

UNIVERZITA PALACKÉHO V OLMOUCI
PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA
KATEDRA EXPERIMENTÁLNÍ FYZIKY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh postupu kalibrace vybraných
pracovních měřidel stejnosměrného napětí
pomocí etalonu FLUKE 715



Vypracoval:	Lukáš Dokoupil
Studijní program:	N1701 Fyzika
Studijní obor:	3942T001 Nanotechnologie
Forma studia:	Prezenční
Vedoucí diplomové práce:	RNDr. Tomáš Rössler, Ph. D.
Termín odevzdání práce:	červenec 2016

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením RNDr. Tomáše Rösslera, Ph.D. a že jsem použil zdrojů, které cituji a uvádím v seznamu použitých pramenů.

V Olomouci dne 25. července 2016

.....
Lukáš Dokoupil

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu RNDr. Tomáši Rösslerovi, Ph.D. za odborné vedení, pomoc a rady při zpracování této diplomové práce.

Bibliografická identifikace

Jméno a příjmení autora	Lukáš Dokoupil
Název práce	Návrh postupu kalibrace vybraných pracovních měřidel stejnosměrného napětí pomocí etalonu FLUKE 715
Typ práce	Diplomová
Pracoviště	Katedra experimentální fyziky
Vedoucí práce	RNDr. Tomáš Rössler, Ph. D.
Rok obhajoby práce	2016
Abstrakt	Účelem této diplomové práce je kalibrace vybraných pracovních měřidel stejnosměrného napětí s využitím procesního kalibrátoru FLUKE 715. První fáze se skládá ze zajištění návaznosti kalibrátoru FLUKE 715 na český systém etalonů stejnosměrného napětí přímým porovnáním s přesnějším etalonem vyššího řádu a analýzy výsledků tohoto porovnání. V druhé fázi jsou pak výsledky tohoto porovnání využity ke stanovení nejistoty měření při kalibraci pracovních měřidel stejnosměrného napětí. Výsledky kalibrace poté slouží při stanovení shody všech řádně zkalibrovaných měřidel se specifikací. Výstupem této diplomové práce je kalibrační postup, kalibrační listy obsahující výsledky měření a schéma metrologické návaznosti zkalibrovaných měřidel.
Klíčová slova	kalibrace, metrologie, návaznost, pracovní měřidla, stejnosměrné napětí
Počet stran	97
Počet příloh	5
Jazyk	český

Bibliographical identification

Autor's first name and surname	Lukáš Dokoupil
Title	Design of calibration procedure of given DC voltage measuring instruments using FLUKE 715 standard
Type of thesis	Master
Department	Department of Experimental Physics
Supervisor	RNDr. Tomáš Rössler, Ph. D.
The year of presentation	2016
Abstract	The purpose of this diploma thesis is calibration of given DC voltage measuring instruments using FLUKE 715 process calibrator. The first stage is to provide the metrological traceability of FLUKE 715 calibrator in czech system of DC voltage standards done by direct comparison with more precise higher level standards and analysis of results of the comparison. These results are then used to calculate the uncertainty of measurement during calibration of DC voltage measuring instruments. The results of calibration are then used to assess the compliance with specification of all properly calibrated instruments. The output of this thesis is calibration guide, calibration certificates which contain results of measurement and schematic of calibrated instruments' metrological traceability.
Keywords	calibration, DC voltage, measuring instruments, metrology, traceability
Number of pages	97
Number of appendices	5
Language	czech

Obsah

Úvod	8
1 Metrologie stejnosměrného napětí	9
1.1 Definice elektrického napětí	9
1.2 Metrologie napětí v ČR	10
1.2.1 Klasifikace měřidel z hlediska zákona o metrologii	10
1.3 Metrologická confirmace	11
1.3.1 Kalibrace	11
1.3.2 Posouzení shody se specifikacemi	13
1.4 Soustava etalonů napětí v ČR	14
1.4.1 Návaznost stejnosměrného napětí v ČR	15
1.4.2 Státní etalon stejnosměrného napětí	16
1.5 Kalibrace měřidel stejnosměrného napětí	21
1.5.1 Matematický model kalibrace	21
1.5.2 Stanovení nejistoty měření při kalibraci	22
2 Návrh a realizace experimentu	29
2.1 Charakteristika kalibrátoru FLUKE 715	29
2.2 Schéma a postup kalibrace	31
2.2.1 Příprava na kalibraci	32
2.2.2 Proces kalibrace	33
2.3 Zajištění metrologické návaznosti kalibrátoru	33
2.3.1 Analýza kalibračního listu FLUKE 715	34
3 Výsledky a jejich diskuze	37
3.1 Stanovení rozšířené nejistoty kalibrovaných měřidel	42
3.2 Posouzení shody výsledků kalibrace se specifikací	45
Závěr	46
Seznam použité literatury	47
Seznam obrázků	51
Seznam tabulek	52
Seznam použitých symbolů a zkratk	53

Přílohy	54
Příloha 1: Kalibrační list FLUKE 715	54
Příloha 2: Kalibrační postup	58
Příloha 3: Kalibrační listy kalibrovaných měřidel	67
Příloha 4: Schéma návaznosti	95
Příloha 5: Obsah přiloženého CD	97

Úvod

U měřidel, které se používají v laboratorní a průmyslové praxi pro měření různých veličin, je nutné zajistit, že poskytují přijatelně přesné výsledky. Toho je možné dosáhnout porovnáním s měřidly přesnějšími, které nazýváme etalony a které samy o sobě bývají porovnávány s přesnějšími etalony vyšší kvality. Proces takového porovnávání se nazývá kalibrace měřidla a slouží k vytvoření nepřerušovaného řetězce návaznosti od konkrétního pracovního měřidla až k samotné realizaci veličiny tedy etalonu nejvyšší kvality v rámci dané veličiny.

Tato diplomová práce má za úkol kalibrovat vybraná pracovní měřidla stejnosměrného napětí a navázat je tak do systému návaznosti veličiny stejnosměrného napětí v České republice s využitím kalibrátoru FLUKE 715, který v rámci této práce poslouží jako pracovní etalon stejnosměrného napětí. Samotný kalibrátor má ale návaznost na americký systém realizace jednotky stejnosměrného napětí a proto je nutné jej nejdříve pomocí kalibrace v Českém metrologickém institutu (ČMI) navázat na český systém. Výsledky této kalibrace uvedené v kalibračním listu vydaném ČMI budou poté využity při zpracování výsledků kalibrace vybraných pracovních měřidel stejnosměrného napětí na Katedře experimentální fyziky PřF UP. Výsledky kalibrace pracovních měřidel pak budou využity k posouzení shody těchto měřidel se specifikací. Měřidla, která budou ve shodě se specifikací, budou zařazena do vytvářeného schématu návaznosti měřidel stejnosměrného napětí.

Kapitola 1 Metrologie stejnosměrného napětí se věnuje definici relevantních pojmů z metrologie, etalonáže stejnosměrného napětí, matematickým rovnicím využívaných při kalibraci a teorii posouzení shody se specifikací. **Kapitola 2 Návrh a realizace experimentu** rozebírá metrologické a technické vlastnosti kalibrátoru FLUKE 715 a popisuje schéma a postup, které budou využity pro kalibraci daných měřidel stejnosměrného napětí. **Kapitola 3 Výsledky a jejich diskuze** se nejdříve věnuje analýze kalibračního listu kalibrátoru FLUKE 715 z ČMI a poté výsledkům samotné kalibrace, včetně popisu stanovení nejistoty měření výsledků kalibrace a procesu posouzení shody se specifikací na dvou vybraných kalibrovaných měřidlech.

Kapitola 1

Metrologie stejnosměrného napětí

Měření představuje proces experimentálního získávání hodnoty veličiny, kterou je důvodně možné přiřadit nějakému objektu či jevu [1]. Za samotným aktem měření se však skrývá velmi komplexní problematika, kterou se zabývá věda zvaná *metrologie*, a která pokrývá nejen technickou stránku měření, ale i legální aspekty měření v regulované sféře, např. při obchodním styku nebo ve zdravotnictví. Mezi hlavní kompetence metrologie patří [2]:

- definice *systému měřicích jednotek*,
- realizace měřicích jednotek pomocí *etalonů* - ztělesněných měř,
- vytvoření nepřerušovaného řetězce *návaznosti měřidel* na etalony porovnáváním jejich metrologických vlastností.

Metrologie stejnosměrných napětí je jednoduše řečeno metrologie aplikovaná do oblasti měření, etalonáže a návaznosti měřidel v oboru stejnosměrného napětí.

1.1 Definice elektrického napětí

Z hlediska fyziky je *elektrické napětí* U definováno jako rozdíl potenciální energie ΔV elektrického náboje ve dvou různých místech elektrického pole dělený velikostí tohoto náboje q , čili

$$U = \frac{\Delta V}{q}. \quad (1.1)$$

Při přemístění náboje q mezi těmito dvěma místy koná pole práci W rovnou rozdílu ΔV přičemž nezávisí na tom, jak se tento náboj z jednoho místa na druhé dostal. Platí tedy rovněž

$$W = \Delta V = U q. \quad (1.2)$$

V kontextu elektrotechniky lze elektrické napětí U definovat pomocí Ohmova zákona jako

$$U = RI, \quad (1.3)$$

kde I je elektrický proud, množství náboje dQ , které proteče libovolným disipativním prvkem o odporu R za čas dt . Napětí U tedy představuje jakousi "hybnou sílu", jejíž důsledkem je pohyb elektrického náboje - elektrický proud I [3, 4].

Stejnoseměrné napětí vs stejnosměrný voltmetr

Za *stejnoseměrné napětí* považujeme takový napěťový signál jehož hodnota je konstantní v čase. Měřidla stejnosměrného napětí se také nazývají *stejnoseměrné voltmetry*, protože jednotka napětí v soustavě SI je 1 volt. Stejnoseměrné voltmetry fungují na principu zobrazení okamžité hodnoty napětí měřeného elektrického obvodu. Lze s nimi tedy měřit i časově proměnlivé signály, ale pouze za předpokladu, že rychlost změny signálu je menší než rychlost zpracování signálu voltmetrem [4].

1.2 Metrologie napětí v ČR

Hlavním orgánem, který v České republice zajišťuje metrologickou návaznost měřidel elektrického napětí je Český metrologický institut (ČMI), který je součástí národního metrologického systému ČR (NMS ČR) a plní funkci národního metrologického institutu. Jeho působnost v metrologii je dána §14 zákona o metrologii č. 505/1990 Sb [6]. Z tohoto mj. vyplývá, že je ČMI pověřen uchováváním státních etalonů a přenosem hodnot měřících jednotek na měřidla a etalony nižší přesnosti. Součástí NMS ČR jsou také akreditované kalibrační laboratoře, které jsou způsobilé provádět kalibraci pracovních měřidel nestanovených. Akreditace je těmto laboratořím udělována na základě objektivního posouzení Českým institutem pro akreditaci (ČIA) za předpokladu, že kalibrační laboratoř splňuje všeobecné požadavky způsobilosti dle normy ČSN EN ISO/IEC 17025:2005 [5].

1.2.1 Klasifikace měřidel z hlediska zákona o metrologii

Paragraf 3 zákona o metrologii klasifikuje měřidla do čtyř hlavních kategorií [6]:

1. *etalony* - ztělesněná míra nebo měřidlo sloužící k uchování měřící jednotky a k přenosu této jednotky na etalony nižší přesnosti nebo pracovní měřidla (např. Zenerovo referenční napětí),

2. *pracovní měřidla stanovená* - měřidla, která jsou Ministerstvem průmyslu a obchodu stanovena pro povinné ověřování jejich metrologických vlastností a funkčnosti. Jedná se o měřidla využívaná
 - při obchodním styku (př. váhy v supermarketu),
 - ve zdravotnictví (př. měření hladiny krevního cukru),
 - v ochraně životního prostředí (př. měření emisí škodlivých látek),
 - pro bezpečnosti práce,
 - při stanovení výše škody.
3. *pracovní měřidla nestanovená* - měřidla, která nepatří mezi etalony ani pracovní měřidla stanovená. Jejich ověřování metrologických vlastností je čistě na vůli majitele měřidla (např. pracovní digitální multimetr),
4. *certifikované a ostatní referenční materiály* - látky určené pro ověřování metrologických vlastností přístrojů, evaluaci měřicích metod a kvantitativní analýzu materiálů.

Napěťové kalibrátory spadají do kategorie etalonů a digitální multimetry pro rutinní měření napětí v laboratoři mezi pracovní měřidla nestanovená.

1.3 Metrologická confirmace

Pojem *metrologické confirmace* je definován v normě ČSN EN ISO 10012 [7] jako soubor úkonů nutných k zajištění shody měřicího vybavení s požadavky na jeho zamýšlené použití. Proces metrologické confirmace zahrnuje tyto úkony [8]:

- kalibrace,
- ověření, že je měřidlo plně funkční a ve shodě se specifikacemi,
- případné justování, oprava měřidla a opětovná kalibrace a ověření.

1.3.1 Kalibrace

Kalibrace je proces, při kterém se stanovuje vztah mezi hodnotou veličiny a nejistotou měření poskytnutou etalonem a hodnotou veličiny a nejistotou z indikace měřidla. Tato informace nám pak slouží ke stanovení vztahu pro získání výsledku měření z indikace. Tento proces se pro každé měřidlo provádí v několika určených *kalibračních bodech*

v daném měřicím rozsahu, aby se zajistilo objektivní zhodnocení metrologických vlastností měřidla. Výběr kalibračních bodů i rozsahů závisí čistě na technických možnostech kalibrační laboratoře a v konečném důsledku na dohodě mezi kalibrační laboratoří a zákazníkem - majitelem měřidla [2].

Kalibrace konkrétního typu měřidla (např. stejnosměrného digitálního voltmetru) se provádí podle daného *kalibračního postupu*. Kalibrační postup by měl obsahovat tyto informace [9, 10]:

- funkce a rozsahy měřidla, na které se postup vztahuje,
- kvalifikace pracovníků provádějících kalibraci,
- užití názvosloví a definice,
- doporučené laboratorní podmínky,
- technické prostředky nutné pro provedení kalibrace (doporučené etalony a měřidla pro měření laboratorních podmínek),
- popis procedur kalibrace (vnější prohlídka, zkouška provozuschopnosti, vlastní kalibrace),
- postup vyhodnocení výsledků kalibrace,
- popis administrativních úkonů (náležitosti kalibračního listu, kalibrační značky a postup protokolování),
- normy a předpisy, ze kterých kalibrační postup vychází.

Výstupem kalibrace je *kalibrační list*. Jedná se o dokument, ve kterém by měly být uvedeny následující náležitosti [9]:

- informace o kalibrační laboratoři (např. adresa, telefon a e-mail),
- informace o zadavateli (jméno, adresa, telefon),
- informace o kalibrovaném měřidle (typ, výrobce, model, výrobní nebo jiné identifikační číslo),
- jméno a podpis kalibračního technika a vedoucího kalibrační laboratoře, razítko kalibrační laboratoře,
- evidenční číslo kalibračního listu, očíslování a celkový počet stran,
- datum přijetí měřidla, kalibrace a vystavení kalibračního listu,

- užitý kalibrační postup,
- etalony užívané pro kalibraci,
- laboratorní podmínky (teplota, vlhkost vzduchu),
- vyjádření metrologické návaznosti výsledků měření, nejistotě měření a případně shodě s danými technickými specifikacemi,
- výsledky měření včetně tabulek s numerickými daty obsahující nejistotu měření ve všech proměřených kalibračních bodech.

V případě postkalibračního justování a oprav měřidla a následné recalibraci je nutné uvést výsledky kalibrace před i po justáží měřidla. Rovněž se doporučuje do kalibračního listu uvést prohlášení, že kalibrační list se nesmí bez dovolení kalibrační laboratoře reprodukovat jinak než v celkovém počtu listů [9].

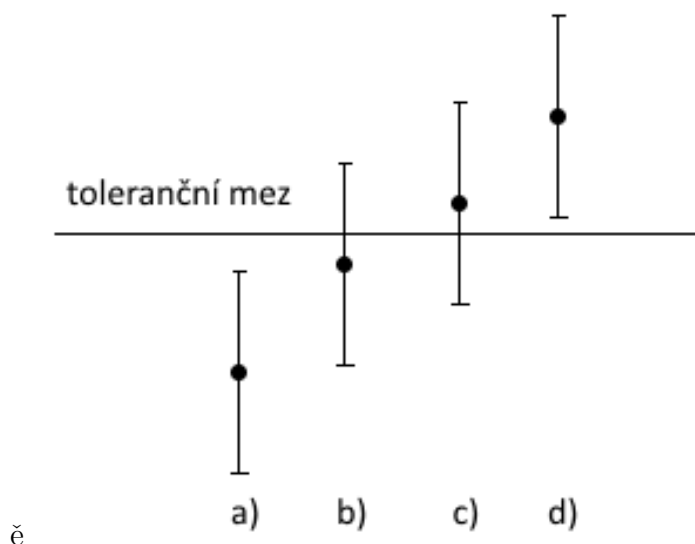
Majitel měřidla se může dohodnout na doporučených intervalech nových kalibrací s kalibrační laboratoří. Tyto kalibrační intervaly slouží zejména k tomu, aby se zjistilo, zda kalibrované měřidlo poskytuje stále přesné výsledky měření a pokud ne, pak záleží na majiteli měřidla, zda dané měřidlo podrobí justování, pokud to umožňuje výrobce měřidla nebo jej odstaví z provozu [9, 11].

1.3.2 Posouzení shody se specifikacemi

Jedná se o proces, ve kterém se porovnávají metrologické charakteristiky měřidla uvedené v kalibračním listu měřidla s technickou specifikací uvedenou zpravidla v dokumentaci dodané výrobcem měřidla. Standardizované pokyny pro uvádění shody se specifikací jsou uvedeny v předpisu ILAC-G8:03/2009 ?? a o jeho český překlad se stará Český institut pro akreditaci.

Postup určení shody je triviální. Z výsledků kalibrace se získá interval hodnot veličiny zkoumaného měřidla, přičemž samotný výsledek měření určuje střed tohoto intervalu a nejistota měření jeho meze. Nejistotou, která určuje velikost intervalu hodnot veličiny se rozumí rozšířená nejistota pro danou pravděpodobnost pokrytí (především 95 %). V druhém kroku se ze specifikace měřidla v daném bodě měřicího rozsahu spočítá chybová toleranční mez, jež se skládá ze složky, která závisí na čtené hodnotě a složky, která je v daném rozsahu konstantní. Nakonec se interval hodnot veličiny zkoumaného měřidla porovná s toleranční mezí. Předpis ILAC-G8:03/2009 rozlišuje čtyři různé případy, které mohou nastat které jsou znázorněny na obr. 1.1:

- a) Výsledek měření (značený černým puntíkem) zvětšený o nejistotu měření (úsečka) nepřekračuje toleranční mez (vodorovná čára). Měřidlo je v daném bodě měřicího rozsahu ve shodě se specifikací.
- b) Výsledek měření zvětšený o nejistotu měření překrývá toleranční mez. Není možné v daném bodě měřicího rozsahu vyjádřit shodu se specifikací.
- c) Platí totéž, co v případě b)
- d) Výsledek měření (značený černým puntíkem) zvětšený o nejistotu měření (úsečka) překračuje toleranční mez (vodorovná čára). Měřidlo v daném bodě měřicího rozsahu není ve shodě se specifikací.



Obr. 1.1: Posouzení shody se specifikací

Prohlášení o shodě se specifikací může být součástí kalibračního listu nebo jej uvést jako samostatnou přílohu. Konkrétní znění prohlášení je možné najít v předpisu ILAC-G8:03/2009 a mělo by také obsahovat informaci o pravděpodobnosti pokrytí intervalu hodnot veličiny zkoumaného měřidla. V naprosté většině případů se zkoumá více než jeden kalibrační bod měřidla. V takovém případě je lepší napsat jen jedno prohlášení, které shrnuje všechny naměřené hodnoty jako celek. Konkrétní tvar takového prohlášení je uveden v předpisu ILAC-G8:03/2009 [12].

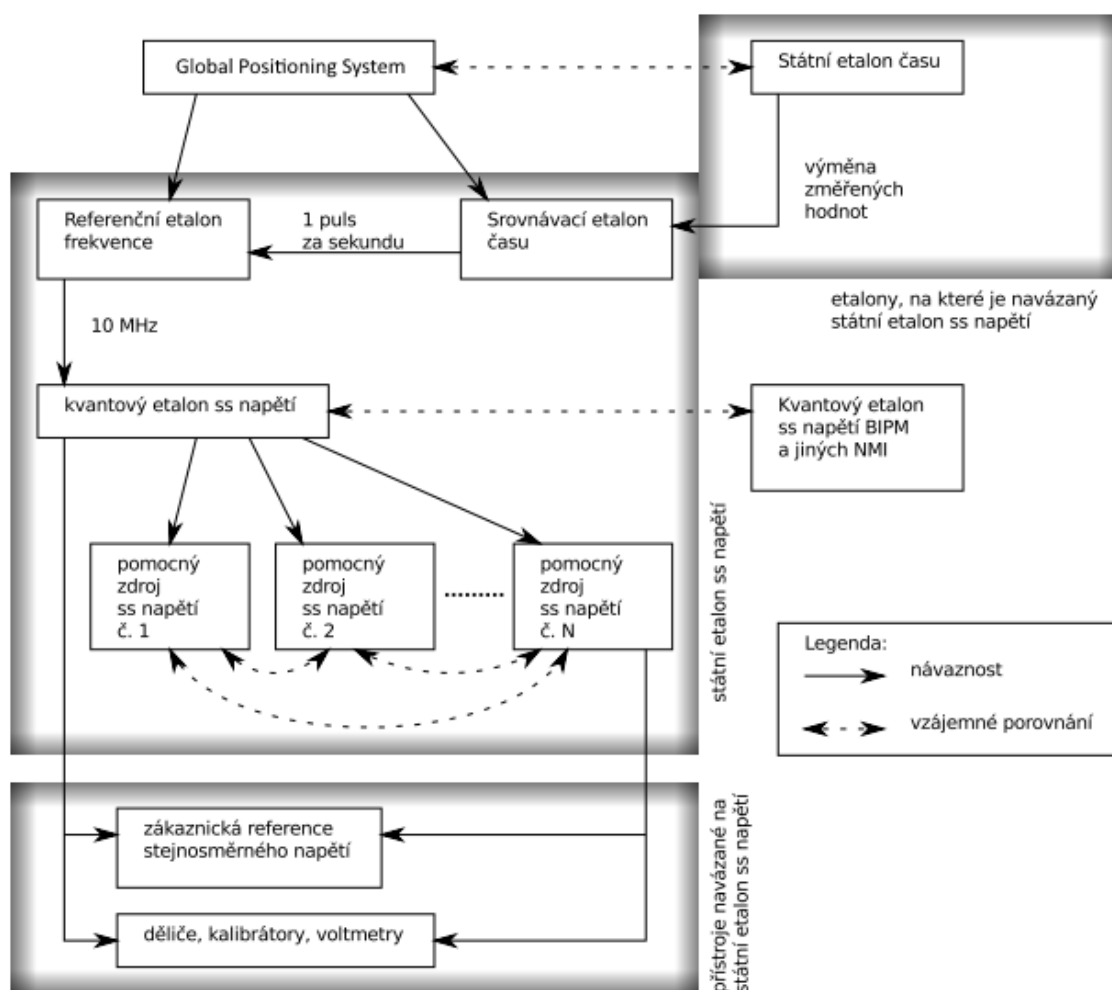
1.4 Soustava etalonů napětí v ČR

Jednotkou napětí v soustavě SI je 1 Volt neboli 1 V. Jedná se o odvozenou jednotku SI a rozměrovou analýzou lze zjistit, že vztah mezi Voltem a základní elektrickou jed-

notkou SI Ampérem je $1 \text{ V} = 1 \text{ m}^2 \text{ kg s}^{-3} \text{ A}^{-1}$. Doposud je však v primární metrologii jednotka proudu trochu paradoxně realizována pomocí kvantových etalonů napětí a odporu. Obsahem této sekce je přehled používaných etalonů napětí. V primární metrologii je na pomyslném vrcholu všeho kvantový etalon napětí na bázi Josephsonova jevu. V běžné metrologické praxi se obvykle používají kalibrátory, což jsou velmi přesné zdroje napětí, multimetry, popř. kombinace obojího [4, 13, 14].

1.4.1 Návaznost stejnosměrného napětí v ČR

Na obr. 1.2 je schéma návaznosti stejnosměrného napětí v České republice převzaté z časopisu Metrologie [14].



Obr. 1.2: Návaznost stejnosměrného napětí v ČR; převzato z [14]

Primárním etalonem v ČR je státní etalon stejnosměrného napětí (kvantový etalon napětí) jež je systémem obsahující čip založeném na kvantovém Josephsonově jevu s rozsahem $\pm 10 \text{ V}$, tři pomocné referenční zdroje na bázi Zenerových diod o hodnotách

napětí 10 V, 1 V, 1,018 V a nanovoltmetr, který porovnává napětí mezi čipem a referenčními zdroji. Produkce napětí z čipu však vyžaduje přesný zdroj mikrovln a proto je kvantový etalon napětí dále navázán na referenční etalon frekvence a ten přes systém GPS na státní etalon času. Kalibrace velmi přesných laboratorních kalibrátorů probíhá tak, že se přes další nanovoltmetr, porovnává výstup napětí z kalibrátoru s výstupem pomocných referenčních zdrojů státního etalonu. Protože mají pomocné referenční zdroje pouze tři možné hodnoty je nutné výstup kalibrátoru vhodně přeškálovat pomocí Kelvinova-Varleyova děliče napětí. Velmi přesné kalibrátory dále slouží ke kalibraci méně přesných kalibrátorů, multimetrů a zdrojů napětí [14, 15]. V tab. 1.1 je srovnání nejistot jednotlivých etalonů stejnosměrného napětí [14, 15].

Druh etalonu napětí	Řád relativní nejistoty
Kvantový etalon napětí	$\sim 0,01$ ppm
Zenerovy reference	$\sim 0,1$ ppm
Velmi přesné kalibrátory	~ 1 ppm
Méně přesné kalibrátory, měřidla nebo zdroje napětí	>10 ppm

Tab. 1.1: Porovnání relativní nejistoty etalonů stejnosměrného napětí

1.4.2 Státní etalon stejnosměrného napětí

V roce 2013 se stal státním etalonem stejnosměrného napětí v České republice kvantový etalon na bázi inverzního Josephsonova jevu a vystřídal tak v pozici primárního etalonu skupinu Zenerových referencí, které byly dosavadním státním etalonem stejnosměrného napětí v ČR od roku 2000 [14, 16].

Josephsonův jev

Fyzikální podstatou Josephsonova jevu je tunelování *Cooperových párů* elektronů mezi dvěma supravodiči oddělenými potenciálovou bariérou ve formě vrstvy tenkého dielektrika nebo nesupravodivého kovu. Cooperovy páry jsou slabě vázané páry elektronů, které vznikají v supravodičích za nízkých teplot. Kolektivně se chovají jako bosony a proto se mohou pohybovat krystalovou mřížkou supravodiče bez rozptylu, což se makroskopicky projevuje ve formě nulového elektrického odporu.

Na obr. 1.3 je zjednodušené schéma součástky zvané *Josephsonův přechod*, která Josephsonova jevu využívá. Pakliže na tuto součástku přiložíme napětí U , vzniká v obvodu s Josephsonovým přechodem střídavý proud o frekvenci f . Frekvence střídavého

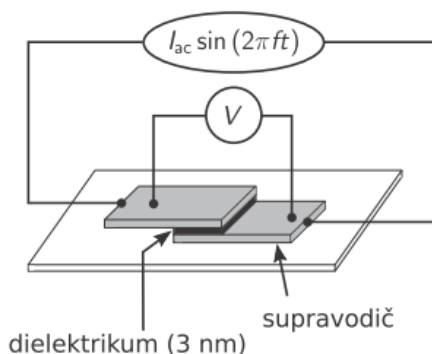
proudu f je úměrná přiloženému napětí dle vzorce

$$f = \frac{2e}{nh} U, \quad (1.4)$$

kde n je celé číslo odpovídající kvantovému stavu, h Planckova konstanta a e elementární náboj. Tento jev lze ale obrátit a Josephsonův přechod vystavit působení elektromagnetického záření o frekvenci f . Potom lze na přechodu naměřit napětí U , jehož velikost je určena pouhým přeuspořádáním rovnice (1.4), tedy

$$U = n \frac{h}{2e} f = \frac{nf}{K_J}. \quad (1.5)$$

Tento obrácený jev se nazývá *inverzní Josephsonův jev* a je podstatou *kvantového etalonu napětí*. Ten se nazývá kvantový, protože jev tunelování potenciálovou bariérou a tvorby Cooperových párů v supravodičích nelze vysvětlit jinak než aparátem kvantové fyziky [14, 16].



Obr. 1.3: Josephsonův přechod; převzato z [14]

Symbol $K_J = 2e/h$ ve vztahu (1.5) se nazývá Josephsonova konstanta. Její hodnota byla posledními experimenty stanovena na [17]

$$K_J = 483597,8525(30) \cdot 10^9 \text{ Hz V}^{-1}. \quad (1.6)$$

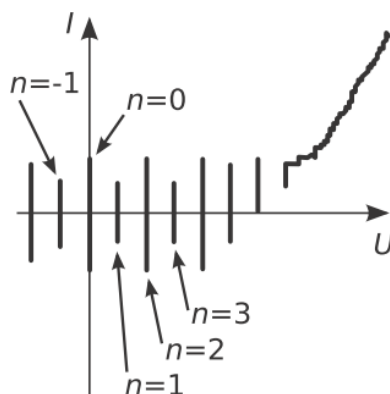
V praxi se však užívá konvenční hodnota Josephsonovy konstanty, jejíž hodnota K_{J-90} byla stanovena dohodou na [18]

$$K_{J-90} = 483597,9 \cdot 10^9 \text{ Hz V}^{-1} \quad (1.7)$$

a jejíž nejistota se v praxi při výpočtech nejistoty měření nezapočítává [14].

Charakteristika kvantového etalonu napětí

Na obr. 1.4 se nachází typická voltampérová charakteristika součástky s jedním Josephsonovým přechodem. Pro stavy s malým kvantovým číslem n a v omezeném rozsahu proudu až do určité hodnoty I_C zvané *kritický proud* se Josephsonův přechod v přítomnosti zdroje elektromagnetického záření o frekvenci f chová jako ideální zdroj proudu. Mimo podkritickou oblast platí pro Josephsonův přechod přibližně Ohmův zákon [14].



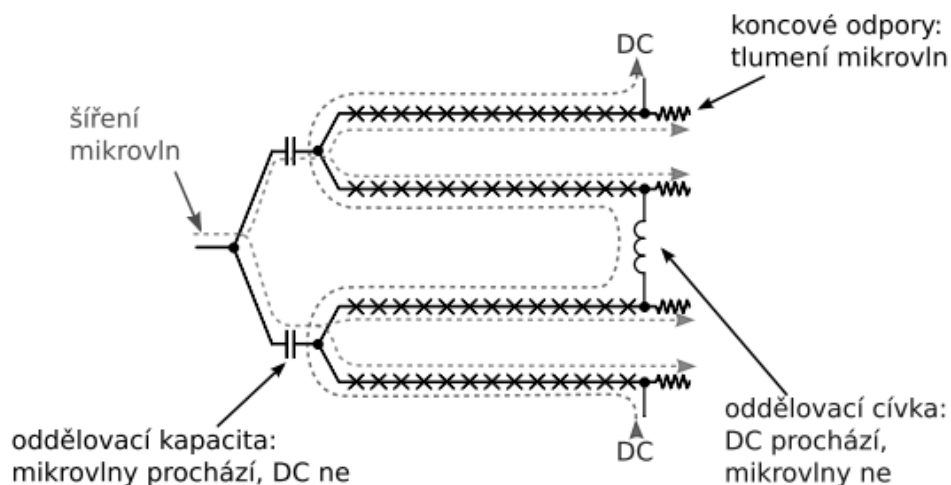
Obr. 1.4: VA charakteristika jednoduchého Josephsonova přechodu; převzato z [14]

Hodnota výstupního napětí se v podkritické oblasti reguluje změnou kvantového čísla n . Technicky to lze provést tak, že se na ozářený přechod připojí zdroj stejnosměrného napětí a jeho hodnota se nastaví na hodnotu napětí, která odpovídá danému kvantovému číslu n . Nejvyšší možné kvantové číslo n , při kterém vykazuje Josephsonův přechod podkritické chování, závisí na kvalitě výroby čipu s Josephsonovým přechodem. Typické maximum je $n = 4$.

Konstrukce kvantového etalonu napětí

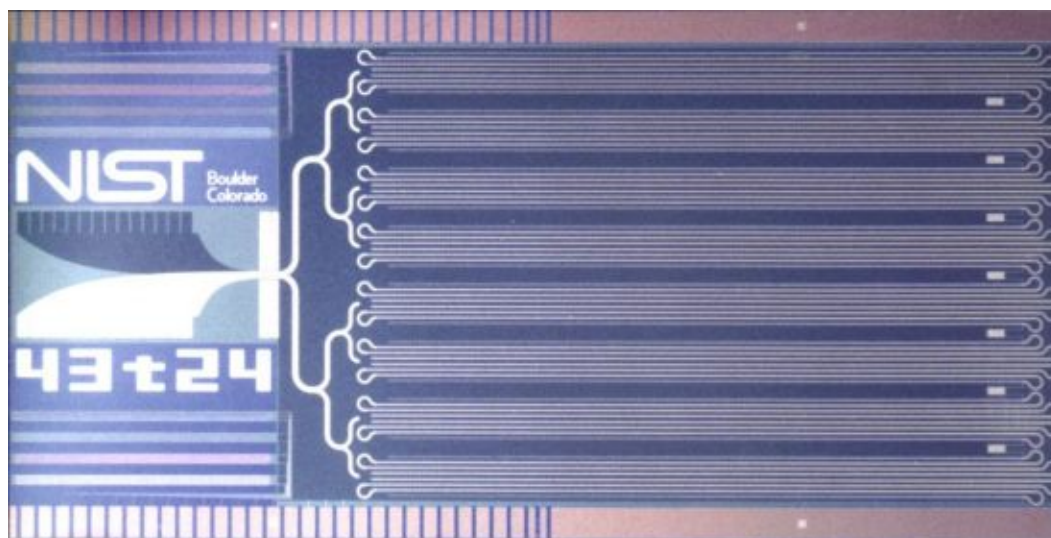
Pro získání vyšších hodnot napětí se používají čipy s více Josephsonovými přechody v rozvětveném páskovém vlnovodu, jehož zjednodušené schéma je na obr. 1.5. V každé dvouvětvi jsou jednotlivé Josephsonovy přechody zapojeny v sérii. Před každou dvouvětví Josephsonových přechodů jsou zapojeny oddělovací kapacity, které dovolují prostoupit pouze elektromagnetickému záření z přívodu, ale elektrostatické pole je vnímá jako rozpojený obvod. Všechny dvouvětve jsou navzájem mezi sebou propojeny oddělovacími cívkami, které brání nežádoucímu přenosu energie záření do sousedních větví, ale pro elektrostatické pole vytvářené Josephsonovými přechody se chová jako zkrat. Celkové

výstupní napětí čipu se získá součtem po klikaté cestičce, která je ve schématu označena písmeny DC.



Obr. 1.5: Zjednodušené schéma Josephsonova čipu; převzato z [14]

Pro metrologické účely se používá Josephsonův čip, kde jako supravodič figuruje niob, jehož kritická teplota je 9,3 K a jako dielektrikum tenká vrstva oxidu hlinitého o tloušťce přibližně 3 nm [14]. Na obr. 1.6 je fotografie prvního Josephsonova čipu připraveného v roce 1992 v laboratořích NIST v americkém Boulderu. Rozměry čipu v jeho rovině jsou 10 mm a 20 mm a obsahuje 20 208 Josephsonových přechodů vyrobených z niobu a oxidu hlinitého. Napětí produkované čipem je 10 V [17].

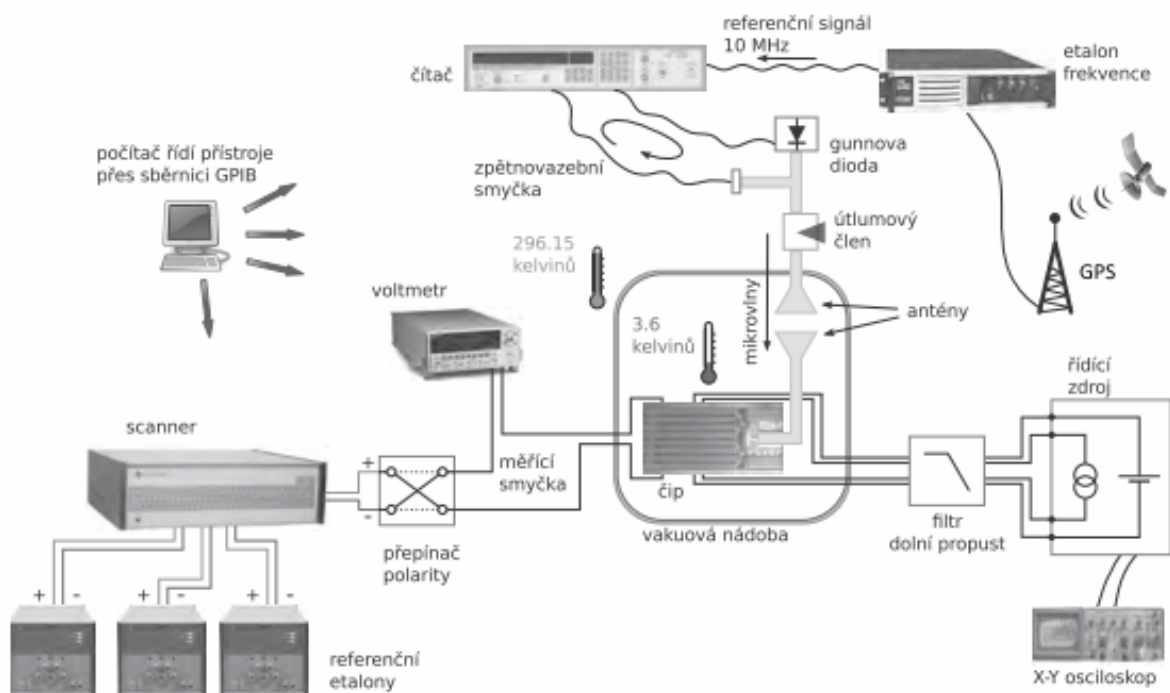


Obr. 1.6: Historicky první Josephsonův čip z roku 1992; převzato z [19]

Kvantový etalon napětí v ČMI

Schéma systému kvantového etalonu stejnosměrného napětí uloženého v suterénu budovy ČMI v Brně je na obr. 1.7. Samotný Josephsonův čip je uložen v evakuované nádobě naplněné heliem, které funguje jako chladicí plyn a udržuje stálou teplotu kolem 3,6 K. Jako zdroj elektromagnetického záření v pásmu mikrovln se užívá Gunnova dioda. Frekvenci mikrovlnného záření monitoruje čítač navázaný na frekvenční referenci, která je přes poziční systém GPS navázaná na státní etalon času. Řídící zdroj slouží k nastavení požadovaného kvantového stavu. Kombinace osciloskopu a řídicího zdroje, pak slouží k ověření správné voltampérové charakteristiky Josephsonova čipu [14].

Kalibrovat referenční etalony samotným Josephsonovým čipem není vhodné, neboť jej lze zatížit pouze malými hodnotami měřicího proudu a navíc je citlivý na šum. Proto je součástí státního etalonu stejnosměrného napětí také skupina Zenerových referencí, kterou již lze užít k přenosu jednotky na referenční etalony nižší metrologické kvality. Mezi kladnými svorkami Zenerových referencí a Josephsonova čipu je zapojený nanovoltmetr, který měří jejich rozdílové napětí a přepínač polarity napětí na svorkách Zenerových referencí [14]. V tab. 1.2 jsou uvedeny metrologické charakteristiky kvantového etalonu napětí v ČMI. Ten bylo mimo jiné roku 2011 podroben srovnání s kvantovým etalon BIPM. Jejich odchylka byla experimentem stanovena na $\Delta U = (9,6 \pm 10,3) \text{ nV}$ [14].



Obr. 1.7: Schéma systému kvantového etalonu v ČMI; převzato z [14]

Rozsah	$\pm 10 \text{ V}$
Rozlišení	$155 \mu\text{V}$
Nejistota	$\pm 11 \text{ nV}$ ($k = 2$)

Tab. 1.2: Metrologické charakteristiky kvantového etalonu napětí v ČMI [14]

1.5 Kalibrace měřidel stejnosměrného napětí

1.5.1 Matematický model kalibrace

Kalibraci je možné považovat za druh měření a proto ji lze přiřadit i odpovídající model měření. Pro kalibraci digitálních měřidel stejnosměrného napětí, kterými se tato diplomová práce zabývá, stačí uvažovat čtyřsložkový model vyjádřený jednoduchým vztahem [20]

$$E_X = (U_X + \delta U_X) - (U_S + \delta U_S) \quad (1.8)$$

kde

- E_X je úhrnná chyba měření kalibrovaného měřidla,
- U_X hodnota napětí indikovaná kalibrovaným měřidlem, naměřená hodnota veličiny,
- U_S hodnota napětí nastavená na kalibrátoru, referenční hodnota veličiny, představuje vlastní hodnotu kalibračního bodu, ve kterém se určuje chyba měření kalibrovaného měřidla,
- δU_X korekce hodnoty napětí indikované kalibrovaným měřidlem,
- δU_S korekce hodnoty napětí nastavené na kalibrátoru.

Základní chybou měření se nazývá rozdíl

$$\Delta_X = U_X - U_S \quad (1.9)$$

a je to zároveň jediná chyba, která se uvažuje, pokud je kalibrace prováděna za doporučených referenčních podmínek. Příčinou základní chyby měření je nedokonalost měřicího přístroje nebo měřicí metody [4].

Přídavnou chybou měření se nazývá rozdíl

$$\delta \Delta_X = \delta U_X - \delta U_S. \quad (1.10)$$

Tato chyba je způsobena odchylkou od doporučených referenčních podmínek (např. závislost napětí na teplotě mimo rozmezí teplot stanovené výrobcem multimetru jako referenční podmínky) [4]. Za doporučených referenčních podmínek je tedy možné předpokládat, že $\delta\Delta_X = 0$ [4, 20].

Za předpokladu stálosti údaje na displeji kalibrovaného měřidla lze hodnotu U_X určit z jedné indikace. V případě rapidního kolísání indikace je nutné užít aritmetický průměr z n (typicky deseti) indikací měřidla za podmínek opakovatelnosti, mj. v krátkém časovém sledu. Potom pro U_X platí

$$U_X = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n U_{jX}, \quad (1.11)$$

kde index j značí j tou indikaci měřidla [20].

1.5.2 Stanovení nejistoty měření při kalibraci

Protože lze všechny veličiny v modelu kalibrace určeným vzorcem (1.8) považovat za nekorelované, lze použít pro odvození *kombinované standardní nejistoty* určení chyby měření $u(E_X)$ v kalibračním bodě U_S stejnosměrného digitálního voltmetru užít zákon šíření nejistot ve tvaru

$$u(E_X) = \sqrt{\left(\frac{\partial E_X}{\partial U_X}\right)^2 u^2(U_X) + \left(\frac{\partial E_X}{\partial U_S}\right)^2 u^2(U_S) + \left(\frac{\partial E_X}{\partial \delta U_X}\right)^2 u^2(\delta U_X) + \left(\frac{\partial E_X}{\partial \delta U_S}\right)^2 u^2(\delta U_S)}. \quad (1.12)$$

Parciální derivace E_X v zákoně šíření nejistot určují citlivost, to jest velikost změny E_X při infinitezimální změně jedné ze složek kalibračního modelu měření. Protože jsou druhé mocniny všech citlivostí jednotkové, viz vzorec (1.10), lze zjednodušit vzorec pro kombinovanou standardní nejistotu určení chyby měření při kalibraci na tvar [20]

$$u(E_X) = \sqrt{u^2(U_X) + u^2(U_S) + u^2(\delta U_X) + u^2(\delta U_S)}. \quad (1.13)$$

Mezi zdroje nejistot patří [21]:

- kolísání indikace měřicího přístroje v důsledku náhodných fluktuací laboratorních podmínek,
- konečné rozlišení a práh citlivosti měřicího přístroje,
- drift parametrů součástí přístroje v důsledku působení známých fyzikálních jevů (např. měření při nestandardních laboratorních podmínkách),
- neurčitost určení laboratorních podmínek,

- neurčitost určení hodnoty použitých etalonů a referenčních vzorků,
- neurčitost určení tabulkových hodnot fyzikálních konstant a dalších parametrů z vnějších zdrojů.

Nejistoty ve vzorci (1.13) mohou být typu A a B [20,21]. O těchto typech pojednávají následující podsekcce.

Nejistota typu A

Nejistota určení U_X je *nejistotou typu A*, protože se určuje pozorováním změn hodnoty veličiny v rámci jednoho experimentu za daných referenčních podmínek z výběrové směrodatná odchylky $s(\bar{U}_X)$ z n indikací kalibrovaného voltmetru

$$s(\bar{U}_X) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{j=1}^n (U_{jX} - \bar{U}_X)^2}. \quad (1.14)$$

kde index j , je j tou indikací kalibrovaného měřidla. Standardní nejistota typu A, v tomto případě nejistota $u(U_X)$ se pak vypočítá jako

$$u(U_X) = k_t s(\bar{U}_X), \quad (1.15)$$

kde k_t je koeficient t-rozdělení, jehož hodnota závisí na počtu stupňů volnosti $\nu = n - 1$. Pro více než deset indikací měřidla, lze t-rozdělení aproximovat normálním rozdělením pravděpodobnosti a tedy $k_t = 1$.

V případě, kdy se užije jedna indikace měřidla, protože je údaj na displeji kalibrovaného měřidla stabilní, se tato nejistota položí rovno nule [20,21].

Nejistota typu B

Všechny ostatní složky kombinované standardní nejistoty jsou *nejistotami typu B*, neboť jsou určeny způsobem jiným než experimentálním pozorováním změn hodnoty veličiny. V případě stejnosměrného digitálního voltmetru je odhad nejistoty

- $u(U_S)$ určen z hodnoty nejistoty v daném kalibračním bodě uvedené v kalibračním listu kalibrátoru,
- $u(\delta U_X)$ určen z hodnoty konečné rozlišitelnosti kalibrovaného digitálního měřidla,
- $u(\delta U_S)$ určen výpočtem přístrojové nejistoty kalibrátoru v daném kalibračním bodě, Ta je uvedena v technických specifikacích kalibrátoru typicky pod pojmem

”přesnost” a skládá se z aditivní složky, která závisí pouze na měřicím rozsahu a multiplikační složky, která je úměrná nastavené hodnotě.

Obecný postup stanovení nejistoty typu B je následující:

- odhadne se interval možných změn hodnoty odhadu vstupní veličiny q , která figuruje jako zdroj nejistoty (např. δU_X). Maximum tohoto intervalu q_{\max} a minimum q_{\min} se volí tak, aby překročení těchto hodnot zdrojem nejistoty bylo málo pravděpodobné,
- stanoví se rozdělení pravděpodobnosti, které by mělo nejlépe vystihovat hodnoty veličiny v intervalu $\langle q_{\min}, q_{\max} \rangle$,
- standardní nejistota měření typu B odhadu vstupní veličiny q se určí podle vzorce

$$u_B(q) = \frac{q_{\max} - q_{\min}}{2\chi}. \quad (1.16)$$

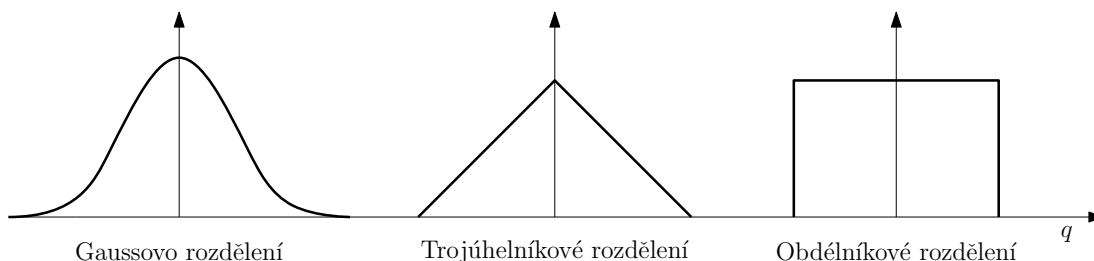
Součinitel χ ve vzorci (1.16) je parametr závislý na typu odhadnutého rozdělení pravděpodobnosti. Hodnoty χ jsou pro jednotlivá rozdělení pravděpodobnosti uvedeny v tab. 1.3. Volba rozdělení pravděpodobnosti hodnot veličiny Q závisí čistě na úvaze experimentátora:

- *normální rozdělení* - se volí v případech, kdy lze předpokládat, že se směrem ke krajním bodům intervalu $\langle q_{\min}, q_{\max} \rangle$ snižuje hustota pravděpodobnosti hodnot měřené veličiny Q podle gaussovské funkce,
- *trojúhelníkové rozdělení* - se volí, pokud lze předpokládat, že se směrem ke krajním bodům intervalu $\langle q_{\min}, q_{\max} \rangle$ snižuje hustota pravděpodobnosti hodnot měřené veličiny Q podle lineární funkce a pravděpodobnost získání hodnoty mimo tento interval je nulová,
- *obdélníkové (rovnoměrné) rozdělení* - se volí v případě, kdy nejsou o dané veličině Q známy jiné informace než mezní hodnoty její variability q_{\min} a q_{\max} . Předpokladem obdélníkového rozdělení je, že všechny hodnoty uvnitř intervalu $\langle q_{\min}, q_{\max} \rangle$ mají stejnou hustotu pravděpodobnosti a pravděpodobnost získání hodnoty mimo tento interval je nulová,

Na obr. 1.8 jsou vyobrazeny tvary křivek jednotlivých výše zmíněných rozdělení pravděpodobnosti [20, 21].

Rozdělení pravděpodobnosti	Součinitel χ
Normální	1
Trojúhelníkové	$\sqrt{6}$
Rovnoměrné	$\sqrt{3}$

Tab. 1.3: Hodnoty součinitele χ pro daná rozdělení pravděpodobnosti



Obr. 1.8: Tvary křivek vybraných rozdělení pravděpodobnosti

Rozšířená nejistota

Celková nejistota určení chyby měření v daném kalibračním bodě se obvykle vyjadřuje jako *rozšířená nejistota měření* [20, 21] symbolem U , jež se vypočítá dle vzorce

$$U = k u(E_X) \quad (1.17)$$

kde k je *koefficient rozšíření*, jehož hodnota se volí s ohledem na žádanou *pravděpodobnost pokrytí*. Pravděpodobnost pokrytí říká s jakou pravděpodobností se skutečná chyba měření nachází v intervalu určeném rozšířenou nejistotou U . Protože užitím symbolu U pro rozšířenou nejistotu může dojít k záměně se symbolem napětí, se v praxi pro napětí používá hlavně symbol V nebo je možné rozšířenou nejistotu U odlišit uvedením veličiny, ke které se rozšířená nejistota vztahuje. Např. rozšířenou nejistotu celkové chyby měření E_X je možné uvést zápisem ve tvaru $U(E_X)$ [20].

Hodnota koeficientu rozšíření k pro danou pravděpodobnost pokrytí závisí na typu rozdělení pravděpodobnosti výstupní veličiny. Hodnoty koeficientů rozšíření pro normální rozdělení pravděpodobnosti jsou uvedeny v tab. 1.4 [21].

Pravděpodobnost pokrytí [%]	Koeficient rozšíření k [-]
68,27	1
90	1,645
95	1,960
95,45	2
99	2,576
99,73	3

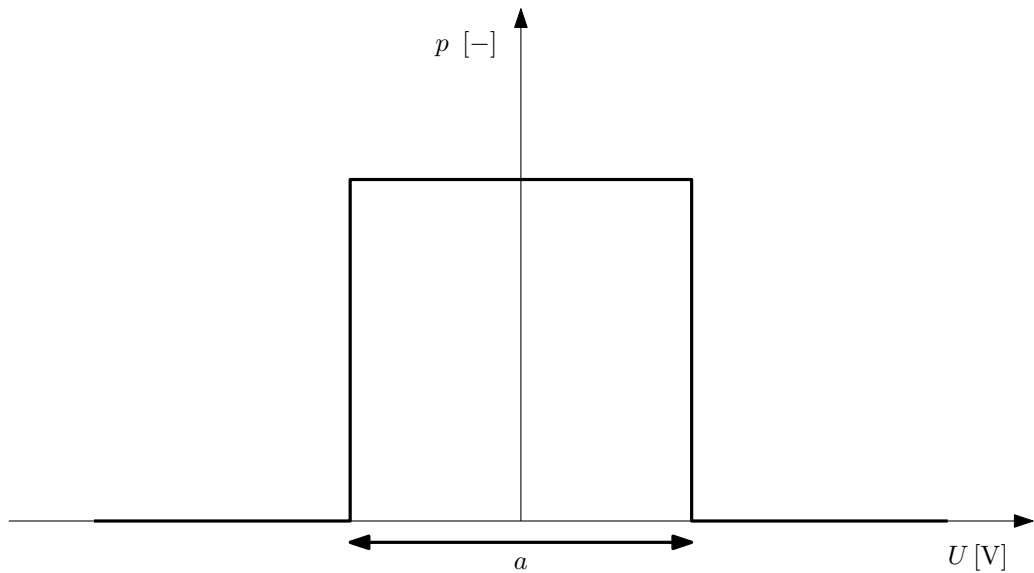
Tab. 1.4: Koeficient rozšíření k pro normální rozdělení pravděpodobnosti [21]

V určitých případech není možné zaručit, že se výsledek měření řídí normálním rozdělením pravděpodobnosti. Dochází k tomu například, když nejistota jedné či dvou vstupních složek výrazně dominuje nad nejistotami ostatních vstupních složek. V takovém případě lze výsledek měření aproximovat rozdělením pravděpodobnosti odpovídající konvoluci rozdělení pravděpodobnosti dominantních vstupních složek [20].

V praxi se lze setkat s případem, kdy jedna nebo více dominantních složek mají obdélníkové rozdělení pravděpodobnosti. V případě jedné dominantní složky s obdélníkovým rozdělením pravděpodobnosti přebírá výsledek měření *obdélníkové rozdělení pravděpodobnosti* a koeficient rozšíření k se spočítá dle jednoduchého vztahu

$$k = p\sqrt{3} \quad (1.18)$$

kde p je pravděpodobnost pokrytí, kdy $p = 1$ znamená pravděpodobnost pokrytí 100 %. Grafické znázornění obdélníkového rozdělení je na obr. 1.9. Všechny hodnoty napětí U jsou uvnitř intervalu o velikosti a stejně pravděpodobné a integrál rozdělení pravděpodobnosti je v celém tomto intervalu roven jedné. To mj. vyjadřuje, že pravděpodobnost získání dané hodnoty U je mimo tento interval nulová [20].



Obr. 1.9: Obdélníkové rozdělení pravděpodobnosti veličiny napětí

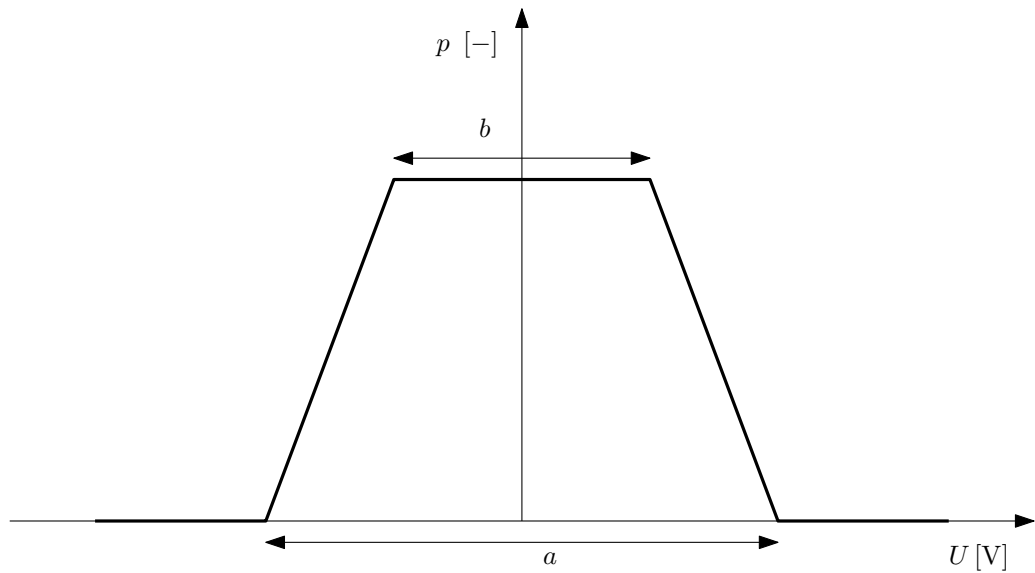
V případě dvou dominantních složek s obdélníkovým rozdělením je výpočet složitější, protože je nutné použít symetrické lichoběžníkové rozdělení pravděpodobnosti. To se získá konvolucí dvou obdélníkových rozdělení s šířkami základny a_1 a a_2 . Potom základna a výsledného lichoběžníku se vypočítá dle vztahu

$$a = a_1 + a_2 \quad (1.19)$$

a horní strana b lichoběžníku dle vztahu

$$b = |a_1 - a_2|. \quad (1.20)$$

Absolutní hodnota rozdílu je zde proto, aby bylo výsledné znaménko vzorce nezávislé na velikosti a_1 a a_2 . Graficky je symetrické lichoběžníkové rozdělení znázorněno na obr. 1.10.



Obr. 1.10: Symetrické lichoběžníkové rozdělení pravděpodobnosti veličiny napětí

Výpočet k závisí nejen na žádané pravděpodobnosti pokrytí p , ale i velikosti poměru β stran a a b

$$\beta = \frac{b}{a}. \quad (1.21)$$

Je-li $\beta > \frac{p}{2-p}$, tak se použije vzorec

$$k(p) = \frac{p(1 + \beta)}{2\sqrt{\frac{1+\beta^2}{6}}}, \quad (1.22)$$

jinak

$$k(p) = \frac{1 - \sqrt{(1-p)(1-\beta^2)}}{\sqrt{\frac{1+\beta^2}{6}}}. \quad (1.23)$$

Pro $\beta = 0$ přechází symetrické lichoběžníkové rozdělení na trojúhelníkové, pro $\beta = 1$ se jedná o rozdělení obdélníkové [20].

U tří a více dominantních složek se již užívá normální rozdělení pravděpodobnosti [20].

Kapitola 2

Návrh a realizace experimentu

Obsahem této kapitoly bude pojednání o charakteristice kalibrátoru FLUKE 715 a vysvětlení dílčích procedur procesu kalibrace.

2.1 Charakteristika kalibrátoru FLUKE 715



Obr. 2.1: Kalibrátor FLUKE 715

Tento přístroj (Obr. 2.1) slouží jako náš prozatímní etalon. Jedná se o procesní kalibrátor, který je spíše vhodný pro analýzu problémů přímo v terénu než laboratorní metrologii. Disponuje rozsahy 200 mV a 20 V pro napěťový vstup a výstup elektrického napětí a jedním rozsahem od 0 do 24 mA pro vstup a výstup veličiny elektrického proudu. V režimu měření proudu lze navíc proměřovat metrologické vlastnosti dvou vodičového vysílače proudové smyčky s využitím interního napájení 24 V a v režimu zdroje proudu simulovat vysílač pro kalibraci měřidel vysílačů proudových smyček s využitím externího napájení. Kalibrátor rovněž obsahuje 250Ω HART rezistor určený pro použití se zařízeními užívající komunikační protokol HART. Veškeré metrologické parametry jsou shrnuty v Tab. 2.1 [22].

Rozsah	Rozlišení	Přesnost (čtení + rozsah)
Vstup/výstup stejnosměrného napětí:		
200 mV	0,01 mV	150 ppm + 0,02 mV
25 V (vstup)/20 V (výstup)	0,001 V	100 ppm + 0,002 V
Vstup/výstup stejnosměrného proudu:		
24 mA	0,001 mA	100 ppm + 0,002 mA

Tab. 2.1: Metrologické parametry kalibrátoru FLUKE 715 [22]



Obr. 2.2: Zdířky kalibrátoru FLUKE 715

Ve spodu kalibrátoru (Obr. 2.2) se nachází celkem čtyři zdířky označené zleva doprava jako

- LOOP (červená)- zdroj napětí 24 V pro kalibraci měřidel elektrického proudu
- mA (červená) - zdířka pro měření elektrického proudu
- COM (černá) - společná referenční zdířka
- V (červená) - zdířka pro vstup a výstup elektrického napětí

Využití jednotlivých zdírek závisí na žádané aplikaci. Pro kalibraci napěťových zdrojů a snímačů stačí jednoduše použít zdírku V pro signál a COM pro referenci. Při jakémkoli měření nesmí být mezi jednotlivými zdírkami napětí vyšší než 30 V. Kalibrátor je napájen jednou 9V baterií typu IEC 6LR61 a vyhovuje bezpečnostním předpisům ANSI/ISA S82.01-1994 a CAN/CSA C22.2 No. 1010.1:1992. Velký důraz byl výrobcem kladen také na robustnost a výdrž kalibrátoru vzhledem k tomu, že je navržen do průmyslového prostředí a proto je možné jej užívat za podmínek, kde jiné přístroje selhávají, či přestanou úplně fungovat. Podmínky, za kterých je možné užívat a skladovat kalibrátor jsou v Tab. 2.2 [22].

Skladovací teplota	-40 až 60 °C
Provozní teplota	-10 až 55 °C
Teplotní koeficient	50 ppm/°C od -10 do 18 °C a od 28 do 50 °C
Max. provozní nadmořská výška	3000 m n. m.
Relativní vlhkost vzduchu	95 % do 30 °C, 75 % do 40 °C, 45 % do 50 °C, 35 % do 55 °C
Mechanické vibrace	2 g od 5 do 500 Hz
Mechanický náraz	testováno pádem z výšky 1 m

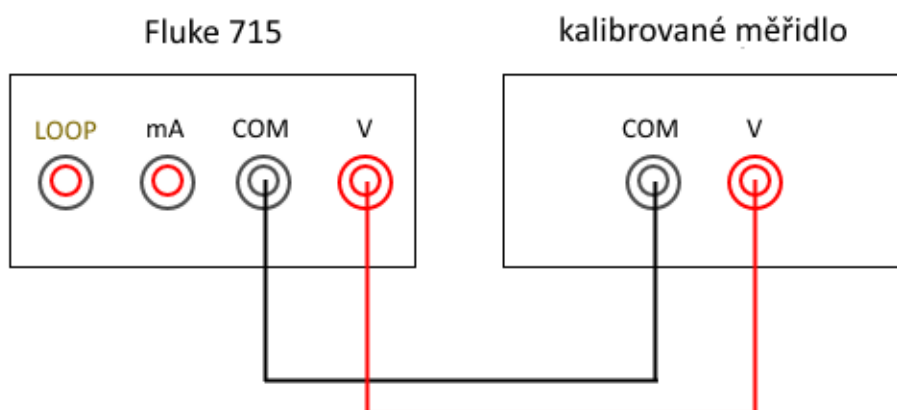
Tab. 2.2: Skladovací a provozní podmínky kalibrátoru FLUKE 715 [22]

2.2 Schéma a postup kalibrace

Vyčerpávající pojednání o tom, kdo je oprávněn provádět kalibraci a jak má při jejím provádění postupovat, udávají standardizované kalibrační postupy, které v České republice vydává Česká metrologická společnost, pro celou Evropu pak organizace EURAMET. Kalibrační postupy jsou navrženy tak, aby byly v souladu s platnými státními i mezinárodními normami, je ovšem nutné zdůraznit, že jejich dodržování není striktně požadováno. Každá organizace si totiž může navrhnout vlastní kalibrační postupy, které odpovídají jejich technické a profesionální vybavenosti [9, 10].

Pro účely této diplomové práce byl navržen kalibrační postup číslo KP-01 R:03.2016 nazvaný **Kalibrace digitálních měřidel stejnosměrného napětí pomocí kalibrátoru FLUKE 715**, který vyčerpávajícím způsobem popisuje všechny náležitosti kalibrace (viz **příloha 2**). V této sekci textu diplomové práce budou nastíněny pouze nejdůležitější úkony, které vedou k získání výsledků kalibrace.

Jednoduché schéma na obrázku 2.3 zobrazuje, jak zapojit multimetr do obvodu s kalibrátorem FLUKE 715 pro proces kalibrace pracovních měřidel stejnosměrného napětí. Jedním vodičem zkratujeme svorky kalibrátoru pro výstup a multimetru pro měření napětí (značené písmenem V), druhým vodičem zkratujeme zemní vstupy kalibrátoru (značené COM). Je nutné volit propojovací vodiče tak, aby jejich vliv na výsledek kalibrace byl zanedbatelný [22].



Obr. 2.3: Zapojení pro kalibraci stejnosměrných měřidel napětí

2.2.1 Příprava na kalibraci

Před vlastní kalibrací je nutné provést sérii procedur, které vedou k hladkému průběhu kalibrace i vyhodnocení jejich výsledků. Kalibrované měřidlo i kalibrátor se připravují na proces vlastní kalibrace v souladu s jejich dokumentací. Je též v zájmu kalibrační technika provést vnější prohlídku a zkoušku provozuschopnosti, neboť jejich opomenutí může v lepším případě vést ke zbytečné ztrátě času při náhlém zjištění, že měřidlo nefunguje jak má, v horším případě k hrubé chybě, která znehodnotí výsledky kalibrace [9, 10]. Vnější prohlídkou se kalibrační technik ujistí, že:

- není poškozen kryt přístroje,
- nechybí žádné součástky a vybavení přístroje,
- všechny technické údaje uvedené na přístroji jsou čitelné a v souladu s dokumentací dodanou výrobcem.

Zkouška provozuschopnosti zajišťuje, že:

- připojovací svorky jsou řádně upevněné,

- všechna tlačítka a přepínače vykonávají předepsané funkce,
- jsou čitelné všechny číslice a znaky na displeji,
- baterie má dostatek energie na napájení měřidla.

Elektrická funkce ovládacích prvků se ověřuje např. pomocí funkce AUTOTEST [9, 10].

Dále je dobré kalibrovaný přístroj i kalibrátor nechat v kalibrační laboratoři ustálit alespoň 30 minut před proměřováním jednotlivých kalibračních bodů. Doporučuje se provádět kontrolu referenčních podmínek před zahájením kalibrace, při jejím průběhu a po jejím skončení [9, 10].

2.2.2 Proces kalibrace

Kalibrovaný multimetr i kalibrátor jsou zapojeny dle schématu z obr. 2.3. Na kalibrátoru se nastaví požadované napětí a z displeje kalibrovaného multimetru se po ustálení odečte zobrazená hodnota napětí. Tento postup se zopakuje ve všech stanovených kalibračních bodech. V tab. 2.3 jsou uvedeny kalibrační body pro stejnosměrné napětí doporučené předpisem EURAMET cg-15 v3.0 [10]. Procento zde znamená část z rozsahu, např. + 50 % z rozsahu 200 mV je 100 mV.

Základní rozsah	$\pm 10 \%$, + 50 %, $\pm 90 \%$
Ostatní rozsahy	+ 10 %, $\pm 90 \%$
Nejnižší zvolený rozsah	0 %

Tab. 2.3: Kalibrační body pro funkci stejnosměrného napětí dle předpisu EURAMET cg-15 v3.0

2.3 Zajištění metrologické návaznosti kalibrátoru

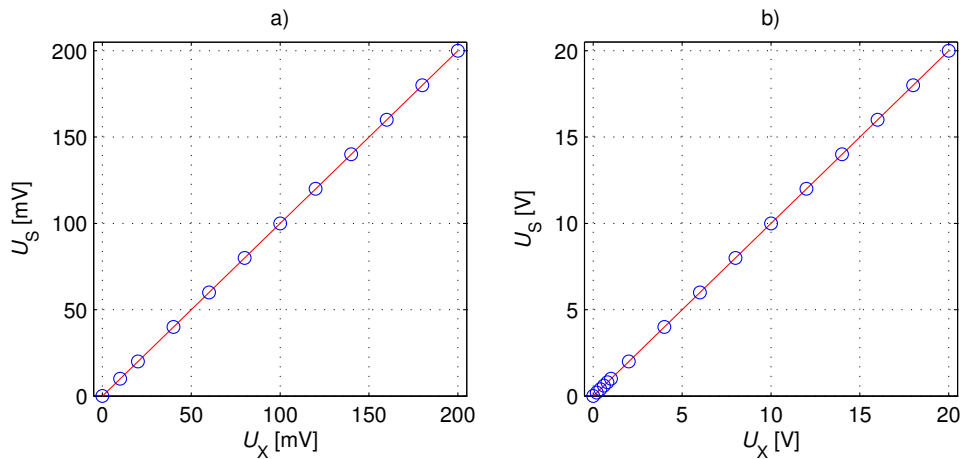
Prvním krokem bylo zajištění metrologické návaznosti našeho etalonu FLUKE 715 na systém etalonů v České republice. Protože se diplomová práce zabývá pouze kalibrací měřidel stejnosměrného napětí, bylo rozhodnuto, že bude u kalibrátoru FLUKE 715 provedena pouze kalibrace výstupu stejnosměrného napětí.

Kalibrační list ČMI obsahuje informace o chybách napěťového výstupu kalibrátoru v daných kalibračních bodech a nejistotách určení těchto chyb. Informace o nejistotě určení chyby etalonu v určitém kalibračním bodě je důležitá, protože slouží jako nejistota návaznosti etalonu při kalibraci pracovních měřidel a tuto nejistotu zahrnujeme do

celkové nejistoty určení chyby v kalibračním bodě pracovního měřidla. V předchozím kalibračním listu vydaném společností FLUKE tato informace naneštěstí chyběla.

2.3.1 Analýza kalibračního listu FLUKE 715

Kalibrace našeho etalonu FLUKE 715 byla provedena pro výstup stejnosměrného napětí v obou jeho rozsazích 200 mV a 20 V pomocí vysoce přesného referenčního etalonového multimetru DATRON 1281 s rozlišením displeje $8\frac{1}{2}$ digitů. Tabulka obsahující údaje o chybách a nejistotách v daných kalibračních bodech je uvedena v kalibračním listě v **příloze 1** [23]. Jestliže jednotlivé kalibrační body znázorníme do grafu, kde na vodorovné ose x je nastavená hodnota napětí na výstupu našeho kalibrátoru U_X a na svislé ose y hodnota indikovaná etalonovým multimetrem U_S , tak jak je to na obr. 2.4, vidíme, že závislost je téměř dokonale lineární. To je dáno tím, že chyby kalibračních bodů jsou o několik řádů menší a proto se zdá, že všechny body leží na přímce $y = x$.



Obr. 2.4: Kalibrace FLUKE 715; a) rozsah 200 mV, b) 20 V; modré kolečka: naměřené kalibrační body, červená přímka: lineární funkce $y = x$

Lepší je tedy kalibrační body zobrazit do grafu, kde na svislé ose místo napětí U_S figuruje chyba kalibračního bodu E_X definovaná jako rozdíl

$$E_X = U_X - U_S, \quad (2.1)$$

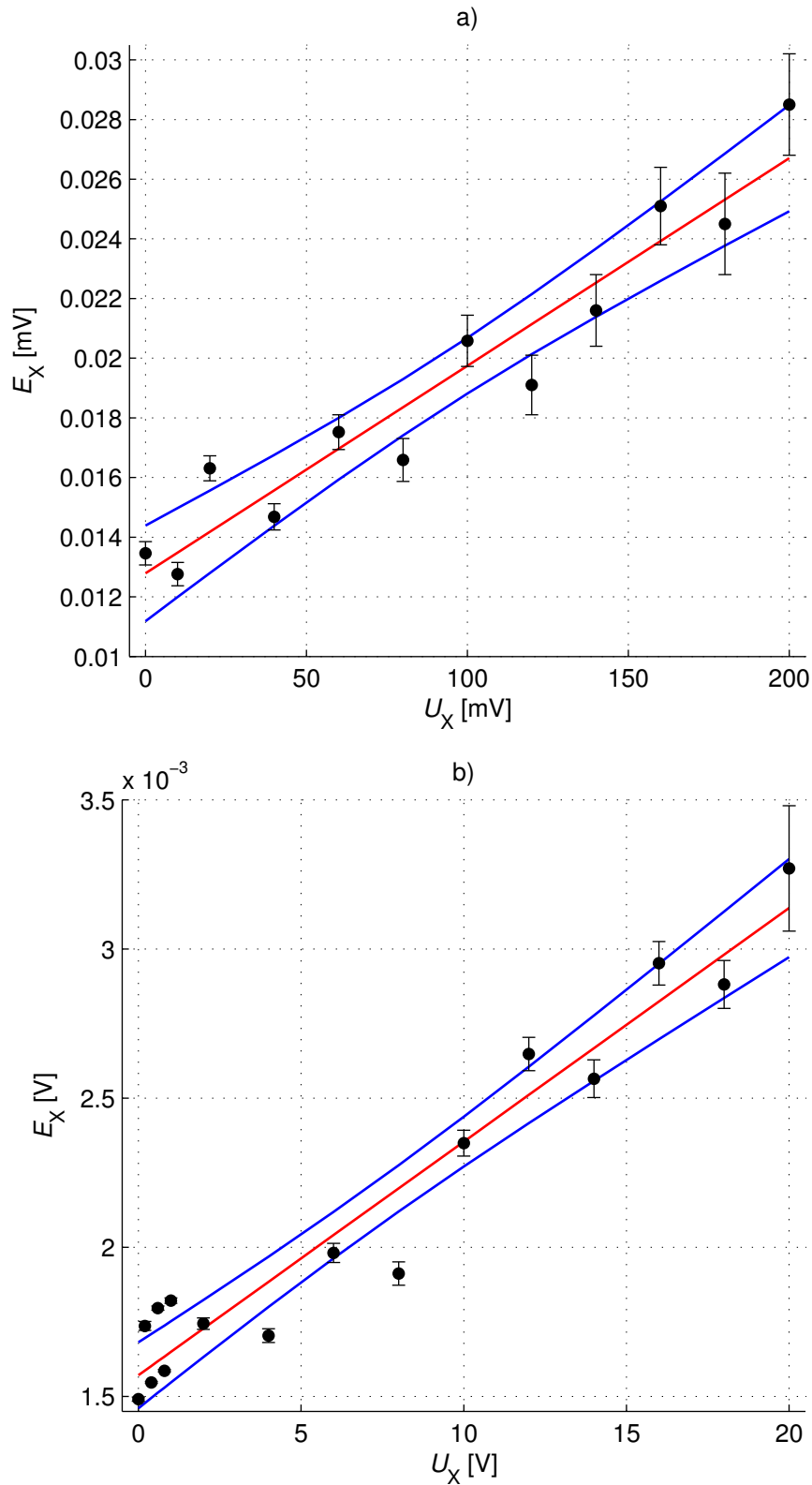
tak jak je to i na obr. 2.5. Metodou lineární regrese je možné tyto body proložit *kalibrační přímkou*, díky čemuž získáme přibližnou funkční závislost. Předpis získaných kalibračních přímek pro FLUKE 715 (zaokrouhleno na dvě platné číslice):

- rozsah 200 mV:

$$E_X = (0,000070 U_X + 0,013) \text{ mV}, \quad (2.2)$$

- rozsah 20 V:

$$E_X = (0,000078 U_X + 0,0016) \text{ V.} \quad (2.3)$$



Obr. 2.5: Kalibrační přímky výstupu FLUKE 715; a) pro rozsah 200 mV, b) pro rozsah 20 V; černé kolečka: naměřené chyby výstupu, černé svislé úsečky: nejistoty chyb výstupu, červená přímka: kalibrační přímka, modré křivky: 95% konfidenční pásy

V ideální případě nulové systematické chyby v celém rozsahu měřených hodnot by měla být kalibrační přímka totožná s vodorovnou osou. Přítomnost aditivních chyb se projeví posunem úseku chybové přímky (tj. konstantou), přítomnost multiplikačních chyb nenulovým sklonem přímky vůči vodorovné ose (tj. chyba je funkcí měřeného kalibračního bodu). Příčinu aditivní i multiplikační chyby jsme nezjistili. Na vině může být například časový drift vlastností součástek vnitřního obvodu kalibrátoru.

Kapitola 3

Výsledky a jejich diskuze

Byla provedena kalibrace celkem devíti měřidel stejnosměrného napětí. Původně těchto měřidel mělo být celkem třináct, ale dva multimetry UNI-T DT9202A nevyhovovaly, protože jejich přepínač funkcí a rozsahů nefungoval bez problémů a dvě měřicí karty značky NI (PCI-6024E, USB-6221) byly po konzultaci s kalibračním manuálem těchto karet vyřazeny z procesu kalibrace z důvodu nedostatečné přesnosti kalibrátoru FLUKE 715.

Na obr. 3.1 je zobrazen příklad zapojení multimetru a kalibrátoru FLUKE 715 pro proces kalibrace. Vzhledem k technologickým limitacím kalibrátoru FLUKE 715 byla provedena kalibrace pouze v rozsazích 200 mV a 20 V. Kalibrační body pro kalibraci vybraných pracovních měřidel pomocí kalibrátoru FLUKE 715 stanovené dle předpisu EURAMET cg-15 jsou uvedeny v tab. 3.1. Základní a zároveň nejmenší rozsah je 200 mV.

Na obr. 3.2 až 3.6 jsou zobrazeny jednotlivé modely kalibrovaných multimetrů. Tab. 3.2 obsahuje souhrn všech kalibrovaných měřidel a tab. 3.3 jejich vybrané metrologické parametry. Kalibrační listy těchto měřidel včetně tabulek s naměřenými kalibračními body a jejich nejistotami jsou obsaženy v **příloze 3**. Každému kalibrovanému měřidlu navíc přísluší číslo měřidla, kterým se tato práce odkazuje na konkrétní měřidlo a který odpovídá poslední číslici čísla kalibračního listu. Tedy měřidlu č. 1, resp. č. 2 odpovídá kalibrační list KL-MULT-160304-01, resp. KL-MULT-160304-02. **Příloha 4** obsahuje schéma návaznosti všech kalibrovaných měřidel, jejichž výsledky kalibrace byly ve shodě se specifikací.

Rozsah	Kalibrační body
200 mV	-180 mV, - 20 mV, 0 mV, 20 mV, 100 mV, 180 mV
20 V	-18 V, 2 V, 18 V

Tab. 3.1: Vybrané kalibrační body

Číslo měřidla	Výrobce	Model	Výrobní číslo
1	Uni-Trend Ltd.	UT50A	814052478
2	AXIOMET AB	AX-585B	997503226
3	AXIOMET AB	AX-585B	997503243
4	AXIOMET AB	AX-585B	997503231
5	Uni-Trend Ltd.	DT9202A	2113856
6	Uni-Trend Ltd.	DT9202A	2113879
7	AXIOMET AB	AX-585B	996900821
8	FK technics, spol. s r.o.	FK8250	7120274
9	FK technics, spol. s r.o.	FK8400	10025164

Tab. 3.2: Kalibrovaná měřidla



Obr. 3.1: Příklad zapojení multimetru a kalibrátoru pro kalibraci; nalevo: Multimetr UT50A, napravo: kalibrátor FLUKE 715

Model	Rozlišení (digitů)	Přesnost (čtení + digit)
UT-50	3½	200 mV ±(0.5 % + 1), 20 V ±(0.5 % + 1)
AX-585B	4½	200 mV ±(0.1 % + 5), 20 V ±(0.1 % + 5)
DT9202A	3½	200 mV ±(0.5 % + 1), 20 V ±(0.5 % + 1)
FK8250	3½	200 mV ±(0.5 % + 2), 20 V ±(0.5 % + 2)
FK8400	3½	200 mV ±(0.5 % + 2), 20 V ±(0.5 % + 2)

Tab. 3.3: Vybrané metrologické parametry kalibrovaných měřidel; převzato z [24–28]



Obr. 3.2: UNI-T DT9202A



Obr. 3.3: AXIOMET AX-585B



Obr. 3.4: UNI-T UT50A



Obr. 3.5: FK Technics FK8250



Obr. 3.6: FK Technics FK8400

3.1 Stanovení rozšířené nejistoty kalibrovaných měřidel

Bez újmy na obecnosti bude na příkladu měřidel č. 2 (AX-585B) a č. 5 (DT9202A) představeno stanovení výsledku měření v kalibračním bodě o hodnotě 180 mV na rozsahu 200 mV. Důvodem výběru těchto dvou měřidel v tomto textu je, že jejich výsledky kalibrace vykazuje odlišný typ statistického rozdělení pravděpodobnosti a proto poslouží jako příklad dvou odlišných případů. Stejný postup se aplikuje i v případě ostatních měřidel v jiných kalibračních bodech. Protože byly dodrženy standardní laboratorní podmínky, tj. teplota $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ a vlhkost vzduchu $(45 \pm 20)\% \text{RH}$, není nutné aplikovat přídatné korekce k úhrnné chybě kalibrace.

Kalibrátor FLUKE 715 byl po připojení k měřidlu č. 2 nastaven na hodnotu $U_S = 180,00 \text{ mV}$.

Měřidlo č. 2 indikovalo hodnotu $U_X = 180,05 \text{ mV}$ a tedy úhrnná chyba kalibrace je dle rovnice (1.8) v tomto případě $E_X = 0,05 \text{ mV}$.

Indikace měřidla U_X byla stálá a proto je možno $u(U_X)$ položit rovno nule, tedy $u(U_X) = 0 \text{ mV}$.

Nejistota složky U_S je nejistotou návaznosti kalibrátoru. Tu lze nalézt v kalibračním listu kalibrátoru a činí $0,0017 \text{ mV}$ v bodě $180,00 \text{ mV}$ pro pravděpodobnost pokrytí 95% za předpokladu normálního rozdělení pravděpodobnosti. Aby se získala standardní nejistota, je nutné tuto hodnotu vydělit koeficientem rozšíření, který je pro tuto pravděpodobnost pokrytí přibližně roven $k = 2$. Standardní nejistota složky U_S se tedy rovná

$$u(U_S) = \frac{0,0017}{2} \text{ mV} = 0,00085 \text{ mV}. \quad (3.1)$$

Nejistota určení korekce hodnoty indikace digitálního multimetru $u(\delta U_X)$ se určí jako polovina konečné rozlišovací schopnosti multimetru, tedy $0,005 \text{ mV}$. Všechny hodnoty v intervalu jehož velikost odpovídá konečné rozlišovací schopnosti multimetru se považují za stejně pravděpodobné a proto této složce nejistoty přísluší obdélníkové rozdělení pravděpodobnosti. Z tohoto důvodu se hodnota $0,005 \text{ mV}$ ještě musí vydělit koeficientem obdélníkového rozdělení $\chi = \sqrt{3}$, aby se získala standardní nejistota korekce digitálního multimetru. Její velikost je pak

$$u(\delta U_X) = \frac{0,005}{\sqrt{3}} \text{ mV} = 0,0029 \text{ mV}. \quad (3.2)$$

Poslední je nejistota určení korekce hodnoty nastavené na kalibrátoru FLUKE 715, tj. $u(\delta U_S)$. Ta se určí ze specifikace uvedené v technické dokumentaci měřidla. Speci-

fikace kalibrátoru na rozsahu 200 mV je $\pm 0,015\%$ ze čtené hodnoty a $\pm 0,02$ mV na celém rozsahu. V bodě 180,00 mV tedy $\pm 0,047$ mV. V manuálu není uvedeno o jaké rozdělení pravděpodobnosti se jedná a proto se bere jako nejhorší odhad obdélníkové rozdělení pravděpodobnosti a proto se tato přístrojová nejistota také vydělí koeficientem obdélníkového rozdělení $\chi = \sqrt{3}$. Nejistota určení korekce kalibrátoru po zaokrouhlení na dvě platné číslice činí $u(\delta U_S) = 0,027$ mV.

$$u(\delta U_S) = \frac{0,047}{\sqrt{3}} \text{ mV} = 0,027 \text{ mV}. \quad (3.3)$$

Tab. 3.4 shrnuje hodnoty všech složek kalibrace, jejich nejistot a rozdělení pravděpodobnosti.

Složka	Hodnota [mV]	Nejistota [mV]	Rozdělení pravděpodobnosti
U_X	180,05	-	-
U_S	180,00	0,00085	normální
δU_X	0,0	0,0029	obdélníkové
δU_S	0,0	0,027	obdélníkové

Tab. 3.4: Parametry jednotlivých složek chyby měření kalibrace měřidla č. 2 v kalibračním bodě 180 mV

Standardní kombinovaná nejistota měření neboli nejistota určení úhrnné chyby měření $u(E_X)$ se spočítá podle vzorce 1.13, tedy

$$u(E_X) = \sqrt{(0,00085)^2 + (0,0029)^2 + (0,027)^2} \text{ mV} = 0,027 \text{ mV}. \quad (3.4)$$

Nyní je možné vypočítat rozšířenou nejistotu U dle vzorce (1.17). Z výsledku (3.4) je zřetelně vidět, že složka kombinované nejistoty $u(\delta U_S)$ výrazně převažuje nad ostatními a proto není možné použít koeficient rozšíření normálního rozdělení $k = 2$ pro získání pravděpodobnosti pokrytí $p = 0,95$ a místo toho je třeba určit koeficient k pro obdélníkové rozdělení dle vzorce (1.18), takže

$$U(E_X) = p\sqrt{3} \cdot u(E_X) = 0,95 \cdot \sqrt{3} \cdot 0,027 \text{ mV} = 0,04455 \text{ mV}. \quad (3.5)$$

a po zaokrouhlení na jednu platnou číslici je chyba měření v kalibračním bodě 180 mV měřidla č. 2 a její nejistota

$$E_X \pm U(E_X) = (0,05 \pm 0,04) \text{ mV}. \quad (3.6)$$

Postup určení dílčích složek nejistoty je u měřidla č. 5 identický. Shrnutí hodnot jed-

notlivých složek úhrnné chyby kalibrace a jejich nejistot v kalibračním bodě 180 mV rozsahu 200 mV je v tab. 3.5.

Složka	Hodnota [mV]	Nejistota [mV]	Rozdělení pravděpodobnosti
U_X	181,3	-	-
U_S	180,00	0,00085	normální
δU_X	0,0	0,029	obdélníkové
δU_S	0,0	0,027	obdélníkové

Tab. 3.5: Parametry jednotlivých složek chyby měření kalibrace měřidla č. 5 v kalibračním bodě 180 mV

Úhrnná chyba kalibrace měřidla v kalibračním bodě 180 mV je

$$E_X = 1,3 \text{ mV} \quad (3.7)$$

a kombinovaná standardní nejistota činí

$$u(E_X) = \sqrt{(0,00085)^2 + (0,029)^2 + (0,027)^2} \text{ mV} = 0,040 \text{ mV}. \quad (3.8)$$

Nejistota určení chyby kalibrace u měřidla č. 5 vykazuje lichoběžníkové rozdělení neboť jsou zde dvě dominantní a numericky srovnatelné složky nejistot, které převažují nad tou třetí, tj. $u(\delta U_X)$ a $u(\delta U_S)$. Základna a a horní strana b lichoběžníka jsou

$$a = (0,029 + 0,027) \text{ mV} = 0,056 \text{ mV}; \quad b = |0,029 - 0,027| \text{ mV} = 0,002 \text{ mV} \quad (3.9)$$

poměr β je tedy

$$\beta = \frac{b}{a} = \frac{0,002}{0,056} = 0,036 \quad (3.10)$$

a poměr

$$\frac{p}{2-p} = \frac{0,95}{1,05} = 0,905, \quad (3.11)$$

což znamená, že $\beta < \frac{p}{2-p}$ a proto se koeficient rozšíření spočítá dle vzorce (1.23)

$$k(0,95) = \frac{1 - \sqrt{(1 - 0,95)(1 - 0,036^2)}}{\sqrt{\frac{1+0,036^2}{6}}} = 1,90. \quad (3.12)$$

Rozšířená nejistota měření U je

$$U(E_X) = k(0,95) u(E_X) = 1,90 \cdot 0,040 \text{ mV} = 0,076 \text{ mV} \quad (3.13)$$

a po zaokrouhlení na jednu platnou číslici je chyba měření E_X v kalibračním bodě 180 mV měřidla č. 5 a její nejistota

$$E_X \pm U(E_X) = (1,30 \pm 0,08) \text{ mV}. \quad (3.14)$$

3.2 Posouzení shody výsledků kalibrace se specifikací

U měřidla č. 5 byly naměřeny hodnoty, které nejsou ve shodě se specifikací. U ostatních měřidel byly všechny naměřené hodnoty ve shodě se specifikací. Konkrétní prohlášení je uvedeno v kalibračních listech těchto měřidel v **příloze 3** této diplomové práce.

Bez újmy na obecnosti a pro úsporu textu bude posouzení shody předvedeno i v tomto případě na měřidlech č. 2 a č. 5 v kalibračním bodě 180 mV.

Specifikace měřidla č. 2 v rozsahu 200 mV uvedená v dokumentaci je $\pm 0,1\%$ ze čtené hodnoty a $\pm 0,05$ mV na celém rozsahu. Z toho vyplývá, že v kalibračním bodě 180 mV je mez intervalu tolerance rovna $\pm 0,23$ mV. Výsledku měření (3.6) v daném kalibračním bodě rozšířenému o nejistotu pro pravděpodobnost pokrytí 95 % odpovídá interval $\langle 0,01; 0,09 \rangle$ mV. Tento interval se nachází uvnitř intervalu tolerance a zároveň nepřekrývá jeho mez. Platí tedy, že měřidlo č. 2 je v bodě 180 mV ve shodě se specifikací.

Specifikace měřidla č. 5 v rozsahu 200 mV uvedená v dokumentaci je $\pm 0,5\%$ ze čtené hodnoty a $\pm 0,1$ mV na celém rozsahu. Z toho vyplývá, že v kalibračním bodě 180 mV je mez intervalu tolerance rovna $\pm 1,0$ mV. Výsledku měření (3.14) v daném kalibračním bodě rozšířenému o nejistotu pro pravděpodobnost pokrytí 95 % odpovídá interval $\langle 1,22; 1,38 \rangle$ mV. Tento interval se nachází mimo interval tolerance a zároveň nepřekrývá jeho mez. Platí tedy, že měřidlo č. 5 není v bodě 180 mV ve shodě se specifikací.

Závěr

Cílem této práce byla kalibrace vybraných pracovních měřidel stejnosměrného napětí z Katedry experimentální fyziky PřF UP s využitím kalibrátoru FLUKE 715. Nejdříve však bylo nutné kalibrátor navázat na systém realizace jednotky stejnosměrného napětí v České republice. O to se postaral kvalifikovaný personál ČMI OI Brno s využitím vysoce přesného etalonového multimetru DATRON 1281. Výsledky kalibrace uvedené v kalibračním listu kalibrátoru pak byly využity pro stanovení nejistoty kalibrace pracovních měřidel stejnosměrného napětí.

Vzhledem k technickým limitům kalibrátoru byly kalibrovány pouze rozsahy 200 mV a 20 V funkce stejnosměrného napětí méně přesných pracovních multimetrů. Pro úplnou kalibraci všech měřidel stejnosměrného napětí ve všech měřicích rozsazích by bylo nutné pořídit klasický laboratorní kalibrátor, jakým je například model DATRON 1281. Pořizovací cena takového přístroje je ale řádově vyšší oproti procesním kalibrátorům jako FLUKE 715 a jeho nákup mimo rámec této diplomové práce.

Z jedenácti vybraných multimetrů bylo kalibrováno pouze devět, neboť dva z nich neprošly prohlídkou provozuschopnosti. Těchto devět multimetrů pak bylo podrobeno procesu posouzení shody se specifikací. Osm z nich bylo ve shodě se specifikací, pouze jeden z nich nebyl v několika kalibračních bodech ve shodě se specifikací. Všem devíti řádně zkalibrovaným měřidlům byl vystaven kalibrační list, který kromě výsledků kalibrace obsahuje také prohlášení o shodě se specifikací.

Výstupem této práce je rovněž kalibrační postup pro kalibraci měřidel stejnosměrného napětí pomocí kalibrátoru FLUKE 715, který byl využit pro kalibraci daných měřidel stejnosměrného napětí (viz **příloha 2**) a schéma návaznosti všech zkalibrovaných měřidel, které prošly zkouškou posouzení shody se specifikací (viz **příloha 4**).

Seznam použité literatury

- [1] TNI 01 0115:2009. *Mezinárodní metrologický slovník - Základní a všeobecné pojmy a přidružené termíny (VIM)*. Praha: ÚNMZ, 2009.
- [2] TŮMOVÁ, O. *Metrologie a hodnocení procesů*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2009. ISBN 978-80-7300-249-7.
- [3] SEDLÁK, B., I. ŠTOLL. *Elektrina a magnetismus*. Vyd. 3., V nakl. Karolinum 2. Praha: Karolinum, 2012. ISBN 978-80-246-2198-2.
- [4] VÍTOVEC, J. *Měření základních elektrických veličin*. Praha: Český metrologická společnost, 2003.
- [5] *Národní metrologický systém České republiky* [online]. UNMZ.cz [cit. 2016-06-20]. Dostupné z: unmz.cz/urad/narodni-metrologicky-system-ceske-republiky
- [6] Zákon č. 505/1990 Sb. ze dne 16. listopadu 1990, o metrologii.
- [7] ČSN EN ISO 10012. *Systémy managementu měření - Požadavky na procesy měření a měřicí vybavení*. Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [8] LUDVÍK, V. *Systém managementu měření*. Praha: ÚNMZ, 2004.
- [9] ČMS KP 4.1.2-06-11-N. *Číslicový multimetr*. Praha: Česká metrologická společnost, 2011.
- [10] EURAMET cg-15 v3.0. *Guidelines on the Calibration of Digital Multimeters*. Berlin: EURAMET, 2015. Dostupné též z: euramet.org/knowledge-transfer/guides/.
- [11] HORSKÝ, J., P. HORSKÝ a J. HORSKÁ. Měření a jeho vyhodnocení V: interval mezi kalibracemi. *Automa*. 2015, **2015**(5). ISSN 1210-9592.
- [12] ILAC-G8:03/2009. *Pokyny k uvádění shody se specifikací*. Praha: Český institut pro akreditaci, 2009.

- [13] Vyhláška č. 264/2000 Sb. ze dne 14. července 2000, o základních měřicích jednotkách a ostatních jednotkách a o jejich označování.
- [14] STREIT, J., M. ŠÍRA. Nový státní etalon stejnosměrného napětí ČR. *Metrologie*. 2013, **2013**(2). ISSN 1210-3543.
- [15] ŠÍRA, M., V. ZACHOVALOVÁ NOVÁKOVÁ, J. OTYCH a J. ZŮDA. *Vybrané problémy metrologie fyzikálních a elektrických veličin*. Brno: Český metrologický institut, 2012. Dostupné též z:
crr.vutbr.cz/system/files/brozura_08_1206.pdf
- [16] TESAŘ, J. *Státní etalony České republiky*. 1. vyd. Praha: Český metrologický institut, 2013. ISBN 978-80-905619-1-5.
- [17] *CODATA Value: Josephson Constant. The NIST Reference on Constants, Units and Uncertainty NIST.gov* [online]. NIST.gov [cit. 2016-06-20]. Dostupné z:
physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?kjios
- [18] *CODATA Value: conventional value of Josephson Constant. The NIST Reference on Constants, Units and Uncertainty* [online]. NIST.gov [cit. 2016-06-20]. Dostupné z: physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?kjios
- [19] *History of NIST Quantum Voltage Standards* [online]. NIST.gov [cit. 2016-07-01]. Dostupné z: nist.gov/pml/history-volt/superconductivity_1990s.cfm
- [20] EA - 4/02 M:2013. *Vyjádření nejistoty měření při kalibraci*. Praha: Český institut pro akreditaci, 2014.
- [21] SUCHÁNEK, M., J. SKOPAL. *Pokyn pro vyjadřování nejistoty měření (GUM)*. Praha: ÚNMZ, 2012
- [22] *FLUKE 715 Volt/mA Calibrator: Instruction Sheet*. Everett: Fluke, 2005. Dostupné též z: en-us.fluke.com/products/ma-loop-calibrators/fluke-715-process-calibration-tool.html#resources
- [23] *Kalibrační list č. 6011-KL-L0807-15*. Brno: ČMI OI Brno, 2015.
- [24] *Model UT50A/B/C: OPERATING MANUAL*. Dong Guan: Uni-Trend Technology, 2001. Dostupné též z: ageta.hu/pdf/UT50ABC.pdf
- [25] *AX585-B: Product specifications*. Malmö: AXIOMET. Dostupné též: en.axiomet.eu/product/ax-585b/pdf/29
- [26] *DT92 Advanced Series: Operator's Manual*. Dong Guan: Uni-Trend Technology. Dostupné též z: yourduino.com/docs/DT9205A.pdf

- [27] *Návod k obsluze: Univerzální měřicí přístroj model FK8250*. Praha: FK Technics, 2009. Dostupné též z:
elektroeden.cz/files/id7%5Cnavody%5C7%5C7120274_navod.pdf
- [28] *Návod k obsluze: Univerzální měřicí přístroj model FK8400 a FK5800*. Praha: FK Technics, 2008. Dostupné též z:
elektroeden.cz/files/id7%5Cnavody%5C7%5C7120122_navod.pdf

Seznam obrázků

1.1	Posouzení shody se specifikací	14
1.2	Návaznost stejnosměrného napětí v ČR; převzato z [14]	15
1.3	Josephsonův přechod; převzato z [14]	17
1.4	VA charakteristika jednoduchého Josephsonova přechodu; převzato z [14]	18
1.5	Zjednodušené schéma Josephsonova čipu; převzato z [14]	19
1.6	Historicky první Josephsonův čip z roku 1992; převzato z [19]	19
1.7	Schéma systému kvantového etalonu v ČMI; převzato z [14]	20
1.8	Tvary křivek vybraných rozdělení pravděpodobnosti	25
1.9	Obdélníkové rozdělení pravděpodobnosti veličiny napětí	27
1.10	Symetrické lichoběžníkové rozdělení pravděpodobnosti veličiny napětí	28
2.1	Kalibrátor FLUKE 715	29
2.2	Zdířky kalibrátoru FLUKE 715	30
2.3	Zapojení pro kalibraci stejnosměrných měřidel napětí	32
2.4	Kalibrace FLUKE 715; a) rozsah 200 mV, b) 20 V; modré kolečka: naměřené kalibrační body, červená přímka: lineární funkce $y = x$	34
2.5	Kalibrační přímký výstupu FLUKE 715; a) pro rozsah 200 mV, b) pro rozsah 20 V; černé kolečka: naměřené chyby výstupu, černé svislé úsečky: nejistoty chyb výstupu, červená přímka: kalibrační přímka, modré křivky: 95% konfidenční pásy	35
3.1	Příklad zapojení multimetru a kalibrátoru pro kalibraci; nalevo: Multimetr UT50A, napravo: kalibrátor FLUKE 715	38
3.2	UNI-T DT9202A	39
3.3	AXIOMET AX-585B	40

3.4 UNI-T UT50A 40

3.5 FK Technics FK8250 41

3.6 FK Technics FK8400 41

Seznam tabulek

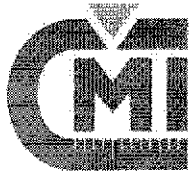
1.1	Porovnání relativní nejistoty etalonů stejnosměrného napětí	16
1.2	Metrologické charakteristiky kvantového etalonu napětí v ČMI [14] . . .	21
1.3	Hodnoty součinitele χ pro daná rozdělení pravděpodobnosti	25
1.4	Koeficient rozšíření k pro normální rozdělení pravděpodobnosti [21] . . .	26
2.1	Metrologické parametry kalibrátoru FLUKE 715 [22]	30
2.2	Skladovací a provozní podmínky kalibrátoru FLUKE 715 [22]	31
2.3	Kalibrační body pro funkci stejnosměrného napětí dle předpisu EURA- MET cg-15 v3.0	33
3.1	Vybrané kalibrační body	38
3.2	Kalibrovaná měřidla	38
3.3	Vybrané metrologické parametry kalibrovaných měřidel; převzato z [24–28]	39
3.4	Parametry jednotlivých složek chyby měření kalibrace měřidla č. 2 v kalibračním bodě 180 mV	43
3.5	Parametry jednotlivých složek chyby měření kalibrace měřidla č. 5 v kalibračním bodě 180 mV	44

Seznam použitých symbolů a zkratek

A/D	analogově digitální
AC	střídavé napětí nebo proud
ČMI	Český metrologický institut
ČIA	Český institut pro akreditaci
ČSN	Česká státní norma
D/A	digitálně analogový
DC	stejnoseměrné napětí nebo proud
EA	European Accreditation
EN	Evropská norma
EURAMET	European Association of National Metrology Institutes
ISO	International Organization for Standardization
IEC	International Electrotechnical Commission
ILAC	International Laboratory Accreditation Cooperation
NI	National Instruments Corp.
NIST	National Institute of Standards and Technology (USA)
OI	Oblastní inspektorát ČMI
TNI	Technická normalizační informace
ÚNMZ	Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví

Přílohy

Příloha 1: Kalibrační list FLUKE 715 [23]



Český metrologický institut

Okružní 31, 638 00 Brno
tel. +420 545 555 111
www.cmi.cz



Kalibrační laboratoř č. 2202 akreditovaná Českým institutem pro akreditaci, o.p.s. podle ČSN EN ISO/IEC 17025:2005

Pracoviště : Oblastní inspektorát Brno, Okružní 31, 638 00 Brno
Oddělení primární etalonáže ss a nf elektrických veličin, tel. 545 555 208, fax 545 555 183

KALIBRAČNÍ LIST

6011-KL-L0807-15

Datum vystavení : 4.11.2015

List 1 ze 3 listů

Zákazník : Univerzita Palackého v Olomouci
Přírodovědecká fakulta
17. listopadu 1192/12
771 46 Olomouc

Měřidlo : Kalibrátor
Výrobce : FLUKE
Typ : 715
Výrobní číslo : 2939011

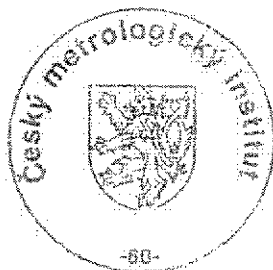
Výsledky kalibrace byly získány za podmínek a s použitím postupů uvedených v tomto kalibračním listě a vztahují se pouze k době a místu provedení kalibrace.

Použité etalony : Multimetr DATRON 1281 v.č. 32029-9, kalibrační list č. 6011-KL-E0002-15


Použitý etalon má metrologickou návaznost na (mezi)národní etalony.

Datum kalibrace : 4.11.2015

Kalibraci provedl :



Vedoucí oddělení:


Ing. Pavel Bednář


Ing. Jiří Streit

- Kalibrační postup :** Kalibrované měřidlo bylo porovnáno se sekundárními etalony.
Při kalibraci bylo použito postupu č. 611-MP-C097.
- Podmínky prostředí :** teplota v laboratoři : $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$
rel.vlhkost vzduchu : $(45 \pm 20) \%RH$
- Výsledky kalibrace :** Výsledky měření viz Tabulky hodnot.
- Nejistoty měření :** Standardní nejistota měření byla určena v souladu s dokumentem EA-4/02. Uvedená rozšířená nejistota měření je součinem standardní nejistoty měření a koeficientu k , který odpovídá pravděpodobnosti pokrytí přibližně 95 %, což pro normální rozdělení odpovídá koeficientu rozšíření $k = 2$.

Český metrologický ústav
Číslová 59, Praha 5
152 00 Praha
ČR

Stejnosměrná napětí - simulace

Rozsah	Hodnota nastavená	Hodnota zjištěná	Chyba	Nejistota měření	
100 mV	0,00 mV	0,013 46 mV	0,013 46 mV	0,000 39 mV	
	10,00 mV	10,012 76 mV	0,012 76 mV	0,000 39 mV	
	20,00 mV	20,016 31 mV	0,016 31 mV	0,000 42 mV	
	40,00 mV	40,014 68 mV	0,014 68 mV	0,000 44 mV	
	60,00 mV	60,017 52 mV	0,017 52 mV	0,000 58 mV	
	80,00 mV	80,016 59 mV	0,016 59 mV	0,000 72 mV	
	100,00 mV	100,020 58 mV	0,020 58 mV	0,000 86 mV	
	120,00 mV	120,019 1 mV	0,019 1 mV	0,001 0 mV	
	140,00 mV	140,021 6 mV	0,021 6 mV	0,001 2 mV	
	160,00 mV	160,025 1 mV	0,025 1 mV	0,001 3 mV	
	180,00 mV	180,024 5 mV	0,024 5 mV	0,001 7 mV	
	200,00 mV	200,028 5 mV	0,028 5 mV	0,001 7 mV	
	10 V	0,000 V	0,001 491 V	0,001 491 V	0,007 mV
		0,200 V	0,201 736 V	0,001 736 V	0,015 mV
0,400 V		0,401 547 V	0,001 547 V	0,003 mV	
0,600 V		0,601 796 V	0,001 796 V	0,007 mV	
0,800 V		0,801 586 V	0,001 586 V	0,004 mV	
1,000 V		1,001 821 V	0,001 821 V	0,009 mV	
2,000 V		2,001 744 V	0,001 744 V	0,019 mV	
4,000 V		4,001 704 V	0,001 704 V	0,023 mV	
6,000 V		6,001 981 V	0,001 981 V	0,032 mV	
8,000 V		8,001 912 V	0,001 912 V	0,039 mV	
10,000 V		10,002 349 V	0,002 349 V	0,043 mV	
12,000 V		12,002 648 V	0,002 648 V	0,056 mV	
14,000 V		14,002 565 V	0,002 565 V	0,063 mV	
16,000 V		16,002 952 V	0,002 952 V	0,073 mV	
18,000 V		18,002 881 V	0,002 881 V	0,080 mV	
20,000 V		20,003 27 V	0,003 27 V	0,21 mV	

Konec kalibračního listu

Český metrologický institut
 Občanská inspekční firma
 Okružní 31
 130 00 Brno

Příloha 2: Kalibrační postup

Katedra experimentální fyziky
Přírodovědecké fakulty UP v Olomouci
17. listopadu 21, 771 46 Olomouc
email: lukas.dokoupil01@upol.cz, web: fyzika.upol.cz

Kalibrační postup
KP-01 R:03.2016

**KALIBRACE DIGITÁLNÍCH MĚŘIDEL STEJNOSMĚRNÉHO
NAPĚTÍ POMOCÍ KALIBRÁTORU FLUKE 715**

Autor:	Lukáš Dokoupil
Schválil:	Tomáš Rössler
Vydáno:	28.2.2016
Revize:	0

Olomouc
březen 2015

1. Úvod

1. Účelem tohoto dokumentu je poskytnout základní pokyny pro provedení kalibrace pracovních měřidel stejnosměrného napětí pomocí kalibrátoru FLUKE 715, vyhodnocení naměřených výsledků a posouzení shody s technickými specifikacemi. Bližší informace jsou obsaženy v příslušných normách, na které se tento kalibrační postup odkazuje, viz čl. 12.
2. Kalibrační postup je určen ke kalibraci digitálních měřidel stejnosměrného napětí pomocí kalibrátoru FLUKE 715 v rozsazích 200 mV a 20 V, v rozsahu indikace až 4½ digitů se základní chybou ± 500 ppm a horší.

2. Názvosloví a definice

1. Názvosloví a definice jsou obsaženy v příslušných normách, viz čl. 12.

3. Požadavky na způsobilost pracovníků a laboratoře

1. Požadavky na způsobilost laboratoře se řídí dle normy ČSN EN ISO/IEC 17025.
2. Pracovníci provádějící kalibraci jsou nejlépe osoby znalé s vyšší kvalifikací dle § 6 vyhlášky č. 50/78 Sb a zároveň seznámeni s kalibračním postupem.

4. Prostředky potřebné pro kalibraci

1. Pro kalibraci dle tohoto postupu je nutné užít následujícího etalonu, který má k dispozici katedra experimentální fyziky
 - procesní kalibrátor stejnosměrného napětí a proudu FLUKE 715
2. Pro zajištění hladkého průběhu kalibrace je dále třeba použít následující pomůcky
 - snímač teploty s rozlišením min. 0,2 °C a vlhkosti vzduchu (např. Papouch THT2 k dispozici na KEF)
 - propojovací vodiče
 - čisticí prostředky

5. Obecné podmínky kalibrace

1. Kalibrace by měla být prováděna za následujících referenčních podmínek
 - teplota vzduchu: (23 ± 2) °C
 - relativní vlhkost vzduchu: (45 ± 20) %RH
2. Zde znak \pm neuvádí nejistotu měření, ale dovolené meze referenčních podmínek v časovém úseku prováděné kalibrace. Případné korekce naměřených hodnot z důvodu nestandardních referenčních podmínek by měly být prováděny v souladu s pokyny stanovenými výrobcem měřicího přístroje.

6. Postup kalibrace

6.1 Příprava na kalibraci

1. Kalibrované měřidlo se na proces kalibrace připraví v souladu s jejich technickou dokumentací.
2. Kalibrované měřidlo se umístí alespoň na 30 minut do prostředí s referenčními podmínkami uvedenými v odst. 1, čl. 5..
3. Je nutné volit propojovací vodiče tak, aby neovlivnili výsledek kalibrace.

6.2 Vnější prohlídka

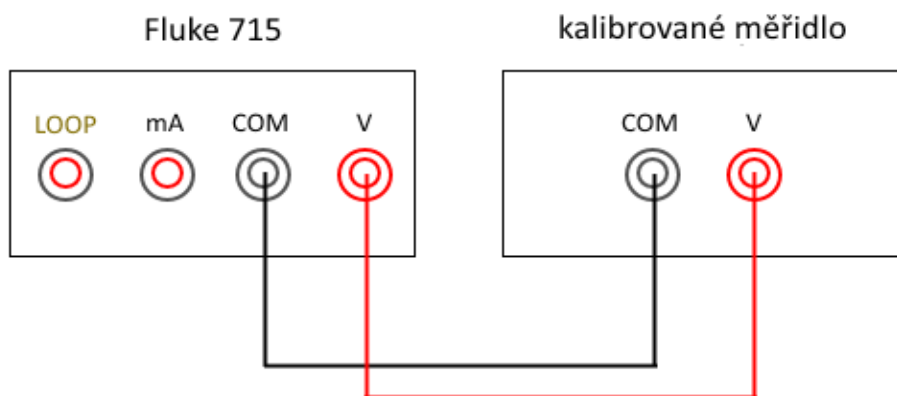
1. Vnější prohlídkou se zjišťuje, že nechybí žádná součást měřidla, kryt přístroje není poškozen, nechybí vylepené výrobní číslo a dodatečné technické informace.

6.3 Zkouška provozuschopnosti

1. Zkontroluje se upevnění svorek, stav baterie, čitelnost displeje a funkčnost tlačítek a přepínačů.
2. Pokud měřidlo umožňuje automatické otestování funkčnosti (SELFTEST), pak se před kalibrací toto otestování provede.

6.4 Vlastní kalibrace

1. Kalibrátor se připraví ke kalibraci obdobným způsobem jako měřidlo postupem uvedeným v odst. 1, čl. 6.1.
2. Schéma zapojení kalibrátoru a multimetru pro kalibraci měřidel stejnosměrného napětí je na obrázku níže



3. Doporučené kalibrační body jsou uvedeny v tabulce níže. Jejich určení vychází z obecného kalibračního postupu pro digitální multimetry EURAMET cg-15 v3.0.

Rozsah	Kalibrační body
200 mV	-180 mV, -20 mV, 0 mV, 20 mV, 180 mV
20 V	-18 V, 2 V, 18 V

Po nastavení daného kalibračního bodu na kalibrátoru se vyčká, dokud se neustálí hodnota zobrazená na displeji kalibrovaného měřidla. Poté se odečte hodnota z displeje kalibrovaného měřidla a porovná s hodnotou nastavenou na kalibrátoru. Výsledky se nezapomenou zapsat do připravené tabulky.

7. Vyhodnocení výsledků kalibrace

7.1 Stanovení nejistoty výsledku měření

1. Proces vyhodnocení výsledků kalibrace se řídí modelem měření, který je popsán blíže v příloze A. Nejistota měření se stanoví podle pokynů uvedených v dokumentu EA – 4/02 M:2013 Vyjádření nejistoty měření při kalibraci.

7.2 Posuzování shody se specifikací

1. Posuzování shody probíhá v souladu s dokumentem ILAC-G8:03/2009. Základy jsou rovněž uvedeny v příloze B tohoto kalibračního postupu.

8. Administrativa kalibrace

8.1 Kalibrační list

1. Kalibrační list obsahuje tyto informace
 - jméno a adresu zadavatele
 - číslo kalibračního listu, očíslování stránek, celkový počet stran
 - datum přijetí měřidla, kalibrace a vystavení kalibračního listu
 - užitý kalibrační postup
 - laboratorní podmínky
 - měřidla použitá při kalibraci
 - vyjádření o návaznosti výsledků měření
 - výsledky měření včetně jejich nejistoty
 - jméno pracovníka provádějícího kalibraci a jeho podpis
 - jméno vedoucího pracovníka a jeho podpis
2. Dále by měl kalibrační list obsahovat vyjádření, že nesmí být bez souhlasu laboratoře reprodukován jinak než v celkovém počtu stran.
3. Pokud byla testována shoda se specifikací, pak bude kalibrační list obsahovat i prohlášení o shodě se specifikací.
4. Vzor kalibračního listu je uveden v příloze C

8.2 Kalibrační značka

1. Měřidlo se po provedení kalibrace opatří kalibrační značkou tj. štítkem, který obsahuje datum

kalibrace, podpis kalibračního technika a identifikaci kalibrační laboratoře. Tato značka je umístěna na viditelném místě.

8.3 Protokolování

1. Originál kalibračního listu je předán majiteli. Kopii kalibračního listu archivuje laboratoř nejméně po dobu pěti let od vydání kalibračního listu.

9. Validace

1. Metody provádění kalibrace jsou validovány v souladu s normou ČSN EN ISO/IEC 17025:2005.

10. Revize kalibračního postupu

1. Originál kalibračního postupu vlastní zpracovatel. Kopie kalibračního postupu jsou rozeslány všem kalibračním technikům provádějících kalibraci pracovních měřidel stejnosměrného napětí pomocí kalibrátoru FLUKE 715.
2. Změny kalibračního postupu provádí zpracovatel a schvaluje jeho vedoucí.
3. Zpracovatel uvede všechny změny kalibračního postupu oproti předchozím revizím v čl. 11.

11. Změny oproti předchozímu vydání

Zde budou při každé revizi kalibračního listu uvedeny jeho změny.

12. Související normy a metrologické předpisy

TNI 01 0115 Mezinárodní metrologický slovník - Základní a všeobecné pojmy a přidružené termíny (VIM)

EA – 4/02 M:2013 Vyjádření nejistoty měření při kalibraci

EURAMET cg-15 v3.0 Guidelines on the Calibration of Digital Multimeters

ČMS KP 4.1.2-06-11-N Číslicový multimetr

ILAC-G8:03/2009 Pokyny k uvádění shody se specifikací

ČSN EN ISO 10012 Systémy managementu měření – Požadavky na procesy měření a měřicí vybavení

ČSN EN ISO/IEC 17025:2005 Posuzování shody – Všeobecné požadavky na způsobilost zkušebních a kalibračních laboratoří.

ČSN IEC 60050-300 Mezinárodní elektrotechnický slovník – Elektrická a elektronická měření a měřicí přístroje

ČSN EN 60359:2003 Elektrické a elektronické měřicí zařízení – Vyjadřování vlastností

Příloha A: Výpočet nejistoty měření kalibrace

Následující příklad popisuje krok po kroku stanovení chyby a nejistoty měření ve vybraném kalibračním bodě.

Byla kalibrován funkce měření stejnosměrného napětí multimetr AX-588B v kalibračním bodě 180 mV na rozsahu 200 mV pomocí kalibrátoru FLUKE 715. Podmínky prostředí jsou standardní, tj. teplota $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ a vlhkost vzduchu $(45 \pm 20) \% \text{RH}$.

Rozlišení kalibrátoru i multimetru je stejné $4\frac{1}{2}$ digitu, tj. pro daný rozsah 0,01 mV.

Specifikace kalibrátoru pro daný kalibrační bod činní:

$\pm 0,015 \%$ ze čtené hodnoty + 2 digity (0,02 mV), tj. $\pm 0,047$ mV.

Specifikace multimetru pro daný kalibrační bod činní: činní:

$\pm 0,1 \%$ ze čtené hodnoty + 5 digitů (0,05 mV), tj. $\pm 0,23$ mV.

Poměr přístrojových nejistot multimetru a kalibrátoru je přibližně 4,9:1, což je více než 4:1 a tudíž lze kalibrátor užít pro kalibraci multimetru.

Kalibrátor je nastaven na hodnotu 180,00 mV, multimetr ukazuje 180,07 mV.

Chyba měření E_x v daném kalibračním bodě je

$$E_x = U_x - U_s + \delta U_x - \delta U_s$$

a standardní nejistota měření $u(E_x)$ se vypočítá jako kvadratický součet nejistot jednotlivých složek chyby měření E_x

$$u(E_x)^2 = u(U_x)^2 + u(U_s)^2 + u(\delta U_x)^2 + u(\delta U_s)^2.$$

- 1) U_x je hodnota napětí indikovaná displejem kalibrovaného měřidla, tedy $U_x = 180,07$ mV. Protože se hodnota na displeji v čase měření nemění, je i nejistota typu A rovna nule $u(U_x)$ rovna nule a lze ji vynechat ve výpočtu nejistoty určení chyby měření $u(E_x)$. Pakliže by hodnota na displeji v průběhu času výrazně kolísala, bylo by nutné provést několik měření a z jednotlivých indikací vypočítat výběrovou směrodatnou odchylku průměru.
- 2) U_s je hodnota napětí nastavená na kalibrátoru, tedy $U_s = 180,00$ mV. Její nejistotu lze získat z kalibračního listu kalibrátoru a přepočtem na standardní nejistotu koeficientem rozšíření $k = 2$. V daném kalibračním bodě je $u(U_s) = 0,00085$ mV.
- 3) δU_x je korekce hodnoty multimetru v důsledku konečné rozlišovací schopnosti displeje multimetru, její hodnota se považuje za nulovou, tedy $\delta U_x = 0$ mV, nejistota δU_x se spočítá dle

$$u(\delta U_x) = \frac{NV\check{C}}{2\sqrt{3}},$$

kde $NV\check{C} = 0,01$ mV je nejméně významná číslice a $\sqrt{3}$ je koeficient pro obdélníkové rozdělení pravděpodobnosti. Pro daný rozsah platí $u(\delta U_x) = 0,0029$ mV.

- 4) δU_s je korekce hodnoty kalibrátoru v důsledku kolísání laboratorních podmínek. Pakliže se pracuje za standardních podmínek, pak je $\delta U_s = 0$ mV. Nejistotu této hodnoty určíme z přístrojové nejistoty kalibrátoru PNK uváděné jako „přesnost“ a vydělíme koeficientem obdélníkového rozdělení $\sqrt{3}$, platí

$$u(\delta U_s) = \frac{PNK}{\sqrt{3}}.$$

Protože $PNK = 0,047$ mV, platí $u(\delta U_s) = 0,027$ mV.

Přehled nejistot

Veličina	Odhad [mV]	Rozdělení pravděpodobnosti	Standardní nejistota [mV]
U_x	180,07	-	-
U_s	180,00	normální	0,00085
δU_x	0,00	obdélníkové	0,0029
δU_s	0,00	obdélníkové	0,027
E_x	0,07	obdélníkové	0,027

Rozšířenou nejistota kalibračního bodu se spočítá dle vzorce

$$U = k \cdot u(E_x),$$

kde k je koeficient rozšíření odpovídající pravděpodobnosti pokrytí cca. 95 % pro dané rozdělení pravděpodobnosti. Pro normální rozdělení by bylo $k = 2$. Protože však výrazně převažuje složka nejistoty $u(\delta U_s)$ mající obdélníkové rozdělení, tak se použije $k = 1,65$. Konkrétní informace o výpočtu koeficientu k je obsažena v doplňku 2, dokumentu EA – 4/02 M:2013. V tomto případě platí $U = 0,04$ mV.

Výsledná chyba je její odhad zvětšený o rozšířenou nejistotu měření pro pravděpodobnost pokrytí 95 %, tedy

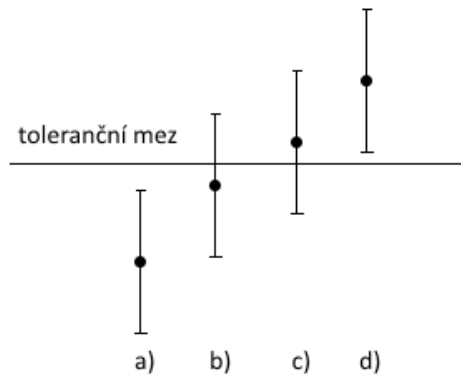
$$(0,07 \pm 0,04) \text{ mV}$$

Tentýž výpočet se provede u všech kalibračních bodů, kalibrační list se pak doplní o prohlášení ve stylu:

Uvedená rozšířená nejistota měření je součinem standardní nejistoty měření a koeficientu rozšíření k , uvedeného v tabulkách hodnot, který byl odvozen za předpokladu rovnoměrného pravděpodobnostního rozdělení pro pravděpodobnost pokrytí 95 %. Standardní nejistota měření byla určena v souladu s dokumentem EA – 4/02 M:2013.

Příloha B: Prohlášení o posouzení shody se specifikací

Proces posouzení shody a jeho prohlášení se řídí dle dokumentu ILAC-G8:03/2009.



- Jestliže výsledek měření zvětšený o rozšířenou nejistotu nepřesahuje toleranční mez danou specifikacemi měřidla, pak lze říci, že měřidlo je ve shodě se specifikacemi
- Jestliže výsledek měření zvětšený o rozšířenou nejistotu překrývá toleranční mez danou specifikacemi měřidla, pak není možné vyjádřit shodu ani neshodu.
- Platí totéž, co v případě b)
- Jestliže výsledek měření zvětšený o rozšířenou nejistotu přesahuje toleranční mez danou specifikacemi měřidla, pak lze říci, že měřidlo není ve shodě se specifikacemi bez ohledu na to, zda část intervalu zasahuje nebo nezasahuje pod toleranční mez danou specifikacemi měřidla

Výše naznačený postup se použije pro všechny kalibrační body a kalibrační list se opatří prohlášením

- Všechny naměřené hodnoty jsou ve shodě se specifikací. Hodnocení shody bylo provedeno v souladu s dokumentem ILAC G8:03/2009,*
pokud jsou všechny kalibrační body ve shodě se specifikací.
- Pro některé s naměřených hodnot není možné vyjádřit shodu se specifikací. Hodnocení shody bylo provedeno v souladu s dokumentem ILAC G8:03/2009,*
pokud alespoň u jednoho bodu není možné vyjádřit shodu či neshodu, ale u ostatních platí shoda.
- Některé s naměřených hodnot nejsou ve shodě se specifikací. Hodnocení shody bylo provedeno v souladu s dokumentem ILAC G8:03/2009*
pokud alespoň jeden kalibrační bod není ve shodě se specifikací.

Rozšířená nejistota platí pro určitou pravděpodobnost pokrytí (např. 95 %). Na tuto skutečnost je nutné v kalibračním listu doplněním předchozího prohlášení o toto tvrzení.

Vyjádření shody se specifikací je založeno na pravděpodobnosti pokrytí 95 % pro rozšířenou nejistotu výsledků měření, na nichž je založeno rozhodnutí o shodě.

Příloha C: Vzorový kalibrační list

Obsažen na dalších stranách v samostatné verzi. V diplomové práci je možné vzorový kalibrační list č. KL-MULT-160304-03 nalézt v příloze 3 diplomové práce.

Příloha 3: Kalibrační listy kalibrovaných měřidel

Katedra experimentální fyziky

Přírodovědecké fakulty UP v Olomouci

17. listopadu 21, 771 46 Olomouc

e-mail: lukas.dokoupil01@upol.cz, web: fyzika.upol.cz

KALIBRAČNÍ LIST

č. KL-MULT-160304-01

Datum vystavení: 4. 3. 2016

Počet stran: 3

Strana 1 ze 3

Zadavatel: Katedra experimentální fyziky Přírodovědecké fakulty UP v Olomouci
17. listopadu 21
771 46 Olomouc

Měřidlo: číslicový multimetr

Výrobce: Uni-Trend Ltd.

Název měřidla: UT50A

Výrobní číslo: 814052478

Datum přijetí: 3. 3. 2016

Místo kalibrace: Katedra experimentální fyziky Přírodovědecké fakulty UP v Olomouci
17. listopadu 21
771 46 Olomouc

Datum kalibrace: 3. 3. 2016

Použité etalony: kalibrátor FLUKE 715 (v.č.: 2939011)

kalibrační list: 6011-KL-L0807-15

laboratoř: ČMI OI Brno (kalibrováno 4. 11. 2015)

Kalibraci provedl:

Vedoucí oddělení:

Lukáš Dokoupil

RNDr. Tomáš Rössler, Ph. D.

- Popis kalibrace:** Kalibrované zařízení bylo porovnáno s etalony uvedenými výše a v souladu s kalibračním postupem č. KP-01 R:03.2016
teplota v laboratoři: (23 ± 2) °C
relativní vlhkost vzduchu: (45 ± 20) %RH
- Výsledky kalibrace:** Výsledky jsou uvedeny v části Tabulky hodnot.
Byly kalibrovány pouze funkce měřidla dle požadavku zadavatele.
- Nejistoty měření:** Uvedená rozšířená nejistota měření je součinem standardní nejistoty měření a koeficientu rozšíření k , uvedeného v tabulkách hodnot, který byl odvozen za předpokladu lichoběžníkového pravděpodobnostního rozdělení pro pravděpodobnost pokrytí 95 %. Standardní nejistota měření byla určena v souladu s dokumentem EA – 4/02 M:2013.
- Prohlášení o shodě:** Všechny naměřené hodnoty jsou ve shodě se specifikací. Vyjádření shody se specifikací je založeno na pravděpodobnosti pokrytí 95 % pro rozšířenou nejistotu výsledků měření, na nichž je založeno rozhodnutí o shodě. Hodnocení shody bylo provedeno v souladu s dokumentem ILAC G8:03/2009.

Tabulky hodnot:

Stejnoseměrné napětí - rozsah 200 mV

Hodnota Nastavená [mV]	Hodnota Zjištěná [mV]	Chyba měření [mV]	Koeficient rozšíření k [-]	Nejistota měření [mV]
-180,00	-179,7	0,30	1,90	0,08
-20,00	-19,9	0,10	1,82	0,06
0,00	0,0	0,00	1,80	0,06
20,00	20,0	0,00	1,82	0,06
100,00	100,1	0,10	1,88	0,07
180,00	180,1	0,10	1,90	0,08

Stejnoseměrné napětí - rozsah 20 V

Hodnota Nastavená [mV]	Hodnota Zjištěná [mV]	Chyba měření [mV]	Koeficient rozšíření k [-]	Nejistota měření [mV]
-18,000	-17,99	0,010	1,89	0,007
2,000	2,01	0,010	1,81	0,006
18,000	18,03	0,030	1,89	0,007

Konec kalibračního listu

Katedra experimentální fyziky

Přírodovědecké fakulty UP v Olomouci

17. listopadu 21, 771 46 Olomouc

e-mail: lukas.dokoupil01@upol.cz, web: fyzika.upol.cz

KALIBRAČNÍ LIST

č. KL-MULT-160304-02

Datum vystavení: 4. 3. 2016

Počet stran: 3

Strana 1 ze 3

Zadavatel: Katedra experimentální fyziky Přírodovědecké fakulty UP v Olomouci
17. listopadu 21
771 46 Olomouc

Měřidlo: číslicový multimetr

Výrobce: AXIOMET AB

Název měřidla: AX-585B

Výrobní číslo: 997503226

Datum přijetí: 3. 3. 2016

Místo kalibrace: Katedra experimentální fyziky Přírodovědecké fakulty UP v Olomouci
17. listopadu 21
771 46 Olomouc

Datum kalibrace: 3. 3. 2016

Použité etalony: kalibrátor FLUKE 715 (v.č.: 2939011)

kalibrační list: 6011-KL-L0807-15

laboratoř: ČMI OI Brno (kalibrováno 4. 11. 2015)

Kalibraci provedl:

Vedoucí oddělení:

Lukáš Dokoupil

RNDr. Tomáš Rössler, Ph. D.

- Popis kalibrace:** Kalibrované zařízení bylo porovnáno s etalony uvedenými výše a v souladu s kalibračním postupem č. KP-01 R:03.2016
teplota v laboratoři: (23 ± 2) °C
relativní vlhkost vzduchu: (45 ± 20) %RH
- Výsledky kalibrace:** Výsledky jsou uvedeny v části Tabulky hodnot.
Byly kalibrovány pouze funkce měřidla dle požadavku zadavatele.
- Nejistoty měření:** Uvedená rozšířená nejistota měření je součinem standardní nejistoty měření a koeficientu rozšíření k , uvedeného v tabulkách hodnot, který byl odvozen za předpokladu rovnoměrného pravděpodobnostního rozdělení pro pravděpodobnost pokrytí 95 %. Standardní nejistota měření byla určena v souladu s dokumentem EA – 4/02 M:2013.
- Prohlášení o shodě:** Všechny naměřené hodnoty jsou ve shodě se specifikací. Vyjádření shody se specifikací je založeno na pravděpodobnosti pokrytí 95 % pro rozšířenou nejistotu výsledků měření, na nichž je založeno rozhodnutí o shodě. Hodnocení shody bylo provedeno v souladu s dokumentem ILAC G8:03/2009.

Tabulky hodnot:

Stejnoseměrné napětí - rozsah 200 mV

Hodnota Nastavená [mV]	Hodnota Zjištěná [mV]	Chyba měření [mV]	Koeficient rozšíření k [-]	Nejistota měření [mV]
-180,00	-180,08	-0,08	1,65	0,04
-20,00	-20,02	-0,02	1,65	0,02
0,00	0,00	0,00	1,65	0,02
20,00	20,01	0,01	1,65	0,02
100,00	100,03	0,03	1,65	0,03
180,00	180,05	0,05	1,65	0,04

Stejnoseměrné napětí - rozsah 20 V

Hodnota Nastavená [mV]	Hodnota Zjištěná [mV]	Chyba měření [mV]	Koeficient rozšíření k [-]	Nejistota měření [mV]
-18,000	-18,008	-0,008	1,65	0,004
2,000	2,001	0,001	1,65	0,002
18,000	18,006	0,006	1,65	0,004

Konec kalibračního listu

Katedra experimentální fyziky

Přírodovědecké fakulty UP v Olomouci

17. listopadu 21, 771 46 Olomouc

e-mail: lukas.dokoupil01@upol.cz, web: fyzika.upol.cz

KALIBRAČNÍ LIST

č. KL-MULT-160304-03

Datum vystavení: 4. 3. 2016

Počet stran: 3

Strana 1 ze 3

Zadavatel: Katedra experimentální fyziky Přírodovědecké fakulty UP v Olomouci
17. listopadu 21
771 46 Olomouc

Měřidlo: číslicový multimetr

Výrobce: AXIOMET AB

Název měřidla: AX-585B

Výrobní číslo: 997503243

Datum přijetí: 3. 3. 2016

Místo kalibrace: Katedra experimentální fyziky Přírodovědecké fakulty UP v Olomouci
17. listopadu 21
771 46 Olomouc

Datum kalibrace: 3. 3. 2016

Použité etalony: kalibrátor FLUKE 715 (v.č.: 2939011)

kalibrační list: 6011-KL-L0807-15

laboratoř: ČMI OI Brno (kalibrováno 4. 11. 2015)

Kalibraci provedl:

Vedoucí oddělení:

Lukáš Dokoupil

RNDr. Tomáš Rössler, Ph. D.

- Popis kalibrace:** Kalibrované zařízení bylo porovnáno s etalony uvedenými výše a v souladu s kalibračním postupem č. KP-01 R:03.2016
teplota v laboratoři: (23 ± 2) °C
relativní vlhkost vzduchu: (45 ± 20) %RH
- Výsledky kalibrace:** Výsledky jsou uvedeny v části Tabulky hodnot.
Byly kalibrovány pouze funkce měřidla dle požadavku zadavatele.
- Nejistoty měření:** Uvedená rozšířená nejistota měření je součinem standardní nejistoty měření a koeficientu rozšíření k , uvedeného v tabulkách hodnot, který byl odvozen za předpokladu rovnoměrného pravděpodobnostního rozdělení pro pravděpodobnost pokrytí 95 %. Standardní nejistota měření byla určena v souladu s dokumentem EA – 4/02 M:2013.
- Prohlášení o shodě:** Všechny naměřené hodnoty jsou ve shodě se specifikací. Vyjádření shody se specifikací je založeno na pravděpodobnosti pokrytí 95 % pro rozšířenou nejistotu výsledků měření, na nichž je založeno rozhodnutí o shodě. Hodnocení shody bylo provedeno v souladu s dokumentem ILAC G8:03/2009.

Tabulky hodnot:

Stejnoseměrné napětí - rozsah 200 mV

Hodnota Nastavená [mV]	Hodnota Zjištěná [mV]	Chyba měření [mV]	Koeficient rozšíření k [-]	Nejistota měření [mV]
-180,00	-180,08	-0,08	1,65	0,04
-20,00	-20,02	-0,02	1,65	0,02
0,00	0,00	0,00	1,65	0,02
20,00	20,00	0,00	1,65	0,02
100,00	100,04	0,04	1,65	0,03
180,00	180,07	0,07	1,65	0,04

Stejnoseměrné napětí - rozsah 20 V

Hodnota Nastavená [mV]	Hodnota Zjištěná [mV]	Chyba měření [mV]	Koeficient rozšíření k [-]	Nejistota měření [mV]
-18,000	-18,010	-0,010	1,65	0,004
2,000	2,002	0,002	1,65	0,002
18,000	18,008	0,008	1,65	0,004

Konec kalibračního listu

Katedra experimentální fyziky

Přírodovědecké fakulty UP v Olomouci

17. listopadu 21, 771 46 Olomouc

e-mail: lukas.dokoupil01@upol.cz, web: fyzika.upol.cz

KALIBRAČNÍ LIST

č. KL-MULT-160304-04

Datum vystavení: 4. 3. 2016

Počet stran: 3

Strana 1 ze 3

Zadavatel: Katedra experimentální fyziky Přírodovědecké fakulty UP v Olomouci
17. listopadu 21
771 46 Olomouc

Měřidlo: číslicový multimetr

Výrobce: AXIOMET AB

Název měřidla: AX-585B

Výrobní číslo: 997503231

Datum přijetí: 3. 3. 2016

Místo kalibrace: Katedra experimentální fyziky Přírodovědecké fakulty UP v Olomouci
17. listopadu 21
771 46 Olomouc

Datum kalibrace: 3. 3. 2016

Použité etalony: kalibrátor FLUKE 715 (v.č.: 2939011)

kalibrační list: 6011-KL-L0807-15

laboratoř: ČMI OI Brno (kalibrováno 4. 11. 2015)

Kalibraci provedl:

Vedoucí oddělení:

Lukáš Dokoupil

RNDr. Tomáš Rössler, Ph. D.

- Popis kalibrace:** Kalibrované zařízení bylo porovnáno s etalony uvedenými výše a v souladu s kalibračním postupem č. KP-01 R:03.2016
teplota v laboratoři: (23 ± 2) °C
relativní vlhkost vzduchu: (45 ± 20) %RH
- Výsledky kalibrace:** Výsledky jsou uvedeny v části Tabulky hodnot.
Byly kalibrovány pouze funkce měřidla dle požadavku zadavatele.
- Nejistoty měření:** Uvedená rozšířená nejistota měření je součinem standardní nejistoty měření a koeficientu rozšíření k , uvedeného v tabulkách hodnot, který byl odvozen za předpokladu rovnoměrného pravděpodobnostního rozdělení pro pravděpodobnost pokrytí 95 %. Standardní nejistota měření byla určena v souladu s dokumentem EA – 4/02 M:2013.
- Prohlášení o shodě:** Všechny naměřené hodnoty jsou ve shodě se specifikací. Vyjádření shody se specifikací je založeno na pravděpodobnosti pokrytí 95 % pro rozšířenou nejistotu výsledků měření, na nichž je založeno rozhodnutí o shodě. Hodnocení shody bylo provedeno v souladu s dokumentem ILAC G8:03/2009.

Tabulky hodnot:

Stejnoseměrné napětí - rozsah 200 mV

Hodnota Nastavená [mV]	Hodnota Zjištěná [mV]	Chyba měření [mV]	Koeficient rozšíření k [-]	Nejistota měření [mV]
-180,00	-180,09	-0,09	1,65	0,04
-20,00	-20,02	-0,02	1,65	0,02
0,00	0,00	0,00	1,65	0,02
20,00	20,00	0,00	1,65	0,02
100,00	100,02	0,02	1,65	0,03
180,00	180,05	0,05	1,65	0,04

Stejnoseměrné napětí - rozsah 20 V

Hodnota Nastavená [mV]	Hodnota Zjištěná [mV]	Chyba měření [mV]	Koeficient rozšíření k [-]	Nejistota měření [mV]
-18,000	-18,010	-0,010	1,65	0,004
2,000	2,001	0,001	1,65	0,002
18,000	18,007	0,007	1,65	0,004

Konec kalibračního listu

Katedra experimentální fyziky

Přírodovědecké fakulty UP v Olomouci

17. listopadu 21, 771 46 Olomouc

e-mail: lukas.dokoupil01@upol.cz, web: fyzika.upol.cz

KALIBRAČNÍ LIST

č. KL-MULT-160304-05

Datum vystavení: 4. 3. 2016

Počet stran: 3

Strana 1 ze 3

Zadavatel: Katedra experimentální fyziky Přírodovědecké fakulty UP v Olomouci
17. listopadu 21
771 46 Olomouc

Měřidlo: číslicový multimetr

Výrobce: Uni-Trend Ltd.

Název měřidla: DT9202A

Výrobní číslo: 2113856

Datum přijetí: 3. 3. 2016

Místo kalibrace: Katedra experimentální fyziky Přírodovědecké fakulty UP v Olomouci
17. listopadu 21
771 46 Olomouc

Datum kalibrace: 3. 3. 2016

Použité etalony: kalibrátor FLUKE 715 (v.č.: 2939011)

kalibrační list: 6011-KL-L0807-15

laboratoř: ČMI OI Brno (kalibrováno 4. 11. 2015)

Kalibraci provedl:

Vedoucí oddělení:

Lukáš Dokoupil

RNDr. Tomáš Rössler, Ph. D.

- Popis kalibrace:** Kalibrované zařízení bylo porovnáno s etalony uvedenými výše a v souladu s kalibračním postupem č. KP-01 R:03.2016
teplota v laboratoři: (23 ± 2) °C
relativní vlhkost vzduchu: (45 ± 20) %RH
- Výsledky kalibrace:** Výsledky jsou uvedeny v části Tabulky hodnot.
Byly kalibrovány pouze funkce měřidla dle požadavku zadavatele.
- Nejistoty měření:** Uvedená rozšířená nejistota měření je součinem standardní nejistoty měření a koeficientu rozšíření k , uvedeného v tabulkách hodnot, který byl odvozen za předpokladu lichoběžníkového pravděpodobnostního rozdělení pro pravděpodobnost pokrytí 95 %. Standardní nejistota měření byla určena v souladu s dokumentem EA – 4/02 M:2013.
- Prohlášení o shodě:** Některé s naměřených hodnot nejsou ve shodě se specifikací. Vyjádření shody se specifikací je založeno na pravděpodobnosti pokrytí 95 % pro rozšířenou nejistotu výsledků měření, na nichž je založeno rozhodnutí o shodě. Hodnocení shody bylo provedeno v souladu s dokumentem ILAC G8:03/2009.

Tabulky hodnot:

Stejnoseměrné napětí - rozsah 200 mV

Hodnota Nastavená [mV]	Hodnota Zjištěná [mV]	Chyba měření [mV]	Koeficient rozšíření k [-]	Nejistota měření [mV]
-180,00	-181,3	-1,30	1,90	0,08
-20,00	-20	0,00	1,82	0,06
0,00	0,0	0,00	1,80	0,06
20,00	20,0	0,00	1,82	0,06
100,00	100,7	0,70	1,88	0,07
180,00	181,3	1,30	1,90	0,08

Stejnoseměrné napětí - rozsah 20 V

Hodnota Nastavená [mV]	Hodnota Zjištěná [mV]	Chyba měření [mV]	Koeficient rozšíření k [-]	Nejistota měření [mV]
-18,000	-18,04	-0,040	1,89	0,007
2,000	1,99	-0,010	1,81	0,006
18,000	18,04	0,040	1,89	0,007

Konec kalibračního listu

Katedra experimentální fyziky

Přírodovědecké fakulty UP v Olomouci

17. listopadu 21, 771 46 Olomouc

e-mail: lukas.dokoupil01@upol.cz, web: fyzika.upol.cz

KALIBRAČNÍ LIST

č. KL-MULT-160304-06

Datum vystavení: 4. 3. 2016

Počet stran: 3

Strana 1 ze 3

Zadavatel: Katedra experimentální fyziky Přírodovědecké fakulty UP v Olomouci
17. listopadu 21
771 46 Olomouc

Měřidlo: číslicový multimetr

Výrobce: Uni-Trend Ltd.

Název měřidla: DT9202A

Výrobní číslo: 2113879

Datum přijetí: 3. 3. 2016

Místo kalibrace: Katedra experimentální fyziky Přírodovědecké fakulty UP v Olomouci
17. listopadu 21
771 46 Olomouc

Datum kalibrace: 3. 3. 2016

Použité etalony: kalibrátor FLUKE 715 (v.č.: 2939011)

kalibrační list: 6011-KL-L0807-15

laboratoř: ČMI OI Brno (kalibrováno 4. 11. 2015)

Kalibraci provedl:

Vedoucí oddělení:

Lukáš Dokoupil

RNDr. Tomáš Rössler, Ph. D.

- Popis kalibrace:** Kalibrované zařízení bylo porovnáno s etalony uvedenými výše a v souladu s kalibračním postupem č. KP-01 R:03.2016
teplota v laboratoři: (23 ± 2) °C
relativní vlhkost vzduchu: (45 ± 20) %RH
- Výsledky kalibrace:** Výsledky jsou uvedeny v části Tabulky hodnot.
Byly kalibrovány pouze funkce měřidla dle požadavku zadavatele.
- Nejistoty měření:** Uvedená rozšířená nejistota měření je součinem standardní nejistoty měření a koeficientu rozšíření k , uvedeného v tabulkách hodnot, který byl odvozen za předpokladu lichoběžníkového pravděpodobnostního rozdělení pro pravděpodobnost pokrytí 95 %. Standardní nejistota měření byla určena v souladu s dokumentem EA – 4/02 M:2013.
- Prohlášení o shodě:** Všechny naměřené hodnoty jsou ve shodě se specifikací. Vyjádření shody se specifikací je založeno na pravděpodobnosti pokrytí 95 % pro rozšířenou nejistotu výsledků měření, na nichž je založeno rozhodnutí o shodě. Hodnocení shody bylo provedeno v souladu s dokumentem ILAC G8:03/2009.

Tabulky hodnot:

Stejnoseměrné napětí - rozsah 200 mV

Hodnota Nastavená [mV]	Hodnota Zjištěná [mV]	Chyba měření [mV]	Koeficient rozšíření k [-]	Nejistota měření [mV]
-180,00	-180,8	-0,80	1,90	0,08
-20,00	-20,0	0,00	1,82	0,06
0,00	0,0	0,00	1,80	0,06
20,00	20,0	0,00	1,82	0,06
100,00	100,5	0,50	1,88	0,07
180,00	180,8	0,80	1,90	0,08

Stejnoseměrné napětí - rozsah 20 V

Hodnota Nastavená [mV]	Hodnota Zjištěná [mV]	Chyba měření [mV]	Koeficient rozšíření k [-]	Nejistota měření [mV]
-18,000	-18,01	-0,010	1,89	0,007
2,000	2,00	0,000	1,81	0,006
18,000	18,01	0,010	1,89	0,007

Konec kalibračního listu

Katedra experimentální fyziky

Přírodovědecké fakulty UP v Olomouci

17. listopadu 21, 771 46 Olomouc

e-mail: lukas.dokoupil01@upol.cz, web: fyzika.upol.cz

KALIBRAČNÍ LIST

č. KL-MULT-160304-07

Datum vystavení: 4. 3. 2016

Počet stran: 3

Strana 1 ze 3

Zadavatel: Katedra experimentální fyziky Přírodovědecké fakulty UP v Olomouci
17. listopadu 21
771 46 Olomouc

Měřidlo: číslicový multimetr

Výrobce: AXIOMET AB

Název měřidla: AX-585B

Výrobní číslo: 996900821

Datum přijetí: 3. 3. 2016

Místo kalibrace: Katedra experimentální fyziky Přírodovědecké fakulty UP v Olomouci
17. listopadu 21
771 46 Olomouc

Datum kalibrace: 3. 3. 2016

Použité etalony: kalibrátor FLUKE 715 (v.č.: 2939011)

kalibrační list: 6011-KL-L0807-15

laboratoř: ČMI OI Brno (kalibrováno 4. 11. 2015)

Kalibraci provedl:

Vedoucí oddělení:

Lukáš Dokoupil

RNDr. Tomáš Rössler, Ph. D.

- Popis kalibrace:** Kalibrované zařízení bylo porovnáno s etalony uvedenými výše a v souladu s kalibračním postupem č. KP-01 R:03.2016
teplota v laboratoři: (23 ± 2) °C
relativní vlhkost vzduchu: (45 ± 20) %RH
- Výsledky kalibrace:** Výsledky jsou uvedeny v části Tabulky hodnot.
Byly kalibrovány pouze funkce měřidla dle požadavku zadavatele.
- Nejistoty měření:** Uvedená rozšířená nejistota měření je součinem standardní nejistoty měření a koeficientu rozšíření k , uvedeného v tabulkách hodnot, který byl odvozen za předpokladu rovnoměrného pravděpodobnostního rozdělení pro pravděpodobnost pokrytí 95 %. Standardní nejistota měření byla určena v souladu s dokumentem EA – 4/02 M:2013.
- Prohlášení o shodě:** Všechny naměřené hodnoty jsou ve shodě se specifikací. Vyjádření shody se specifikací je založeno na pravděpodobnosti pokrytí 95 % pro rozšířenou nejistotu výsledků měření, na nichž je založeno rozhodnutí o shodě. Hodnocení shody bylo provedeno v souladu s dokumentem ILAC G8:03/2009.

Tabulky hodnot:

Stejnoseměrné napětí - rozsah 200 mV

Hodnota Nastavená [mV]	Hodnota Zjištěná [mV]	Chyba měření [mV]	Koeficient rozšíření k [-]	Nejistota měření [mV]
-180,00	-180,00	0,00	1,65	0,04
-20,00	-20,00	0,00	1,65	0,02
0,00	0,00	0,00	1,65	0,02
20,00	20,00	0,00	1,65	0,02
100,00	100,00	0,00	1,65	0,03
180,00	180,00	0,00	1,65	0,04

Stejnoseměrné napětí - rozsah 20 V

Hodnota Nastavená [mV]	Hodnota Zjištěná [mV]	Chyba měření [mV]	Koeficient rozšíření k [-]	Nejistota měření [mV]
-18,000	-17,990	0,010	1,65	0,004
2,000	2,000	0,000	1,65	0,002
18,000	17,990	-0,010	1,65	0,004

Konec kalibračního listu

Katedra experimentální fyziky

Přírodovědecké fakulty UP v Olomouci

17. listopadu 21, 771 46 Olomouc

e-mail: lukas.dokoupil01@upol.cz, web: fyzika.upol.cz

KALIBRAČNÍ LIST

č. KL-MULT-160304-08

Datum vystavení: 4. 3. 2016

Počet stran: 3

Strana 1 ze 3

Zadavatel: Katedra experimentální fyziky Přírodovědecké fakulty UP v Olomouci
17. listopadu 21
771 46 Olomouc

Měřidlo: číslicový multimetr

Výrobce: FK technics, spol. s r.o.

Název měřidla: FK8250

Výrobní číslo: 7120274

Datum přijetí: 3. 3. 2016

Místo kalibrace: Katedra experimentální fyziky Přírodovědecké fakulty UP v Olomouci
17. listopadu 21
771 46 Olomouc

Datum kalibrace: 3. 3. 2016

Použité etalony: kalibrátor FLUKE 715 (v.č.: 2939011)

kalibrační list: 6011-KL-L0807-15

laboratoř: ČMI OI Brno (kalibrováno 4. 11. 2015)

Kalibraci provedl:

Vedoucí oddělení:

Lukáš Dokoupil

RNDr. Tomáš Rössler, Ph. D.

- Popis kalibrace:** Kalibrované zařízení bylo porovnáno s etalony uvedenými výše a v souladu s kalibračním postupem č. KP-01 R:03.2016
teplota v laboratoři: (23 ± 2) °C
relativní vlhkost vzduchu: (45 ± 20) %RH
- Výsledky kalibrace:** Výsledky jsou uvedeny v části Tabulky hodnot.
Byly kalibrovány pouze funkce měřidla dle požadavku zadavatele.
- Nejistoty měření:** Uvedená rozšířená nejistota měření je součinem standardní nejistoty měření a koeficientu rozšíření k , uvedeného v tabulkách hodnot, který byl odvozen za předpokladu lichoběžníkového pravděpodobnostního rozdělení pro pravděpodobnost pokrytí 95 %. Standardní nejistota měření byla určena v souladu s dokumentem EA – 4/02 M:2013.
- Prohlášení o shodě:** Všechny naměřené hodnoty jsou ve shodě se specifikací. Vyjádření shody se specifikací je založeno na pravděpodobnosti pokrytí 95 % pro rozšířenou nejistotu výsledků měření, na nichž je založeno rozhodnutí o shodě. Hodnocení shody bylo provedeno v souladu s dokumentem ILAC G8:03/2009.

Tabulky hodnot:

Stejnoseměrné napětí - rozsah 200 mV

Hodnota Nastavená [mV]	Hodnota Zjištěná [mV]	Chyba měření [mV]	Koeficient rozšíření k [-]	Nejistota měření [mV]
-180,00	-179,0	1,00	1,90	0,08
-20,00	-19,9	0,10	1,82	0,06
0,00	0,0	0,00	1,80	0,06
20,00	20,0	0,00	1,82	0,06
100,00	99,9	-0,10	1,88	0,07
180,00	179,2	-0,80	1,90	0,08

Stejnoseměrné napětí - rozsah 20 V

Hodnota Nastavená [mV]	Hodnota Zjištěná [mV]	Chyba měření [mV]	Koeficient rozšíření k [-]	Nejistota měření [mV]
-18,000	-17,90		1,89	0,007
2,000	1,99		1,81	0,006
18,000	17,92		1,89	0,007

Konec kalibračního listu

Katedra experimentální fyziky

Přírodovědecké fakulty UP v Olomouci

17. listopadu 21, 771 46 Olomouc

e-mail: lukas.dokoupil01@upol.cz, web: fyzika.upol.cz

KALIBRAČNÍ LIST

č. KL-MULT-160304-09

Datum vystavení: 4. 3. 2016

Počet stran: 3

Strana 1 ze 3

Zadavatel: Katedra experimentální fyziky Přírodovědecké fakulty UP v Olomouci
17. listopadu 21
771 46 Olomouc

Měřidlo: číslicový multimetr

Výrobce: FK technics, spol. s r.o.

Název měřidla: FK8400

Výrobní číslo: 10025164

Datum přijetí: 3. 3. 2016

Místo kalibrace: Katedra experimentální fyziky Přírodovědecké fakulty UP v Olomouci
17. listopadu 21
771 46 Olomouc

Datum kalibrace: 3. 3. 2016

Použité etalony: kalibrátor FLUKE 715 (v.č.: 2939011)

kalibrační list: 6011-KL-L0807-15

laboratoř: ČMI OI Brno (kalibrováno 4. 11. 2015)

Kalibraci provedl:

Vedoucí oddělení:

Lukáš Dokoupil

RNDr. Tomáš Rössler, Ph. D.

- Popis kalibrace:** Kalibrované zařízení bylo porovnáno s etalony uvedenými výše a v souladu s kalibračním postupem č. KP-01 R:03.2016
teplota v laboratoři: (23 ± 2) °C
relativní vlhkost vzduchu: (45 ± 20) %RH
- Výsledky kalibrace:** Výsledky jsou uvedeny v části Tabulky hodnot.
Byly kalibrovány pouze funkce měřidla dle požadavku zadavatele.
- Nejistoty měření:** Uvedená rozšířená nejistota měření je součinem standardní nejistoty měření a koeficientu rozšíření k , uvedeného v tabulkách hodnot, který byl odvozen za předpokladu lichoběžníkového pravděpodobnostního rozdělení pro pravděpodobnost pokrytí 95 %. Standardní nejistota měření byla určena v souladu s dokumentem EA – 4/02 M:2013.
- Prohlášení o shodě:** Všechny naměřené hodnoty jsou ve shodě se specifikací. Vyjádření shody se specifikací je založeno na pravděpodobnosti pokrytí 95 % pro rozšířenou nejistotu výsledků měření, na nichž je založeno rozhodnutí o shodě. Hodnocení shody bylo provedeno v souladu s dokumentem ILAC G8:03/2009.

Tabulky hodnot:

Stejnoseměrné napětí - rozsah 200 mV

Hodnota Nastavená [mV]	Hodnota Zjištěná [mV]	Chyba měření [mV]	Koeficient rozšíření k [-]	Nejistota měření [mV]
-180,00	-179,7	0,30	1,90	0,08
-20,00	-19,9	0,10	1,82	0,06
0,00	0,0	0,00	1,80	0,06
20,00	19,9	-0,10	1,82	0,06
100,00	99,8	-0,20	1,88	0,07
180,00	179,7	-0,30	1,90	0,08

Stejnoseměrné napětí - rozsah 20 V

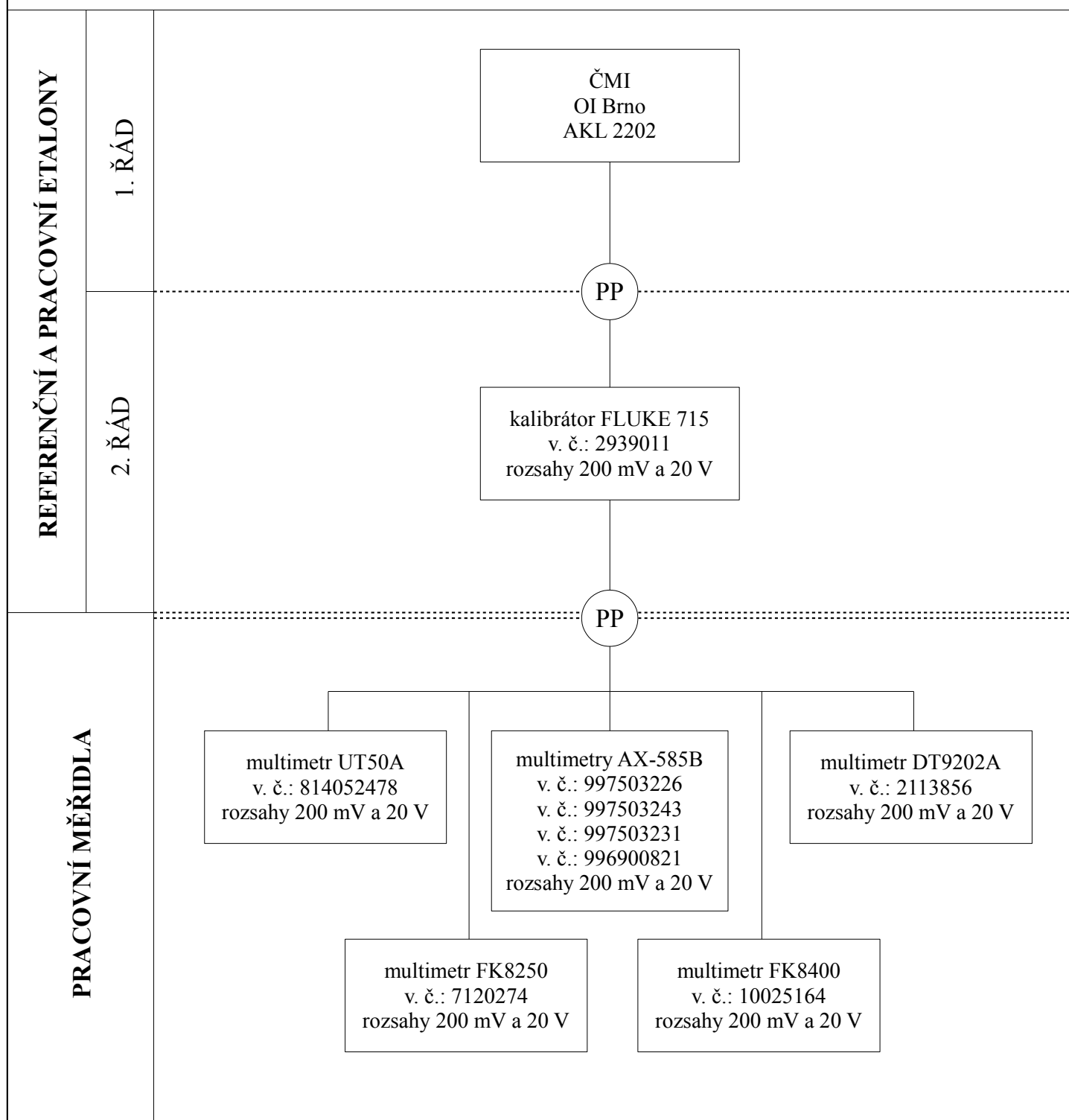
Hodnota Nastavená [mV]	Hodnota Zjištěná [mV]	Chyba měření [mV]	Koeficient rozšíření k [-]	Nejistota měření [mV]
-18,000	-17,94	0,060	1,89	0,007
2,000	1,98	-0,020	1,81	0,006
18,000	17,94	-0,060	1,89	0,007

Konec kalibračního listu

Příloha 4: Schéma návaznosti

SCHÉMA NÁVAZNOSTI MĚŘIDEL STEJNOSMĚRNÉHO NAPĚTÍ

Katedra experimentální fyziky, PřF UP Olomouc



kalibrátor FLUKE 715, výrobní číslo: 2939011

- funkce stejnosměrné napětí
 - rozsah 200 mV: rozlišení 0,01 mV, přesnost 0,015 % ze čtení + 0,02 mV
 - rozsah 20 V: rozlišení 0,001 V, přesnost 0,01 % ze čtení + 0,002 V

Vypracoval: Lukáš Dokoupil
Verze: 1
Datum: 24. června 2016

Příloha 5: Obsah přiloženého CD

Na přiloženém CD je k dispozici:

- soubor `DP_Lukas_Dokoupil.pdf` - elektronická verze textu diplomové práce (PDF);
- adresář `DP` - zdrojový kód diplomové práce pro LaTeX;
- adresář `fluke715` - složka vztahující se ke kalibraci kalibrátoru FLUKE 715;
 - soubor `data.ods` - tabulky výsledků kalibrace FLUKE 715 (ODF);
 - soubor `data.xls` - tabulky výsledků kalibrace FLUKE 715 (XLS);
 - soubor `skenf715.pdf` - sken kalibračního listu FLUKE 715 (PDF);
 - adresář `grafy` - grafy kalibračních přímek;
 - adresář `matlab` - zdrojové kódy pro vytvoření grafů kalibračních přímek v prostředí MATLAB;
- adresář `ilustrace` - ilustrace využité v textu diplomové práce;
- adresář `kalibrace` - složka vztahující se ke kalibraci pracovních měřidel SS napětí;
 - soubor `data_kalib.ods` - tabulky výsledků kalibrace pracovních měřidel (ODF);
 - soubor `KP-01_R-03.2016.odt` - kalibrační postup (ODF);
 - soubor `KP-01_R-03.2016.pdf` - kalibrační postup (PDF);
 - soubor `schema_navaznosti.odg` - schéma návaznosti (ODF);
 - soubor `schema_navaznosti.pdf` - schéma návaznosti (PDF);
 - adresář `klist_ODF` - kalibrační listy (ODF);
 - adresář `klist_PDF` - kalibrační listy (PDF);