



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

MĚŘENÍ MALÝCH STEJNOSMĚRNÝCH NAPĚTÍ

LOW LEVEL DC VOLTAGE MEASUREMENT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. LUCIE OBŠILOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MARIE HAVLÍKOVÁ, Ph.D.

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Kybernetika, automatizace a měření

Studentka: Bc. Lucie Obšilová

ID: 135985

Ročník: 2

Akademický rok: 2014/2015

NÁZEV TÉMATU:

Měření malých stejnosměrných napětí

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se s problematikou přesného měření malých stejnosměrných napětí. Popište principy a měřicí postupy dostupných metod pro měření malých napětí, které se používají na externím pracovišti ČMI Brno.
2. Navrhněte postup porovnání daných měřicích metod a metodu zpracování porovnání.
3. V návaznosti na semestrální projekt realizujte na externím pracovišti ČMI Brno porovnání měření malých stejnosměrných napětí různými metodami v souladu s pokyny konzultanta.
4. Zpracujte naměřená data porovnání. Vyhodnoťte a interpretejte dosažené výsledky.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] R. Honig, J. Streit, and M. Sira, Use of the BVD for traceability of bipolar DC voltage scale from 1 mV up to 1200 V, in Proceedings of NCSL International Workshop and Symposium, San Antonio, Texas, USA, 2009, p. 13.
- [2] M. Šíra, M. Early, J. Streit, and L. Christian, Comparison of the Reference Step Method with a MI 8000/8001 potentiometer, in 2012 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM), 2012, pp. 540–541.

Termín zadání: 9.2.2015

Termín odevzdání: 18.5.2015

Vedoucí práce: Ing. Marie Havlíková, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce: Ing. Stanislav Mašláň

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.

Předseda oborové rady

Abstrakt

Práce se zabývá měřením malých stejnosměrných napětí s využitím tří měřicích metod. První část práce popisuje jednotlivé metody. Jedná se o potenciometrickou metodu, referenční krokovou metodu a přímou metodu. Práce také popisuje kvantový etalon stejnosměrného napětí založený na Josephsonově jevu, který se použil ke kalibraci nanovoltmetru a Zenerovy reference. Teoretická část práce se dále zabývá vyhodnocením klíčového porovnání dat.

Hlavním cílem práce je porovnání metod pro měření malých stejnosměrných napětí. Praktická část práce se zabývá realizací měření všemi metodami ve spolupráci s Českým metrologickým institutem v Brně. Naměřené hodnoty jsou zpracovány, včetně vyhodnocení nejistot. Závěrečná část práce se zaměřuje na porovnání měřicích metod. Určí se referenční hodnota porovnání klíčových dat a stupeň ekvivalence měření každé metody. Další část porovnání zahrnovala grafické porovnání metod. Konec práce obsahuje zhodnocení dosažených výsledků.

Klíčová slova

Stejnoseměrné napětí, referenční kroková metoda, potenciometrická metoda, kvantový etalon stejnosměrného napětí na základě Josephsonova jevu, klíčové porovnání, referenční hodnota klíčového porovnání, stupeň ekvivalence.

Abstract

This thesis deals with low level DC voltage measurement by three methods. First part of this thesis describes each method. It is about potentiometric method, reference step method and direct method. This thesis also describes Josephson voltage standard which was used for calibration nanovoltmeter and Zener reference. The theoretical part of this thesis also deals with the evaluation of key comparison data.

The main goal of this thesis is the comparison of methods used to measure low level DC voltage. The practical part of the thesis deals with the implementation of measurement with all methods in cooperation with Czech metrology institute. The measured values are processed including uncertainty evaluations. The final part of this thesis focuses on comparison of measurement methods. The key comparison reference value and the degree of equivalence of the measurement of each method are determined. Next part of comparison consisted of graphic comparison of methods. The end of the thesis contains evaluation of the achieved results.

Keywords

DC voltage, reference step method, potentiometric method, Josephson voltage standard, key comparison, key comparison reference value, degree of equivalence.

Bibliografická citace:

Obšilová, L. *Měření malých stejnosměrných napětí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 89s. Vedoucí diplomové práce byla Ing. Marie Havlíková, Ph.D.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Měření malých stejnosměrných napětí jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové 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 autorka uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušila autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhla nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědoma 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: **15. května 2015**

.....

podpis autora

Poděkování (nepovinné)

Děkuji vedoucí diplomové práce Ing. Marii Havlíkové, Ph.D. a odborným konzultantům Mgr. Martinu Šírovi, Ph.D. a Ing. Stanislavu Mašláňovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne: **15. května 2015**

.....
podpis autora

Obsah

1	Úvod.....	12
2	Metody pro měření malých stejnosměrných napětí.....	13
2.1	Přímá metoda měření stejnosměrných napětí.....	13
2.1.1	Kvantový etalon stejnosměrného napětí	13
2.1.2	Popis kvantového etalonu stejnosměrného napětí.....	17
2.1.3	Popis kalibrace pomocí kvantového etalonu.....	18
2.2	Referenční kroková metoda	19
2.3	Potenciometrická metoda měření stejnosměrných napětí	22
2.3.1	Popis metody.....	22
2.3.2	Výpočet výsledného napětí a nejistoty.....	24
3	Vyhodnocení porovnání metod	27
3.1	Procedura A.....	27
3.2	Nejistoty měření.....	29
4	Měření malých stejnosměrných napětí.....	33
4.1	Výběr kalibrátoru	34
4.2	Měření přímou metodou.....	34
4.3	Měření referenční krokovou metodou.....	36
4.4	Měření potenciometrickou metodou	38
5	Zpracování naměřených dat	39
5.1	Kalibrace linearity nanovoltmetru Keithley 2182A	39
5.2	Zpracování dat naměřených přímou metodou.....	45
5.3	Zpracování dat naměřených referenční krokovou metodou.....	46
5.4	Potenciometrická metoda.....	54
6	Porovnání měřicích metod.....	55
6.1	Volba bodů pro porovnání	55
6.2	Grafy pro porovnání metod.....	56
6.3	Klíčové porovnání metod.....	57
6.4	Diskuze dosažených výsledků.....	59
	Závěr	70
	Literatura.....	72
	Seznam příloh	74

Seznam obrázků

Obrázek 1 Voltampérová charakteristika Josephsonova přechodu pro různé kvantové stavy n [1]	14
Obrázek 2 Páskový vlnovod - zapojení několika Josephsonových přechodů do série [1]	15
Obrázek 3 Schéma Josephsonova čipu, kde křížek označuje jeden Josephsonův přechod [1]	15
Obrázek 4 Josephsonův čip [2]	16
Obrázek 5 Schéma kvantového etalonu stejnosměrného napětí ČMI [1]	17
Obrázek 6 Státní etalon stejnosměrného napětí na ČMI [1]	18
Obrázek 7 Schéma zapojení pro měření referenční krokovou metodou [5]	20
Obrázek 8 Závislost výstupního napětí zdroje na jeho nastavení [5]	20
Obrázek 9 Schéma zapojení pro potenciometrickou metodu při měření napětí do 10V [4]	22
Obrázek 10 Schéma zapojení pro potenciometrickou metodu při měření napětí nad 10V [4]	23
Obrázek 11 Schéma zapojení binárního napěťového děliče pro bipolární měření [6]	24
Obrázek 12 Schéma zapojení pro měření přímou metodou	35
Obrázek 13 konektor LEMO FVN1.S a zásuvka nanovoltmetru Keithley 2182A [16]	35
Obrázek 14 Schéma zapojení pro měření referenční krokovou metodou [4]	36
Obrázek 15 Schéma zapojení pro porovnání kalibrátoru Fluke 5720A se Zenerovou referencí 732A	37
Obrázek 16 Schéma zapojení pro měření potenciometrickou metodou [4]	38
Obrázek 17 Ilustrační graf závislosti napětí nanovoltmetru U na napětí kvantového etalonu U_{jvs} , zobrazení chyby nanovoltmetru	40
Obrázek 18 Ilustrační graf závislosti napětí nanovoltmetru U na napětí kvantového etalonu U_{jvs} , zobrazení nelinearity nanovoltmetru	41
Obrázek 19 Závislost chyby Δ nanovoltmetru Keithley 2182A na jeho napětí U , rozsah 0,01 V	42
Obrázek 20 Závislost nelinearity ε nanovoltmetru Keithley 2182A na jeho napětí U , rozsah 0,01V	43
Obrázek 21 Závislost zisků G nanovoltmetru Keithley 2182A na čase, rozsah 0,01 V	44
Obrázek 22 Schéma zapojení pro porovnání kalibrátoru se Zenerovou referencí	47
Obrázek 23 Závislost napětí nastaveného na kalibrátoru na jeho správném napětí	49
Obrázek 24 Porovnání metod měření malých ss napětí včetně rozšířených nejistot, nominální hodnota 7 mV, odchylky Δ absolutních hodnot napětí od nominální hodnoty, kalibrátor Fluke 5720A, rozsah 220 mV	56

Obrázek 25 Porovnání metod měření malých ss napětí včetně rozšířených nejistot, nominální hodnota -2 mV, odchylky Δ absolutních hodnot napětí od nominální hodnoty, kalibrátor Fluke 5720A, rozsah 220 mV	60
Obrázek 26 Porovnání metod měření malých ss napětí včetně rozšířených nejistot, nominální hodnota 10 mV, odchylky Δ absolutních hodnot napětí od nominální hodnoty, kalibrátor Fluke 5720A, rozsah 220 mV	60
Obrázek 27 Porovnání metod měření malých ss napětí včetně rozšířených nejistot, nominální hodnota -9 V, odchylky Δ absolutních hodnot napětí od nominální hodnoty, kalibrátor Fluke 5720A, rozsah 11 V	61
Obrázek 28 Porovnání metod měření malých ss napětí včetně rozšířených nejistot, nominální hodnota 5 V, odchylky Δ absolutních hodnot napětí od nominální hodnoty, kalibrátor Fluke 5720A, rozsah 11 V	62
Obrázek 29 Porovnání metod měření malých ss napětí včetně rozšířených nejistot, nominální hodnota 3 mV, odchylky Δ absolutních hodnot napětí od nominální hodnoty, kalibrátor Fluke 5720A, rozsah 220 mV	63
Obrázek 30 Porovnání metod měření malých ss napětí včetně rozšířených nejistot, nominální hodnota 9 mV, odchylky Δ absolutních hodnot napětí od nominální hodnoty, kalibrátor Fluke 5720A, rozsah 220 mV	63
Obrázek 31 Porovnání metod měření malých ss napětí včetně rozšířených nejistot, nominální hodnota 1 mV, odchylky Δ absolutních hodnot napětí od nominální hodnoty, kalibrátor Fluke 5720A, rozsah 220 mV	64
Obrázek 32 Porovnání metod měření malých ss napětí včetně rozšířených nejistot, nominální hodnota 50 μ V, odchylky Δ absolutních hodnot napětí od nominální hodnoty, kalibrátor Fluke 5720A, rozsah 220 mV	65
Obrázek 33 Porovnání metod měření malých ss napětí včetně rozšířených nejistot, nominální hodnota -9 V, odchylky Δ absolutních hodnot napětí od nominální hodnoty, kalibrátor Fluke 5720A, rozsah 11 V	66
Obrázek 34 Porovnání metod měření malých ss napětí včetně rozšířených nejistot, nominální hodnota 5 mV, odchylky Δ absolutních hodnot napětí od nominální hodnoty, kalibrátor Fluke 5720A, rozsah 220 mV	66
Obrázek 35 Porovnání metod měření malých ss napětí včetně rozšířených nejistot, nominální hodnota -5 mV, odchylky Δ absolutních hodnot napětí od nominální hodnoty, kalibrátor Fluke 5720A, rozsah 220 mV	67

Seznam tabulek

Tabulka 1 Příklad průběhu měření referenční krokové metody pro rozsah 10 V	21
Tabulka 2 Časový průběh měření jednotlivými metodami	33
Tabulka 3 Kalibrace Zenerovy reference Fluke 732A, sériové číslo: 4825014	47
Tabulka 4 Hodnoty rozdílu Zenerovy reference Fluke 732A a kalibrátoru Fluke 5720A naměřené nanovoltmetrem Keithley 2182A	48
Tabulka 5 Hodnoty napětí x_m a standardní kombinované nejistoty $u(p)$ jednotlivých metod pro nominální napětí 10 V	57
Tabulka 6 Hodnoty výběrového průměru \bar{x} a maximální standardní kombinované nejistoty $u_{max}(x)$ pro nominální hodnotu napětí 10 V	57
Tabulka 7 Výsledné hodnoty klíčového porovnání metod pro rozsah 220 mV kalibrátoru Fluke 5720A	68
Tabulka 8 Výsledné hodnoty klíčového porovnání metod pro rozsah 11 V kalibrátoru Fluke 5720A	69

1 ÚVOD

Pro přesné měření malých stejnosměrných napětí se používají tři metody. Jedná se o přímou metodu, referenční krokovou metodu a potenciometrickou metodu. Hlavním cílem práce bude vzájemné porovnání jednotlivých metod.

Přímá metoda spočívá v porovnání testovaného kalibrátoru s nanovoltmetrem, který se zkalibruje pomocí kvantového etalonu stejnosměrného napětí. Tento etalon je založen na Josephsonově jevu. V metrologii se využívá inverzní střídavý Josephsonův jev, kdy se po přivedení střídavého proudu na Josephsonův přechod vytvoří stejnosměrné napětí. Josephsonův přechod je tvořen dvěma supravodiči oddělenými velmi tenkým dielektrikem. [1]

Referenční kroková metoda (Reference step method) závisí na velmi dobré linearitě použitého multimetru. Kromě multimetru obsahuje měřicí obvod testovaný kalibrátor a referenční zdroj. Metoda vyhodnocuje zisky jednotlivých rozsahů ověřovaného přístroje. Výhoda metody spočívá ve využití běžně dostupných přístrojů. Naopak nevýhodou metody je velká časová náročnost. [5]

Posledním způsobem měření malých stejnosměrných napětí je potenciometrická metoda, která je založena na použití binárního napěťového děliče. Princip metody spočívá v odečtení rozdílu děleného napětí Zenerovy reference a napětí ověřovaného kalibrátoru. Celé měření je plně automatizované.

Realizace měření jednotlivými metodami proběhne na externím pracovišti Českého metrologického institutu v Brně. Naměřené hodnoty budou zpracovány, včetně vyhodnocení nejistot měření. Porovnání metod pro měření malých stejnosměrných napětí bude zahrnovat grafické porovnání metod a použití procedury A klíčového porovnání.

Český metrologický institut k měření malých stejnosměrných napětí běžně používá potenciometrickou metodu. Cílem práce je tuto metodu porovnat s ostatními dvěma metodami a na základě výsledků klíčového porovnání určit, která z metod je nejpřesnější.

2 METODY PRO MĚŘENÍ MALÝCH STEJNOSMĚRNÝCH NAPĚTÍ

2.1 Přímá metoda měření stejnosměrných napětí

První a zároveň nejjednodušší představenou metodou je přímá metoda měření stejnosměrných napětí. Měřicí obvod se skládá pouze z testovaného kalibrátoru a nanovoltmetru, na němž se odečítá napětí kalibrátoru. Použitý nanovoltmetr je před měřením zkalibrován pomocí kvantového etalonu stejnosměrného napětí. Kalibrace nanovoltmetru by měla proběhnout v poměrně krátkém časovém intervalu před jeho použitím, aby zaručoval dostatečnou stabilitu. Další kapitola popisuje kvantový etalon stejnosměrného napětí, který je založen na Josephsonově jevu.

2.1.1 Kvantový etalon stejnosměrného napětí

Brian Josephson publikoval roku 1962 teoretickou práci studující pohyb částic ve slabě vázaných supravodičích. Jedná se o strukturu složenou ze dvou supravodičů oddělených velmi tenkým dielektrikem, která se nazývá Josephsonův přechod. Tento jev již o dva roky dříve zkoumal I. Giaveri, ale přisuzoval ho průrazům v dielektriku. Roku 1963 byl jev experimentálně potvrzen panem Shapirem. [1]

Supravodič je kov, ve kterém při nízkých teplotách klesá elektrický odpor na nulu. Tento jev je důsledkem vzniku dvojic vzájemně velmi slabě vázaných elektronů nazývaných Cooperovy páry. Všechny Cooperovy páry nacházející se v jednom supravodiči mají stejnou vlnovou délku a fázi a dokážou procházet materiálem bez rozptylu na kovové mřížce. Důsledkem je, že v supravodičích není pozorován elektrický odpor. Základem Josephsonova jevu je tunelování Cooperových párů, které závisí na tloušťce bariéry. Když se mezi dvěma supravodiči nachází tlustá bariéra, fáze Cooperových párů v supravodičích jsou nezávislé. Při snižování tloušťky bariéry začne docházet k tunelování Cooperových párů mezi supravodiči a vytvoří se slabá fázová vazba mezi Cooperovými páry těchto dvou supravodičů. Tunelovací proud skrz bariéru je sinovou funkcí rozdílu fází a rozdíl fází je funkcí stejnosměrného napětí na bariéře.[1]

Rozlišují se tři způsoby Josephsonova jevu: [1]

1. Stejnosměrný Josephsonův jev – stejnosměrný proud přechází Josephsonův přechod, přičemž na přechodu není vytvořeno napětí
2. Střídavý Josephsonův jev – po přivedení střídavého napětí na přechod se vytvoří proudové oscilace, využití pro převodník napětí na frekvenci
3. Inverzní střídavý Josephsonův jev – po přivedení střídavého proudu na přechod se vytvoří stejnosměrné napětí, využití pro převodník frekvence na napětí

V metrologii se využívá poslední způsob, tedy inverzní střídavý Josephsonův jev. Při působení elektromagnetického pole o frekvenci f na Josephsonův přechod, vzniká napětí V_n dané rovnicí (2.1). Ve vztahu se vyskytuje Josephsonova konstanta, která je určena ze vztahu (2.2). [2]

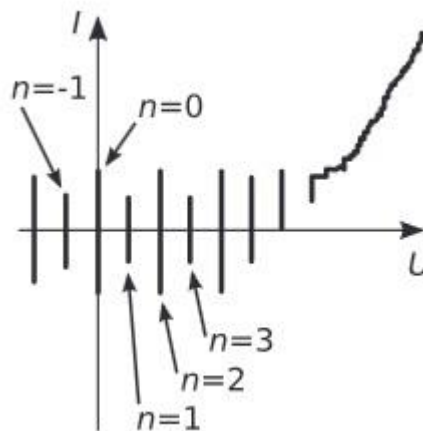
$$V_n = \frac{n \cdot f}{K_J} \quad (2.1)$$

V_n napětí vznikající na Josephsonově přechodu
 n kvantový stav Josephsonova přechodu
 f frekvence působícího elektromagnetického pole
 K_J Josephsonova konstanta

$$K_J = \frac{2 \cdot e}{h} \quad (2.2)$$

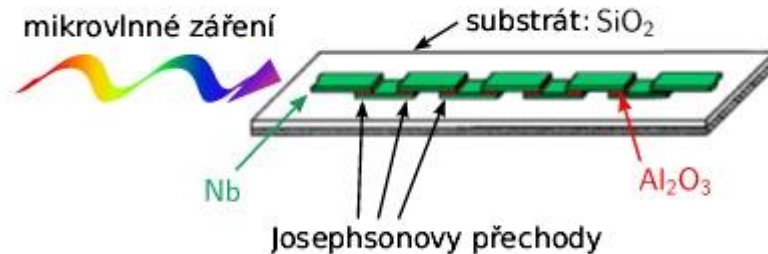
e elementární náboj, $e = 1,602176265 \cdot 10^{-19}$ C,
 h Planckova konstanta, $h = 6062606957 \cdot 10^{-34}$ Js

Obrázek 1 zobrazuje voltampérovou charakteristiku přechodu pro různé kvantové stavy n . Vždy pro jeden kvantový stav se Josephsonův přechod chová jako ideální zdroj, což však platí pouze v malém rozsahu stejnosměrného proudu (přibližně $\pm 100 \mu\text{A}$). Hodnota proudu je závislá na teplotě Josephsonova čipu. Jakmile je proud překročen, chování Josephsonova přechodu se stává nepředvídatelné. V etalonech stejnosměrného napětí se používají Josephsonovy přechody s vysokou kapacitou. Jejich voltampérová charakteristika protíná přímo bod nulového proudu. Josephsonův jev je stabilní většinou pro kvantové stavy, které nepřesahují hodnotu ± 4 . Velikost napětí na Josephsonově přechodu při 75 GHz dosahuje při kvantovém stavu $n = 1$ hodnoty $155,088 \mu\text{V}$ a při kvantovém stavu $n = 4$ hodnoty $620,350 \mu\text{V}$. [1]



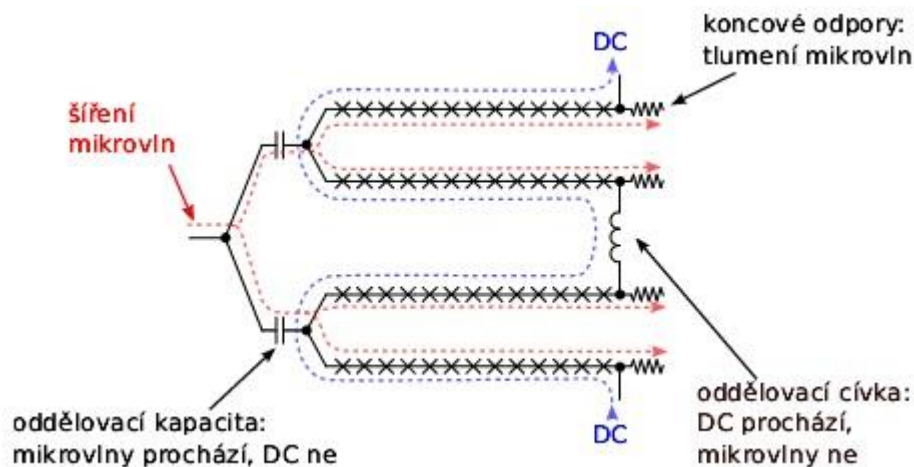
Obrázek 1 Voltampérová charakteristika Josephsonova přechodu pro různé kvantové stavy n [1]

Na jednom Josephsonově přechodu lze získat pouze velmi malá napětí, proto se používá páskový vlnovod, který se skládá z více Josephsonových přechodů zapojených do série, viz. Obrázek 2. [1]



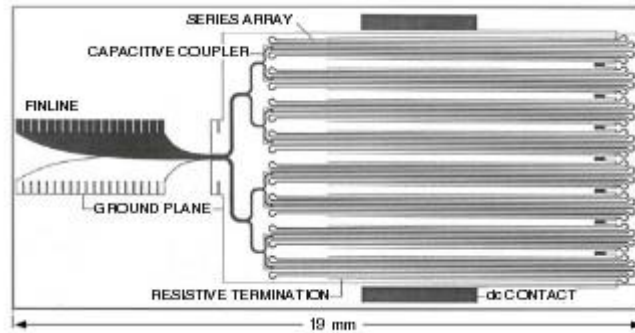
Obrázek 2 Páskový vlnovod - zapojení několika Josephsonových přechodů do série [1]

Kdyby všechny Josephsonovy přechody tvořily jediný vlnovod, byly by tedy zapojeny za sebou, vznikal by na prvním přechodu úbytek mikrovlňného výkonu, který by se velmi lišil od úbytku výkonu na posledním přechodu. Z toho důvodu se Josephsonovy přechody zapojují do tvaru rozvětveného páskového vlnovodu, který zobrazuje Obrázek 3. Mikrovlny jsou pak rozděleny rovnoměrně do více částí. Josephsonovy přechody se zapojují do série pro stejnosměrné napětí, ale pro mikrovlny jsou zapojeny sério-paralelně. Toho je dosaženo oddělením větví vlnovodu pomocí kapacit a cívek. [1]



Obrázek 3 Schéma Josephsonova čipu, kde křížek označuje jeden Josephsonův přechod[1]

Josephsonovy čipy obsahují až desítky tisíc přechodů a nachází se v nich také integrovaný rozvod mikrovlń. Etalon napětí ČMI využívá čip, který je vyroben na křemíkovém substrátu, obsahuje supravodiče z niobu a dielektrikum o tloušťce 3 nm z oxidu hlinitého. Celkem je čip tvořen přibližně dvaceti tisíci Josephsonovými přechody, viz Obrázek 4 (pravá část). Na levé straně čipu se nachází mikrovlńná anténa a rozvod mikrovlń do jednotlivých větví vlnovodu. [1]

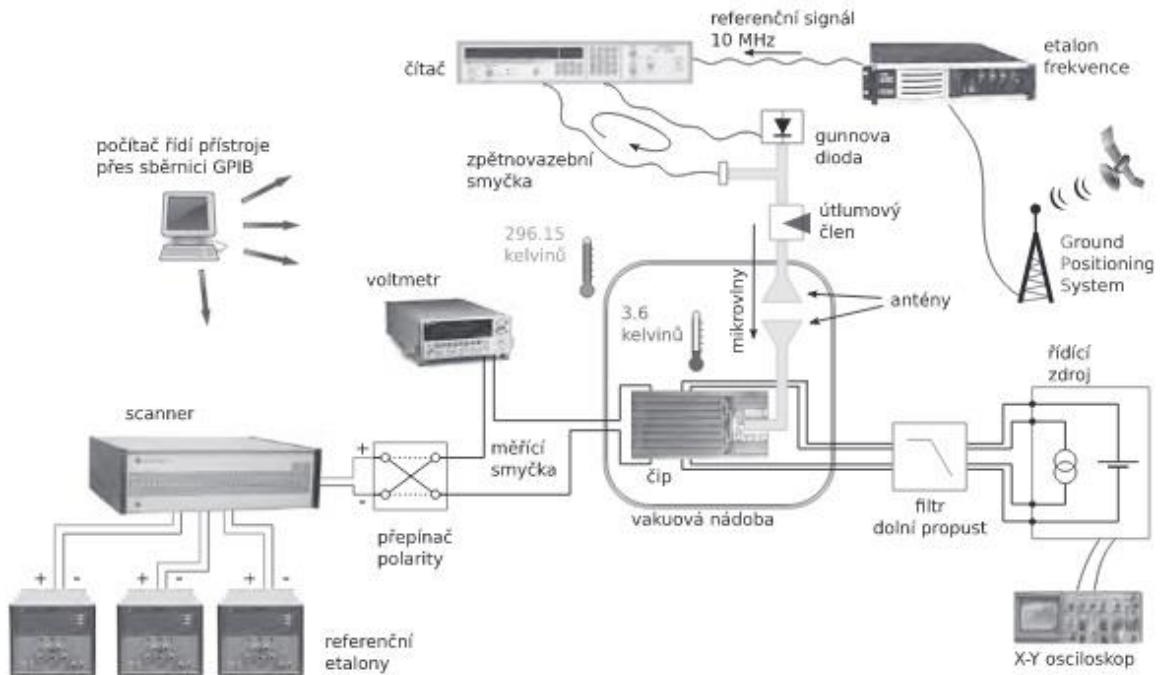


Obrázek 4 Josephsonův čip [2]

Při měření je potřeba nastavit kvantový stav čipu, což se provádí připojením externího zdroje stejnosměrného napětí a proudu. Kvantový stav každého přechodu se přizpůsobí tak, aby napětí čipu bylo stejné jako napětí přivedené zdrojem. Jakmile je externí zdroj odpojen, kvantové stavy zůstanou stabilní po dostatečně dlouhou dobu. Stabilita kvantového stavu závisí na teplotě a to tak, že s nižší teplotou je kvantový stav stabilnější. Dále stabilitu ovlivňuje šum vnějšího prostředí, proto jsou všechny prvky kvantového etalonu stíněny. Etalon ČMI dokáže generovat stálé napětí přibližně po dobu jedné minuty, než změní kvantový stav. Hodnota kvantového stavu se měří voltmetrem. [1]

2.1.2 Popis kvantového etalonu stejnosměrného napětí

Obrázek 5 zobrazuje všechny části kvantového etalonu stejnosměrného napětí. Etalon obsahuje Josephsonův čip, chlazení potřebné k dosažení teploty přibližně 4 K, zdroj mikrovln, čítač frekvence mikrovln s referenčním etalonem frekvence, řídicí zdroj, nanovoltmetr a analogový osciloskop. [1]



Obrázek 5 Schéma kvantového etalonu stejnosměrného napětí ČMI [1]

Pro vznik supravodivosti je potřeba velmi nízká teplota pod 5 K, k čemuž se používá kapalné helium nebo různá chladičí zařízení. Etalon ČMI k chlazení využívá pulsně-akustický jev, který spočívá v přivádění tlakových (akustických) vln do trubice s plynným heliem. Přivedením vln se ohřeje jeden konec trubice a druhý konec se naopak ochladí. Systém se skládá z chladičí trubice, vakuové nádoby a malého ventilu pro vytváření akustických vln, který se nachází v dostatečné vzdálenosti od měřicích vodičů. Výhodou tohoto systému chlazení je, že způsobuje pouze velmi malé mechanické otřesy a produkuje minimální elektromagnetický šum. Kvůli omezení toku tepla z vnějšího prostředí, se Josephsonův čip nalézá ve vakuové nádobě a před magnetickým rušením je chráněn mu-metalovou folií. Mu-metal je materiál s vysokou permeabilitou. K ovládacímu řídicímu zdroji a měřenému přístroji je čip připojen šesti vodiči. Délka a průřez vodičů se volí jako kompromis mezi celkovým elektrickým odporem vodičů a výsledným tepelným tokem na čip. [1]

Mikrovlny se k čipu přivádí pomocí vlnovodu. Aby se omezil tepelný tok vedením, je vlnovod ve vakuové nádobě rozdělen dvěma trychtýřovými anténami. Pro generování mikrovln slouží Gunnova dioda. Pro měření a řízení mikrovln se využívá čítač, který je navázán na státní etalon času pomocí globálního polohovacího systému. [1]

K nastavení kvantového stavu čipu se používá napěťový a proudový zdroj, který je řízený počítačem. Kvantový stav lze určit pomocí nanovoltmetru, který splňuje podmínku, že má lepší rozlišení než napěťový rozdíl dvou sousedních kvantových stavů. Po určení kvantového stavu lze vypočítat pravou hodnotu kvantového etalonu, viz vzorec (2.1). Poté je možné zpětně vypočítat chybu nanovoltmetru. Analogový osciloskop a řídicí zdroj slouží k ověření správnosti voltampérové charakteristiky čipu. [1]



Obrázek 6 Státní etalon stejnosměrného napětí na ČMI [1]

2.1.3 Popis kalibrace pomocí kvantového etalonu

Kvantový etalon se používá především ke kalibraci pomocných zdrojů stejnosměrného napětí, většinou Zenerových referencí, které využívají polovodičovou Zenerovu diodu zapojenou v závěrném směru. Dioda se používá ke stabilizaci napětí, které je pro určitý rozsah proudu téměř konstantní. Výhodou Zenerových referencí je jejich velmi malý šum. Pro vyšší stabilitu jsou Zenerovy reference trvale napájeny a zatíženy. [1], [2]

Prvním krokem kalibrace je nastavení kvantového stavu etalonu. Kvantový stav musí odpovídat napětí, které je co nejbližší k měřenému napětí Zenerovy reference. Pak se Zenerova reference připojí paralelně k Josephsonově čipu. Mezi kladné svorky testované Zenerovy reference a Josephsonova čipu se umístí nanovoltmetr, kterým se změří rozdílové napětí. Zároveň se však v obvodu nachází ofsetové napětí způsobené hlavně Seebackovým jevem. Tento jev má za následek vznik termoelektrického napětí v obvodu složeném ze dvou materiálově různých vodičů, jejichž spoje jsou na rozdílných teplotách. Zde se jedná o vodiče, jež prochází teplotním gradientem od Josephsonova čipu, kde je teplota 4 K, k Zenerově referenci o teplotě 296 K odpovídající 23 °C. Spoj měď-zlato má hodnotu Seebackova koeficientu rovnu 0,3 μV , takže přibližná velikost vznikajícího termoelektrického napětí je 90 μV . [1]

K odstranění vlivu offsetového napětí slouží další měření, při kterém je výstupní napětí etalonu záporné. U Zenerovy reference se polarita otočí prohozením svorek. Nanovoltmetrem se odečte rozdílové napětí. Nyní je možné vypočítat velikost offsetového napětí, protože jeho polarita je pořád stejná. Offsetové napětí se ale také mění v čase, proto je nutné změřit více odečtů vždy pro obě polarity. [1]

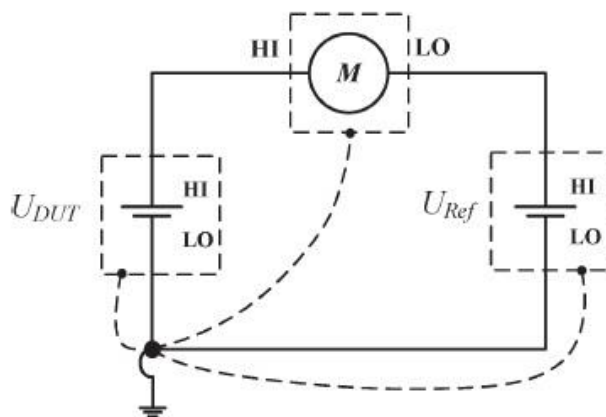
Jeden odečet hodnoty Zenerovy reference zabere asi pět minut. Celková kalibrace však někdy trvá i několik hodin z důvodu korekce dalších zdrojů nejistot na svorkách Zenerovy reference. Kvantový etalon ČMI dokáže generovat napětí od -10 V do 10 V s krokem 155 μV a nejistotou 11 nV. Nejistoty kvantového etalonu jsou velmi nízké, proto je výsledná nejistota kalibrace dána hlavně nejistotou typu A Zenerovy reference. V laboratořích ČMI při kalibraci Zenerových referencí na úrovni 10 V dosahují nejistoty 60 nV/V s pravděpodobností pokrytí 95,45%. [1]

2.2 Referenční kroková metoda

Referenční kroková metoda (Reference step method) pro měření stejnosměrných napětí byla vypracována L. A. Christianem na Novém Zélandu. Tato metoda vyhodnocuje zisky jednotlivých rozsahů testovaného kalibrátoru. Hlavní výhodou metody je, že využívá běžně dostupné přístroje, dva kalibrátory a digitální multimetr. Základním předpokladem je výborná linearita digitálního multimetru. [4]

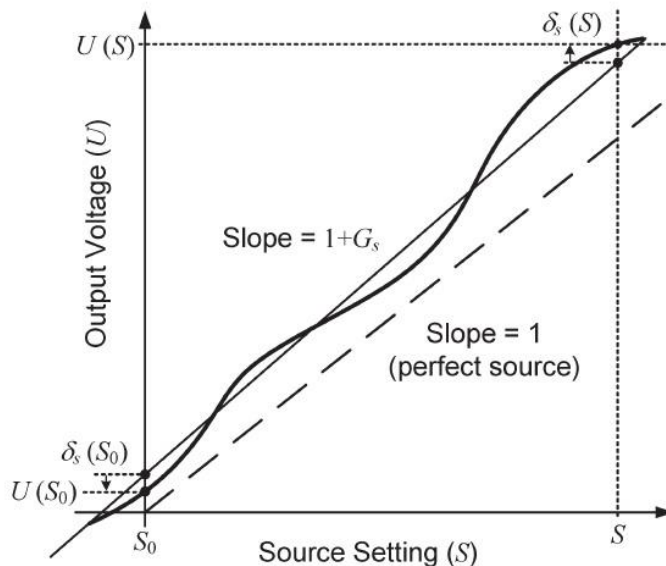
Princip metody spočívá ve změření poměru zisků různých rozsahů testovaného přístroje. Schéma zapojení pro měření referenční krokovou metodou zobrazuje Obrázek 7. Jeden kalibrátor slouží jako pomocný zdroj napětí a druhý kalibrátor je testovaným přístrojem. Poměr zisků je změřen voltmetrem, přičemž pomocný zdroj je potřebný pouze k dočasnému generování referenčního napětí. Předpokladem metody je vysoká linearita voltmetru a dostatečná časová stabilita referenčního kalibrátoru. Absolutní hodnoty voltmetru a referenčního kalibrátoru nemusí být známy. Pro získání absolutních hodnot testovaného kalibrátoru je třeba následně zkalibrovat zisk jednoho rozsahu pomocí jiné metody. Poté je možné pomocí poměrů zisků rozsahů vypočítat absolutní hodnoty napětí na ostatních rozsazích.

Celý měřicí systém je uzemněný u testovaného přístroje, což je volba provedená na základě mnoha různých experimentálních zapojení. Do stejného místa vede i pomocné stínění (svorka guard) voltmetru a referenčního kalibrátoru. Důvodem zapojení je zabránění vzniku nežádoucích zemních smyček. [4]



Obrázek 7 Schéma zapojení pro měření referenční krokovou metodou [5]

Každý zdroj je na daném rozsahu charakterizován určitým ziskem. V ideálním případě by zisk zdroje měl mít hodnotu rovnu jedné. V reálné praxi je však zisk vyjádřen vztahem $1 + G_S$, kde G_S je korekce zisku zdroje, viz Obrázek 8. [5]



Obrázek 8 Závislost výstupního napětí zdroje na jeho nastavení [5]

Zisk je definován vztahem mezi výstupním napětím U a nastavením zdroje S (S_0 se většinou rovná nule), viz Obrázek 8, podle rovnice (2.3). [5]

$$U(S) - U(S_0) = (1 + G_S)(S - S_0) + \delta_S(S) - \delta_S(S_0) \quad (2.3)$$

- U výstupní napětí zdroje
- G_S korekce zisku zdroje
- S napětí nastavené na zdroji
- δ_S odchylka od lineární přímky

Příklad průběhu měření pro rozsah 10 V ověřovaného kalibrátoru zobrazuje Tabulka 1. Na referenčním zdroji se nastavuje napětí pouze dvou hodnot 0 V a 1 V. Nejdříve se nastaví rozsah testovaného přístroje 1 V a postupně se změní rozdíly M_0^* a M_1^* . Poté se kalibrátor přepne na rozsah 10 V a měří se vždy dvojice hodnot mezi stejnými rozdíly nastavených napětí, například rozdíl mezi 1 V kalibrátoru a 0 V referenčního zdroje, čímž se získá M_2 a druhý rozdíl mezi 2 V kalibrátoru a 1 V zdroje, tedy M_3 . Obdobným způsobem měření probíhá až do 10 V, Tabulka 1 slouží pouze jako příklad a není proto kompletní.

Tabulka 1 Příklad průběhu měření referenční krokové metody pro rozsah 10 V

rozsah testovaného kalibrátoru	testovaný kalibrátor [V]	referenční zdroj [V]	rozdíl naměřený nanovoltmetrem
rozsah 1 V	0	0	M_0^*
	1	1	M_1^*
rozsah 10 V	0	0	M_0
	1	1	M_1
	1	0	M_2
	2	1	M_3
	2	0	M_4
	3	1	M_5
	3	0	M_6
	4	1	M_7

Získané dvojice rozdílů navzájem odečteme a sumujeme je přes celý rozsah kalibrátoru, čímž získáme poměr zisků rozsahů $K_{10R/R}$ daný vzorcem (2.4) a (2.5). [5]

$$\frac{1 + G_{DUT,10R}}{1 + G_{DUT,R}} = 1 + K_{10R/R} \approx \frac{1 + \frac{1}{10} \sum_{j=1}^{10} (M_{2j-1} - M_{2j-2})}{1 + (M_1^* - M_0^*)} \quad (2.4)$$

$G_{DUT,10R}$ zisk rozsahu 10R kalibrátoru
 $G_{DUT,R}$ zisk rozsahu R kalibrátoru
 $K_{10R/R}$ poměr zisků rozsahů 10R a R

$$K_{10R/R} = \frac{G_{DUT,10R} + 1}{G_{DUT,R} + 1} - 1 \quad (2.5)$$

$G_{DUT,10R}$ zisk rozsahu 10R kalibrátoru
 $G_{DUT,R}$ zisk rozsahu R kalibrátoru
 $K_{10R/R}$ poměr zisků rozsahů 10R a R

Na závěr se získá zisk rozsahu 10R kalibrátoru tak, že se hodnota kalibrátoru porovná se Zenerovou referencí. Poté už lze dopočítat jednotlivé zisky ostatních rozsahů. [5]

Celý proces je automatizovaný a ovládaný přes aplikaci v programu LabVIEW. Při měření je důležité nechat nějakou dobu ustálit napětí, než proběhne jeho odečet nanovoltmetrem. Program nastavuje hodnotu tohoto zpoždění na 10 s, ale na vyšších rozsazích se zpoždění zvyšuje. Na rozsahu 100 V se zpoždění zvýší na 15 s a na rozsahu 1000 V naroste zpoždění až na 40 s. [5]

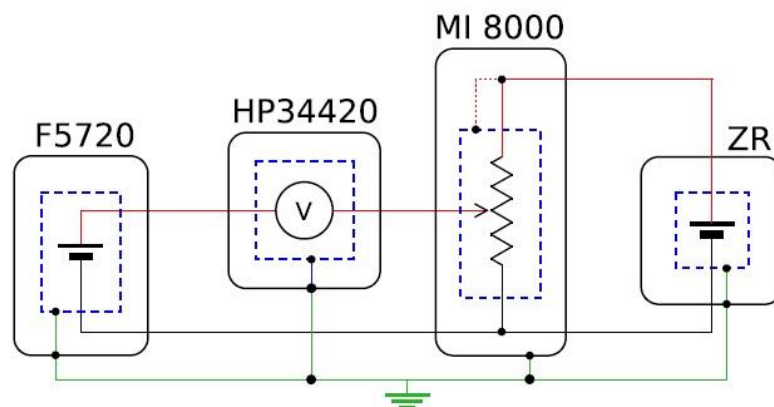
Celé měření se skládá nejdříve ze sekvence odměrů vzrůstajícího napětí až do konce rozsahu a poté následuje sekvence odměrů stejných hodnot klesajícího napětí až k nule. Tímto způsobem se celé měření opakuje pětkrát, aby bylo získáno deset hodnot korekce zisku. Pokud se měří 4 rozsahy kalibrátoru, celé měření trvá přibližně 15 hodin, což je poměrně časově náročné. [5]

2.3 Potenciometrická metoda měření stejnosměrných napětí

Poslední metoda používaná pro měření velmi malých stejnosměrných napětí je založena na použití binárního napěťového děliče. Obvykle se používá automatizovaný model 8000A od firmy Measurements International. Metoda umožňuje plně automatizované měření kladných i záporných napětí v rozsahu od 1 mV do 1200 V. [6]

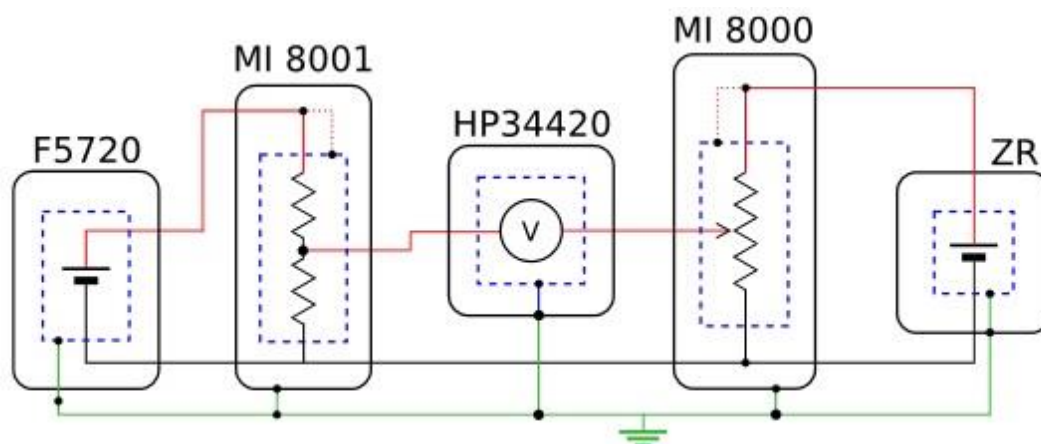
2.3.1 Popis metody

Obvod pro měření s potenciometrem MI 8000A se dále skládá z testovaného kalibrátoru, referenčního zdroje (Zenerova reference) a nanovoltmetru, viz Obrázek 9. Nanovoltmetr měří rozdíl absolutní hodnoty testovaného kalibrátoru a dělené hodnoty Zenerovy reference. Hlavní výhodou metody je, že nanovoltmetrem neteče téměř žádný proud díky jeho velké vstupní impedanci. Potenciometr MI 8000A umožňuje autokalibraci pomocí připojení dvou známých stabilních napětí. Popisované zapojení lze použít pro měření do 10 V z důvodu hodnoty Zenerovy reference. [5]



Obrázek 9 Schéma zapojení pro potenciometrickou metodu při měření napětí do 10V [4]

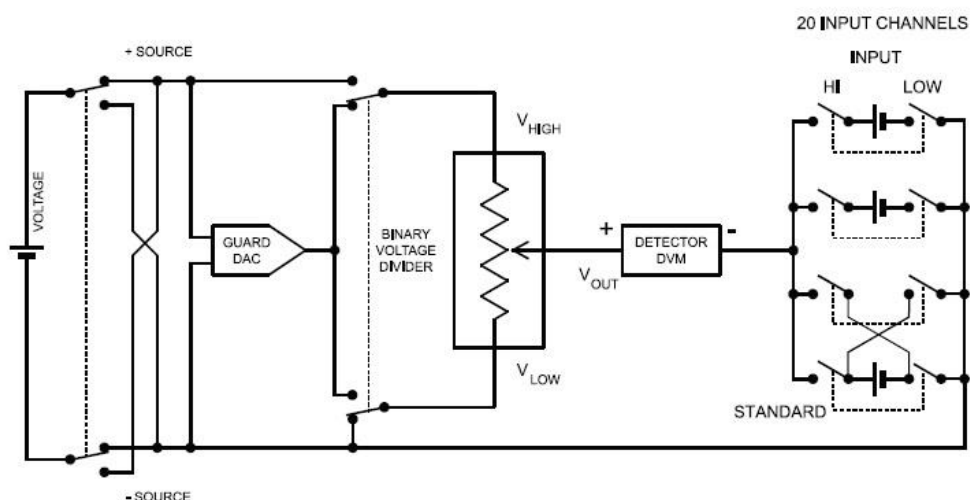
Ke zvýšení rozsahu měření až do ± 1200 V se do obvodu přidá pomocný dělič MI8001A, který dělí napětí testovaného přístroje na hodnotu menší než 10 V, viz Obrázek 10. MI 8001A umožňuje nastavení pěti rozsahů – 1200 V, 300 V, 120 V, 30 V a 10 V. Protože jsou rozsahy pevně dané, ke zvýšení rozlišení je použit potenciometr MI 8000A, který je nastaven tak, aby rozdíl napětí měřený nanovoltmetrem byl co nejnižší. Když známe oba dělicí poměry a hodnotu Zenerovy reference, lze vyhodnotit absolutní napětí testovaného kalibrátoru. [5]



Obrázek 10 Schéma zapojení pro potenciometrickou metodu při měření napětí nad 10V [4]

Potenciometr MI8000A a pomocný dělič MI8001A tvoří část kompletního automatizovaného měřicího systému. Celé měření je řízeno softwarem, který ovládá přepínání obou děličů a odečítá hodnoty z nanovoltmetru. [6]

Protože se zvyšoval požadavek na vysokou přesnost kalibrací stejnosměrných napěťových rozsahů kalibrátorů, rostla poptávka po plně automatizovaném měření napětí obou polarit s využitím dostupných přístrojů. Z těchto důvodů byla potenciometrická metoda vylepšena, aby se dala použít nejen pro měření kladných napětí, ale také záporných napětí v rozsahu od 1 mV do 1200 V. Potenciometr MI8000A obsahuje relé, která umožňují změnu polarity zdroje napětí, které je dělené binárním napěťovým děličem. Tato úprava představuje nejjednodušší způsob měření obou polarit napětí. Schéma zapojení binárního potenciometrického děliče umožňujícího bipolární měření zobrazuje Obrázek 11. [6]



Obrázek 11 Schéma zapojení binárního napěťového děliče pro bipolární měření [6]

2.3.2 Výpočet výsledného napětí a nejistoty

Potenciometrická metoda je založena na získání série nepřímých měření, které se všechny podílejí na výsledné nejistotě. Samotné měření probíhá tak, že se na začátku nastaví poměr děliče P_i . Poté se odečte rozdíl V_d mezi měřeným napětím a děleným napětím referenčního zdroje. Když je vypnut dělič, lze změřit offsetové napětí nanovoltmetru V_0 . Zjednodušený výpočet výsledného napětí V ukazují rovnice (2.6). [6]

$$V = \overline{V_{gnd}} + \frac{\sum_i P_i \cdot V_{std} - V_{resi}}{N} \quad (2.6)$$

- V_{gnd} offsetové napětí děliče
- V_{std} napětí referenčního zdroje
- P_i poměr děliče
- N počet měření
- V výsledné napětí

V_{res} je rozdíl mezi měřeným napětím V_d a offsetovým napětím nanovoltmetru V_0 , viz rovnice (2.7).

$$V_{res} = V_d - V_0 \quad (2.7)$$

- V_d napětí měřené nanovoltmetrem
- V_0 offsetové napětí nanovoltmetru

Celá rovnice bez zjednodušení obsahuje velké množství proměnných, kolem sto třiceti. Velké množství proměnných je zapříčiněno použitím Čutkovského metody kalibrace. Proto se výsledky napětí a nejistot určují softwarem. Výpočet nejistoty probíhá dle vzorce (2.8). Dalším způsobem, jak určit výslednou nejistotu, je použití metody Monte Carlo. [6]

$$u^2(V) = u^2(\overline{V_{gnd}}) + \left(\frac{\sum_i P_i}{N}\right)^2 u^2(V_{std}) + \left(\frac{V_{std}}{N}\right)^2 \sum_i (u^2(P_i)) + \left(\frac{1}{N}\right)^2 \sum_i (u^2(V_{resi})) \quad (2.8)$$

V_{gnd}	offsetové napětí děliče
V_{std}	napětí referenčního zdroje
P_i	poměr děliče
N	počet měření
V_{resi}	rozdíl mezi měřeným napětím a offsetovým napětím nanovoltmetru

Ke každé nejistotě je určen efektivní stupeň volnosti. Protože je měřeno pouze několik hodnot N , místo Gaussova rozdělení pravděpodobnosti je použito užší Studentovo rozdělení. Z tohoto rozdělení lze určit koeficient krytí s $\nu = N-1$ stupni volnosti. Počet stupňů volnosti a úroveň konfidence určuje hodnotu tabelovaného součinitele t_p , který je použit k výpočtu rozšířené nejistoty podle vztahu (2.9). [7]

$$U = k \cdot u_c = t_p(\nu) \cdot u_c \quad (2.9)$$

k	koeficient pokrytí
u_c	standardní kombinovaná nejistota
$t_p(\nu)$	koeficient Studentova rozdělení
ν	počet stupňů volnosti

Pokud nejistotu tvoří pouze jedna složka nejistoty typu A, je počet stupňů volnosti $\nu = N-1$. V případě nejistoty tvořené více složkami lze stupně volnosti získat z Welch-Satterthwaitova vztahu (2.10). [8]

$$v_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{v_i}} \quad (2.10)$$

u_c	kombinovaná nejistota
u_i	všechny dílčí nejistoty podílející se na kombinované nejistotě u_c
v_i	stupně volnosti příslušející jednotlivým složkám u_i

Efektivní stupeň volnosti při měření napětí potenciometrickou metodou se vypočítá ze vztahu (2.11). [6]

$$v_{eff}(V) = u_c^4 \left[\frac{u^4(\overline{V_{gnd}})}{v_{eff}(\overline{V_{gnd}})} + \left(\frac{\sum_i P_i}{N}\right)^4 \frac{u^4(V_{std})}{v_{eff}(V_{std})} + \left(\frac{V_{std}}{N}\right)^4 \sum_i \frac{u^4(P_i)}{v_{eff}(P_i)} + \left(\frac{1}{N}\right)^4 \left(\sum_i \frac{u^4(V_{resi})}{v_{eff}(V_{resi})}\right) \right]^{-1} \quad (2.11)$$

V_{gnd} offsetové napětí děliče

V_{std} napětí referenčního zdroje

P_i poměr děliče

N počet měření

V_{resi} rozdíl mezi měřeným napětím a offsetovým napětím nanovoltmetru

3 VYHODNOCENÍ POROVNÁNÍ METOD

První částí porovnání metod pro měření malých stejnosměrných napětí bude grafické porovnání metod. Vytvoří se grafy odchylek absolutních hodnot napětí od nominálního napětí včetně rozšířených nejistot v závislosti na čase. Grafy budou zobrazovat odchylky měření všech metod, aby je bylo možné vzájemně porovnat.

Další způsob porovnání metod proběhne stejně jako při vyhodnocení klíčových porovnání. Pojmeme klíčové porovnání se rozumí mezinárodní porovnávací zkouška. Jejím cílem je vzájemné uznávání státních etalonů. Mezi jednotlivými zúčastněnými instituty koluje cestovní etalon. Na konci porovnání se cestovní etalon vrátí k první laboratoři, kde proběhne znovu měření a určí se drift cestovního etalonu.

Roku 1999 Mezinárodní výbor pro váhy a míry (CIPM) stanovil Dohodu o vzájemném uznávání (Mutual Recognition Arrangement - MRA). Součástí dohody jsou také dva postupy používané při klíčovém porovnání. Jedná se o proceduru A a proceduru B. Jejich cílem je stanovení stupně ekvivalence etalonů. Stupeň ekvivalence je stupeň, ve kterém se hodnoty etalonů shodují s referenčními hodnotami klíčového porovnání. Tyto referenční hodnoty lze většinou považovat za blízké přiblížení k hodnotě SI, kdy se ale nemusí jednat o nutně nejlepší přiblížení. Stupeň ekvivalence lze vyjádřit jako odchylku od referenční hodnoty klíčového porovnání a nejistotu této odchylky. [9]

Procedura A je založena na výpočtu váženého průměru, který je považován za referenční hodnotu klíčového porovnání. Procedura B využívá metodu Monte Carlo. Při porovnání metod pro měření stejnosměrných napětí bude použita procedura A, která je podrobněji popsána v následující kapitole.

3.1 Procedura A

Celá kapitola vychází z literatury [10]. Porovnání se zúčastní N národních institutů, které jsou označeny čísly $i = 1, 2, \dots, N$. Vstupní veličiny porovnání se označí jako x_i a jejich standardní kombinovaná nejistota $u(x_i)$. Postup výpočtu je shrnut do několika následujících bodů.

1. Stanovení váženého průměru y z hodnot x_i naměřených jednotlivými instituty podle vztahu (3.1). Vážený průměr je nejvíce ovlivněn výsledkem měření s nejmenší nejistotou, proto se naměřené hodnoty podělí jejich nejistotou $u(x_i)$ v druhé mocnině.

$$y = \frac{\frac{x_1}{u^2(x_1)} + \frac{x_2}{u^2(x_2)} + \dots + \frac{x_N}{u^2(x_N)}}{\frac{1}{u^2(x_1)} + \frac{1}{u^2(x_2)} + \dots + \frac{1}{u^2(x_N)}} \quad (3.1)$$

x_i naměřené hodnoty jednotlivých institutů i
 $u(x_i)$ standardní nejistoty naměřených hodnot jednotlivých institutů i
 y vážený průměr

2. Stanovení rozptylu $u(y)$ z rovnice (3.2).

$$\frac{1}{u^2(y)} = \frac{1}{u^2(x_1)} + \frac{1}{u^2(x_2)} + \dots + \frac{1}{u^2(x_N)} \quad (3.2)$$

$u(x_i)$ standardní nejistoty naměřených hodnot jednotlivých institutů i

3. Provedení chí kvadrát testu označovaného také jako test dobré shody, který umožňuje ověřit, zda má náhodná veličina určité předem dané rozdělení pravděpodobnosti. Pokud byl test dobré shody úspěšný, tak za referenční hodnotu klíčového porovnání x_{ref} se zvolí vážený průměr y a standardní nejistotou $u(x_{ref})$ je $u(y)$. Následuje výpočet stupně ekvivalence daného odchylkou d_i naměřené hodnoty od referenční hodnoty porovnání a rozšířenou nejistotou $U(d_i)$, výsledkem je tedy dvojice $(d_i, U(d_i))$ vypočtená ze vztahu (3.6) a (3.7).

$$d_i = x_i - x_{ref} \quad (3.6)$$

x_i naměřené hodnoty jednotlivých institutů i
 x_{ref} referenční hodnota klíčového porovnání
 d_i odchylka hodnoty naměřené i -tým institutem a referenční hodnoty klíčového porovnání

$$U(d_i) = 2u(d_i) \quad (3.7)$$

$u(d_i)$ standardní nejistota odchylky naměřené hodnoty a referenční hodnoty porovnání

Standardní nejistota $u(d_i)$ je dána vztahem (3.8).

$$u^2(d_i) = u^2(x_i) - u^2(x_{ref}) \quad (3.8)$$

$u(x_i)$ standardní nejistoty naměřených hodnot jednotlivých institutů i
 $u(x_{ref})$ standardní nejistota referenční hodnoty klíčového porovnání

4. Test dobré shody byl neúspěšný. Měření některých institutů se mohou hodně lišit od ostatních měření a tím negativně ovlivňují vážený průměr. Pro stupeň ekvivalence odlišných měření platí podmínka daná rovnicí (3.12).

$$|d_i| > 2u(d_i) \quad (3.12)$$

- d_i odchylna hodnoty naměřené i -tým institutem a referenční hodnoty klíčového porovnání
 $u(d_i)$ standardní nejistota odchylny naměřené hodnoty a referenční hodnoty porovnání

Nevyhovující měření, která splňují podmínku z rovnice (3.12), se z klíčového porovnání vyloučí a proběhne znovu postup celé procedury A.

3.2 Nejistoty měření

Kapitola poskytuje stručný přehled nejistot měření. Pojem nejistota označuje parametr udávaný s výsledkem měření a charakterizující rozsah hodnot, které je možné racionálně přiřadit k měřené veličině. Existují dva typy nejistot – standardní nejistota typu A a standardní nejistota typu B. [11]

Určení standardní nejistoty typu A vychází ze statistického zpracování naměřených dat. Jedná se o data získaná opakovanými měřeními. Jednotlivá měření jsou provedena za stejných podmínek a jsou nezávislá. Z naměřených hodnot x_i se určí výběrový průměr \bar{x} podle vztahu (3.13). [12]

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.13)$$

- n počet měření
 x_i jednotlivé naměřené hodnoty
 \bar{x} výběrový průměr

Standardní nejistota typu A $u_A(x)$ se rovná výběrové směrodatné odchylce výběrového průměru a určí se ze vztahu (3.14). Vztah lze použít v případě, že je provedeno alespoň deset měření. [12]

$$u_A(x) = s_{\bar{x}} = \frac{s_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3.14)$$

- $s_{\bar{x}}$ výběrová směrodatná odchylka výběrového průměru
 n počet měření
 x_i jednotlivé naměřené hodnoty
 \bar{x} výběrový průměr
 $u_A(x)$ standardní nejistota typu A

Standardní nejistota typu B je vyhodnocována jinak než statistickým zpracováním naměřených dat. K jejímu určení slouží například údaje dané výrobcem měřicího přístroje, zkušenosti z předchozích měření nebo údaje získané kalibrací přístrojů. Standardní nejistotu typu B tvoří dílčí nejistoty zdrojů $u_B(z_j)$. Nejistota $u_B(z_j)$ se vypočítá z maximální odchylky j -tého zdroje nejistoty z_{jmax} z rovnice (3.15). [11], [12]

$$u_B(z_j) = \frac{z_{jmax}}{k} \quad (3.15)$$

- z_{jmax} maximální odchylka j -tého zdroje nejistoty
 k hodnota příslušící zvolenému typu rozdělení pravděpodobnosti, pro rovnoměrné rozdělení $k = \sqrt{3}$
 $u_B(z_j)$ standardní nejistota typu B j -tého zdroje

Výsledná standardní nejistota typu B u_B je definována vztahem (3.16), kde p určuje počet zdrojů. [11]

$$u_B = \sqrt{\sum_{j=1}^p A_j^2 u_B^2(z_j)} \quad (3.16)$$

- u_{Bzj} standardní nejistota typu B j -tého zdroje
 p počet zdrojů
 A_j součinitel citlivosti j -tého zdroje
 u_{By} standardní nejistota typu B

Po určení standardní nejistoty typu A a typu B lze obě nejistoty společně vyjádřit pomocí standardní kombinované nejistoty u_c , která se vypočítá ze vztahu (3.17). [12]

$$u_c = \sqrt{u_A^2(x) + u_B^2(x)} \quad (3.17)$$

$u_A(x)$ standardní nejistota typu A
 $u_B(x)$ standardní nejistota typu B
 u_c standardní kombinovaná nejistota

Pro normální rozdělení představuje stanovená standardní nejistota interval určený s pravděpodobností přibližně 68 %. Většinou je potřeba stanovit interval pokrytí, který se blíží ke 100 %. Toho lze dosáhnout zavedením rozšířené nejistoty, kterou definuje vztah (3.18). Koeficient rozšíření $k_r = 2$ pro rozšíření na 95% pravděpodobnost, $k_r = 3$ pro rozšíření na 99,7% pravděpodobnost. [11]

$$U = k_r u_c \quad (3.18)$$

U rozšířená nejistota
 k_r koeficient rozšíření
 u_c standardní kombinovaná nejistota

Při určování nejistoty odhadu měřené veličiny, která je funkcí dalších veličin, jejichž odhady i nejistoty jsou známy, se použije zákon šíření nejistot. Výstupní veličina Y je funkcí veličin $X_1, X_2, \dots, X_q, \dots, X_m$, viz (3.19). Funkce f musí být známou funkcí. [12]

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_q, \dots, X_m) \quad (3.19)$$

Y výstupní veličina
 $X_1, X_2, \dots, X_q, \dots, X_m$ vstupní veličiny
 m počet vstupních veličin

Odhad y výstupní veličiny Y se určí ze vztahu (3.20). [12]

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_q, \dots, x_m) \quad (3.20)$$

y odhad výstupní veličiny Y
 $x_1, x_2, \dots, x_q, \dots, x_m$ odhady vstupních veličin $X_1, X_2, \dots, X_q, \dots, X_m$

Pokud jsou odhady vstupních veličin nekorelované, nejistota odhadu y veličiny Y je definována podle vztahu (3.21). [12]

$$u^2(y) = \sum_{q=1}^m A_q^2 u_q^2(x) \quad (3.21)$$

A_q koeficienty citlivosti
 $u_q(x)$ standardní nejistota odhadu vstupních veličin
 $u(y)$ nejistota odhadu y veličiny Y

Koeficienty citlivosti A_q se určí podle vztahu (3.22). [12]

$$A_q = \left. \frac{\partial f(X_1, \dots, X_m)}{\partial X_q} \right|_{X_1=x_1, \dots, X_m=x_m} \quad (3.22)$$

A_q koeficienty citlivosti
 $X_1, X_2, \dots, X_q, \dots, X_m$ vstupní veličiny
 $x_1, x_2, \dots, x_q, \dots, x_m$ odhady vstupních veličin $X_1, X_2, \dots, X_q, \dots, X_m$

Pro stanovení nejistot měření lze využít metodu Monte Carlo, která se poslední dobou používá stále častěji. Výhodou metody je snadné stanovení nejistot nepřímých měření, protože není nutné počítat citlivostní koeficienty ani stupně volnosti. K dalším výhodám metody patří možnost výpočtu s komplikovanými rozloženími vstupních veličin nebo výpočet s komplexními čísly. [13]

Prvním krokem při určování nejistoty pomocí metody Monte Carlo je vytvoření matematického modelu měření. Následně se generuje pro všechny vstupní veličiny náhodná hodnota podle příslušného rozložení. Jednotlivé vygenerované hodnoty vstupních veličin se dosadí do modelu měřeného děje. Celý postup generování vstupů a simulace proběhne N -krát. Zvolený počet iterací má být alespoň $N = 10^6$. Výstupem simulace je N hodnot výstupní veličiny. Nejistota se určí jako výběrová směrodatná odchylka, za předpokladu, že je rozložení výstupní veličiny normální. [13], [14]

4 MĚŘENÍ MALÝCH STEJNOSMĚRNÝCH NAPĚTÍ

Praktická realizace měření malých stejnosměrných napětí všemi třemi popsány metodami proběhla na externím pracovišti ČMI v Brně. Pro porovnání metod by bylo ideální, aby proběhlo několik opakovaných měření všemi třemi metodami. Tak lze získat přesnější hodnotu váženého průměru, která představuje referenční hodnotu porovnání metod. Časový průběh měření jednotlivými metodami zobrazuje Tabulka 2. Druhé měření potenciometrickou metodou nebylo kompletní, byla změřena přibližně třetina hodnot. Důvodem byla organizace práce na ČMI a dostupnost přístrojů, které byly kromě měření porovnání metod využívány pro kalibrace zákaznických přístrojů.

Tabulka 2 Časový průběh měření jednotlivými metodami

datum	čas	metoda	čas od začátku měření [h]
4.2.2015	14:30	přímá	0,00
4.2.2015	15:39	RSM	1,09
5.2.2015	13:00	přímá	21,21
5.2.2015	15:19	potenciometrická	24,82
6.2.2015	2:43	potenciometrická	37,22
6.2.2015	14:00	přímá	47,30
6.2.2015	15:48	RSM	49,18
7.2.2015	8:42	RSM	68,12
8.2.2015	1:37	RSM	85,07
9.2.2015	19:26	potenciometrická	124,93

Měření jednotlivými metodami proběhlo v co nejkratším časovém intervalu, aby se co nejméně projevil drift testovaného kalibrátoru Fluke 5720A. Celé měření trvalo šest dní. Celou dobu zůstaly všechny použité přístroje zapnuté. Výjimku tvořil nanovoltmetr Keithley 2182A, který byl průběžně kalibrován pomocí kvantového etalonu stejnosměrného napětí. Ten se nachází v jiné místnosti v jiném patře. Proto musel být nanovoltmetr vždy pro přenos mezi místnostmi vypnut, což může mít vliv na jeho stabilitu. U Zenerovy reference, která se také přenášela mezi místnostmi, tento problém nenastal. Zenerovy reference jsou vybavené vlastní baterií, není tedy nutné je vypínat.

4.1 Výběr kalibrátoru

Kalibrátor obsahuje referenční zesilovač, který zajišťuje stejnosměrnou přesnost a stabilitu. Referenční zesilovač musí projít speciálním procesem výběru, včetně dlouhodobého stárnutí, aby byla zajištěna jeho vysoká spolehlivost a výkon odpovídající specifikacím. [15]

Pro měření byl zvolen kalibrátor Fluke 5720A. Jedná se o přesný přístroj, který se používá ke kalibracím různých elektrických měřicích přístrojů. Kalibrátor Fluke 5720A zachovává vysokou přesnost v širokém rozsahu teplot okolí, proto ho lze použít i pro kalibrace v jiném prostředí než v laboratořích s regulací teploty. Fluke 5720A slouží ke kalibraci AC/DC napětí, AC/DC proudu nebo odporu. Kalibrátor Fluke 5720A je přesný zdroj stejnosměrného napětí do 1100 V, střídavého napětí do 1100 V, AC nebo DC proudu do 2,2 A a odporu od 1 Ω do 100 M Ω . Kalibrátor obsahuje šest rozsahů stejnosměrného napětí: 220 mV; 2,2 V; 11 V; 22 V; 220 V; 1100 V. Pokud byl kalibrátor vypnutý, je nutné ho před začátkem měření nechat alespoň dvě hodiny zahřát. [15]

4.2 Měření přímou metodou

Přímá metoda spočívá v odečtení hodnoty generované kalibrátorem Fluke 5720A pomocí nanovoltmetru Keithley 2182A, viz kapitola 2.1. Nanovoltmetr Keithley 2182A byl zkalibrovaný kvantovým etalonem stejnosměrného napětí. Oba přístroje byly připojené přes sběrnici GPIB do počítače. Pro měření byl použit program z ČMI vytvořený v LabVIEW.

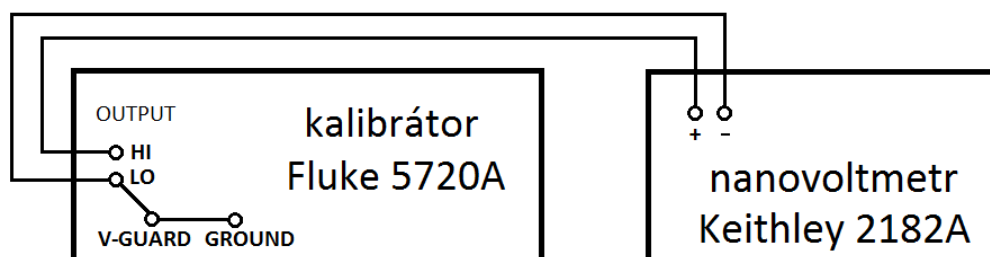
Použité přístroje

- Nanovoltmetr Keithley 2182A, sériové číslo: 0981116
- Kalibrátor Fluke 5720A, sériové číslo: 7365206

Před zahájením měření bylo nutné počkat, než se ustálí teplota nanovoltmetru Keithley 2182A. Teplota nanovoltmetru Keithley 2182A se nesmí lišit o více než 1 °C od jeho kalibrační teploty, aby bylo možné použít přesnější specifikace nanovoltmetru. Pokud se aktuální teplota nanovoltmetru Keithley 2182A lišila o více než 1 °C od jeho kalibrační teploty, provedla se autokalibrace nanovoltmetru. Dalším krokem bylo vynulování offsetového napětí nanovoltmetru Keithley 2182A, které se provede zkratováním kladné a záporné vstupní svorky a poté je nanovoltmetr vynulován.

Schéma zapojení zobrazuje Obrázek 12. Vstupní svorky nanovoltmetru Keithley 2182A jsou ve formě zásuvky LEMO. Nanovoltmetr se připojuje kabelem se čtyřpinovou vidlicí FVN.1S – LEMO, viz Obrázek 13. Výhoda konektoru spočívá ve velmi malých parazitních napětích způsobených teplotními rozdíly, čehož se využívá především při připojení nanovoltmetru ke kvantovému etalonu stejnosměrného napětí.

Další výhodou konektoru je, že přítlačná síla kontaktů je stálá a přechodové odpory jsou malé a stabilní. [16]



Obrázek 12 Schéma zapojení pro měření přímou metodou



Obrázek 13 konektor LEMO FVN1.S a zásuvka nanovoltmetru Keithley 2182A [16]

Jednotlivé měřicí body byly zvoleny podle rozsahu kalibrátoru Fluke 5720A a nanovoltmetru Keithley 2182A:

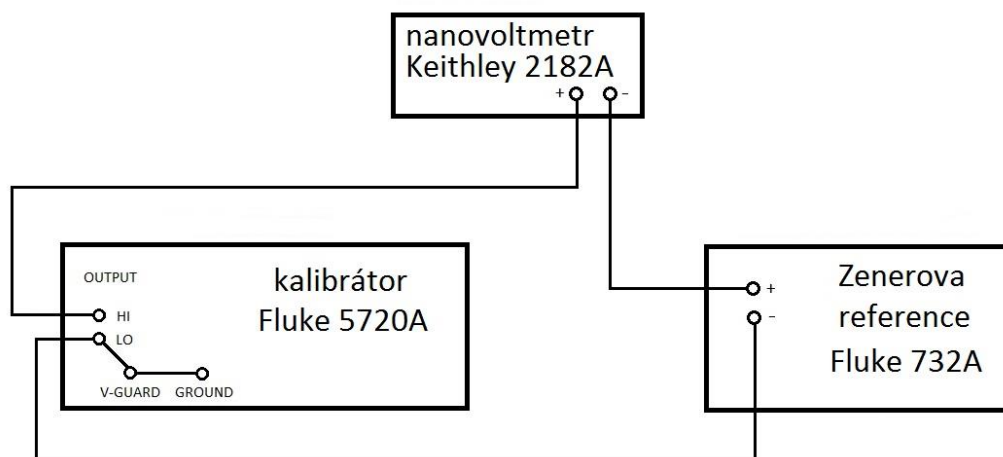
- rozsah kalibrátoru 220 mV, rozsah nanovoltmetru 10 mV
od -10 mV do 10 mV s krokem 1 mV; od -0,9 mV do 0,9 mV po 0,1 mV a 0,05 mV
- rozsah kalibrátoru 2,2 V, rozsah nanovoltmetru 10 mV
od -10 mV do 10 mV s krokem 1 mV
- rozsah kalibrátoru 11 V, rozsah nanovoltmetru 10 V
od -10 V do 10 V s krokem 1 V.

V každém měřicím bodě proběhlo 11 odměrů, přičemž první odměr byl automaticky smazán. Důvodem bylo ustálení měřicího proudu generovaného při odečítání nanovoltmetrem. Když nanovoltmetr neodečítá, mívá jiný vstupní odpor.

V průběhu celého měření proběhla čtyřikrát kalibrace linearity nanovoltmetru Keithley 2182A pomocí kvantového etalonu stejnosměrného napětí. Linearita nanovoltmetru je závislost chyby nanovoltmetru na napětí Josephsonova čipu. Kalibrace nanovoltmetru Keithley 2182A proběhla vždy pro rozsahy 10 mV a 10 V. Celé měření

Jednotlivé měřicí body byly nastaveny podle příkladu v kapitole 2.2, viz Tabulka 1. Nejdříve proběhlo měření pro určení poměru zisků rozsahů 10 V a 1 V a poté poměru zisků rozsahů 1 V a 0,1 V. Následným zpracováním naměřených dat byl určen zisk kalibrátoru Fluke 5720A pro rozsahy 0,1 V; 1 V a 10 V.

Jakmile skončilo automatizované měření, ručně se porovnávala hodnota kalibrátoru Fluke 5720A se Zenerovou referencí Fluke 732A. Z naměřených hodnot se získal zisk kalibrátoru Fluke 5720A na rozsahu 10 V. Schéma zapojení pro porovnání kalibrátoru Fluke 5720A se Zenerovou referencí 732A zobrazuje Obrázek 15. Zenerova reference musela být při měření odpojována od síťového napájení, aby nevznikala zemní smyčka. Zenerova reference Fluke 732A byla tedy napájena z baterie. Teplota nanovoltmetru Keithley 2182A se nechala ustábit a nesměla se lišit o více než 1 °C od jeho kalibrační teploty, jinak bylo nutné provést autokalibraci nanovoltmetru. Dalším krokem bylo vynulování offsetového napětí nanovoltmetru.



Obrázek 15 Schéma zapojení pro porovnání kalibrátoru Fluke 5720A se Zenerovou referencí 732A

Při měření se na kalibrátoru Fluke 5720A nastavila taková hodnota napětí, aby nanovoltmetr Keithley 2182A měřil co nejmenší hodnotu napětí. Chyba nanovoltmetru závisí na velikosti měřeného napětí. Se vzrůstajícím napětím se chyba nanovoltmetru zvyšuje. Proběhlo deset odměrů rozdílového napětí měřeného nanovoltmetrem Keithley 2182A. Poté proběhlo měření znovu s opačnou polaritou Zenerovy reference Fluke 732A, přičemž na kalibrátoru byla nastavena hodnota -10 V. Porovnání kalibrátoru se Zenerovou referencí proběhlo celkem dvakrát. Poprvé hned po skončení prvního měření metodou RSM a druhé porovnání proběhlo před dalšími třemi po sobě jdoucími měřeními referenční krokovou metodou.

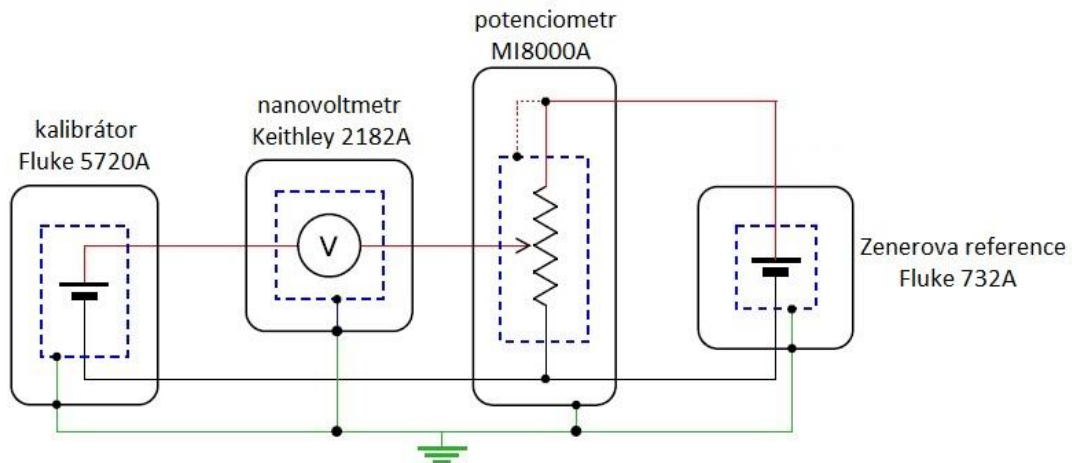
Před každým porovnáním kalibrátoru se Zenerovou referencí proběhla kalibrace Zenerovy reference Fluke 732A pomocí kvantového etalonu napětí. Každá kalibrace proběhla čtyřikrát pro kladnou polaritu a čtyřikrát pro zápornou polaritu Zenerovy reference Fluke 732A. K měření byl použit program NISTVolt, který ovládá kvantový etalon. Pro každé měření program vypočítal rozšířenou nejistotu kalibrace.

4.4 Měření potenciometrickou metodou

Obvod pro měření potenciometrickou metodou se skládal z potenciometru MI 8000A, kalibrátoru Fluke 5720A, Zenerovy reference Fluke 732A a nanovoltmetru Keithley 2182A, viz Obrázek 16. Protože se měřila napětí pouze do 10 V, nebylo nutné použít další pomocný dělič MI8001A sloužící ke zvýšení rozsahu měřeného napětí, viz kapitola 2.3. Měření je poměrně časově náročné, trvalo přibližně deset hodin.

Použité přístroje

- Potenciometr MI8000A, sériové číslo: 1100085
- Nanovoltmetr Keithley 2182A, sériové číslo: 4027014
- Kalibrátor Fluke 5720A, sériové číslo: 7365206
- Zenerova reference Fluke 732A, sériové číslo: 4045003
- Zenerova reference Fluke 732A, sériové číslo: 4825014



Obrázek 16 Schéma zapojení pro měření potenciometrickou metodou [4]

Před samotným měřením proběhla autokalibrace děliče MI8000A, který umožňuje vlastní kalibraci pomocí připojení dvou známých stabilních napětí. Každý dělicí stupeň potenciometru MI8000A má nějaký korekční faktor. Tyto korekční faktory byly kalibrovány pomocí připojení Zenerovy reference Fluke 732A (s. č.: 4045003). Poté se připojila další Zenerova reference Fluke 732A (s. č.: 4825014) a kalibroval se pokles napětí první Zenerovy reference způsobený zatížením.

Potenciometr MI8000A tvořil část kompletního automatizovaného měřicího systému. Celé měření bylo řízeno softwarem, který ovládal přepínání děliče a odečítal jednotlivé hodnoty z nanovoltmetru Keithley 2182A. Měřicí body byly zvoleny stejně jako u přímé metody. Nevýhoda programu spočívala v tom, že nebylo možné nastavovat rozsah kalibrátoru Fluke 5720A. Jeho rozsah byl nastavován automaticky. V programu byly vytvořeny jednotlivé měřicí body, které byly následně vloženy do konečného programu. Výstupem programu byla průměrná hodnota měřeného napětí a rozšířená nejistota měření.

5 ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT

5.1 Kalibrace linearity nanovoltmetru Keithley 2182A

Nanovoltmetr Keithley 2182A byl čtyřikrát zkalibrován na rozsazích 10 mV a 10 V pomocí kvantového etalonu stejnosměrného napětí. Z naměřených dat byl pro každý rozsah určen zisk nanovoltmetru Keithley 2182A, jeho chyba a nelinearita. Pro další zpracování dat byla důležitá hlavně chyba nanovoltmetru Keithley 2182A a jeho nejistota. Zjištěné chyby nanovoltmetru sloužily k přepočtu dat naměřených nanovoltmetrem u přímé a referenční krokové metody.

Pro kalibraci nanovoltmetru Keithley 2182A byl použit program NISTVolt. Jeho výstupem byl z každého měření soubor obsahující 11 dvojic dat. Jednalo se o napětí nastavené na Josephsonově čipu a odpovídající napětí změřené nanovoltmetrem Keithley 2182A.

Prvním krokem zpracování bylo určení offsetu kvantového etalonu, který byl vyhodnocen pomocí lineární interpolace v bodě 0. Zjištěná hodnota offsetu kvantového etalonu byla následně odečtena od všech hodnot naměřených nanovoltmetrem Keithley 2182A.

Dalším zjišťovaným parametrem nanovoltmetru Keithley 2182A byl jeho zisk, což je závislost napětí změřeného nanovoltmetrem na napětí kvantového etalonu. Zisk nanovoltmetru Keithley 2182A byl získán proložením naměřených dat přímkou. Výsledkem byla přímka s koeficienty k a q , viz rovnice (5.1).

$$U = kU_{JVS} + q \quad (5.1)$$

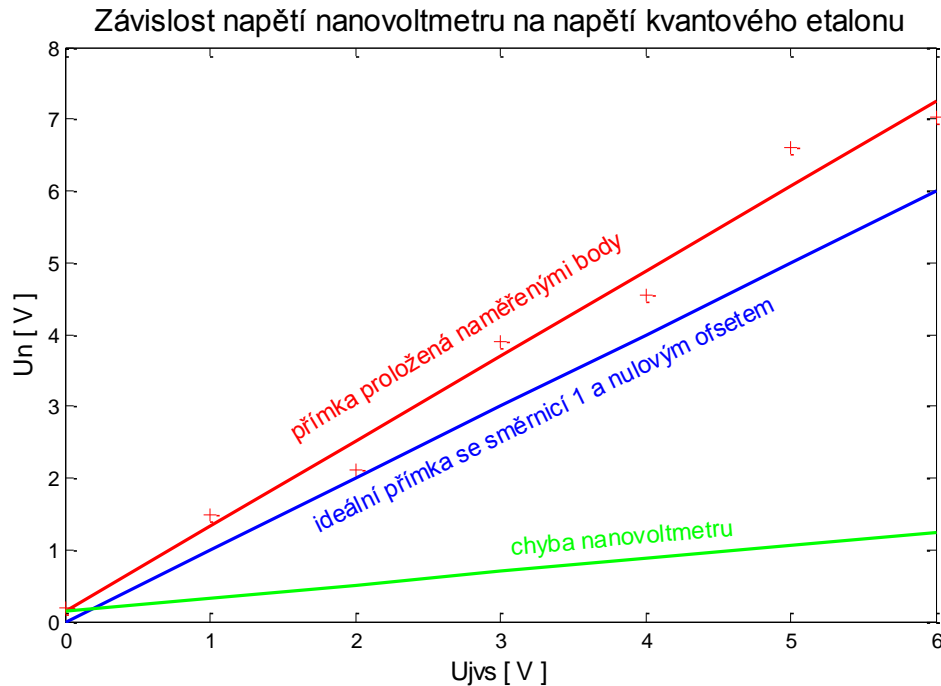
U	napětí nanovoltmetru
U_{JVS}	napětí Johnsonova čipu
k	směrnice přímky proložené naměřenými body
q	offset přímky proložené naměřenými body

Výsledný zisk G nanovoltmetru Keithley 2182A byl určen podle vztahu (5.2).

$$G = k - 1 \quad (5.2)$$

G	zisk nanovoltmetru
k	směrnice přímky proložené naměřenými body

Chyba nanovoltmetru Keithley 2182A je definována jako odchylka od ideální přímky se směrnici $k = 1$ a nulovým ofsetem. Graficky zobrazuje chybu nanovoltmetru Obrázek 17, který je pouze ilustrační. Ve skutečnosti se přímka proložená naměřenými body téměř neliší od ideální přímky.



Obrázek 17 Ilustrační graf závislosti napětí nanovoltmetru U na napětí kvantového etalonu U_{jvs} , zobrazení chyby nanovoltmetru

Chyba Δ nanovoltmetru Keithley 2182A byla vypočítána z rovnice (5.3).

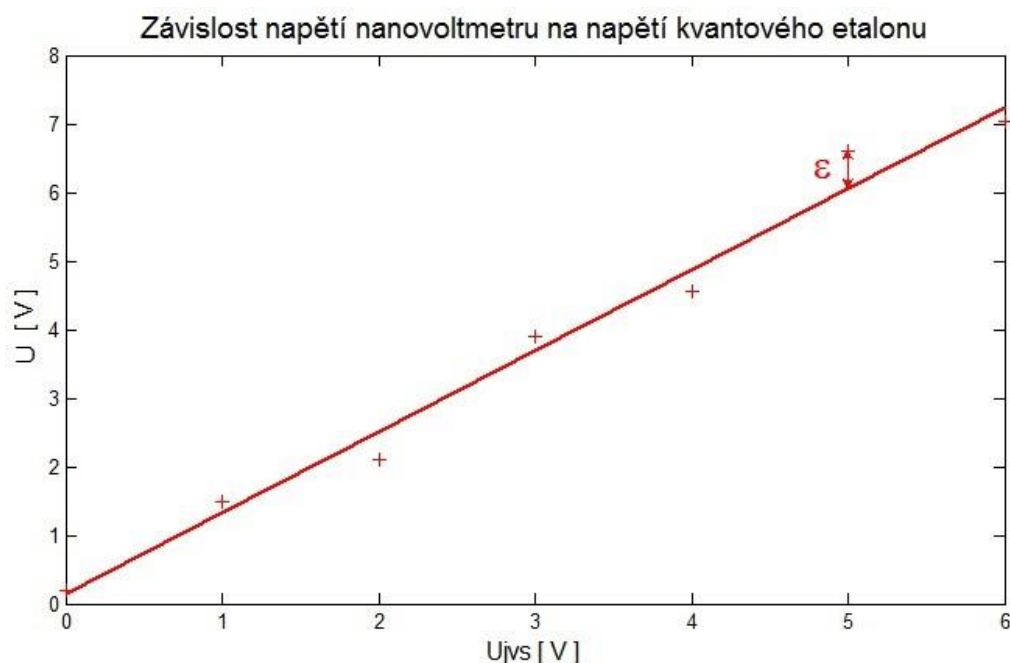
$$\Delta = kU_{jvs} + q - U_{jvs} \quad (5.3)$$

- U_{jvs} napětí Johnsonova čipu
- k směrnice přímky proložené naměřenými body
- q ofset přímky proložené naměřenými body
- Δ chyba nanovoltmetru

Posledním parametrem určovaným při kalibraci nanovoltmetru Keithley 2182A byla jeho nelinearita ε určená ze vztahu (5.4). Nelinearita vyjadřuje odchylku od proložené přímky, viz Obrázek 18.

$$\varepsilon = U - (kU_{jvs} + q) \quad (5.4)$$

- ε nelinearita nanovoltmetru
- U napětí nanovoltmetru
- U_{jvs} napětí Johnsonova čipu
- k směrnice přímky proložené naměřenými body
- q ofset přímky proložené naměřenými body



Obrázek 18 Ilustrační graf závislosti napětí nanovoltmetru U na napětí kvantového etalonu U_{jvs} , zobrazení nelinearity nanovoltmetru

Další bod zpracování zahrnoval výpočet průměrných hodnot a nejistot jednotlivých parametrů. Nejdříve byla vypočítána průměrná hodnota offsetu kvantového etalonu ze všech měření a nejistota typu A offsetu u_{offset} . V každém kalibračním bodě byla určena průměrná hodnota chyby nanovoltmetru Keithley 2182A ze všech měření a vyhodnotila se nejistota typu A chyb nanovoltmetru u_{Δ} .

Poslední část kombinované nejistoty tvořila nejistota kvantového etalonu u_{JVS} , která byla určena na základě porovnání a vlastností etalonu. Velikost nejistoty kvantového etalonu $u_{JVS} = 12$ nV. [17] Výsledná kombinovaná nejistota kalibrace nanovoltmetru u_{cn} byla dána vztahem (5.5).

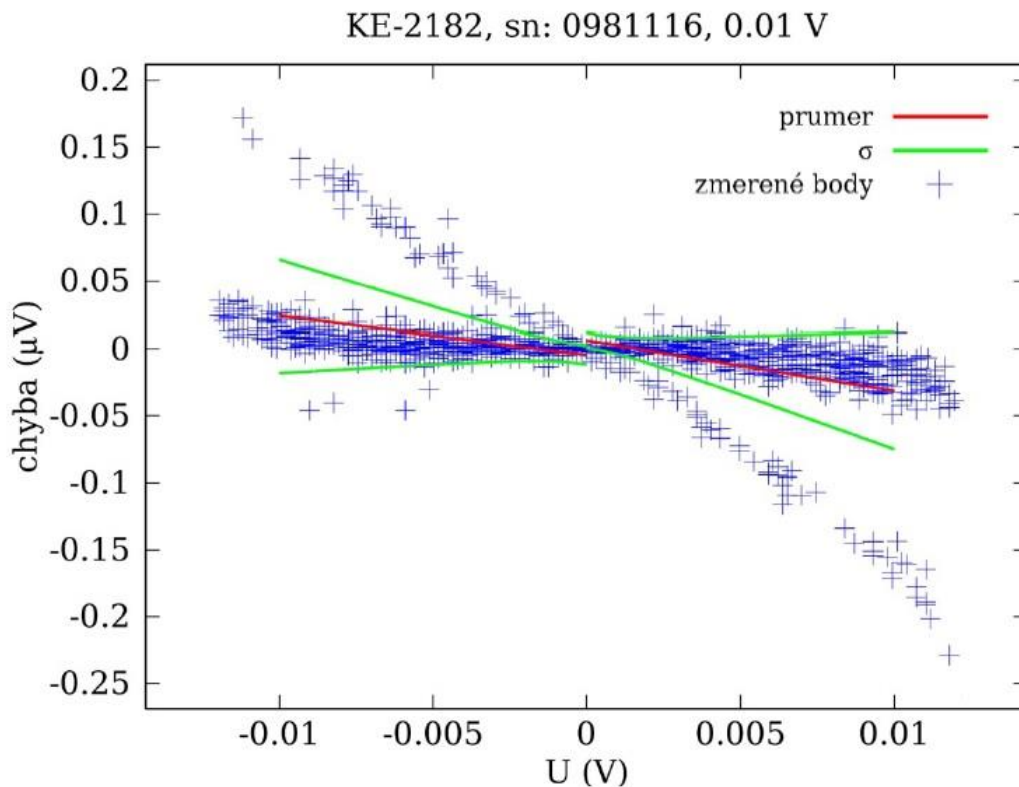
$$u_{cn} = \sqrt{u_{\Delta}^2 + u_{offset}^2 + u_{JVS}^2} \quad (5.5)$$

u_{cn}	kombinovaná nejistota kalibrace nanovoltmetru
u_{Δ}	standardní nejistota typu A chyb nanovoltmetru
u_{offset}	standardní nejistota typu A offsetu kvantového etalonu
u_{JVS}	nejistota kvantového etalonu

Dále byla určena průměrná hodnota zisků a nelinearity nanovoltmetru Keithley 2182A pro oba kalibrované rozsahy. Z důvodu korekce hodnot naměřených nanovoltmetrem Keithley 2182A byl vytvořen vektor obsahující přesně takové hodnoty napětí, ve kterých bude nanovoltmetr Keithley 2182A použitý pro měření. V těchto

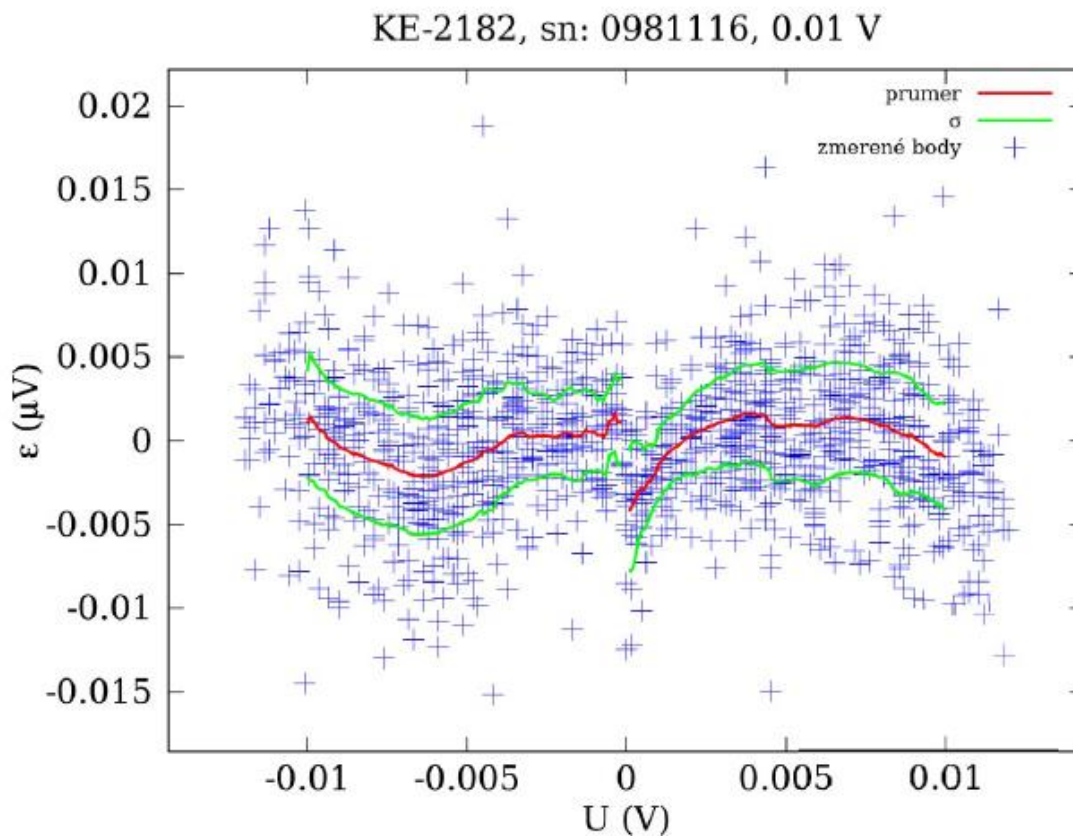
bodech byla určena chyba a standardní kombinovaná nejistota nanovoltmetru Keithley 2182A a data byla uložena do tabulky, viz Přílohy A.1, A.2.

Výsledky kalibrace byly zaznamenány do grafů, pro každý rozsah zvláštní graf. Obrázek 19 zobrazuje závislost chyby Δ nanovoltmetru Keithley 2182A na jeho napětí U . Modré křížky označují rozdíl napětí nanovoltmetru a napětí Josephsonova čipu. Červené přímky zobrazují průměrnou chybu nanovoltmetru Keithley 2182A a zelené přímky určují rozptyl chyby. Z grafu je patrné zakřivení naměřených hodnot na koncích grafu. Z toho důvodu byl výpočet chyby, zisku i nelinearity rozdělen na kladnou a zápornou část. Získané průměrné hodnoty jednotlivých parametrů pak lépe odpovídaly naměřeným datům.



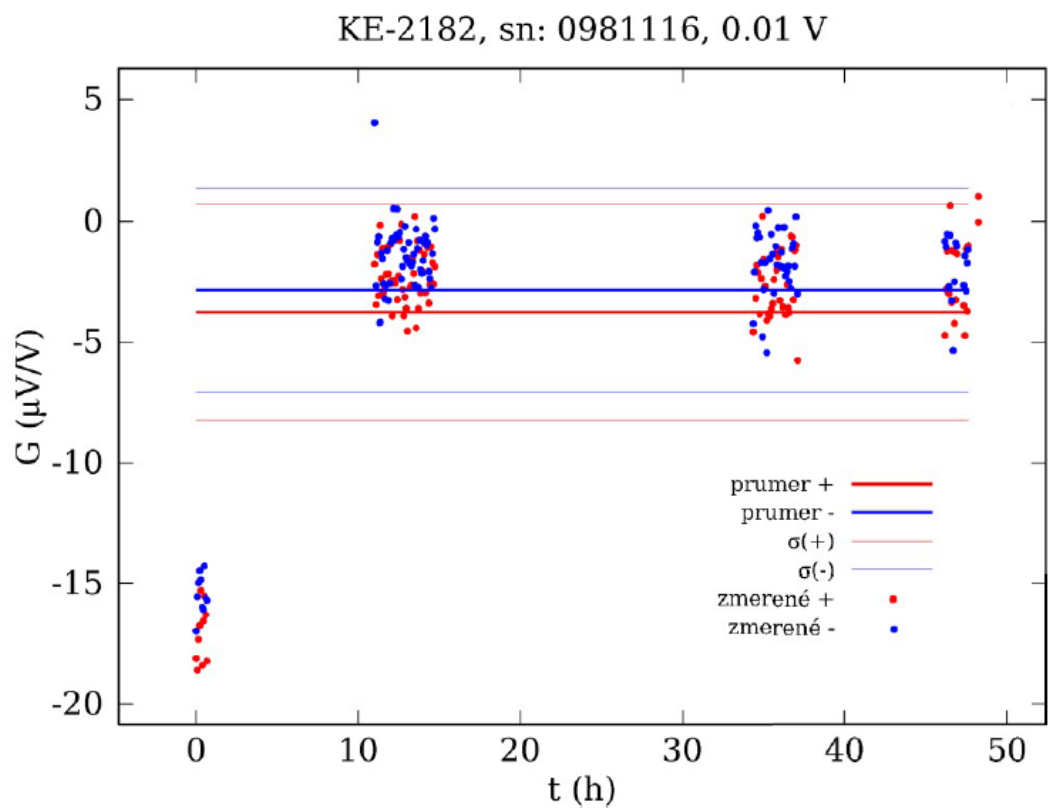
Obrázek 19 Závislost chyby Δ nanovoltmetru Keithley 2182A na jeho napětí U , rozsah 0,01 V

Obrázek 20 zobrazuje závislost nelinearity ε nanovoltmetru Keithley 2182A na jeho napětí U . Z grafu je patrné, že průměrná hodnota nelinearity má typický esovitý průběh.



Obrázek 20 Závislost nelinearity ε nanovoltmetru Keithley 2182A na jeho napětí U , rozsah 0,01V

Závislost zisku G nanovoltmetru Keithley 2182A na čase v hodinách zobrazuje Obrázek 21. Červeně jsou zobrazeny hodnoty zisku pro kladná napětí nanovoltmetru a modrá barva představuje hodnoty zisku pro záporná napětí nanovoltmetru. Z grafu vyčnívají hodnoty zisků z prvního měření. Z grafu závislosti chyby nanovoltmetru na jeho napětí, viz Obrázek 19, bylo také vidět, že některé chyby nanovoltmetru přesahují hodnotu $|\Delta| > \pm 0,5 \mu\text{V}$. Bylo zjištěno, že se jedná o všechny hodnoty z první sady měření. Důvodem bylo přenesení nanovoltmetru Keithley 2182A mezi dvěma měřicími pracovišti, při kterém musel být vypnut a zapnut, což se projevilo na jeho zisku i chybě. Při dalším přenosu nanovoltmetru už se stejný problém neopakoval.



Obrázek 21 Závislost zisků G nanovoltmetru Keithley 2182A na čase, rozsah 0,01 V

5.2 Zpracování dat naměřených přímou metodou

Při měření přímou metodou proběhlo vždy 10 odměřů kalibrátoru Fluke 5720A nanovoltmetrem Keithley 2182A. Naměřená data byla uložena do tabulek v Excelu, viz Příloha B. Pro každé měření byla vypočtena průměrná hodnota napětí a přiřazen čas měření. Pro zpracování dat byla vytvořena funkce s názvem prima_metoda v programu Matlab.

Hlavním krokem zpracování dat získaných přímou metodou byl přepočet hodnot naměřených nanovoltmetrem Keithley 2182A. Při kalibraci nanovoltmetru Keithley 2182A byla určena jeho chyba a nejistota v jednotlivých měřicích bodech, viz Přílohy A.1, A.2. Hodnoty naměřené nanovoltmetrem Keithley 2182A byly korigovány tak, že chyba nanovoltmetru v daném kalibračním bodě byla přičtena k hodnotě naměřené nanovoltmetrem Keithley 2182A.

První část kombinované nejistoty tvořila nejistota typu A u_{Anv} z 10 odměřů nanovoltmetru Keithley 2182A. Tato nejistota byla určena ze vztahu (5.6).

$$u_{Anv} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (U_{pi} - \bar{U}_p)^2} \quad (5.6)$$

u_{Anv} nejistota typu A z 10 odměřů nanovoltmetru

n počet odměřů nanovoltmetrem

U_{pi} napětí nanovoltmetru v i -tém měřicím bodě

\bar{U}_p průměr napětí naměřených nanovoltmetrem

Další nejistotu měření přímou metodou tvořila standardní nejistota typu B daná specifikacemi nanovoltmetru Keithley 2182A u_{Bnv} , která byla vypočtena ze vztahu (5.7). Specifikace nanovoltmetru Keithley 2182A udávané výrobcem byly v jednotce ppm, proto byly ve vzorci podělené hodnotou 10^6 . [18]

$$u_{Bnv} = \bar{U}_p \frac{\delta_M}{10^6} + X_R \frac{\delta_R}{10^6} \quad (5.7)$$

\bar{U}_p korigované napětí nanovoltmetru

δ_M chyba nanovoltmetru z měřené hodnoty

X_R rozsah nanovoltmetru

δ_R chyba z rozsahu nanovoltmetru

u_{Bnv} standardní nejistota typu B nanovoltmetru daná specifikacemi

Poslední část kombinované nejistoty tvořila nejistota kalibrace nanovoltmetru u_{cn} určená ze vztahu (5.5), viz kapitola 5.1. Standardní kombinovaná nejistota měření přímou metodou u_c v jednom kalibračním bodě je dána rovnicí (5.8).

$$u_c = \sqrt{u_{Anv}^2 + u_{cn}^2 + u_{Bnv}^2} \quad (5.8)$$

u_c	kombinovaná nejistota měření přímou metodou
u_{Anv}	standardní nejistota typu A z 10 odměrů nanovoltmetru
u_{cn}	nejistota kalibrace nanovoltmetru, viz vztah (5.5)
u_{Bnv}	standardní nejistota typu B nanovoltmetru daná specifikacemi

Pro výpočet rozšířené nejistoty byl u měření pomocí všech tří metod použit koeficient rozšíření $k_r = 2$. Pak rozšířená nejistota odpovídá pravděpodobnosti pokrytí 95%. Rozšířená nejistota U byla určena z rovnice (5.9).

$$U = k_r \cdot u_c \quad (5.9)$$

k_r	koeficient rozšíření
u_c	standardní kombinovaná nejistota měření přímou metodou
U	rozšířená nejistota

5.3 Zpracování dat naměřených referenční krokovou metodou

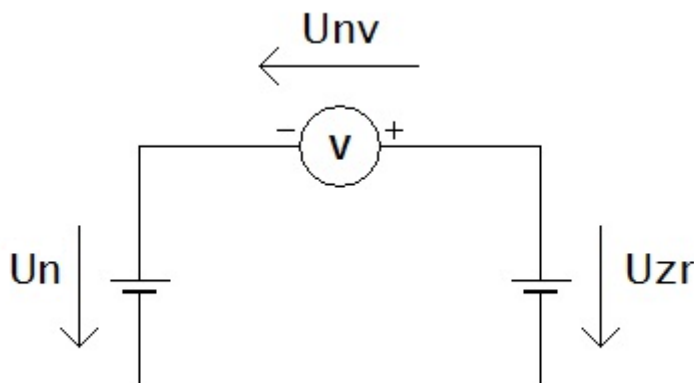
Pro zpracování dat byla v programu Matlab vytvořena funkce s názvem RSM, ze které jsou volány další funkce. Prvním krokem zpracování dat referenční krokové metody bylo přepočítání výsledných poměrů zisků dvou rozsahů na zisky jednotlivých rozsahů. V druhé části měření byla zjištěna přesná hodnota kalibrátoru Fluke 5720A jeho porovnáním se Zenerovou referencí Fluke 732A. Ze změřených napětí byl určen zisk kalibrátoru Fluke 5720A na rozsahu 10 V.

Před porovnáním kalibrátoru Fluke 5720A se Zenerovou referencí Fluke 732A proběhla kalibrace Zenerovy reference Fluke 732A pomocí kvantového etalonu napětí. Zenerova reference Fluke 732A byla zkalibrována dvakrát, viz kapitola 4.3. Naměřené hodnoty napětí Zenerovy reference U_{zr} spolu se standardními nejistotami u_{zr} kalibrace určenými programem NISTVolt zobrazuje Tabulka 3. Výsledné napětí Zenerovy reference Fluke 732A bylo určeno jako výběrový průměr z naměřených hodnot.

Tabulka 3 Kalibrace Zenerovy reference Fluke 732A, sériové číslo: 4825014

kalibrace Zr Fluke 732 A - sériové číslo: 4825014			
5. 2. 2015		6. 2. 2015	
U_{zr} [V]	u_{zr} [nV]	U_{zr} [V]	u_{zr} [nV]
-10,000148345	26,6	-10,000148551	21,4
-10,000148307	25,6	-10,000148551	18,9
10,000148329	30,7	10,000148535	16,8
10,000148494	25,0	10,000148564	28,4
-10,000148276	23,1	-10,000148460	25,6
-10,000148394	22,2	-10,000148442	22,4
10,000148509	19,3	10,000148539	27,4
10,000148507	20,8	10,000148621	22,5

Obvod pro první měření porovnání kalibrátoru Fluke 5720A se Zenerovou referencí Fluke 732A zobrazuje Obrázek 22.



Obrázek 22 Schéma zapojení pro porovnání kalibrátoru se Zenerovou referencí

Ze schématu lze určit napětí kalibrátoru podle rovnic (5.10), (5.11).

$$-U_{nd} + U_{zr} - U_n = 0 \quad (5.10)$$

$$U_n = U_{zr} - U_{nd} \quad (5.11)$$

Příklad výpočtu proběhne pro první měření s kladnou polaritou Zenerovy reference. Na kalibrátoru Fluke 5720A byla nastavena hodnota $U_n = 10,000159$ V. Měřicí obvod navíc obsahoval ofsetové napětí kalibrátoru Fluke 5720A, které bylo určeno softwarem referenční krokové metody.

Proběhlo deset odměřů rozdílu Zenerovy reference Fluke 732A a kalibrátoru Fluke 5720A pomocí nanovoltmetru Keithley 2182A. Hodnoty naměřené nanovoltmetrem z obou měření pro kladnou i zápornou polaritu Zenerovy reference obsahuje Tabulka 4.

Tabulka 4 Hodnoty rozdílu Zenerovy reference Fluke 732A a kalibrátoru Fluke 5720A naměřené nanovoltmetrem Keithley 2182A

	1. měření		2. měření	
	kladná polarita Zr	záporná polarita Zr	kladná polarita Zr	záporná polarita Zr
	U_{nd} [nV]	U_{nd} [nV]	U_{nd} [nV]	U_{nd} [nV]
	568	731	515	-685
	874	686	484	-456
	772	998	523	-714
	866	1048	502	-467
	574	710	514	-890
	420	821	632	-930
	601	1039	953	-600
	1045	964	1008	-788
	372	903	977	-607
	865	654	530	-731
průměr	695,7	855,4	663,8	-686,8

Hodnoty U_{nd} naměřené nanovoltmetrem Keithley 2182A neodpovídaly skutečné hodnotě měřeného napětí U_{nv} . Naměřené hodnoty U_{nd} zobrazené na displeji nanovoltmetru Keithley 2182A lze zapsat vztahem (5.12).

$$U_{nd} = U_{nv}(1 + G_{n_{01}}) \quad (5.12)$$

U_{nd} napětí nanovoltmetru zobrazené na displeji

U_{nv} korigované napětí nanovoltmetru

$G_{n_{01}}$ zisk nanovoltmetru na rozsahu 0,01 V

Hodnoty byly přepočítány pomocí zisku $G_{n_{01}}$ nanovoltmetru Keithley 2182A, který byl určen při kalibraci nanovoltmetru, viz kapitola 5.1. Korekce hodnot naměřených nanovoltmetrem Keithley 2182A proběhla podle vztahu (5.13).

$$U_{nv} = \frac{U_{nd}}{(1 + G_{n_{01}})} \quad (5.13)$$

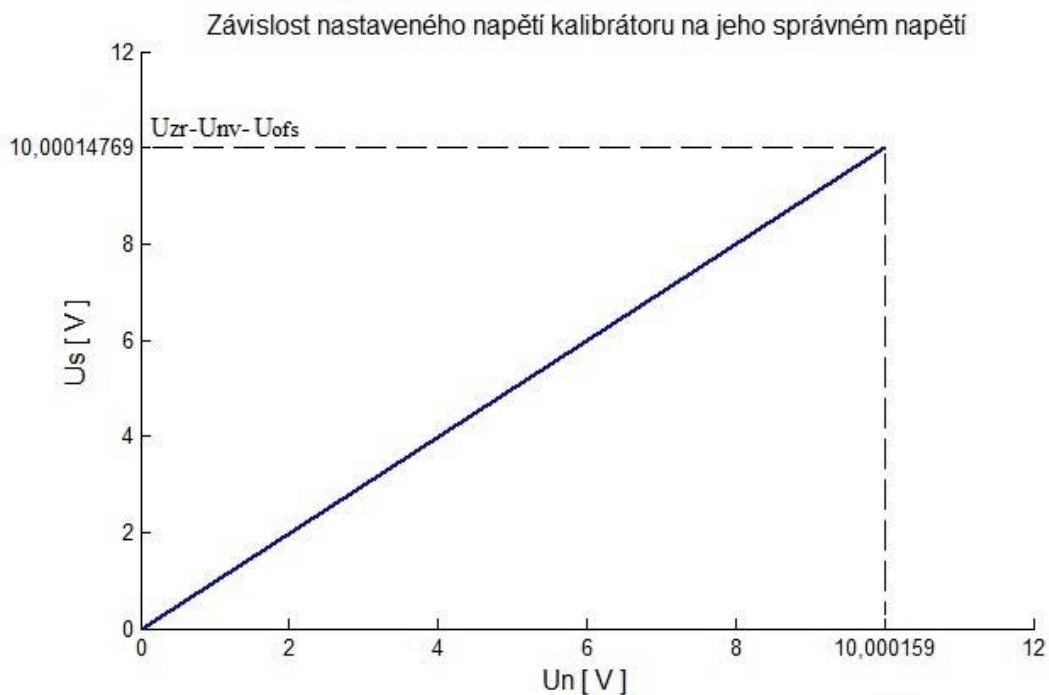
U_{nd} napětí nanovoltmetru zobrazené na displeji

U_{nv} korigované napětí nanovoltmetru

$G_{n_{01}}$ zisk nanovoltmetru na rozsahu 0,01 V

Zisk kalibrátoru Fluke 5720A byl určen ze směrnice přímky, viz kapitola 2.2. Na ose x se nacházelo napětí nastavené na kalibrátoru U_n . Tomuto napětí odpovídalo skutečné výstupní napětí kalibrátoru Fluke 5720A $U_{zr} - U_{nv} - U_{ofs}$, což je rozdíl průměrné

hodnoty Zenerovy reference Fluke 732A z prvního měření a průměrného korigovaného napětí naměřeného nanovoltmetrem Keithley 2182A z prvního měření při kladné polaritě Zenerovy reference. Dále bylo odečteno ofsetové napětí U_{ofs} kalibrátoru Fluke 5720A. Přímku pro výpočet zisku na rozsahu 10 V zobrazuje Obrázek 23. Předpokládalo se, že v bodě 0 na ose x, byla hodnota na ose y nulová. Ve skutečnosti kalibrátor s nastaveným napětím $U_n = 0$ V nikdy na výstupu nemá přesně hodnotu 0 V. Tato odchylka je však malá a na směrnici přímky má velmi malý vliv, lze ji proto zanedbat.



Obrázek 23 Závislost napětí nastaveného na kalibrátoru na jeho správném napětí

Z rovnice (5.14) byla určena směrnici přímky A .

$$A = \frac{U_{zr} - U_{nv} - U_{ofs}}{U_n} = \frac{10,00014769}{10,000159} = 0,999998869 \quad (5.14)$$

- U_{zr} napětí Zenerovy reference
- U_{nv} průměrné korigované napětí změřené nanovoltmetrem
- U_{ofs} ofsetové napětí kalibrátoru
- U_n napětí nastavené na kalibrátoru
- A směrnice přímky

Zisk G_{10} kalibrátoru Fluke 5720A na rozsahu 10 V byl vypočítán ze vztahu (5.15).

$$G_{10} = A - 1 = -1,131 \mu V/V \quad (5.15)$$

G_{10} zisk kalibrátoru na rozsahu 10 V
 A směrnice přímky

K výpočtu zisků jednotlivých rozsahů kalibrátoru Fluke 5720A byly použity hodnoty poměrů zisků naměřené referenční krokovou metodou, viz Příloha C.1. Poměr zisků $K_{10/1}$ rozsahů 10 V a 1 V kalibrátoru je definován vztahem (5.16). Poměr zisků byl udán v jednotce ppm, proto byla celá rovnice násobena hodnotou 10^6 .

$$K_{10/1} = \left(\frac{G_{10} + 1}{G_1 + 1} - 1 \right) \cdot 10^6 \quad (5.16)$$

$K_{10/1}$ poměr zisků kalibrátoru na rozsazích 10 V a 1 V
 G_{10} zisk kalibrátoru na rozsahu 10 V
 G_1 zisk kalibrátoru na rozsahu 1 V

Zisk G_1 rozsahu 1V kalibrátoru Fluke 5720A byl vypočítán z rovnice (5.17).

$$G_1 = \frac{G_{10} + 1}{K_{10/1} + 1} - 1 = \frac{-1,131 \cdot 10^{-6} + 1}{\frac{-0,68}{10^6} + 1} - 1 = -0,451 \mu V/V \quad (5.17)$$

Ze známého zisku příslušného rozsahu, lze dopočítat hodnotu U_s kalibrátoru Fluke 5720A pro kteroukoli nastavenou hodnotu napětí U_n v daném rozsahu. Například pro rozsah 10 V lze dopočítat pravé napětí U_s kalibrátoru Fluke 5720A ze vztahu (5.18).

$$U_s = (G_{10} + 1)U_n + U_{ofs} \quad (5.18)$$

U_s pravé napětí kalibrátoru
 G_{10} zisk kalibrátoru na rozsahu 10 V
 U_n napětí nastavené na kalibrátoru
 U_{ofs} ofsetové napětí kalibrátoru

Software referenční krokové metody určil ofsetová napětí kalibrátoru Fluke 5720A a jejich nejistotu pouze pro rozsahy 10 V a 1 V. Chyběl zde rozsah 0,01 V. Nejistotu ofsetového napětí kalibrátoru Fluke 5720A nelze zanedbat, proto byl proveden její odhad. Ze specifikací kalibrátoru Fluke 5720A lze určit, že nejistota se s klesajícím rozsahem snižuje. [15] Proto byla při výpočtu nejistoty ofsetového napětí

kalibrátoru u_{ofs} rozsahu 0,01 V použita nejistota ofsetového napětí pro vyšší rozsah 1 V, která má pro první měření rozsahu 0,01 V hodnotu $u_{ofs} = 0,05 \mu\text{V}$, viz Příloha C.2.

Při každém porovnání kalibrátoru Fluke 5720A se Zenerovou referencí Fluke 732A bylo nanovoltmetrem Keithley 2182A změřeno deset hodnot, z kterých byla určena standardní nejistota typu A u_{Anv} . U nanovoltmetru byla dále určena standardní nejistota typu B daná specifikacemi nanovoltmetru u_{Bnv} , která byla vypočtena ze vztahu (5.7). Další nejistotu tvořila nejistota kalibrace nanovoltmetru u_{cnv} určená ze vztahu (5.5).

K dalším zdrojům nejistot patřila standardní kombinovaná nejistota kalibrace Zenerovy reference Fluke 732A, která byla pro každé měření určena programem NISTVolt. Z osmi měření program vypočítal osm nejistot, viz Tabulka 3. Ze všech nejistot byla vybrána nejistota u_{maxzr} , která měla nejvyšší hodnotu.

U Zenerovy reference byla dále uvažována nejistota u_{sZR} daná stabilitou Zenerovy reference Fluke 732A, která byla určena z předchozích záznamů etalonu. Nejistota daná stabilitou Zenerovy reference Fluke 732A byla vypočítána pomocí Allanovy variace. Hodnota nejistoty v období 24 hodin byla $u_{sZR} = 2,5 \text{ nV}$. [17]

Výslednou standardní kombinovanou nejistotu $u(G_{10})$ referenční krokové metody pro rozsah 10 V definuje rovnice (5.19).

$$u(G_{10}) = \sqrt{u_{ofs}^2 + u_{Anv}^2 + u_{cnv}^2 + u_{Bnv}^2 + u_{maxzr}^2 + u_{sZR}^2} \quad (5.19)$$

u_{ofs}	nejistota ofsetového napětí kalibrátoru
u_{Anv}	nejistota typu A z deseti odměrů nanovoltmetrem
u_{cnv}	nejistota kalibrace nanovoltmetru
u_{Bnv}	standardní nejistota typu B nanovoltmetru daná jeho specifikacemi
u_{maxzr}	nejistota kalibrace Zenerovy reference
u_{sZR}	nejistota stability Zenerovy reference
$u(G_{10})$	kombinovaná nejistota referenční krokové metody pro rozsah 10 V

Software referenční krokové metody vyhodnotil standardní nejistotu poměru zisků dvou rozsahů kalibrátoru Fluke 5720A, viz Příloha C.1. Zisky rozsahů 1 V a 0,1 V kalibrátoru Fluke 5720A byly získány výpočtem. K určení nejistoty byl použit zákon šíření nejistot, viz kapitola 3.2. Výpočet je ukázán na zisku rozsahu 1 V, který je definován podle vztahu (5.20).

$$G_1 = f(G_{10}, K_{10/1}) \quad (5.20)$$

$K_{10/1}$	poměr zisků rozsahů 10 V a 1 V kalibrátoru
G_{10}	zisk kalibrátoru na rozsahu 10 V
G_1	zisk kalibrátoru na rozsahu 1 V

Nejistota $u(G_1)$ zisku rozsahu 1 V kalibrátoru Fluke 5720A je definována vztahy (5.21) a (5.22).

$$u^2(G_1) = \left(\frac{\partial f(G_{10}, K_{10/1})}{\partial G_{10}} \right)^2 \cdot u^2(G_{10}) + \left(\frac{\partial f(G_{10}, K_{10/1})}{\partial K_{10/1}} \right)^2 \cdot u^2(K_{10/1}) \quad (5.21)$$

$u(G_1)$	nejistota zisku rozsahu 1 V
$K_{10/1}$	poměr zisků rozsahů 10 V a 1 V kalibrátoru
G_{10}	zisk kalibrátoru na rozsahu 10 V
$u(G_{10})$	nejistota zisku rozsahu 10 V
$u(K_{10/1})$	nejistota poměru zisků rozsahů 10 V a 1 V

$$u(G_1) = \sqrt{\left(\frac{\partial f(G_{10}, K_{10/1})}{\partial G_{10}} \right)^2 \cdot u^2(G_{10}) + \left(\frac{\partial f(G_{10}, K_{10/1})}{\partial K_{10/1}} \right)^2 \cdot u^2(K_{10/1})} \quad (5.22)$$

Koeficient citlivosti A_1 se určí ze vztahu (5.23).

$$A_1 = \frac{\partial f(G_{10}, K_{10/1})}{\partial G_{10}} = \left(\frac{G_{10} + 1}{K_{10/1} + 1} - 1 \right) \cdot \frac{1}{\partial G_{10}} = \frac{1}{K_{10/1} + 1} \quad (5.23)$$

$K_{10/1}$	poměr zisků rozsahů 10 V a 1 V kalibrátoru
G_{10}	zisk kalibrátoru na rozsahu 10 V
$u(G_{10})$	nejistota zisku rozsahu 10 V
$u(K_{10/1})$	nejistota poměru zisků rozsahů 10 V a 1 V

Koeficient citlivosti A_2 je definován vztahem (5.24).

$$A_2 = \frac{\partial f(G_{10}, K_{10/1})}{\partial K_{10/1}} = \left(\frac{G_{10} + 1}{K_{10/1} + 1} - 1 \right) \cdot \frac{1}{\partial K_{10/1}} = -\frac{G_{10} + 1}{(K_{10/1} + 1)^2} \quad (5.24)$$

$K_{10/1}$	poměr zisků rozsahů 10 V a 1 V kalibrátoru
G_{10}	zisk kalibrátoru na rozsahu 10 V
$u(G_{10})$	nejistota zisku rozsahu 10 V
$u(K_{10/1})$	nejistota typu A referenční krokové metody pro měření poměru zisků rozsahů 10 V a 1 V

Výsledná kombinovaná nejistota $u(G_1)$ zisku rozsahu 1 V kalibrátoru Fluke 5720A se vypočítá z rovnice (5.25). Obdobně lze určit nejistotu zisku rozsahu 0,1 V.

$$u(G_1) = \sqrt{A_1^2 \cdot u^2(G_{10}) + A_2^2 \cdot u^2(K_{10/1})} \quad (5.25)$$

$u(G_{10})$	nejistota zisku rozsahu 10 V
$u(K_{10/1})$	nejistota poměru zisků rozsahů 10 V a 1 V
A_1	koeficient citlivosti určený z ()
A_2	koeficient citlivosti určený z ()
$u(G_1)$	nejistota zisku rozsahu 1 V

Z důvodu složitosti výpočtu nejistot referenční krokové metody, hlavně u nejistot pro rozsahy 1 V a 0,01 V kalibrátoru Fluke 5720A, bylo nakonec přistoupeno k vyhodnocení nejistot pomocí metody Monte Carlo. Počet opakování metody Monte Carlo byl zvolen $N = 10^6$. Pro každou veličinu, použitou při výpočtu výsledného zisku, bylo generováno N hodnot normálního rozdělení. V našem případě se generují hodnoty napětí Zenerovy reference Fluke 732A, hodnoty naměřené nanovoltmetrem Keithley 2182A při porovnání kalibrátoru se Zenerovou referencí Fluke 732A, hodnoty ofsetových napětí a poměrů zisků kalibrátoru Fluke 5720A.

Ze známé hodnoty napětí nastaveného na kalibrátoru Fluke 5720A se podle vzorců (5.14) a (5.15) určil zisk kalibrátoru Fluke 5720A na rozsahu 10 V. Pak byly vypočítány zisky rozsahu 1 V a 0,01 V kalibrátoru, viz vztahy (5.16) a (5.17). Výsledná hodnota napětí byla určena z rovnice (5.18). Nejistota určená metodou Monte Carlo má koeficient rozšíření $k_r = 1$. Aby výsledná nejistota odpovídala pravděpodobnosti pokrytí 95 %, byla nejistota násobena koeficientem rozšíření $k_r = 2$.

5.4 Potenciometrická metoda

Software potenciometru vytvořil pro každý měřicí bod výstupní soubor s příponou *.his*. Na každém řádku souboru se nacházelo jedno měření. Každý řádek obsahoval datum a čas měření, průměrnou hodnotu napětí, rozšířenou nejistotu měření, počet stupňů volnosti a konfidenční úroveň. Zjednodušený výpočet výsledného napětí, nejistoty a stupňů volnosti popisuje kapitola 2.3.2. Z důvodu velké složitosti jednotlivých výpočtů byla všechna data vypočítána softwarem potenciometru.

Data z výstupních souborů byla převedena do tabulky v Excelu a seřazena vzestupně podle napětí. V programu Excel byly vypočítány rozdíly časů jednotlivých měření od času prvního měření, aby se daly použít pro časové porovnání metod. V Matlabu byla vytvořena funkce `potenciometr_m`, která načítala data z tabulky v Excelu. Software pro měření potenciometrickou metodou určoval relativní rozšířené nejistoty v jednotkách ppm. Tyto nejistoty byly pomocí vztahu (5.26) přepočítány na absolutní rozšířené nejistoty.

$$u = \frac{u_r \cdot H}{10^6} \quad (5.26)$$

u_r	relativní nejistota
H	průměrná hodnota napětí
u	absolutní nejistota

Funkce `potenciometr_m` vrací matici obsahující hodnoty průměrného napětí, rozšířené nejistoty a času měření ze všech měření.

6 POROVNÁNÍ MĚŘICÍCH METOD

Závěrečná část práce se zabývá porovnáním metod pro měření malých stejnosměrných napětí. Prvním krokem bylo vytvoření grafů odchylek absolutních hodnot napětí naměřeného jednotlivými metodami od nominální hodnoty napětí. Poté proběhlo porovnání metod pomocí procedury A klíčového porovnání. Závěr kapitoly obsahuje diskuzi dosažených výsledků.

6.1 Volba bodů pro porovnání

Porovnání proběhlo pro dva rozsahy kalibrátoru Fluke 5720A. Jednalo se o rozsah 220 mV a 11 V. Byly vybrány měřicí body, ve kterých proběhlo měření všemi třemi metodami.

Zvolené nominální hodnoty napětí U_n kalibrátoru Fluke 5720A pro porovnání metod:

- rozsah 220 mV: od -10 mV do 10 mV s krokem 1 mV kromě bodu 0 V
- rozsah 11 V: od -10 V do -3 V s krokem 1 V
od 3 V do 10 V s krokem 1V.

Při měření potenciometrickou metodou byl automaticky nastavován rozsah testovaného přístroje. Například pro hodnotu 2 V byl rozsah kalibrátoru Fluke 5720A automaticky nastaven na 2,2 V. Přímou metodou a referenční krokovou metodou byly hodnoty 2 V a 1 V měřeny na rozsahu 11 V. Hodnoty tedy nelze porovnat, protože byly každou metodou měřené na jiném rozsahu.

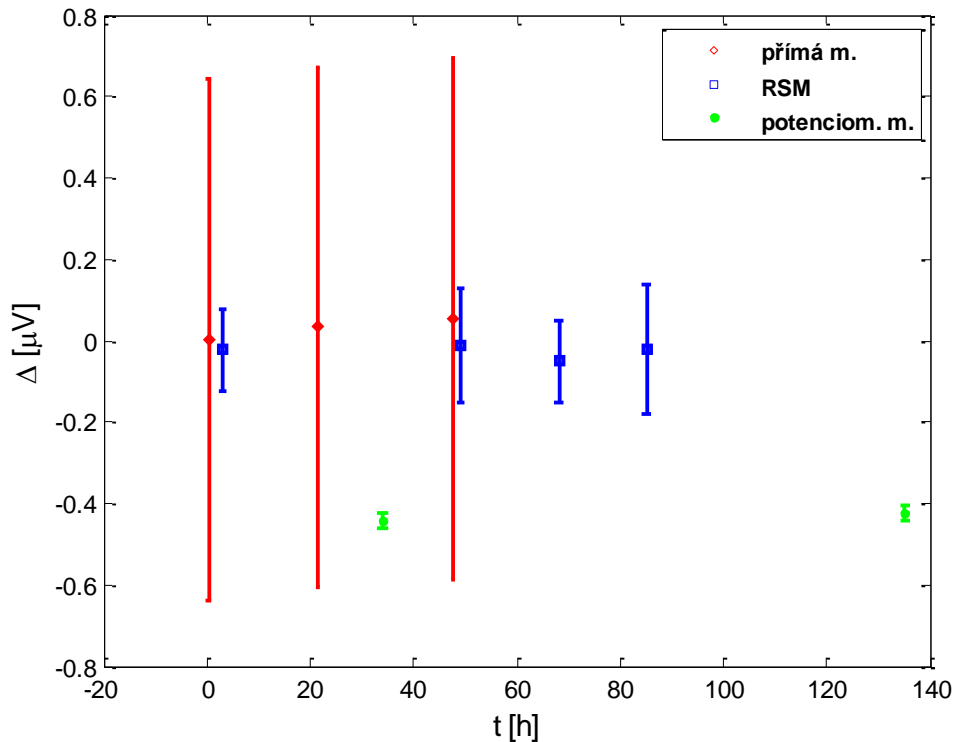
Podobný případ nastal také pro nižší hodnoty napětí. Přímou metodou se na rozsahu 2,2 V kalibrátoru Fluke 5720A měřily hodnoty menší než 10 mV z důvodu rozsahu nanovoltmetru Keithley 2182A. Takto malé hodnoty by se nedaly změřit potenciometrickou metodou, při které by byl rozsah kalibrátoru automaticky nastaven na nejnižší rozsah 220 mV kalibrátoru Fluke 5720A.

Měřilo se i několik hodnot menších než -10 mV, ale měření neproběhlo všemi metodami. Z těchto hodnot byl vybrán bod 50 μ V, který byl změřen pouze metodou přímou a potenciometrickou. Tento bod nebyl použit při klíčovém porovnání metod, ale byl vytvořen graf pro porovnání metody přímé a potenciometrické.

6.2 Grafy pro porovnání metod

Před samotným klíčovým porovnáním metod proběhla tvorba grafů pro porovnání metod. Z grafů lze určit správnost výsledků a odhalit případné chyby ve zpracování dat. Pro tvorbu grafů slouží skript s názvem grafy vytvořený v matlabu.

Pro každou hodnotu nominálního napětí zvolenou pro porovnání metod byl vytvořen graf odchylek Δ absolutní hodnoty napětí od nominální hodnoty napětí U_n v závislosti na čase, viz Obrázek 24. Odchylka je vyjádřena i s příslušnou rozšířenou nejistotou, aby bylo možné jednotlivé měřicí metody porovnat. Odchylka je vyjádřena jednotkou μV . Měření přímou metodou proběhlo ve všech měřicích bodech třikrát, referenční krokovou metodou čtyřikrát a potenciometrickou metodou dvakrát, u některých bodů třikrát. Ve všech grafech je přímá metoda vyznačena červenou barvou, referenční kroková metoda (RSM) modrou barvou a potenciometrická metoda zelenou barvou.



Obrázek 24 Porovnání metod měření malých ss napětí včetně rozšířených nejistot, nominální hodnota 7 mV, odchylky Δ absolutních hodnot napětí od nominální hodnoty, kalibrátor Fluke 5720A, rozsah 220 mV

Při vytváření grafů proběhlo zároveň ověření správnosti zpracování dat a vykreslování grafů. K ověření byla použita testovací data. Pro vybrané nominální napětí $U_n = 10 \text{ V}$ byla vytvořena ideální testovací data pro jednotlivé metody. U přímé metody byla výpočtem ověřena průměrná hodnota napětí a výsledná rozšířená nejistota. Pro referenční krokovou metodu byl ověřen zisk všech rozsahů a rozšířené nejistoty pro první měření. U potenciometrické metody proběhlo ověření načítání správných dat

a přepočtu relativní nejistoty. Následně byla všechna testovací data vykreslena do grafu a bylo ověřeno, že graf vykresluje správné hodnoty. Ověřením testovacích dat bylo dokázáno, že ve zpracování dat z jednotlivých metod nedošlo k chybě.

6.3 Klíčové porovnání metod

Při porovnání metod se postupovalo podle procedury A používané pro klíčové porovnání dat, viz kapitola 3.1. Výsledkem porovnání metod bylo určení stupně ekvivalence jednotlivých metod. Stupeň ekvivalence se skládá z odchylky hodnoty naměřené jednotlivými metodami od referenční hodnoty porovnání metod a příslušné nejistoty. K porovnání metod slouží skript s názvem porovnaní vytvořený v matlabu.

Porovnání metod proběhlo pro každou nominální hodnotu napětí. Příklad výpočtu bude proveden pro nominální hodnotu napětí $U_n = 10$ V. Naměřené hodnoty x_m a standardní kombinované nejistoty $u(x)$ pro nominální napětí $U_n = 10$ V zobrazuje Tabulka 5.

Tabulka 5 Hodnoty napětí x_m a standardní kombinované nejistoty $u(p)$ jednotlivých metod pro nominální napětí 10 V

metoda	přímá		RSM		potenciometrická	
	x_{pm} [V]	$u(x_p)$ [μV]	x_{rm} [V]	$u(x_r)$ [μV]	x_{dm} [V]	$u(x_d)$ [μV]
1	9,99999592	400,00	9,99998870	0,16	9,99999105	2,06
2	9,99999854	400,00	9,99998920	0,16	9,99999070	2,06
3	9,99999092	400,01	9,99998920	0,16	9,99999083	2,06
4	-	-	9,99998920	0,15	-	-

Prvním krokem bylo stanovení váženého průměru. Z naměřených hodnot napětí jednotlivých metod byl určen výběrový průměr \bar{x} . Z nejistot každé metody byla zvolena maximální nejistota $u_{max}(x)$, viz Tabulka 6.

Tabulka 6 Hodnoty výběrového průměru \bar{x} a maximální standardní kombinované nejistoty $u_{max}(x)$ pro nominální hodnotu napětí 10 V

přímá m.		RSM		potenciometrická m.	
\bar{x}_p [V]	$u_{max}(\bar{x}_p)$ [μV]	\bar{x}_r [V]	$u_{max}(\bar{x}_r)$ [μV]	\bar{x}_d [V]	$u_{max}(\bar{x}_d)$ [μV]
9,9999951	400,01	9,9999890	0,16	9,9999908	2,06

Následuje výpočet váženého průměru y podle vztahu (6.1).

$$y = \frac{\frac{\bar{x}_p}{u_{max}(\bar{x}_p)^2} + \frac{\bar{x}_r}{u_{max}(\bar{x}_r)^2} + \frac{\bar{x}_d}{u_{max}(\bar{x}_d)^2}}{\frac{1}{u_{max}(\bar{x}_p)^2} + \frac{1}{u_{max}(\bar{x}_r)^2} + \frac{1}{u_{max}(\bar{x}_d)^2}} = 9,99998909 \text{ V} \quad (6.1)$$

\bar{x}_p	výběrový průměr přímé metody pro $U_n = 10 \text{ V}$
$u_{max}(\bar{x}_p)$	maximální standardní kombinovaná nejistota přímé metody pro $U_n = 10 \text{ V}$
\bar{x}_r	výběrový průměr RSM pro $U_n = 10 \text{ V}$
$u_{max}(\bar{x}_r)$	maximální standardní kombinovaná nejistota RSM pro $U_n = 10 \text{ V}$
\bar{x}_d	výběrový průměr potenc. metody pro $U_n = 10 \text{ V}$
$u_{max}(\bar{x}_d)$	maximální standardní kombinovaná nejistota potenc. m. pro $U_n = 10 \text{ V}$

Další krok představuje stanovení rozptylu $u(y)$ ze vztahu (6.2).

$$\frac{1}{u(y)^2} = \frac{1}{u_{max}(\bar{x}_p)^2} + \frac{1}{u_{max}(\bar{x}_r)^2} + \frac{1}{u_{max}(\bar{x}_d)^2} = 1,65 \cdot 10^{14} \text{ V} \quad (6.2)$$

$u_{max}(\bar{x}_p)$	maximální standardní kombinovaná nejistota přímé m. pro $U_n = 10 \text{ V}$
$u_{max}(\bar{x}_r)$	maximální standardní kombinovaná nejistota RSM pro $U_n = 10 \text{ V}$
$u_{max}(\bar{x}_d)$	maximální standardní kombinovaná nejistota potenc. m. $U_n = 10 \text{ V}$

Vážený průměr y lze považovat za referenční hodnotu x_{ref} klíčového porovnání metod. Rozptyl $u(y)$ vyjadřuje standardní nejistotu $u(x_{ref})$ referenční hodnoty porovnání metod. Nyní lze přistoupit k výpočtu stupně ekvivalence jednotlivých metod. Odchylka d_p průměrné hodnoty naměřené přímou metodou od referenční hodnoty porovnání x_{ref} se určí ze vztahu (6.3).

$$d_p = \bar{x}_p - x_{ref} = 6.04 \mu\text{V} \quad (6.3)$$

\bar{x}_p	výběrový průměr přímé metody pro nominální hodnotu $U_n = 10 \text{ V}$
x_{ref}	referenční hodnota klíčového porovnání metod pro $U_n = 10 \text{ V}$
d_p	odchylka průměrné hodnoty naměřené přímou metodou od referenční hodnoty porovnání metod pro $U_n = 10 \text{ V}$

Standardní kombinovaná nejistota $u(d_p)$ odchylky průměrné hodnoty naměřené přímou metodou od referenční hodnoty porovnání pro $U_n = 10 \text{ V}$ se určí ze vztahu (6.4) a rozšířená nejistota $U(d_p)$ se vypočítá ze vztahu (6.5). Standardní nejistota referenční hodnoty porovnání $u(x_{ref})$ je definována výše rovnicí pro rozptyl $u(y)$ (6.2).

$$u(d_p) = \sqrt{u_{max}(\bar{x}_p)^2 - u(x_{ref})^2} = 200,01 \mu V \quad (6.4)$$

$u_{max}(\bar{x}_p)$	maximální standardní kombinovaná nejistota přímé metody pro $U_n = 10V$
$u(x_{ref})$	standardní nejistota referenční hodnoty porovnání metod
$u(d_p)$	standardní nejistota pro stupeň ekvivalence přímé m. $U_n = 10 V$

$$U(d_p) = 2u(d_p) = 400,02 \mu V \quad (6.5)$$

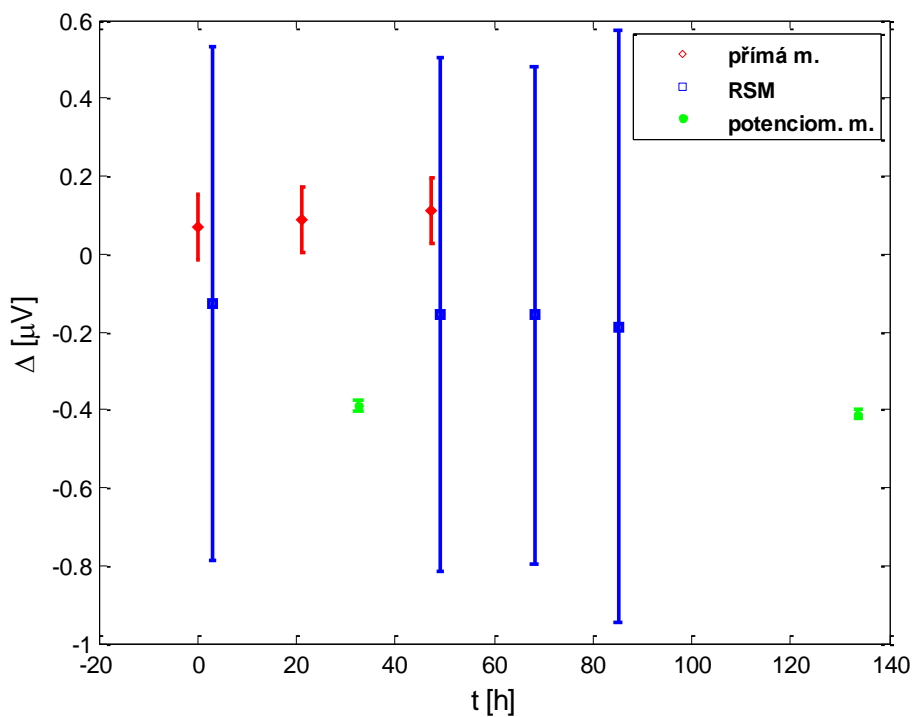
$u(d_p)$	standardní kombinovaná nejistota odchylky průměrné hodnoty naměřené přímou metodou od referenční hodnoty porovnání metod pro $U_n = 10 V$
$U(d_p)$	rozšířená nejistota odchylky průměrné hodnoty naměřené přímou metodou od referenční hodnoty pro $U_n = 10 V$

Obdobným způsobem proběhne výpočet stupně ekvivalence pro referenční krokovou metodu a potenciometrickou metodu. Postup se opakuje pro všechny hodnoty nominálního napětí, které byly zvolené pro porovnání metod.

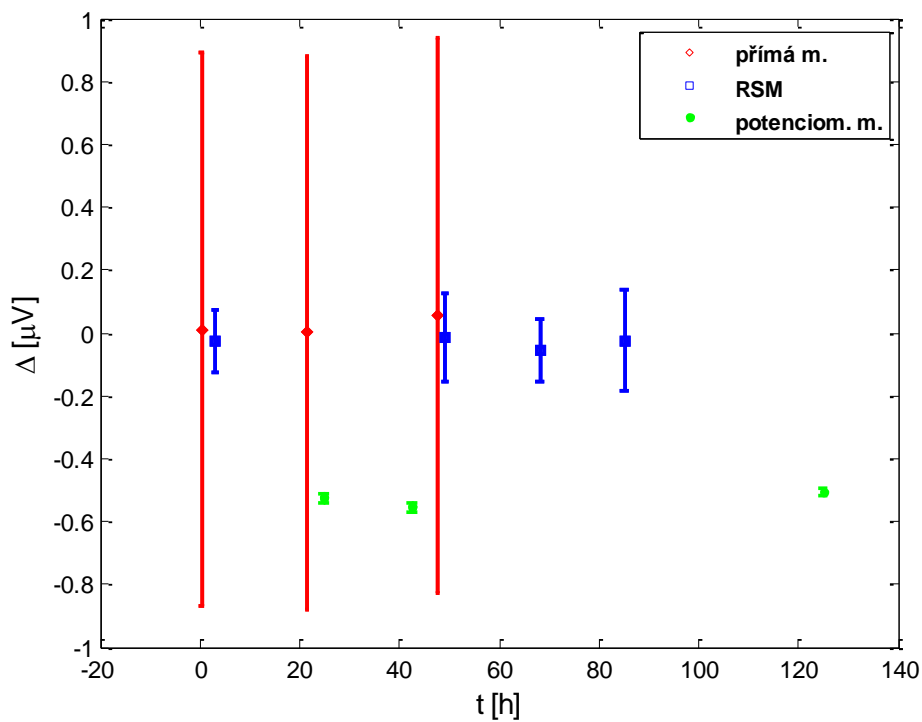
6.4 Diskuze dosažených výsledků

Kapitola obsahuje několik vybraných grafů sloužících ke grafickému porovnání metod pro měření malých stejnosměrných napětí. Porovnání metod proběhlo pro dva rozsahy 220 mV a 11 V kalibrátoru Fluke 5720A. Grafy zobrazují odchylky absolutních hodnot napětí jednotlivých metod od nominálních hodnot napětí v závislosti na čase včetně rozšířených nejistot měření. Jednotlivé grafy byly vybrány tak, aby demonstrovaly dosažené výsledky.

Diskuze výsledků začne vyhodnocením měření pomocí přímé metody. Projevuje se velký rozdíl mezi měřením na rozsahu 10 V a 10 mV nanovoltmetru Keithley 2182A. Nanovoltmetr je přístroj stavěný na měření malých hodnot napětí. Na nižším rozsahu mají nanovoltmetry stabilnější zisk než na vyšším rozsahu. Hodnoty naměřené nanovoltmetrem Keithley 2182A na rozsahu 10 mV jsou stabilní pro všechny hodnoty nominálních napětí obou polarit, což je patrné z Obrázek 25 pro nominální napětí -2 mV a z Obrázek 26 pro nominální napětí 10 mV.

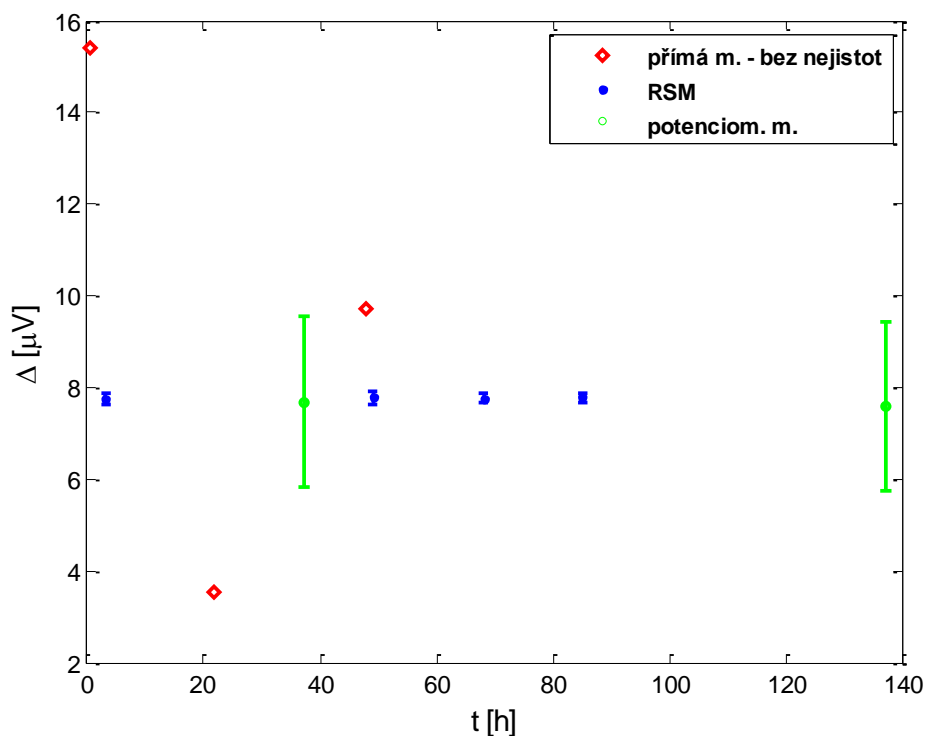


Obrázek 25 Porovnání metod měření malých ss napětí včetně rozšířených nejistot, nominální hodnota -2 mV, odchylky Δ absolutních hodnot napětí od nominální hodnoty, kalibrátor Fluke 5720A, rozsah 220 mV



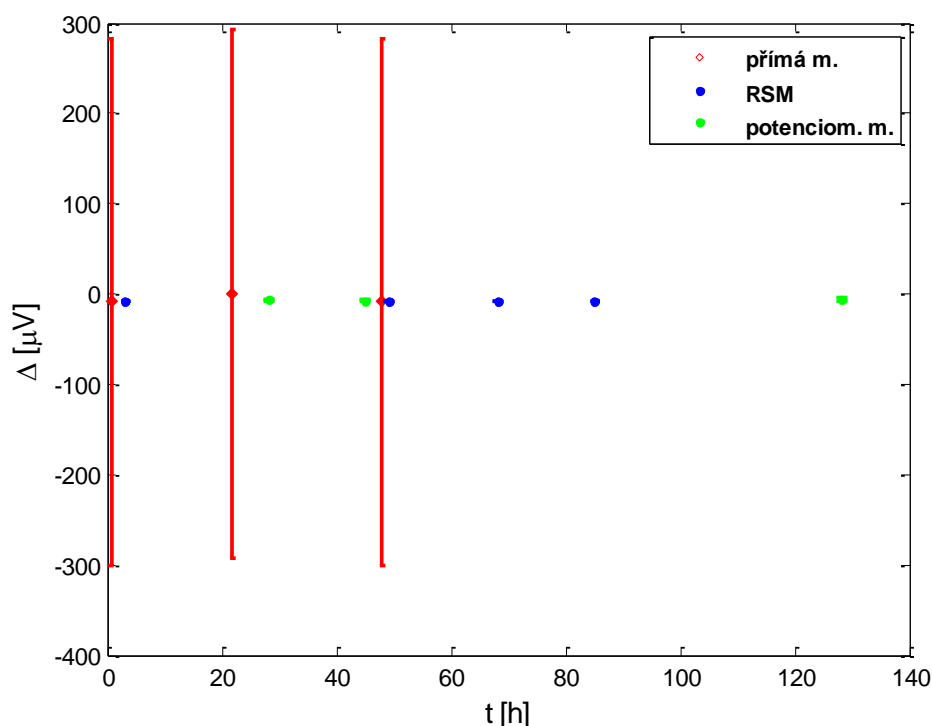
Obrázek 26 Porovnání metod měření malých ss napětí včetně rozšířených nejistot, nominální hodnota 10 mV, odchylky Δ absolutních hodnot napětí od nominální hodnoty, kalibrátor Fluke 5720A, rozsah 220 mV

Naopak hodnoty přímé metody naměřené nanovoltmetrem Keithley 2182A na rozsahu 10 V jsou hodně rozdílné, což zobrazuje Obrázek 27 pro nominální hodnotu napětí -9 V.



Obrázek 27 Porovnání metod měření malých ss napětí včetně rozšířených nejistot, nominální hodnota -9 V, odchylky Δ absolutních hodnot napětí od nominální hodnoty, kalibrátor Fluke 5720A, rozsah 11 V

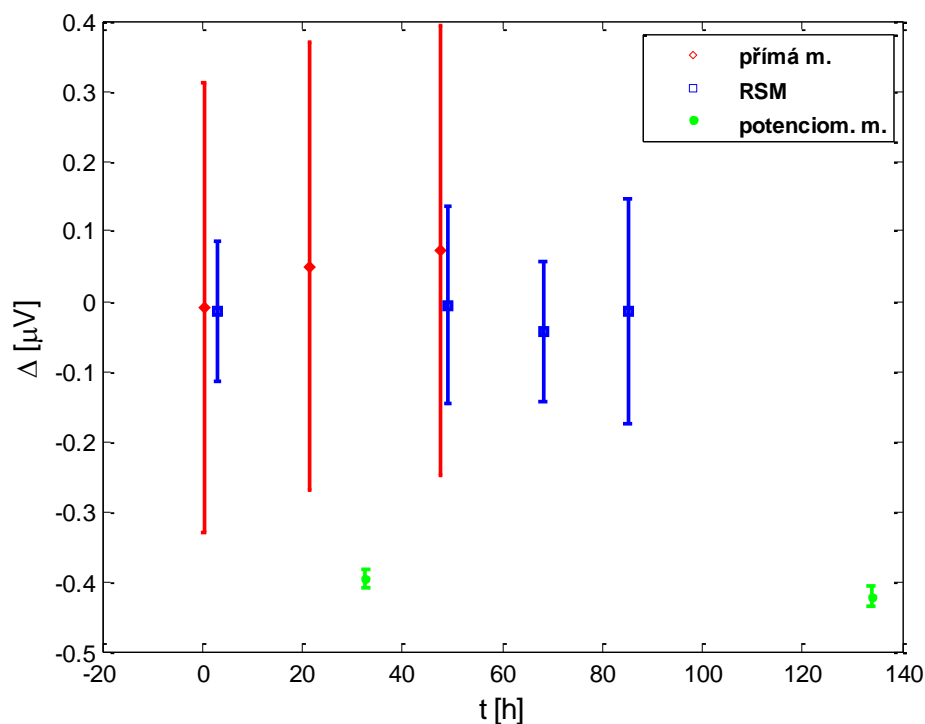
Rozdílným hodnotám naměřeným nanovoltmetrem Keithley 2182A na rozsahu 10 V odpovídá nejistota přímé metody, jejíž největší část tvoří nejistota daná specifikacemi nanovoltmetru Keithley 2182A. Vzhledem k velké nejistotě nanovoltmetru Keithley 2182A, je měření přímou metodou na rozsahu 10 V nanovoltmetru Keithley 2182A shodné v rámci nejistoty s potenciometrickou i referenční metodou, což dokazuje graf pro nominální hodnotu napětí 5 V, viz Obrázek 28. U hodnot nominálního napětí většího než 1 V je kvůli velké nejistotě přímé metody v dalších grafech zobrazena odchylka přímé metody bez nejistoty z důvodu lepšího zobrazení ostatních metod.



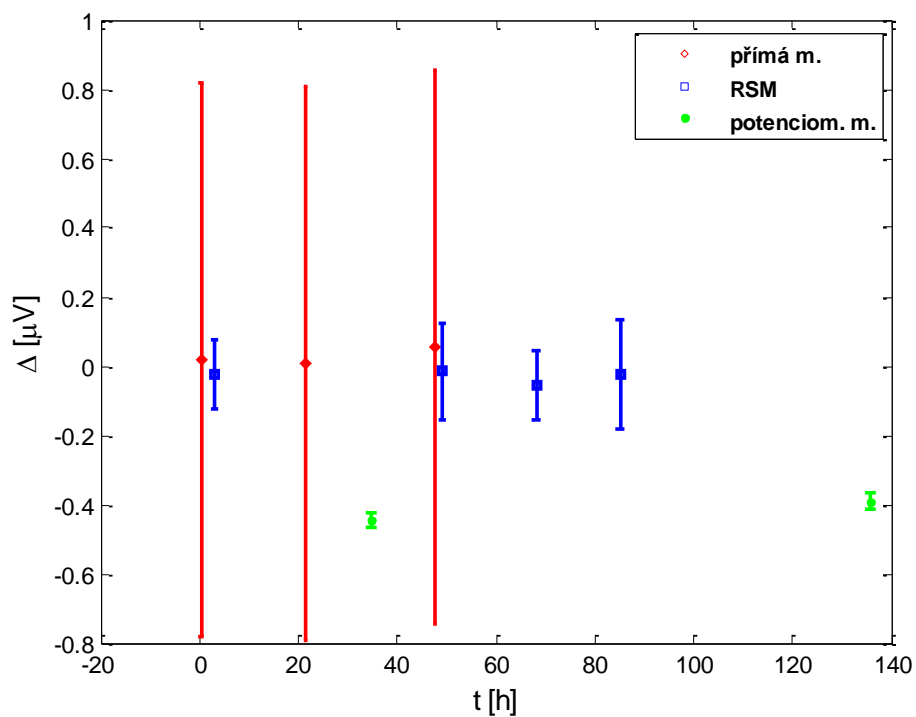
Obrázek 28 Porovnání metod měření malých ss napětí včetně rozšířených nejistot, nominální hodnota 5 V, odchylky Δ absolutních hodnot napětí od nominální hodnoty, kalibrátor Fluke 5720A, rozsah 11 V

Pro měření napětí v rozsahu kolem 10 V se více hodí například přístroj Fluke 8508A. Standardní nejistota typu B nanovoltmetru Keithley 2182A daná specifikacemi výrobce na rozsahu 10 V při měření napětí hodnoty 10 V má velikost $u_{BnKeithley} = 200 \mu\text{V}$. Naproti tomu standardní nejistota typu B přístroje Fluke 8508A při měření napětí hodnoty 10 V je $u_{BFluke} = 14 \mu\text{V}$. [19] K měření hodnot od jednotek voltů by bylo lepší použít místo nanovoltmetru Keithley 2182A například Fluke 8508A. Naopak při měření napětí hodnoty 1 mV by zase nejistota přístroje Fluke 8508A byla mnohem vyšší než nejistota nanovoltmetru Keithley 2182A. Žádný přístroj nemůže být velmi přesný na širokém rozsahu hodnot napětí.

Z měření nanovoltmetrem Keithley 2182A vyplývá, že jeho nejistota značně závisí na velikosti měřené hodnoty. Hlavní část nejistoty přímé metody tvoří nejistota daná specifikacemi nanovoltmetru Keithley 2182A, která pro stejný rozsah závisí právě na velikosti měřené hodnoty. Při nominálním napětí 3 mV je nejistota přímé metody přibližně $0,3 \mu\text{V}$, viz Obrázek 29, při nominálním napětí 9 mV nejistota přímé metody vzroste na $0,8 \mu\text{V}$, viz Obrázek 30.



Obrázek 29 Porovnání metod měření malých ss napětí včetně rozšířených nejistot, nominální hodnota 3 mV, odchylky Δ absolutních hodnot napětí od nominální hodnoty, kalibrátor Fluke 5720A, rozsah 220 mV

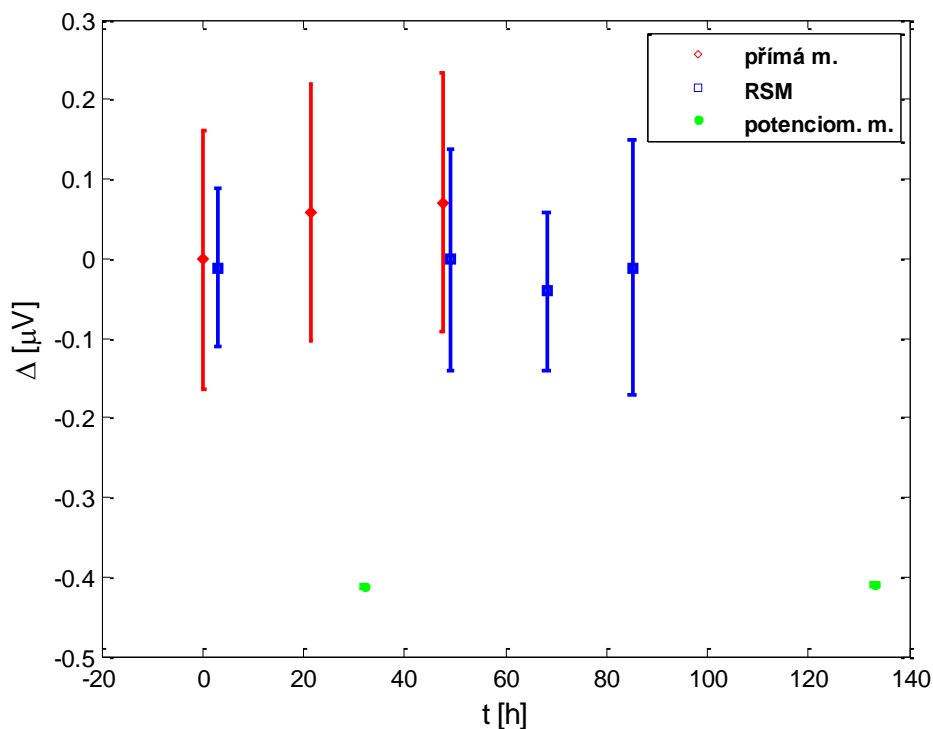


Obrázek 30 Porovnání metod měření malých ss napětí včetně rozšířených nejistot, nominální hodnota 9 mV, odchylky Δ absolutních hodnot napětí od nominální hodnoty, kalibrátor Fluke 5720A, rozsah 220 mV

Při měření přímou metodou se vyskytl další problém způsobený vypnutím nanovoltmetru Keithley 2182A. Důvodem vypnutí bylo přenesení nanovoltmetru Keithley 2182A do jiné místnosti ke kvantovému etalonu stejnosměrného napětí, kde byl zkalibrován. Z výsledků kalibrace nanovoltmetru Keithley 2182A pro rozsah 0,01 V vyplynulo, že zisk nanovoltmetru při prvním měření se velmi lišil od zisků při dalších měřeních, což bylo způsobeno právě vypnutím nanovoltmetru Keithley 2182A. Nanovoltmetr Keithley 2182A by měl při měření zůstat stále zapnutý.

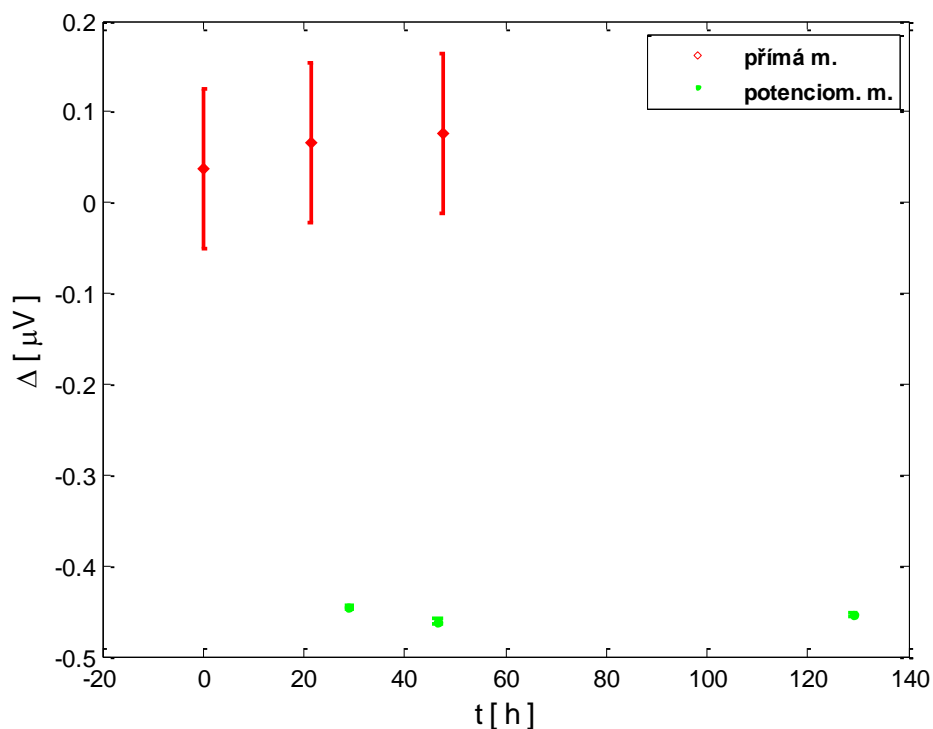
Z hodnot naměřených potenciometrickou metodou lze sledovat rozdíl mezi měřeními hodnot větších než 3 V na rozsahu 11 V kalibrátoru Fluke 5720A a měřeními na nižším rozsahu 220 mV kalibrátoru Fluke 5720A. U hodnot nominálního napětí U_n v rozmezí od 3 V do 10 V pro kladnou i zápornou polaritu je měření potenciometrickou metodou ve všech bodech shodné v rámci nejistot s přímou i referenční krokovou metodou, což zobrazuje Obrázek 28.

Pro hodnoty nominálního napětí menšího než 10 mV se měření potenciometrickou metodou hodně liší od ostatních metod. Pro nominální napětí v rozmezí 1 mV až 3 mV není měření potenciometrickou metodou shodné v rámci nejistot s referenční krokovou ani s přímou metodou, jak zobrazuje Obrázek 31. V dalších bodech se potenciometrická metoda shoduje v rámci nejistot pouze s jednou z ostatních metod.



Obrázek 31 Porovnání metod měření malých ss napětí včetně rozšířených nejistot, nominální hodnota 1 mV, odchylny Δ absolutních hodnot napětí od nominální hodnoty, kalibrátor Fluke 5720A, rozsah 220 mV

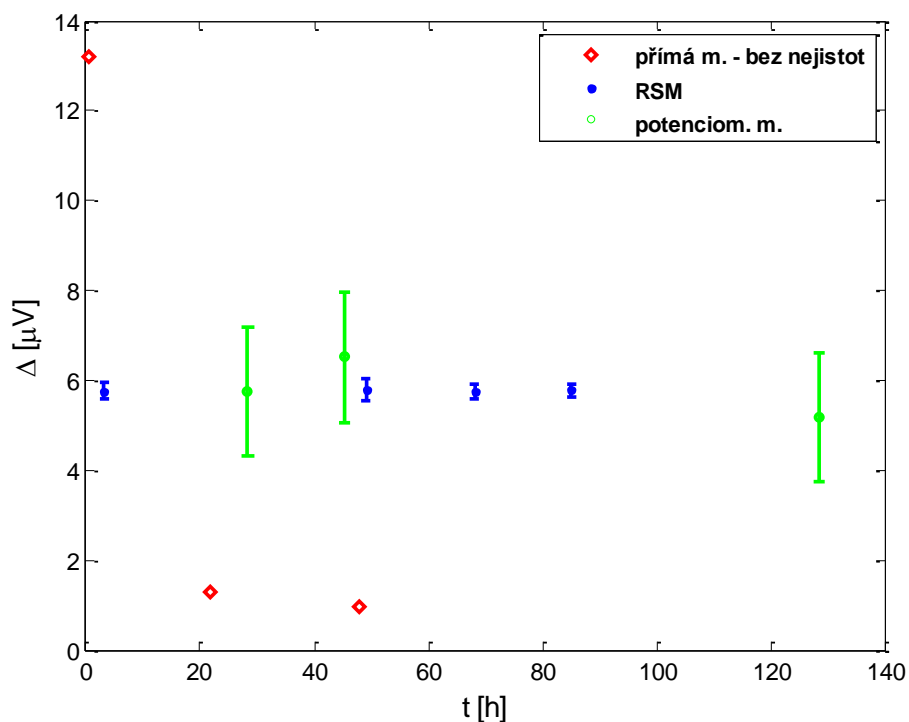
Z grafů byla určena odchylka metod v jednotkách ppm. Při nominálním napětí 10 mV je velikost odchylky potenciometrické metody od referenční metody přibližně 35 ppm, na 1 mV už se jedná o 400 ppm, viz Obrázek 31. Lze usuzovat, že při nižších hodnotách napětí, se bude potenciometrická metoda více lišit od ostatních metod. Z důvodu ověření tohoto předpokladu, byl vytvořen graf pro nominální napětí 50 μV , viz Obrázek 32, které bylo změřeno pouze metodou přímou a potenciometrickou. Odchylka těchto dvou metod byla přibližně 8000 ppm. S klesajícím nominálním napětím se potenciometrická metoda stále více liší od ostatních metod.



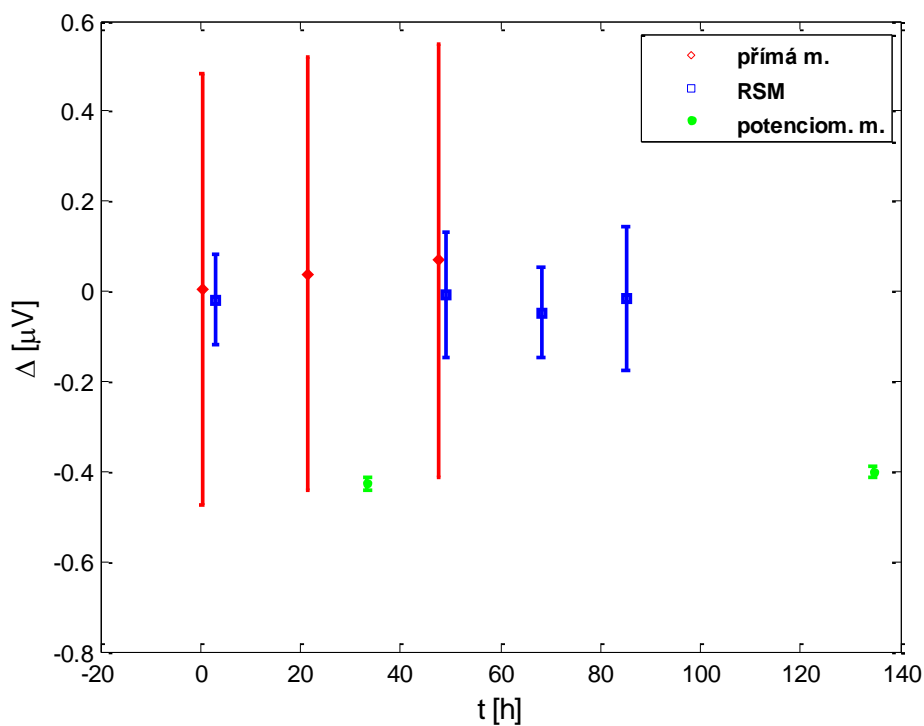
Obrázek 32 Porovnání metod měření malých ss napětí včetně rozšířených nejistot, nominální hodnota 50 μV , odchylky Δ absolutních hodnot napětí od nominální hodnoty, kalibrátor Fluke 5720A, rozsah 220 mV

Měření potenciometrickou metodou pro hodnoty nominálního napětí menšího než 10 mV není shodné v rámci nejistot s ostatními metodami také z důvodu velmi malé nejistoty. Tato nejistota je určena přímo softwarem potenciometru. Čím menší hodnotu potenciometr měří, tím používá větší dělicí poměr a i jeho nejistota by měla být větší. Na základě těchto závěrů bylo zjištěno, že software potenciometru neurčuje nejistotu správně.

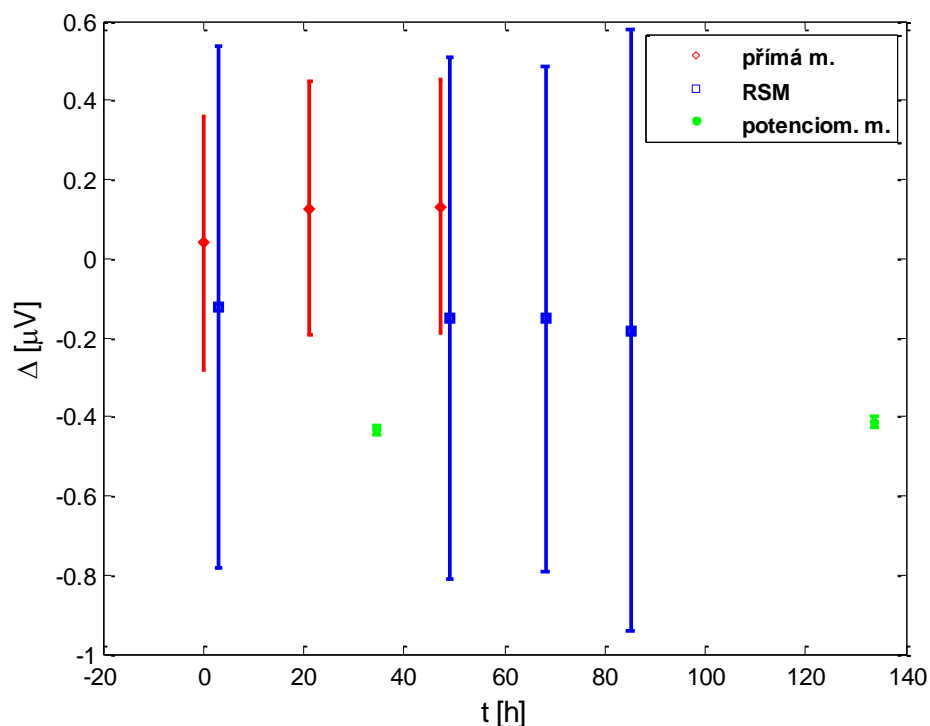
Výsledné naměřené hodnoty referenční krokové metody jsou dobré v celém rozsahu hodnot nominálního napětí obou polarit, což zobrazuje Obrázek 33 pro nominální napětí -7 V, Obrázek 34 pro nominální napětí 5 mV, Obrázek 35 pro nominální napětí -5 mV a ostatní grafy uvedené výše.



Obrázek 33 Porovnání metod měření malých ss napětí včetně rozšířených nejistot, nominální hodnota -7 V, odchylky Δ absolutních hodnot napětí od nominální hodnoty, kalibrátor Fluke 5720A, rozsah 11 V



Obrázek 34 Porovnání metod měření malých ss napětí včetně rozšířených nejistot, nominální hodnota 5 mV, odchylky Δ absolutních hodnot napětí od nominální hodnoty, kalibrátor Fluke 5720A, rozsah 220 mV



Obrázek 35 Porovnání metod měření malých ss napětí včetně rozšířených nejistot, nominální hodnota -5 mV, odchylky Δ absolutních hodnot napětí od nominální hodnoty, kalibrátor Fluke 5720A, rozsah 220 mV

U hodnot nominálního napětí menšího než 10 mV se nachází rozdíl v nejistotě metody RSM mezi kladnými a zápornými hodnotami, což zobrazuje Obrázek 34 a Obrázek 35. Tento rozdíl je způsoben nejistotou ofsetového napětí kalibrátoru Fluke 5720A, která se značně liší pro kladnou a zápornou polaritu.

Nevýhodou metody RSM je její velká časová náročnost na rozdíl od rychlejší potenciometrické metody. Navíc u metody RSM je nutné ručně navazovat na Zenerovu referenci. Zjistilo se, že software referenční krokové metody neurčuje ofsetová napětí kalibrátoru ani příslušnou nejistotu pro rozsah 0,01 V, viz kapitola 5.3. Ve spolupráci s laboratoří na Novém Zélandu by měly být tyto nedostatky programu doplněny.

V rámci porovnání metod nebylo nutné řešit drift kalibrátoru Fluke 5720A z důvodu jeho velmi dobré stability. Pokud by kalibrátor nebyl dostatečně stabilní, musel by se určit jeho drift a zahrnout ho do porovnání metod.

Výsledné hodnoty klíčového porovnání metod pomocí procedury A zobrazuje Tabulka 7 pro rozsah 0,22 V kalibrátoru Fluke 5720A a Tabulka 8 pro rozsah 11 V kalibrátoru Fluke 5720A. Výsledkem je odchylka d průměrné hodnoty naměřené určitou metodou od referenční hodnoty klíčového porovnání metod a příslušná rozšířená nejistota $U(d)$ pro jednotlivé hodnoty nominálního napětí U_n .

Tabulka 7 Výsledné hodnoty klíčového porovnání metod pro rozsah 220 mV kalibrátoru Fluke 5720A

	U_n [V]	přímá m.		RSM		potenciom. m.	
		d_p [μV]	$U(d_p)$ [μV]	d_r [μV]	$U(d_r)$ [μV]	d_d [μV]	$U(d_d)$ [μV]
rozsah 0,22 V	-0,01	0,54	0,72	0,29	0,76	-0,0003	0,0004
	-0,009	0,50	0,64	0,23	0,76	-0,0007	0,0009
	-0,008	0,49	0,56	0,23	0,76	-0,0009	0,0010
	-0,007	0,52	0,48	0,26	0,76	-0,0008	0,0007
	-0,006	0,52	0,40	0,26	0,76	-0,0013	0,0010
	-0,005	0,52	0,32	0,27	0,76	-0,0010	0,0006
	-0,004	0,48	0,24	0,23	0,76	-0,0031	0,0015
	-0,003	0,47	0,16	0,23	0,76	-0,0033	0,0011
	-0,002	0,47	0,08	0,23	0,76	-0,0115	0,0020
	-0,001	0,49	0,02	0,26	0,76	-0,0045	0,0002
	0,001	0,45	0,16	0,39	0,16	-0,0002	0,0000
	0,002	0,44	0,24	0,39	0,16	-0,0054	0,0018
	0,003	0,44	0,32	0,38	0,16	-0,0046	0,0017
	0,004	0,42	0,40	0,37	0,16	-0,0085	0,0033
	0,005	0,44	0,48	0,39	0,16	-0,0033	0,0013
	0,006	0,44	0,56	0,39	0,16	-0,0064	0,0025
	0,007	0,45	0,64	0,40	0,16	-0,0051	0,0019
	0,008	0,45	0,72	0,39	0,16	-0,0085	0,0033
	0,009	0,43	0,80	0,38	0,15	-0,0079	0,0032
0,01	0,54	0,88	0,49	0,15	-0,0042	0,0013	

Z porovnání metod na rozsahu 220 mV kalibrátoru Fluke 5720A vyplývá, že nejlepších výsledků dosahuje potenciometrická metoda, což však není pravda. Hodnoty odchylek d_d a nejistot $U(d_d)$ potenciometrické metody jsou o hodně menší než u ostatních dvou metod. Vše bylo způsobeno tím, že nejistota měření potenciometrickou metodou na rozsahu 220 mV byla velmi malá. Příliš malá nejistota potenciometrické metody ovlivnila hodnotu váženého průměru, která velmi závisí na nejistotách jednotlivých metod. Výsledná referenční hodnota porovnání metod pak byla velmi blízká hodnotám naměřeným potenciometrickou metodou. Z grafického porovnání metod bylo zjištěno, že měření potenciometrickou metodou na rozsahu 220 mV kalibrátoru Fluke 5720A se hodně liší od přesnější přímé a RSM metody.

Aby bylo porovnání metod na rozsahu 220 mV kalibrátoru Fluke 5720A smysluplné, bylo nutné potenciometrickou metodu vyřadit z porovnání. Poté se nejpřesnější metodou stala přímá metoda.

Z výsledných hodnot porovnání metod na rozsahu 11 V kalibrátoru Fluke 5720A, viz Tabulka 8, byla nejpřesnější metodou určena referenční kroková metoda, jejíž odchylky d_r od referenční hodnoty porovnání dosahují nejnižších hodnot.

Tabulka 8 Výsledné hodnoty klíčového porovnání metod pro rozsah 11 V kalibrátoru Fluke 5720A

	U_n [V]	přímá m.		RSM		potenciom. m.	
		d_p [μV]	$U(d_p)$ [μV]	d_r [μV]	$U(d_r)$ [μV]	d_d [μV]	$U(d_d)$ [μV]
rozsah 11 V	-10	0,49	320,00	0,0010	0,0071	-0,30	2,04
	-9	1,78	284,00	0,0007	0,0097	-0,13	1,84
	-8	-2,10	248,00	-0,001	0,021	0,09	1,63
	-7	-0,63	212,00	-0,002	0,043	0,05	1,41
	-6	-0,36	176,00	-0,006	0,081	0,08	1,19
	-5	2,47	140,00	-0,02	0,14	0,10	0,95
	-4	-0,61	104,00	-0,07	0,23	0,22	0,71
	-3	-1,31	68,00	-0,09	0,36	0,11	0,46
	3	-0,91	148,00	-0,17	0,27	0,31	0,49
	4	0,25	184,00	-0,07	0,17	0,30	0,73
	5	-0,49	220,00	-0,07	0,10	0,65	0,97
	6	0,25	256,00	-0,04	0,06	0,84	1,20
	7	1,64	292,00	-0,02	0,03	1,09	1,42
	8	0,81	328,00	-0,01	0,01	1,03	1,63
	9	1,83	364,00	-0,009	0,012	1,37	1,84
	10	6,04	400,00	-0,011	0,012	1,77	2,04

ZÁVĚR

Diplomová práce splnila všechny body zadání. První část práce obsahuje popis tří měřicích metod pro měření velmi malých stejnosměrných napětí. Jedná se o metodu přímou, potenciometrickou a referenční krokovou metodu. Dále se teoretická část práce věnuje postupu vyhodnocení porovnání metod a uvádí přehled nejistot měření.

Praktická část práce se zabývá realizací měření malých stejnosměrných napětí jednotlivými metodami na externím pracovišti ČMI v Brně. Testovaným kalibrátorem byl zvolen přístroj Fluke 5720A. Práce popisuje postup zpracování naměřených dat získaných z několika měření každé metody, včetně výpočtu nejistot měření.

Poslední část práce se věnuje grafickému porovnání metod a na příkladě ukazuje postup procedury A klíčového porovnání použité při porovnání metod pro měření malých stejnosměrných napětí.

Porovnání metod proběhlo pro rozsahy 220 mV a 11 V kalibrátoru Fluke 5720A. Z klíčového porovnání metod vyplývá, že pro hodnoty nominálního napětí většího než 3 V obou polarit byla nejpřesnější referenční kroková metoda. Pro nominální napětí menší než 10 mV bylo nejpřesnější měření přímou metodou, která využívala nanovoltmetr Keithley 2182A.

Na rozsahu 0,01 V má nanovoltmetr Keithley 2182A stabilní zisk. Na rozsahu 10 V jsou hodnoty naměřené nanovoltmetrem Keithley 2182A velmi rozdílné, ale nejistota těchto měření daná především specifikacemi přístroje byla vysoká, takže měření přímou metodou bylo shodné v rámci nejistot s ostatními metodami. Pro měření hodnot nad 1 V by místo nanovoltmetru Keithley 2182A lépe posloužil například přístroj Fluke 8508A.

Nanovoltmetr Keithley 2182A by neměl být během měření vypínán. Vypnutí nanovoltmetru Keithley 2182A z důvodu organizace měření se projevilo na změně zisku rozsahu 0,01 V.

Pro nominální hodnoty větší než 3 V obou polarit bylo měření potenciometrickou metodou shodné v rámci nejistot s přímou i referenční krokovou metodou. Pro nominální napětí menší než 10 mV se výsledné hodnoty potenciometrické metody velmi lišily od ostatních metod. Bylo zjištěno, že s klesajícím napětím se potenciometrická metoda stále více liší od ostatních metod.

U hodnot nominálního napětí menšího než 10 mV obou polarit byla navíc nejistota potenciometrické metody příliš malá, proto nebylo měření shodné v rámci nejistot s některou z ostatních metod. Z důvodu velmi malé nejistoty musela být potenciometrická metoda vyřazena z klíčového porovnání metod pro nominální napětí menší než 10 mV. Čím menší hodnotu potenciometr měří, tím používá větší dělicí poměr a i jeho nejistota by měla být větší. Z těchto závěrů vyplývá, že software potenciometru neurčuje nejistotu správně.

Referenční kroková metoda poskytuje dobré výsledky v celém rozsahu hodnot. Nevýhodou metody RSM je nutnost ručně navazovat na Zenerovu referenci a velká časová náročnost, kdy jedno měření trvá přibližně 16 hodin. Potenciometrická metoda je rychlejší než referenční kroková metoda, ale výhledově by bylo nutné dohledat chyby při určování nejistoty.

LITERATURA

- [1] ŠÍRA, M. a J. STREIT. *Metrologie: Nový státní etalon stejnosměrného napětí ČR*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci a měření, 2013, roč. 22, č. 2, s. 2-7. ISSN 1210-3543.
- [2] JEANNERET, B. a S. P. BENZ. Application of the Josephson effect in electrical metrology. *The European Physical Journal Special Topics* [online]. 2009, vol. 172, issue 1, s. 181-206 [cit. 2014-10-14]. DOI: 10.1140/epjst/e2009-01050-6. Dostupné z: <http://link.springer.com>
- [3] BÁBEK, T. Automatizace měření Zenerových referencí. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 54 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Marie Havlíková, Ph.D.
- [4] SIRA, Martin, Murray EARLY, Jiri STREIT a Laurie CHRISTIAN. Comparison of the Reference Step Method with a MI 8000/8001 potentiometer. *2012 Conference on Precision electromagnetic Measurements* [online]. 2012, s. 540-541 [cit. 2014-11-05]. DOI: 10.1109/cpem.2012.6251042.
- [5] EARLY, Murray D., Martin SIRA, Bengt-Olof ANDERSSON, Laurie A. CHRISTIAN, Ove GUNNARSSON, Karl-Erik RYDLER a Jiri STREIT. A Simple Build-Up Method for the DC Voltage Scale of a Source. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* [online]. 2013, vol. 62, issue 6, s. 1600-1607 [cit. 2014-11-08]. DOI: 10.1109/tim.2012.2230734. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpls/absAll.jsp?arnumber=6251021&tag=1>
- [6] HONIG, Roman, Martin SIRA a Jiri STREIT. Use of the BVD for Traceability of Bipolar DC Voltage Scale from 1 mV Up to 1200 V. *NCSL International Workshop and Symposium*. San Antonio, Texas, USA, 2009.
- [7] FRANK, Petr. Výpočet rozšířené nejistoty a vyjadřování stupňů volnosti standardní nejistoty měření typu B. *Elektrorevue* [online]. 2005, č. 13 [cit. 2014-11-25]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/05013/index.html>
- [8] *Guide to Expression of Uncertainty in Measurement*. BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML, 2006, 137 s.
- [9] MEZINÁRODNÍ VÝBOR PRO VÁHY A MÍRY. Vzájemné uznávání státních etalonů a certifikátů kalibrace nebo měření, vydaných národními metrologickými instituty [online]. Paříž, 1999 [cit. 2014-12-06]. Dostupné z: <http://www.cmi.cz/index.php?wdc=137&lang=1>
- [10] COX, M G. The evaluation of key comparison data. *Metrologia* [online]. 2002, vol. 39, issue 6, s. 589-595 [cit. 2014-12-06]. DOI: 10.1088/0026-1394/39/6/10.
- [11] PALEŇČÁR, R., F. VDOLEČEK a M. HALAJ. Nejistoty v měření I: vyjadřování nejistot. *Automa* [online]. 2001, č. 7-8, s. 50-54 [cit. 2014-12-15]. Dostupné z: <http://automa.cz/download/au070150.pdf>
- [12] PALEŇČÁR, R., F. VDOLEČEK a M. HALAJ. Nejistoty v měření II: nejistoty přímých měření. *Automa* [online]. 2001, č. 10, s. 52-56 [cit. 2014-12-15]. Dostupné z: <http://automa.cz/download/au100152.pdf>

- [13] NOVOTNÝ, M. *Nejistota nepřímého měření určená metodou Monte Carlo*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 52s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Soňa Šedivá, Ph.D.
- [14] KOČÍ, R. *Nejistoty interferometrických měření*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 82s. Vedoucí diplomové práce byla Ing. Marie Havlíková, Ph.D.
- [15] *5700A/5720A Series II Multi-Function Calibrator: Service Manual* [online]. 2007 [cit. 2015-02-21]. Dostupné z: <http://us.flukecal.com/literature/product-manuals/5700a5720a-series-ii-service-manual>
- [16] STREIT, Jiří, Martin ŠÍRA a Stanislav MAŠLÁŇ. *ZÁVĚREČNÁ ZPRÁVA Č. 6011-TR-Z0001-13: Rozvoj primární a sekundární etalonáže stejnosměrných a střídavých elektrických veličin*. Český metrologický institut oblastní inspektorát Brno, 2013, 85 s.
- [17] Mgr. Martin Šíra, Ph.D. – ústní sdělení (Český metrologický institut, Okružní 772/31, 63800 Brno, Lesná) dne 19. března 2015.
- [18] Servis Manual. Model 2182 Nanovoltmetr. Cleveland, Ohio, U.S.A. : Keithley Instruments, Inc., 1998. 114 s.
- [19] *Fluke 8508A Reference Multimeter: Service Manual* [online]. 2004 [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: http://assets.fluke.com/manuals/8508A___smeng0100.pdf

SEZNAM PŘÍLOH

A	Kalibrace nanovoltmetru Keithley 2182A	75
A.1	Chyby a nejistoty nanovoltmetru pro rozsah 0.01 V	75
A.2	Chyby a nejistoty nanovoltmetru pro rozsah 10 V	76
A.3	Kalibrace nanovoltmetru - grafy	77
B	Data naměřená přímou metodou	79
C	Data naměřená referenční krokovou metodou	85
C.1	Hodnoty poměrů zisků rozsahů kalibrátoru Fluke 5720A a nejistoty	85
C.2	Hodnoty ofsetového napětí kalibrátoru Fluke 5720A a nejistoty	86
D	Data naměřená potenciometrickou metodou.....	87

A Kalibrace nanovoltmetru Keithley 2182A

A.1 Chyby a nejistoty nanovoltmetru pro rozsah 0.01 V

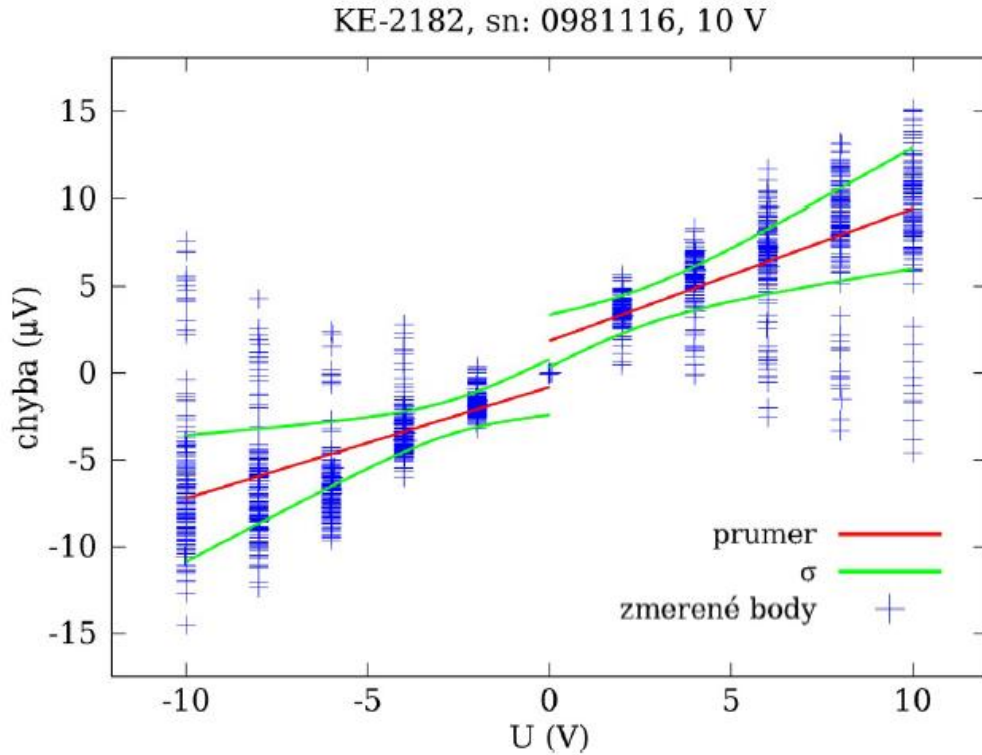
U [V]	chyba [V]	kombinovaná nejistota u_{cn} [V]
-0,010	2,40E-08	1,30E-08
-0,009	2,11E-08	1,29E-08
-0,008	1,83E-08	1,28E-08
-0,007	1,54E-08	1,27E-08
-0,006	1,26E-08	1,26E-08
-0,005	9,71E-09	1,26E-08
-0,004	6,86E-09	1,25E-08
-0,003	4,01E-09	1,25E-08
-0,002	1,16E-09	1,24E-08
-0,001	-1,68E-09	1,24E-08
0,000	-4,53E-09	1,24E-08
0,000	6,19E-09	1,24E-08
0,001	2,44E-09	1,24E-08
0,002	-1,31E-09	1,24E-08
0,003	-5,06E-09	1,24E-08
0,004	-8,81E-09	1,25E-08
0,005	-1,26E-08	1,26E-08
0,006	-1,63E-08	1,26E-08
0,007	-2,01E-08	1,27E-08
0,008	-2,38E-08	1,28E-08
0,009	-2,76E-08	1,29E-08
0,010	-3,13E-08	1,31E-08

A.2 Chyby a nejistoty nanovoltmetru pro rozsah 10 V

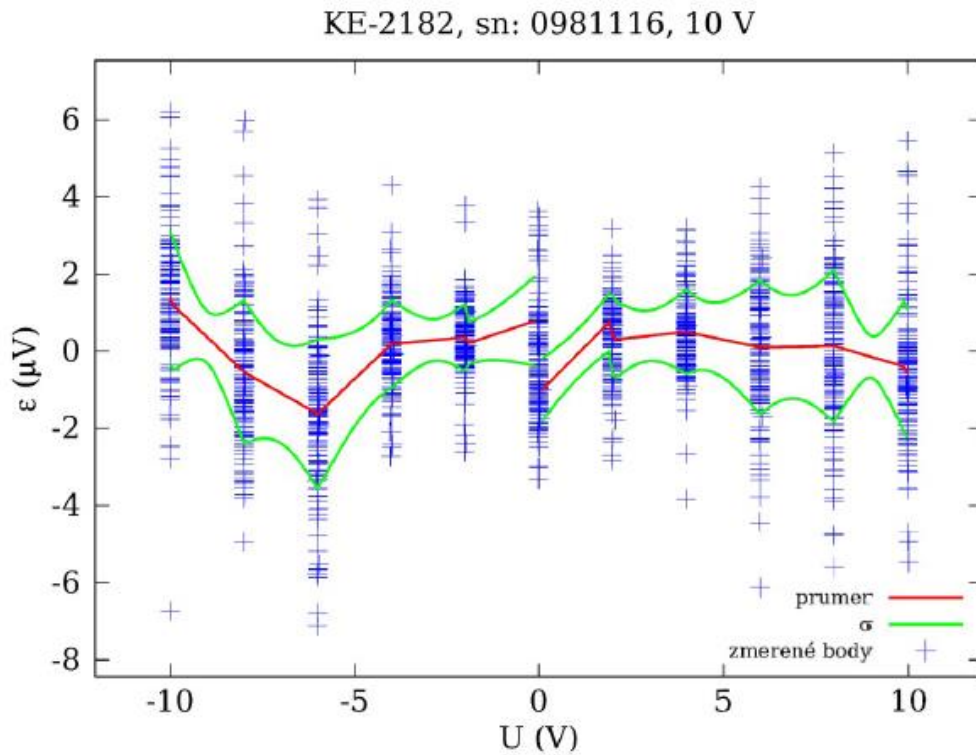
U [V]	chyba [V]	kombinovaná nejistota u_{cn} [V]
-10	-7,23E-06	3,19E-07
-9	-6,59E-06	2,79E-07
-8	-5,94E-06	2,40E-07
-7	-5,30E-06	2,02E-07
-6	-4,66E-06	1,65E-07
-5	-4,02E-06	1,32E-07
-4	-3,38E-06	1,05E-07
-3	-2,74E-06	9,00E-08
-2	-2,09E-06	9,31E-08
-1	-1,45E-06	1,13E-07
0	-8,10E-07	1,42E-07
0	1,86E-06	1,35E-07
1	2,62E-06	1,12E-07
2	3,38E-06	9,85E-08
3	4,14E-06	9,89E-08
4	4,90E-06	1,13E-07
5	5,66E-06	1,36E-07
6	6,42E-06	1,65E-07
7	7,18E-06	1,97E-07
8	7,94E-06	2,31E-07
9	8,70E-06	2,66E-07
10	9,46E-06	3,02E-07

A.3 Kalibrace nanovoltmetru - grafy

Závislost chyby nanovoltmetru Keithley 2182A na jeho napětí pro rozsah 10 V

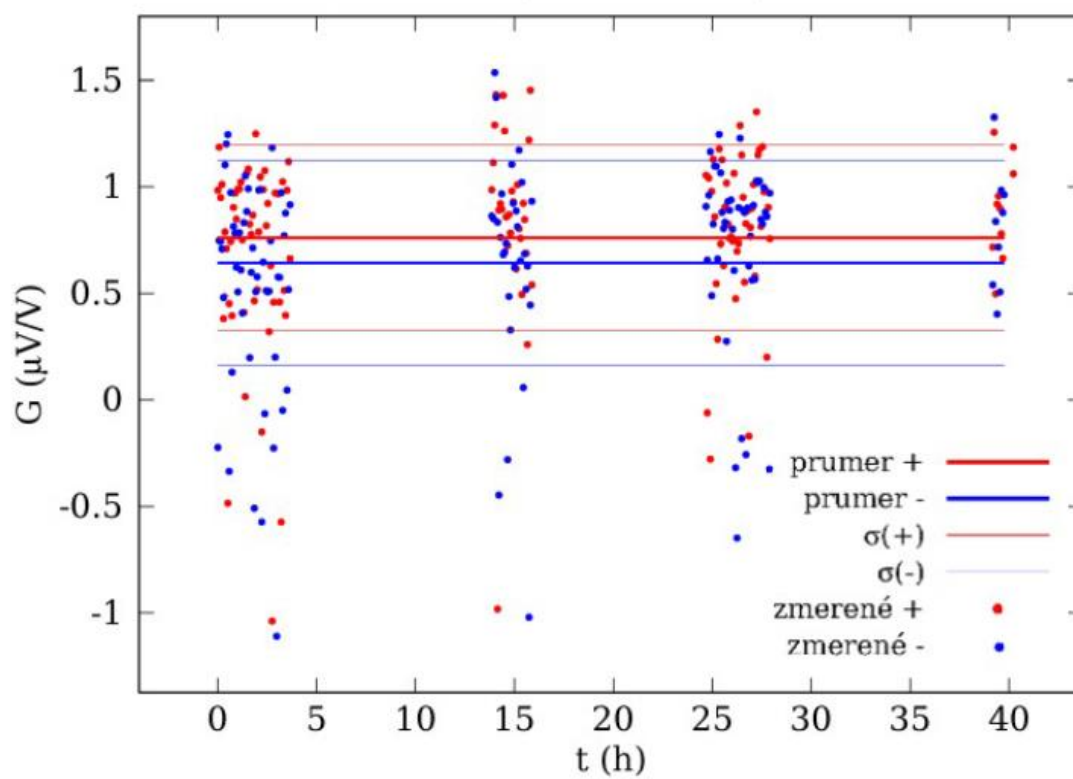


Závislost nelinearity ε nanovoltmetru Keithley 2182A na jeho napětí pro rozsah 10V



Závislost zisků G nanovoltmetru Keithley 2182A na čase pro rozsah 10 V

KE-2182, sn: 0981116, 10 V



B Data naměřená přímou metodou

Data naměřená přímou metodou, 1. měření, rozsah kalibrátoru 0.22 V, rozsah nanovoltmetru 0.01 V

U_n [V]	U_1 [V]	U_2 [V]	U_3 [V]	U_4 [V]	U_5 [V]	U_6 [V]	U_7 [V]	U_8 [V]	U_9 [V]	U_{10} [V]	U_{av} [V]
-0,010	-0,00999999	-0,00999998	-0,01000001	-0,01000000	-0,00999999	-0,00999998	-0,01000001	-0,01000000	-0,00999999	-0,00999997	-0,00999999
-0,009	-0,00899995	-0,00899995	-0,00899996	-0,00899995	-0,00899996	-0,00899995	-0,00899996	-0,00899996	-0,00899995	-0,00899995	-0,00899995
-0,008	-0,00799999	-0,00799997	-0,00799997	-0,00799999	-0,00799997	-0,00799998	-0,00799997	-0,00799997	-0,00799997	-0,00799995	-0,00799997
-0,007	-0,00699999	-0,00699997	-0,00699996	-0,00699996	-0,00699998	-0,00699996	-0,00699995	-0,00699997	-0,00699996	-0,00699996	-0,00699996
-0,006	-0,00599996	-0,00599996	-0,00599996	-0,00599996	-0,00599996	-0,00599996	-0,00599993	-0,00599995	-0,00599996	-0,00599990	-0,00599995
-0,005	-0,00499998	-0,00499996	-0,00500000	-0,00499998	-0,00499996	-0,00499998	-0,00499995	-0,00499995	-0,00499997	-0,00499997	-0,00499997
-0,004	-0,00399995	-0,00399995	-0,00399994	-0,00399995	-0,00399995	-0,00399993	-0,00399993	-0,00399994	-0,00399994	-0,00399991	-0,00399994
-0,003	-0,00299996	-0,00299997	-0,00299994	-0,00299997	-0,00299993	-0,00299995	-0,00299997	-0,00299997	-0,00299998	-0,00299996	-0,00299996
-0,002	-0,00199995	-0,00199994	-0,00199992	-0,00199992	-0,00199994	-0,00199993	-0,00199993	-0,00199991	-0,00199995	-0,00199993	-0,00199993
-0,001	-0,00099995	-0,00099997	-0,00099994	-0,00099994	-0,00099993	-0,00099994	-0,00099996	-0,00099992	-0,00099996	-0,00099995	-0,00099995
0,000	0,00000000	0,00000001	0,00000001	-0,00000001	-0,00000002	-0,00000003	-0,00000001	-0,00000001	0,00000001	-0,00000001	0,00000000
0,001	0,00100000	0,00100000	0,00099999	0,00100000	0,00100000	0,00099999	0,00100000	0,00099998	0,00100000	0,00100000	0,00100000
0,002	0,00200000	0,00199997	0,00200002	0,00200000	0,00200002	0,00199999	0,00199999	0,00200000	0,00200001	0,00200000	0,00200000
0,003	0,00300001	0,00300001	0,00299998	0,00299999	0,00299998	0,00300000	0,00300001	0,00299998	0,00300001	0,00299998	0,00300000
0,004	0,00399999	0,00400000	0,00400000	0,00400000	0,00399999	0,00399999	0,00400000	0,00399999	0,00400000	0,00400004	0,00400000
0,005	0,00500000	0,00500002	0,00500000	0,00500001	0,00500002	0,00500004	0,00500003	0,00500001	0,00500002	0,00500002	0,00500002
0,006	0,00600002	0,00600001	0,00600001	0,00600000	0,00600000	0,00600001	0,00600001	0,00600001	0,00599999	0,00600003	0,00600001
0,007	0,00700002	0,00700004	0,00700002	0,00700002	0,00700002	0,00700006	0,00700004	0,00700001	0,00699999	0,00700000	0,00700002
0,008	0,00800005	0,00800003	0,00800002	0,00800005	0,00800003	0,00800001	0,00800002	0,00800003	0,00800002	0,00800003	0,00800003
0,009	0,00900004	0,00900003	0,00900005	0,00900003	0,00900005	0,00900003	0,00900004	0,00900007	0,00900005	0,00900005	0,00900004
0,010	0,01000006	0,01000005	0,01000003	0,01000004	0,01000003	0,01000003	0,01000003	0,01000004	0,01000004	0,01000006	0,01000004

Data naměřená přímou metodou, 1. měření, rozsah kalibrátoru 11 V, rozsah nanovoltmetru 10 V

U_n [V]	U_1 [V]	U_2 [V]	U_3 [V]	U_4 [V]	U_5 [V]	U_6 [V]	U_7 [V]	U_8 [V]	U_9 [V]	U_{10} [V]	U_{av} [V]
-10	-9,99998090	-9,99997940	-9,99998030	-9,99998120	-9,99998200	-9,99998350	-9,99998340	-9,99998190	-9,99998060	-9,99998150	-9,99998147
-9	-8,99997570	-8,99997540	-8,99997560	-8,99997690	-8,99997700	-8,99997760	-8,99997870	-8,99998070	-8,99998180	-8,99998080	-8,99997802
-8	-7,99998360	-7,99998270	-7,99998380	-7,99998390	-7,99998490	-7,99998570	-7,99998280	-7,99998480	-7,99998540	-7,99998590	-7,99998435
-7	-6,99998280	-6,99998080	-6,99998090	-6,99997870	-6,99997810	-6,99997810	-6,99998160	-6,99998510	-6,99998520	-6,99998380	-6,99998151
-6	-5,99998710	-5,99998710	-5,99998690	-5,99998670	-5,99998550	-5,99998650	-5,99998580	-5,99998810	-5,99998850	-5,99998850	-5,99998707
-5	-4,99998970	-4,99998920	-4,99998990	-4,99998990	-4,99998930	-4,99998810	-4,99998620	-4,99998730	-4,99998780	-4,99998790	-4,99998853
-4	-3,99999430	-3,99999430	-3,99999430	-3,99999460	-3,99999500	-3,99999440	-3,99999410	-3,99999390	-3,99999390	-3,99999390	-3,99999427
-3	-2,99999550	-2,99999650	-2,99999640	-2,99999660	-2,99999630	-2,99999680	-2,99999700	-2,99999640	-2,99999660	-2,99999700	-2,99999651
-2	-1,99999820	-1,99999810	-1,99999820	-1,99999760	-1,99999770	-1,99999670	-1,99999740	-1,99999800	-1,99999860	-1,99999830	-1,99999788
-1	-0,99999903	-0,99999757	-0,99999830	-0,99999830	-0,99999921	-0,99999939	-0,99999876	-0,99999828	-0,99999801	-0,99999901	-0,99999859
0	-0,00000003	-0,00000076	-0,00000030	-0,00000076	-0,00000057	-0,00000094	-0,00000076	-0,00000085	-0,00000057	-0,00000103	-0,00000066
1	0,99999748	0,99999729	0,99999811	0,99999866	0,99999829	0,99999802	0,99999847	0,99999838	0,99999829	0,99999783	0,99999808
2	1,99999450	1,99999430	1,99999470	1,99999360	1,99999430	1,99999450	1,99999380	1,99999410	1,99999420	1,99999440	1,99999424
3	2,99999150	2,99999060	2,99999250	2,99999210	2,99999300	2,99999150	2,99999160	2,99999090	2,99999090	2,99999140	2,99999160
4	3,99999000	3,99998920	3,99998930	3,99998900	3,99998920	3,99998990	3,99998980	3,99999020	3,99999050	3,99999040	3,99998975
5	4,99998490	4,99998610	4,99998570	4,99998350	4,99998360	4,99998370	4,99998300	4,99998540	4,99998540	4,99998570	4,99998470
6	5,99998640	5,99998620	5,99998550	5,99998500	5,99998420	5,99998380	5,99998460	5,99998540	5,99998550	5,99998510	5,99998517
7	6,99998350	6,99998450	6,99998440	6,99998380	6,99998390	6,99998380	6,99998310	6,99998290	6,99998450	6,99998600	6,99998404
8	7,99998010	7,99997940	7,99997730	7,99997500	7,99997720	7,99997990	7,99997850	7,99997840	7,99997860	7,99997820	7,99997826
9	8,99998080	8,99997880	8,99997950	8,99997820	8,99997780	8,99997810	8,99997870	8,99998140	8,99998210	8,99998320	8,99997986
10	9,99998530	9,99998690	9,99998710	9,99998690	9,99998620	9,99998580	9,99998580	9,99998630	9,99998800	9,99998630	9,99998646

Data naměřená přímou metodou, 2. měření, rozsah kalibrátoru 0.22 V, rozsah nanovoltmetru 0.01 V

U_n [V]	U₁ [V]	U₂ [V]	U₃ [V]	U₄ [V]	U₅ [V]	U₆ [V]	U₇ [V]	U₈ [V]	U₉ [V]	U₁₀ [V]	U_{av} [V]
-0,010	-0,00999988	-0,00999987	-0,00999987	-0,00999986	-0,00999985	-0,00999987	-0,00999987	-0,00999988	-0,00999987	-0,00999984	-0,00999987
-0,009	-0,00899985	-0,00899985	-0,00899986	-0,00899985	-0,00899987	-0,00899987	-0,00899985	-0,00899987	-0,00899987	-0,00899986	-0,00899986
-0,008	-0,00799999	-0,00799987	-0,00799987	-0,00799988	-0,00799988	-0,00799985	-0,00799984	-0,00799989	-0,00799984	-0,00799985	-0,00799987
-0,007	-0,00699987	-0,00699987	-0,00699986	-0,00699999	-0,00699988	-0,00699988	-0,00699987	-0,00699985	-0,00699986	-0,00699987	-0,00699987
-0,006	-0,00599987	-0,00599985	-0,00599989	-0,00599987	-0,00599986	-0,00599987	-0,00599989	-0,00599987	-0,00599989	-0,00599987	-0,00599987
-0,005	-0,00499987	-0,00499986	-0,00499989	-0,00499988	-0,00499986	-0,00499989	-0,00499989	-0,00499989	-0,00499991	-0,00499999	-0,00499988
-0,004	-0,00399988	-0,00399988	-0,00399999	-0,00399989	-0,00399991	-0,00399989	-0,00399999	-0,00399989	-0,00399987	-0,00399991	-0,00399989
-0,003	-0,00299991	-0,00299991	-0,00299991	-0,00299989	-0,00299999	-0,00299989	-0,00299999	-0,00299992	-0,00299999	-0,00299991	-0,00299999
-0,002	-0,00199991	-0,00199999	-0,00199993	-0,00199999	-0,00199993	-0,00199992	-0,00199999	-0,00199992	-0,00199992	-0,00199999	-0,00199991
-0,001	-0,00099991	-0,00099992	-0,00099992	-0,00099993	-0,00099991	-0,00099992	-0,00099993	-0,00099999	-0,00099992	-0,00099994	-0,00099992
0,000	0,00000005	0,00000008	0,00000006	0,00000005	0,00000004	0,00000004	0,00000009	0,00000005	0,00000006	0,00000005	0,00000006
0,001	0,00100004	0,00100006	0,00100005	0,00100006	0,00100006	0,00100006	0,00100005	0,00100007	0,00100006	0,00100004	0,00100005
0,002	0,00200008	0,00200006	0,00200004	0,00200005	0,00200008	0,00200006	0,00200004	0,00200005	0,00200005	0,00200006	0,00200006
0,003	0,00300004	0,00300005	0,00300005	0,00300005	0,00300006	0,00300008	0,00300004	0,00300006	0,00300006	0,00300006	0,00300005
0,004	0,00400007	0,00400005	0,00400004	0,00400004	0,00400005	0,00400007	0,00400003	0,00400006	0,00400005	0,00400006	0,00400005
0,005	0,00500006	0,00500005	0,00500005	0,00500005	0,00500006	0,00500004	0,00500006	0,00500005	0,00500005	0,00500004	0,00500005
0,006	0,00600006	0,00600008	0,00600006	0,00600004	0,00600005	0,00600006	0,00600003	0,00600005	0,00600004	0,00600004	0,00600005
0,007	0,00700004	0,00700005	0,00700005	0,00700005	0,00700005	0,00700005	0,00700006	0,00700006	0,00700004	0,00700008	0,00700005
0,008	0,00800003	0,00800003	0,00800005	0,00800005	0,00800003	0,00800002	0,00800002	0,00800005	0,00800004	0,00800004	0,00800003
0,009	0,00900004	0,00900001	0,00900004	0,00900006	0,00900003	0,00900002	0,00900004	0,00900004	0,00900003	0,00900005	0,00900004
0,010	0,01000006	0,01000003	0,01000004	0,01000003	0,01000001	0,01000005	0,01000001	0,01000004	0,01000001	0,01000005	0,01000003

Data naměřená přímou metodou, 2. měření, rozsah kalibrátoru 11 V, rozsah nanovoltmetru 10 V

U_n [V]	U_1 [V]	U_2 [V]	U_3 [V]	U_4 [V]	U_5 [V]	U_6 [V]	U_7 [V]	U_8 [V]	U_9 [V]	U_{10} [V]	U_{av} [V]
-10	-9,99998790	-9,99998840	-9,99998710	-9,99998650	-9,99998610	-9,99998720	-9,99998970	-9,99998980	-9,99999080	-9,99999160	-9,99998851
-9	-8,99999250	-8,99998980	-8,99998740	-8,99998670	-8,99998580	-8,99999080	-8,99999030	-8,99998970	-8,99999200	-8,99999360	-8,99998986
-8	-7,99999520	-7,99999470	-7,99999560	-7,99999580	-7,99999410	-7,99999520	-7,99999620	-7,99999520	-7,99999290	-7,99999350	-7,99999484
-7	-6,99999630	-6,99999710	-6,99999500	-6,99999360	-6,99999240	-6,99999140	-6,99999170	-6,99999450	-6,99999240	-6,99998990	-6,99999343
-6	-5,99999370	-5,99999450	-5,99999400	-5,99999340	-5,99999270	-5,99999240	-5,99999230	-5,99999010	-5,99999190	-5,99999280	-5,99999278
-5	-4,99999160	-4,99999110	-4,99999130	-4,99999060	-4,99998830	-4,99998720	-4,99998850	-4,99999040	-4,99998970	-4,99998840	-4,99998971
-4	-3,99999540	-3,99999590	-3,99999600	-3,99999540	-3,99999520	-3,99999600	-3,99999680	-3,99999700	-3,99999590	-3,99999550	-3,99999591
-3	-2,99999620	-2,99999610	-2,99999540	-2,99999510	-2,99999530	-2,99999740	-2,99999700	-2,99999690	-2,99999760	-2,99999710	-2,99999641
-2	-1,99999870	-1,99999810	-1,99999770	-1,99999760	-1,99999740	-1,99999780	-1,99999840	-1,99999720	-1,99999760	-1,99999680	-1,99999773
-1	-0,99999870	-0,99999870	-0,99999915	-0,99999861	-0,99999879	-0,99999833	-0,99999806	-0,99999733	-0,99999824	-0,99999851	-0,99999844
0	-0,00000003	0,00000033	-0,00000003	-0,00000076	-0,00000021	-0,00000057	0,00000061	0,00000033	-0,00000003	-0,00000030	-0,00000007
1	0,99999678	0,99999678	0,99999705	0,99999696	0,99999642	0,99999686	0,99999668	0,99999641	0,99999541	0,99999631	0,99999657
2	1,99999370	1,99999240	1,99999300	1,99999270	1,99999340	1,99999330	1,99999260	1,99999340	1,99999290	1,99999300	1,99999304
3	2,99999260	2,99999260	2,99999250	2,99999340	2,99999280	2,99999400	2,99999230	2,99999200	2,99999350	2,99999330	2,99999290
4	3,99999590	3,99999400	3,99999240	3,99999200	3,99999290	3,99999300	3,99999430	3,99999320	3,99999390	3,99999320	3,99999348
5	4,99999160	4,99999230	4,99999190	4,99999120	4,99999090	4,99999210	4,99999390	4,99999290	4,99999380	4,99999360	4,99999242
6	5,99999080	5,99999220	5,99999210	5,99999100	5,99999040	5,99999140	5,99999150	5,99999220	5,99999180	5,99999170	5,99999151
7	6,99999390	6,99999280	6,99999200	6,99999240	6,99999150	6,99999100	6,99999120	6,99999440	6,99999520	6,99999270	6,99999271
8	7,99999250	7,99999010	7,99998840	7,99999060	7,99999150	7,99999130	7,99999000	7,99999050	7,99999000	7,99998730	7,99999022
9	8,99999130	8,99999000	8,99999020	8,99998950	8,99999100	8,99998980	8,99998880	8,99999000	8,99998960	8,99999080	8,99999010
10	9,99998810	9,99998880	9,99998850	9,99999010	9,99999010	9,99999110	9,99998860	9,99998900	9,99998930	9,99998720	9,99998908

Data naměřená přímou metodou, 3. měření, rozsah kalibrátoru 0.22 V, rozsah nanovoltmetru 0.01 V

U_n [V]	U₁ [V]	U₂ [V]	U₃ [V]	U₄ [V]	U₅ [V]	U₆ [V]	U₇ [V]	U₈ [V]	U₉ [V]	U₁₀ [V]	U_{av} [V]
-0,010	-0,00999990	-0,00999989	-0,00999988	-0,00999988	-0,00999990	-0,00999989	-0,00999990	-0,00999989	-0,00999990	-0,00999991	-0,00999989
-0,009	-0,00899989	-0,00899988	-0,00899987	-0,00899986	-0,00899991	-0,00899987	-0,00899988	-0,00899985	-0,00899989	-0,00899986	-0,00899987
-0,008	-0,00799987	-0,00799986	-0,00799986	-0,00799987	-0,00799987	-0,00799987	-0,00799985	-0,00799990	-0,00799987	-0,00799987	-0,00799987
-0,007	-0,00699988	-0,00699989	-0,00699989	-0,00699987	-0,00699988	-0,00699988	-0,00699986	-0,00699988	-0,00699987	-0,00699987	-0,00699988
-0,006	-0,00599988	-0,00599985	-0,00599988	-0,00599986	-0,00599988	-0,00599987	-0,00599987	-0,00599987	-0,00599987	-0,00599987	-0,00599987
-0,005	-0,00499989	-0,00499986	-0,00499988	-0,00499988	-0,00499988	-0,00499988	-0,00499988	-0,00499988	-0,00499988	-0,00499987	-0,00499988
-0,004	-0,00399989	-0,00399988	-0,00399989	-0,00399988	-0,00399988	-0,00399990	-0,00399990	-0,00399988	-0,00399991	-0,00399988	-0,00399989
-0,003	-0,00299990	-0,00299987	-0,00299990	-0,00299988	-0,00299989	-0,00299990	-0,00299990	-0,00299990	-0,00299990	-0,00299989	-0,00299989
-0,002	-0,00199991	-0,00199989	-0,00199988	-0,00199986	-0,00199990	-0,00199992	-0,00199991	-0,00199988	-0,00199988	-0,00199989	-0,00199989
-0,001	-0,00099988	-0,00099991	-0,00099990	-0,00099989	-0,00099990	-0,00099989	-0,00099988	-0,00099990	-0,00099989	-0,00099991	-0,00099989
0,000	0,00000010	0,00000006	0,00000009	0,00000010	0,00000008	0,00000007	0,00000007	0,00000009	0,00000008	0,00000009	0,00000008
0,001	0,00100008	0,00100007	0,00100006	0,00100005	0,00100005	0,00100007	0,00100006	0,00100007	0,00100011	0,00100006	0,00100007
0,002	0,00200009	0,00200007	0,00200010	0,00200006	0,00200008	0,00200008	0,00200007	0,00200007	0,00200006	0,00200006	0,00200007
0,003	0,00300009	0,00300008	0,00300007	0,00300007	0,00300006	0,00300009	0,00300008	0,00300010	0,00300007	0,00300007	0,00300008
0,004	0,00400007	0,00400006	0,00400006	0,00400007	0,00400007	0,00400006	0,00400009	0,00400008	0,00400010	0,00400006	0,00400007
0,005	0,00500008	0,00500008	0,00500008	0,00500008	0,00500008	0,00500006	0,00500007	0,00500010	0,00500009	0,00500009	0,00500008
0,006	0,00600006	0,00600006	0,00600007	0,00600009	0,00600008	0,00600008	0,00600008	0,00600007	0,00600008	0,00600007	0,00600007
0,007	0,00700006	0,00700009	0,00700007	0,00700008	0,00700008	0,00700008	0,00700007	0,00700005	0,00700008	0,00700009	0,00700008
0,008	0,00800009	0,00800008	0,00800006	0,00800008	0,00800008	0,00800010	0,00800009	0,00800007	0,00800008	0,00800008	0,00800008
0,009	0,00900006	0,00900009	0,00900010	0,00900009	0,00900007	0,00900005	0,00900010	0,00900011	0,00900008	0,00900007	0,00900008
0,010	0,01000008	0,01000010	0,01000011	0,01000009	0,01000009	0,01000008	0,01000007	0,01000008	0,01000009	0,01000008	0,01000009

Data naměřená přímou metodou, 3. měření, rozsah kalibrátoru 11 V, rozsah nanovoltmetru 10 V

U_n [V]	U₁ [V]	U₂ [V]	U₃ [V]	U₄ [V]	U₅ [V]	U₆ [V]	U₇ [V]	U₈ [V]	U₉ [V]	U₁₀ [V]	U_{av} [V]
-10	-9,99998310	-9,99998350	-9,99998310	-9,99998190	-9,99997980	-9,99997940	-9,99997870	-9,99997770	-9,99997890	-9,99997920	-9,99998053
-9	-8,99998330	-8,99998460	-8,99998600	-8,99998510	-8,99998230	-8,99998090	-8,99998320	-8,99998400	-8,99998370	-8,99998380	-8,99998369
-8	-7,99998680	-7,99998600	-7,99998700	-7,99998940	-7,99999000	-7,99999090	-7,99998930	-7,99999010	-7,99999030	-7,99999010	-7,99998899
-7	-6,99999360	-6,99999450	-6,99999380	-6,99999350	-6,99999360	-6,99999400	-6,99999300	-6,99999300	-6,99999370	-6,99999480	-6,99999375
-6	-5,99999440	-5,99999350	-5,99999220	-5,99999200	-5,99999270	-5,99999200	-5,99999220	-5,99999170	-5,99999400	-5,99999460	-5,99999293
-5	-4,99999180	-4,99999130	-4,99999120	-4,99999050	-4,99999040	-4,99999120	-4,99999140	-4,99999050	-4,99999040	-4,99999050	-4,99999092
-4	-3,99999290	-3,99999240	-3,99999220	-3,99999370	-3,99999470	-3,99999370	-3,99999330	-3,99999300	-3,99999210	-3,99999190	-3,99999299
-3	-2,99999660	-2,99999710	-2,99999590	-2,99999750	-2,99999700	-2,99999670	-2,99999710	-2,99999800	-2,99999810	-2,99999830	-2,99999723
-2	-1,99999750	-1,99999770	-1,99999770	-1,99999790	-1,99999680	-1,99999770	-1,99999740	-1,99999670	-1,99999660	-1,99999680	-1,99999728
-1	-0,99999824	-0,99999815	-0,99999860	-0,99999770	-0,99999824	-0,99999906	-0,99999770	-0,99999815	-0,99999796	-0,99999878	-0,99999826
0	0,00000024	-0,00000057	0,00000042	0,00000052	-0,00000030	-0,00000003	0,00000015	-0,00000021	-0,00000012	-0,00000066	-0,00000006
1	0,99999612	0,99999612	0,99999603	0,99999739	0,99999685	0,99999685	0,99999703	0,99999658	0,99999722	0,99999704	0,99999672
2	1,99999310	1,99999280	1,99999250	1,99999300	1,99999300	1,99999310	1,99999350	1,99999280	1,99999310	1,99999300	1,99999299
3	2,99999220	2,99999180	2,99999240	2,99999190	2,99999160	2,99999090	2,99999070	2,99998960	2,99998960	2,99998930	2,99999100
4	3,99998850	3,99998930	3,99998950	3,99999010	3,99999110	3,99999010	3,99999000	3,99999010	3,99999020	3,99999030	3,99998992
5	4,99998710	4,99998760	4,99998710	4,99998790	4,99998720	4,99998810	4,99998920	4,99998940	4,99998950	4,99998920	4,99998823
6	5,99998420	5,99998380	5,99998570	5,99998700	5,99998700	5,99998760	5,99998630	5,99998450	5,99998360	5,99998320	5,99998529
7	6,99998230	6,99998160	6,99998190	6,99998430	6,99998410	6,99998410	6,99998530	6,99998540	6,99998560	6,99998320	6,99998378
8	7,99998360	7,99998400	7,99998450	7,99998400	7,99998470	7,99998450	7,99998420	7,99998290	7,99998360	7,99998370	7,99998397
9	8,99997930	8,99997800	8,99997910	8,99998150	8,99998140	8,99998150	8,99998150	8,99998050	8,99997970	8,99997710	8,99997996
10	9,99998110	9,99998390	9,99998380	9,99998490	9,99998400	9,99998150	9,99997910	9,99997710	9,99997920	9,99998000	9,99998146

C Data naměřená referenční krokovou metodou

C.1 Hodnoty poměrů zisků rozsahů kalibrátoru Fluke 5720A a nejistoty

1. měření

poměr zisků rozsahů	Kladná polarita		Záporná polarita	
	K [ppm]	u(K) [ppm]	K [ppm]	u(K) [ppm]
1:0.1	1,28	0,35	1,45	0,17
10:1	-0,68	0,08	-0,77	0,10

2. měření

poměr zisků rozsahů	Kladná polarita		Záporná polarita	
	K [ppm]	u(K) [ppm]	K [ppm]	u(K) [ppm]
1:0.1	1,35	0,43	1,60	0,40
10:1	-0,68	0,08	-0,71	0,10

3. měření

poměr zisků rozsahů	Kladná polarita		Záporná polarita	
	K [ppm]	u(K) [ppm]	K [ppm]	u(K) [ppm]
1:0.1	1,23	0,29	1,34	0,35
10:1	-0,81	0,21	-0,80	0,09

4. měření

poměr zisků rozsahů	Kladná polarita		Záporná polarita	
	K [ppm]	u(K) [ppm]	K [ppm]	u(K) [ppm]
1:0.1	1,38	0,36	1,50	0,39
10:1	-0,92	0,22	-0,84	0,08

C.2 Hodnoty ofsetového napětí kalibrátoru Fluke 5720A a nejistoty

1. měření

rozsah	Kladná polarita		Záporná polarita	
	U_{ofs} [μ V]	$u(U_{ofs})$ [μ V]	U_{ofs} [μ V]	$u(U_{ofs})$ [μ V]
1	-0,01	0,05	-0,13	0,33
10	0,01	0,27	-1,19	0,28

2. měření

rozsah	Kladná polarita		Záporná polarita	
	U_{ofs} [μ V]	$u(U_{ofs})$ [μ V]	U_{ofs} [μ V]	$u(U_{ofs})$ [μ V]
1	0,00	0,07	-0,16	0,33
10	0,03	0,32	-1,22	0,39

3. měření

rozsah	Kladná polarita		Záporná polarita	
	U_{ofs} [μ V]	$u(U_{ofs})$ [μ V]	U_{ofs} [μ V]	$u(U_{ofs})$ [μ V]
1	-0,04	0,05	-0,16	0,32
10	-0,05	0,33	-1,31	0,20

4. měření

rozsah	Kladná polarita		Záporná polarita	
	U_{ofs} [μ V]	$u(U_{ofs})$ [μ V]	U_{ofs} [μ V]	$u(U_{ofs})$ [μ V]
1	-0,01	0,08	-0,19	0,38
10	-0,02	0,19	-1,21	0,22

D Data naměřená potenciometrickou metodou

hodnota měřeného napětí	změřené napětí U_m [V]	rozšířená nejistota U [ppm]	čas od začátku všech měření [h]
N10mV	-0,010000410	1,374583864	24,98
N10mV	-0,010000441	1,312116034	65,68
N10mV	-0,010000459	1,035637788	125,10
N9mV	-0,009000387	2,378410390	34,87
N9mV	-0,009000366	2,026665645	135,00
N8mV	-0,008000385	2,657823763	33,53
N8mV	-0,008000372	2,339023087	134,65
N7mV	-0,007000431	2,472764350	34,20
N7mV	-0,007000401	2,215452191	134,32
N6mV	-0,006000426	3,068711492	33,87
N6mV	-0,006000401	2,625254759	133,98
N5mV	-0,005000433	2,484932177	34,53
N5mV	-0,005000413	2,628352418	133,65
N4mV	-0,004000377	4,695098416	33,20
N4mV	-0,004000399	3,468049552	133,48
N3mV	-0,003000390	4,432460657	32,87
N3mV	-0,003000402	3,610828600	133,98
N2mV	-0,002000390	6,522964661	32,53
N2mV	-0,002000411	5,607639425	133,65
N1mV	-0,001000424	2,505720038	32,20
N1mV	-0,001000425	2,516287242	133,32
1mV	0,000999587	2,300676623	32,03
1mV	0,000999590	2,259508830	133,15
2mV	0,001999586	5,462137983	32,37
2mV	0,001999594	7,708809122	133,48
3mV	0,002999604	3,969890882	32,70
3mV	0,002999579	5,159838929	133,82
4mV	0,003999584	4,227390316	33,03
4mV	0,003999615	5,565672603	134,15
5mV	0,004999573	2,771579334	33,37
5mV	0,004999599	2,138251210	134,48
6mV	0,005999553	3,263870478	34,70
6mV	0,005999605	3,211953322	134,82

hodnota měřeného napětí	změřené napětí U_m [V]	rozšířená nejistota U [ppm]	čas od začátku všech měření [h]
7mV	0,006999559	2,434545743	34,03
7mV	0,006999576	2,490099950	135,15
8mV	0,007999539	2,555292127	34,37
8mV	0,007999588	2,844003897	135,48
9mV	0,008999556	2,216352039	34,70
9mV	0,008999610	2,502621920	135,82
10mV	0,009999475	1,444559240	24,82
10mV	0,009999446	1,433255481	42,52
10mV	0,009999493	1,032630078	124,93
N1V	-1,000000073	0,207737083	26,68
N1V	-0,999999844	0,207178712	43,38
N1V	-0,999999718	0,207519406	126,80
N2V	-2,000000169	0,205597390	27,35
N2V	-2,000000263	0,205647851	44,05
N2V	-2,000000636	0,205890553	127,48
N3V	-2,999998353	0,205699146	27,70
N3V	-2,999998174	0,205609435	44,38
N3V	-2,999997550	0,205470290	127,82
N4 V	-3,999996920	0,205473825	35,20
N4 V	-3,999996942	0,205427296	136,32
N5V	-4,999996268	0,205260001	28,03
N5V	-4,999995913	0,205255124	44,73
N5V	-4,999996160	0,205262692	128,32
N6V	-5,999995085	0,205344876	36,53
N6V	-5,999995192	0,205343618	136,67
N7V	-6,999994234	0,205320661	28,37
N7V	-6,999993490	0,205266832	45,23
N7V	-6,999994812	0,205276740	128,48
N8V	-7,999993456	0,205221946	36,87
N8V	-7,999992810	0,205296706	137,00
N9V	-8,999992311	0,205249819	37,22
N9V	-8,999992418	0,205262525	137,33
N10V	-9,999991432	0,205315407	28,70
N10V	-9,999991488	0,205294071	45,40
N10V	-9,999991677	0,205229958	128,83

hodnota měřeného napětí	změřené napětí U_m [V]	rozšířená nejistota U [ppm]	čas od začátku všech měření [h]
1V	0,999999076	0,207006519	26,52
1V	0,999999330	0,206999030	43,22
1V	0,999999501	0,207976077	126,63
2V	1,999999408	0,205666870	27,18
2V	1,999999347	0,205694890	43,88
2V	2,000000161	0,205773102	127,32
3V	2,999997419	0,205507405	27,52
3V	2,999997298	0,205574747	44,22
3V	2,999996891	0,205819552	127,65
4V	3,999995993	0,205460109	35,03
4V	3,999996012	0,205550710	137,32
5V	4,999995448	0,205299430	27,87
5V	4,999994969	0,205297023	44,57
5V	4,999995350	0,205335385	127,98
6V	5,999994208	0,205417220	35,37
6V	5,999994447	0,205422799	137,50
7V	6,999993504	0,205299904	28,20
7V	6,999992722	0,205436319	44,90
7V	6,999994206	0,205390731	128,32
8V	7,999992663	0,205315378	35,70
8V	7,999991948	0,205335936	137,83
9V	8,999991620	0,205329822	36,05
9V	8,999991478	0,205522936	138,17
10V	9,999991048	0,205264951	28,53
10V	9,999990697	0,205297550	45,23
10V	9,999990829	0,205312541	128,65