

# Nový státní etalon stejnosměrného napětí ČR

Mgr. Martin Šíra, Ph.D.

Ing. Jiří Streit

květen 2013

## 1 Úvod

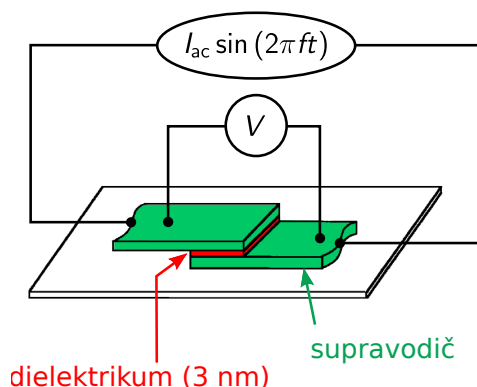
Systém SI definuje jednotku proudu ampér, a tedy by se dala považovat za hlavní jednotku v oblasti elektromagnetických veličin. Bohužel kvantové etalony proudu jsou zatím pouze ve vývoji. Naproti tomu kvantové etalony napětí a odporu jsou používány již mnoho let a ve všech národních metrologických institutech slouží k realizaci jednotek ss. elektrického napětí a odporu. Z nich se pak dále na základě Ohmova zákona odvozuje jednotka proudu. Popis kvantového etalonu odporu ČMI byl publikován v dřívějším čísle časopisu Metrologie [8]. Tento článek popisuje kvantový etalon ss napětí ČMI, umístěný v laboratořích oddělení primární etalonáže ss a nf elektrických veličin v Brně. Zájemci o podrobnější popis kvantových etalonů napětí mohou čerpat z publikací [1–3].

## 2 Josephsonův jev

Roku 1962 publikoval Brian D. Josephson teoretickou práci týkající se dvou supravodičů oddělených velmi tenkým dielektrikem (tzv. „špatným zkratem“). Odvodil velmi jednoduchý vztah mezi proudem a napětím takové struktury, která byla později nazvána Josephsonův přechod. Jev poté experimentálně ověřil Shapiro roku 1963. Jak to bývá, byl jev pozorován I. Giaverim už roku 1960, ale byl přisuzován průrazům v dielektriku (tzv. „dobrý zkrat“). Roku 1973 byla udělena Nobelova cena pánům I. Giaverimu ( $\frac{1}{4}$ ), L. Esakimu ( $\frac{1}{4}$ ) a B. D. Josephsonovi ( $\frac{1}{2}$ ) za práci na poli fyziky supravodičů.

Za nízkých teplot se z některých kovů stávají supravodiče, ve kterých elektrický odpor klesá na nulu. To je důsledkem vytvoření tzv. Cooperových párů, což jsou dvojice vzájemně velmi slabě vázaných elektronů. Všechny Cooperovy páry v jednom supravodiči mají stejnou vlnovou délku a fázi a dokážou procházet materiálem bez rozptylu na kovové mřížce, proto není pozorován v supravodičích elektrický odpor. Již delší dobu bylo známo, že elektrony dokážou procházet bariérou (např. tenkým dielektrikem) tzv. tunelováním. Podstata Josephsonova jevu je právě v tunelování Cooperových párů. Pokud máme dva supravodiče oddělené tlustou bariérou, fáze Cooperových párů v jednotlivých supravodičích jsou nezávislé. Pokud postupně snižujeme tloušťku bariéry, začnou Cooperovy páry tunelovat mezi oběma supravodiči, čímž vznikne slabá fázová vazba mezi Cooperovými páry obou supravodičů. Josephson vypočítal, že tunelovací proud skrz bariéru je sinovou funkcí rozdílu fází, a rozdíl fází je funkcí stejnosměrného napětí na bariéře. Důsledkem jsou následující tři podoby jevu (podrobnější popis a odvození jevu je popsán například v [3]):

1. stejnosměrný Josephsonův jev, kdy stejnosměrný proud přechází přes Josephsonův přechod bez vytvoření napětí na přechodu,
2. střídavý Josephsonův jev, kdy přivedením střídavého napětí na Josephsonův přechod se vytvoří proudové oscilace, tedy jev slouží jako převodník napětí na frekvenci,
3. inverzní střídavý Josephsonův jev, kdy přivedením střídavého proudu (obvykle pomocí externího elektromagnetického pole) na Josephsonův přechod se vytvoří stejnosměrné napětí, tedy jev pracuje jako dokonalý převodník frekvence na napětí (viz obr. 1).



Obrázek 1: Schéma Josephsonova přechodu a inverzního Josephsonova jevu. Přivedením střídavého proudu vzniká na struktuře stejnosměrné napětí.

Inverzní střídavý Josephsonův jev se využívá v metrologii. Rovnice odvozená B. D. Josephsonem má tvar:

$$V = n \cdot f \frac{h}{2 \cdot e} \quad (1)$$

kde:

- $h$  je Planckova konstanta ( $6,62606957(29) \times 10^{-34}$  Js),
- $e$  je elementární náboj ( $1,602176565(35) \times 10^{-19}$  C),
- $n$  je kvantový stav Josephsonova přechodu,
- $f$  je frekvence externího elektromagnetického pole,
- $V$  je napětí na Josephsonově přechodu.

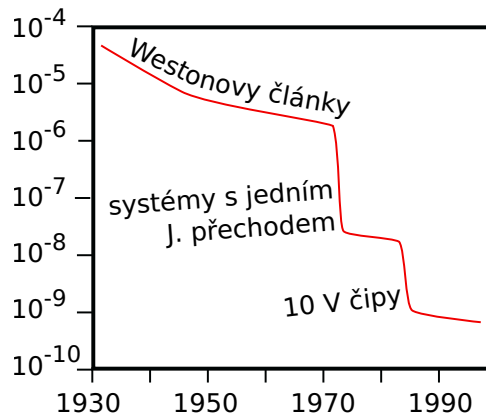
Ze vztahu je vidět, že napětí na Josephsonově přechodu nezávisí na amplitudě střídavého proudu, pouze na jeho frekvenci.

Původně Josephsonův jev sloužil k určení poměru

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

kteřý byl nazván Josephsonovou konstantou. Při měření poměru sloužily jako etalony napětí Westonovy články. Nejistota těchto experimentů byla velká, jelikož práce s Westonovými bateriemi je komplikovaná. Proto začal být jev využíván naopak k realizaci jednotky volt.

Použití Josephsonova jevu v metrologii mělo velké důsledky na nejistoty porovnání metrologických institutů. Zavedení etalonů s Josephsonovými čipy s jedním Josephsonovým přechodem snížilo nejistoty porovnání o dva řády. Další skok nastal rozšířením vícepřechodových



Obrázek 2: Shoda stejnosměrného napětí mezi národními metrologickými instituty. Využití Josephsonových přechodů vedlo ke značnému zlepšení oproti porovnání Westonových článků. Další výrazné zlepšení nastalo po výrobě Josephsonových čipů s více přechody.

Josephsonových čipů. Vývoj nejistot je zobrazen na obr. 2. Z počátku každý institut používal vlastní hodnotu Josephsonovy konstanty, sjednocení nastalo roku 1990. Mezinárodní hodnota

$$K_{J-90} = 483597,9 \text{ GHz} \cdot \text{V}^{-1} \quad (3)$$

byla přijata celosvětově jako vážený průměr měření  $K_J$  provedených do roku 1990. Před přijetím nové konstanty bylo provedeno mnoho měření, prokazujících platnost Josephsonovy rovnice za různých podmínek, jako je teplota, použité materiály, časová neměnnost, nezávislost na kvalitě výroby aj.

Relativní nejistota  $K_{J-90}$  je 0,4 ppm. Jelikož nejistota je mnohem větší než typické měření na kvantovém etalonu napětí (nejistota porovnání dvou etalonů na základě Josephsonova jevu je obvykle na úrovni 0,001 ppm), není nejistota konstanty započítávaná do výsledné nejistoty měření. To je možné si dovolit pouze tehdy, pokud všechny národní metrologické instituty používají stejnou hodnotu konstanty. Tento problém bude vyřešen přijetím nové soustavy SI založené na základních fyzikálních konstantách, ve které nejistoty a budou nulové, a tedy nejistota budoucí konstanty bude také nulová.

Poslední upřesnění hodnoty Josephsonovy konstanty dle CODATA [4] je

$$K_J = 483597,870(11) \text{ GHz} \cdot \text{V}^{-1}, \quad (4)$$

tedy hodnota se již dnes liší o  $-0,062$  ppm (opět je vhodné srovnat s obvyklou nejistotou porovnání dvou etalonů na základě Josephsonova jevu: 0,001 ppm). Tedy s novou soustavou SI dojde pravděpodobně k posunu stupnice jednotky volt.

### 3 Princip kvantového etalonu stejnosměrného napětí

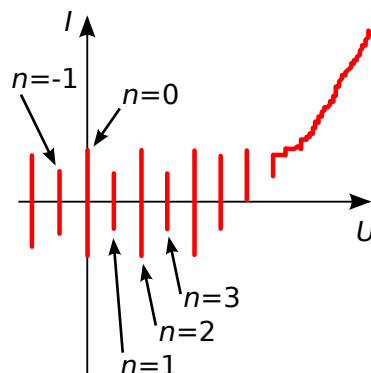
Voltampérová charakteristika jednoho Josephsonova přechodu je ukázána na obr. 3. Pro jeden kvantový stav se Josephsonův přechod chová jako ideální zdroj, ale jen v malém rozsahu stejnosměrného proudu, obvykle  $\pm 100$  mA. Při překročení tohoto proudu se jev destabilizuje a Josephsonův přechod se chová nepředvídatelně. Pro Josephsonovy přechody s vysokou kapacitou (určeno při výrobě) voltampérová charakteristika prochází bodem nulového proudu. Tyto Josephsonovy přechody jsou použity ve všech kvantových etalonech stejnosměrného napětí. Napětí na jednom Josephsonově přechodu v závislosti na kvantovém stavu  $n$  je pro frekvenci 75 GHz v následující tabulce (aplikace Josephsonovy rovnice):

$n$	$U$ ( $\mu\text{V}$ )
-4	-620,350
$\vdots$	$\vdots$
-1	-155,088
0	0
+1	+155,088
$\vdots$	$\vdots$
+4	+620,350

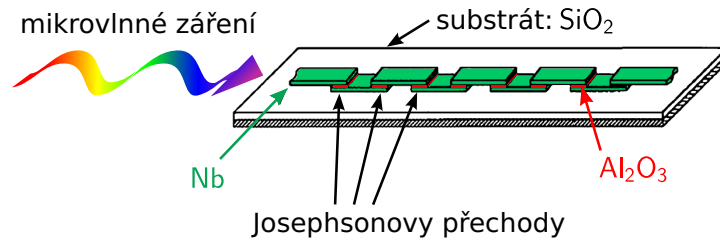
Maximální kvantový stav Josephsonových přechodů v závislosti na kvalitě výroby a vlastnostech materiálů obvykle nepřesáhne hodnotu  $\pm 4$ . Pro vyšší hodnoty bývá jev nestabilní.

K získání větších napětí jsou Josephsonovy přechody zapojeny do série a tvoří páskový vlnovod (viz obr. 4). Aby etalon pracoval správně, na všech přechodech musí být přibližně stejný úbytek mikrovlnného výkonu, což byla největší překážka při návrhu těchto obvodů. Pokud by byly všechny Josephsonovy přechody zapojeny za sebou do jediného vlnovodu, na poslední přechod by dopadal mnohem menší mikrovlnný výkon než na první přechod. Proto jsou Josephsonovy přechody sestaveny do tvaru rozvětveného páskového vlnovodu (viz obr. 5) tak, aby mikrovlny byly rozvedeny rovnoměrně do několika částí. Jednotlivé větve vlnovodu jsou odděleny kapacitami a cívkami. Díky tomu jsou Josephsonovy přechody zapojeny pro stejnosměrné napětí v sérii, ale pro mikrovlny sériovo-paralelně. Na obr. 5 je schéma vícepřechodového Josephsonova čipu s vyznačením vedení mikrovln. Dnes se vyrábí tzv. Josephsonovy čipy s až desítkami tisíc přechodů a integrovaným rozvodem mikrovln. Čip používaný v etalonu napětí ČMI (fotografie viz obr. 6) má přibližně dvacet tisíc Josephsonových přechodů a je schopen generovat napětí v rozsahu od mínus jedenácti voltů až po plus jedenáct voltů s krokem přibližně  $155 \mu\text{V}$  při stejnosměrném proudu v rozsahu  $\pm 100 \mu\text{A}$ . Supravodiče jsou vyrobeny z niobu, dielektrikum je z oxidu hlinitého. Tloušťka dielektrika je kolem  $3 \text{ nm}$ . Vše je vyrobeno na křemíkovém substrátu. Jen několik laboratoří dokáže vyrobit takový čip – ve Spojených státech amerických, v Německu a v Japonsku. Výtěžnost výroby je malá, tedy cena čipu je vysoká.

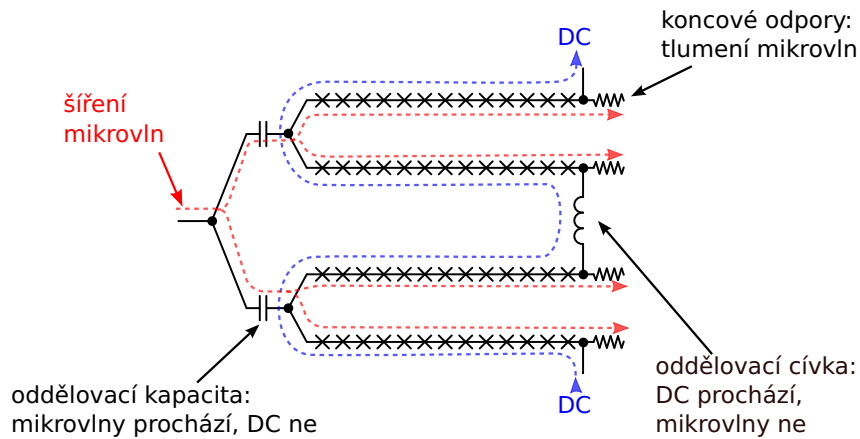
Kvantový stav čipu lze vnutit připojením externího zdroje stejnosměrného napětí a proudu. Kvantové stavy jednotlivých přechodů se přizpůsobí tak, aby napětí čipu odpovídalo přivedenému externímu napětí a po odpojení externího zdroje jsou kvantové stavy stabilní po dosta-



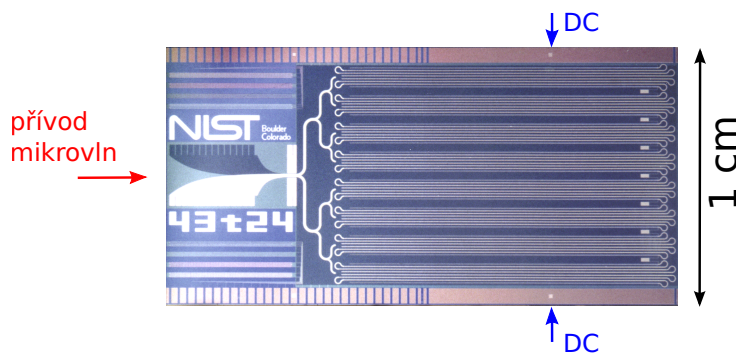
Obrázek 3: Voltampérová charakteristika Josephsonova přechodu s velkou kapacitou pro různé kvantové stavy.



Obrázek 4: Schéma sériového zapojení několika Josephsonových přechodů tvořících vlnovod.



Obrázek 5: Schéma Josephsonova čipu. Křížek označuje Josephsonův přechod. Vyznačeno je vedení mikrovln a stejnosměrného napětí (DC).



Obrázek 6: Fotografie Josephsonova čipu. V levé části je mikrovlenná anténa (přechod vlnovodu na čip) a rozvod mikrovln do jednotlivých oblastí, v pravé části je přes 20 000 Josephsonových přechodů. Vpravo nahoře a dole jsou výstupní kontakty stejnosměrného napětí.

tečně dlouhou dobu. Hodnotu kvantového stavu lze změřit voltmetrem s rozlišením lepším než napěťový rozdíl dvou sousedních kvantových stavů. Vzhledem k povaze jevu může nastat pouze celočíselný kvantový stav, takže změřením kvantového stavu voltmetrem zároveň získáme korekci voltmetru. Stabilita kvantového stavu je závislá na teplotě (s nižší teplotou vyšší stabilita) a šumu pocházejícího z vnějšího prostředí. Proto je potřeba kvalitní stínění pro všechny prvky kvantového etalonu. Například stabilita etalonu ČMI je přibližně minuta, tedy napětí generované čipem je stále v průměru po dobu jedné minuty, poté čip změní kvantový stav.

## 4 Popis kvantového etalonu ss. napětí

Kvantový etalon stejnosměrného napětí na základě Josephsonova jevu, také zkráceně JVS (Josephson Voltage System), se skládá z následujících částí (viz obr. 7):

1. čipu s Josephsonovými přechody
2. chlazení k dosažení teploty  $\sim 4$  K
3. zdroje mikrovln
4. čítače frekvence mikrovln s referenčním etalonem frekvence
5. řídicího zdroje
6. nanovoltmetru
7. analogového osciloskopu

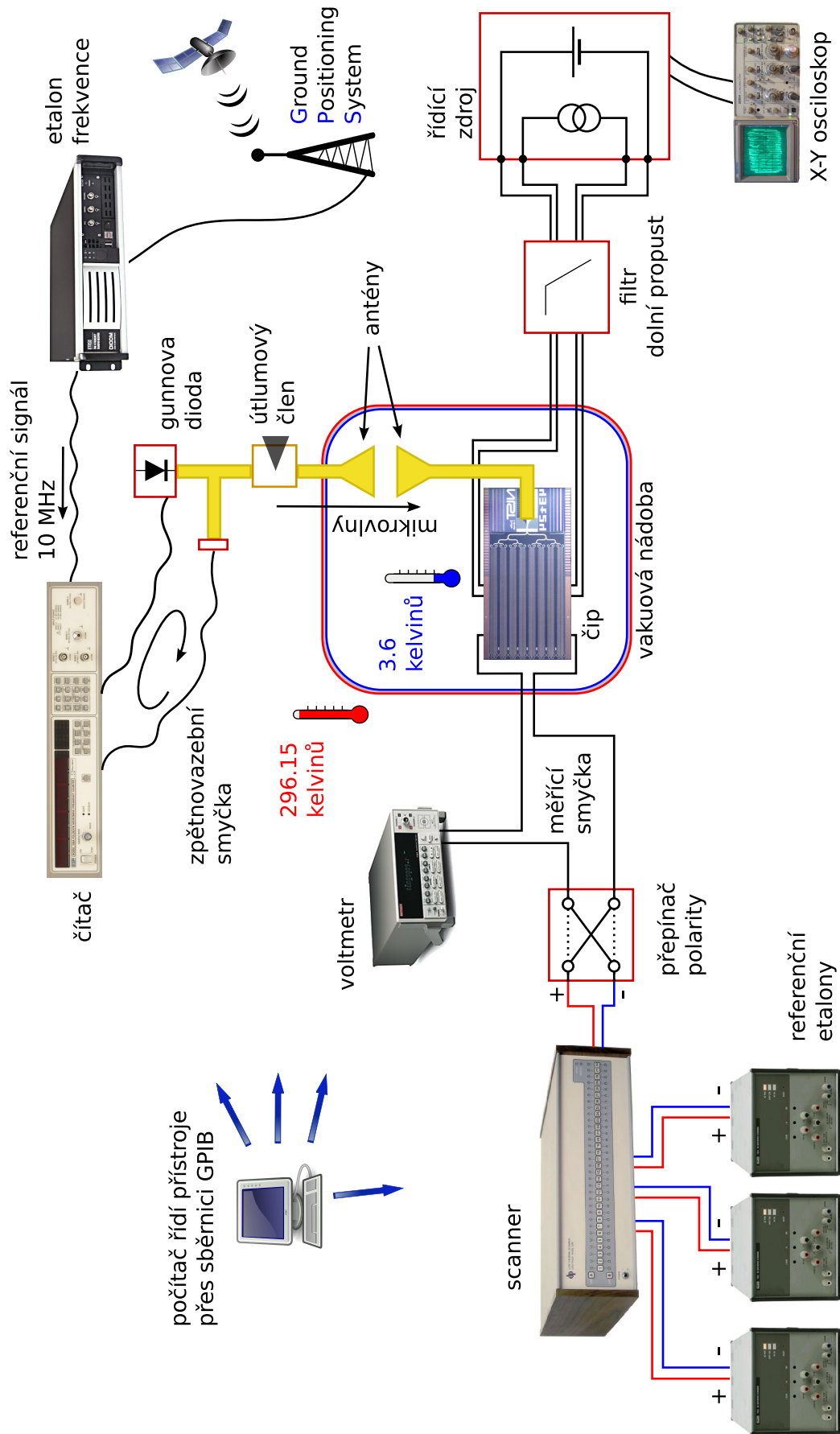
K dosažení nízké teploty potřebné pro vznik supravodivého jevu v čípech (pod pět kelvinů) se obvykle používá kapalné helium. V poslední době se také začíná používat různých chladících zařízení. Etalon ČMI je chlazen na základě pulsně-akustického jevu. Do trubice naplněné plyným heliem jsou přiváděny tlakové (akustické) vlny, které mají za následek ohřev jednoho konce trubice a ochlazení druhého konce. Popis jevu a princip chlazení je podrobně popsán v [5]. Tento systém nepotřebuje žádné mechanické součásti uvnitř chladicí trubice a vakuové nádoby kromě malého ventilu vytvářejícího akustické vlny, který je ovšem umístěn mimo vakuovou nádobu a v dostatečné vzdálenosti od měřících vodičů. Tudíž chladicí systém produkuje pouze velmi malé mechanické otřesy a minimální elektromagnetický šum. Samotný Josephsonův čip je umístěn ve vakuové nádobě, čímž se omezuje tok tepla z vnějšího prostředí. Jako ochrana před magnetickým rušením je použita mu-metalová fólie. Mikrovlny jsou přivedeny k Josephsonově čipu vlnovodem, který je ve vakuové nádobě rozdělen dvěma trychtýřovými anténami pro omezení tepelného toku vedením. Čip je připojen k ovládacímu řídicímu zdroji a měřenému zařízení celkem šesti vodiči, jejichž průřez a délka je zvolena jako kompromis mezi celkovým elektrickým odporem vodičů a výsledným tepelným tokem na čip. Mezi vodiči existuje nenulový svodový odpor, který přispívá k celkové nejistotě etalonu. Jeho hodnota je stálá a lze ji změřit.

Mikrovlny jsou generovány Gunnovou diodou. Frekvence mikrovln je měřena a řízena čítačem, který je navázaný na referenční etalon frekvence. Ten je dále navázaný na státní etalon času pomocí globálního polohovacího systému (GPS, Ground Positioning System) metodou „Common view“ [6]. V laboratoři je měřena časová stupnice GPS a zároveň se stejné měření provádí na oddělení státního etalonu frekvence a času. Porovnáním naměřených dat lze získat odchylku referenčního etalonu frekvence vůči státnímu etalonu a tedy i nejistotu frekvence mikrovlnného záření dopadajícího na Josephsonův čip.

Součástí etalonu je dále řídicí zdroj, což je počítačem řízený napěťový a proudový zdroj sloužící k nastavení kvantového stavu čipu. K určení kvantového stavu čipu a měření rozdílu napětí JVS a měřeného zařízení slouží nanovoltmetr.

K ověření správné voltampérové charakteristiky čipu (viz obr. 3) se používá řídicí zdroj a analogový osciloskop, který je k zobrazení přechodových dějů vhodnější, než srovnatelně drahý digitální osciloskop.

Fotografie kvantového etalonu stejnosměrného napětí ČMI je na obr. 8.



Obrázek 7: Schéma kvantového etalonu stejnosměrného napětí ČMI.



Obrázek 8: Fotografie kvantového etalonu stejnosměrného napětí ČMI. V levé části je vakuová nádoba s chladícím zařízením a Josephsonovým čipem, v pravé části je osciloskop s voltamperovou charakteristikou Josephsonova čipu pro jeden kvantový stav, čítač a řídicí zdroj.

## 5 Popis kalibrace pomocí JVS

JVS dokáže generovat napětí s velmi malou nejistotou, ale bohužel ho lze zatížit pouze malým měřicím proudem a je velmi citlivý na šумы vnějších zařízení. Proto se hodí prakticky pouze ke kalibraci pomocných zdrojů stejnosměrného napětí, obvykle Zenerových referencí (ZR). Zenerovy reference jsou zdroje stabilizované Zenerovou diodou, které se vyznačují velmi malým šumem. Výstupní napětí má obvykle stabilitu několik desetin ppm za rok, takže je nutné pravidelně je kalibrovat kvantovým etalonem napětí.

Na začátku kalibrace ZR se nastaví JVS do takového kvantového stavu, aby výstupní napětí bylo co nejbližší měřené ZR. Poté se JVS a ZR zapojí paralelně a nanovoltmetr mezi kladné svorky JVS a ZR. Nanovoltmetrem se odečte rozdílové napětí. Součástí obvodu je ale také off-setové napětí. To je způsobeno převážně Seebeckovým jevem na vodičích, které procházejí teplotním gradientem od Josephsonova čipu (4 K,  $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) k ZR (296 K,  $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Pro představu Seebeckův koeficient pro spoje měď-zlato je  $0,3\text{ }\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ , což má za následek vznik termoelektrického napětí kolem  $90\text{ }\mu\text{V}$ . Proto se v druhé části měření nastaví kvantový stav čipu tak, aby výstupní



napětí bylo záporné. Polarita ZR se změní otočením svorek. Znova se provede odečet rozdílového napětí multimetrem. Jelikož polarita offsetového napětí je stále stejná, lze je již vypočítat. Bohužel jeho hodnota se mění v čase, proto se provádí více odečtů pro kladné a záporné polarity a výsledné časově závislé offsetové napětí se prokládá přímkou. Pokud čip během měření samovolně nebo vlivem šumu změní kvantový stav, měření se přeruší, provede se opětovné nastavení kvantového stavu řídicím zdrojem a pokračuje se v měření.

Ve výsledku jeden odečet hodnoty ZR trvá přibližně pět minut. Dále je třeba korigovat různé další zdroje nejistot na svorkách ZR, krátkodobý šum ZR, a tedy celková kalibrace může trvat i několik hodin.

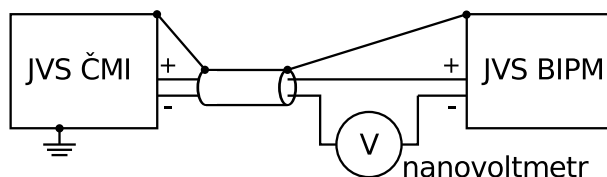
Nejistota kalibrace ZR je dána převážně nejistotou typu A měřené ZR, protože nejistoty JVS jsou velmi nízké. Nejistota jednoho pětiminutového odečtu na úrovni 10 V je kolem 15 nV (tedy 0,0015 ppm). Ale nejistota celkové kalibrace ZR je mnohem vyšší. CMC laboratoře primární etalonáže elektrických veličin ČMI pro kalibraci ZR na úrovni 10 V je 60 nV/V s pravděpodobností pokrytí 95,45% (tedy 0,06 ppm).

## 6 Porovnání s BIPM

V únoru 2011 proběhlo porovnání kvantového etalonu ČMI s cestovním kvantovým etalonem BIPM, jehož výsledky byly publikovány v [7]. Porovnání bylo rozděleno do dvou částí. Nejprve etalon BIPM sloužil jako zdroj neznámého napětí, (simulace kalibrace ZR). V druhé části proběhlo přímé porovnání obou Josephsonových čipů.

### 6.1 První část porovnání

Oba systémy byly zapojeny tak, že kladné výstupní svorky byly spojeny, a mezi záporné svorky byl zapojen nanovoltmetr (viz obr. 9). Pro čítače obou etalonů byl použit stejný referenční signál, a frekvence mikrovln nastavena na stejnou hodnotu. Etalon BIPM byl napájen z baterií, aby se předešlo problémům se zemními smyčkami. Měření byla provedena na úrovni +10 V a -10 V.

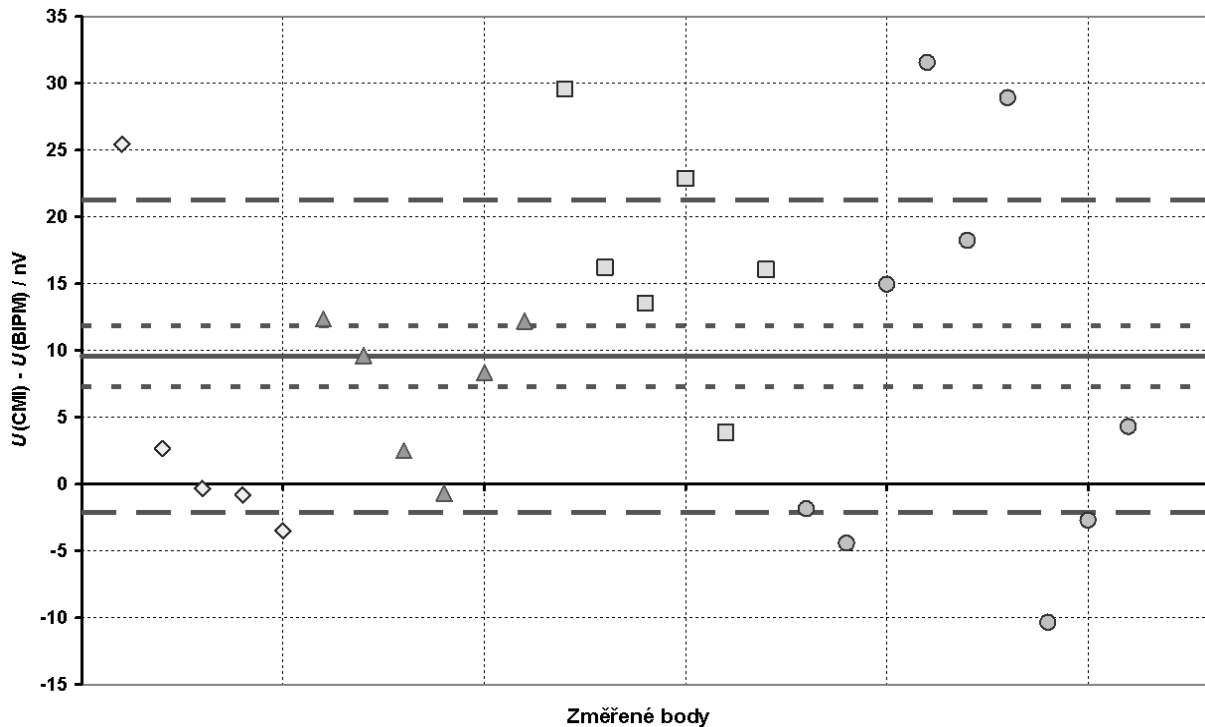


Obrázek 9: Schéma zapojení dvou kvantových etalonů během první části porovnání s BIPM.

Nejprve byl nastaven kvantový stav Josephsonova čipu ČMI, poté byl ručně nastaven kvantový stav Josephsonova čipu BIPM. V rámci jednoho měření byly získány čtyři bloky měření s oběma polaritami napětí dle schématu kladné napětí, záporné napětí, kladné napětí a záporné napětí. Každé měření trvalo přibližně 5 minut. Graf s 26 body měření v této konfiguraci je na obr. 10. Z grafu je patrné, že etalon ČMI má v této konfiguraci odchylku přibližně 10 nV. Výsledný naměřený rozdíl napěťových úrovní kvantových etalonů a celková nejistota je:

$$(U_{\text{ČMI}} - U_{\text{BIPM}}) = +9,6 \text{ nV}, u_c = 10,3 \text{ nV} \quad (5)$$

Naměřená odchylka, tzv. nulový offset, je způsoben řídicím zdrojem. Jeho hodnota byla odhadnuta před samotným porovnáním a odpovídá hodnotě naměřené během porovnání. Řídicí zdroj je potřebný pro automatizaci kalibrace zenerových referencí, přičemž nejistota 10 nV je pro tato



Obrázek 10: Jednotlivé naměřené body první části porovnání s BIPM na úrovni 10 V: různé značky bodů označují měření v různé dny. Nepřerušovaná čára označuje průměr, dlouhými čárkami (—) je vyznačena směrodatná odchylka, krátkými čárkami (- -) je vyznačena výběrová směrodatná odchylka průměru.

měření zanedbatelná. Zdroj ale není potřeba pro přímé porovnání Josephsonových čipů, které bylo provedeno v druhé části porovnání.

## 6.2 Druhá část porovnání

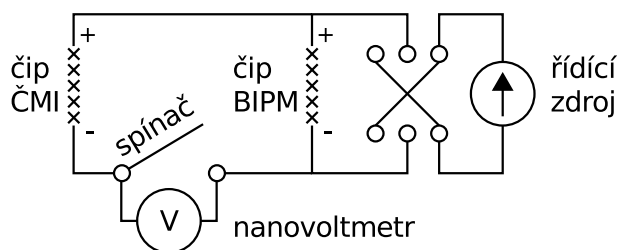
Při prvním pokusu propojit přímo oba Josephsonovy čipy bylo zjištěno, že kvantové stavy obou Josephsonových etalonů jsou velmi nestabilní. Proto byl mezi čipy zapojen II filtr konstrukce BIPM s cívkou v kladné i záporné větvi ( $L = 25 \text{ mH}$ ,  $C = 0,1 \text{ }\mu\text{F}$ ).

Aby oba čipy byly během měření ve stejném kvantovém stavu, používá se následující postup. Nanovoltmetr je zkratován spínačem. Řídící zdroj BIPM je zapojen paralelně k oběma Josephsonovým čipům a nastaví oba Josephsonovy čipy do požadovaného kvantového stavu. Poté se řídící zdroj odpojí. Jelikož jsou oba Josephsonovy čipy zapojeny paralelně, vzájemně se udržují ve stejném kvantovém stavu. Poté se rozpojí spínač u nanovoltmetru. Pokud je spínač kvalitní a nedochází k jiskření, nenastane změna kvantového stavu, nebo se změní velmi málo. V opačném případě se mohou kvantové stavy změnit natolik, že rozdíl mezi oběma čipy je příliš veliký pro měření nanovoltmetrem. Poté se změří odchylka mezi oběma Josephsonovými čipy. Schéma zapojení je na obr. 11.

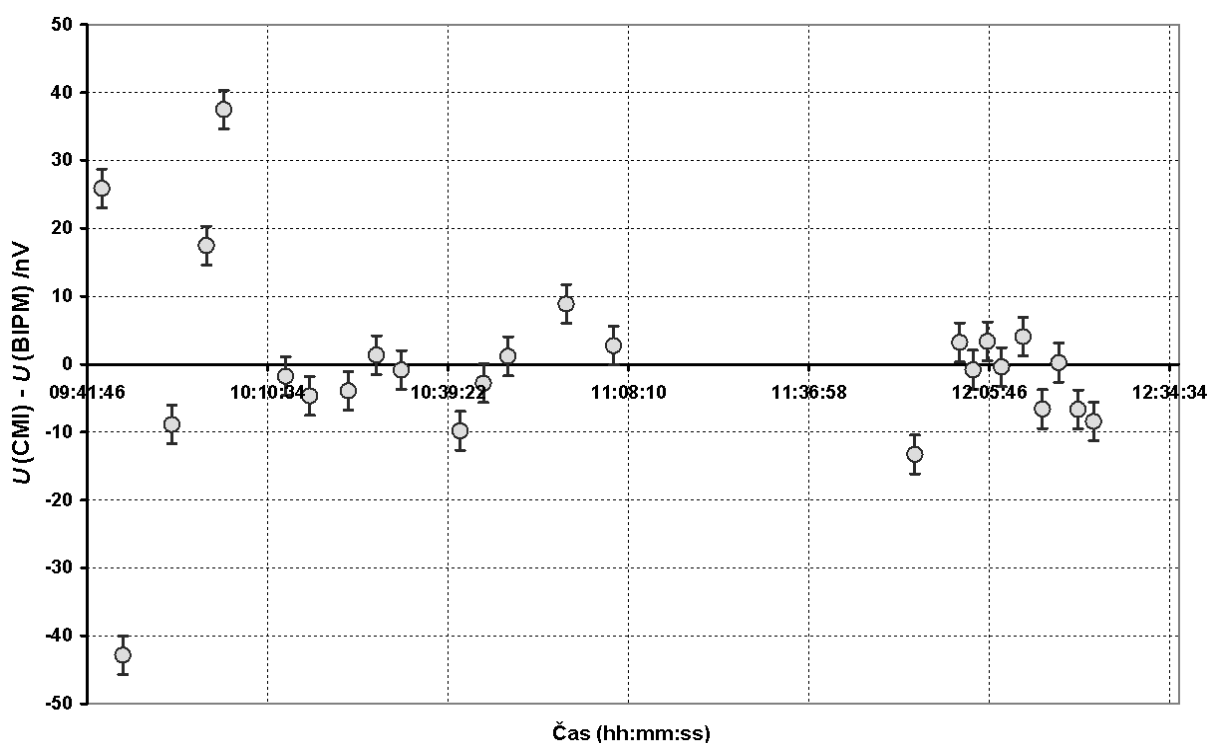
Výsledek měření je v grafu na obr. 12. Prvních 5 měření je provedeno se spínačem konstrukce BIPM, který ale nebyl dostatečně kvalitní. Poté byl nahrazen spínačem ČMI „Fluke 792A-7003 Transfer Switch“, který byl původně určen pro AC-DC měření. Po malé úpravě se ukázal jako vynikající prostředek pro přímé porovnání dvou Josephsonových čipů. Výsledek této části porovnání je:

$$(U_{\text{CMI}} - U_{\text{BIPM}}) = +1,1 \text{ nV}, u_a = 3,0 \text{ nV} \quad (6)$$

Toto porovnání bylo pro BIPM prvním, kdy kvantový etalon nebyl chlazen kapalným heliem, ale chladícím zařízením. Ukázalo se, že chlazení nemá vliv na výslednou hodnotu nebo nejistotu samotného porovnání.



Obrázek 11: Schéma zapojení dvou kvantových etalonů během druhé části porovnání s BIPM.



Obrázek 12: Jednotlivé naměřené body druhé části porovnání. Prvních 5 měření je provedeno se spínačem konstrukce BIPM, ostatní body jsou naměřené se spínačem ČMI.

## 7 Závěr

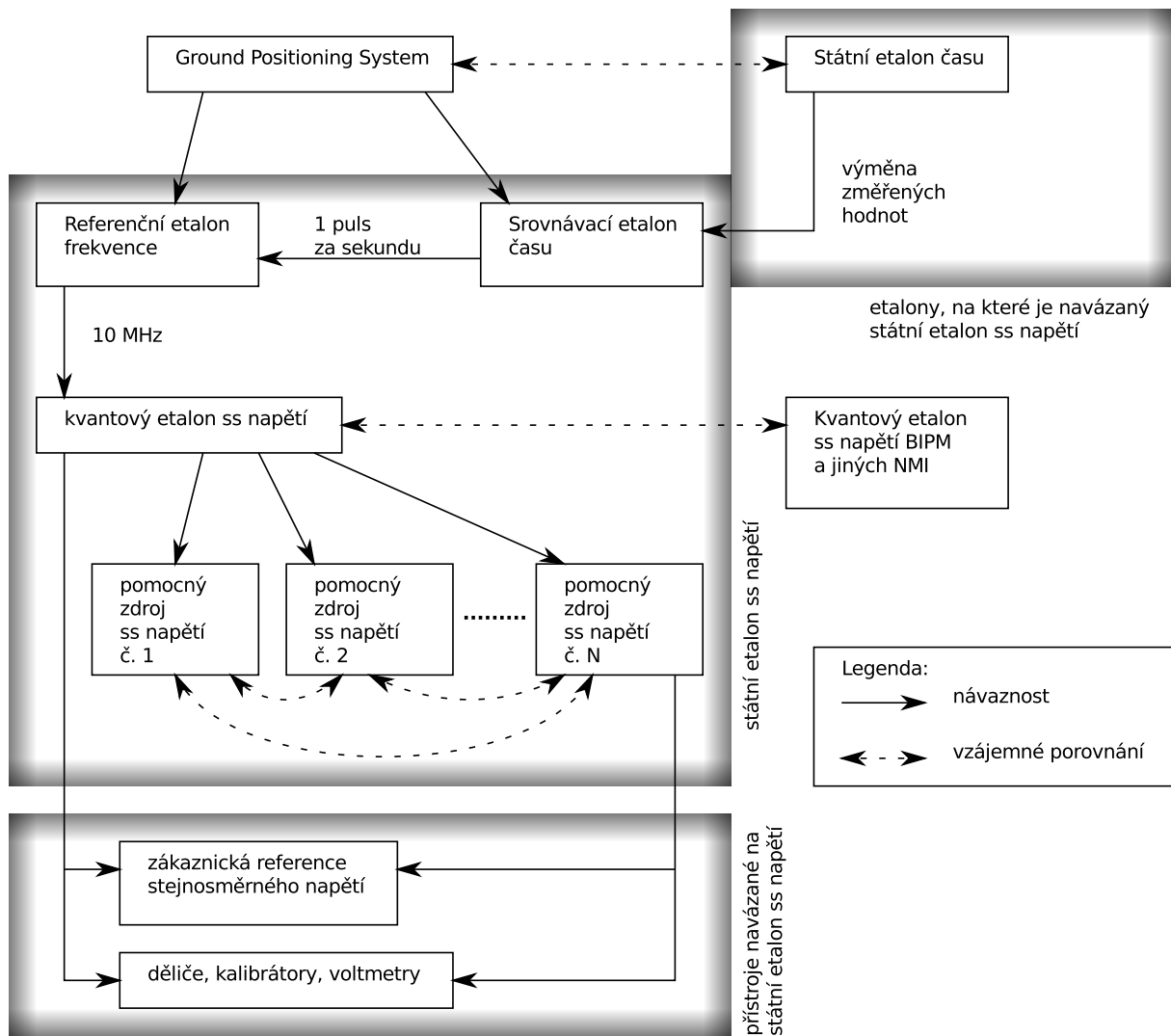
Na základě popsaného porovnání s BIPM a předchozích porovnání i s jinými instituty byl předsedou ÚNMZ v roce 2013 kvantový etalon ss napětí ČMI schválen a vyhlášen státním etalonem ss napětí ČR. Etalon je schopen generovat ss napětí v rozsahu od  $-10$  V do  $10$  V s krokem  $155 \mu\text{V}$  a nejistotou  $11$  nV. Rozpis nejistoty pro úroveň  $10$  V je v následující tabulce:

nejistota	typ	rozdělení	hodnota standardní nejistoty (nV)
nejistota mikrovlnného čítače	B	rovnorné	0,12
svodový odpor vodičů	B	rovnorné	0,33
nejistota nanovoltmetru	B	rovnorné	3,5
nulový ofset řídícího zdroje	A	normální	9,9
celková nejistota			10,5

Celková návaznost etalonu je na obr. 13. Do budoucna je naplánován vývoj kalibrace voltmetrů a nanovoltmetrů přímo pomocí kvantového etalonu napětí. To by umožnilo snížit nejistoty kalibrace velmi malých napětí.

## 8 Literatura

1. Hamilton, C. A. Josephson voltage standards. *Review of Scientific Instruments*, 2000, č. 71(10), s. 3611. doi:10.1063/1.1289507
2. Jeanneret, B., Benz, S. P. Application of the Josephson effect in electrical metrology. *The European Physical Journal Special Topics*, 2009, č. 172(1), s. 181–206. doi:10.1140/epjst/e2009-01050-6
3. Roy, A. Great experiments in physics. *Resonance*, 1998, č. 3(9), 6–13. doi:10.1007/BF02836076
4. Mohr, P. J., Taylor, B. N., Newell, D. B. CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2010. *Reviews of Modern Physics*, 2010, č. 84(4), s. 1527–1605. doi:10.1103/RevModPhys.84.1527
5. de Waele, A.T.A.M. Pulse-tube refrigerators: principle, recent developments, and prospects. *Physica B: Condensed Matter*, 2000, č. 280(1–4), s. 479–482. doi:10.1016/S0921-4526(99)01840-2
6. Allan, D. W., Weiss, M. A. Accurate Time and Frequency Transfer During Common-View of a GPS Satellite, 34th Annual Frequency Control Symposium, 1980, s. 334–346.
7. Solve, S., Chayramy, R., Stock, M., Streit, J., Šíra, M. Comparison of the Josephson voltage standards of the CMI and the BIPM (part of the ongoing BIPM key comparison BIPM.EM-K10.b). *Metrologia*, 2012, č. 49(1A), s. 01003–01003. doi:10.1088/0026-1394/49/1A/01003
8. Chrobok, Petr. Státní etalon stejnosměrného elektrického odporu na bázi kvantového Hallova jevu. *Metrologie*. Praha, 2009, č. 3, str.10.



Obrázek 13: Schéma návaznosti stejnosměrného napětí v ČMI.