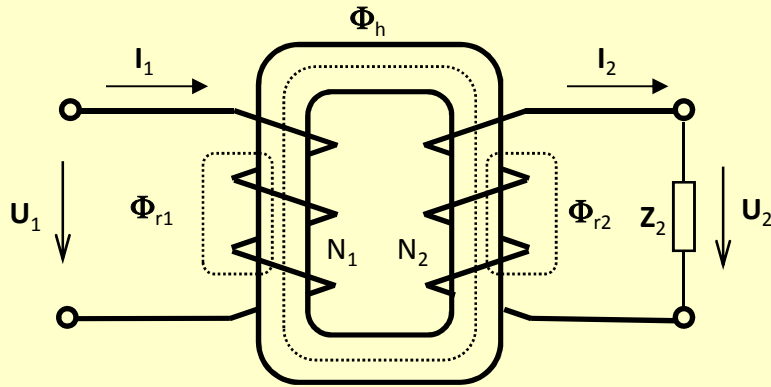
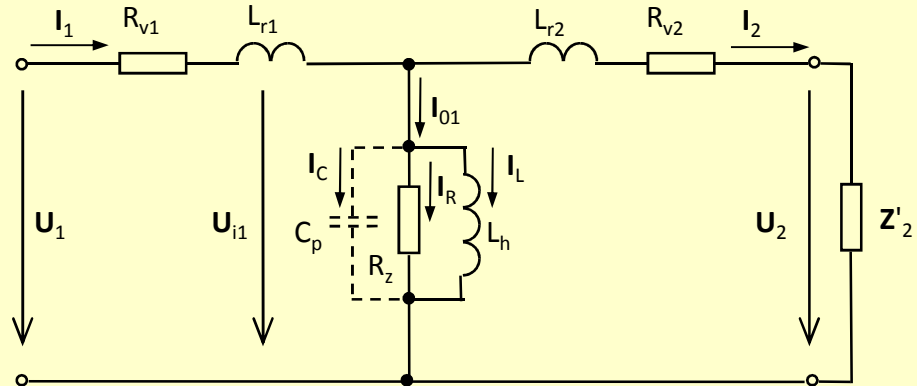


**METROLOGIE**  
**MĚŘICÍCH TRANSFORMÁTORŮ**  
**V ČMI LPM PRAHA**

## ZÁKLADNÍ USPOŘÁDÁNÍ MĚŘICÍHO TRANSFORMÁTORU



## NÁHRADNÍ OBVOD $N_1 = N_2$



**IDEÁLNÍ MT**  $\mu \rightarrow \infty$ ;  $G_{mh} \rightarrow \infty$ ; **IDEÁLNÍ MTP**  $\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = p_I$

**IDEÁLNÍ MTN**  $\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = p_U$

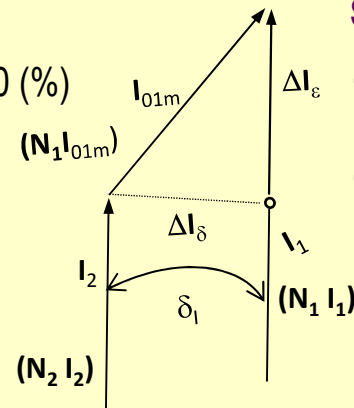
### SKUTEČNÝ MTP

**CHYBA PROUDU**  $\varepsilon_I = \frac{p_I I_2 - I_1}{I_1} \cdot 100 = \frac{\Delta I \varepsilon}{I_1} \cdot 100$  (%)

**CHYBA ÚHLU**  $\delta_I \doteq \text{tg } \delta_I = \frac{\Delta I \delta}{I_1}$  (rad)

### MAGNETICKÉ OBVODY MTP

- Toroidní jádra vinutá páskem z magneticky měkkého materiálu: Křemíkové oceli (2% Si)
- trafoker, trafoperm ( $\mu_4 = 2000$ ,  $B_{\max} = 1,7$  T)
- Permalloy Mumetal ( $\mu_4 = 20000$ ,  $B_{\max} = 0,7$  T)
- Ni (30-70)% Fe, Cu Co (žíhané)
- Nanokrystallické materiály na bázi železa
- ( $\mu_4 = 20000$ ,  $B_{\max} = 1,3$  T) (Fe Cu Nb Si B)



### SKUTEČNÝ MTN

**CHYBA NAPĚTÍ**  $\varepsilon_U = \frac{p_U U_2 - U_1}{U_1} \cdot 100 = \frac{\Delta U \varepsilon}{U_1} \cdot 100$  (%)

**CHYBA ÚHLU**  $\delta_U \doteq \text{tg } \delta = \frac{\Delta U \delta}{U_1}$  (rad)

### MAGNETICKÉ OBVODY MTN

Dělená C jádra z křemíkové oceli,  
U etalonových MTN skládané jádro z EI plechů

## POUŽITÍ A ZÁKLADNÍ PARAMETRY MĚŘICÍCH TRANSFORMÁTORŮ (MT)

**MĚŘICÍ TRANSFORMÁTORY PROUDU (MTP) A NAPĚTÍ (MTN) – stanovená měřidla, součást řetězce pro měření elektrické energie, výkonu, proudu a napětí v sítích 50 Hz**

### ZÁKLADNÍ PARAMETRY MTP

- převod  $p_I = I_1/I_2$
- typické hodnoty primárního proudu  $I_1$ : (10 - 12,5 - 15 - 20 - 25 - 30 - 40 - 50 - 60 – 75) A a jejich dekadické násobky
- jmenovité hodnoty sekundárního proudu: 1 A, (2 A), 5 A
- jmenovitý zdánlivý výkon: 2,5 VA pro  $\cos \varphi = 1$ ; (5 - 10 - 15 – 30) VA pro  $\cos \varphi = 0,8$
- MTP s rozšířenou zátěží musí vyhovovat tř. př. v rozsahu zátěží (1 - 15) VA,  $\cos \varphi = 1$
- třídy přesnosti: 0,1; 0,2; 0,5 – odpovídající **chyby proudu  $\epsilon_I$  a úhlu  $\delta_I$**  (5 až 120) % $I_N$
- třídy přesnosti: 0,2S; 0,5S – odpovídající **chyby proudu  $\epsilon_I$  a úhlu  $\delta_I$**  (1 až 120) % $I_N$

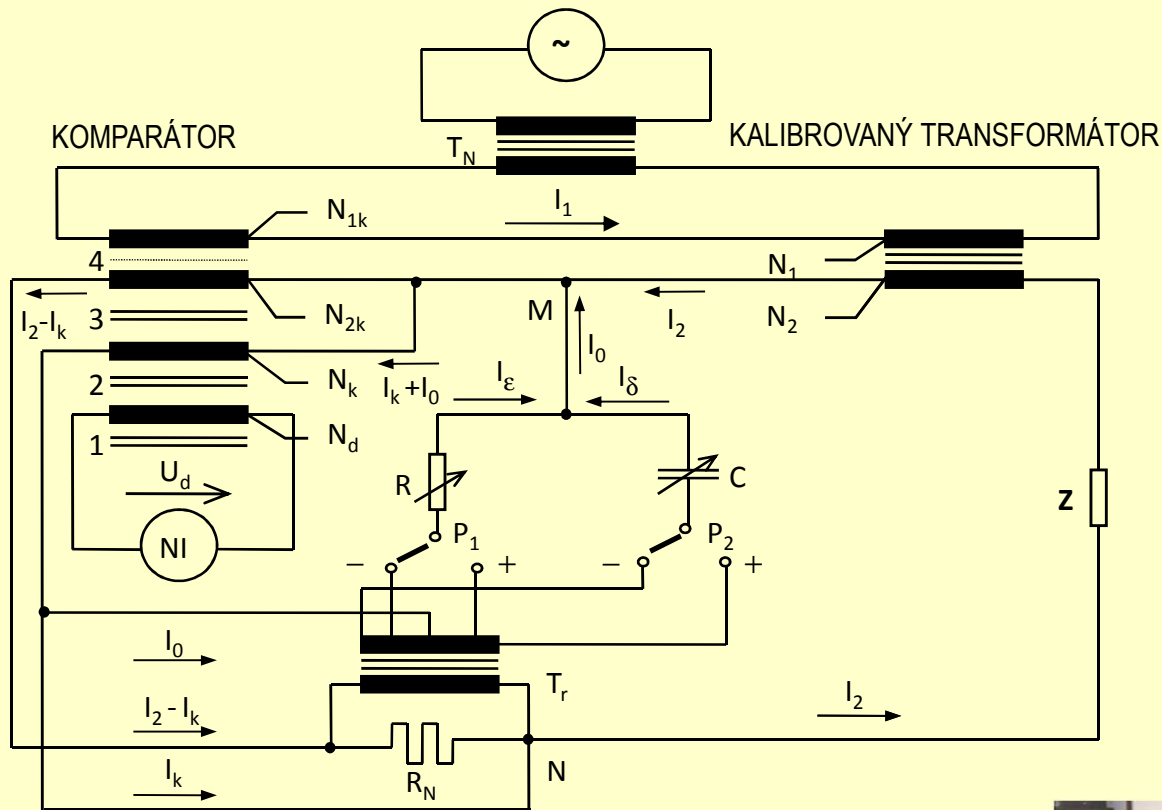


### ZÁKLADNÍ PARAMETRY MTN

- převod  $p_U = U_1/U_2$
- typické hodnoty primárního napětí  $U_1$ : dle rozvodné soustavy a napětí generátoru v rozsahu ( $3/\sqrt{3}$  – 400/ $\sqrt{3}$ ) kV
- jmenovité hodnoty sekundárního napětí: 100 V, 110 V, ( $100/\sqrt{3}$ ,  $110/\sqrt{3}$ ,  $100/3$ ,  $110/3$ ) V
- jmenovitý zdánlivý výkon: (1 - 2,5 – 5 – 10) VA pro  $\cos \varphi = 1$   
(10 – 25 – 50 – 100 ) VA pro  $\cos \varphi = 0,8$
- třídy přesnosti: 0,1; 0,2; 0,5 – odpovídající **chyby napětí  $\epsilon_U$  a úhlu  $\delta_U$**



## KALIBRACE MTP POMOCÍ KOMPENZOVANÉHO TOROIDNÍHO KOMPARÁTORU



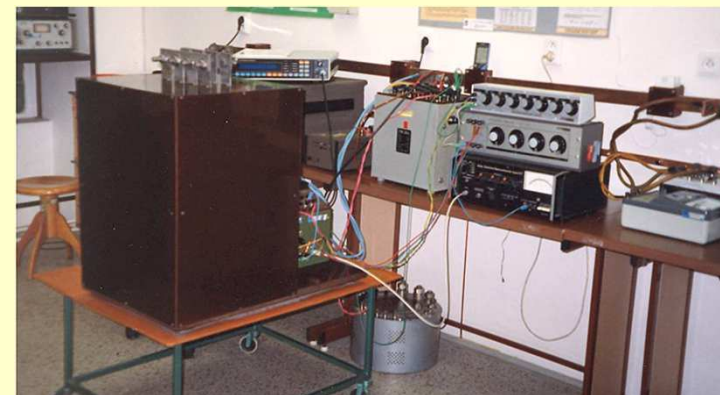
$$\varepsilon'_I = \pm R_N \frac{n_\varepsilon}{n_1} \frac{1}{R} 100 \quad (\%; \Omega; \Omega),$$

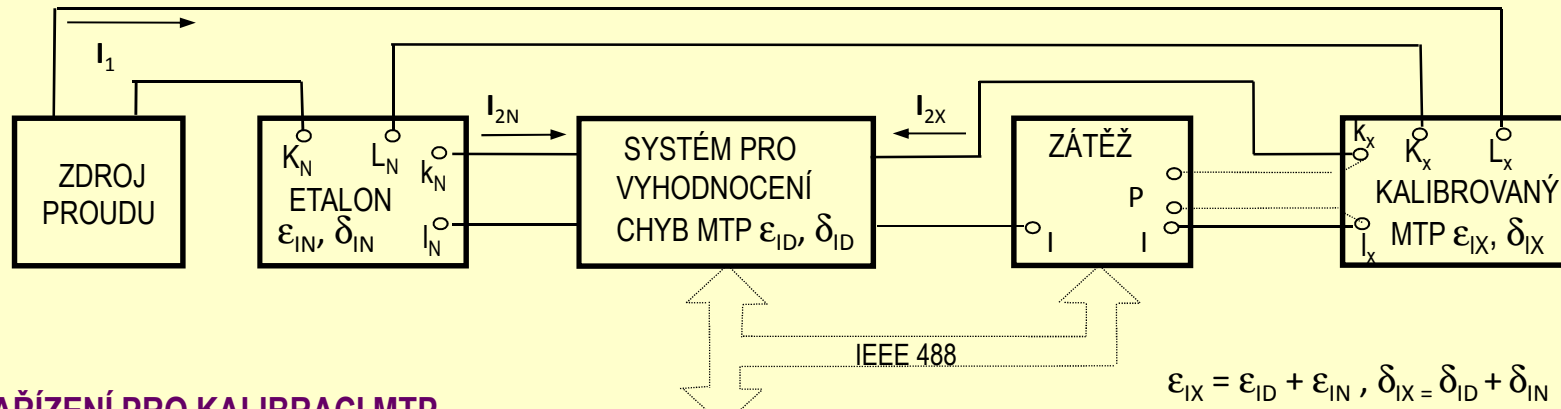
$$\delta'_I = \pm R_N \frac{n_\delta}{n_1} \omega C \quad (\text{rad}; \Omega; \text{rad}\cdot\text{s}^{-1}; \text{F})$$

ROZSAH PRIMÁRNÍCH PROUDŮ (0,5 až 1200)A/5A 34 PŘEVODŮ

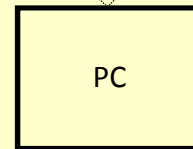
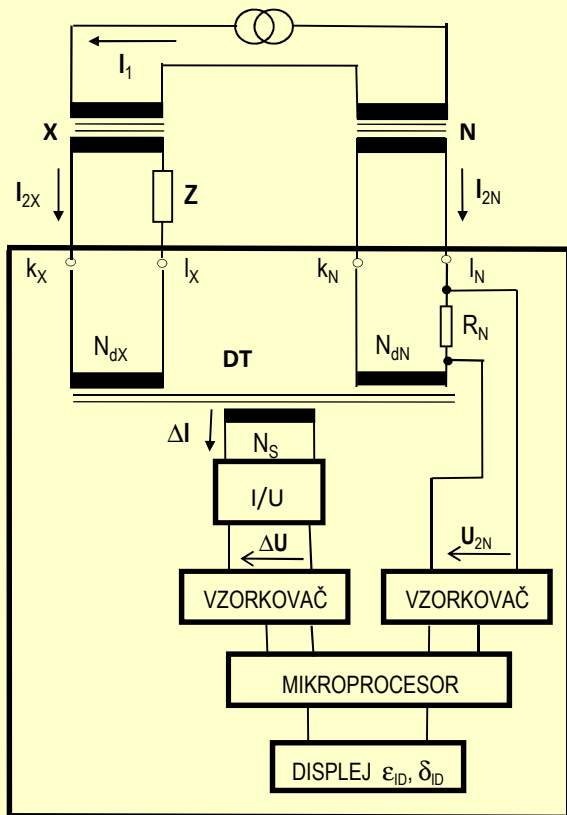
VLASTNÍ CHYBA KOMPARÁTORU : 0,5 ppm ; 0,0017 úhlové minuty

VÝVOJ A REALIZACE NA KATEDŘE MĚŘENÍ FEL ČVUT 1980





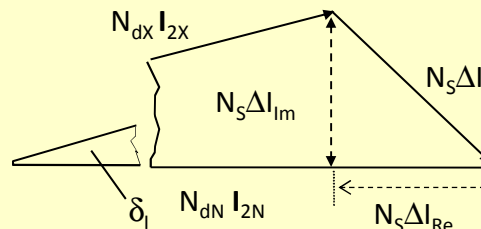
## SCHÉMA ZAŘÍZENÍ PRO KALIBRACI MTP



$$u_{\epsilon_{IX}} = \sqrt{u_{\epsilon_{ID}}^2 + u_{\epsilon_{IN}}^2}$$

$$u_{\delta_{IX}} = \sqrt{u_{\delta_{ID}}^2 + u_{\delta_{IN}}^2}$$

## FÁZOROVÝ DIAGRAM

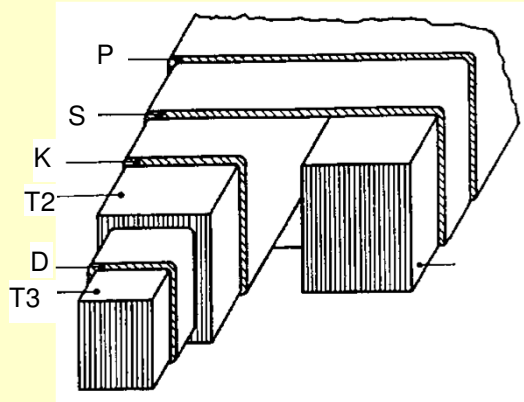


$$\epsilon_{ID} = \frac{N_S \Delta I_{Re}}{N_{dN} I_{2N}} = \frac{N_S \Delta U_{Re}}{R N_{dN} I_{2N}}$$

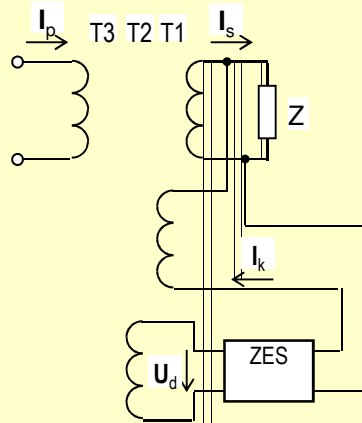
$$\delta_{ID} = \text{tg } \delta_{ID} = \frac{N_S \Delta U_{Im}}{R(N_{dN} I_{2N} - N_S \Delta I_{Re})}$$

# ETALONY POUŽÍVANÉ PŘI KALIBRACÍCH MĚŘICÍCH TRANSFORMÁTORŮ PROUDU

## ETALONOVÝ MTP S ELEKTRONICKOU KOMPENZACÍ CHYB

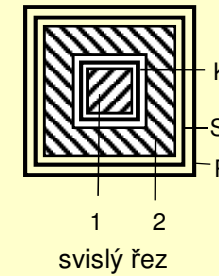


Uspořádání magnetického obvodu

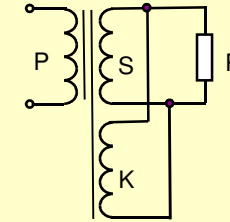


Elektrický náhradní obvod

## ETALONOVÝ MTP S POMOČNÝM BUZENÍM



svislý řez



zapojení vinutí



### Tettex 4764

Rozsah prim. proudu 5 A – 5 000 A  
Počet převodů 156  
Rozsah sek. proudu 1 A, 5 A  
Chyba 10 ppm; 0,05'

### Tettex 4761

Rozsah prim. proudu 1 A – 1 000 A  
Počet převodů 20  
Rozsah sek. proudu 1 A, 5 A  
Chyba 10 ppm; 0,05'

### MI 7020H

Rozsah prim. proudu 2 000 A  
Počet převodů 1 (1 000 : 1 nebo 2 000 : 1)  
Rozsah sek. proudu 1 A, 5 A  
Chyba 10 ppm; 10 μrad

### MI 7020H/4000

4 000 A  
Počet převodů 1 (1 000 : 1 nebo 2 000 : 1)  
Rozsah sek. proudu 1 A, 5 A  
Chyba 10 ppm; 10 μrad



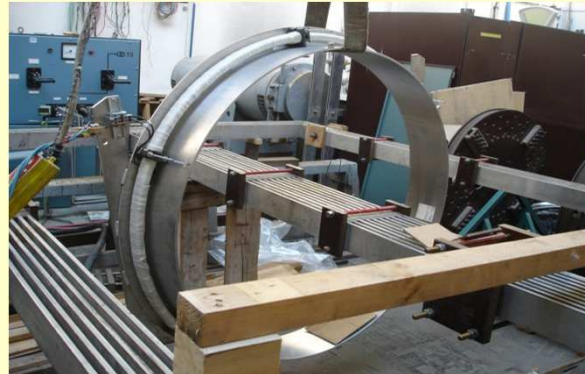
Kalibrace MTP 8 kA/5A systémem Tettex



Systém pro vyhodnocení chyb a zátěž Tettex

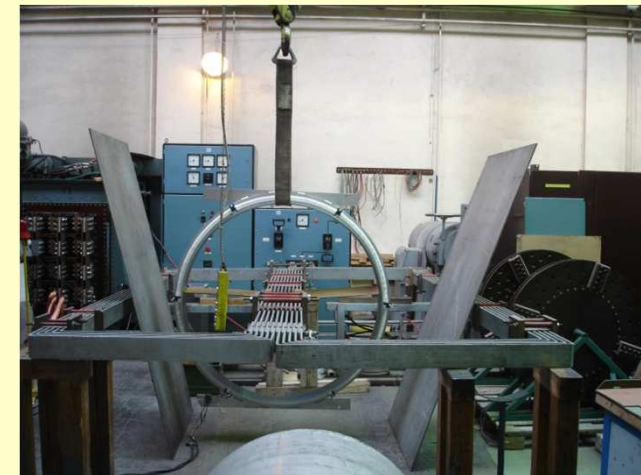


Primární proud 10 závitů 2 kA



Primární proud smyčkou  
10 závitů 2 kA

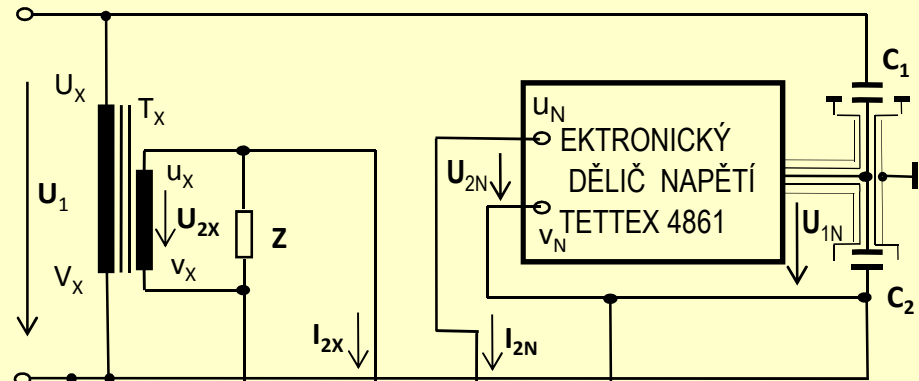
KALIBRACE MTP 20 kA/5A



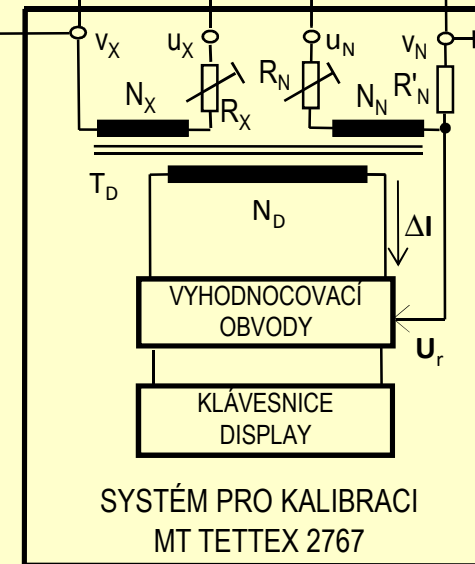
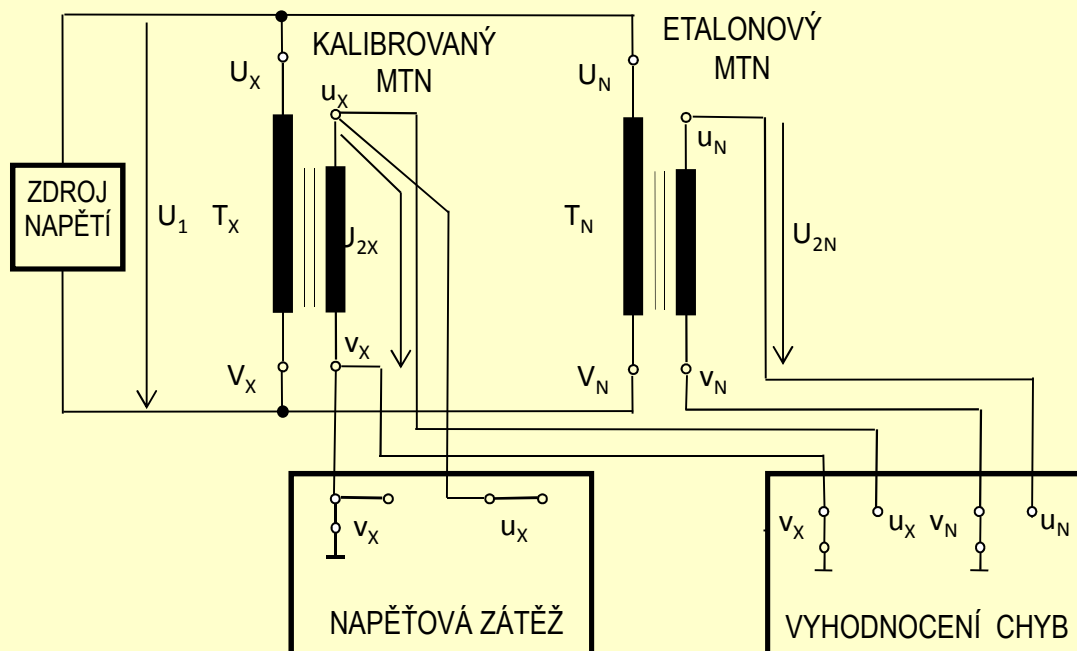
Stínění vlivu zpětných  
vodičů smyčky



## KALIBRACE MTN POMOCÍ KAPACITNÍHO DĚLIČE



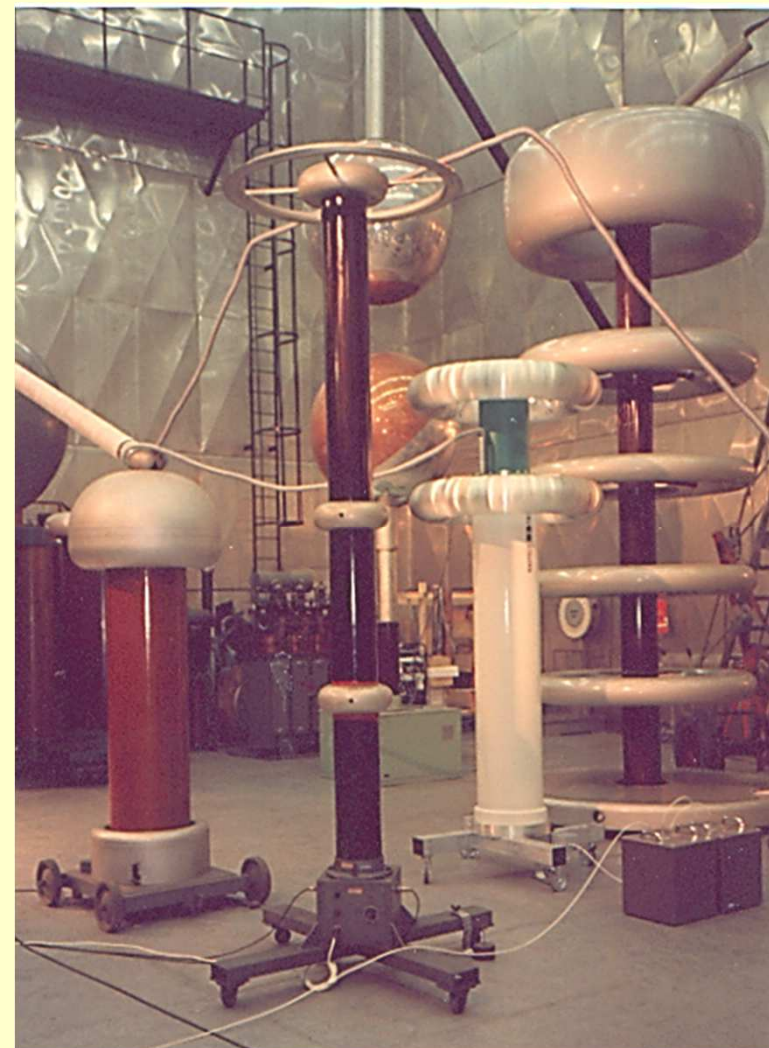
## ZAPOJENÍ PRO KALIBRACI MTN SROVNÁVACÍ METODOU



$$\epsilon_{UX} = \epsilon_{UD} + \epsilon_{UN}, \delta_{UX} = \delta_{UD} + \delta_{UN}$$



## KALIBRACE MĚŘICÍCH TRANSFORMÁTRŮ NAPĚTÍ

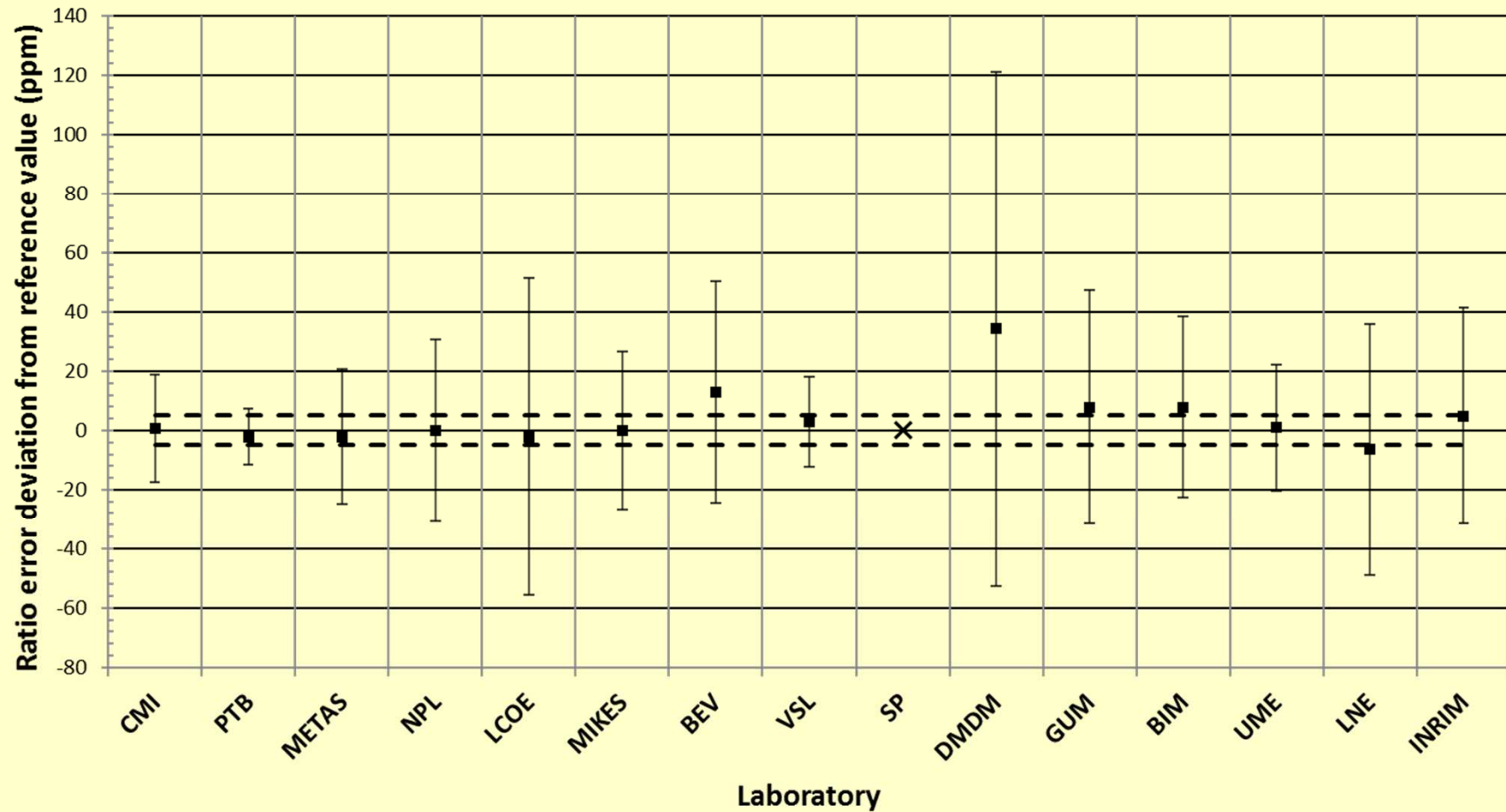


VN hala FEL ČVUT

# MEZINÁRODNÍ POROVNÁNÍ MTP DO 10 kA EURAMET 1187

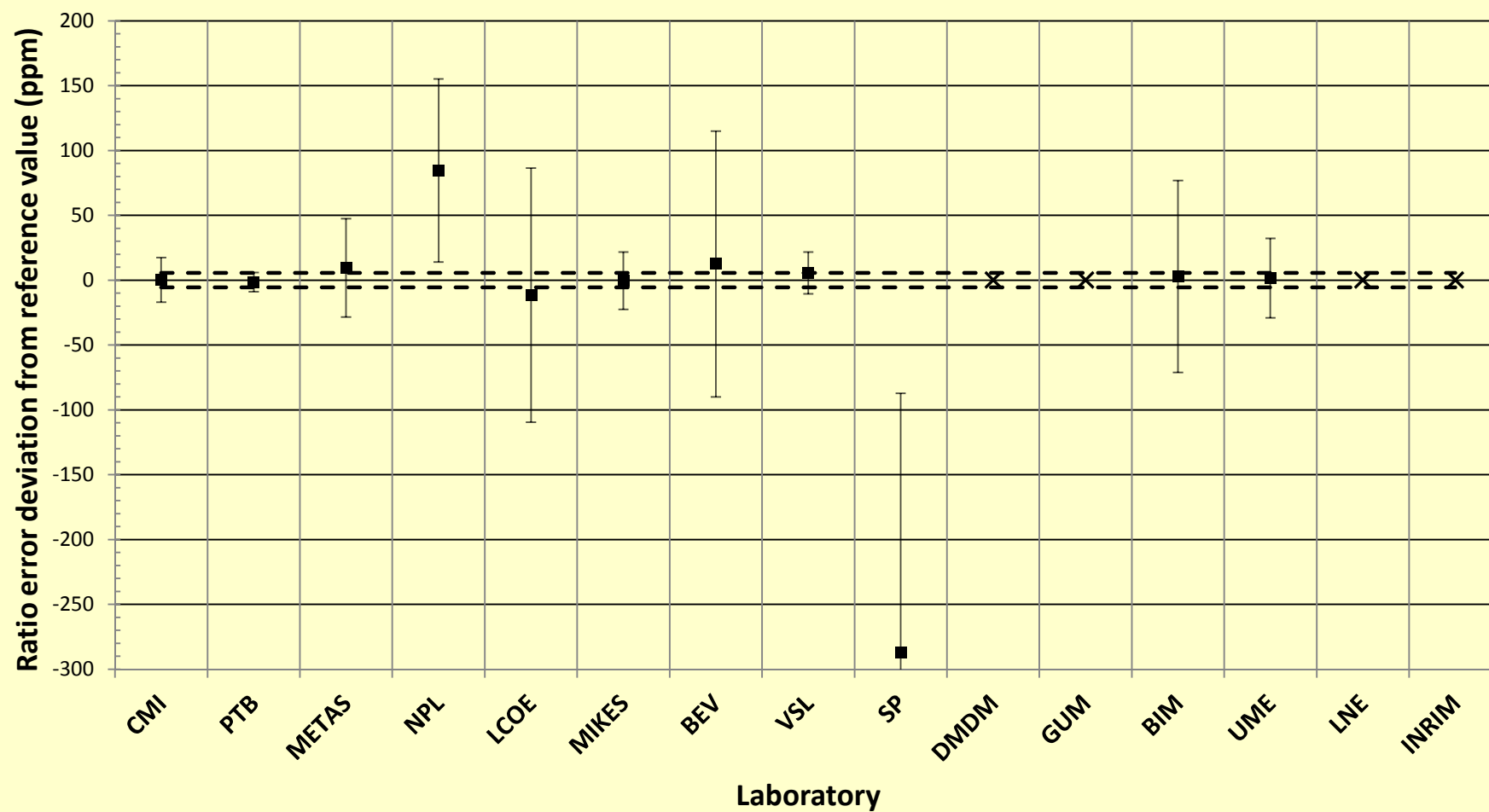
## Ratio error deviation from reference value

$k_1 = 10 \text{ kA}/5 \text{ A}, 50 \% I_N, 5 \text{ VA}$



# Ratio error deviation from reference value

$k_1 = 10 \text{ kA}/5 \text{ A}, 1 \% I_N, 5 \text{ VA}$





## PARAMETRY (CMC) PRO MĚŘICÍ TRANSFORMÁTORY A DC NAPĚTÍ A PROUD, C A tg $\delta$

### MĚŘICÍ TRANSFORMÁTORY PROUDU

PŘEVOD : (0,5 až 20 000)A/5A resp. 1A Rozsah chyby proudu (0 až 20)% nejistota (0,002 až 0,2) %  
chyby úhlu (0 až 20) crad nejistota (0,0032 až 0,2) crad  
(0 až 11)<sup>0</sup> nejistota (0,11 až 6,8) ´

### MĚŘICÍ TRANSFORMÁTORY NAPĚTÍ

PŘEVOD : (100 V/5V až 400 kV/250V) Rozsah chyby napětí (0 až 20)% nejistota (0,006 až 0,2) %  
chyby úhlu (0 až 20) crad nejistota (0,006 až 0,2) crad  
(0 až 11)<sup>0</sup> nejistota (0,2 až 6,8) ´

DC NAPĚTÍ : (1 až 100) kV : nejistota (0,035 až 0,058)%

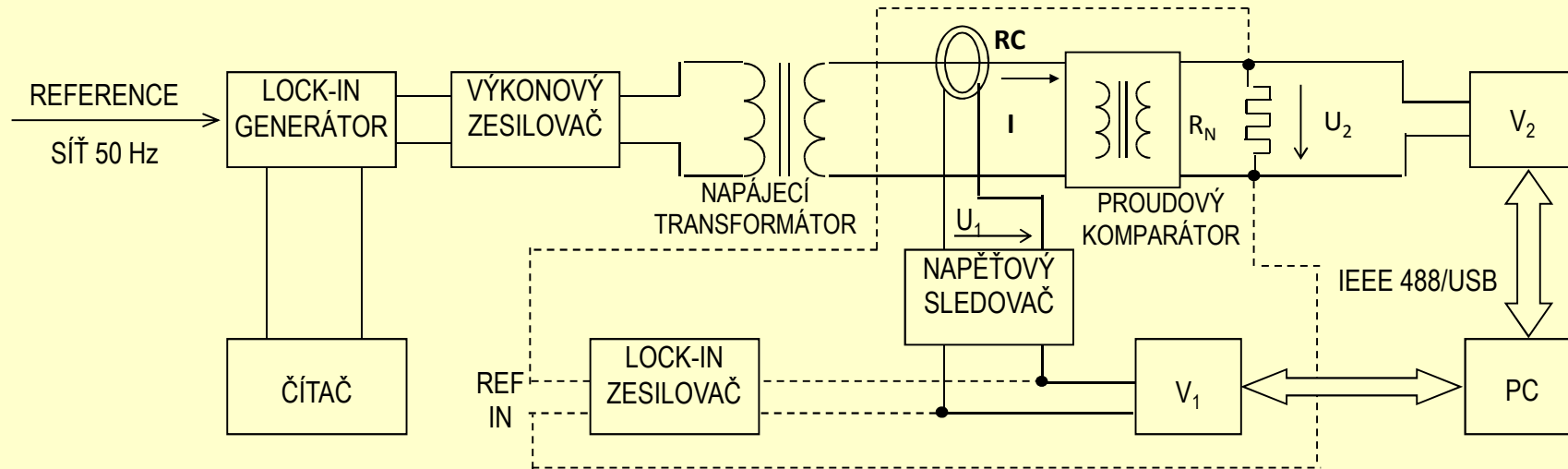
DC PROUD : (100 až 1000) A : nejistota 0,003 %

AC VN KAPACITY : napětí (0,1 až 400) kV, (10 až 10<sup>7</sup>) pF nejistota ( 0,01 až 0,23)%  
tg  $\delta$  : ( 10<sup>-5</sup> až 1) napětí do 400 kV nejistota ( 2,5. 10<sup>-5</sup> až 10<sup>-2</sup>)

ETALONY VN KAPACITY : (10 až 10 000) pF/2kV, 100 000 pF/1kV, 100 pF/100 kV, 50 pF/400 kV

ETALONY tg  $\delta$  : 0,1 až 5.10<sup>-5</sup>

ROGOWSKEHO CÍVKY : při 50 Hz do proudu 20 kA



**Konstanta RC:** 
$$K_{RC} = \frac{U_I}{I} \frac{50}{f} = \frac{U_I}{U_2} \frac{R_N}{p_1} \frac{50}{f}$$

Odchylka od 90° mezi měřeným proudem  $I$  a indukovaným napětím  $U_1$  představuje **chybu úhlu RC**.

**Nejistota  $K_{RC}$  typu B:** 
$$u_B(K_R) = \sqrt{\left(\frac{R_N}{U_2 p_1} u(U_1)\right)^2 + \left(\frac{U_1}{U_2 p_1} u(R_N)\right)^2 + \left(\frac{U_1 R_N}{U_2^2 p_1} u(U_2)\right)^2 + \left(\frac{U_1 R_N}{U_2^2 p_1^2} u(p_1)\right)^2}$$

**Nejistoty určení  $K_{RC}$**

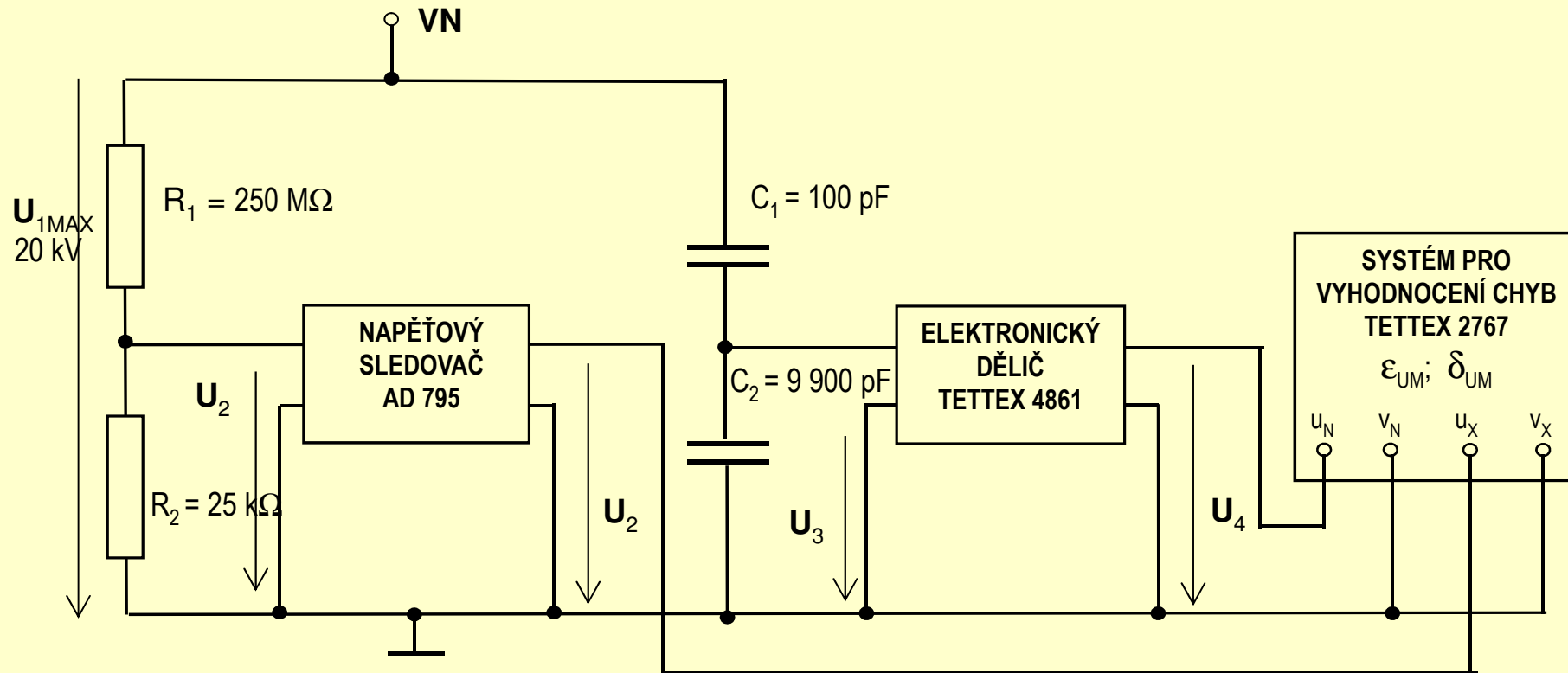
$u_{KRC} (B) = 0,061 \%$

$u_{KRC} (A) = 0,013 \%$

$u_{KRC} = 0,062 \%$

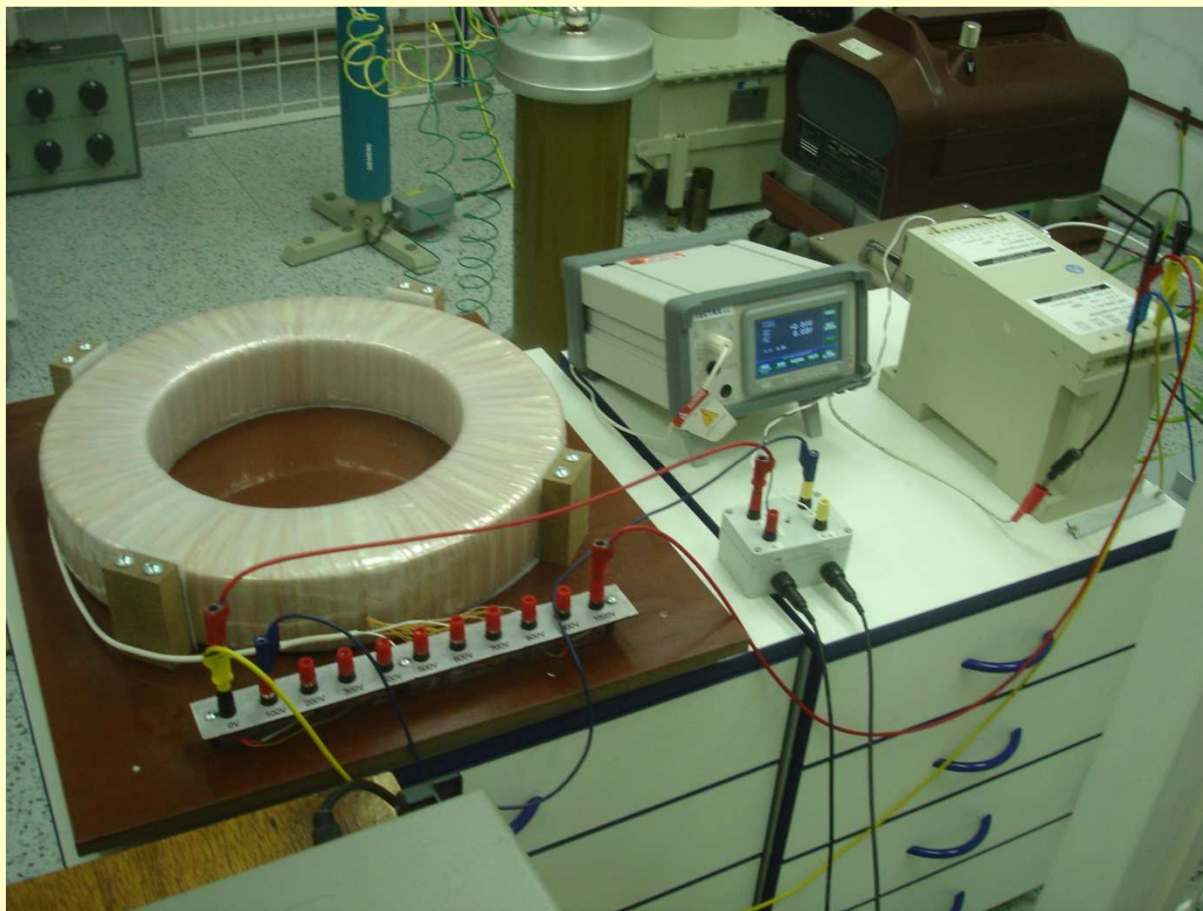
$U_{KRC} = 0,12 \%$

## KALIBRACE VYSOKONAPĚŤOVÝCH DĚLIČŮ POMOCÍ SYSTÉMU TETTEX 2767



**CHYBA NAPĚTÍ**  $\epsilon_{ND} = \frac{k_{ND} U_2 - U_1}{U_1} \approx \frac{U_2 - U_4}{U_4}$

**CHYBA ÚHLU**  $\delta_U$  je dána jako fázový posuv fázoru výstupního napětí  $U_2$  proti fázoru vstupního napětí  $U_4$



INDUKČNÍ DĚLIČ 10 x 100 V PRO KALIBRACI EL. DĚLIČE NAPĚTÍ



KALIBRACE ROGOWSKÉHO CÍVKY PRO MĚŘENÍ ZKRATOVÝCH PROUDŮ





KALIBRACE VN KONDENZÁTORU POMOCÍ TRANSFORMÁTOROVÉHO MOSTU



KALIBRACE KLEŠŤOVÉHO AMPERMETRU DC PROUDEM DO 1 kA



# ***KALIBRACE ZÁTĚŽÍ PRO MĚŘICÍ TRANSFORMÁTORY***

**Karel Draxler<sup>1</sup>, Michal Ulvr<sup>2</sup>, Renata Styblíková<sup>2</sup> a Jan Hlaváček<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> ČVUT FEL Praha  
Fakulta elektrotechnická  
Katedra měření

<sup>2</sup> Český metrologický institut  
Laboratoře primární metrologie Praha  
Oddělení elektromagnetických veličin

<sup>3</sup> ČVUT FEL Praha  
Fakulta elektrotechnická  
Katedra elektroenergetiky



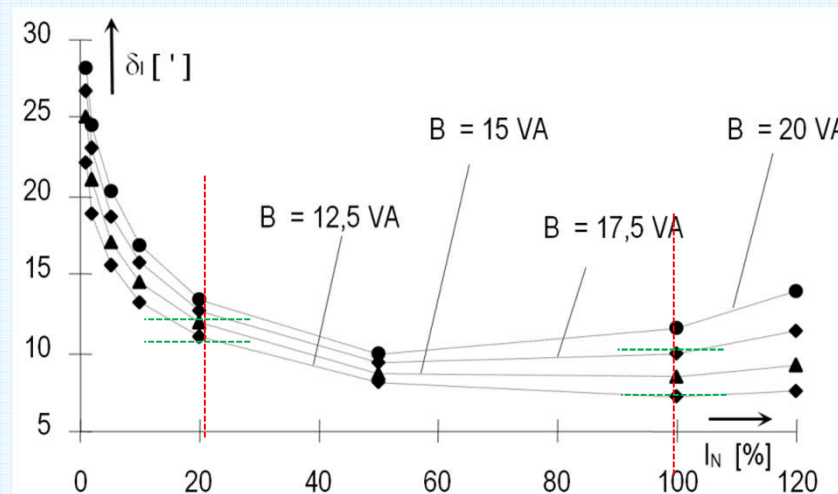
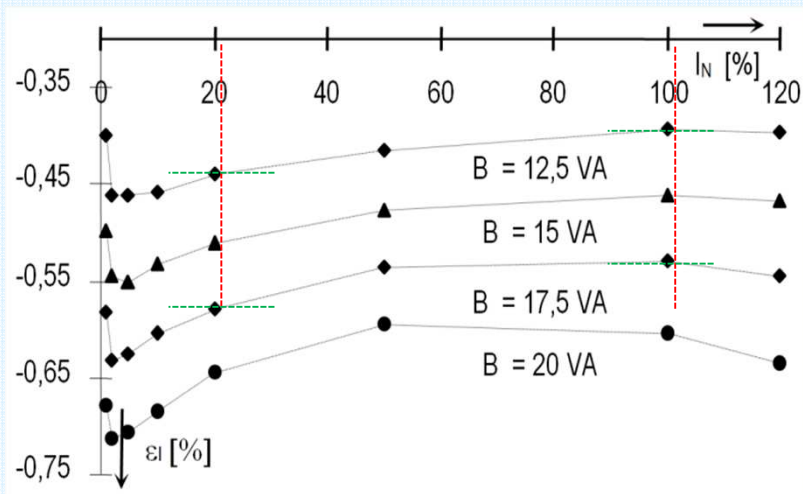
## VLIV PŘESNOSTI ZÁTĚŽE NA CHYBY MĚŘICÍCH TRANSFORMÁTORŮ PROUDU A NAPĚTÍ



### NÁVRH POŽADAVKŮ NA PŘESNOST ZÁTĚŽÍ POUŽÍVANÝCH PŘI OVĚŘOVÁNÍ MĚŘICÍCH TRANSFORMÁTORŮ:

- Je-li hodnota zátěže vyjádřena jako impedance, musí se její velikost  $B$  včetně přívodů rovnat jmenovité hodnotě s odchylkou  $\pm 3\%$  a její fázový posuv  $\beta$  se musí rovnat jmenovité hodnotě s odchylkou  $\pm 3$  grad.
- Je-li hodnota zátěže vyjádřena pomocí zdánlivého výkonu  $B$ , musí se jeho hodnota včetně přívodů rovnat jeho jmenovité hodnotě s odchylkou  $\pm 3\%$  a účinník  $PF$  ( $\cos \beta$ ) se musí rovnat jmenovité hodnotě s odchylkou  $\pm 0,02$ .
- Tyto požadavky byly ověřeny měřením závislostí chyb měřicích transformátorů na změně velikosti a účinníku zátěže.

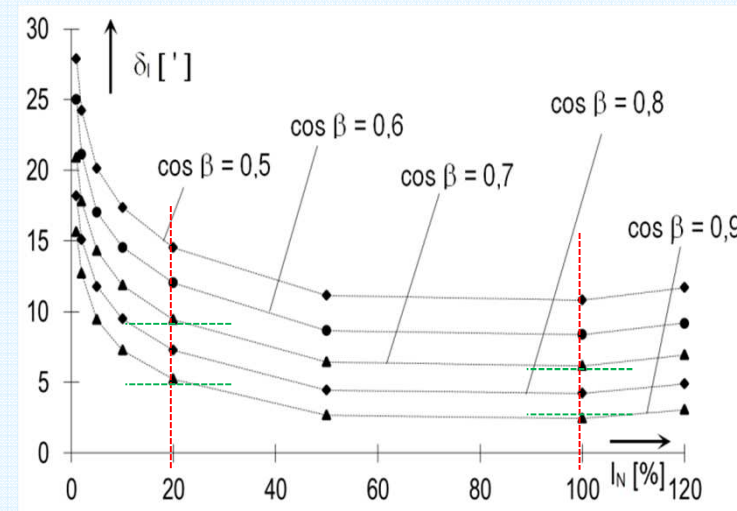
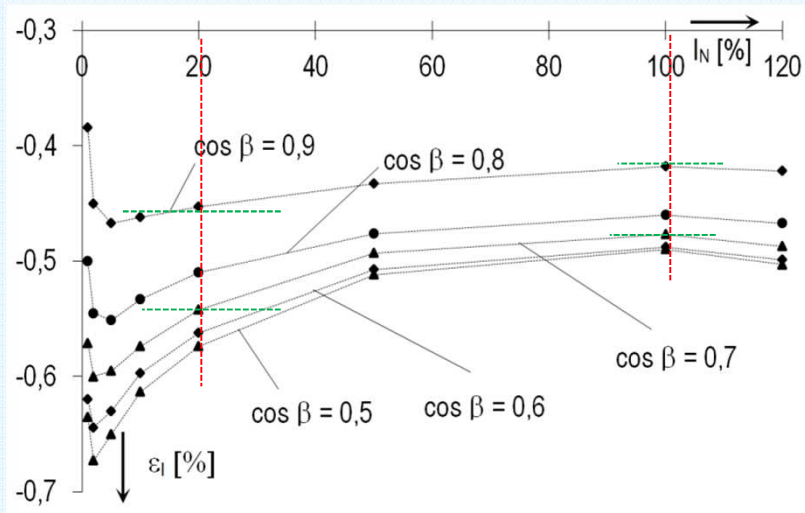
**MTP: 50 A / 5 A; třída přesnosti 0.5;  $B_r = 15$  VA;  $PF = 0.8$**



Závislost chyby proudu  $\epsilon_i$  a chyby úhlu  $\delta_i$  na velikosti primárního proudu  $I_1$  a zátěži  $B$ ,  $k_T = 50$  A/5 A,  $PF = 0.8$



# VLIV PŘESNOSTI ZÁTĚŽE NA CHYBY MĚŘICÍCH TRANSFORMÁTORŮ PROUDU A NAPĚTÍ

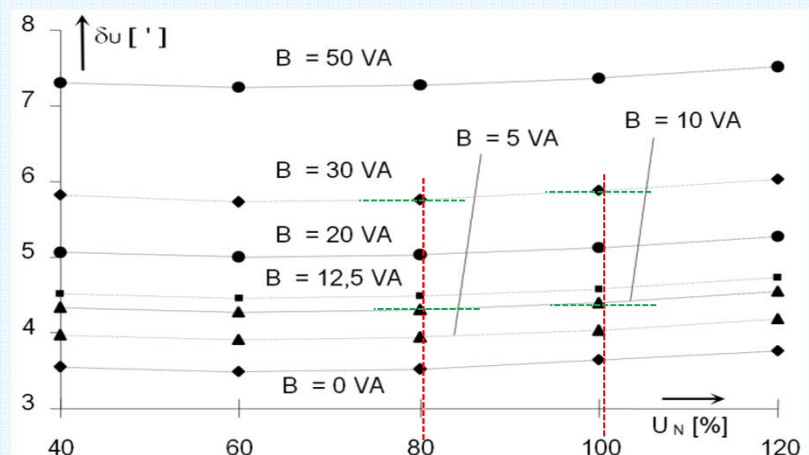
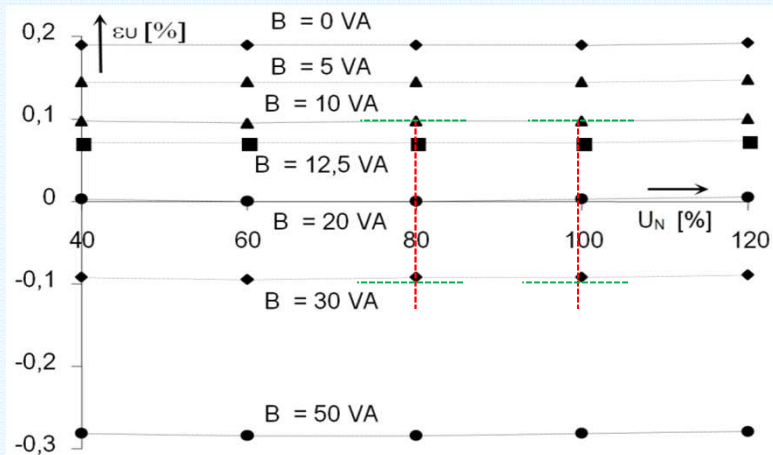


Závislost chyby proudu  $\varepsilon_1$  a chyby úhlu  $\delta_1$  na velikosti primárního proudu  $I_1$  a účinníku zátěže  $\cos \beta$ ,  $k_I = 50 \text{ A/5 A}$ ,  $B = 15 \text{ VA}$ .

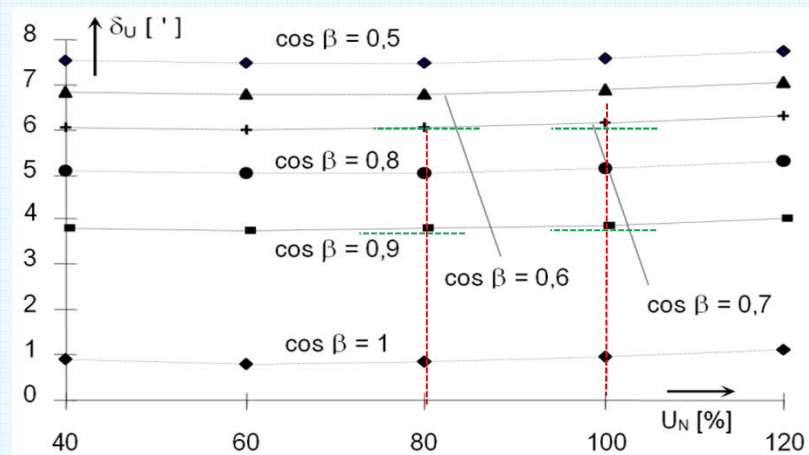
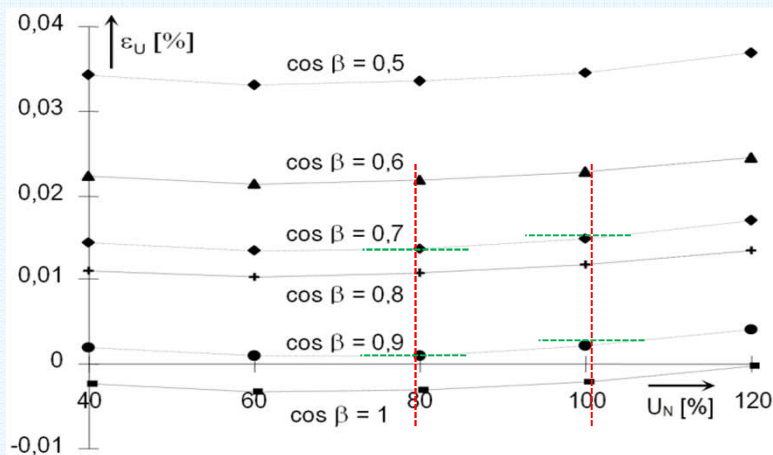
Vliv změny velikosti zátěže a jejího účinníku byl vyšetřován v rozsahu (20 až 100) % jmenovité hodnoty proudu  $I_R$  v okolí jmenovité hodnoty zátěže.



# VLIV PŘESNOSTI ZÁTĚŽE NA CHYBY MĚŘICÍCH TRANSFORMÁTORŮ PROUDU A NAPĚTÍ



Závislost chyby napětí  $\varepsilon_U$  a chyby úhlu  $\delta_U$  MTN na velikosti primárního napětí  $U_1$  a velikosti zátěže,  $k_U = (22/\sqrt{3}) \text{ kV} // (100/\sqrt{3}) \text{ V}$ ,  $B = 20 \text{ VA}$ ,  $\text{PF} = 0.8$



Závislost chyby napětí  $\varepsilon_U$  a chyby úhlu  $\delta_U$  MTN na velikosti primárního napětí  $U_1$  a účinku zátěže  $\cos \beta$ ,  
 $k_U = (22/\sqrt{3}) \text{ kV} // (100/\sqrt{3}) \text{ V}$ ,  $B = 20 \text{ VA}$ ,  $\text{PF} = 0.8$

Vliv změny velikosti zátěže a jejího účinku byl vyšetřován v rozsahu (80 až 100) % jmenovité hodnoty napětí  $U_R$  v okolí jmenovité hodnoty zátěže.



# VLIV PŘESNOSTI ZÁTĚŽE NA CHYBY MĚŘICÍCH TRANSFORMÁTORŮ PROUDU A NAPĚTÍ



Lineární aproximací závislostí chyby převodu  $\varepsilon_B$  a  $\varepsilon_{PF}$  a chyby úhlu  $\delta_B$  a  $\delta_{PF}$  na změnách  $\Delta B_B$  and  $\Delta B_{PF}$  mohou být konstanty  $k_{B\varepsilon}$ ,  $k_{PF\varepsilon}$ ,  $k_{B\delta}$  a  $k_{PF\delta}$  vyjádřeny jako

$$k_{B\varepsilon} = \Delta\varepsilon_B / \Delta B_\varepsilon = (\varepsilon_{2B} - \varepsilon_{1B}) / (B_{2\varepsilon} - B_{1\varepsilon})$$

$$k_{PF\varepsilon} = \Delta\varepsilon_{PF} / \Delta PF = (\varepsilon_{2PF} - \varepsilon_{1PF}) / (PF_{2\varepsilon} - PF_{1\varepsilon})$$

$$k_{B\delta} = \Delta\delta_B / \Delta B_\delta = (\delta_{2B} - \delta_{1B}) / (B_{2\delta} - B_{1\delta})$$

$$k_{PF\delta} = \Delta\delta_{PF} / \Delta PF = (\delta_{2PF} - \delta_{1PF}) / (PF_{2\delta} - PF_{1\delta})$$

Za předpokladu odchylek zátěže  $\delta B = 3\%$  a  $\Delta PF = 0.02$  odpovídající změny chyb  $\Delta\varepsilon_B$ ,  $\Delta\varepsilon_{PF}$ ,  $\Delta\delta_B$  a  $\Delta\delta_{PF}$  mohou být vyjádřeny jako

$$\Delta\varepsilon_B = k_{B\varepsilon} \Delta B_\varepsilon = k_{B\varepsilon} \delta B \cdot B / 100$$

$$\Delta\delta_B = k_{B\delta} \Delta B_\delta = k_{B\delta} \delta B \cdot B / 100$$

$$\Delta\varepsilon_{PF} = k_{PF\varepsilon} \Delta PF$$

$$\Delta\delta_{PF} = k_{PF\delta} \Delta PF$$

## VLIV ZMĚNY VELIKOSTI ZÁTĚŽE $B$ A ÚČINÍKU ZÁTĚŽE $PF$ NA CHYBY MTP

MTP 50 A/5 A; tř. př. 0.5; $B = 15 \text{ VA} \pm 3\%$ ; $PF = 0.8 \pm 0.02$								
$I_1$ (% $I_{1r}$ )	$k_{B\varepsilon}$ (%/VA)	$k_{PF\varepsilon}$ (%)	$k_{B\delta}$ (°/VA)	$k_{PF\delta}$ (°)	$\Delta\varepsilon_B$ (%)	$\Delta\delta_B$ (°)	$\Delta\varepsilon_{PF}$ (%)	$\Delta\delta_{PF}$ (°)
100	0.03	0.3	0.5	22.5	0.0135	0.225	0.006	0.45
20	0.012	0.45	0.3	15	0.0054	0.135	0.009	0.30

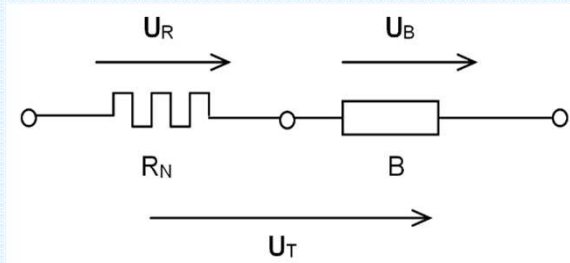
## VLIV ZMĚNY VELIKOSTI ZÁTĚŽE $B$ A ÚČINÍKU ZÁTĚŽE $PF$ NA CHYBY MTN

MTN (22/ $\sqrt{3}$ ) kV/(100/ $\sqrt{3}$ ) V; tř. př. 0.2; $B = 20 \text{ VA} \pm 3\%$ ; $PF = 0.8 \pm 0.02$								
$U_1$ (% $U_{1r}$ )	$k_{B\varepsilon}$ (%/VA)	$k_{PF\varepsilon}$ (%)	$k_{B\delta}$ (°/VA)	$k_{PF\delta}$ (°)	$\Delta\varepsilon_B$ (%)	$\Delta\delta_B$ (°)	$\Delta\varepsilon_{PF}$ (%)	$\Delta\delta_{PF}$ (°)
100	0.01	0.08	0.07	12	0.006	0.042	0.0016	0.24
80	0.01	0.07	0.07	11	0.006	0.042	0.0014	0.22

Z výsledků je patrné, že změny účinníku zátěže mají podstatně větší vliv na chyby MT než změny její velikosti.



# KALIBRACE ZÁTĚŽÍ PRO MĚŘICÍ TRANSFORMÁTORY METODOU TŘÍ VOLTMETRŮ



Zapojení pro metodu 3 voltmetrů

$$B_{ICT} = Z I_r^2 = \frac{U_B}{U_R} R_N I_r^2, \quad B_{IVT} = \frac{U_r^2}{Z} = U_r^2 \frac{U_R}{U_B} \frac{1}{R_N}$$

Relativní hodnota nejistoty typu B údaje velikosti zátěže B

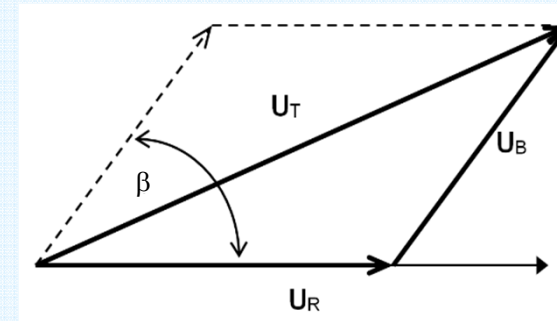
$$u_r(B) = \sqrt{[u_r(U_B)]^2 + [u_r(U_R)]^2 + [u_r(R_N)]^2}$$

**Rozšířená nejistota velikosti zátěže:  $U_r(B) = 2 u_r(B)$**

$u_r(B)$  je relativní nejistota velikosti zátěže (%)

$u_r(U_B)$  a  $u_r(U_R)$  jsou relativní hodnoty nejistot napětí  $U_B$  (%) a  $U_R$  (%)

$u_r(R_N)$  je relativní hodnota nejistoty etalonového rezistoru  $R_N$  (%)



Fázorový diagram

$$PF = \cos \beta = \frac{U_T^2 - U_R^2 - U_B^2}{2 U_B U_R}$$

Nejistota typu B účinníku zátěže  $\cos \varphi$

$$u(\cos \beta) = \sqrt{\left(\frac{\partial(\cos \beta)}{\partial U_R} u(U_R)\right)^2 + \left(\frac{\partial(\cos \beta)}{\partial U_B} u(U_B)\right)^2 + \left(\frac{\partial(\cos \beta)}{\partial U_T} u(U_T)\right)^2}$$

$$u(\cos \beta) = \sqrt{[A u(U_T)]^2 + [B u(U_R)]^2 + [C u(U_B)]^2}$$

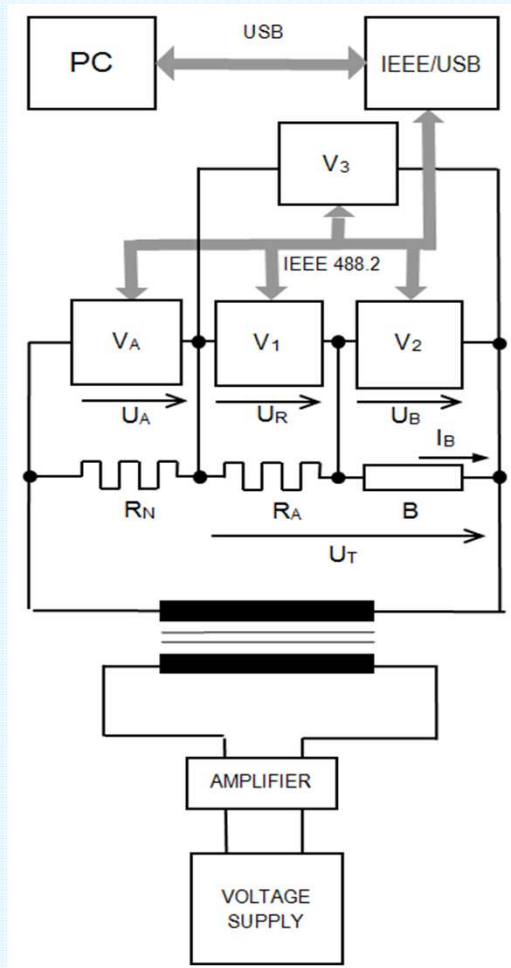
$$A = \frac{U_T}{U_B U_R}; \quad B = \frac{U_B^2 - U_T^2 - U_R^2}{2 U_B U_R^2}; \quad C = \frac{U_R^2 - U_T^2 - U_B^2}{2 U_B^2 U_R}$$

**Rozšířená nejistota účinníku zátěže:  $U(\cos \varphi) = 2 u(\cos \varphi)$**





## MODIFIKOVANÁ METODA TŘÍ VOLTMETRŮ



Měřicí systém se čtyřmi voltmetry

Resistor  $R_N$  slouží pouze k měření proudu zátěží  $I_B$ .

Resistor  $R_A$  slouží pouze k měření účinníku ( $\cos \beta$ )

$R_A$  je proměnný rezistor, jehož hodnota je volena tak, aby se minimalizovala nejistota měření účinníku zátěže PF.

Pro zátěž MTP:  $R_A = B/I_r^2$

Pro zátěž MTN:  $R_A = U_r^2/B$

$$B_{\text{MTP}} = ZI_r^2 = \frac{U_B}{U_A} R_N I_r^2 \quad B_{\text{MTN}} = \frac{U_r^2}{Z} = U_r^2 \frac{U_A}{U_B} \frac{1}{R_N}$$

Pro  $R_A = |Z| (\Omega) \Rightarrow U_R = U_B = U_K$

Citlivostní koeficienty pro určení nejistoty účinníku PF

$$A = \frac{U_T}{U_K^2}; B = -\frac{U_T^2}{2U_K^3}; C = -\frac{U_T^2}{2U_K^3}$$

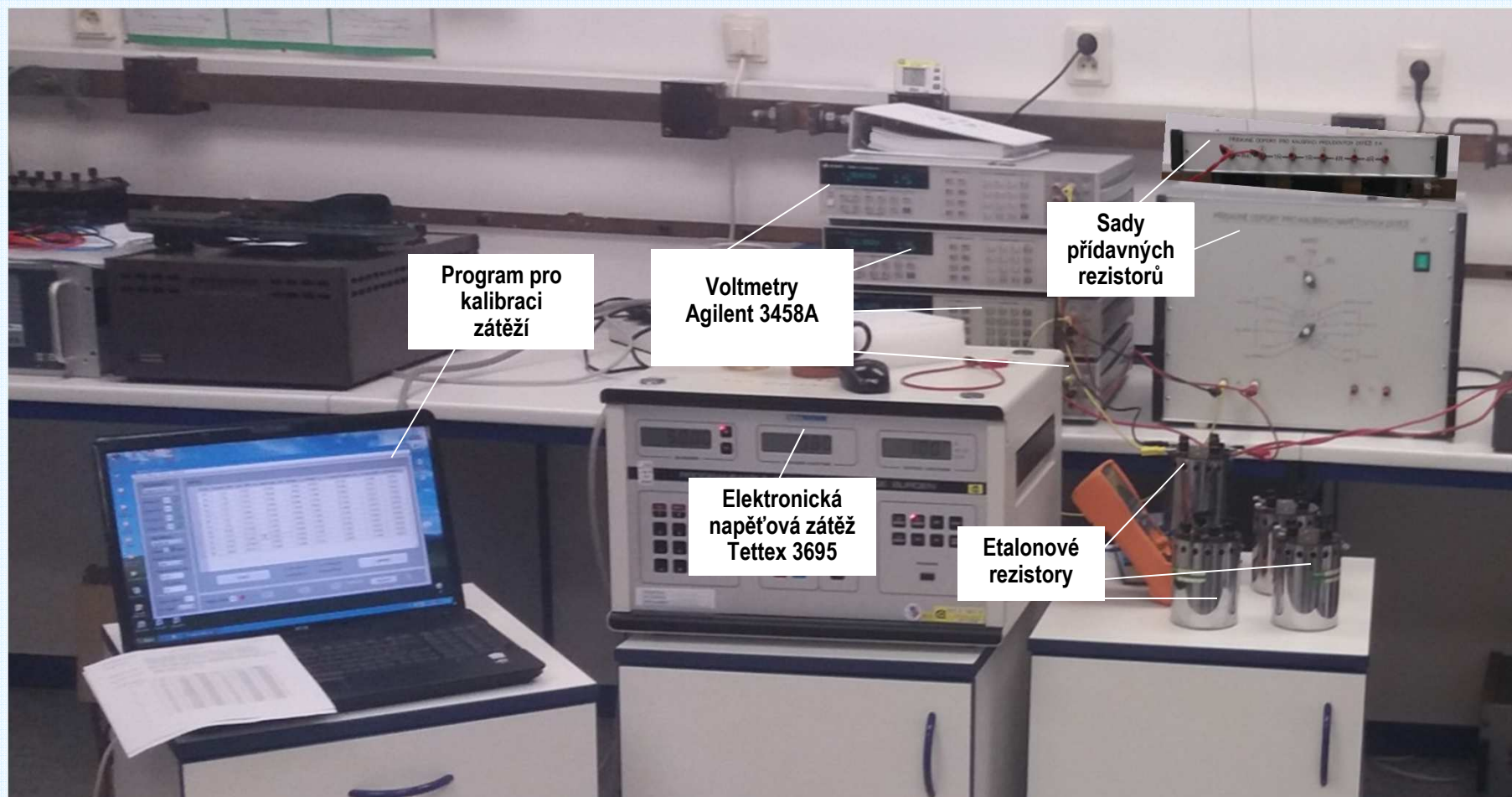
Napětí  $U_A$ ,  $U_R$ ,  $U_B$  a  $U_T$  jsou měřena voltmetry Agilent 3458 A řízenými PC programem v LabWindows CVI.

Odměry voltmetrů probíhají simultánně pomocí příkazu GET.

Měřicí obvod je napájen zesilovačem buzeným generátorem zavěšeným na síti 50 Hz z důvodu zajištění stability a minimálního zkreslení signálu.

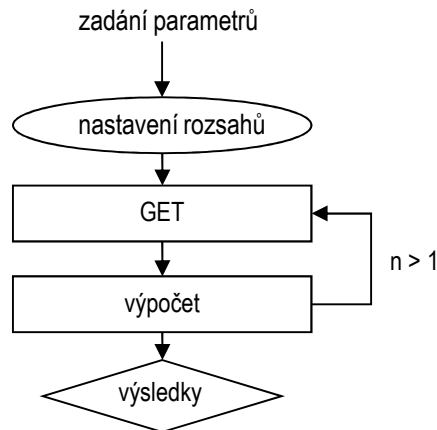


## PRACOVNÍŠTĚ PRO KALIBRACI NAPĚŤOVÝCH ZÁTĚŽÍ





# PRINCIP ŘÍZENÍ VOLTMETRŮ V PROSTŘEDÍ LABWINDOWS CVI



1. Zadání parametrů: parametry zátěže, hodnota  $R_N$ , počet odměrů  $n$
2. Automatické nastavení rozsahů voltmetrů
3. Start příkazu GET (Group Execute Trigger)
4. Provedení požadovaného počtu odměrů a průměrování výsledků
5. Výpočet jednotlivých měřených veličin včetně nejistot

## VÝSLEDKY MĚŘENÍ

NAPĚŤOVÁ ZÁTĚŽ: 5 VA, 10 VA A 20 VA, PF = 0.8																
$B_{\text{set up}}$ (VA)	$R_A$ ( $\Omega$ )	$R_N$ ( $\Omega$ )	$U_A$ (V)	$U_B$ (V)	$U_T$ (V)	$U_R$ (V)	$B_{\text{meas}}$ (VA)	$PF_{\text{meas}}$ (-)	$U(B_{\text{meas}})$ (%)	A (-)	B (-)	C (-)	$u(U_T)$ (V)	$u(U_B)$ (V)	$u(U_R)$ (V)	$U(PF_{\text{meas}})$ (-)
U <sub>r</sub> = 100 V, PF = 0.8																
5	2000	100	4.9986	99.6851	188.188	98.8574	5.014	0.797	0.14	0.0191	-0.0181	-0.0181	0.21	0.07	0.07	0.005
10	1000	10	1.0013	100.463	170.368	79.0813	9.967	0.798	0.15	0.02144	-0.02	-0.0206	0.2	0.06	0.06	0.005
20	500	10	1.9999	100.412	203.17	113.867	19.917	0.797	0.14	0.01777	-0.017	-0.0167	0.22	0.08	0.08	0.005
U <sub>r</sub> = 100/√3 V, PF = 0.8																
5	667	100	8.5484	57.0462	113.157	62.3526	4.995	0.796	0.17	0.03181	-0.0303	-0.03	0.17	0.05	0.05	0.007
10	333	10	1.7075	57.1822	100.632	49.0696	9.954	0.793	0.19	0.03586	-0.0336	-0.0342	0.16	0.04	0.04	0.007
20	167	10	3.4293	57.3642	118.01	67.0976	19.927	0.797	0.16	0.03066	-0.0293	-0.0288	0.17	0.05	0.05	0.006
PROUDOVÁ ZÁTĚŽ: 5 VA, 10 VA A 20 VA, PF = 0.8																
$B_{\text{set up}}$ (VA)	$R_A$ ( $\Omega$ )	$R_N$ ( $\Omega$ )	$U_A$ (V)	$U_B$ (V)	$U_T$ (V)	$U_R$ (V)	$B_{\text{meas}}$ (VA)	$PF_{\text{meas}}$ (-)	$U(B_{\text{meas}})$ (%)	A (-)	B (-)	C (-)	$u(U_T)$ (V)	$u(U_B)$ (V)	$u(U_R)$ (V)	$U(PF_{\text{meas}})$ (-)
I <sub>r</sub> = 5 A, PF = 0.8																
5	0.2	0.1	0.50021	0.978918	1.89268	1.013631	4.993	0.804	0.20	1.907	-1.815	-1.808	0.00214	0.00069	0.000708	0.005
10	0.2	0.1	0.50228	2.0233	2.9117	1.017757	10.071	0.813	0.15	1.414	-1.293	-1.3844	0.00275	0.00221	0.000711	0.006
20	0.2	0.1	0.50000	4.00776	4.86256	1.013883	20.039	0.807	0.13	1.197	-1.045	-1.188	0.00392	0.00340	0.000708	0.007
I <sub>r</sub> = 1 A, PF = 0.8																
5	10	1	9.49243	5.05553	13.8466	1.01404	4.986	0.793	0.12	0.2885	-0.2813	-0.2621	0.0183	0.004033	0.005795	0.006
10	10	1	5.65013	6.02582	11.0745	0.60392	9.978	0.799	0.11	0.3253	-0.3074	-0.3096	0.0076	0.004615	0.003490	0.004
20	10	1	6.48657	11.3131	16.9569	0.56653	19.969	0.800	0.11	0.2311	-0.2118	-0.2249	0.0202	0.007788	0.003992	0.006



## ZÁVĚR

---

- Při kalibraci laboratorních transformátorů s třídou přesnosti 0,2 nebo vyšší se doporučuje, aby hodnota účinníku zátěže byla v rozmezí  $0,8 \pm 0,1$ . Totéž platí pro mezilaboratorní srovnání.
- Metoda tří voltmetrů umožňuje současně stanovit zdánlivý výkon zátěže a jeho účinník.
- Pro oba parametry lze vyjádřit nejistoty typu B  $U(B)$  a  $U(PF)$ , které závisí na přesnosti použitého etalonového rezistoru  $R_N$  a na přesnosti použitých voltmetrů.
- Nejistotu měření účinníku  $U(PF)$  lze minimalizovat použitím pomocného rezistoru  $R_A$ , jehož hodnota nemá vliv na nejistotu měření.
- Použití čtvrtého voltmetru umožňuje snížit nejistotu typu B pro určení účinníku PF.
- Při použití voltmetrů Agilent 3458A nejistota stanovení velikosti zátěže B nepřesáhne 0,2 % a nejistota stanovení účinníku PF nepřesáhne 0,01, což vyhovuje navrhovaným požadavkům.
- Ke snížení nejistoty typu A se používá napájení měřicího obvodu pomocí zesilovače buzeného z generátoru fázově zavěšeného na síti 50 Hz s minimálním zkreslením a stabilní amplitudou.