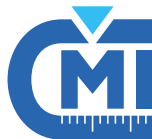


# Metrologická návaznost elektrických veličin aneb jaká je návaznost mezi čínským voltmetrem a brazilským ampérmetrem

Martin Šíra

Český Metrologický Institut

verze ze dne 16. 10. 2018



Co je to návaznost?

Návaznosti obecně

Návaznost elektrických veličin

Přehled návaznosti elektrických veličin

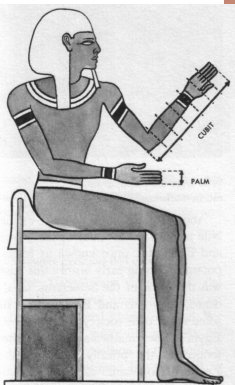
Návaznost jednotlivých veličin

# Již staří egyptané, 3000 l.p.n.l

Návaznost délkových měřidel (loket – cubit) na „zlatý etalon“.

Každý měsíc porovnání.

Opomenutí se trestalo stětím hlavy!



Uriah Wellcome: Coudée (règle) de Mâya, ministre des Finances du roi  
Toutânkhamon, 1336 – 1327 a.v. J.-C. (18<sup>e</sup> dynastie)

Průzkumem zjištěno:

- ▶ 37 místních variací stopy
- ▶ 68 variací lokte
- ▶ 83 různých měř pro suché zrní
- ▶ 70 pro tekutiny
- ▶ 63 pro váhy

(Thomas McGreevy, Peter Cunningham (1995). The Basis of Measurement: Historical Aspects Picton Publishing. ISBN 0-948251-82-4.)

Veřejné míry. Příklad z Greenwiche:



Co je to návaznost?

Návaznosti obecně

Návaznost elektrických veličin

Přehled návaznosti elektrických veličin

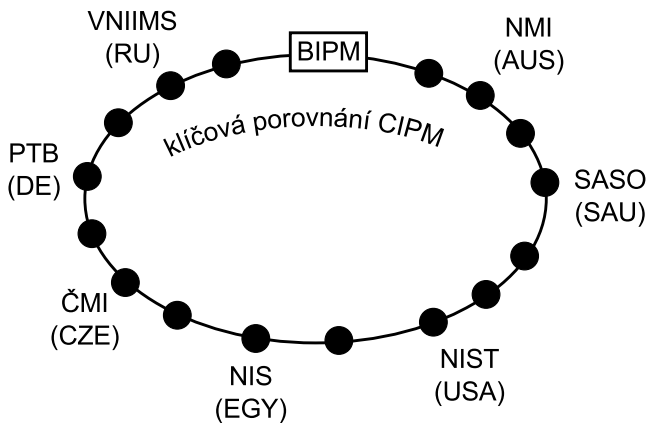
Návaznost jednotlivých veličin

# Druhy návazností

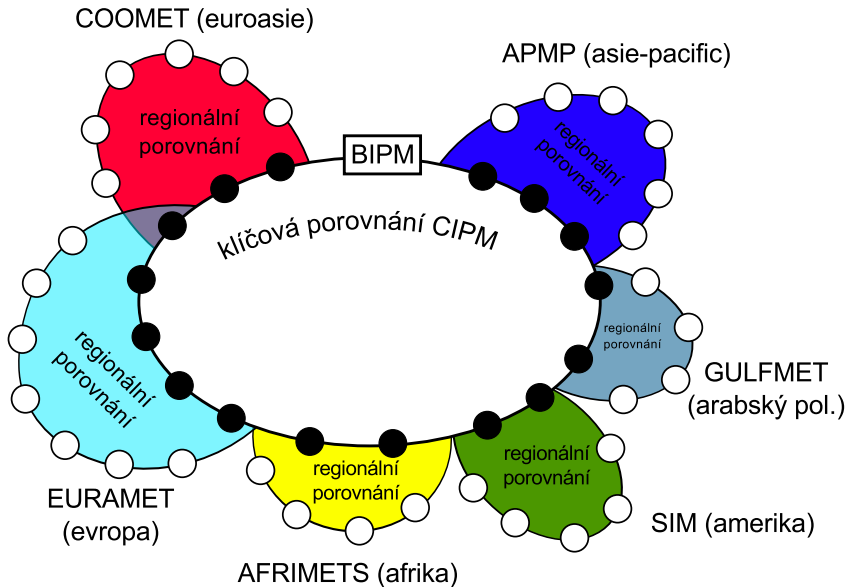
1. horizontální – CIPM MRA
2. vertikální – CIPM MRA
3. jednotková – systém SI



# Horizontální návaznost NMI

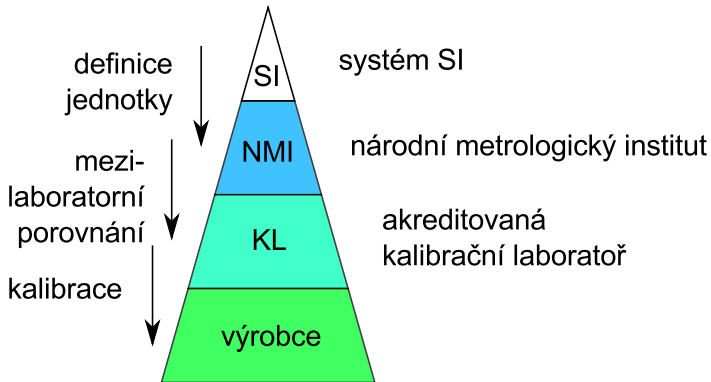


# Horizontální návaznost NMI

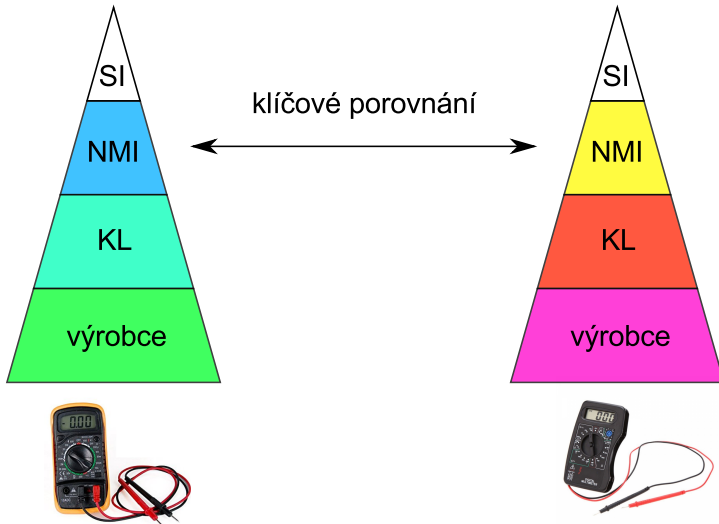




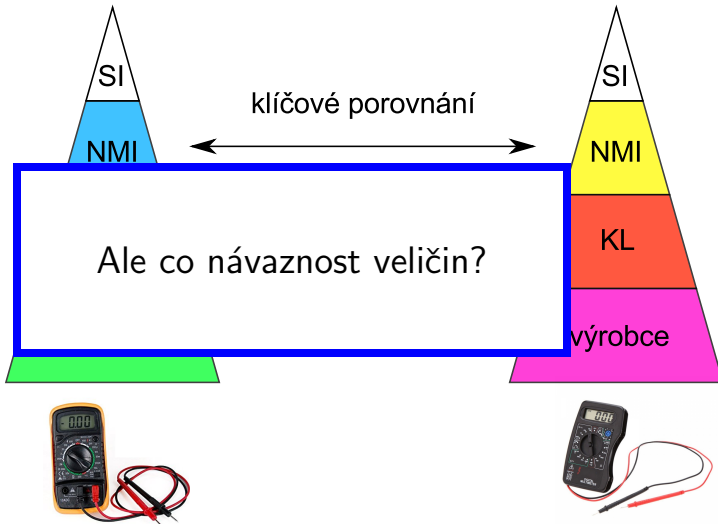
# Vertikální návaznost



# Vertikální návaznost



# Vertikální návaznost



Co je to návaznost?

Návaznosti obecně

Návaznost elektrických veličin

Přehled návaznosti elektrických veličin

Návaznost jednotlivých veličin

Co je to návaznost?

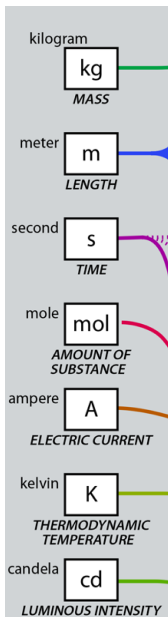
Návaznosti obecně

Návaznost elektrických veličin

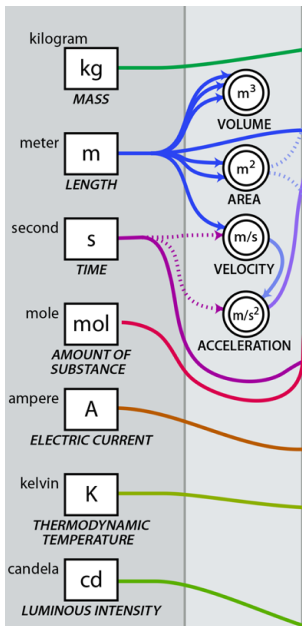
Přehled návaznosti elektrických veličin

Návaznost jednotlivých veličin

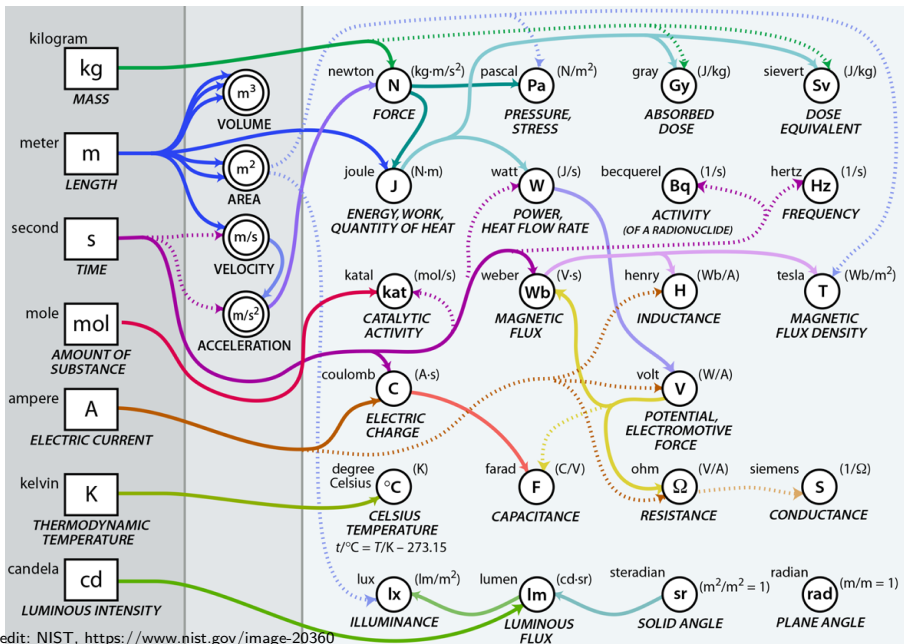
# Návaznost podle systému SI – nepoužívá se



# Návaznost podle systému SI – nepoužívá se

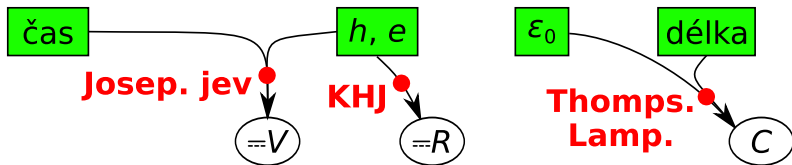


# Návaznost podle systému SI – nepoužívá se

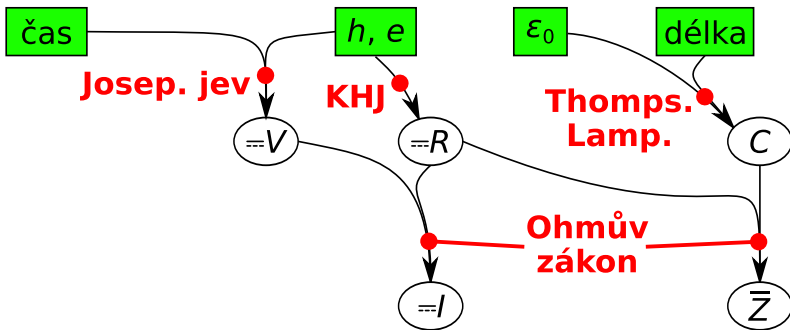




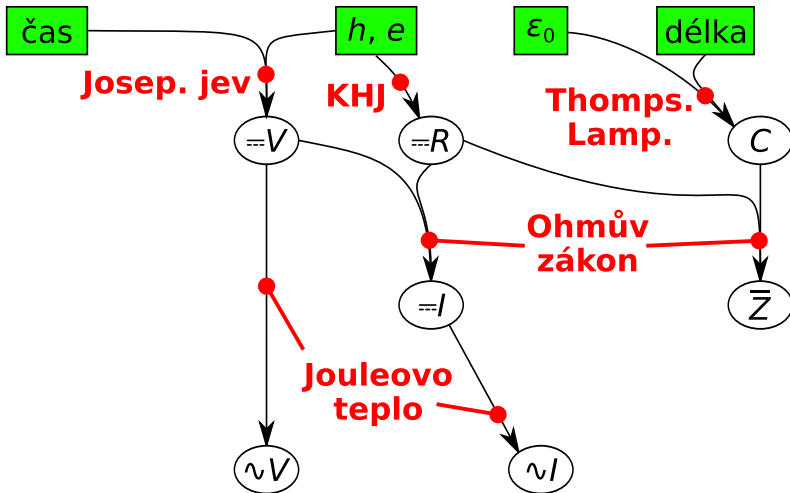
# Přehled – praktická návaznost, ss. a nf veličiny



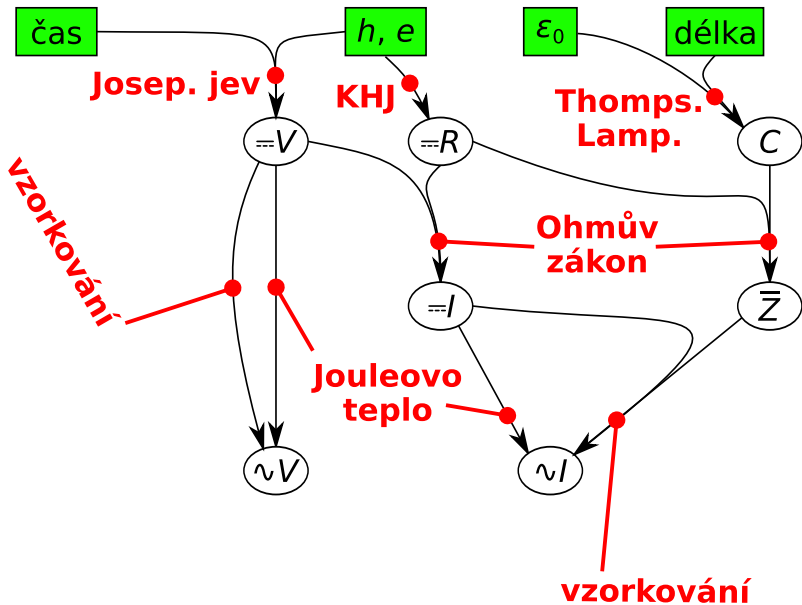
# Přehled – praktická návaznost, ss. a nf veličiny



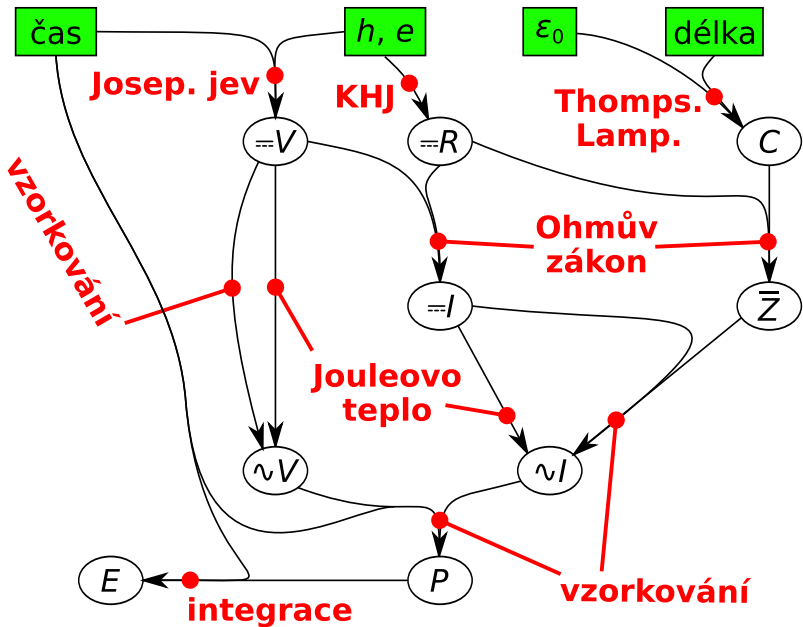
# Přehled – praktická návaznost, ss. a nf veličiny



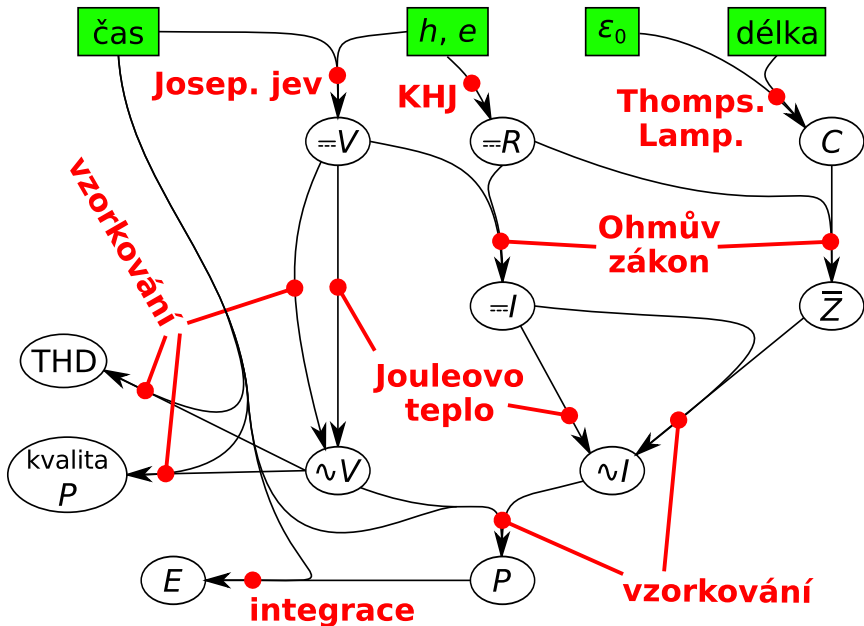
# Přehled – praktická návaznost, ss. a nf veličiny



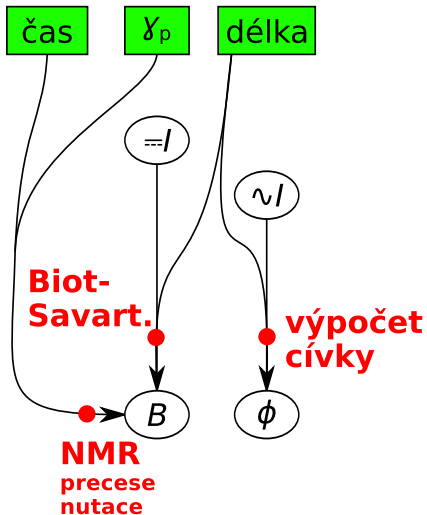
# Přehled – praktická návaznost, ss. a nf veličiny



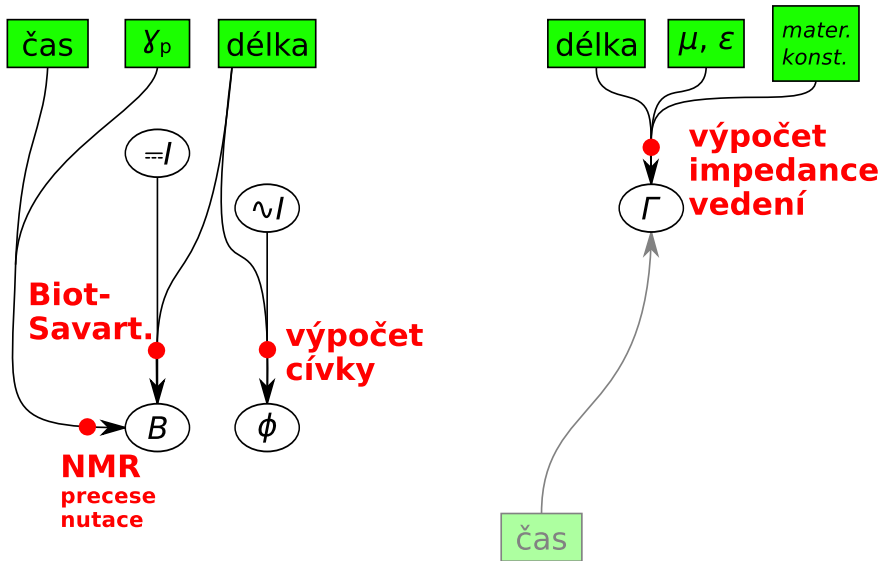
# Přehled – praktická návaznost, ss. a nf veličiny



# Přehled – praktická návaznost, magnetické a vf veličiny

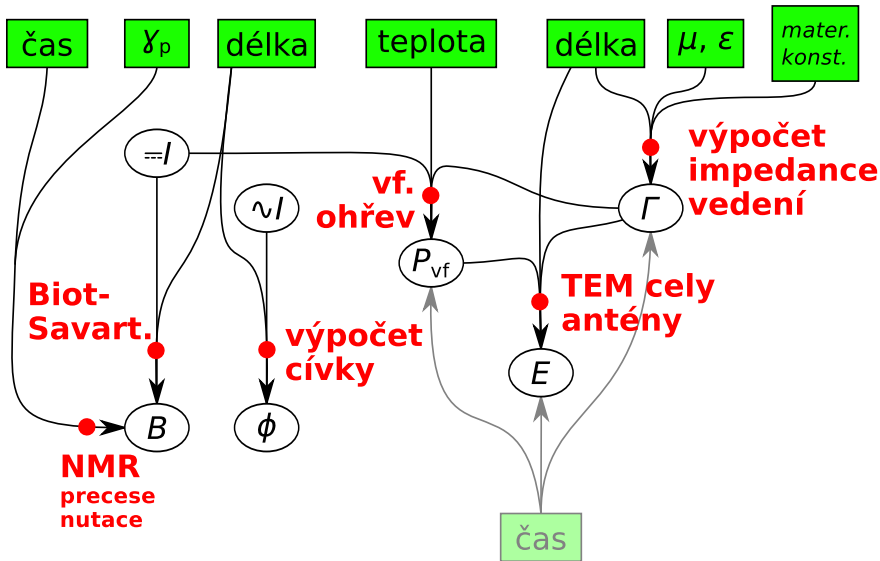


# Přehled – praktická návaznost, magnetické a vf veličiny





# Přehled – praktická návaznost, magnetické a vf veličiny



Co je to návaznost?

Návaznosti obecně

Návaznost elektrických veličin

Přehled návaznosti elektrických veličin

Návaznost jednotlivých veličin

# $\equiv V$ , stejnosměrné napětí

Jednotka:  $V$  ( $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{A}^{-1}$ )

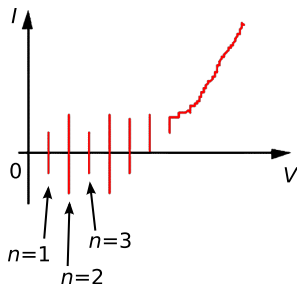
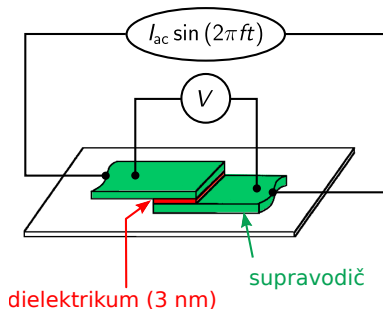
Návaznost na:  $h$ ,  $e$ , čas

Princip: inverzní střídavý Josephsonův jev

Realizace: kvantový etalon ss. napětí

Rel. nejistota: od  $1 \text{ nV} \cdot \text{V}^{-1}$  pro  $-10$  až  $10 \text{ V}$  (bez nej.  $e$ ,  $h$ !)

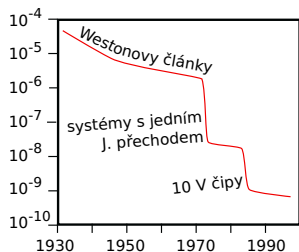
$$V = \frac{n \cdot f \cdot h}{2 \cdot e}$$



# $\approx V$ , stejnosměrné napětí

Kv. etalon ss napětí:

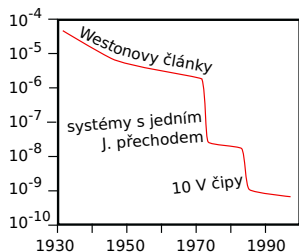
pro  $\langle n \rangle = 3$ ,  $f = 75$  GHz je potřeba  $\approx 20\,000$  J. přechodů.



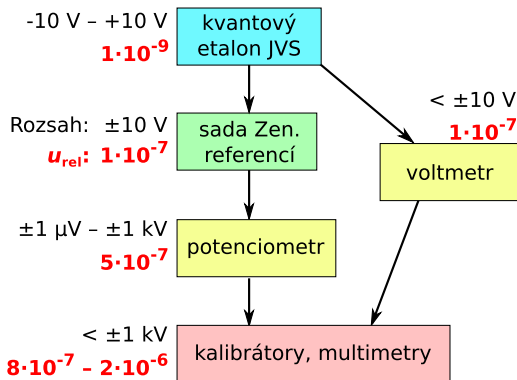
# $\approx V$ , stejnosměrné napětí

Kv. etalon ss napětí:

pro  $\langle n \rangle = 3$ ,  $f = 75$  GHz je potřeba  $\approx 20\,000$  J. přechodů.



10.1109/JPROC.2004.833671



# $R_H$ , stejnosměrný odpor

Jednotka:  $\Omega$  ( $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{A}^{-2}$ )

Návaznost na:  $h$ ,  $e$

Princip: kvantový Hallův jev

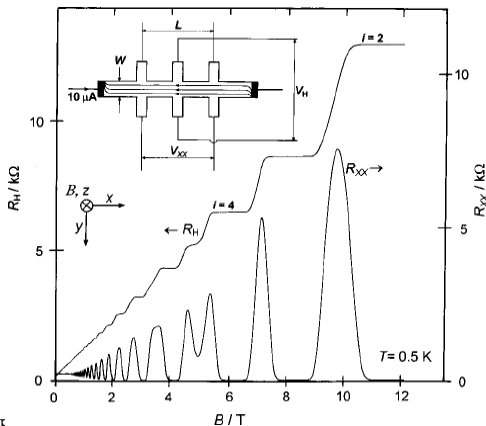
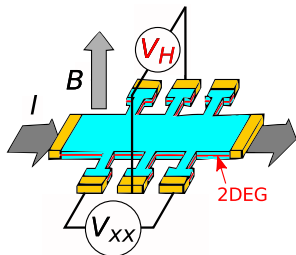
Realizace: kvantový etalon ss. odporu

Rel. nejistota: od  $1 \text{ n}\Omega \cdot \Omega^{-1}$  pro  $12,9 \text{ k}\Omega$  (bez nejistoty  $e$ ,  $h$ !)

$$R_H = \frac{1}{i} \cdot \frac{h}{e^2}$$

$$R_{H-90} = \frac{h}{e^2} = 25,812\,807 \text{ k}\Omega$$

$$i \equiv 2 \rightarrow R_H = 12,906\,403\,5 \text{ k}\Omega$$



# Proudový komparátor – CCC (cryogenic current comparator)

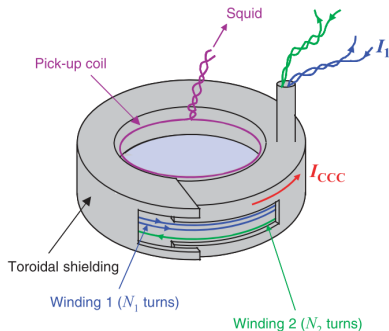
Most tvořený cívkami stíněné pomocí Meissnerova jevu → nulový rozptyl mag. pole.

Cívkami teče proud opačné polarity, SQUID použit jako detektor nulového proudu.

Slouží k porovnání dvou etalonů odporu nebo navázání odporu na KHJ.

Rozsah  $0,1 \Omega - 100 \text{ k}\Omega$

Rel. nejistota: od  $10 \text{ n}\Omega \cdot \Omega^{-1}$



# $\overline{I}$ , stejnosměrný proud

Jednotka: A (A)

Návaznost na:  $\overline{V}$ ,  $\overline{R}$

Princip: Ohmův zákon

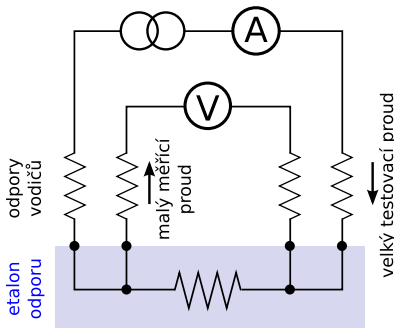
Realizace: přímé zapojení sekundárních etalonů  $\overline{V}$  a  $\overline{R}$

Rel. nejistota: od  $1 \mu\text{A} \cdot \text{A}^{-1}$  pro jednotky A

$$I = V/R$$

Kvantové etalony nejsou (zatím) praktické. Přímé zapojení KHJ a JVS problematické.

Čtyřvodičové zapojení:





# C, kapacita

Jednotka:  $F$  ( $s^4 \cdot A^2 \cdot m^{-2} \cdot kg^{-1}$ )

Návaznost na:  $\varepsilon_0$ , délka

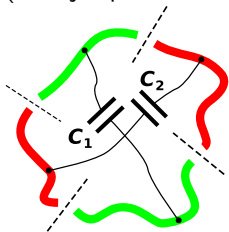
Princip: Thompson-Lampardova teorie

Realizace: vypočítatelný kondenzátor

Rel. nejistota:  $10 \text{ nF} \cdot F^{-1}$  pro  $1 \text{ pF}$

$$\exp(-\pi \cdot C_1/\varepsilon_0) + \exp(-\pi \cdot C_2/\varepsilon_0) = 1$$

(Platí jen pro nekonečně dlouhé elektrody!)



$$C = \varepsilon_0 \cdot L \frac{\ln 2}{\pi}$$

# C, kapacita

Jednotka:  $F$  ( $s^4 \cdot A^2 \cdot m^{-2} \cdot kg^{-1}$ )

Návaznost na:  $\epsilon_0$ , délka

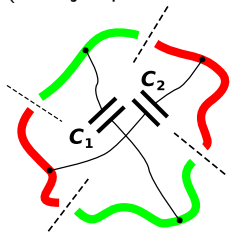
Princip: Thompson-Lampardova teorie

Realizace: vypočitatelný kondenzátor

Rel. nejistota:  $10 \text{ nF} \cdot F^{-1}$  pro  $1 \text{ pF}$

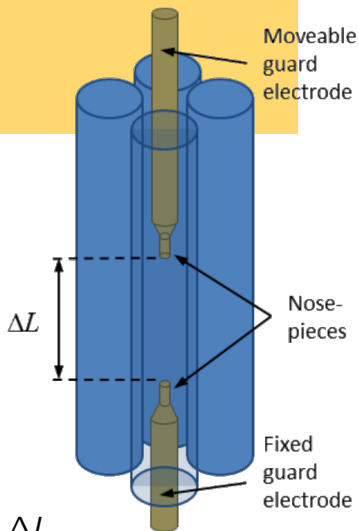
$$\exp(-\pi \cdot C_1/\epsilon_0) + \exp(-\pi \cdot C_2/\epsilon_0) = 1$$

(Platí jen pro nekonečně dlouhé elektrody!)

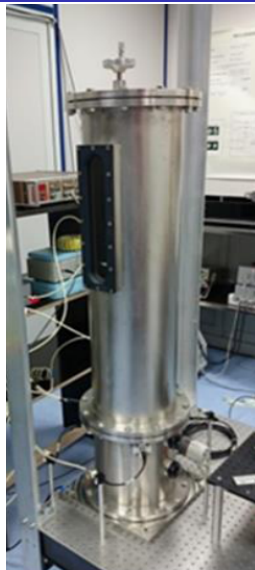
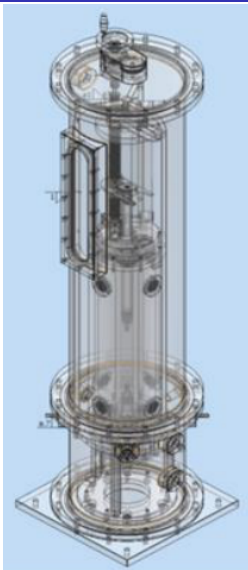
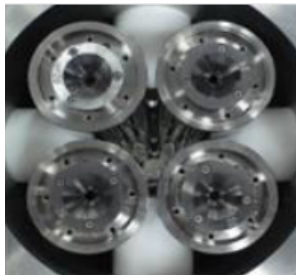


$$C = \epsilon_0 \cdot L \frac{\ln 2}{\pi}$$

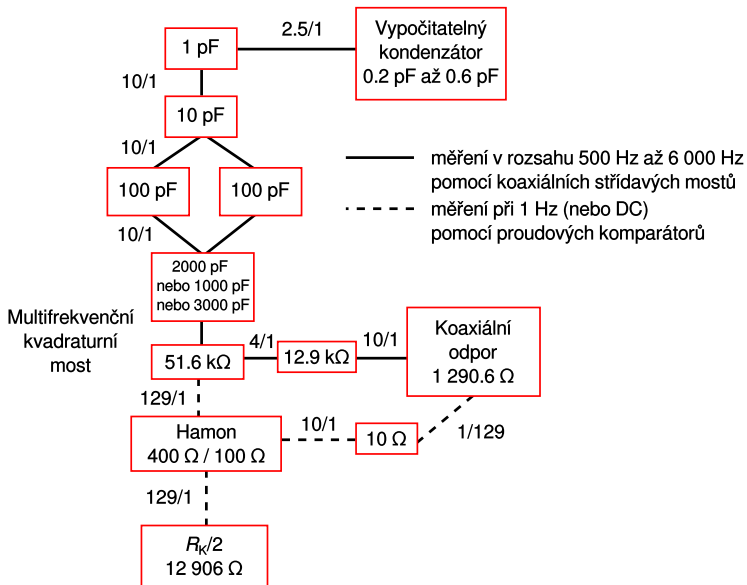
$$\Delta C \approx 1,9 \times 10^{-12} \cdot \Delta L$$



# Realizace Thompson-Lampardova kondenzátoru, BIPM



# Návaznost $\Omega$ a F, BIPM



## $\sim I$ , střídavý proud

Jednotka: A (A)

Návaznost na:  $\sim I$

Princip: Joulův ohřev

Realizace: ac-dc diference

Rel. nejistota: od  $2 \mu\text{A} \cdot \text{A}^{-1}$  pro 1 A

Měření teploty odporového členu při ss. a stř. proudu. Pokud jsou teploty stejné, pak je i stejný elektrický výkon a  $I_{\text{ac,RMS}} = I_{\text{dc}}$

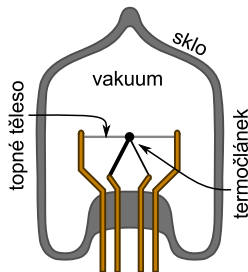
Dopravdy:

$$\delta = \frac{I_{\text{ac,RMS}} - I_{\text{dc}}}{I_{\text{dc}}} \Big|_{T_{\text{dc}} = T_{\text{ac}}} \neq 0$$

Měří se RMS!

## SJTC – Single Junction Thermal Converters

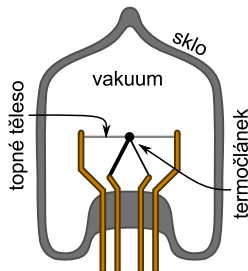
- ▶ vývoj v 50. letech
- ▶ měření teploty: mV s nV nejistotou
- ▶ frekvenční závislost rovná do GHz
- ▶ nejistoty  $\approx 1$  ppm



# měření ac-dc diference

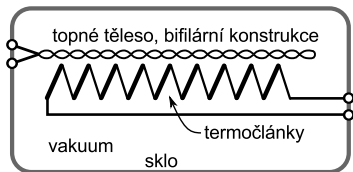
## SJTC – Single Junction Thermal Converters

- ▶ vývoj v 50. letech
- ▶ měření teploty: mV s nV nejistotou
- ▶ frekvenční závislost rovná do GHz
- ▶ nejistoty  $\approx 1$  ppm



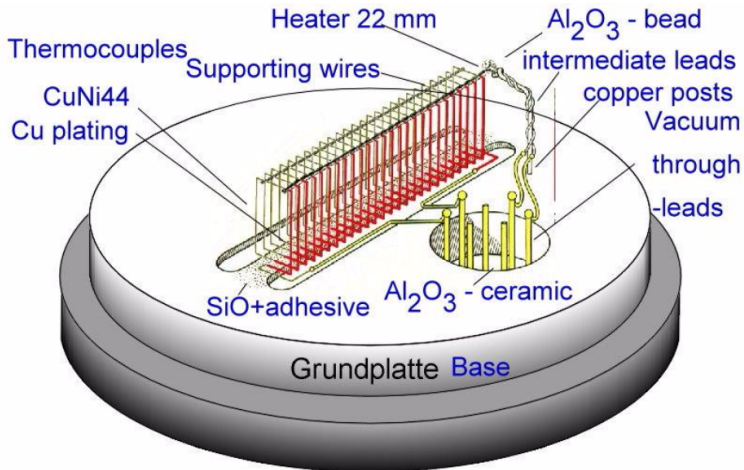
## MJTC – Multijunction Thermal Converters

- ▶ vývoj v 70. letech
- ▶ vyšší napětí měření teploty
- ▶ horší frekvenční závislost
- ▶ nejistoty  $\approx 0,1$  ppm



# schéma MJTC, vyvinuto v PTB

## PTB 3-dimensional MJTC





# Vlastnosti ac-dc metody

## Výhody:

- ▶ relativně jednoduché
- ▶ vysoká stabilita prvků (desítky let)
- ▶ velká šířka pásma: Hz – MHz

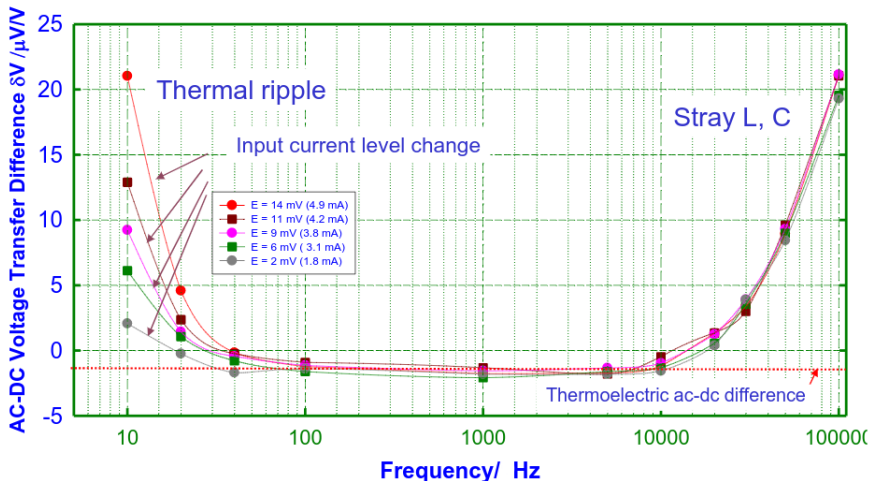
## Nevýhody:

- ▶ nelze oddělit šum od měřeného proudu (RMS)
- ▶ dlouhé doby měření (hodiny)
- ▶ zatěžování zdroje proudu

## Parazitní jevy:

- ▶ termoelektrické jevy
- ▶ parazitní kapacita/indukčnost prvku
- ▶ skin efekt
- ▶ tepelná kapacita

# charakteristika SJTC



2SJTC  $90 \Omega / 5 \text{ mA} + \approx 40 \Omega$  series resistor

Dave Inglis NRC, Canada at NIST/SIM Metrology School, Gaithersburg, MD, October, 2013

## $\sim V$ , střídavé napětí

Jednotka: V ( $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{A}^{-1}$ )

Návaznost na:  $\sim V$

Princip: Joulov ohřev

Realizace: ac-dc difference

Rel. nejistota: od  $1 \mu\text{V} \cdot \text{V}^{-1}$  pro 1 V

Měření teploty odporového členu při ss. a stř. napětí. Pokud jsou teploty stejné, pak je i stejný elektrický výkon a  $V_{\text{ac,RMS}} = V_{\text{dc}}$

Doopravdy:

$$\delta = \frac{V_{\text{ac,RMS}} - V_{\text{dc}}}{V_{\text{dc}}} \Big|_{T_{\text{dc}} = T_{\text{ac}}} \neq 0$$

Měří se RMS!

# $\sim V$ , střídavé napětí

Jednotka:  $V$  ( $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{A}^{-1}$ )

Návaznost na:  $\text{---}V$

Princip: vzorkování

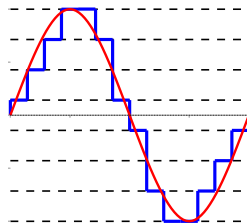
Realizace: analogově digitální převodníky (ADC)

Rel. nejistota: od  $1 \mu\text{V} \cdot \text{V}^{-1}$  pro  $1 \text{V}$

Rychlé opakované měření napětí.

**Navzorkovat nestačí!**

K získání  $\sim V$  je potřeba  
data zpracovat algoritmem:  
DFT, fit, ...



# Vlastnosti vzorkovacích metod

## Výhody:

- ▶ možnost odlišit jednotlivé složky signálu i šum,
- ▶ možnost měřit rychlé děje,
- ▶ vysoké vstupní impedance.

## Nevýhody:

- ▶ komplikované zpracování dat,
- ▶ malá stabilita,
- ▶ nutno počítat se šířkou pásma.

## Parazitní jevy:

- ▶ kvantizační šum,
- ▶ nelinearita ADC,
- ▶ zkreslení ADC,
- ▶ jitter,
- ▶ chyba algoritmu,
- ▶ . . . .

# (Hewlett Packard, Agilent) Keysight 3458

- ▶ nejpřesnější digitizér do  $\approx 20$  kSa/s,
- ▶  $8\frac{1}{2}$ -místný ( $\approx 2^{28}$ ) vzorkovací voltmetr,
- ▶ konstrukce ze 70. let,
- ▶ 2 metody vzorkování: integrační, hold&sample,
- ▶ dosažitelné rel. nejistoty při ideálních podmínkách  $\approx 10^{-6}$ ,
- ▶ existuje celá kniha věnována nastavení a zpracování dat jenom tohoto voltmetru (multimetru).



## $\bar{Z}$ , impedance

Jednotka:  $\Omega$  ( $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{A}^{-2}$ )

Návaznost na:  $R$ ,  $C$

Princip: Ohmův zákon (v komplexní rovině)

Realizace: mosty

Rel. nejistota: od  $0,1 \mu\Omega \cdot \Omega^{-1}$

$$Z = V/I, \quad z, v, I \in \mathbb{C}$$

Druhy mostů: indukční, kapacitní, kvadrurní, Maxwell-Wienův, vzorkovací, . . .

Etalony  $C$ ,  $L$ ,  $\sim R$

Frekvenční rozsah 10 Hz – 100 MHz

Sekundární etalony kapacity ČMI:

křemenné kondenzátory v  $\text{N}_2$ , tepl. stabilizace, 10 pF, 100 pF

typický drift  $>1$  ppm za 35 let!

# Odvození indukčnosti – Maxwell-Wienův most

Známé  $C$ ,  $R_1$ ,  $R_2$  → změřené  $L$  a  $R_s$  ( $Q$ )

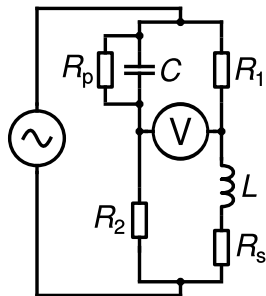
Rel. nejistota: od  $1 \mu\text{H} \cdot \text{H}^{-1}$

$$\frac{R_p(R_s + j\omega L)}{1 + j\omega C R_p} = R_1 R_2$$

$$R_s = \frac{R_1 R_2}{R_p}$$

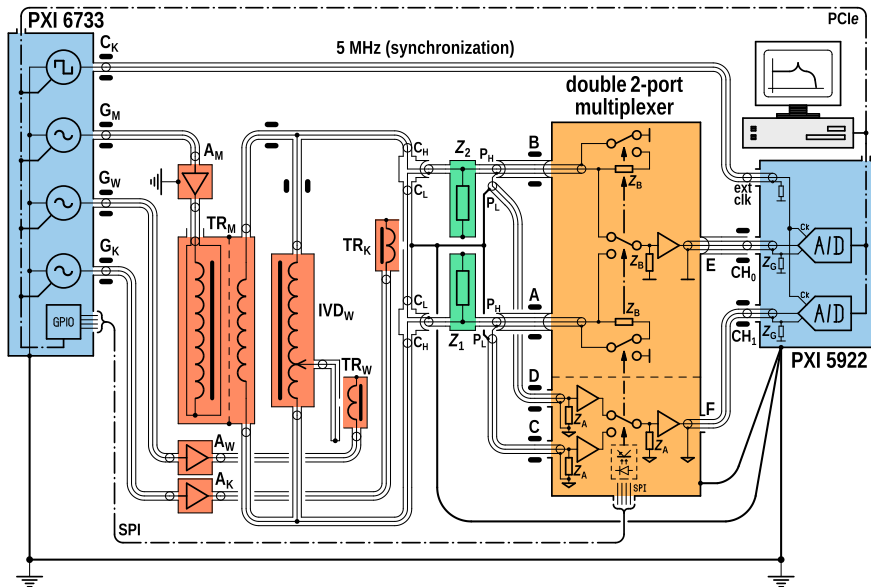
$$L = R_1 R_2 C$$

fázový posuv  $C$  vyrovná fázový posuv  $L$

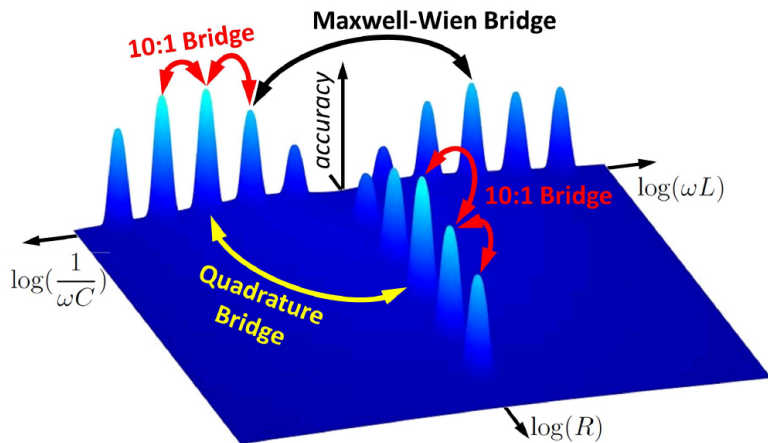




# Kvadrurní vzorkovací most pro nízké impedance, ČMI



# Přesnost měření impedance v komplexní rovině (klasické metody)



Jednotka:  $W$  ( $kg \cdot m^2 \cdot s^{-3}$ )

Návaznost na:  $\sim V$ ,  $\sim I$ , čas

Princip: vzorkování

Realizace: voltmetr + voltmetr s bočníkem

Rel. nejistota: od  $10 \mu W \cdot V^{-1} \cdot A^{-1}$  pro 1 V, 1 A,  $0^\circ$

$$P(t) = u(t) \cdot i(t)$$

Na nejpřesnějších úrovních *fantomový* výkon:

Napěťový a proudový obvod **není** galvanicky spojen.

Není potřeba opravdový výkon – zdroje nejsou zatíženy.

Vzorkování:

FFT  $\rightarrow$  velké chyby  $\varphi$  pro nekoherentní systém.

# $E$ , energie

Jednotka: J ( $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ )

Návaznost na:  $P$ , čas

Princip: výkon po daný čas

System na ověřování elektroměrů ČMI:



Návaznost na:  $\sim V$ , čas

Realizace: vzorkování průběhu napětí

Velké množství sledovaných veličin:

amplitudy, poklesy, podpětí, zvýšení, přepětí, výpadky, zkreslení, interharmonické, rychlé změny napětí, flikry, fázory, frekvence, rychlost změny frekvence, nesymetrie, HDO, ...

Cca 10 **závazných** mezinárodních norem.

Důležité pro:

stabilitu/řízení přenosové/distribuční sítě, ekonomiku, zdravotní důsledky.

# B, magnetická indukce

Jednotka: T ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{A}^{-1}$ )

Návaznost na:  $\vec{v} = \vec{v}_p$ ,  $\gamma_p$ , čas, délka

Princip: Biot-Savartův zákon, nukleární magnetická rezonance: precese, nutace

Realizace: vypočitatelná cívka, NMR spektroskopie

Rel. nejistota: od 2 nT pro 2 mT, 1 A

$< 0,6 \text{ mT}$ :

Bakerův solenoid

$$B = K_B \cdot I$$

$0,02 \text{ T} - 2 \text{ T}$ :

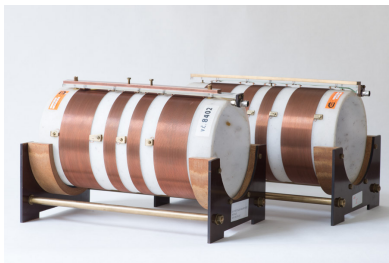
NMR precese ve vzorku vody.

$$B = 2\pi f_p / \gamma'_p$$

$$\gamma_p = 2,675\,221\,900(18) \times 10^8 \text{ s}^{-1} \cdot \text{T}^{-1} \text{ (CODATA 2014)}$$

$0,1 \text{ mT} - 200 \text{ mT}$ :

NMR nutace v tekoucí vodě. Magnetování a indukce rezonance jsou prostorově oddělené.



Cívky Barkerova typu, ČMI

# $\Phi$ , magnetický tok

Jednotka: Wb ( $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-1}$ )

Návaznost na:  $\sim I$ , délka

Princip: vypočítatelná cívka

Realizace: Campbellova cívka

Rel. nejistota: od  $1 \mu\text{Wb} \cdot \text{A}^{-1}$  pro  $10 \text{mWb} \cdot \text{A}^{-1}$

Měření přesných rozměrů cívky

$$\Phi = B \cdot S$$

Druhý způsob: cívky s dvojitým vinutím,  
tedy etalony vzájemné indukčnosti

→ návaznost na impedanci.



Cívkové etalony magnetického toku, ČMI

# $\Gamma$ , činitel odrazu

Jednotka:  $V \cdot V^{-1}$

Návaznost na:  $\mu$ ,  $\epsilon$ , délka, materiálové konstanty

Princip: VNA zakončený vypočitatelnou charakteristickou impedancí

Realizace: přesné vzduchové linky

Rel. nejistota: odraz od  $2 \times 10^{-3}$ , přenos od  $30 \times 10^{-6}$

Charakteristická impedance zkratované linky vypočtena z rozměrů.

Pro koax. vedení:

$$Z = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \ln\left(\frac{D}{d}\right)$$

Doopravdy numerické výpočty s trojrozměrným modelem linky

$$\Gamma = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} \quad (Z_0 \text{ je referenční imp., např. } 50 \Omega)$$

Parazitní jevy: skin efekt.



Etalonová vzduchová linka s konektory typu N



# $P$ , vysokofrekvenční výkon

Jednotka:  $W$  ( $kg \cdot m^2 \cdot s^{-3}$ )

Návaznost na:  $---$ ,  $\Gamma$ , teplota

Princip: vf. ohřev

Realizace: bolometr a kalorimetr

Rel. nejistota: od  $1,5 mW \cdot W^{-1}$

Odporový člen součástí  
Wheatstonova můstku.  
Srovnání s ohřevem  $---$ .

Kalorimetr měří záření  
neabsorbované v bolometru.



Kalorimetr PTB WR-10 pro 75 GHz – 110 GHz

<https://www.ptb.de/cms/en/ptb/fachabteilungen/abt2/fb-22/ag-222/hf-leistung-222.html>

# $E$ , intenzita vf. pole

Jednotka:  $V \cdot m^{-1}$  ( $kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$ )

Návaznost na:  $P$ ,  $\Gamma$ , délka

Princip: vypočitatelné cely/komory

Realizace: přesné TEM cely, vlnovody, bezodrazové komory

do 250 MHz: pravoúhlá TEM cela, do  $140 V \cdot m^{-1}$

do 1 GHz: pravoúhlá TEM cela, do  $60 V \cdot m^{-1}$

300 MHz – 3 GHz: pyramidální TEM cela, do  $50 V \cdot m^{-1}$

1 GHz – 2,5 GHz: pravoúhlé vlnovody, do  $200 V \cdot m^{-1}$

1 GHz – 18 GHz: bezodrazová komora, do  $100 V \cdot m^{-1}$

# pravoúhlá TEM cela, ČMI



# bezodrazová komora, ČMI



