ČESKÝ METROLOGICKÝ INSTITUT

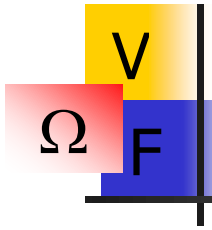
# NÁVAZNOST EL. VELIČIN OD PRIMÁRNÍCH ETALONŮ K DMM A KALIBRÁTORŮM

Ing. Jiří STREIT
Laboratoř primární etalonáže ss a nf el. veličin
ČMI OI Brno

# SOUSTAVA SI

- Základní jednotka – Ampér [ A ]
- Definice:

*„Ampér je stálý elektrický proud, který při průtoku dvěma rovnoběžnými přímými a nekonečně dlouhými vodiči, zanedbatelného kruhového průřezu, umístěnými ve vakuu ve vzájemné vzdálenosti 1 m, vyvolá mezi nimi sílu $2*10^{-7}$ newtonu na metr délky."*




# REALIZACE AMPÉRU

- Pomocí Ohmova zákona $I = U/R$

$$[A] = [V]/[\Omega]$$

- SET (single electron tunneling)

$$[A] = [C]/[s]$$

- Nabíjení známé kapacity $I = C \cdot dU/dt$

$$[A] = [F] \cdot [V]/[s]$$

# REALIZACE VOLTU

- Pomocí Josephsonova jevu

$$V = n \cdot f \cdot h/2 \cdot e = n \cdot f / \mathrm{K_J}$$

$$K_{J\text{-}90} = 2 \cdot e / h = 483\ 597{,}9\ \mathrm{GHz\ V^{-1}}$$

$$h = 6{,}626\ 068\ 960\ 83 \times 10^{-34}\ \mathrm{J\ s}$$

$$e = 1{,}602\ 176\ 487\ 186 \times 10^{-19}\ \mathrm{C}$$

$$K_J = 483\ 597{,}890\ 893\ \mathrm{GHz\ V^{-1}}$$

# REALIZACE OHMU

- Pomocí kvantového Hallova jevu

$R_H = h/ie^2 = R_K/i$

$R_{K\text{-}90} = h/e^2 = 25\,812{,}807\ \Omega$

$h = 6{,}626\,068\,960\,83 \times 10^{-34}\ \mathrm{J\,s}$

$e = 1{,}602\,176\,487\,186 \times 10^{-19}\ \mathrm{C}$

$R_K = 25\,812{,}807\,557\,4\ \Omega$

# REALIZACE FARADU

- Pomocí vypočitatelné kapacity – Thompsonův Lampardův teorém

$\varepsilon_0 = (1/\mu_0 c^2)$ $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ N $A^{-2}$

- Porovnáním impedance se známou hodnotou R z QHE např. pomocí kvadraturního mostu
- Pomocí SET

# REALIZACE V ČMI

- ss napětí – státní etalon 10 V a 1.018 V

JVS + sada zenerových referencí

- ss odpor – státní etalon 1 Ω a 10 kΩ

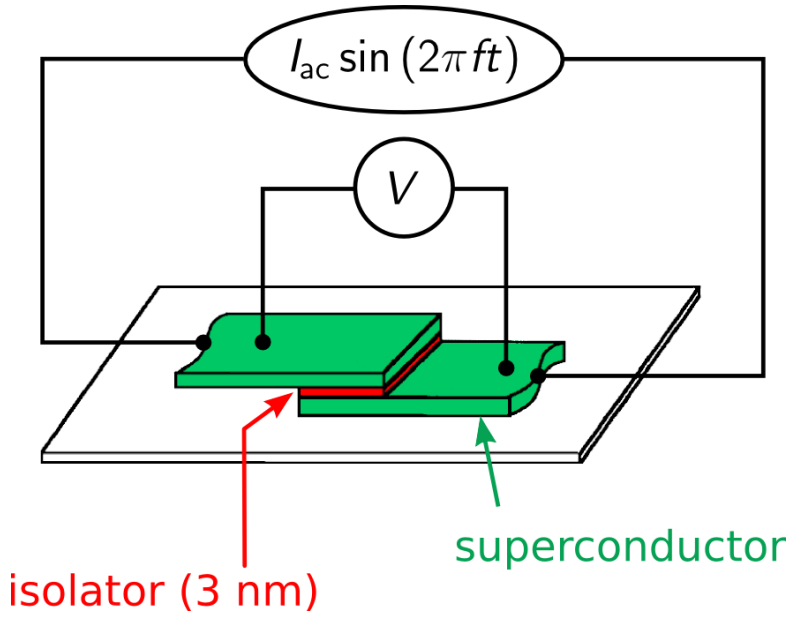
QHE + CCC + etalonové odpory

- kapacita – státní etalon 10 pF a 100 pF

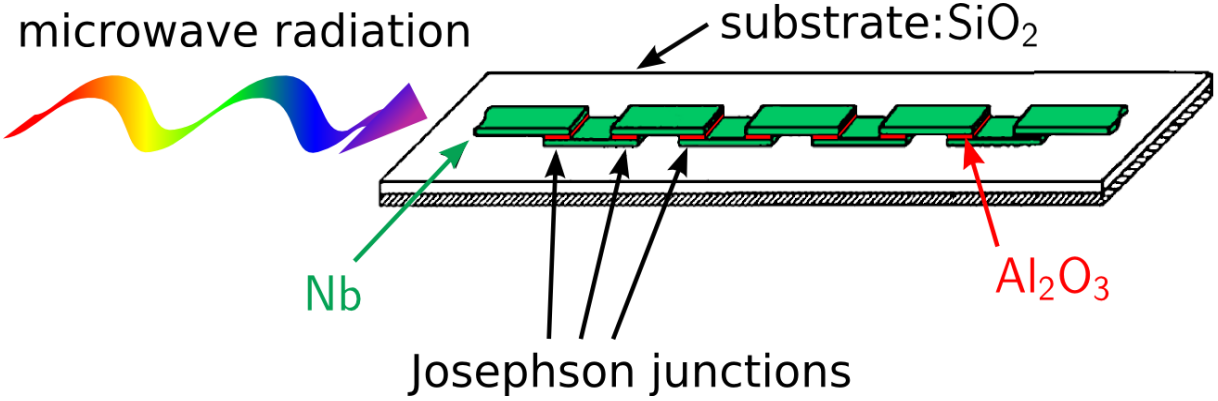
sada křemenných kondenzátorů – návaznost na BIPM

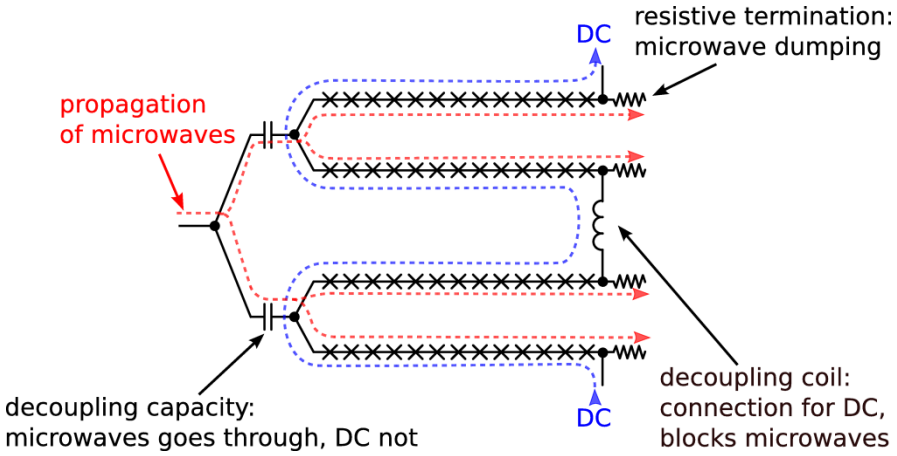
# STEJNOSMĚRNÉ NAPĚTÍ - JVS

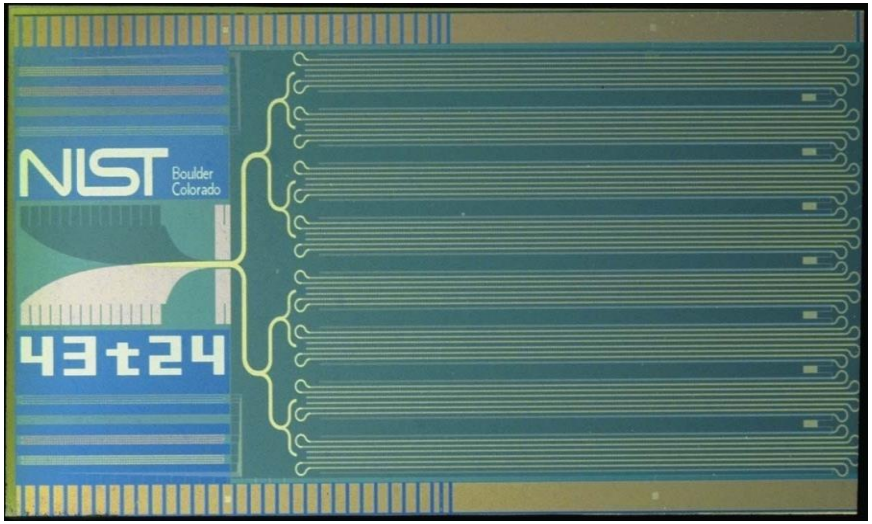
- B. Josephson 1962
- $V = nhf/2e = Nf/K_J$
- $K_J = 2e/h$
- $K_J = 483597{,}9\ \mathrm{GHz/V}$



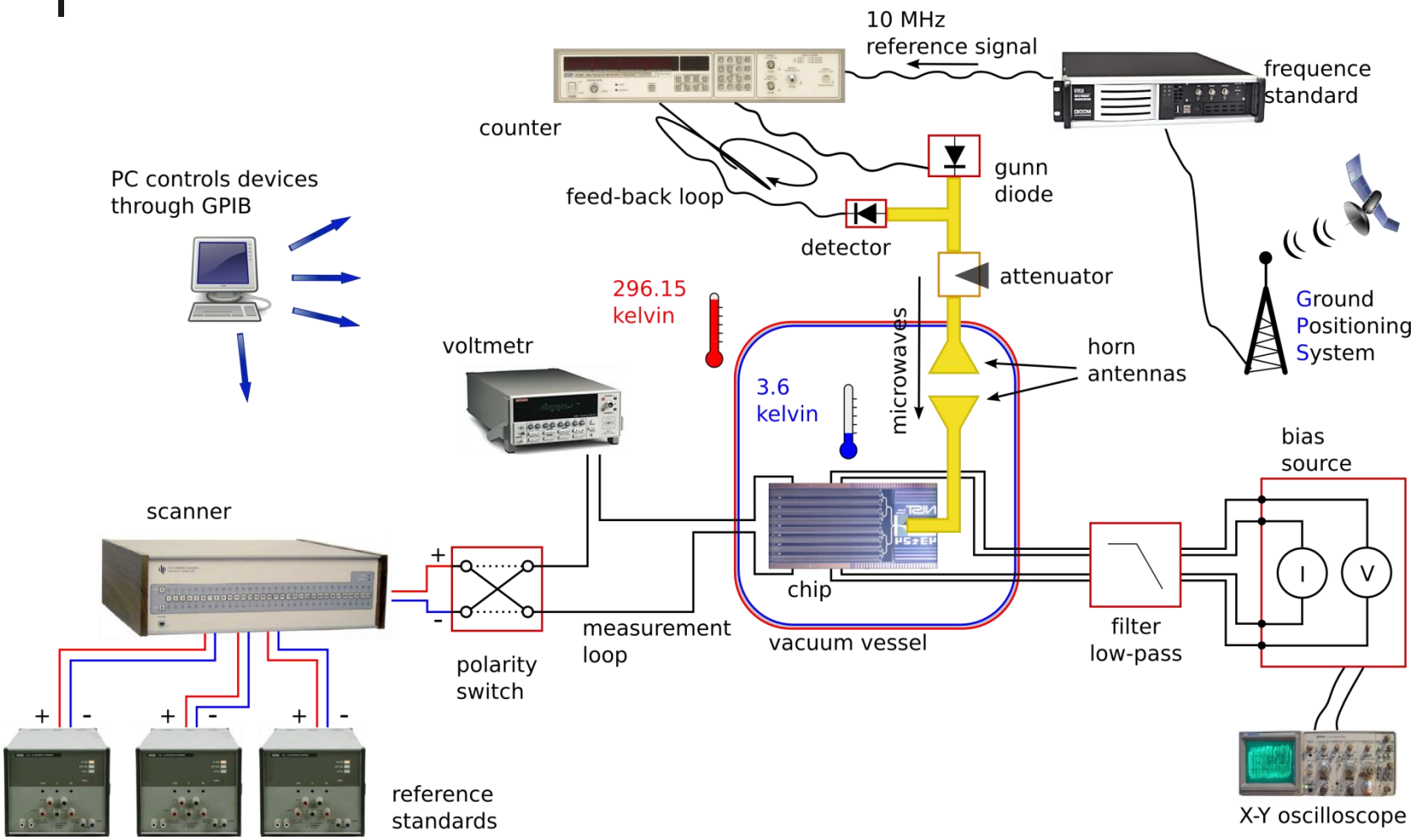
# STEJNOSMĚRNÉ NAPĚTÍ - JVS



# STEJNOSMĚRNÉ NAPĚTÍ - JVS

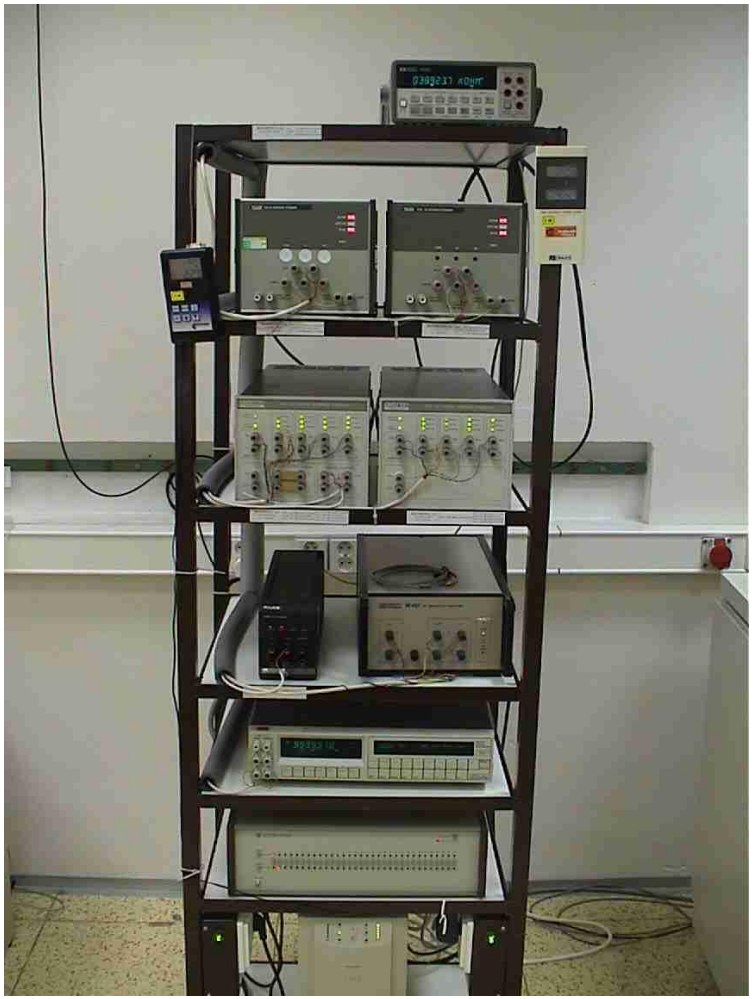


# STEJNOSMĚRNÉ NAPĚTÍ - JVS

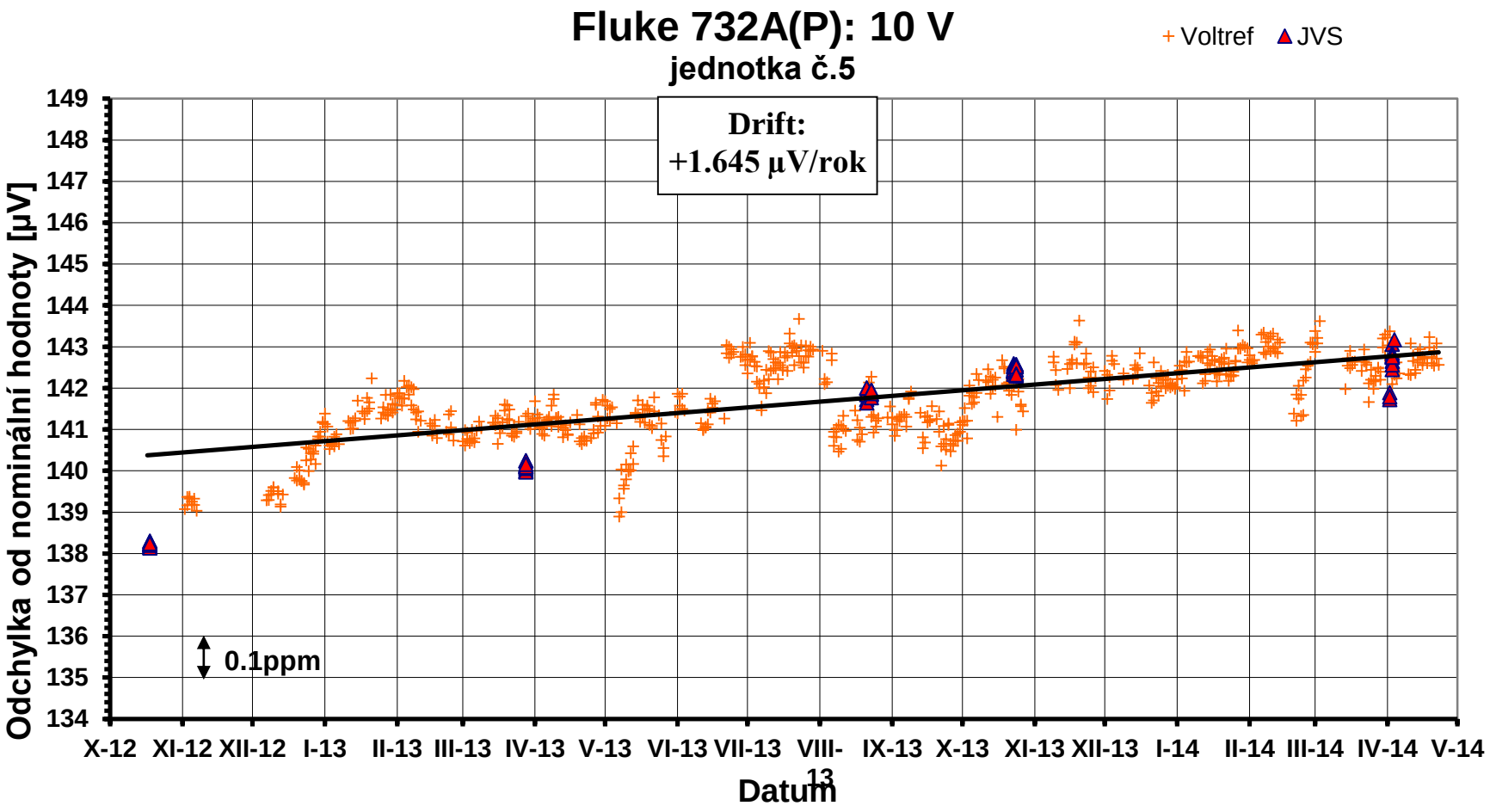
- Rozsah -11 V ÷ +11 V
- Nejistota 1E-8
- Návaznost: primární etalon, jen porovnání s jinými etalony
- Přímé porovnání s etalonem BIPM na 10 V
  ($U_{CMI}$ - $U_{BIPM}$) = 9,6x10$^{-9}$ V
  $U$ = 10,3 × 10$^{-9}$ V

# STEJNOSMĚRNÉ NAPĚTÍ - jednotka

- Skupina Zenerových referencí
- Nejistota pro 10 V: ±1.5 μV (1.5E-7)
- Nejistota pro 1.018 V: ± 1.5 μV (1.5E-6)
- Návaznost na JVS



# ZENEROVA REFERENCE



# STEJNOSMĚRNÉ NAPĚTÍ - stupnice

- Rozsah 1 mV až 1100 V
- Pasivní odporové děliče
- Fluke 732A
- Fluke 720A
- Datron 4002S
- Přesnost ~$10^{-6}$

# STEJNOSMĚRNÉ NAPĚTÍ - stupnice

- Rozsah 1 mV až 1100 V
- Binární dělič R/2R - autokalibrace
- Fluke 732A – zdroj ref. napětí
- Automatizované měření
- Přesnost $<10^{-6}$

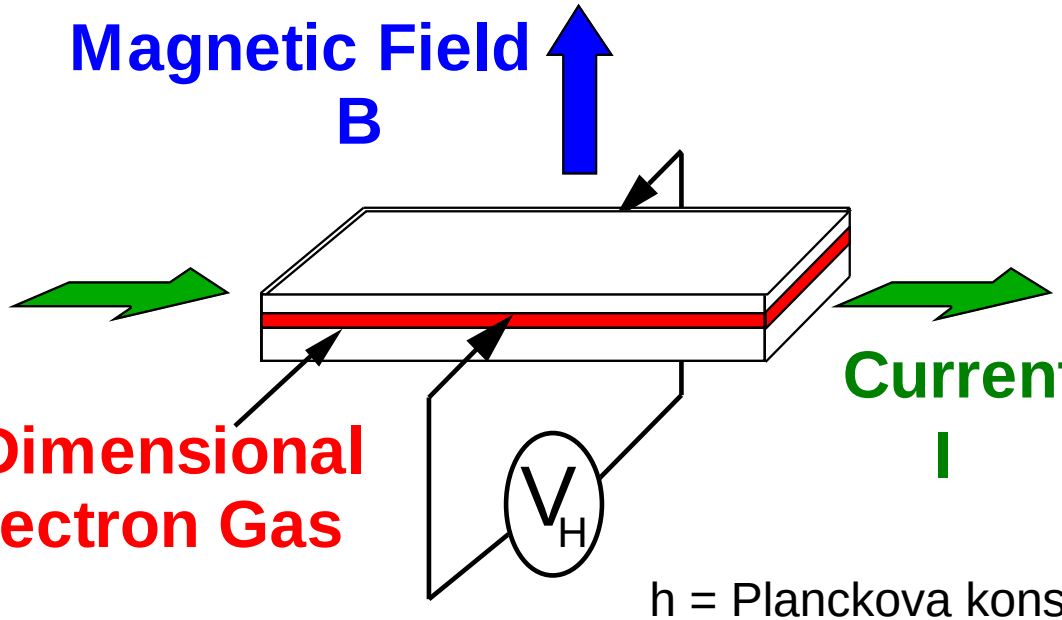
# STEJNOSMĚRNÝ ODPOR - jednotka

- Velmi stabilní etalonové odpory
- Nejistota pro 1 Ω: ±32 nΩ (3.2E-8)
- Nejistota pro 10 kΩ: ± 0.32 mΩ (3.2E-8)
- Návaznost na primární QHE (Kvantový Hallův jev)

# STEJNOSMĚRNÝ ODPOR - jednotka

Kvantový Hallův odpor

Klaus Von Klitzing




h = Planckova konstanta
e = náboj elektronu
i = celé číslo

$$R = V / I = h / i\,e^2$$

$$R_K = h / e^2 = 25812.807572 \text{ ohms}$$

# STEJNOSMĚRNÝ ODPOR - stupnice

- Rozsah 0.1 mΩ až 100 TΩ
- Přesné odporové mosty
- Přesnost $10^{-7}$ až $10^{-2}$

# STEJNOSMĚRNÝ PROUD

- Rozsah 100 μA až 10 A
- Odvození pomocí sady přesných etalonových odporů a ss etalonového voltmetru
- Přesnost ~ $10^{-5}$

# STŘÍDAVÉ NAPĚTÍ

- Odvozuje se od ss napětí pomocí termočlánků

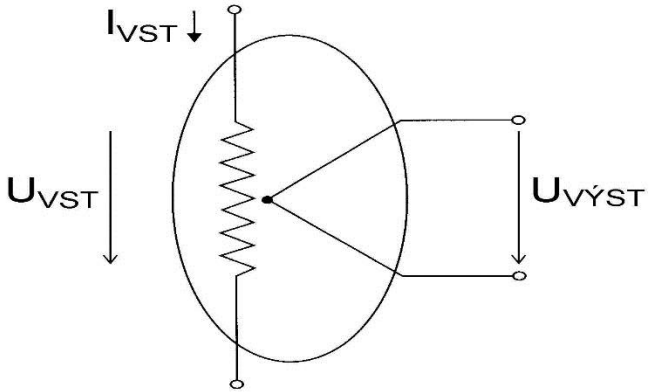
$$U_{AC} = U_{DC}( 1 + d(f) )$$

*d(f) je AC/DC diference termočlánku pro danou frekvenci*

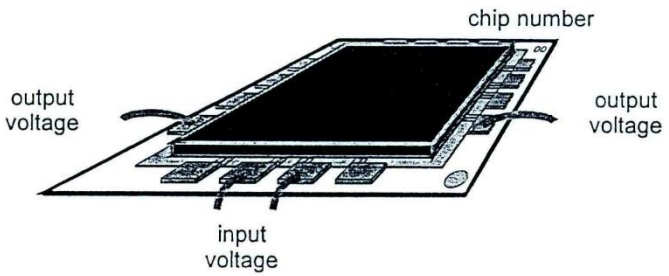
*f = 10 Hz až 1 MHz (100 MHz)*

# TERMOČLÁNKY – rozdělení

- Klasické jednoduché (SJTC)




- Planární mnohonásobné integrované (PMJTC)



# TERMOČLÁNKY

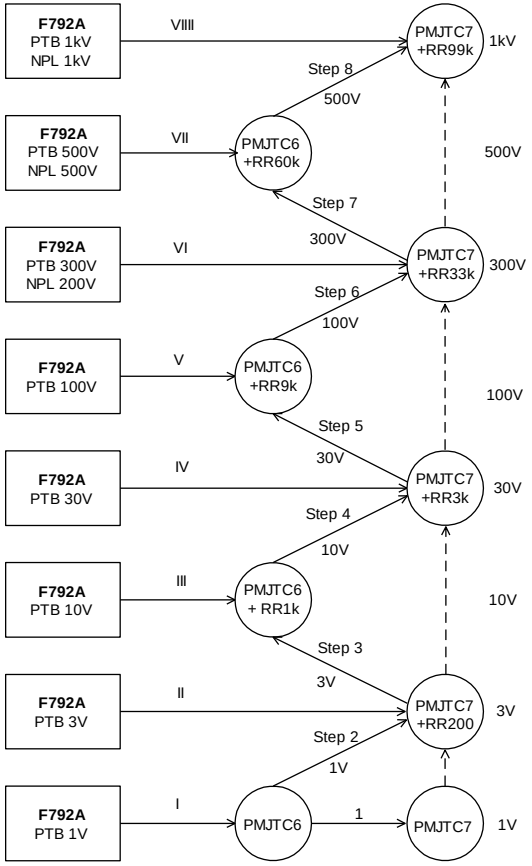
- Vstupní napětí je 1 V
- Vstupní proud je 10 mA (90 Ω), 5 mA (180 Ω)
- Výstupní napětí:

  ~7 mV (SJTC),

  ~100 mV (MJTC)
- f = 10 Hz až 100 MHz

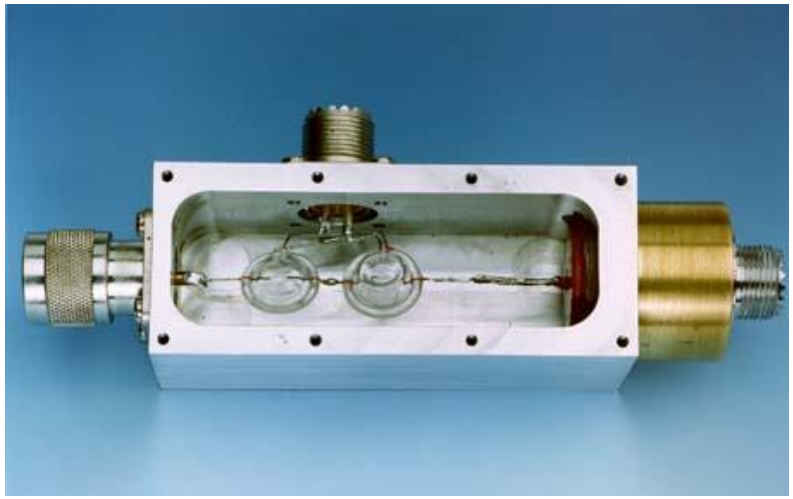
# VĚTŠÍ STŘÍDAVÁ NAPĚTÍ

- Rozsah 2 V až 1 kV
- Metodou „step up” pomocí rozsahových odporů



# MALÁ STŘÍDAVÁ NAPĚTÍ

- 1 mV až 500 mV,
  10 Hz až 1 MHz
- Pomocí mikropotenciometrů
- Pomocí indukčních děličů

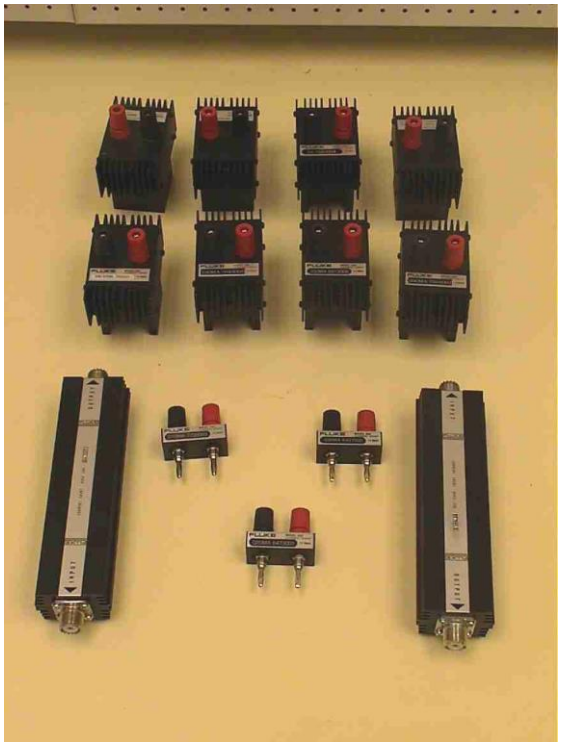


# STŘÍDAVÁ NAPĚTÍ - stupnice

- AC/DC Transfer Standard Fluke 792A
- Rozsah 2 mV až 1 kV
- f = 10 Hz až 1 MHz
- Kalibrovaný v NPL (Velká Británie)
- Přesnost $10^{-6}$ až $10^{-4}$

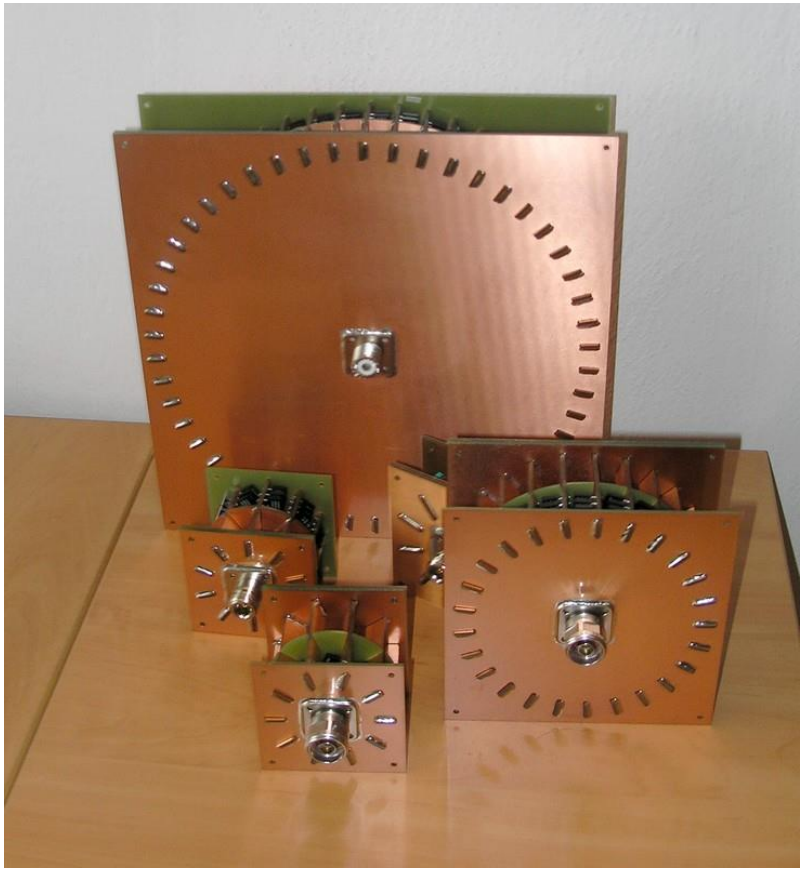
# STŘÍDAVÉ PROUDY

- Rozsah 10 mA až 10 A
- f =  10 Hz až 10 kHz
- AC/DC Transfer Standard Fluke 792A + proudové bočníky Fluke A40 a A40A
- Klecové bočníky ČMI
- Přesnost $10^{-5}$ až $10^{-4}$



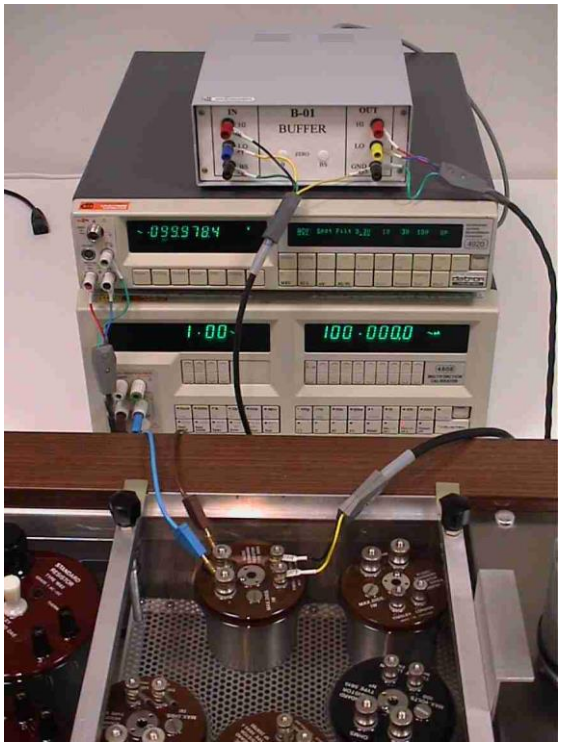
# STŘÍDAVÉ PROUDY

- Rozsah 10 mA až 100 A
- f = 10 Hz až 100 kHz
- Klecové bočníky ČMI
- Přesnost $10^{-6}$ až $10^{-5}$ pro AC-DC diferenci
- Fázová chyba v do desítek μrad – pro použití ve výkonu

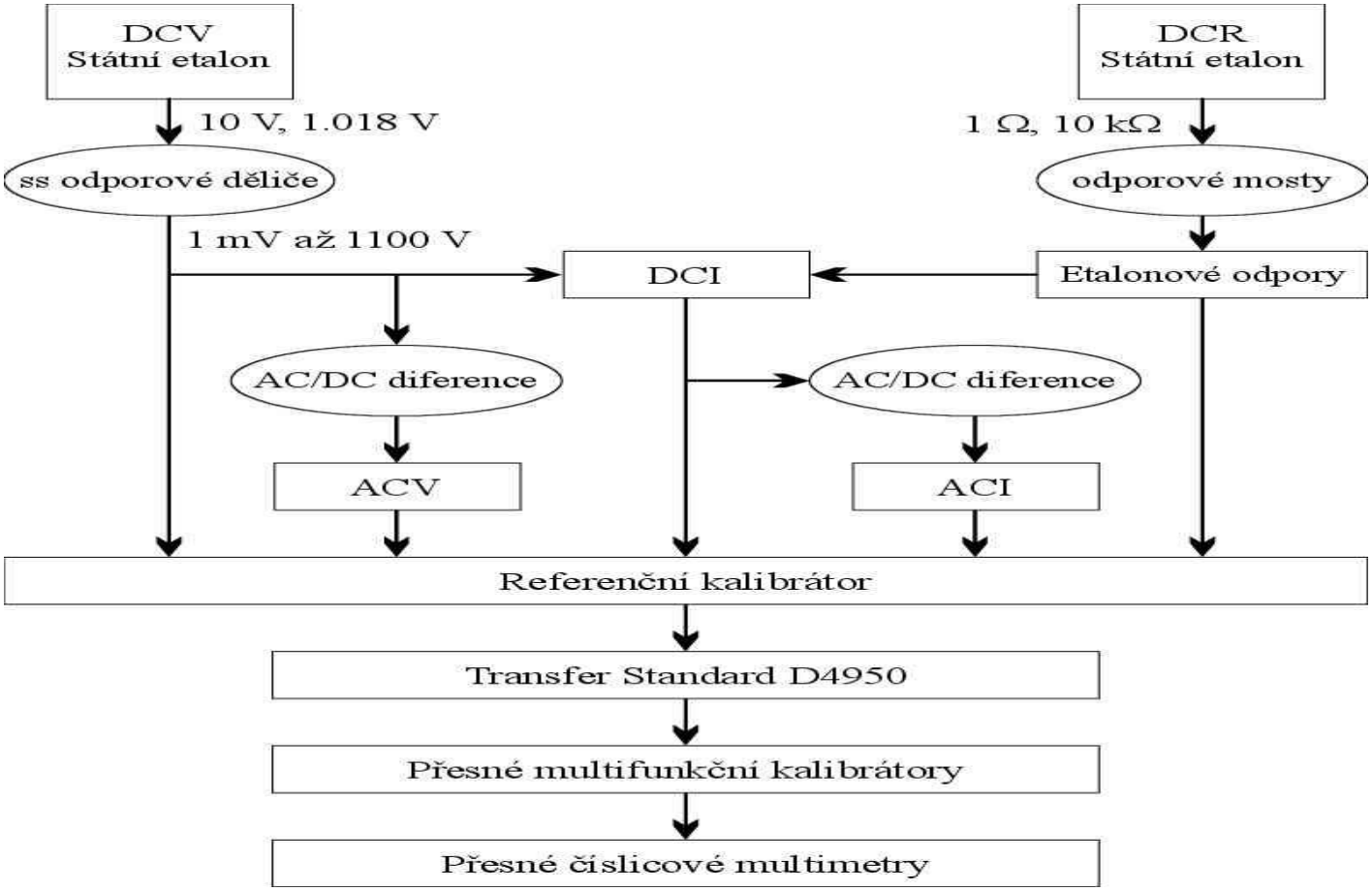


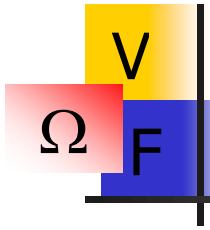
# STŘÍDAVÉ PROUDY–malé hodnoty

- 100 µA až 10 mA
- Kalibrace nepřímou metodou pomocí etalonových AC/DC odporů Tinsley a přesného střídavého odporu DATRON 4920



# NÁVAZNOST


DCV
Státní etalon
10 V, 1.018 V
ss odporové děliče
1 mV až 1100 V
DCR
Státní etalon
1 Ω, 10 kΩ
odporové mosty
Etalonové odpory
DCI
AC/DC diference
AC/DC diference
ACV
ACI
Referenční kalibrátor
Transfer Standard D4950
Přesné multifunkční kalibrátory
Přesné číslicové multimetry




# IMPEDANCE

- Kapacita 1 pF až 10 mF
- Střídavý odpor 1 mΩ až 10 MΩ
- Indukčnost 10 µH až 10 kH
- Ztrátový činitel 1E-6 až 1 pro C 1 pF až 1 nF
- f = 10 Hz až 1 MHz (10 MHz)

# KAPACITA - jednotka

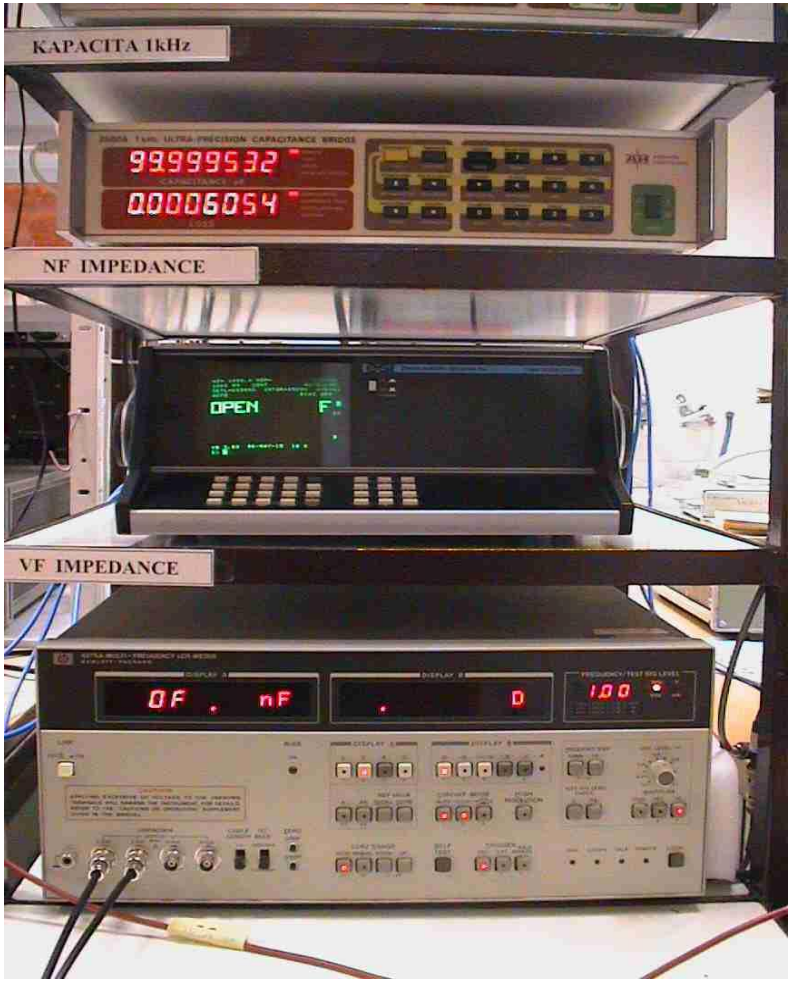
- 10 pF (TESLA)
- 100 pF (AH11)
- f = 1 kHz a 1592 Hz
- Přesnost ~$10^{-7}$

Návaznost na BIPM

# KAPACITA - stupnice

- AH 2500
- 1 pF až 1 μF
  f = 1 kHz

- Širokopásmové mosty
- až do 10 mF
- f = 10 Hz až 10 MHz



# STŘÍDAVÝ ODPOR

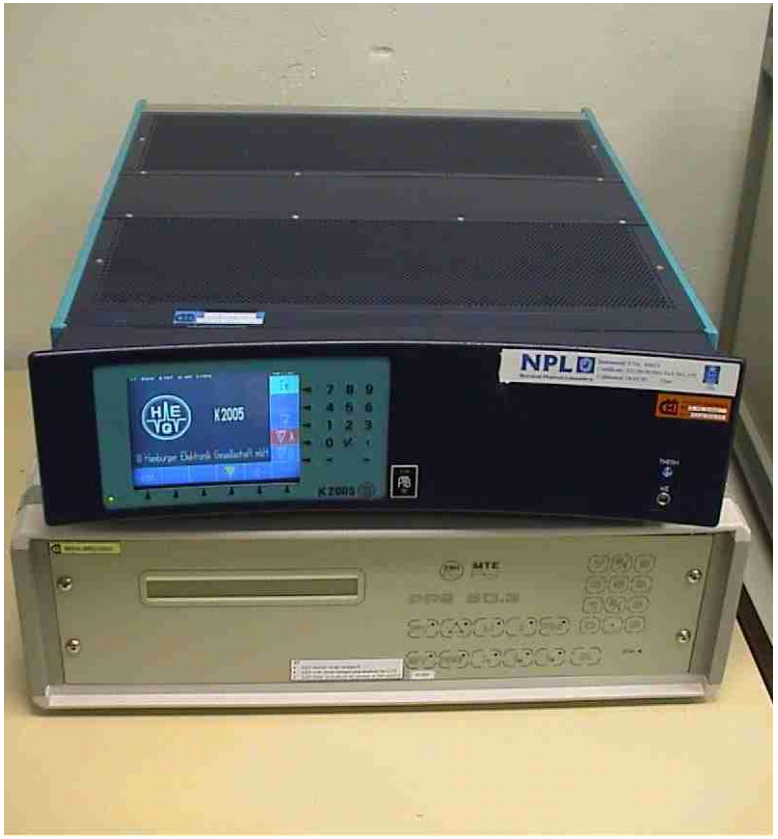
- Odpory s vypočitatelnou frekvenční charakteristikou 1 a 100 Ω, 1 a 10 kΩ
- Kalibrace VNIIM (Rusko)
- Přesnost ~$10^{-6}$

# INDUKČNOST

- Odvození rezonanční metodou
- Kalibrace pomocí RLC mostů
- Základní hodnota 10 mH a 100 mH z R a C pomocí Maxwell-Wienova mostu
- Přesnost ~$10^{-4}$

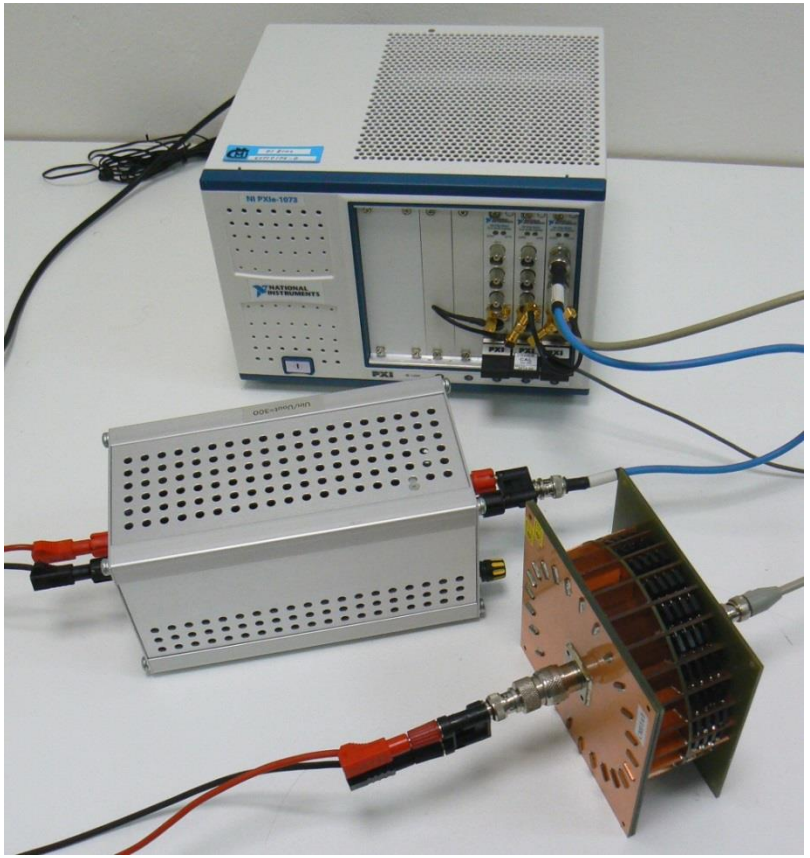
# ELEKTRICKÝ VÝKON A PRÁCE

- Státní etalon 1-fázového výkonu K2005
- 50 V až 300 V
- 50 mA až 100 A
- Účiník 0 až 1
- 45 Hz až 65 Hz
- Přesnost $8*10^{-5}$
- Návaznost PTB a NPL

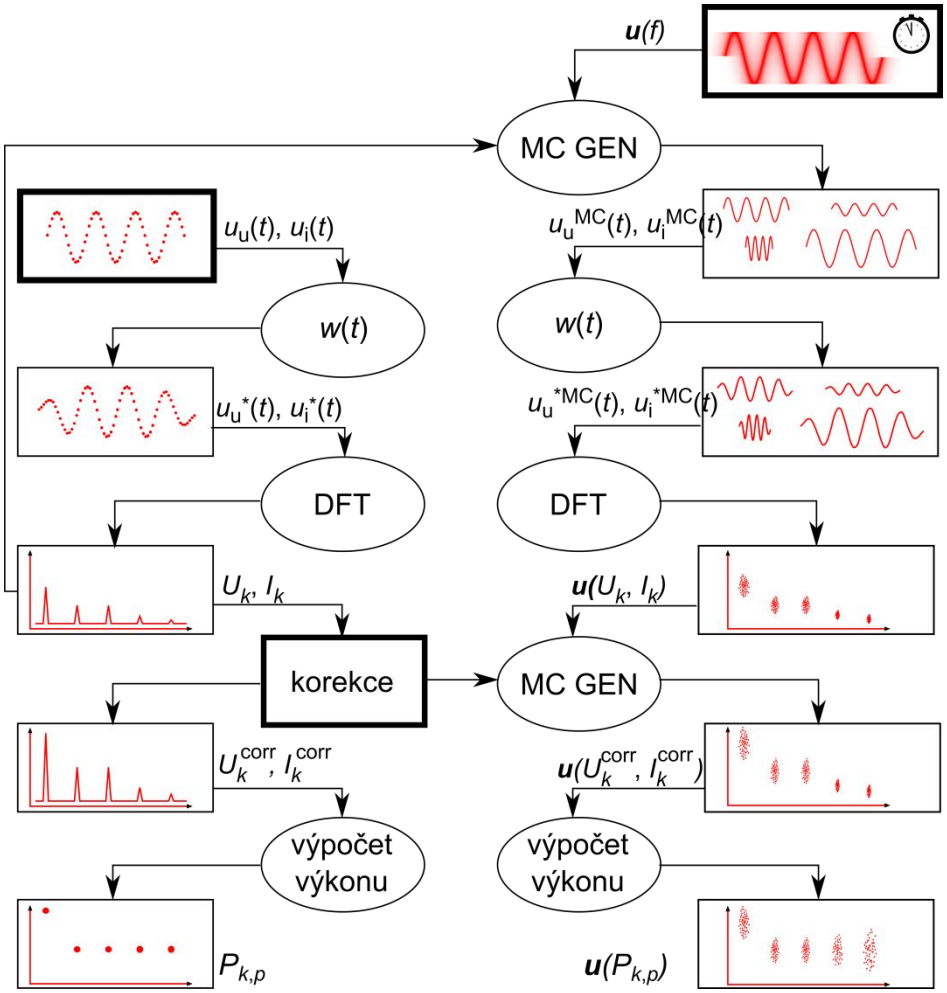


# ELEKTRICKÝ VÝKON A PRÁCE

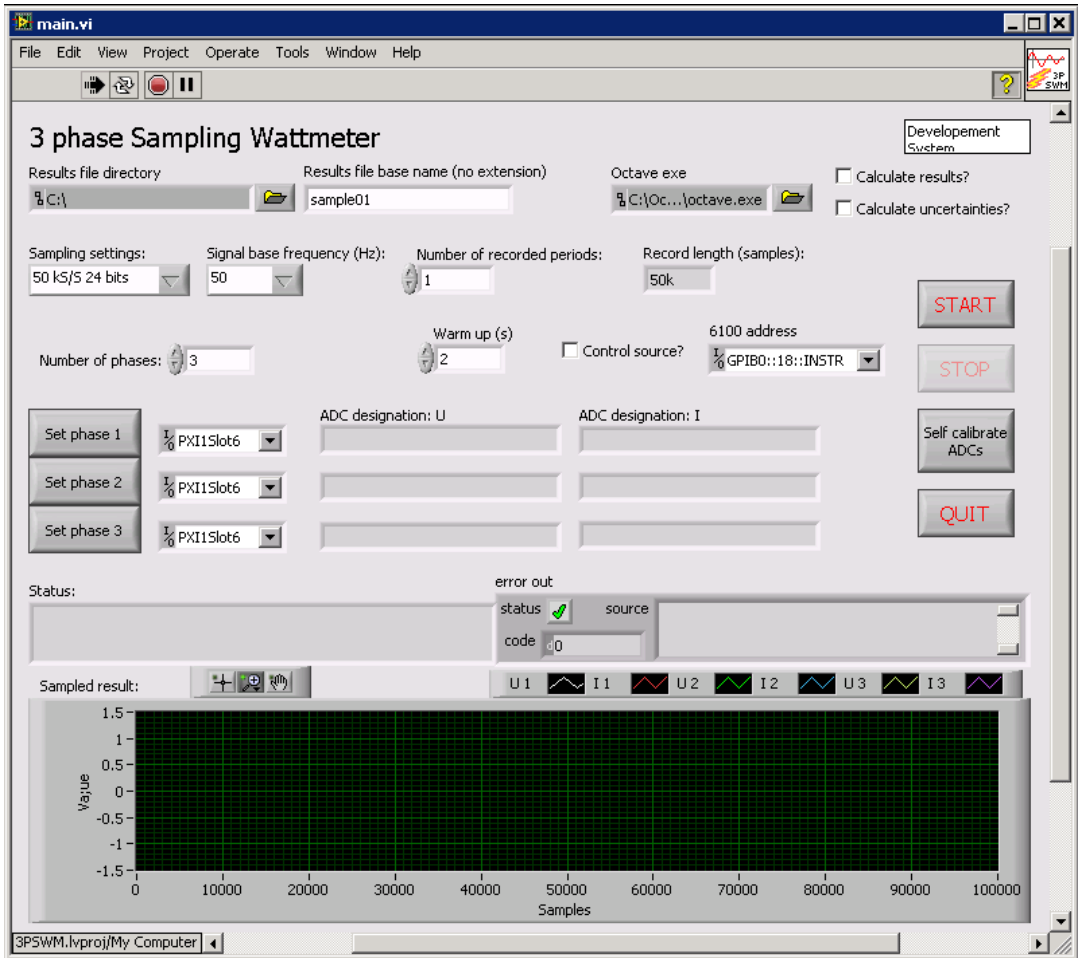
- měření 3-fázového výkonu pomocí vzorkovacích karet
- 1 V až 560 V
- 1 mA až 100 A
- Účiník 0 až 1
- 50 Hz až 10 kHz
- Přesnost $<10^{-5}$



# PRINCIP MĚŘENÍ



# POČÍTAČOVÉ MĚŘENÍ A ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ



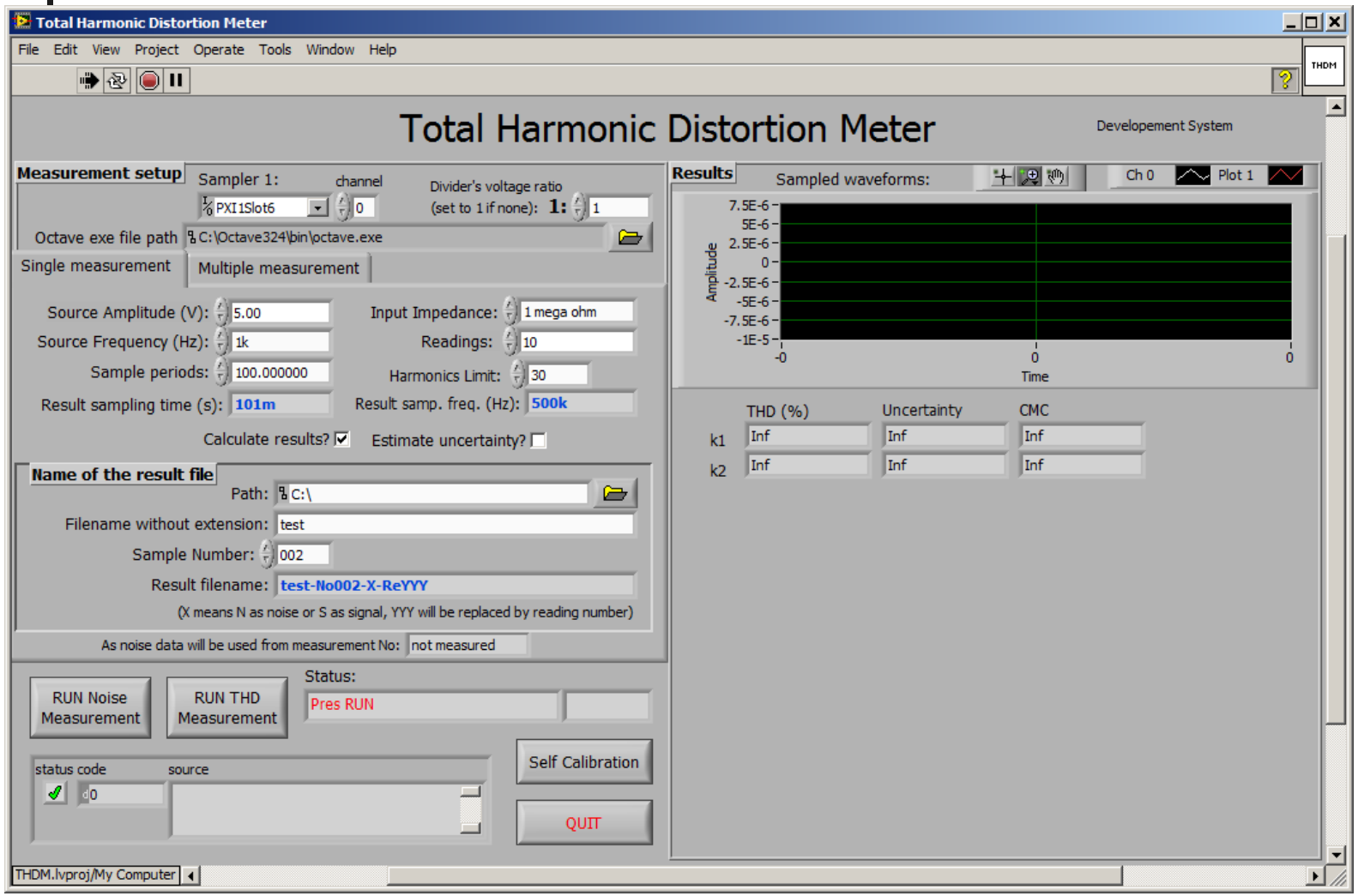
# ELEKTRICKÉ SIGNÁLY

- Harmonické zkreslení (THD)
- Fázový posuv

# Vzorkovací fázoměr

Využívá dvoukanálovou rychlou vzorkovací kartu a vstupní dělič napětí.

# Vzorkovací měřič THD



# KALIBROVANÁ MĚŘIDLA

- etalony napětí a poměru napětí
- AC/DC termokonvertory
- přesné číslicové multimetry (od 6 ½ místa a přesnější)
- přesné multifunkční kalibrátory
- měřiče a etalony elektrických prvků

# KALIBROVANÁ MĚŘIDLA

- RLCG mosty
- měřiče a kalibrátory výkonu
- etalonové elektroměry
- měřiče fázového posuvu
- měřiče nelineárního zkreslení a zkreslení generátorů
- Teploměrné mosty

# DĚKUJI ZA POZORNOST

WWW.CMI.CZ

http://kcdb.bipm.org/BIPM-KCDB/

jstreit@cmi.cz