RHV na IDC – převodník odporu na stejnosměrný proud a naopak
5. RHV na VDC-2W – převodník odporu na stejnosměrné napětí a naopak

Přístroje HP3458A, M142 a převodníky RHV na IDC a RHV na VDC-2W vytvořila firma Meatest. Přístroj 9010 od firmy Meatest je doplněn o mou funkci RHV.

### 9.2 Funkce Resistance High Voltage (RHV)

Pro kalibraci vysokoohmové odporové dekády voltampérovou metodou bylo potřeba vytvořit funkci s názvem RHV (Resistance High Voltage), jejímž vedlejším parametrem je napětí.



Obr. 9.2: Funkce RHV

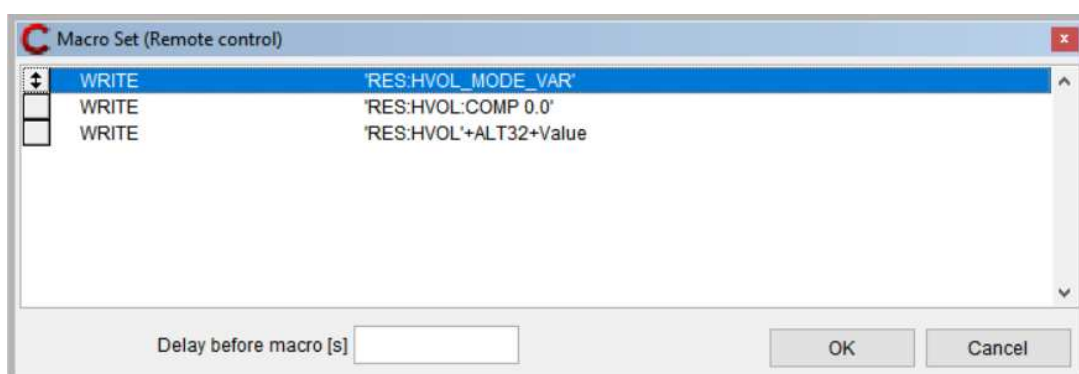
V sekci dálkového řízení dekády se nastavily makra (viz. následující příkazy podle kapitoly 6) pro zadávání a měření (obr. 4.5).

- Makro **SET**

```
WRITE , RES : HVOL_MODE_VAR `
//nastavení dekády do módu Variable (proměnný odpor)

WRITE , RES : HVOL : COMP 0 . 0 `
//nulová kompenzace drátu

WRITE , RES : HVOL ` +ALT32+Value
//nastavení požadované hodnoty odporu
```

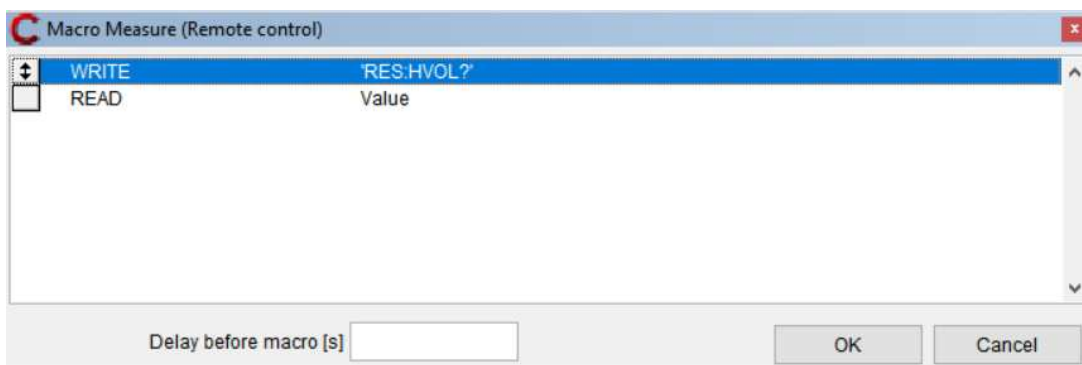


Obr. 9.3: Makro SET funkce RHV kalibrátoru 9010

- Makro **MEASURE**

```
WRITE , RES : HVOL? `
//čtení naměřené hodnoty odporu
```

READ Value  
//zápis do proměnné



**Obr. 9.4: Makro MEASURE funkce RHV kalibrátoru 9010**

Dále je potřeba definovat odporové a napěťové rozsahy a přesnosti podle specifikace dekády (Tab. 8.1)

**Tab. 9.1: Jednotlivé rozsahy použité v kartě přístroje 9010 ve funkci RHV [4]**

Odporové rozsahy	Přesnost [%]	Povolené napětí [V]
100 - 999,9 k $\Omega$	0,1	315
1 - 1,999 M $\Omega$	0,1	1250
2 - 9,999 M $\Omega$	0,1	1500
10 - 99,99 M $\Omega$	0,1	1500
100 - 499,9 M $\Omega$	0,2	1500
500 - 999,9 M $\Omega$	0,2	1500
1 - 9,999 G $\Omega$	0,5	1500
10 - 19,99 G $\Omega$	1	1500
20 - 100 G $\Omega$	1	1500

### 9.3 Body kalibrace

Pro správnou kalibraci zařízení je nutno navrhnout body, ve kterých bude kalibrace provedena. Program Caliber disponuje průvodcem tvorby procedur, který tyto body dokáže sám navrhnout (na každý rozsah vytvoří jeden bod kalibrace). Většinou je ale potřeba body navržené průvodcem doplnit, aby byl proměřen celý rozsah kalibrovaného přístroje. Program Caliber netestuje přítomné odporové segmenty, ale jednotlivé rozsahy. Pro správnou kalibraci dekády je nutno testovat jednotlivé odporové segmenty, z nichž se dekáda skládá.

Pro vysokoohmovou odporovou dekádu kalibrátoru 9010 jsem navrhnul body kalibrace, které lze vidět v Tab. 9.1. Body kalibrace jsou rozmístěny tak, aby

byly otestovány všechny hardwarově přítomné odporové segmenty (od odporu 86,2 k $\Omega$  do 8,3 G $\Omega$  po domluvě s firmou Meatest, nižší odporové segment slouží k jemnému dostavení odporu na dekádě). Majoritní část (90%) hodnoty bodu kalibrace musí tvořit právě testovaný odporový segment přítomný ve vysokoohmové odporové dekádě kalibrátoru 9010 (např. pro odporový segment 86,2 k $\Omega$  je vytvořen bod kalibrace 100 k $\Omega$ , kdy testovaný odporový segment zaujímá právě 90% hodnoty odporu bodu kalibrace).

Vysokoohmová odporová dekáda kalibrátoru 9010 je složena z 30 samostatných odporových segmentů. Pro kalibraci je zvoleno 19 odporových segmentů od 86,2 k $\Omega$  do 8,3 G $\Omega$ . Každý bod kalibrace je nutno pro otestování stálosti vlastností jednotlivých segmentů otestovat při dvou vzájemně odlišných hodnotách napětí. Každý segment je testován při napětí 100 V a při maximálním povoleném napětí, které lze přivést na segment, popř. při 1 kV, jelikož napěťový zdroj (multifunkční kalibrátor M142) nedokáže mít na výstupu napětí vyšší než je 1000 V. V proceduře bude tudíž přítomno 38 bodů kalibrace (19 odporových segmentů testovaných při dvou hodnotách napětí).

**Tab. 9.2: Body kalibrace vysokohmové odporové dekády kalibrátoru 9010**

<b>Testovaný segment [<math>\Omega</math>]</b>	<b>Bod kalibrace [<math>\Omega</math>]</b>	<b>Testovací napětí [V]</b>
86k2	100k	100
86k2	100k	400
168k	190k	100
168k	190k	500
328k	365k	100
328k	365k	700
640k	710k	100
640k	710k	1000
1M25	1M4	100
1M25	1M4	1000
2M45	2M75	100
2M45	2M75	1000
4M78	5M3	100
4M78	5M3	1000
9M36	10M4	100
9M36	10M4	1000
18M2	20M25	100
18M2	20M25	1000
35M5	39M5	100
35M5	39M5	1000
69M6	77M5	100
69M6	77M5	1000
135M6	150M	100
135M6	150M	1000
236M	262M5	100
236M	262M5	1000
430M	478M	100
430M	478M	1000
780M	870M	100
780M	870M	1000
1G39	1G55	100
1G39	1G55	1500
2G7047	3G	100
2G7047	3G	1500
4G5	5G	100
4G5	5G	1500
8G3	9G25	100
8G3	9G25	1500

## 9.4 Výpočty odporu a nejistot měření

### 9.4.1 Výpočet odporu

Pro správnou funkci celé procedury je nutno dostávat z kalibrace hodnoty v jednotkách elektrického odporu  $[\Omega]$ . V proceduře v sekci funkce v záložce Evaluation a Standard Value musí být přítomen vzorec pro výpočet odporu. Vzorec odpovídá rovnici Ohmova zákona (rovnice 9.1). Hodnota odporu je označena jako  $X_s$  pro dodržení stejných symbolů jako v programu Caliber.

$$R = X_s = \frac{m142(3).value}{hp3458a(2).value} \quad [\Omega] \quad (9.1)$$

$X_s$  – standardní hodnota,  $m142(3).value$  – nastavená hodnota napětí na kalibrátoru M142,  $hp3458a.value$  – změřená hodnota proudu multimetrem HP3458A

## 9.5 Výpočet nejistot měření kalibrace vysokoodporové dekády kalibrátoru 9010

Pro proceduru kalibrace vysokoodporové odporové dekády jsem navrhnul vzorec pro výpočet nejistoty měření odporu [21].

Jelikož se jedná o nepřímé měření odporu (voltampérová metoda), musí se vypočíst i nejistota nepřímého měření (rovnice 9.2).

$$u_c(R) = \sqrt{\left(\frac{\delta\left(\frac{U}{I}\right)}{\delta U}\right)^2 u_c^2(U) + \left(\frac{\delta\left(\frac{U}{I}\right)}{\delta I}\right)^2 u_c^2(I)} \quad [\Omega] \quad (9.2)$$

$u_c(R)$  – kombinovaná nejistota odporu  $[\Omega]$ ,  $U$  – elektrické napětí  $[V]$ ,  $I$  – elektrický proud  $[A]$ ,  $u_c(U)$  – kombinovaná nejistota napětí,  $u_c(I)$  – kombinovaná nejistota proudu

Po úpravě dostaneme tvar (rovnice 9.3):

$$u_c(R) = \sqrt{\frac{u_c^2(U)}{I^2} + \frac{U^2}{I^4} u_c^2(I)} \quad [\Omega] \quad (9.3)$$

V proceduře v sekci Funkce v záložce Evaluation a Standard uncertainty musí být přítomen vzorec pro výpočet nejistoty nepřímého měření odporu (rovnice 9.4).

$$U_{sa} = \sqrt{\frac{m142(3).uncertainty^2}{hp3458a(2).value^2} + \frac{m142(3).value^2}{hp2458a(2).value^4} hp3458a(2).uncertainty^2} \quad [\Omega] \quad (9.4)$$

$U_{sa}$  – standardní nejistota měření odporu,  $m142(3).value$  – hodnota napětí nastavená na kalibrátoru M142,  $m142(3).uncertainty$  – nejistota přístroje M142,  $hp3458a(2).value$  – změřená hodnota proudu multimetrem HP3458a,  $hp3458a(2).uncertainty$  – nejistota přístroje HP3458a

Hodnoty uvedené v rovnici 9.4 zjišťuje program Caliber automaticky. Hodnoty  $x.value$  jsou hodnoty přímo nastavené na přístroji (v případě, že se přístroj chová jako zdroj) nebo hodnoty změřené přístroji (pokud je přístroj ve funkci měřidla). Hodnoty  $x.uncertainty$  jsou hodnoty uvedené v kartách přístrojů [5].

## 9.6 Výpočet odporu a nejistot pro jeden bod kalibrace

V této kapitole je ukázka výpočtu hodnoty odporu, chyby metody a nejistot měření pro jeden bod kalibrace podle schématu na obr. 7.2.

**Tab. 9.3: Použité přístroje**

Typ přístroje	Identifikace
Multifunkční kalibrátor 9010	SN1
Multifunkční kalibrátor M142	SN540061
Multimetr HP3458A	SN2823A10318

**Tab. 9.4: Podmínky měření**

Teplota	22,2 °C
Vlhkost	46,2 %

Pro další body kalibrace je postup výpočtu obdobný. Naměřené a vypočtené hodnoty programem Caliber lze vidět v příloze 1.



**Tab. 9.5: Bod kalibrace, pro který je proveden výpočet**

<b>Function</b>	RHV
<b>Range</b>	1 MΩ
<b>Standard</b>	0,0999780 MΩ; 100 V
<b>UUT</b>	0,1 MΩ
<b>Odchylka</b>	0,022 kΩ
<b>%spe</b>	22
<b>Povoleno</b>	0,1 kΩ
<b>Nejistota</b>	0,0035 kΩ
<b>Stav</b>	ok

**Tab. 9.6: Naměřené hodnoty programem Caliber**

<b>U [V]</b>	<b>I [mA]</b>
100	1,0002318
100	1,0002147
100	1,0002218
100	1,0002083
100	1,0002234

Procedura kalibrace byla vykonána v laboratoři firmy Meatest dne 3. 5. 2019. Jako přesného zdroje napětí bylo využito multifunkčního kalibrátoru M142, a funkci přesného ampérmetru zastával multimetr HP3458A. Kalibrace byla provedena třikrát, pokaždé se stejným výsledkem.

Z naměřených hodnot z Tab. 9.4 lze spočítat hodnotu odporu nastavenou na odporové dekádě jednoduše za použití Ohmova zákona (rovnice 9.5).

$$R_{x1} = \frac{U}{I_1} = \frac{100}{1,0002318 \cdot 10^{-3}} = 0,99977 \text{ M}\Omega \quad (9.5)$$

Průměrnou hodnotu odporu dostaneme aritmetickým průměrem odporů spočítaných podle rovnice 9.6.

$$\begin{aligned} \overline{R_x} &= R_{UUT} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{xi} = \\ &= \frac{1}{5} (0,99977 + 0,99979 + 0,99978 + 0,99979 + 0,99978) = \\ &= 0,99978 \text{ M}\Omega \end{aligned} \quad (9.6)$$

Absolutní chybu měření lze vypočíst ze vztahu 9.8. Ve výstupním protokolu (viz. příloha 1) se jedná o sloupec odchylka.

$$\bar{I} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i = \frac{1}{5} (1,0002318 + 1,0002147 + 1,0002218 + 1,0002083 + 1,0002234) = 1,000220 \text{ mA} \quad (9.7)$$

$$\Delta_{Rx} = \text{Odchylka} = R_{UUT} - R_{ST} = 100 - 99,9780 = 0,0220 \text{ k}\Omega \quad (9.8)$$

$$\text{Povoleno} = \frac{\delta_{R9010}}{100} R_{UUT} = \frac{0,1}{100} 100 = 0,1 \text{ k}\Omega \quad (9.9)$$

$$\%spe = \frac{\text{Odchylka}}{\text{Povoleno}} 100 = \frac{0,0220}{0,1} 100 = 22 \% \quad (9.10)$$

**Tab. 9.7: Specifikace kalibrátoru M142 ve funkci zdroje napětí [3]**

Rozsah	$\delta_m + \delta_R$ [%]
20 mV	0,005 + 0,03
200 mV	0,0015 + 0,004
2 V	0,0012 + 0,0005
20 V	0,0010 + 0,00025
240 V	0,0015 + 0,00020
1000 V	0,005 + 0,002

Standardní nejistotu způsobenou zdrojem napětím vypočteme podle rovnice 9.8. Hodnoty  $\delta_m$  a  $\delta_R$  lze najít v manuálech k jednotlivým měřicím přístrojům, popř. v Tab. 9.5 a 9.6.

$$\begin{aligned} u_C(U) = u_B(U) &= \frac{\delta_{mU} U_m + \delta_{RU} U_R}{100} = \\ &= \frac{0,0015 \cdot 100 + 0,0002 \cdot 240}{100 \cdot \sqrt{3}} = 1,14 \text{ mV} \end{aligned} \quad (9.11)$$

**Tab. 9.8: Specifikace multimetru HP3458A ve funkci měřidla proudu [24]**

Rozsah	$\delta_m + \delta_R$ [%]
100 nA	0,0035 + 0,033
1 $\mu$ A	0,0025 + 0,0033
10 $\mu$ A	0,0025 + 0,00083
100 $\mu$ A	0,0025 + 0,00067
1 mA	0,0025 + 0,00042
10 mA	0,0025 + 0,00042
100 mA	0,004 + 0,00042
1 A	0,0115 + 0,001

Rovnice 9.9 ukazuje výpočet standardní nejistoty způsobené ampérmetrem.

$$\begin{aligned}
 u_B(I) &= \frac{\delta_{mI}I_m + \delta_{RI}I_R}{100} = \\
 &= \frac{0,0025 \cdot 1,00022 \cdot 10^{-3} + 0,00042 \cdot 10^{-3}}{100 \cdot \sqrt{3}} = 16,86 \text{ nA}
 \end{aligned}
 \tag{9.12}$$

Jelikož pro každý bod kalibrace je změřeno pět hodnot proudu, je nutné brát v úvahu i standardní nejistotu typu A. Koeficient  $k_s$  lze nalézt v Tab. 8.1.

$$\begin{aligned}
 u_A(I) &= k_s \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (I_{mi} - \bar{I}_m)^2}{n(n-1)}} = \\
 &= 1,4 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (I_{mi} - 1,00022 \cdot 10^{-3})^2}{5(5-1)}} = 5,59 \text{ nA}
 \end{aligned}
 \tag{9.13}$$

Kombinovaná nejistota měření proudu je:

$$\begin{aligned}
 u_C(I) &= \sqrt{u_A(I)^2 + u_B(I)^2} = \\
 &= \sqrt{5,59^2 + 16,86^2} = 17,76 \text{ nA}
 \end{aligned}
 \tag{9.14}$$

Výpočet standardní nejistoty nepřímého měření odporu lze vidět ve vztahu 9.15.

$$u_c(R) = \sqrt{\frac{u_c^2(U)}{I^2} + \frac{U^2}{I^4} u_c^2(I)} =$$

$$= \sqrt{\frac{(1,14 \cdot 10^{-3})^2}{(1,00022 \cdot 10^{-3})^2} + \frac{100^2}{(1,00022 \cdot 10^{-4})^2} (17,76 \cdot 10^{-9})^2} =$$

$$= 2,1 \Omega$$
(9.15)

$$U(R) = k_r u_c(R) = 2 \cdot 2,1 = 4,2 \Omega (P = 95\%)$$
(9.16)

V tab. 9.11 lze vidět výsledky výpočtu absolutní chyby měření (sloupec odchylka) a rozšířenou nejistotu měření (P = 95 %).

**Tab. 9.9: Teoreticky vypočtené hodnoty odporu a nejistot měření pro daný bod kalibrace**

Funkce	Rozsah	Etalon	UUT	Odchylka	Nejistota
RHV	1 MΩ	0,99978 MΩ; 100 V	0,1 MΩ	0,022 kΩ	4,2 Ω (P = 95%)

Srovnání hodnot naměřených programem Caliber a vypočtených hodnot lze vidět v Tab. 9.12.

**Tab. 9.10: Srovnání hodnot naměřených programem Caliber a vypočtených hodnot pro bod kalibrace 100 kΩ, 100 V**

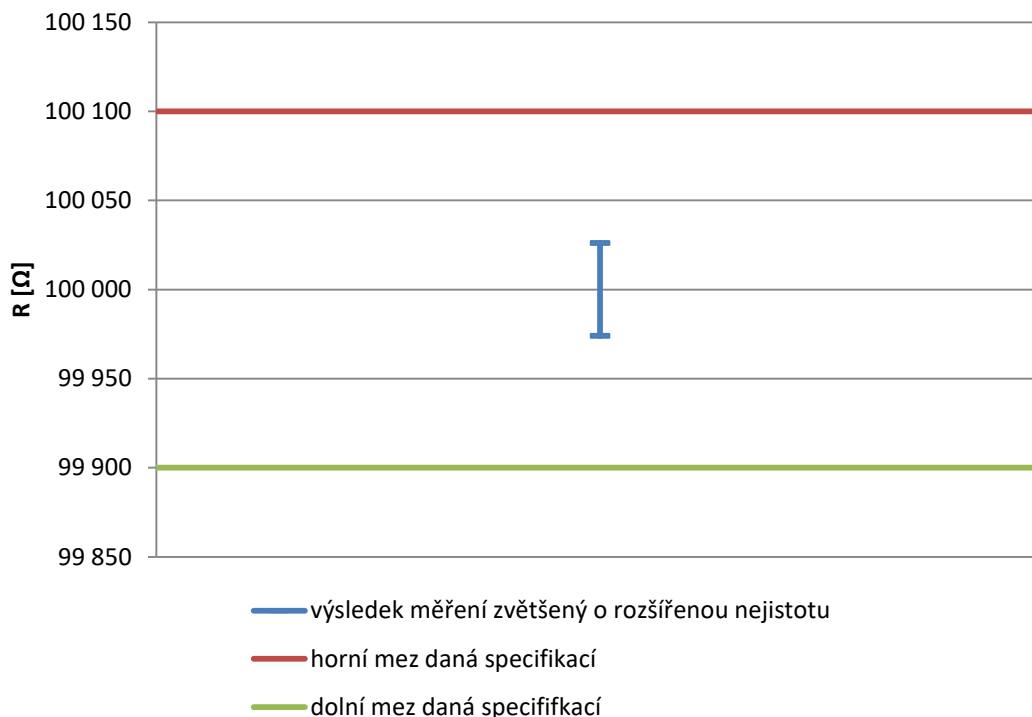
	Rozsah	Etalon	UUT	Odchylka	Nejistota
teoreticky	1 MΩ	0,99978 MΩ; 100 V	0,1 MΩ	0,022 kΩ	4,2 Ω (P = 95%)
změřeno	1 MΩ	0,99978 MΩ; 100 V	0,1 MΩ	0,022 kΩ	3,5 Ω (P = 95%)

Teoretická hodnota rozšířené nejistoty měření odporu a hodnota změřené programem Caliber se liší o 0,7 Ω. Rozdíl je způsoben zaokrouhlováním mezivýsledků a neuvažováním úbytku napětí na ampérmetru při teoretickém výpočtu.

Všechny změřené hodnoty programem Caliber lze vidět v kalibračním protokolu (příloha 3). Kalibrační protokol byl vytvořen podle vzoru kalibračních protokolů od firmy Meatest, pouze v něm chybí hlavička protokolu s údaji o firmě. Výsledek kalibrace určuje poslední sloupec protokolu. Větší vypovídací hodnotu má ale procento čerpání specifikace %spe. Pro vysokoohmovou odporovou dekádu se považuje za přijatelné procento čerpání specifikace menší než 100 %.

Bod kalibrace 100 kΩ, 100 V rozebíraný v této kapitole má procento čerpání specifikace 22 %, což vyhovuje požadované přesnosti.

**Graf 9.1: Shoda se specifikací (bod kalibrace 100 k $\Omega$ , 100 V)**



Z grafu 9.1 lze vidět, že bod kalibrace 100 k $\Omega$ , 100 V prošel kalibrací, protože celý interval zahrnující i nejistoty měření odporu se nachází uvnitř intervalu znázorňujícího povolený odpor nastavený na vysokoodporové odporové dekádě kalibrátoru 9010.

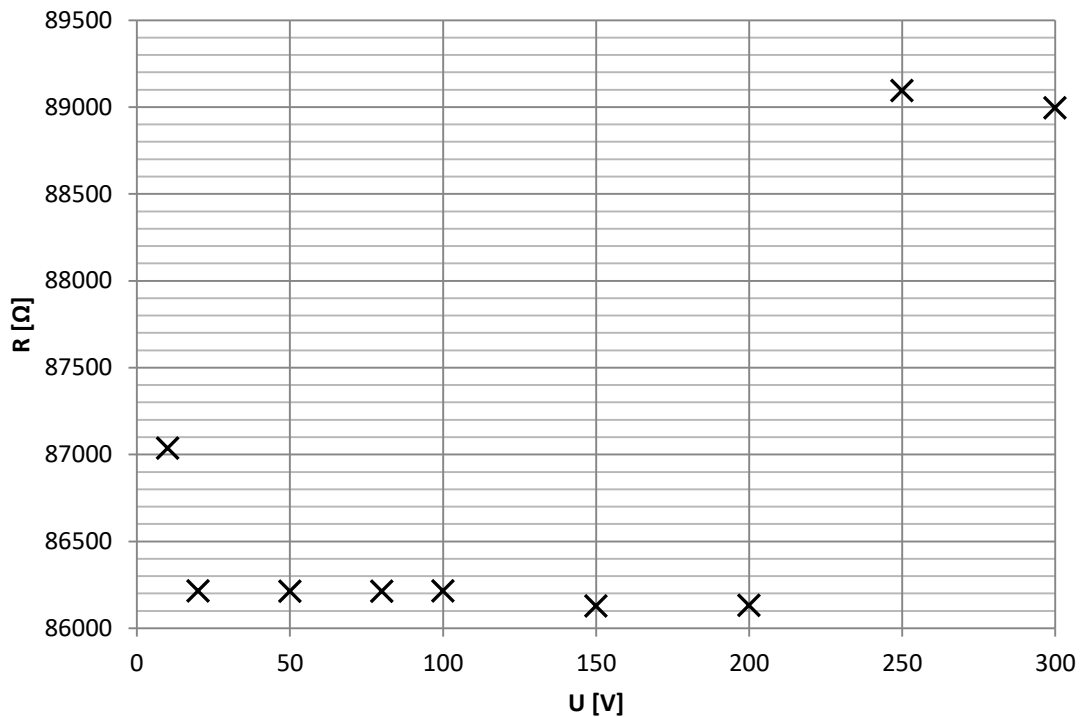
## 9.7 Celkový výsledek kalibrace vysokoodporové dekády kalibrátoru 9010

Všechny body kalibrace a jejich proměření lze vidět v příloze 1. Další vypočtené nejistoty měření odporu neuvažují standardní nejistotu typu A měření proudu, jelikož tyto hodnoty program Caliber neexportuje do výstupního protokolu.

V příloze 2 se nachází grafy znázorňující a srovnávající nejistoty měření odporu jednotlivých bodů kalibrace. Z grafů lze vidět, že hodnoty nejistot vypočtených programem Caliber a teoretickými výpočty se mírně liší. Rozdíl je způsoben především zaokrouhlováním mezivýsledků, neuvažováním standardní nejistoty typu A opakovaného měření proudu a zanedbáním vnitřního odporu ampérmetru v teoretickém výpočtu nejistot.

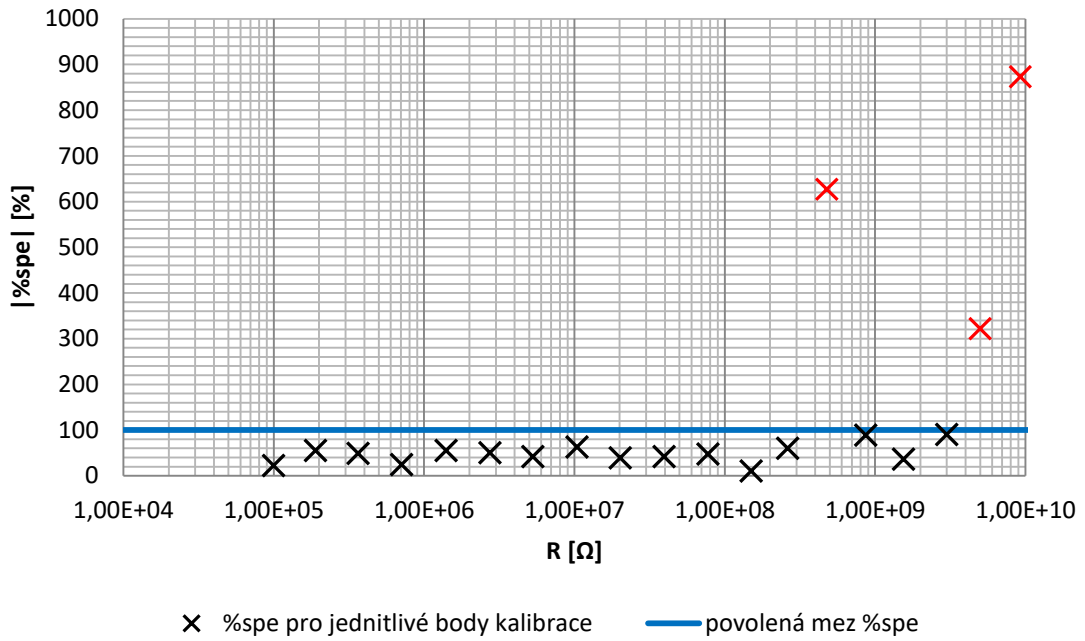


**Graf 9.3: Napět'ová závislost segmentu 86,2 k $\Omega$**

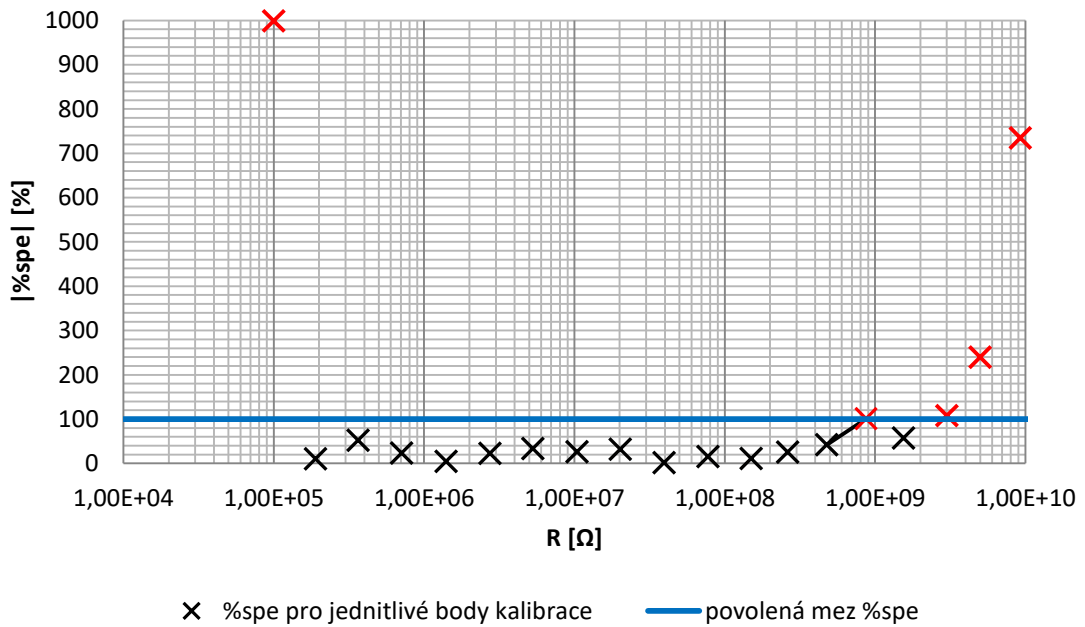


Důležitým parametrem výstupního protokolu (příloha 3) je procento čerpání specifikace. Podle něj lze snadno a rychle vyhodnotit výsledek kalibrace. Pro kalibraci vysokoohmové odporové dekády kalibrátoru 9010 je přijatelný rozsah procenta čerpání specifikace 0 – 100 %. V grafu 9.4, resp. v grafu 9.5, lze vidět výsledek kalibrace vyjádřený procentem čerpání specifikace pro body kalibrace, kde je testovací napětí 100 V, resp. 300 / 1000 V.

**Graf 9.4: Procento čerpání specifikace jednotlivých bodů kalibrace (testovací napětí 100 V)**



**Graf 9.5: Procento čerpání specifikace jednotlivých bodů kalibrace (testovací napětí 300 / 1000 V)**



Grafy 9.4 a 9.5 ukazují stejný výsledek jako graf 9.2. Znovu je odhalen špatný odporový segment 86,2 kΩ. Odporová dekáda vyhovuje a odpovídá specifikaci až



po odporový segment 478 M $\Omega$ . Vyšší odporové segmenty již mají větší odchylky a nevyhovují požadovaným přesnostem. Pro tyto rozsahy je nutné zavést větší tolerance odporu dekády, popř. pro tyto odporové segmenty použít přesnějších a kvalitnějších součástek.

Z procedury kalibrace 9010 lze usoudit, že vysokoohmová odporová dekáda prozatím nevyhovuje parametrům, které udává výrobce. Odporové segmenty přibližně do 0,5 G $\Omega$  je možné využít pro vysokoohmovou odporovou dekádu kalibrátoru 9010. Proces kalibrace dekády našel také špatný odporový segment 86,2 k $\Omega$ , který je nutno opravit.

## 10 ZÁVĚR

Hlavním úkolem bakalářské práce bylo vytvoření procedury kalibrace pro nový multifunkční kalibrátor 9010 firmy Meatest. K vytvoření procedury jsem využil program Caliber.

Seznámil jsem se s programem Caliber, nastudoval jsem práci s různými moduly programu, abych byl následně schopen vytvořit proceduru kalibrace.

Ve firmě Meatest jsem měl možnost seznámit se s vysokohmovou odporovou dekádou kalibrátoru 9010, jejím sestavením a principem. Jelikož je kalibrátor 9010 stále ještě ve vývoji, specifikace přístroje se stále ještě mění. S firmou Meatest jsme se domluvili na voltampérové metodě měření odporu.

Vytvořil jsem kartu přístroje kalibrátoru 9010, přidal vlastní funkci RHV (Resistance High Voltage) pro měření odporu voltampérovou metodou. Dále jsem této funkci přiřadil rozsahy a přesnosti dle specifikace dekády.

První částí vytvoření procedury byl seznam vhodných přístrojů pro kalibraci. Jako zdroj přesného napětí jsem použil multifunkční kalibrátor M142. Funkci přesného ampérmetru zastává multimetr HP3458A. Poté již následovalo vytvoření schématu procedury (obr. 9.1).

Důležitou částí práce bylo navrhnutí samotných bodů kalibrace. Ke správné kalibraci dekády je potřeba otestovat každý odporový segment, z nichž se odporová dekáda skládá. Pro ověření stálosti vlastností dekády je nutno každý odporový segment testovat alespoň při dvou různých napětích (napětí 100 V a maximální povolené napětí, popř. 1 kV, jelikož kalibrátor M142 nedokáže mít na výstupu vyšší napětí). Samotné body kalibrace lze vidět v Tab. 9.1.

Po vytvoření procedury následovala již samotná zkouška procedury kalibrace v praxi. Test procedury kalibrace vysokoodporové dekády kalibrátoru 9010 proběhl v laboratoři firmy Meatest. Po odladění procedury lze vidět výsledek kalibrace dekády v příloze 1, popř. příloze 3 (výstupní protokol kalibrace vysokohmové odporové dekády kalibrátoru 9010 vytvořený dle vzoru protokolů od firmy Meatest). Z dosažených výsledků kalibrace dekády lze usoudit, že pro nižší odpory (do 0,5 G $\Omega$ ) odporová dekáda vyhovuje parametrům dekády udávaným v její specifikaci. Pro vyšší odpory jsou již odchylky odporu větší, než udává specifikace. Pro správnou funkčnost dekády je potřeba tyto odporové segmenty nahradit součástkami s vyšší kvalitou a přesností, nebo ponechat stávající sestavení vysokohmové odporové dekády s opravou její specifikace.

Při ladění procedury kalibrace odporové dekády byl zjištěn špatný odporový segment 86,2 k $\Omega$ . Tento odporový segment je napěťově závislý (viz graf 9.3). Díky této chybě odporové dekády lze vidět správně navržené body kalibrace, kdy se každý odporový segment musí testovat alespoň při dvou různých napětích, aby se předešlo právě nechtěné napěťové závislosti odporových segmentů.

# Literatura

- [1] METROLOGIE V KOSTCE [online] 2. vydání. Brno: Český metrologický institut, 2003 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <http://www.cmi.cz/>
- [2] Meatest, a. s. [online]. Brno, 2018 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://www.meatest.com/cs>
- [3] M142, Multifunction calibrator [online], [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://www.meatest.com/files/download/dat/m142d.pdf>
- [4] Manual 9010: Dostupné z: <http://www.meatest.cz>.
- [5] CALIBER: Uživatelská příručka [online]. Ver. 2.30 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://www.meatest.com/files/download/man/caln.pdf>
- [6] M194 Operation manual [online] Ver. 16. Brno [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://www.meatest.com/files/download/dat/m194d.pdf>
- [7] Vrba, K.: *Konstrukce elektronických zařízení*. Skripta VUT Brno
- [8] In: SEALEVEL: SeaLINK+232-DB9 [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://www.sealevel.com/wp-content/uploads/2018/06/db9m-rs232-pinout.jpg>
- [9] In: *Vyvoj.hw.cz: Sériová linka RS-232* [online]. 2005 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: [https://vyvoj.hw.cz/files/rozhrani/images/rs232\\_f1.gif](https://vyvoj.hw.cz/files/rozhrani/images/rs232_f1.gif).
- [10] ElectronicsHub: RS232 Protocol [online]. 2017 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://www.electronicshub.org/rs232-protocol-basics/>
- [11] ElectronicsNotes: What is GPIB / IEEE 488 Bus [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://www.electronics-notes.com/articles/test-methods/gpib-ieee-488-bus/what-is-gpib-ieee488.php>
- [12] USBshop.cz: USB konektory [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z <http://www.usbshop.cz/p1.htm>
- [13] Lantronix: Ethernet Tutorial [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://www.lantronix.com/resources/networking-tutorials/ethernet-tutorial-networking-basics/>
- [14] *PankyWeby. Zapojení síťového konektoru RJ-45* [online]. In:2018 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://www.pc-servis-cr.cz/znalostni-databaze/sit/7-zapojeni-sitoveho-konektoru-rj-45>
- [15] National Instruments VISA [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: [www.ni.com/visa/](http://www.ni.com/visa/)
- [16] *Web o chemii, elektronice a programování, Měření odporů* [online]. In: .2006 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <http://z-moravec.net/elektronika/rezistory/mereni-odporu/>
- [17] Šedivá, S., Havlíková, M.: *Měření v elektrotechnice – Laboratorní návody*, Skripta VUT.
- [18] Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Sborníky technické harmonizace, Svazek č. 8, Nejistoty měření.

- [19] Bejček, L., Čejka, M., Rez, J., Gescheidtová, E., Steibauer, M.: *Měření v elektrotechnice*. Skripta VUT Brno.
- [20] BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML, Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. Geneva: International Organisation for Standardization, 1st ed., 1993, Corrected and reprinted 1995, 101 pages, ISBN 92-67-10188-9.
- [21] PALENČÁR, R. – VDOLEČEK, F. – HALAJ, M. *Nejistoty v měření I: vyjadřování nejistot*. *Automa*. 2001, 7, s. 50-54.
- [22] Palenčar, R., Vdoleček, F., Halaj, M.: *Nejistoty v měření III: nejistoty nepřímých měření*. *AUTOMA*. 2001, 12, s. 28-33.
- [23] Palenčar, R., Vdoleček, F., Halaj, M.: *Nejistoty v měření IV: nejistoty při kalibraci a ověřování*. *AUTOMA*. 2002, 4, s. 41-47.
- [24] Keysight 3458A Multimeter [online], [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5965-4971E.pdf?id=1000073270:epsg:dow>

## Seznam příloh

Příloha 1 - Protokol kalibrace vysokoodporové dekády kalibrátoru 9010 .....	62
Příloha 2 - Nejistoty měření jednotlivých bodů kalibrací.....	63
Příloha 3 - Calibration Certificate No. 1 .....	65
Příloha 4 - CD .....	68

# Příloha 1 - Protokol kalibrace vysokoodporové dekády kalibrátoru 9010

Funkce	Rozsah	Etalon	UUT	Odchylka	%spe	Povoleno	Nejistota
<RHV	1 Mohm	0.0999780 Mohm; 100V	0.1000000 Mohm	0.0220 kohm	22	0.1000 kohm	0.0035 kohm   ok
<RHV	1 Mohm	0.1012514 Mohm; 300V	0.1000000 Mohm	-1.2514 kohm	-999	0.1000 kohm	0.0055 kohm   *
<RHV	1 Mohm	0.1901049 Mohm; 100V	0.1900000 Mohm	-0.1049 kohm	-55	0.1900 kohm	0.0076 kohm   ok
<RHV	1 Mohm	0.190019 Mohm; 300V	0.190000 Mohm	-0.019 kohm	-10	0.190 kohm	0.013 kohm   ok
<RHV	1 Mohm	0.365180 Mohm; 100V	0.365000 Mohm	-0.180 kohm	-49	0.365 kohm	0.018 kohm   ok
<RHV	1 Mohm	0.365190 Mohm; 300V	0.365000 Mohm	-0.190 kohm	-52	0.365 kohm	0.013 kohm   ok
<RHV	1 Mohm	0.710169 Mohm; 100V	0.710000 Mohm	-0.169 kohm	-24	0.710 kohm	0.050 kohm   ok
<RHV	1 Mohm	0.710163 Mohm; 300V	0.710000 Mohm	-0.163 kohm	-23	0.710 kohm	0.030 kohm   ok
<RHV	2 Mohm	1.400776 Mohm; 100V	1.400000 Mohm	-0.776 kohm	-55	1.400 kohm	0.059 kohm   ok
<RHV	2 Mohm	1.399940 Mohm; 1kV	1.400000 Mohm	0.060 kohm	4	1.400 kohm	0.052 kohm   ok
<RHV	10 Mohm	2.75136 Mohm; 100V	2.75000 Mohm	-1.36 kohm	-50	2.75 kohm	0.15 kohm   ok
<RHV	10 Mohm	2.75061 Mohm; 1kV	2.75000 Mohm	-0.61 kohm	-22	2.75 kohm	0.12 kohm   ok
<RHV	10 Mohm	5.30222 Mohm; 100V	5.30000 Mohm	-2.22 kohm	-42	5.30 kohm	0.42 kohm   ok
<RHV	10 Mohm	5.30176 Mohm; 1kV	5.30000 Mohm	-1.76 kohm	-33	5.30 kohm	0.32 kohm   ok
<RHV	100 Mohm	10.40650 Mohm; 100V	10.40000 Mohm	-6.50 kohm	-63	10.40 kohm	0.43 kohm   ok
<RHV	100 Mohm	10.40269 Mohm; 1kV	10.40000 Mohm	-2.69 kohm	-26	10.40 kohm	0.40 kohm   ok
<RHV	100 Mohm	20.2580 Mohm; 100V	20.2500 Mohm	-8.0 kohm	-39	20.3 kohm	1.1 kohm   ok
<RHV	100 Mohm	20.25641 Mohm; 1kV	20.25000 Mohm	-6.41 kohm	-32	20.25 kohm	0.98 kohm   ok
<RHV	100 Mohm	39.4835 Mohm; 100V	39.5000 Mohm	16.5 kohm	42	39.5 kohm	3.6 kohm   ok
<RHV	100 Mohm	39.5003 Mohm; 1kV	39.5000 Mohm	-0.3 kohm	-1	39.5 kohm	2.7 kohm   ok
<RHV	100 Mohm	77.464 Mohm; 100V	77.500 Mohm	36 kohm	47	78 kohm	11 kohm   ok
<RHV	100 Mohm	77.5116 Mohm; 1kV	77.5000 Mohm	-11.6 kohm	-15	77.5 kohm	8.1 kohm   ok
<RHV	500 Mohm	149.970 Mohm; 100V	150.000 Mohm	30 kohm	10	300 kohm	19 kohm   ok
<RHV	500 Mohm	149.9655 Mohm; 1kV	150.0000 Mohm	34.5 kohm	11	300.0 kohm	8.3 kohm   ok
<RHV	500 Mohm	262.186 Mohm; 100V	262.500 Mohm	314 kohm	60	525 kohm	56 kohm   ok
<RHV	500 Mohm	262.369 Mohm; 1kV	262.500 Mohm	131 kohm	25	525 kohm	22 kohm   ok
<RHV	500 Mohm	472.01 Mohm; 100V	478.00 Mohm	5993 kohm	627	956 kohm	489 kohm   *
<RHV	500 Mohm	477.595 Mohm; 1kV	478.000 Mohm	405 kohm	42	956 kohm	71 kohm   ok
<RHV	1 Gohm	0.86845 Gohm; 100V	0.87000 Gohm	1.55 Mohm	89	1.74 Mohm	0.38 Mohm   ?
<RHV	1 Gohm	0.86825 Gohm; 1kV	0.87000 Gohm	1.75 Mohm	101	1.74 Mohm	0.23 Mohm   ?
<RHV	10 Gohm	1.5472 Gohm; 100V	1.5500 Gohm	2.8 Mohm	36	7.8 Mohm	1.3 Mohm   ok
<RHV	10 Gohm	1.54554 Gohm; 1kV	1.55000 Gohm	4.46 Mohm	57	7.75 Mohm	0.18 Mohm   ok
<RHV	10 Gohm	2.9865 Gohm; 100V	3.0000 Gohm	13.5 Mohm	90	15.0 Mohm	4.6 Mohm   ?
<RHV	10 Gohm	2.98373 Gohm; 1kV	3.00000 Gohm	16.27 Mohm	108	15.00 Mohm	0.62 Mohm   *
<RHV	10 Gohm	4.920 Gohm; 100V	5.000 Gohm	80 Mohm	322	25 Mohm	11 Mohm   *
<RHV	10 Gohm	4.9399 Gohm; 1kV	5.0000 Gohm	60.1 Mohm	240	25.0 Mohm	1.6 Mohm   *
<RHV	10 Gohm	8.846 Gohm; 100V	9.250 Gohm	404 Mohm	873	46 Mohm	41 Mohm   *
<RHV	10 Gohm	8.9100 Gohm; 1kV	9.2500 Gohm	340.0 Mohm	735	46.3 Mohm	5.2 Mohm   *

Popis symbolů:

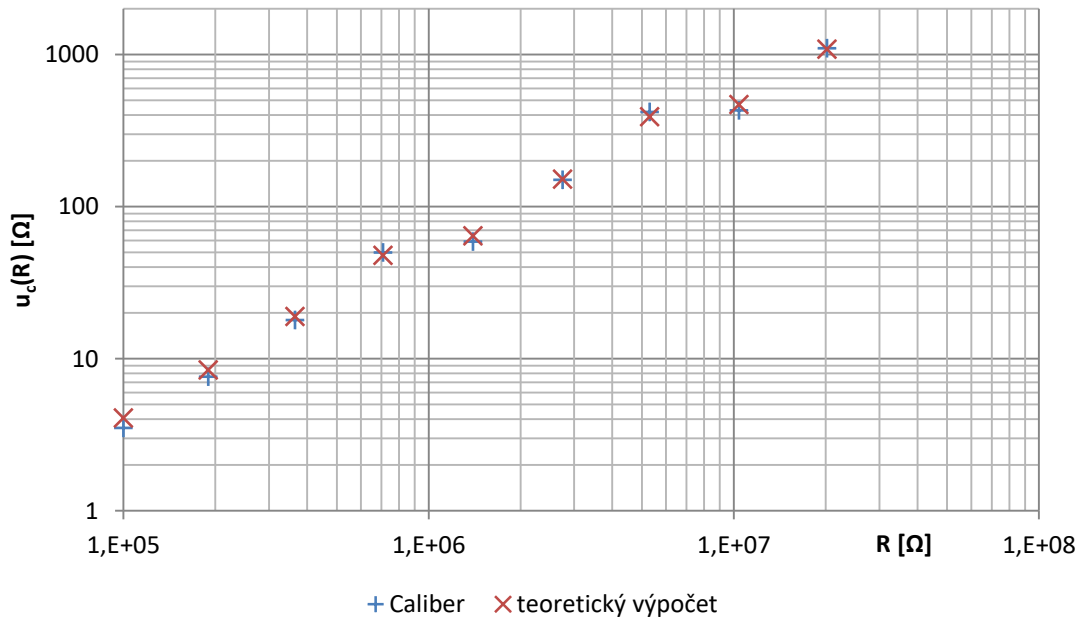
ok ... vyhovuje

? ... chyba naměřená je v intervalu mezní chyba ± nejistota měření

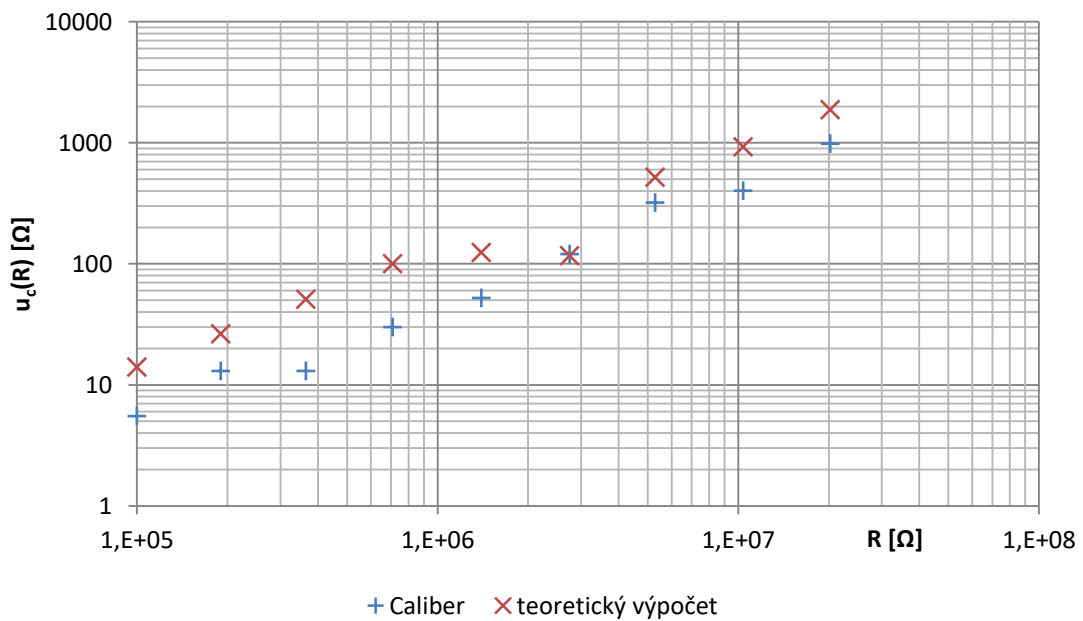
\* ... nevyhovuje

## Příloha 2 - Nejistoty měření jednotlivých bodů kalibrací

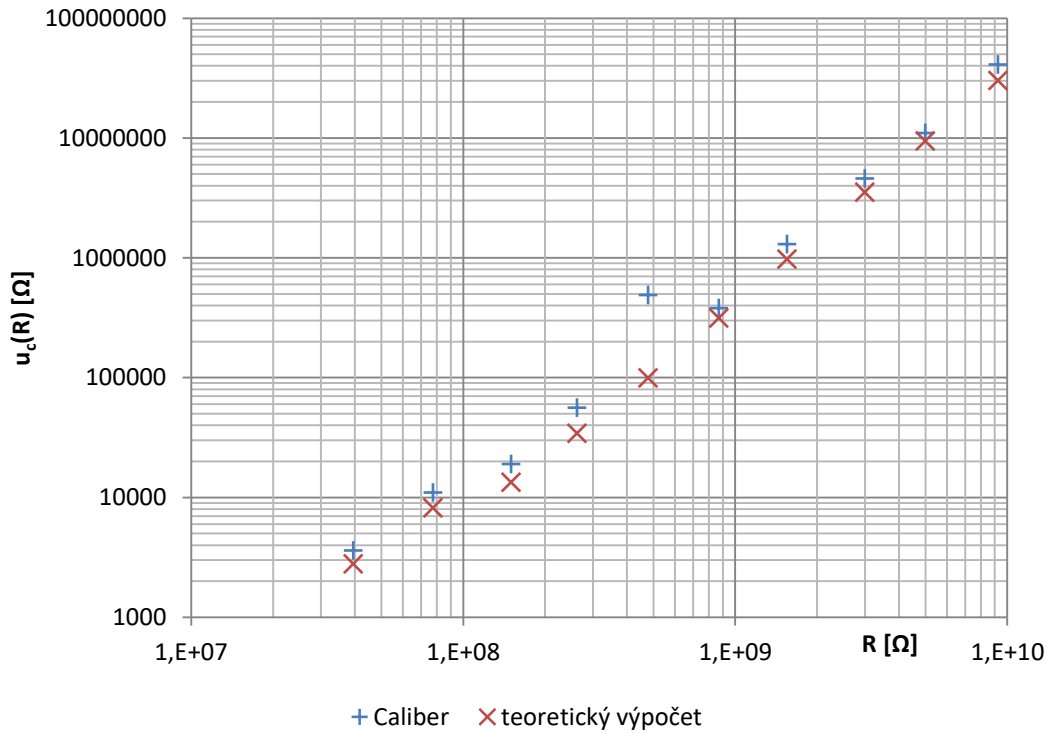
Graf č. 1: Nejistoty měření odporu (pro napětí 100 V, odpor menší než 20,25 M $\Omega$ )



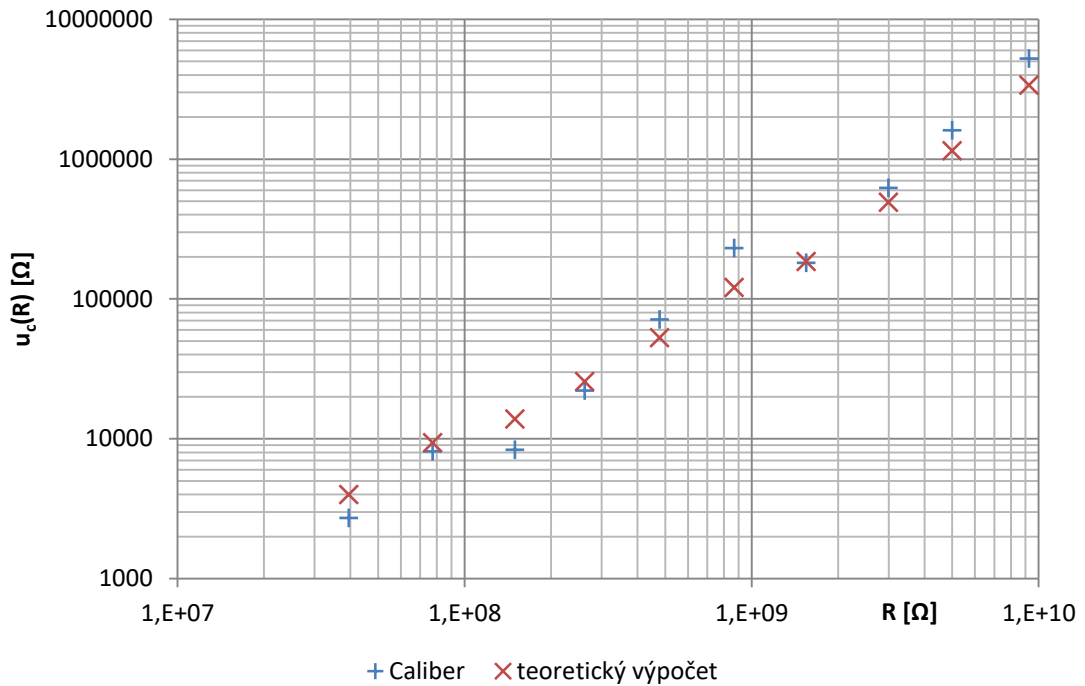
Graf č. 2: Nejistoty měření odporu (pro napětí 300 / 1000 V, odpor menší než 20,25 M $\Omega$ )



**Graf č. 3: Nejistoty měření odporu (pro napětí 100 V, odpor větší než 39,5 MΩ)**



**Graf č. 4: Nejistoty měření odporu (pro napětí 1000 V, odpor větší než 39,5 MΩ)**





# Příloha 3 - Calibration Certificate No. 1

## Calibration Certificate No. 1

---

**Manufacturer:** Meatest

**Model Type Number:** 9010

**Serial Number:** SN1

**Customer:** Meatest

**Date of Calibration:** 3. 5. 2019

**Place of Calibration:** Calibration laboratory Meatest, Zelezna 3, CZ-619 00

**Number of Pages:** 3

**Page:** 1

The instrument has been calibrated in accordance with the manufacturer's User's manual using that are traceable to National or International Standards or have been derived by approved ratio techniques.

The measurement uncertainties stated in this document have been determined according EA-4/02. They were estimated as expanded uncertainty obtained multiplying the standard uncertainty by the coverage factor  $k=2$  with confidence level of 95%.

The measurement results relate only to the calibrated items and do not carry any implication regarding long term stability of the instrument.

---

Seal	Date of Issue	Head of Calibration Laboratory	Person in Charge
------	---------------	--------------------------------	------------------

3. 5. 2019

Ing. Jan Bartoň

Petr Bilík

---

This calibration certificate may not be reproduced other than in full except with the permission of the issuing laboratory. Calibration certificates without signature and seal are not valid.

<b>Range of Calibration:</b>	High Voltage Resistance	
<b>Calibration Conditions:</b>	Temperature:	22,2 °C
	Humidity:	46,2 %
<b>Calibration Procedure:</b>	Automatic calibration according to the test procedure 9010 RHV	
<b>Applied Standards:</b>	Nepřímé měření V-A metodou Multifunkční kalibrátor M142 SN540061, multimetr HP3458A SN2823A10318	

The following pages contain the calibration results with column indicating the instrument performance relative to the stated specification.

The column headed „%spe“ is the measured error as percentage of the stated specification with no allowance being made for the calibration uncertainty.

## Measurement Results:

Funkce	Rozsah	Etalon	UUT	Odchylka	%spe	Povoleno	Nejistota	
<RHV	1 Mohm	0.0999780 Mohm; 100V	0.1000000 Mohm	0.0220 kohm	22	0.1000 kohm	0.0035 kohm	ok
<RHV	1 Mohm	0.1012514 Mohm; 300V	0.1000000 Mohm	-1.2514 kohm	-999	0.1000 kohm	0.0055 kohm	*
<RHV	1 Mohm	0.1901049 Mohm; 100V	0.1900000 Mohm	-0.1049 kohm	-55	0.1900 kohm	0.0076 kohm	ok
<RHV	1 Mohm	0.190019 Mohm; 300V	0.1900000 Mohm	-0.019 kohm	-10	0.190 kohm	0.013 kohm	ok
<RHV	1 Mohm	0.365180 Mohm; 100V	0.365000 Mohm	-0.180 kohm	-49	0.365 kohm	0.018 kohm	ok
<RHV	1 Mohm	0.365190 Mohm; 300V	0.365000 Mohm	-0.190 kohm	-52	0.365 kohm	0.013 kohm	ok
<RHV	1 Mohm	0.710169 Mohm; 100V	0.710000 Mohm	-0.169 kohm	-24	0.710 kohm	0.050 kohm	ok
<RHV	1 Mohm	0.710163 Mohm; 300V	0.710000 Mohm	-0.163 kohm	-23	0.710 kohm	0.030 kohm	ok
<RHV	2 Mohm	1.400776 Mohm; 100V	1.400000 Mohm	-0.776 kohm	-55	1.400 kohm	0.059 kohm	ok
<RHV	2 Mohm	1.399940 Mohm; 1kV	1.400000 Mohm	0.060 kohm	4	1.400 kohm	0.052 kohm	ok
<RHV	10 Mohm	2.75136 Mohm; 100V	2.75000 Mohm	-1.36 kohm	-50	2.75 kohm	0.15 kohm	ok
<RHV	10 Mohm	2.75061 Mohm; 1kV	2.75000 Mohm	-0.61 kohm	-22	2.75 kohm	0.12 kohm	ok
<RHV	10 Mohm	5.30222 Mohm; 100V	5.30000 Mohm	-2.22 kohm	-42	5.30 kohm	0.42 kohm	ok
<RHV	10 Mohm	5.30176 Mohm; 1kV	5.30000 Mohm	-1.76 kohm	-33	5.30 kohm	0.32 kohm	ok
<RHV	100 Mohm	10.40650 Mohm; 100V	10.40000 Mohm	-6.50 kohm	-63	10.40 kohm	0.43 kohm	ok
<RHV	100 Mohm	10.40269 Mohm; 1kV	10.40000 Mohm	-2.69 kohm	-26	10.40 kohm	0.40 kohm	ok
<RHV	100 Mohm	20.2580 Mohm; 100V	20.2500 Mohm	-8.0 kohm	-39	20.3 kohm	1.1 kohm	ok
<RHV	100 Mohm	20.25641 Mohm; 1kV	20.25000 Mohm	-6.41 kohm	-32	20.25 kohm	0.98 kohm	ok
<RHV	100 Mohm	39.4835 Mohm; 100V	39.5000 Mohm	16.5 kohm	42	39.5 kohm	3.6 kohm	ok
<RHV	100 Mohm	39.5003 Mohm; 1kV	39.5000 Mohm	-0.3 kohm	-1	39.5 kohm	2.7 kohm	ok
<RHV	100 Mohm	77.464 Mohm; 100V	77.500 Mohm	36 kohm	47	78 kohm	11 kohm	ok
<RHV	100 Mohm	77.5116 Mohm; 1kV	77.5000 Mohm	-11.6 kohm	-15	77.5 kohm	8.1 kohm	ok
<RHV	500 Mohm	149.970 Mohm; 100V	150.000 Mohm	30 kohm	10	300 kohm	19 kohm	ok
<RHV	500 Mohm	149.9655 Mohm; 1kV	150.0000 Mohm	34.5 kohm	11	300.0 kohm	8.3 kohm	ok
<RHV	500 Mohm	262.186 Mohm; 100V	262.500 Mohm	314 kohm	60	525 kohm	56 kohm	ok
<RHV	500 Mohm	262.369 Mohm; 1kV	262.500 Mohm	131 kohm	25	525 kohm	22 kohm	ok
<RHV	500 Mohm	472.01 Mohm; 100V	478.00 Mohm	5993 kohm	627	956 kohm	489 kohm	*
<RHV	500 Mohm	477.595 Mohm; 1kV	478.000 Mohm	405 kohm	42	956 kohm	71 kohm	ok
<RHV	1 Gohm	0.86845 Gohm; 100V	0.87000 Gohm	1.55 Mohm	89	1.74 Mohm	0.38 Mohm	?
<RHV	1 Gohm	0.86825 Gohm; 1kV	0.87000 Gohm	1.75 Mohm	101	1.74 Mohm	0.23 Mohm	?
<RHV	10 Gohm	1.5472 Gohm; 100V	1.5500 Gohm	2.8 Mohm	36	7.8 Mohm	1.3 Mohm	ok
<RHV	10 Gohm	1.54554 Gohm; 1kV	1.55000 Gohm	4.46 Mohm	57	7.75 Mohm	0.18 Mohm	ok
<RHV	10 Gohm	2.9865 Gohm; 100V	3.0000 Gohm	13.5 Mohm	90	15.0 Mohm	4.6 Mohm	?
<RHV	10 Gohm	2.98373 Gohm; 1kV	3.00000 Gohm	16.27 Mohm	108	15.00 Mohm	0.62 Mohm	*
<RHV	10 Gohm	4.920 Gohm; 100V	5.000 Gohm	80 Mohm	322	25 Mohm	11 Mohm	*
<RHV	10 Gohm	4.9399 Gohm; 1kV	5.0000 Gohm	60.1 Mohm	240	25.0 Mohm	1.6 Mohm	*
<RHV	10 Gohm	8.846 Gohm; 100V	9.250 Gohm	404 Mohm	873	46 Mohm	41 Mohm	*
<RHV	10 Gohm	8.9100 Gohm; 1kV	9.2500 Gohm	340.0 Mohm	735	46.3 Mohm	5.2 Mohm	*

Popis symbolů:

ok ... vyhovuje

? ... chyba naměřená je v intervalu mezní chyba ± nejistota měření

\* ... nevyhovuje

**Statement of Compliance:** Passed except points marked with symbol \*, ?.

## Příloha 4 - CD

### Obsah CD:

- BP\_Bilik.pdf - bakalářská práce
- Calibration\_Certificate.pdf - protokol o kalibraci vysokoodporové dekády kalibrátoru 9010
- 9010\_RHV.pro - procedura kalibrace vysokoodporové dekády kalibrátoru 9010 vytvořená v program Caliber
- 9010.dev - karta přístroje multifunkčního kalibrátoru 9010