

# **Metódy merania pasívnych elektrických veličín**

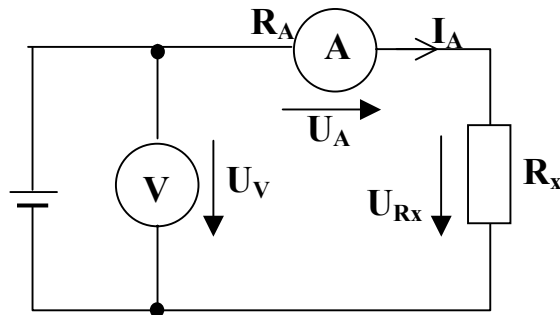
- **reálne elektrické vlastnosti pasívnych prvkov (odporníky, cievky, kondenzátory) vyjadrujú náhradné schémy z ideálnych prvkov**
- **základné parametre ideálnych prvkov – elektrický odpor (vodivosť), kapacita, vlastná alebo vzájomná indukčnosť**
- **elektrický odpor (vodivosť) môžeme merať DC alebo AC prúdom; pri AC môže byť výsledok závislý aj od frekvencie**
- **kapacitu a indukčnosť meriame obvykle pri striedavom harmonickom napájanom signáli, možno použiť aj iné metódy – nabíjanie meranej kapacity a pod.**
- **väčšina parametrov prvkov elektrických obvodov závisí na teplote, u cievok s feromagnetickým jadrom aj od prúdu cez cievku**
- **pri meraní parametrov pasívnych prvkov treba brať tieto skutočnosti do úvahy**
- **výsledok merania obvykle obsahuje aj podmienky merania**

## **Meranie odporu DC prúdom (1)**

- **primárny etalón elektrického odporu možno definovať**
  - **na základe definície jednotky kapacity a frekvencie (sú definované absolútne)**
  - **alebo využitím kvantového Hallovoho javu**
- **sekundárne etalóny elektrického odporu pre meranie DC prúdom sa robia z manganínu (zliatina kovov s malou tepelnou závislosťou a časovou stabilitou odporu)**
  - **stredné a vyššie hodnoty odporov sa robia ako vinuté drôtové odporníky, pod  $0,1 \Omega$  ako tyčové alebo tvarované plechy**
  - **pre  $10^{-3}$  až  $10^5 \Omega$  chyba menšia ako 0,001 %, mimo tento interval (hore aj dole) je chyba väčšia**
  - **zaťažiteľnosť 0,01 W až 0,1 W; ponorené v oleji až 1 W**

## Meranie odporu DC prúdom (2)

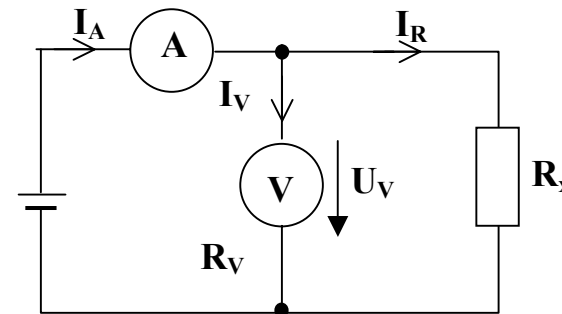
- metódy výchylkové a nulové (odporové mostíky)
- výchylkové metódy – „priame“, nepriame, prevodníky
- iné delenie – meranie stredných, malých a veľkých odporov
- meranie stredných odporov – z Ohmovho zákona (VA metóda – bola uvedená pri DC výkone)



$$R_X = \frac{U_V - U_A}{I_A} = \frac{U_V}{I_A} - R_A$$

$R_x$  – veľké,  $U_A$  – zanedbáme

$$\delta_m = \frac{R_A}{R_X} \cdot 100 \quad (\text{chyba metódy})$$



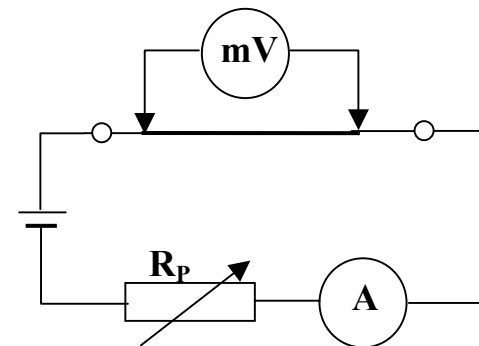
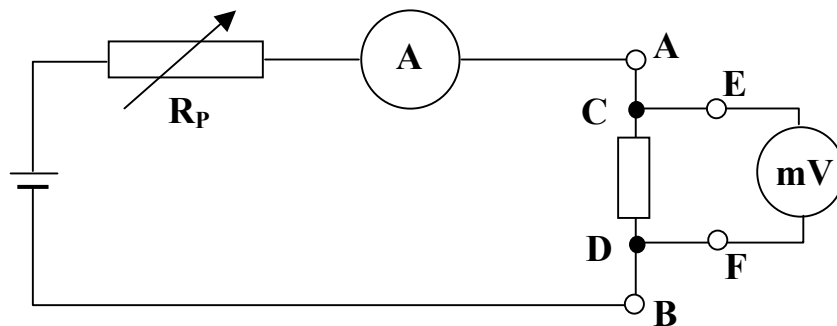
$$R_X = \frac{U_V}{I_A - I_V} = \frac{U_V}{I_A - \frac{U_V}{R_V}}$$

$R_x$  – malé,  $I_V$  - zanedbáme

$$\delta_m = \frac{R_X}{R_X + R_V} \cdot 100 (\text{chyba metódy})$$

## Meranie odporu DC prúdom (3)

- meranie malých odporov
- malý odpor – ak prechodové odpory svoriek alebo prívodov k meranému odporníku sú zrovnateľné s požadovanou absolútnou chybou merania
- štvorsvorkové zapojenie a taká metóda, ktorá eliminuje odpor svoriek a vodičov



- úbytok na prídavných svorkách A, B nie je meraný na V-metroch
- meraný odpor je definovaný medzi C, D
- prechodové odpory napät'ových svoriek E, F sa voči vnútornému odporu  $mV$  zanedbávajú

## Meranie odporov DC prúdom (4)

- malé odpory – ďalší rušivý vplyv sú termoelektrické napätia
- úbytok napätia na meranom malom odpore je malý, môžu termonapätia  $U_{t1}$  a  $U_{t2}$  na svorkách ovplyvniť meranie
- eliminujeme to meraním 2-krát; pri 2. meraní zmeníme smer prúdu v obvode  $\Rightarrow$  polarita napätia na odpore sa zmení, polarita  $U_{t1}$ ,  $U_{t2}$  zostane zachovaná

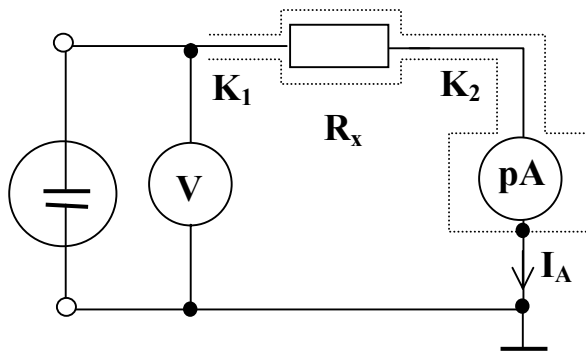
$$U_{mV1} = I \cdot R_x + U_{t1} - U_{t2}$$

$$U_{mV2} = -I \cdot R_x + U_{t1} - U_{t2}$$

$$U_x = \frac{U_{mV1} - U_{mV2}}{2} = I \cdot R_x$$

## Meranie odporov DC prúdom (5)

- veľké odpory – hovoríme o nich vtedy, ak pomer veľkosti parazitných zvodových prúdov a prúdu cez meraný odpor je zrovnateľný s požadovanou relatívnou chybou merania



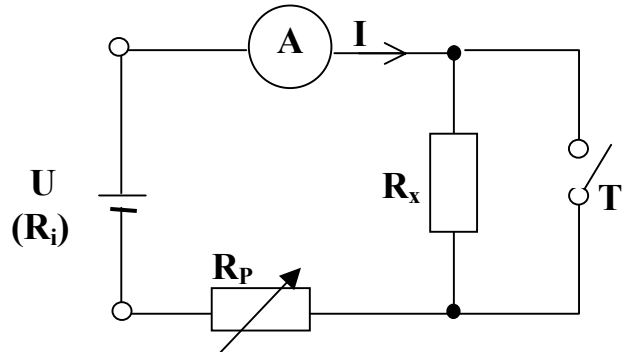
V-A metóda pre veľké  $R_x$

malý  $I_A$  – tieniť a zemniť zapojenie

- aby sa neuplatnil zvodový odpor podložky, na ktorej je meraný odporník upevnený, musia byť izolačné priechodky navzájom oddelené vodivým materiálom pripojeným k tieneniu
- zvodové odpory tienených káblov môže ovplyvniť výsledok
- meranie zvodového odporu izolantov – patrí k meraniu veľkých odporov – špeciálne usporiadanie V-A metódy

## Analógové ohmmetre (1)

- často súčasť analógových multimetrov

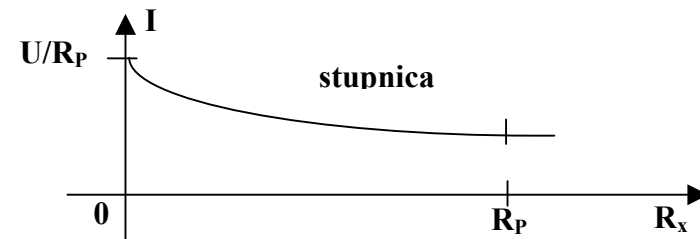


- $R_x = 0$  (zapnuté T)  $\Rightarrow I = U/R_P$   
 $R_x = \infty \Rightarrow I = 0$

$$R_i \ll R_P; \quad R_A \ll R_P; \quad I \doteq \frac{U}{R_P + R_X}$$

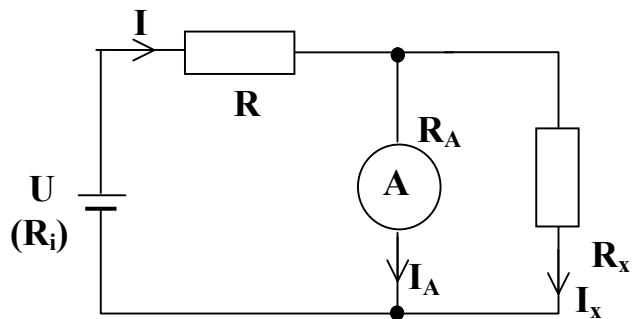
A – magnetoelektrický

$R_x$  a  $R_P$  sú porovnateľne veľké



## Analógové ohmmetre (2)

- menšie  $R_x$

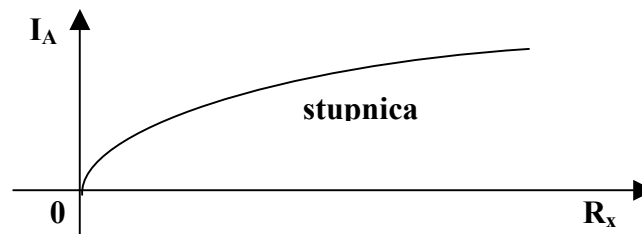


$$R_i \ll R;$$

$$\frac{I_A}{I_x} = \frac{R_x}{R_A} \Rightarrow \frac{I_A}{I - I_A} = \frac{R_x}{R_A} \Rightarrow I_A = \frac{R_x}{R_x + R_A} \cdot I$$

$$I = \frac{U}{R + R_A // R_A} \Rightarrow I_A = \frac{U \cdot R_x}{R \cdot R_A + R_x \cdot (R + R_A)}$$

- $R_x = 0 \Rightarrow I_A = 0$   
 $R_x \rightarrow \infty \Rightarrow I_A = U / (R + R_A)$



- $I_A = f(U)$  – nevyhovuje, kolísanie a pokles napätia, ...



## Analógové ohmmetre (3)

- v spojení s odporovými senzormi na meranie fyzikálnych veličín sa používajú pomerové elektromechanické systémy

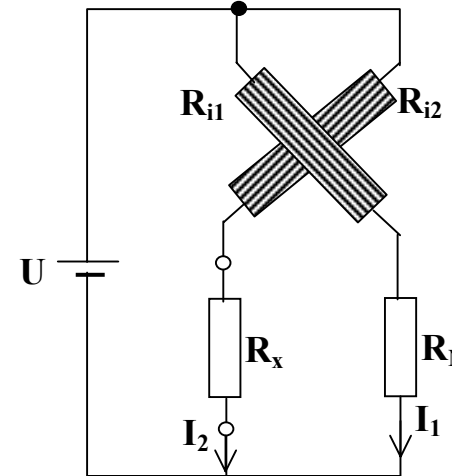
- veľké odpory

$$(R_N + R_{i1}) \cdot I_1 = (R_x + R_{i2}) \cdot I_2$$

$$R_N \gg R_{i1}; \quad R_x \gg R_{i2}$$

$$R_x = R_N \cdot \frac{I_1}{I_2} = R_N \cdot \alpha$$

$$\alpha = f\left(\frac{I_1}{I_2}\right)$$



- namerané hodnoty  $R_x \neq f(U)$ ;  $U$  musí mať istú hodnotu, aby prístroj fungoval
- použitie: meranie izolácií, v automobiloch – palivomer, teplomer
- zabezpečenie otrasuvzdornosti  $\Rightarrow$  pevné cievky, pohyblivý magnet

## Analógové ohmmetre (3)

- malé odpory

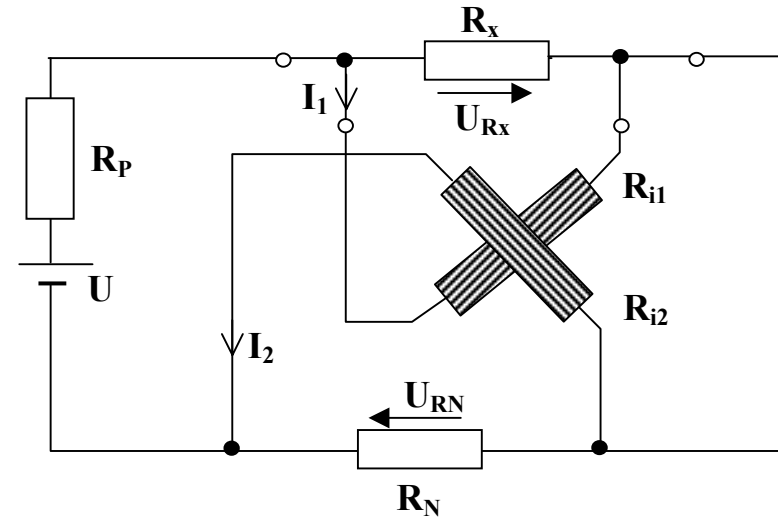
$$R_N \ll R_{i1}; \quad R_x \ll R_{i2}$$

$$R_{i1} = R_{i2} = R_i$$

$$\frac{R_x \cdot I}{R_N \cdot I} = \frac{U_{Rx}}{U_{RN}}; \quad \frac{U_{Rx} / R_i}{U_{RN} / R_i} = \frac{I_1}{I_2}$$

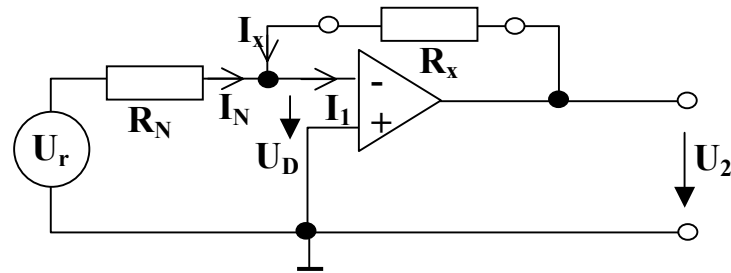
$$R_x = R_N \cdot \frac{I_1}{I_2} = R_N \cdot \alpha$$

- zapojenie umožňuje 4-svorkové pripojenie  $R_x$
- použitie – zemné odpory, odpor nulovacích vodičov atď’.



# Číslicové ohmmetre (multimetre) (1)

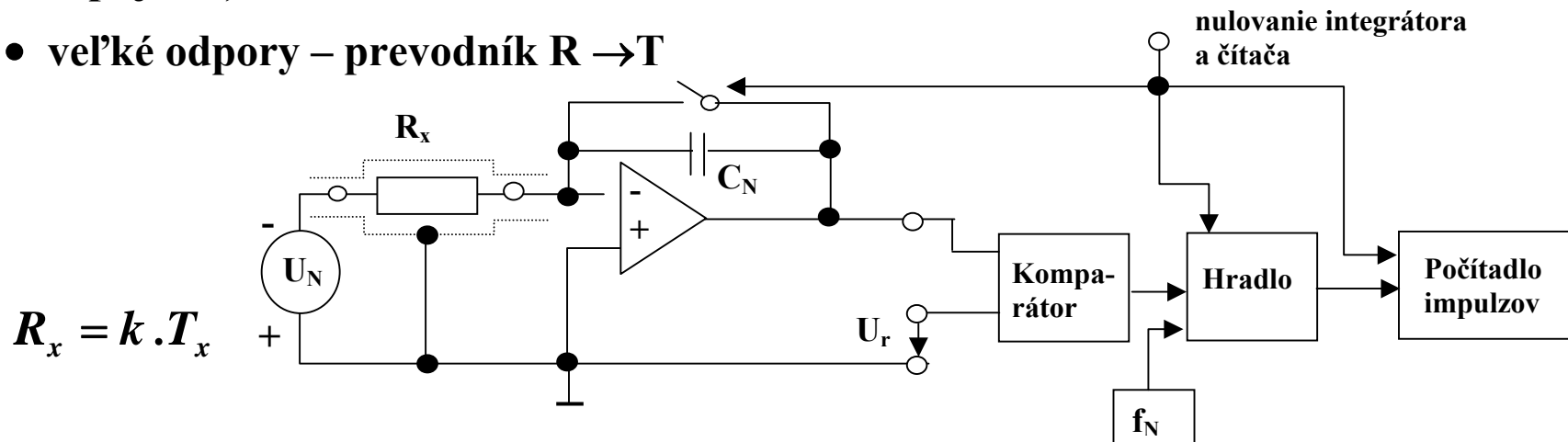
- využívajú na meranie odporu prevodník  $R \rightarrow U$



$R_{vst} \rightarrow \infty$  ideálny OZ  $\Rightarrow I_1 \doteq 0$ ;  $U_D \doteq 0$   
 $A \rightarrow \infty$

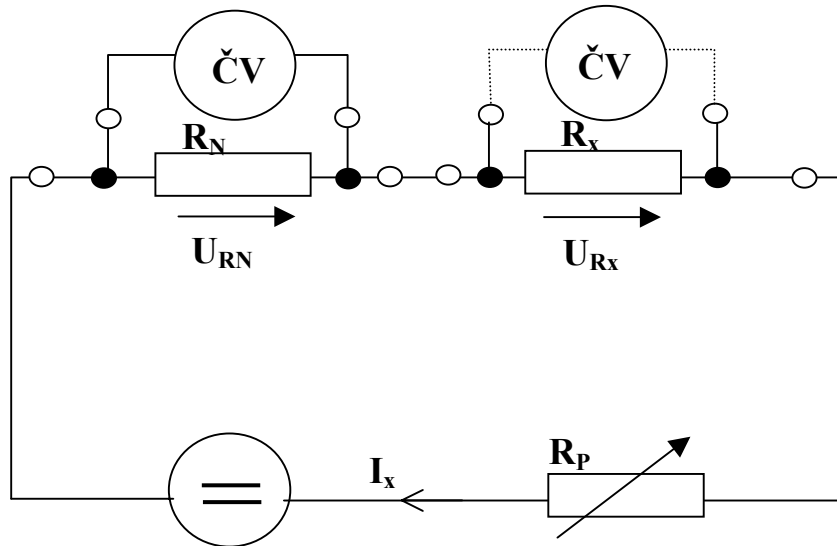
$$\frac{U_2}{R_x} = -\frac{U_r}{R_N} \Rightarrow R_x = -R_N \frac{U_2}{U_r} = k \cdot U_2$$

- $U_2$  meria ČV (AČP) – meranie stredných a väčších odporov;  
 $U_r \in < 10^{-1}; 10^0 V > \Rightarrow$  môžeme zanedbať napät'ovú nesymetriu OZ
- pre veľké  $R_x$  nemôžeme zanedbať  $I_1$  (kľudový prúd)
- existujú modifikácie uvedeného zapojenia pre malé odpory (štvorsvorkové zapojenie)
- veľké odpory – prevodník  $R \rightarrow T$



## Porovnávací metóda merania odporu

- sériová porovnávací metóda – na meranie malých odporov, kde nevyhovuje číslcový multimeter (najnižší rozsah obvykle 100 Ω)
- jednoduchá a lacná metóda, dosažitelná presnosť 0,1 %



$$R_x = \frac{U_{R_x}}{I_x} = \frac{U_{R_x}}{U_{R_N}} \cdot R_N = k \cdot U_{R_x}$$

$$\delta_{R_x} \leq |\delta_{R_N}| + |\delta_{U_{R_x}}| + |\delta_{U_{R_N}}|$$

- použiť ten istý ČV, na tom istom rozsahu  $\Rightarrow$  neuplatní sa celková chyba ČV, ale len odchýlka od linearity ( $I_x$  počas merania konšt.)
- termoelektrické napätia eliminujeme meraním 2x. Druhýkrát po komutácii smeru  $I_x$
- existuje aj paralelná porovnávací metóda ( $R_N$  a  $R_x$  sú zapojené paralelne), merajú sa prúdy – dnes sa málo používa

## Substitučná metóda merania

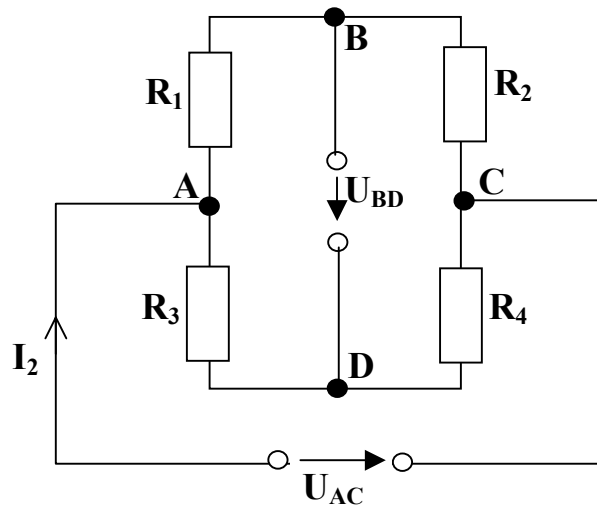
- pre presné porovnanie skutočnej hodnoty odporov dvoch rezistorov rovnakých menovitých hodnôt
- etalón aj meraný rezistor (etalón 2. stupňa) zmeriame rovnakým prístrojom (metódou), výsledky označme  $N$ ,  $X$

$$R_x = R_N \cdot X/N$$

- pri použití toho istého rozsahu prístroja je chyba metódy daná chybou etalónu  $\delta_{RN}$  a odchýlkou od linearít prístroja
- substitučná metóda sa používa nielen pre meranie  $R$ , ale aj indukčností a kapacít

# Odporové mostíky (1)

- **Wheatstonov mostík – vyvážený sa používa len na presné meranie stredných odporov**
  - **nevyvážený v oblasti merania neelektrických veličín (teplota, tenzometre)**



**AC -napájanie**

**BD – vyvážený mostík NI, nevyvážený  
voltmeter alebo obvody na spracovanie signálu**

$$U_{BD} = U_{AC} \cdot \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right)$$

- **vyvážený mostík  $U_{BD} = 0 \Rightarrow R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3$**

$$R_1 \rightarrow R_x; \quad R_2 \rightarrow R_D \Rightarrow R_x = R_D \cdot R_3 / R_4$$

$$|\delta_{R_x}| \leq |\delta_{R_D}| + |\delta_{R_3}| + |\delta_{R_4}| \quad \text{- maximálna relatívna chyba}$$

## Odporové mostíky (2)

- nevyvážený W. mostík – obvykle  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_0$   
 $R_1$  sa mení zmenou meranej neelektrickej veličiny o  $\Delta R$

$$U_{BD} = U_{AC} \cdot \left( \frac{R_0 + \Delta R}{2R_0 + \Delta R} - \frac{R_0}{2R_0} \right) = \frac{U_{AC}}{4R_0} \cdot \frac{\Delta R}{1 + \frac{\Delta R}{2R_0}}$$

- obdobne pre napájanie zo zdroja prúdu  $I_Z$  dostaneme

$$U_{BD} = \frac{I_Z}{4} \cdot \frac{\Delta R}{1 + \frac{\Delta R}{4R_0}}$$

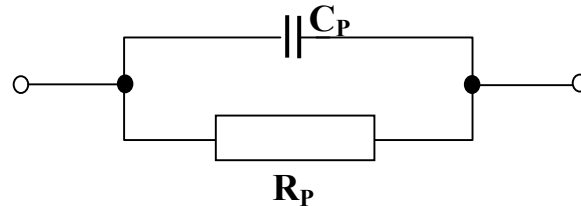
- v oboch prípadoch  $U_{BD}$  nelineárne závisí na  $\Delta R$
- $\Delta R \ll 2R_0$  resp.  $4R_0 \Rightarrow$  nelinearitu môžeme zanedbať

$$U_{BD} = \frac{U_{AC}}{4R_0} \cdot \Delta R \quad U_{BD} = \frac{I_Z}{4} \cdot \Delta R$$

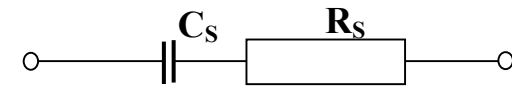
- ak nemôžeme zanedbať nelinearitu, linearizujeme W. mostík pomocou operačného zosilňovača
- na presné meranie malých odporov sa používa Thompsonov mostík, umožňuje štvorsvorkové zapojenie  $R_x$  do obvodu

## Meranie impedancií (1)

- náhradné schémy reálnych pasívnych prvkov – pri napájaní striedavým prúdom ich reálne elektrické vlastnosti vyjadruje sériová alebo paralelná náhradná schéma
- kondenzátor



$$\operatorname{tg} \delta = \frac{X_P}{R_P} = \frac{1}{\omega \cdot C_P \cdot R_P} = \frac{G_P}{\omega \cdot C_P}$$



$$\operatorname{tg} \delta = \frac{R_S}{X_S} = \omega \cdot R_S \cdot C_S$$

$\operatorname{tg} \delta$  - stratový činiteľ

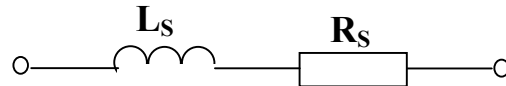
- impedancia (admitancia) sériovej aj paralelnej náhrady musia byť rovnaké  $\rightarrow C_S = f(C_P)$ ;  $R_S = f(R_P)$

$$C_S = C_P (1 + \operatorname{tg}^2 \delta) \quad R_S = \frac{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}{G_P \cdot \operatorname{tg}^2 \delta}$$

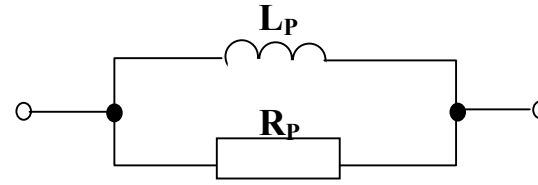


## Meranie impedancií (2)

- cievka



$$Q = \frac{X_S}{R_S} = \frac{\omega \cdot L_S}{R_S}$$



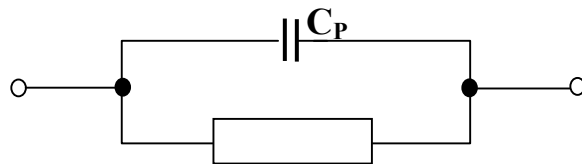
$$Q = \frac{R_P}{X_P} = \frac{R_P}{\omega \cdot L_P}$$

**Q – činiteľ kvality**

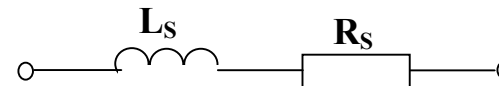
$R_P, R_S$  – reprezentuje odpor vinutia a u cievok s feromagnetikom aj straty vo feromagnetiku

sériová náhrada – vzduchové cievky; paralelná náhrada – cievky s feromagnetickým jadrom

- odporník – v obvode so striedavým prúdom nie je ideálny prvok
  - odpory s vyššou hodnotou (cca  $> 10 \text{ k}\Omega$ ) majú obvykle kapacitný charakter
  - odpory s nižšou hodnotou (cca  $< 10 \text{ }\Omega$ ) majú induktívny charakter



$$\tau = R_P \cdot C_P$$

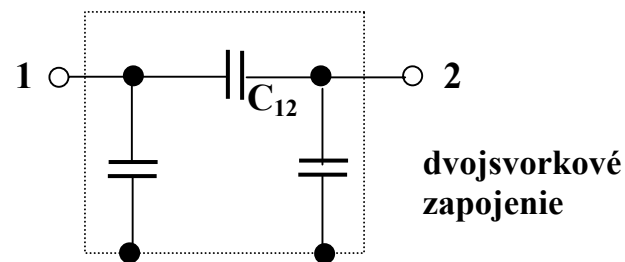
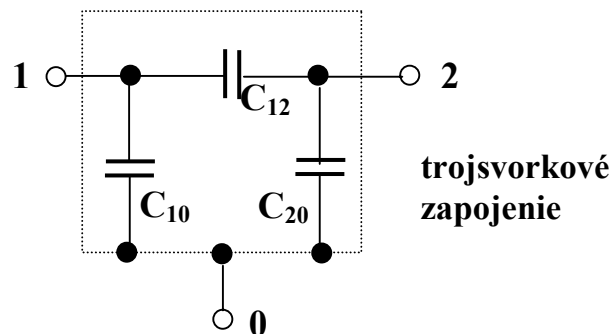


$$\tau = L_S / R_S$$

$\tau$  - časová konštanta; charakterizuje induktívny alebo kapacitný charakter prvku

## Meranie impedancií (3) - etalóny

- etalón kapacity – primárny etalón je absolútny etalón navrhnutý podľa Thompson-Lampardovho teorému – platí pre výpočet kapacity valcového kondenzátora nekonečnej dĺžky; rôzne úpravy, aby to vyhovovalo aj pre konečnú dĺžku
- sekundárne etalóny (10pF až 10nF) sa realizujú ako doskové kondenzátory (vzduchové alebo s inertným plynom)
  - kondenzátor je tienený, zapojenie trojsvorkové umožňuje definovať priechodziu kapacitu  $C_{12}$  nezávisle na okolitých objektoch a elektrickom poli



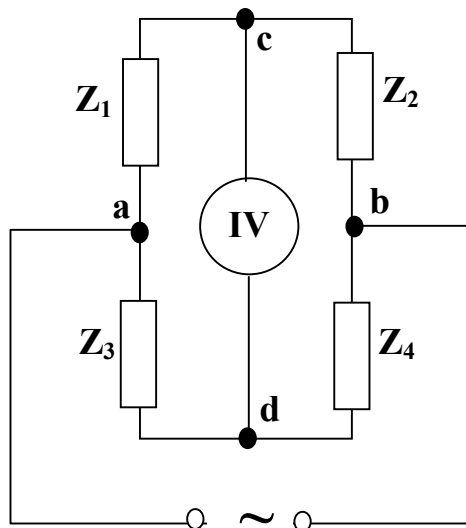
- väčšie hodnoty sekundárnych etalónov – sľudové dielektrikum

## **Meranie impedancií (4) - etalóny**

- **jednotka indukčnosti je naviazaná na jednotku kapacity a frekvencie (väčšia presnosť ako pri výpočte definovanej cievky)**
- **sekundárny etalón indukčnosti sú jedno- alebo viacvrstvové valcové alebo toroidálne cievky na kostre s rozmerovo stabilného materiálu – problematické je tienenie**
- **etalónové odporníky pre meranie odporu striedavým prúdom majú mať minimálnu a presne definovanú časovú konštantu  $\tau$ ; závislosť na frekvencii má byť zanedbateľná**  
**- riešenia pre rôzne frekvenčné pásma sú rôzne**

## Meranie impedancií (5) – mostíkové metódy

- mostíky Wheatstonovho typu a transformátorové mostíky
- W – mostík



$$I_{IV} = 0 \Rightarrow \bar{Z}_1 \cdot \bar{Z}_4 = \bar{Z}_2 \cdot \bar{Z}_3$$

$$\bar{Y}_1 \cdot \bar{Y}_4 = \bar{Y}_2 \cdot \bar{Y}_3$$

$$\bar{Z} = R_e(\bar{Z}) + j I_m(\bar{Z})$$

$$\left. \begin{aligned} R_e(\bar{Z}_1 \cdot \bar{Z}_4) &= R_e(\bar{Z}_2 \cdot \bar{Z}_3) \\ I_m(\bar{Z}_1 \cdot \bar{Z}_4) &= I_m(\bar{Z}_2 \cdot \bar{Z}_3) \end{aligned} \right\} \text{podmienka vyváženia}$$

$$\bar{Z} = Z \angle \varphi = Z e^{j\varphi}$$

$$(Z_1 \angle \varphi_1) \cdot (Z_4 \angle \varphi_4) = (Z_2 \angle \varphi_2) \cdot (Z_3 \angle \varphi_3)$$

$$\left. \begin{aligned} Z_1 \cdot Z_4 &= Z_2 \cdot Z_3 \\ \varphi_1 + \varphi_4 &= \varphi_2 + \varphi_3 \end{aligned} \right\} \text{podmienka vyváženia}$$

## Meranie impedancií (6)

- nie každý striedavý mostík sa dá vyvážiť; pri zvolení „nevhodných“ impedancií (L alebo C – charakteru) sa nemusí splniť fázová podmienka rovnováhy
- príklad  $\bar{Z}_1 = Z_1 \angle 60^\circ$  (indukčnosť)       $\bar{Z}_4 = Z_4 \angle 30^\circ$  (indukčnosť)  
 $\bar{Z}_2 = Z_2 \angle -90^\circ$  (kapacita)       $\bar{Z}_3 = Z_3 \angle 0^\circ$  (premenlivý odpor)  
 $\varphi_1 + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3 \Rightarrow 60^\circ + 30^\circ \neq -90^\circ + 0^\circ$  nevyvážitelný mostík
- $\bar{Z}_1$  je obvykle neznáma impedancia  $\bar{Z}_x$
- impedancie  $\bar{Z}_2, \bar{Z}_3, \bar{Z}_4$  volíme podľa charakteru meranej  $\bar{Z}_x$  (kapacitný alebo induktívny) a aby sme boli schopní mostík vyvážiť (splniť fázovú podmienku)
- rôzne zapojenia mostíkov – cvičenia, literatúra

## Meranie impedancií (7)

- wattmetrická metóda -  $\cos \varphi_x = \frac{P_W}{U_V \cdot I_A}$ ;  $Z_x = \frac{U_V}{I_A}$

- pri nezanedbateľnej spotrebe W-metra a V-metra treba korekcie na údaje W-metra a A-metra

- používame na meranie cievok s feromagnetickým jadrom. Treba merať pri určitej frekvencii a sýtení (rádovo  $10^\circ \text{A}$ ) – mostíky sú nepoužiteľné
- metóda troch V-metrov (bolo pri meraní výkonu)

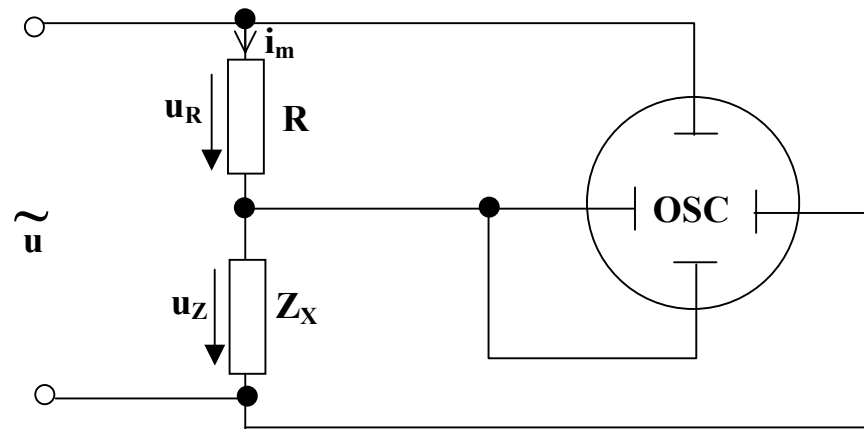
$$\cos \varphi_x = \frac{U^2 - U_N^2 - U_X^2}{2U_N \cdot U_X} \quad Z_x = \frac{U_X}{U_N} \cdot R_N$$

- metóda troch A-metrov (bolo pri meraní výkonu)

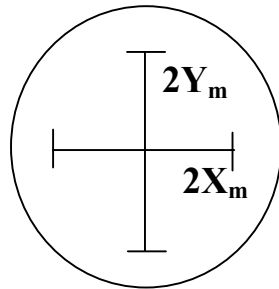
$$\cos \varphi_x = \frac{I^2 - I_N^2 - I_X^2}{2I_N \cdot I_X} \quad Z_x = \frac{I_N}{I_X} \cdot R_N$$

## Meranie impedancií (8)

- osciloskopická metóda – podobná 3-voltmetrovej metóde



- určenie veľkosti  $Z_X$ , citlivosti  $k_1$ , v smere osi  $x$  a  $k_2$  v smere osi  $y$  sú rovnaké  $\Rightarrow k_1 = k_2 = k$



pripojíme:

$$\text{len } U_R \Rightarrow 2Y_m = 2.k.I_m.R$$

$$\text{len } U_Z \Rightarrow 2X_m = 2.k.I_m.Z$$

$$\frac{2Y_m}{2X_m} = \frac{2.k.I_m.R}{2.k.I_m.Z} \Rightarrow Z = \frac{X_m}{Y_m}.R$$

## Meranie impedancií (9) – osciloskopická metóda

- meranie fázy – pripojíme súčasne  $U_R$  a  $U_Z$ , obecnne dostaneme na obrazovke elipsu, jej rovnica

$$x^2 \cdot Y_m^2 + y^2 \cdot X_m^2 - 2 \cdot x \cdot y \cdot X_m \cdot Y_m \cdot \cos \varphi = X_m^2 \cdot Y_m^2 \cdot \sin^2 \varphi$$

Odčítame:  $x_0, X_m, y_0, Y_m$

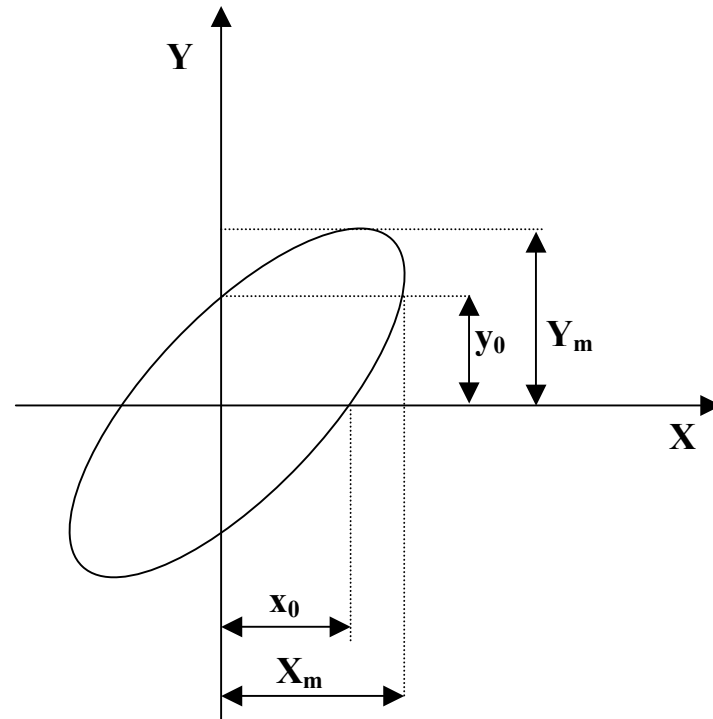
$$x = 0; \quad y = y_0 \Rightarrow y_0^2 = Y_m^2 \cdot \sin^2 \varphi$$

$$y_0 = Y_m \cdot \sin \varphi$$

$$y = 0; \quad x = x_0 \Rightarrow x_0^2 = X_m^2 \cdot \sin^2 \varphi$$

$$x_0 = X_m \cdot \sin \varphi$$

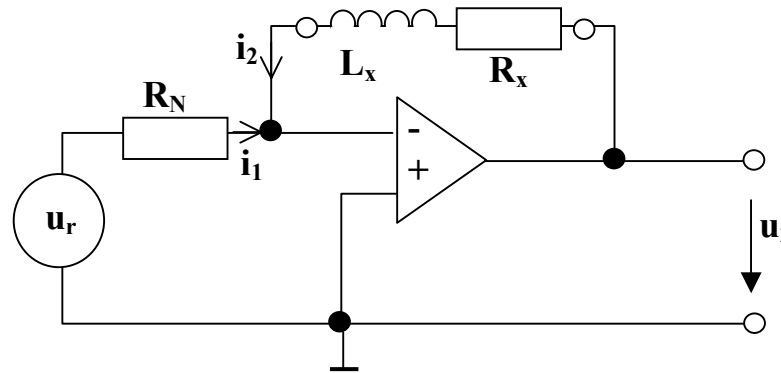
$$\sin \varphi = \frac{x_0}{X_m} = \frac{y_0}{Y_m}$$





## Číslicové meranie impedancií (1)

- prevodníky impedancia (admitancia) na fázor napätia ( $\dot{Z} \rightarrow \dot{U}$ ,  $\dot{Y} \rightarrow \dot{U}$ )
- ideálne operačné zosilňovače  $\dot{I}_1 + \dot{I}_2 = 0$



$$\frac{\dot{U}_r}{R_N} = -\frac{\dot{U}_z}{\dot{Z}_x}$$

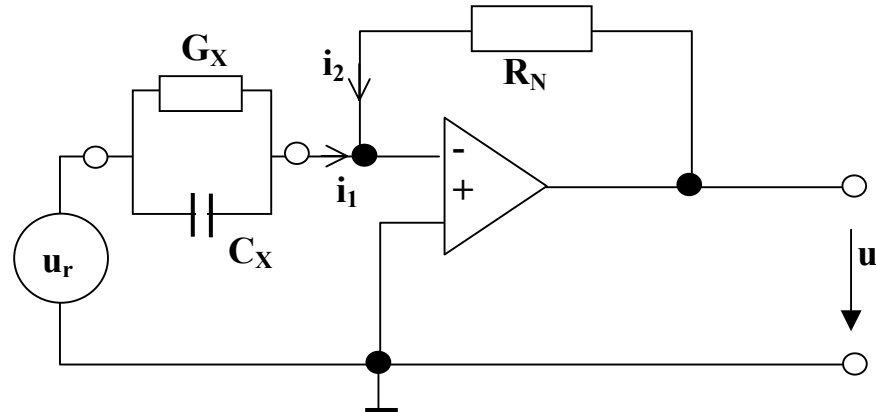
$$R_e(\dot{U}_2) \text{ je vo fáze s } \dot{U}_r \quad I_m(\dot{U}_2) \text{ je kolmá na } \dot{U}_r$$

$$\dot{Z}_x = R_x + j\omega L_x = -\frac{R_N}{U_r} \cdot R_e(\dot{U}_2) - j \frac{R_N}{U_r} \cdot I_m(\dot{U}_2)$$

$$R_x = -\frac{R_N}{U_r} \cdot R_e(\dot{U}_2) \quad L_x = -\frac{R_N}{\omega \cdot U_r} \cdot I_m(\dot{U}_2)$$

- $R_e(\dot{U}_2)$  a  $I_m(\dot{U}_2)$  meriame vektorvoltmetrom (meria veľkosť a fázú napätia),  $U_r$  pripojíme na referenčný vstup vektorvoltmetra

## Číslicové meranie impedancií (2)



$$\dot{U}_r \cdot \dot{Y} = -\frac{\dot{U}_2}{R_N}$$

$R_e(\dot{U}_2)$  je vo fáze s  $\dot{U}_r$

$I_m(\dot{U}_2)$  je kolmá na  $\dot{U}_r$

$$\dot{Y}_x = G_x + j\omega \cdot C_x$$

$$G_x = -\frac{R_E(\dot{U}_2)}{U_R \cdot R_N}; \quad L_x = -\frac{I_m(\dot{U}_2)}{\omega \cdot U_r \cdot R_N}$$

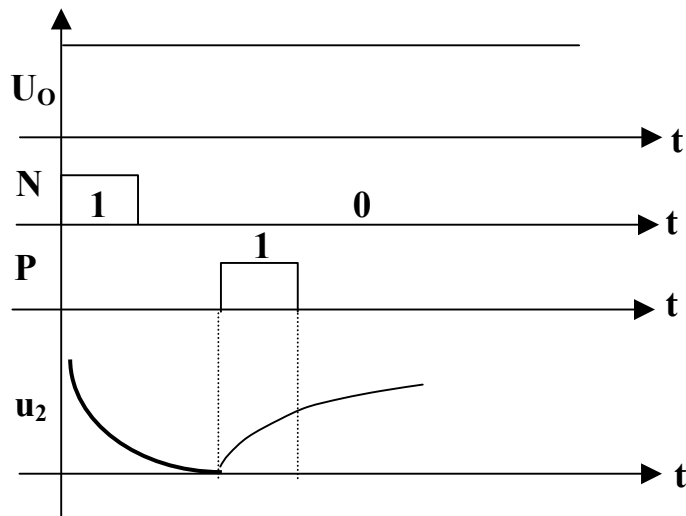
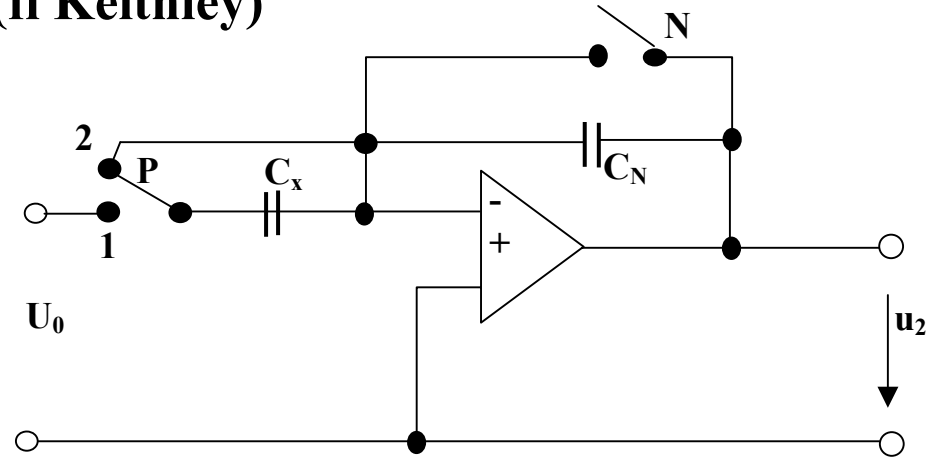
- $R_e(\dot{U}_2)$  a  $I_m(\dot{U}_2)$  meriame vektorvoltmetrom (meria veľkosť a fázu napätia),  $U_r$  pripojíme na referenčný vstup vektorvoltmetra

## **Číslicové meranie impedancií (3)**

- **v oboch prípadoch možno použiť 3-svorkové pripojenie meranej impedancie (admitancie) - parazitné kapacity neovplyvnia meranie**
- **pre meranie malých impedancií meranú impedanciu pripájame 4-svorkovo, obvykle napäťový úbytok na meranej impedancii zosilníme zosilňovačom, aby bol merateľný**

# Číslicové meranie impedancií (4)

- číslicový merač kapacity (fi Keithley)



\* viackrokové meranie

\* zopnutie N  $\rightarrow C_N$  sa vybije  $\rightarrow u_2 = 0$

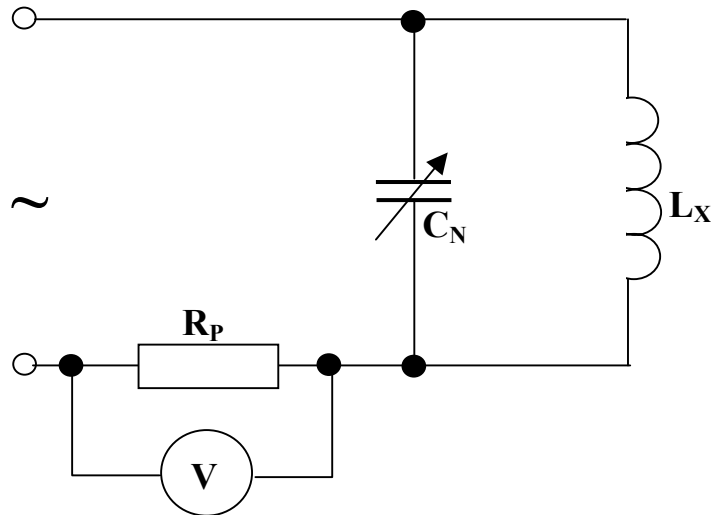
\* rozopneme N, P  $\rightarrow 1$ ,  $u_2 = U_0 \cdot C_x / C_N$

\*  $C_x = C_N \Rightarrow u_2 = U_0$

\*  $u_2$  odmeriame ČV

\*  $C_x = k \cdot u_2$

## Rezonančné metódy merania $L_x$ , $C_x$ – princíp



ideálna indukčnosť ( $R_x = 0$ )

možno zameniť  $C_N \rightarrow C_X$  a

$L_X \rightarrow L_N$

- ladíme pomocou zmeny  $C_N$ , kým  $\alpha_V$  je minimálna

$$- \omega L_x = \frac{1}{\omega C_N} \Rightarrow L_x = \frac{1}{\omega^2 C_N}$$

- použitie pri frekvenciách vyšších ako  $10^5$  Hz

- na podobnom princípe pracujú Q-metre

- možnosť použiť aj sériový rezonančný obvod

- využitie aj v tzv. rezonančných mostíkoch