



**Fakulta elektrotechnická**  
*Katedra technologií a měření*

## **METROLOGIE**

11. přednáška

### **Etalonáž a měření elektrických veličin (II.)**

11.

© Tůmová

1

## **17 Etalonáž a měření el. veličin (II.)**

- **Etalony pasivních veličin:**

- elektrického odporu
- elektrické kapacity
- indukčnosti

- vlastnosti

- nejlepší časová stálost hodnoty
- nejmenší závislost na okolních vlivech (teplota, vlhkost, atd.)

11.

© Tůmová

3

- etalony určené pro použití ve střídavých obvodech by navíc měly splňovat tyto požadavky:

- **hodnota etalonu:**
- konstantní v celém kmitočtovém pásmu, pro které je etalon určen
- úhel impedance má být:  $0$ ,  $\pi / 2$ ,  $-\pi / 2$
- pozn. vzhledem k tomu, že se uplatňuje celá řada vlivů, nelze dosáhnout ideálního stavu
- 4-vodičové připojení nutností (napěťové a proudové svorky)

11.

© Tůmová

4

## 17.1 Etalony el.odporu

- hlavní parazitní příčiny -
- kmitočtové závislosti  $L$  a  $C$  vinutí
- povrchový jev v odporovém drátu, z něhož je etalon navinut
- materiál
- manganin (80 % Cu + 12 % Mn + 3 %Ni)
- niklothal (75 % Ni + 17 % Co + Mn + další prvky, které výrobce neuvádí), má větší rezistivitu, lze vyrobit velmi tenké drátky a navinout je

11.

© Tůmová

5

### ● dělení etalonů elektrického odporu

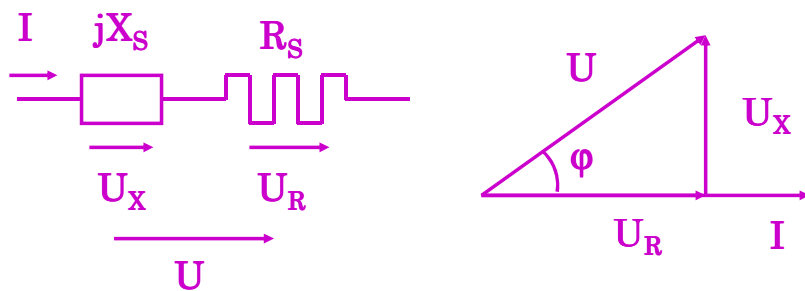
- odporový etalon otevřený – odporový drát je stočen, přístup vzduchu nebo přímo uložen do olejové lázně (výhoda - přímý odvod tepla, nevýhoda - údržba čistého oleje)
- odporový etalon uzavřený (=hermetizovaný)
- pro pevný kmitočet –
- odporový etalon nahradíme sériovým zapojením  $R_S$  a reaktance  $X_S$
- případně paralelní kombinace  $R_P$  a  $X_P$
- 
- náhradní schéma pro obvod střídavého proudu a fázorové diagramy (doplňte orientace úhlů  $\varphi$ )

11.

© Tůmová

6

## Náhradní schéma (1)



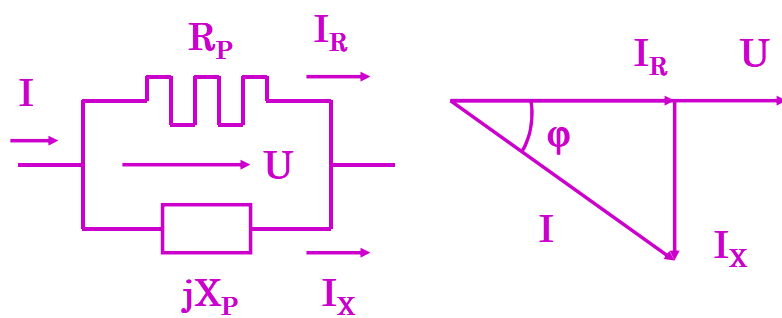
$$\overline{Z} = R_S + jX_S$$

11.

© Tůmová

7

## Náhradní schéma (2)



$$\overline{Z} = \frac{R_P jX_P}{R_P + jX_P}$$

11.

© Tůmová

8

- porovnáním obou schémat

$$R_P = R_S (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi)$$

- úhel  $\varphi$  - z fázorových diagramů

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{X_S}{R_S} = \frac{R_P}{X_P}$$

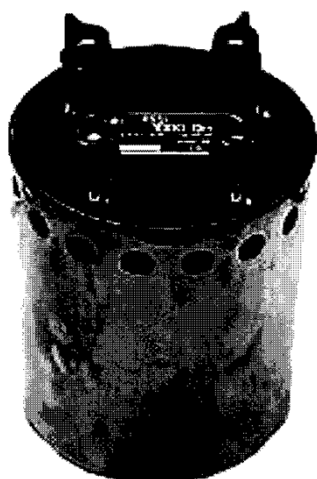
11.

© Tůmová

9

- ukázky etalonů odporu (1)

#### Ruské etalony P310, P321



Drátové odpory podobného provedení a určení jako etalony Metra. Použitý materiál odporového drátu byl ruský manganin, vyráběné byly v ZIP Krasnodar (nyní ZIPnaučpribor) a dodávané místo etalonů Metra na základě mezinárodní dohody. Výhodou etalonů P 321 až P 331 je jejich hermetická konstrukce.

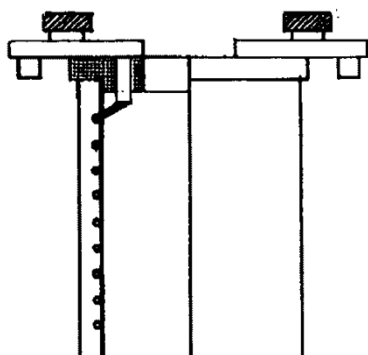
**Obr. 2.5.2:** Etalony P 321 jsou klasické etalony z manganinu

11.

© Tůmová

10

### • ukázky etalonů odporu (2)



Klasická, velmi stará konstrukce z počátku minulého století je nazvána po autorovi Thomas resistors. Tímto způsobem jsou provedeny etalony v základní sadě NIST v USA a byly vyráběny i firmou Leeds and Northrup, viz **obr. 2.5.13**.

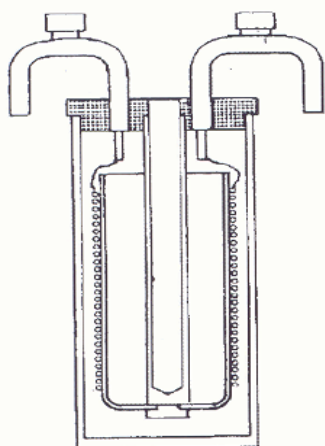
**Obr. 2.5.13:** Konstrukce klasického drátového etalonu odporu provedení „Thomas“

11.

© Tůmová

11

### • ukázky etalonů odporu (3)



Dalším typem etalonů, plněných olejem, vyvinutých také v NBS (nyní NIST) je provedení Rosa, viz **obr. 2.5.14**.

Podle těchto provedení byly konstruovány i etalony ZIP Krasnodar, P310, P321, P331.

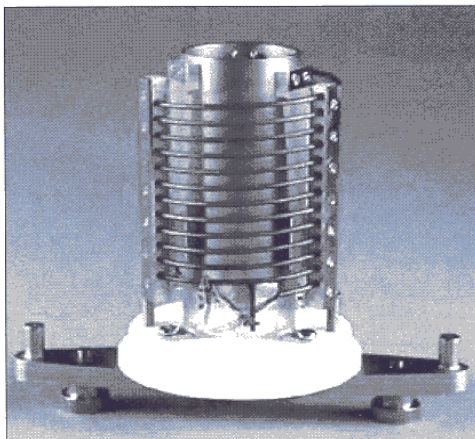
**Obr. 2.5.14:** Jiná konstrukce drátového etalonu odporu provedení „Rosa“

11.

© Tůmová

12

- ukázky etalonů odporu (4)



Obr. 2.5.15: Vnitřní provedení etalonu  $1\ \Omega$  z výroby metrologického institutu Austrálie

11.

© Tůmová

13

## Ukázky etalonů odporu (5)

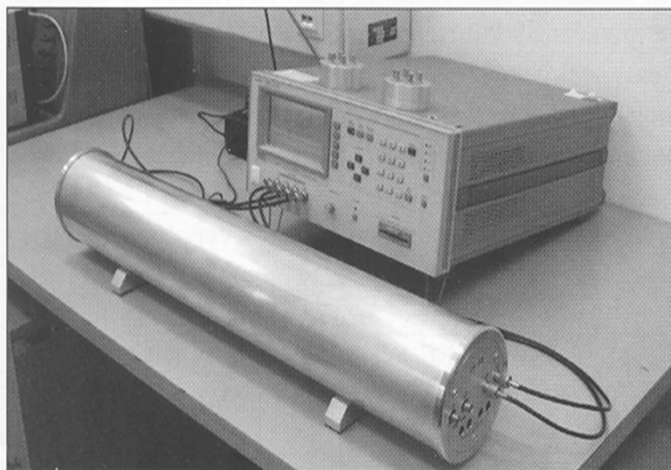


Obr. 5.1.6: Nízkoohmové etalóny Metra, typ RN hodnot  $0,1\ \Omega$  a  $0,0001\ \Omega$  a Leeds & Northrup, typ 4222-B  $0,01\ \Omega$  a typ 4223-B  $0,001\ \Omega$

11.

14

## Ukázky etalonů odporu (6)



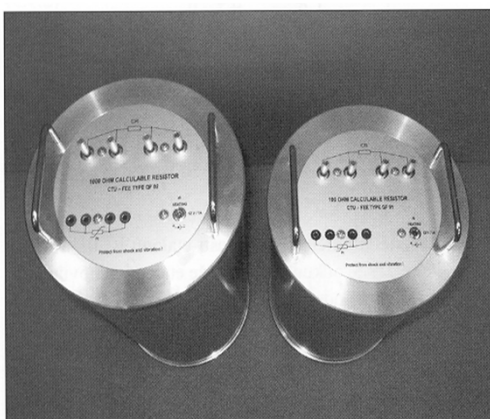
Obr. 2.9.3: Termostat s namontovanými etalony EK 100 a EK 1000

11.

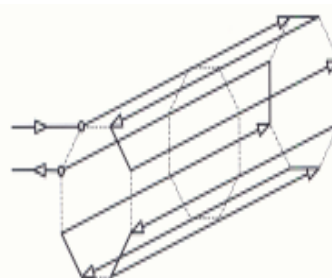
© Tůmová

15

## Ukázky etalonů odporu (7)



Obr. 2.9.7: Etalony QF01 (100 Ω) a QF02 (1 000 Ω)



Obr. 2.9.8: Odporový element oktofilního etalonu

11.

© Tůmová

16



## 17.2 Etalony indukčnosti

### 17.2.1 Etalony vlastních indukčností

- u ideálního etalonu vlastní indukčnosti  $L$  napětí fázově předbíhá proud o  $+\pi/2$

11.

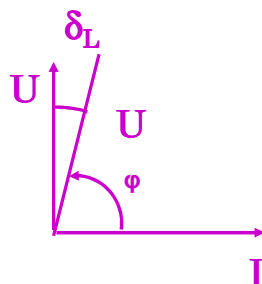
© Tůmová

17

- u skutečných etalonů je však úhel mezi proudem a napětím

$$\varphi = \frac{\pi}{2} - \delta_L \text{ (rad)}$$

kde  $\delta_L$  ... ztrátový úhel etalonu,  
tg ... ztrátový činitel



- při výpočtu kmitočtových závislostí etalonů vlastní indukčnosti a jejich ztrátových činitelů je třeba uvažovat parazitní impedanci etalonů

11.

© Tůmová

18

- převrácená hodnota ztrátového činitele -  
činitel jakosti etalonu (cívky)

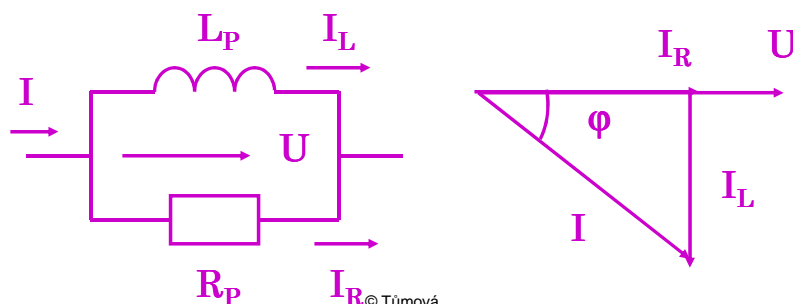
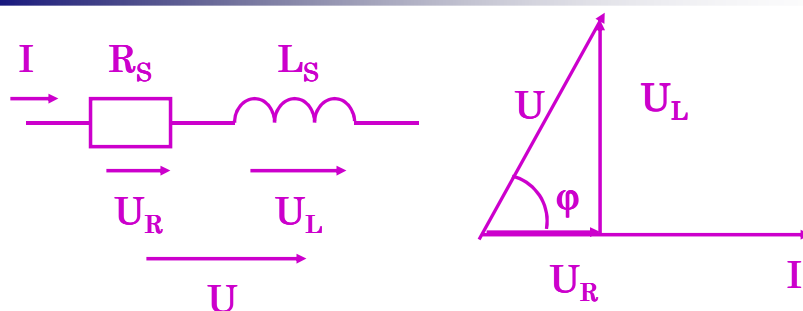
$$Q_L = \frac{1}{\operatorname{tg} \delta_L}$$

- pro jistý pevný kmitočet  $f$  lze etalon vlastní indukčnosti nahradit:
  - sériovým zapojením odporu  $R_S$  a indukčností  $L_S$
  - nebo paralelní kombinací  $R_P$  a  $L_P$
  - viz obr.

11.

© Tůmová

19



11.

© Tůmová

20

- platí

$$\operatorname{tg} \delta_L = \frac{R_S}{\omega L_S} = \frac{\omega L_P}{R_P}$$

- porovnáním obou schémat

$$R_P = R_S \frac{1 + \operatorname{tg}^2 \delta_L}{\operatorname{tg}^2 \delta_L}$$

$$L_P = L_S (1 + \operatorname{tg}^2 \delta_L)$$

- pozn. u cívek s malými indukčnostmi může být  $\operatorname{tg} \delta > 1$

11.

© Tůmová

21

- primární etalony  $L$

- jednovrstvá cívka navinutá na válcové kostře z nemagnetického materiálu

- kostra je obvykle z křemenného skla s permeabilitou blízkou jedničce (materiály neferomagnetické) a s nízkou hodnotou permitivity (kosta bývá i z mramoru)

- v kostře vysoustružené drážky, uložené vinutí
- průměr cívky cca 200 - 300 mm
- délka cívky je pěti-desetinásobkem průměru cívky

11.

© Tůmová

22

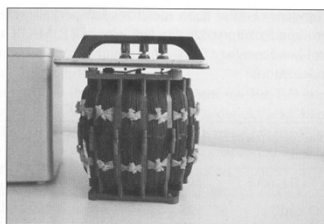
- **Metrologické vlastnosti:**
- přesnost indukčnosti s navázanými etalony cívkami  $< 10^{-6} \%$
- dlouhodobá stabilita etalonů je  $< 10^{-5} \%$
- **Nevýhodná vlastnost:**
- citlivost na blízkost vodivých nebo magnetických předmětů,  
případně na blízkost cizích magnetických polí
- používají se frekvence do 1kHz

11.

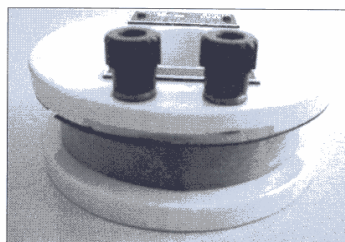
© Tůmová

23

## Ukázky etalonů indukčnosti (1)



Obr. 2.7.1. Vnitřní konstrukce toroidního etalonu indukčnosti typu P5115.



Obr. 2.7.1: Etalon s otevřeným polem RFT 0187

Obr. 2.7.2: Toroidní etalony indukčnosti pod 100  $\mu\text{H}$  s potlačením vlivu indukčnosti přívodů

© Tůmová

24

## 17.2.2 Etalony vzájemných indukčností

- u ideálního etalonu vzájemné indukčnosti  $M$  - napětí  $U_2$  indukované v sekundárním vinutí

$$U_2 = j\omega M I_1$$

kde  $\omega$  ... úhlový kmitočet ( $2\pi f$ )

$M$  ... hodnota etalonu

$I_1$  ... proud procházející primárním vinutím

11.

© Tůmová

25

- u skutečného etalonu vzájemné indukčnosti platí

$$U_2 = (R_M + j\omega M) I_1$$

kde  $R_M$  ... reálná část vzájemné indukčnosti

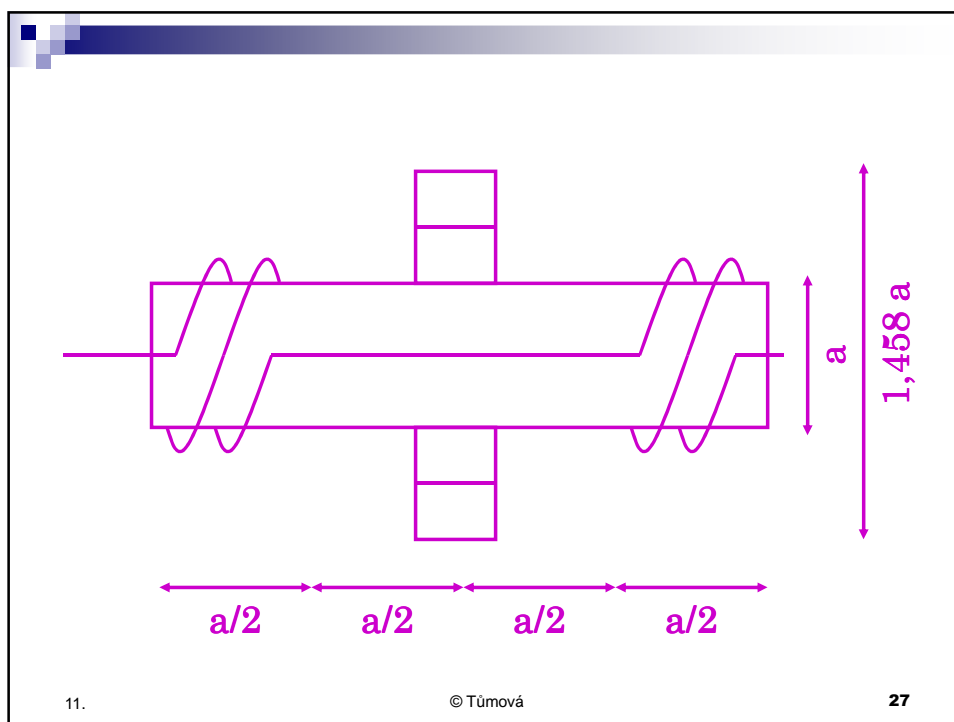
- ztrátový činitel etalonu

$$\operatorname{tg} \delta_M = \frac{R_M}{\omega M}$$

11.

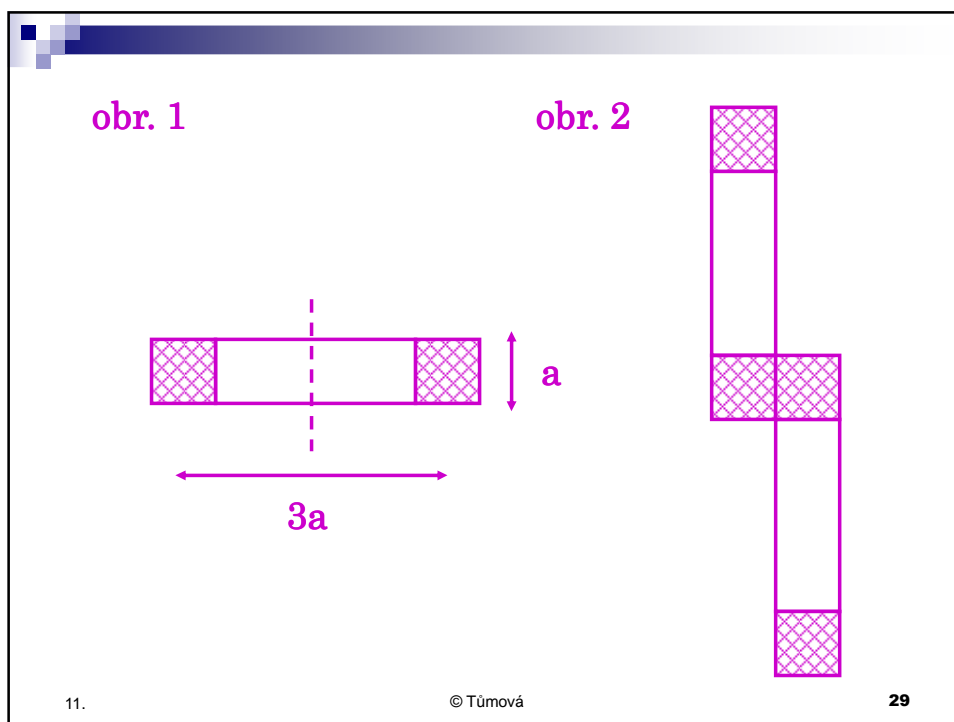
© Tůmová

26



- **sekundární etalony** mohou mít tato uspořádání:
- **Maxwellovo uspořádání** – čtvercový průřez cívky, nevýhodou velký rozptyl magnetického pole (viz obr. 1)
- **astatické uspořádání** (viz obr. 2)
- **Brooksovo uspořádání**

11. © Tůmová 28



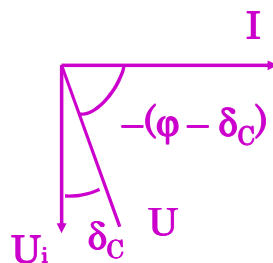
## 17.3 Etalony elektrické kapacity

- etalonem elektrické kapacity připojeným na střídavé napětí harmonického průběhu prochází el. proud, který v ideálním případě předbíhá napětí o úhel  $+\pi/2$

- úhel impedance vykazované skutečným etalonem je

$$\varphi = -\left(\frac{\pi}{2} - \delta_c\right) (\text{rad})$$

kde  $\delta_c \dots$  **ztrátový úhel etalonu**



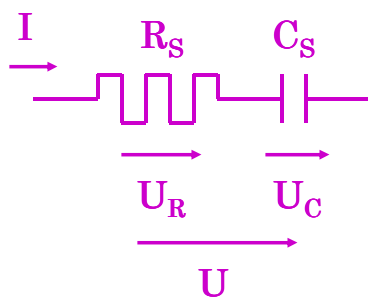
- pro jistý pevný kmitočet lze kapacitní etalon nahradit:
  - sériovým zapojením  $R_s$  a  $C_s$
  - paralelní kombinací  $R_p$  a  $C_p$

11.

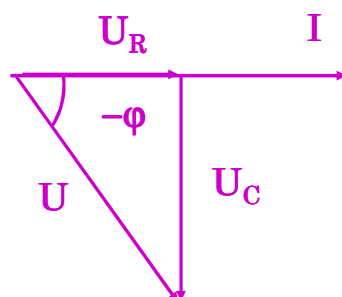
© Tůmová

31

### Náhradní schéma (1)



$$\bar{Z} = R_s - jX_s$$



$$X_s = \frac{1}{j\omega C_s}$$

11.

© Tůmová

32



Náhradní schéma (2)

$$\bar{Z} = \frac{R_P jX_P}{R_P - jX_P} \quad X_P = \frac{1}{j\omega C_P}$$

11. © Tůmová 33

- platí 
$$\operatorname{tg} \delta_C = \omega C_S R_P \frac{1}{\omega C_P R_P}$$
- porovnáním obou schémat

$$R_P = R_S \frac{1 + \operatorname{tg}^2 \delta_C}{\operatorname{tg}^2 \delta_C}$$

$$C_S = C_P (1 + \operatorname{tg}^2 \delta_C)$$

- pozn. platí, že  $\operatorname{tg} \delta_C < 10^{-5}$

11. © Tůmová 34

- dielektrikem kapacitního etalonu je tavený křemen a na něj jsou zataveny elektrody
- celý systém hermeticky uzavřen v dusíkatém prostředí

11.

© Tůmová

35

### ● Státní etalon elektrické kapacity

- Od r. 1995 budován a
- Vyhlášen v r. 2004 o hodnotě 10 pF
- (11 ks kondenzátorů s křemenným dielektrikem v olejové termostatické lázni se stabilitou  $\pm 0,005$  °C)
- Od r. 2001 budován a
- Vyhlášen v r. 2007 o hodnotě 100 pF
- (skupina 4 kondenzátorů na společném rámu)
- 2 cestovní etalony o hodnotě 10 a 100 pF navazují státní etalony v BIML

11.

© Tůmová

36

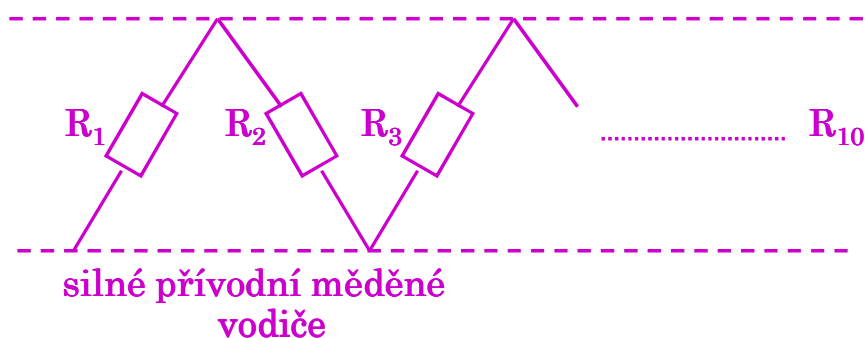
## 17.4 Transferové etalony

- používají se k měření přesných aktivních i pasivních el. veličin
- slouží jako prostředek při vzájemném porovnávání etalonů, materiálůvých měřidel nebo měřicích přístrojů
- př. etalony Hamonova typu :
- 10 odporových etalonů stejné jmenovité hodnoty (obvykle  $10\Omega$ ), trvale sériově připojeny (a lze přepojit na paralelní zapojení)

11.

© Tůmová

37



11.

© Tůmová

38

- Předp., že:
- počet etalonů =  $n$ ,
- jmenovitá hodnota každého z nich =  $R$
- skutečná hodnota  $i$ -tého:

$$R_i = R (1 + \delta_i)$$

kde  $i = 1, 2, \dots, n$

$\delta_i$  ... poměrná odchylka od jmenovité hodnoty

$$R (\delta_i < 10^{-2})$$

11.

© Tůmová

39

- zapojíme-li etalony do série (a neuplatňují-li se odpory přívodů),
- výsledný odpor:

$$\begin{aligned} R_S &= \sum_{i=1}^n R_i = \sum_{i=1}^n R (1 + \delta_i) = \\ &= nR + \left( 1 + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i \right) = nR (1 + \bar{\delta}) \end{aligned}$$

kde

$$\bar{\delta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i$$

11.

© Tůmová

40

- v případě paralelní kombinace

$$R_P = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{R(1 + \delta_i)}}$$

11.

© Tůmová

41

- rozložením řady  $\frac{1}{1 + \delta}$  pomocí Taylorova

rozvoje, úpravou zlomku a zanedbáním členů s vyšší mocninou (které se vzhledem ke své hodnotě na výsledku neprojeví) :

$$R_P = \frac{R}{n} (1 + \bar{\delta})$$

$$\bar{\delta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i$$

11.

© Tůmová

42

- **Porovnání obou vztahů pro sériovou a paralelní kombinaci:**

poměrná odchylka hodnoty  $R_S$  od jmenovité hodnoty  $nR$  se rovná poměrné odchylce hodnoty  $R_P$  od jmenovité hodnoty  $R/n$

- spojením obou vztahů 
$$\frac{R_S}{R_P} = n^2$$
- tento vztah neobsahuje  $\overline{\delta}$  –
- toho lze využít při přesném měření elektrického odporu a elektrického napětí (je vyloučena chyba měření)

11.

© Tůmová

43

# Konec 11. přednášky

## D Ě K U J I Z A P O Z O R N O S T

11.

© Tůmová

44