



## 7.3 Merjenje upornosti

Meritve upornosti  $R = \frac{u(t)}{i(t)}$  praviloma izvajamo:

- pri **enosmernem** (konstantnem) toku in napetosti,
  - če nas zanima realna komponenta upora,
- pri **sinusnem** toku in napetosti,
  - če želimo določiti še **kapacitivnost in induktivnost** upora.





Pri merjenju se **električna energija** ( $u_R \cdot i_R$ ) pretvori v **toplotno**  
→ **spremeni se upornost**

- sistematični vpliv
  - pri **bakru** in ostalih kovinah je temperaturni koeficient:

$$\text{ca. } +0,4\% / \text{K}$$

- zlitina **manganin** ima temperaturni koeficient zelo majhen:

$$\text{ca. } +10^{-5} / \text{K}$$





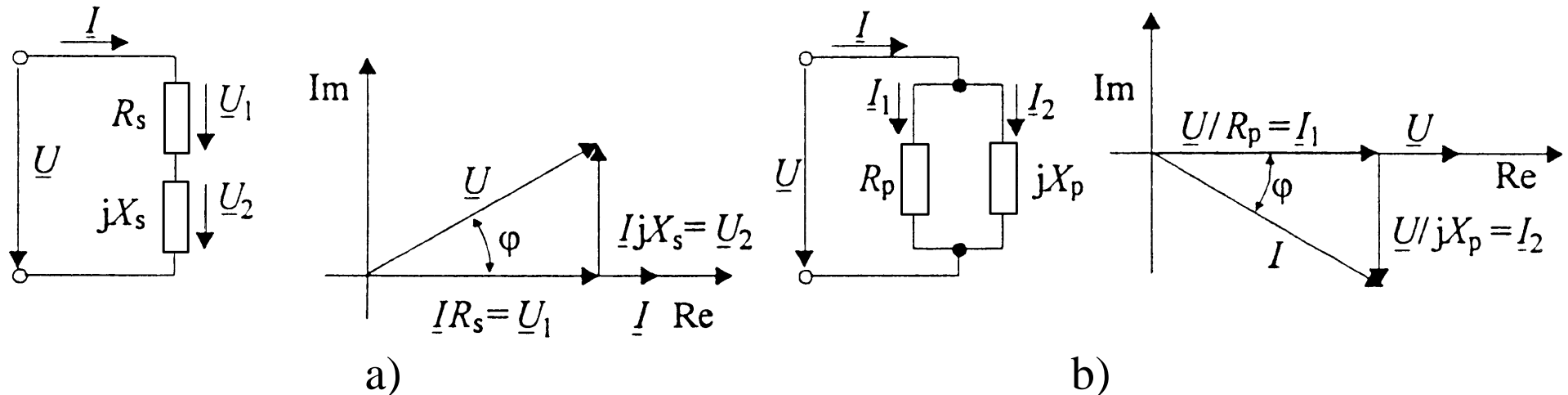
Upornost je lahko **odvisna od:**

- **napetosti** (varistor),
- **zunanje temperature** (termistor),
- **osvetljenosti** (fotoupor),
- **magnetne indukcije** (uporovna magnetna sonda),
- **frekvence** (kožni pojav),
- **specifične upornosti** (materialna lastnost),
- **dimenzij** itn.

Kadar ima upornost tudi **elektrolitičen značaj** (upornost tekočin, ozemljitvene upornosti itn.), jo merimo **z izmeničnim sinusnim tokom** (polarizacija elektrod).



- Upornost sestavljata:
- **realna ohmska** komponenta,
  - **in jalova upornost ali reaktanca.**



Slika 7.30 Nadomestni vezji pasivnega dvopola

Realno in imaginarno upornost povežemo v:

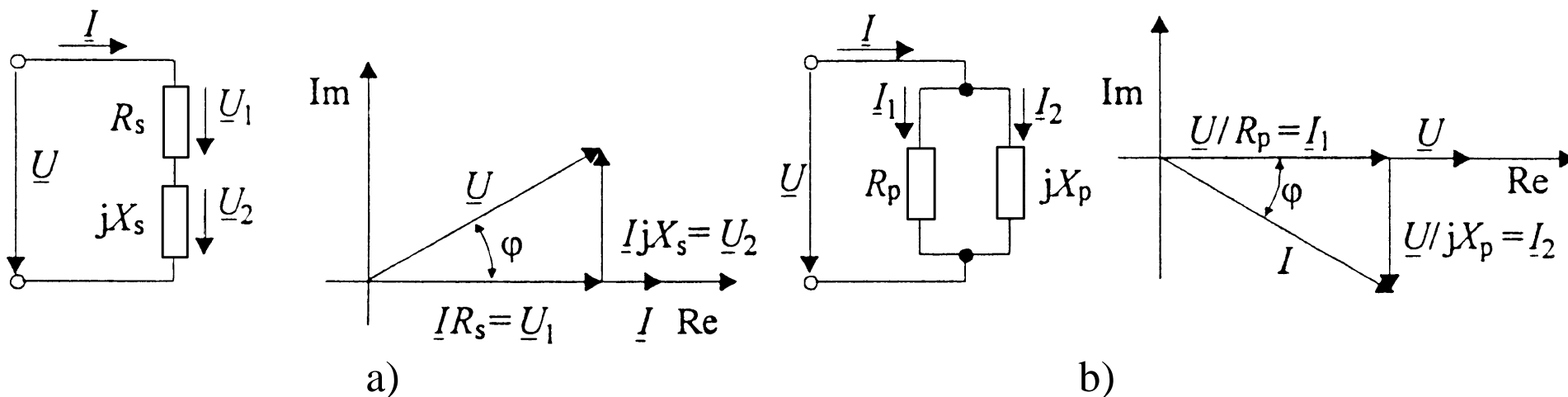
- **zaporedno** nadomestno vezavo (a):

$$U_1 = U \cos \varphi = IR_s \Rightarrow R_s = \frac{U \cos \varphi}{I} - \text{razmerje delovne komponente napetosti in toka.}$$

- **vzporedno** nadomestno vezavo (b):

$$I_1 = I \cos \varphi = U/R_p \Rightarrow R_p = \frac{U}{I \cos \varphi}$$





Slika 7.30 Nadomestni vezji pasivnega dvopola

### Preko moči:

$$\text{a) } R_s = \frac{U \cos \varphi}{I} \cdot \frac{I}{I} = \frac{P}{I^2}$$

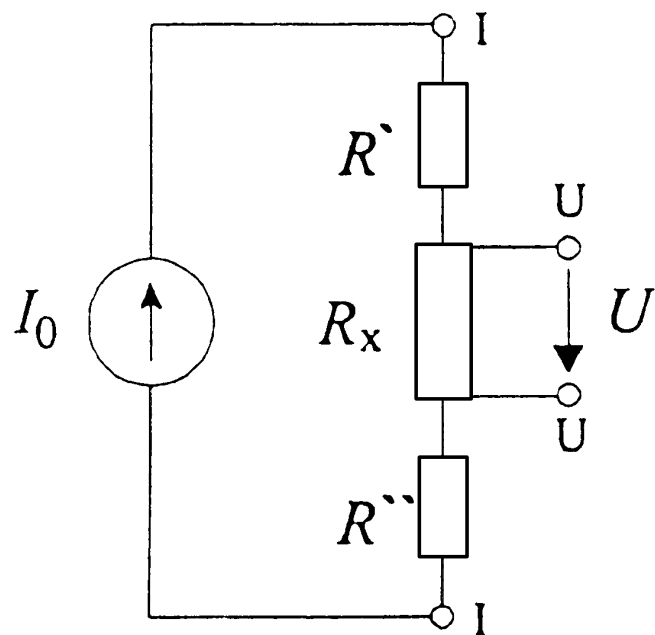
$$\text{b) } R_p = \frac{U}{I \cos \varphi} \cdot \frac{U}{U} = \frac{U^2}{P}$$



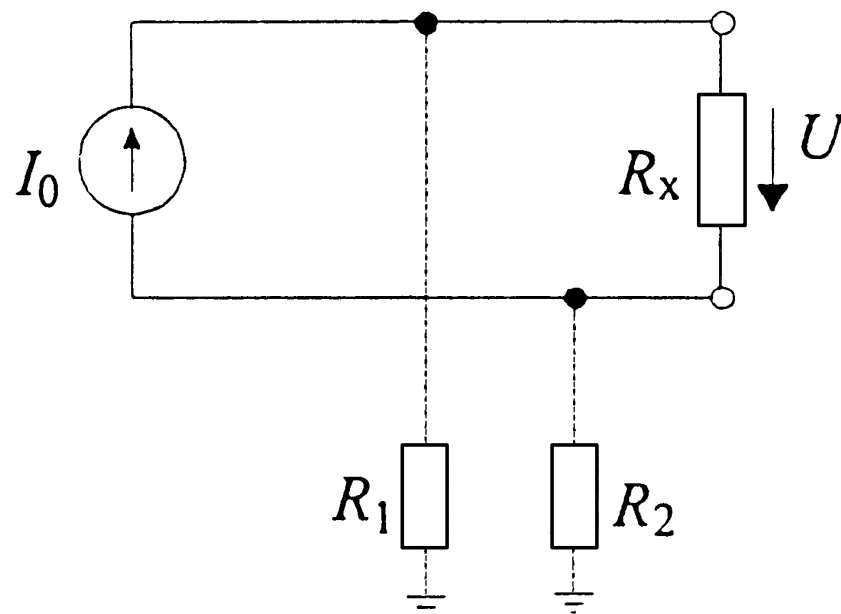


Pri merjenju (**majhnih!**) upornosti moramo biti pozorni na **upornost priključkov**:

- priključni vodniki,
  - prehodne upornosti stikov.
- Uporabljamo **tokovne in napetostne sponke**.
    - če ne uporabimo napetostnih sponk:  $R_x + R' + R''$



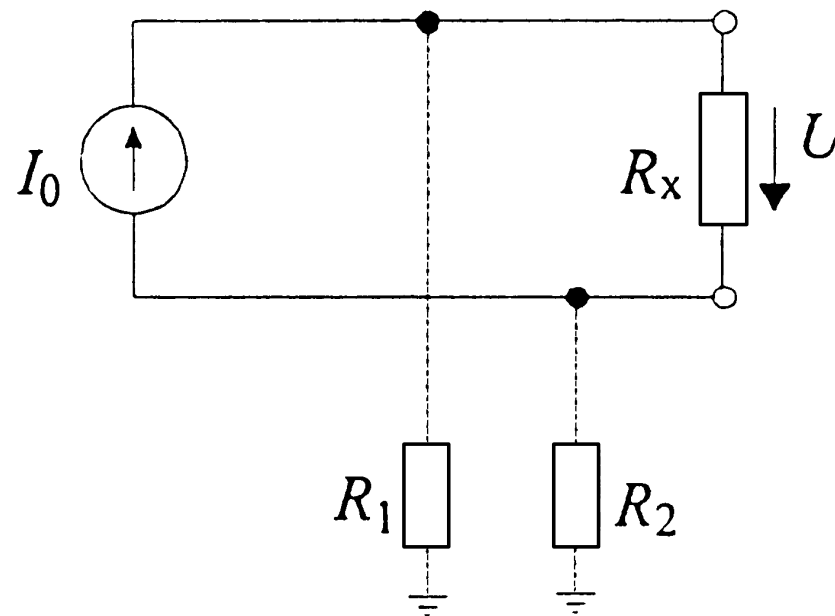
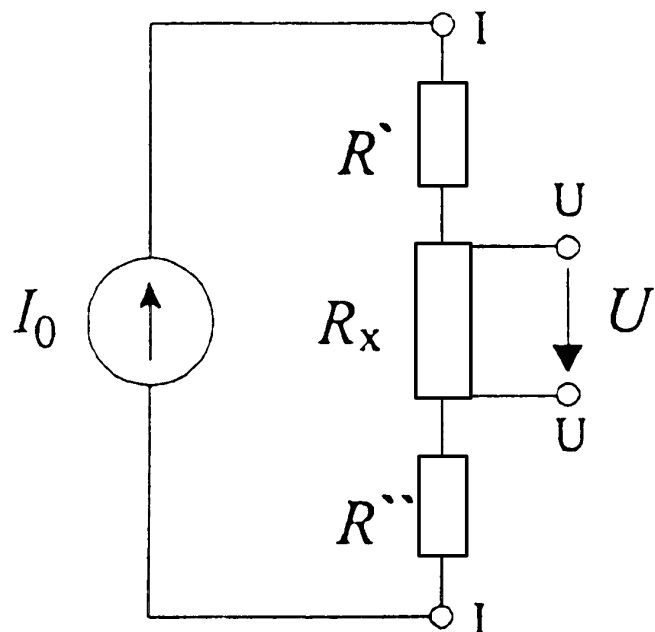
a)



b)

Slika 7.31 Posebnosti pri merjenju majhnih in velikih upornosti





Pri merjenju **velikih upornosti** moramo imeti dobro **galvansko ločitev od okolice** (zemlje).

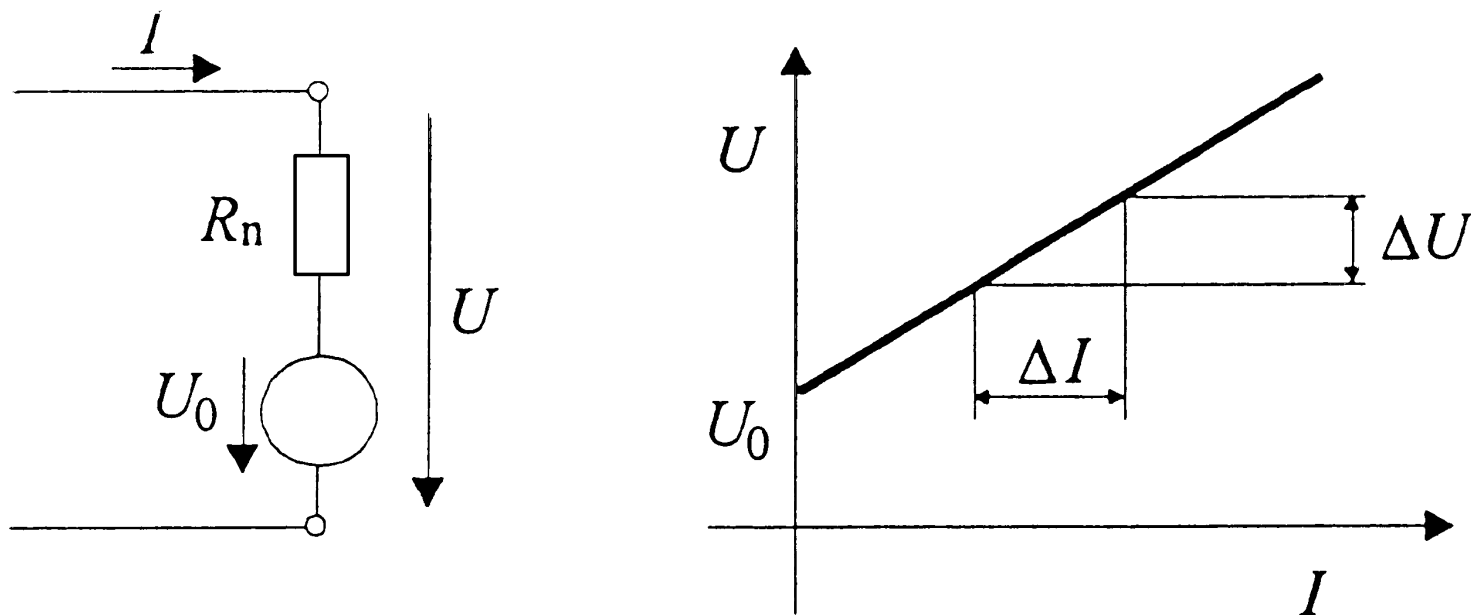
- velika izolacijska upornost  $R_1, R_2 \gg 1$ ,
- izolacijska upornost  $R_1 + R_2$  je vezana vzporedno k merjeni  $R_x$ .





Notranja upornost aktivnega dvopola je razmerje med:

- spremembo napetosti na sponkah,
- in pripadajočo spremembo toka.



Slika 7.32 Notranja upornost aktivnega dvopola

Za aktivni dvopol velja:  $U = U_0 + IR_n \Rightarrow dU = R_n dI$

**Notranja upornost:**  $R_n = \frac{\Delta U}{\Delta I}$

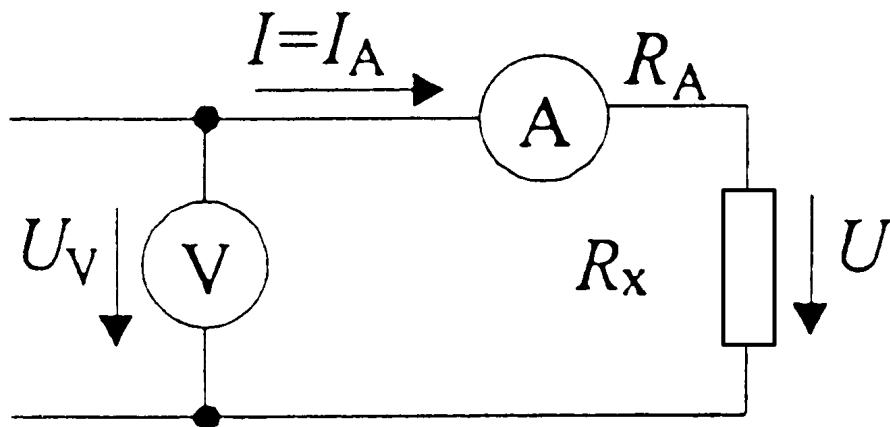




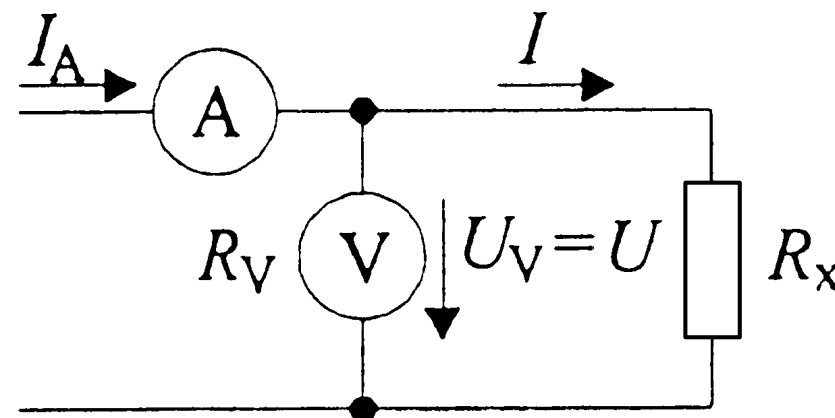
Metod za merjenje upornosti je veliko (mostična, U-I , ...)



## ***U-I* metoda merjenja upornosti**



a)



b)

Slika 7.33 *U-I* metoda merjenja upornosti

### **Varianta a:**

- tok je pravilen:  $I_A = I,$
- napetost je prevelika:  $U_V = U + IR_A$

Razmerje je **večje** kot  $R_x$ : 
$$\frac{U_V}{I_A} = \frac{U + IR_A}{I} = R_x + R_A$$





$$\frac{U_V}{I_A} = \frac{U + IR_A}{I} = R_x + R_A$$

- če upoštevamo samo  $U_V$  in  $I_A$ , je **sistematični pogrešek**:

$$R_i = \frac{U_V}{I_A} \Rightarrow e = \frac{U_V/I_A - R_x}{R_x} = \frac{R_A}{R_x}$$

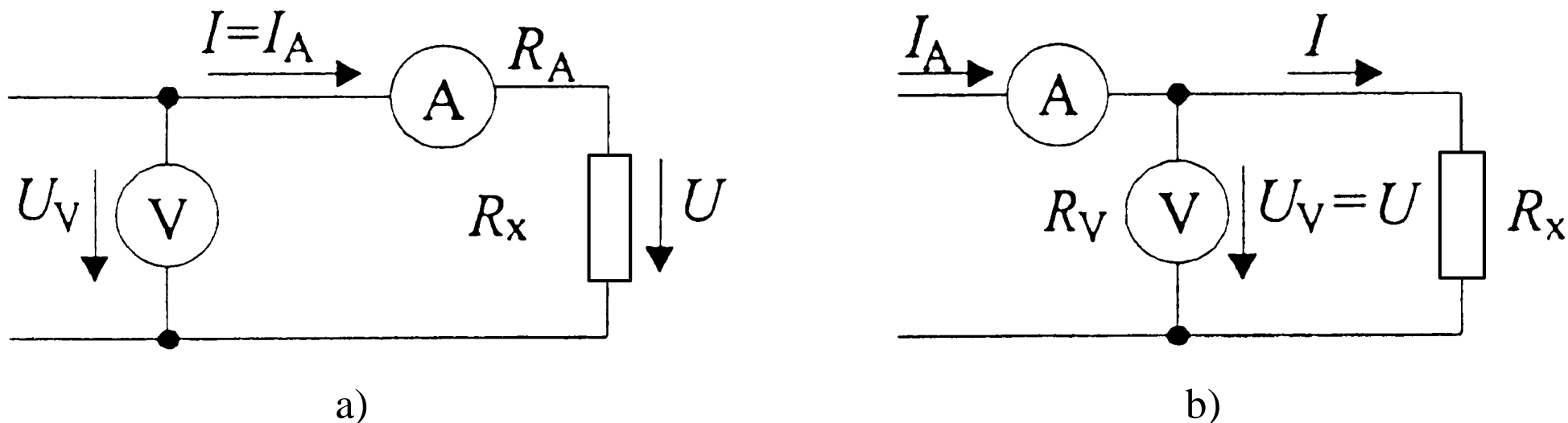
Ta metoda se uporablja za **merjenje velikih upornosti**,

- pogrešek ( $R_A$ ) je zanemarljiv.

Pri **zelo velikih upornostih** moramo upoštevati **dopustno obremenitev**  $I^2 R_x$ .

**Merilna negotovost** je odvisna od negotovosti pri merjenju napetosti in toka.





Slika 7.33  $U$ - $I$  metoda merjenja upornosti

### Varianta b:

- napetost je pravilna:  $U_V = U$ ,
- tok je prevelik:  $I_A = I + U_V / R_V$ ,

Razmerje je **manjše** kot  $R_x$ : 
$$\frac{U_V}{I_A} = \frac{R_x R_V}{R_x + R_V}$$





$$\frac{U_V}{I_A} = \frac{R_x R_V}{R_x + R_V}$$

- če upoštevamo samo  $U_V$  in  $I_A$ , je **sistematični pogrešek**:

$$R_i = \frac{U_V}{I_A} \Rightarrow e = \frac{U_V/I_A - R_x}{R_x} = -\frac{R_x}{R_x + R_V} \approx -\frac{R_x}{R_V}$$

Ta metoda se uporablja za **merjenje majhnih upornosti**,

- upornost  $R_V$  je praviloma dosti večja od  $R_x$ .

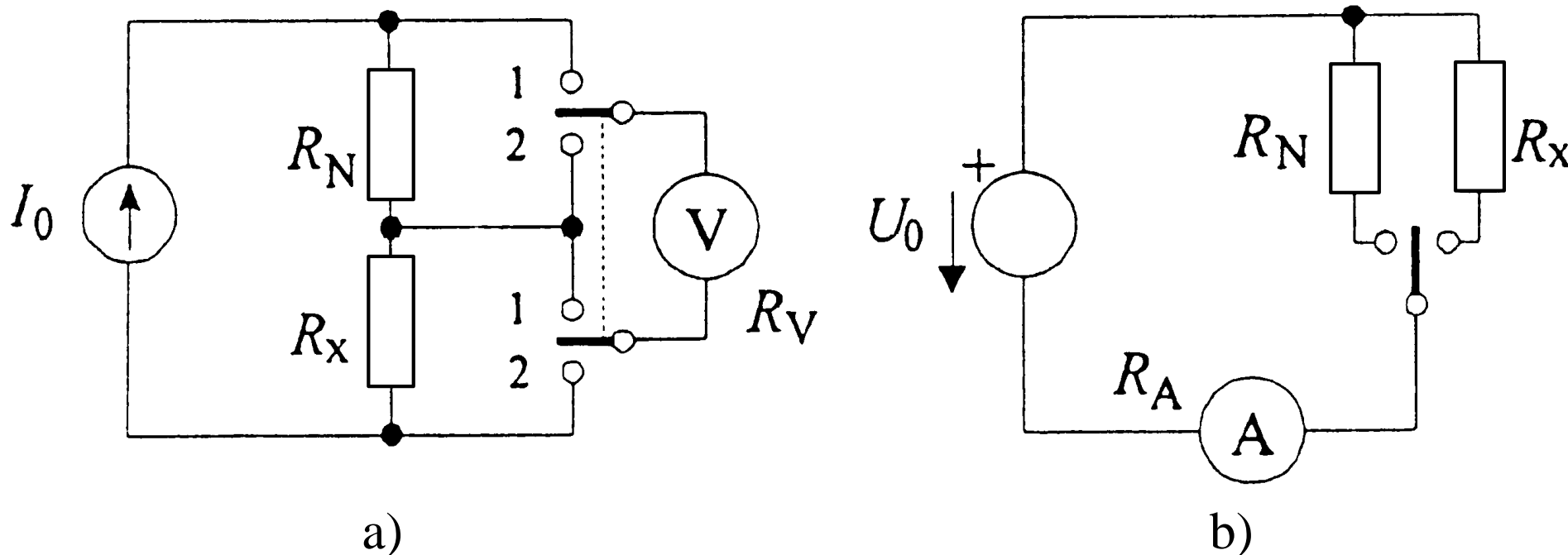
Pri **zelo majhnih upornostih** moramo upoštevati **dopustno obremenitev**  $U^2/R_x$ .

**Merilna negotovost** je odvisna od negotovosti pri merjenju napetosti in toka.





# Primerjalna metoda



Slika 7.34 Napetostna in tokovna primerjalna metoda

## Napetostna primerjalna metoda (a)

- Položaj 1-1:  $U_N = I_0 \frac{R_N R_V}{R_N + R_V}$ ,
- Položaj 2-2:  $U_x = I_0 \frac{R_x R_V}{R_x + R_V}$ .





Pri konstantnem  $I_0$ : 
$$R_x = R_N \frac{U_x}{U_N} \cdot \frac{1}{1 + (1 - U_x/U_N) R_N/R_V}$$

Če uporabimo izraz  $R_i = R_N \frac{U_x}{U_N}$ , 'pridelamo' sistematični pogrešek:

$$e = \frac{R_i - R_x}{R_x} \quad \text{oz.} \quad e = \frac{R_N}{R_V} \left( 1 - \frac{U_x}{U_N} \right)$$

$$\text{oz.} \quad e = \frac{R_N - R_x}{R_x + R_V} = \frac{R_N - R_x}{R_V}$$

- odločilno je razmerje razlike upornosti  $R_N - R_x$  proti upornosti voltmetra  $R_V$ .
  - primerna za **merjenje majhnih upornosti**.





## Merilna negotovost napetostne primerjalne metode

Če izvedemo primerjavo **z istim voltmetrom**, lastni **pogrešek  $E$  ne vpliva na negotovost**, kadar sta upornosti (napetosti) blizu skupaj:

$$R_N \approx R_x \quad \Leftrightarrow \quad U_x / U_N - 1 \approx 0,01$$

Pogreška voltmetra  $E$  ne poznamo, vendar se v kvocientu njegov vpliv izloči:

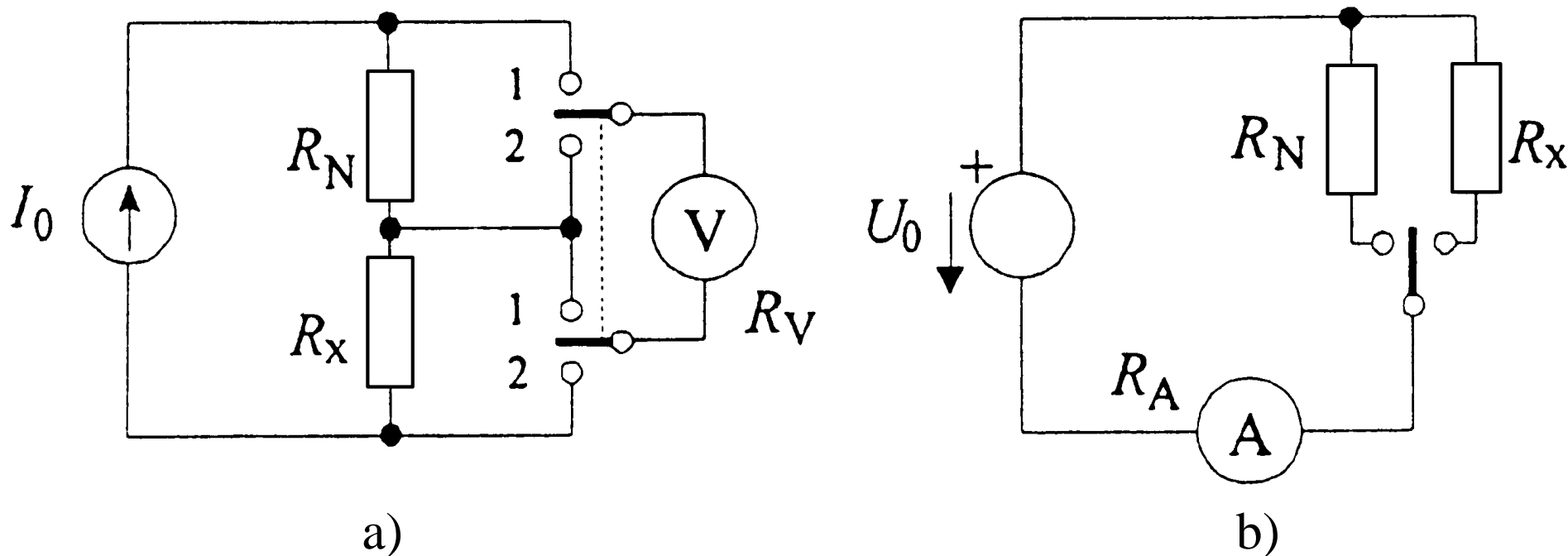
$$R_i = R_N \frac{U_x - E}{U_N - E} = R_N \frac{U_x}{U_N} \cdot \frac{1 - E/U_x}{1 - E/U_N} \approx R_N \frac{U_x}{U_N}$$

**Primer:**  $U_x = 1,025 \text{ V}$  in  $U_N = 1,018 \text{ V}$ ,  $E = 0,015 \text{ V}$

$$\frac{U_x - E}{U_N - E} = \frac{1,025 \text{ V} - 0,015 \text{ V}}{1,018 \text{ V} - 0,015 \text{ V}} = 1,0070$$

$$\frac{U_x}{U_N} = \frac{1,025 \text{ V}}{1,018 \text{ V}} = 1,0069 \quad - \text{ samo za } 0,01\% \text{ manj!} \quad \Leftrightarrow \quad e = 1,5\%$$





Slika 7.34 Napetostna in tokovna primerjalna metoda

### Tokovna primerjalna metoda (b)

- čez upor  $R_N$  teče tok: 
$$I_N = \frac{U_0}{R_N + R_A}$$
- čez upor  $R_X$  teče tok: 
$$I_X = \frac{U_0}{R_X + R_A}$$





Pri konstantni napetosti  $U_0$ :  $R_x = R_N \frac{I_N}{I_x} \left[ 1 + \frac{R_A}{R_N} \left( 1 - \frac{I_x}{I_N} \right) \right]$

Če uporabimo izraz:  $R_i = R_N \frac{I_N}{I_x}$ ,

- ‘pridelamo’istematični pogrešek:

$$e = \frac{G_x - G_N}{G_A + G_N} \approx \frac{G_x - G_N}{G_A}$$

Primerjanje je tem bolj točno, čim bliže sta si merjeni veličini!

Če je etalon  $R_N$  spremenljiv in vzpostavimo  $I_x = I_N$ , se metoda spremeni **zamenjalno** ( $R_A$  nepomembna)!

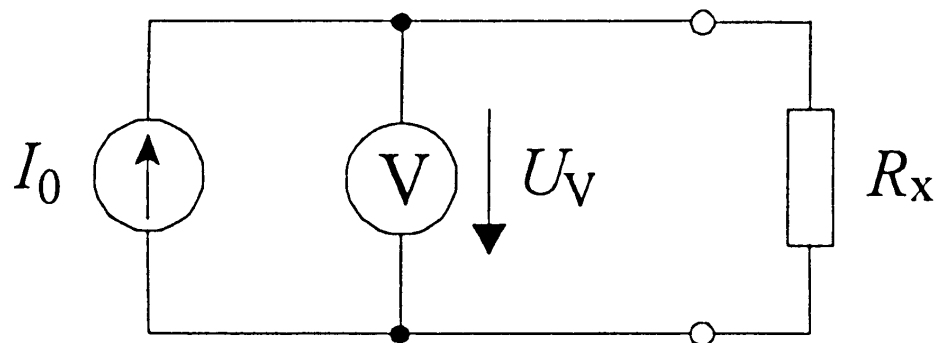




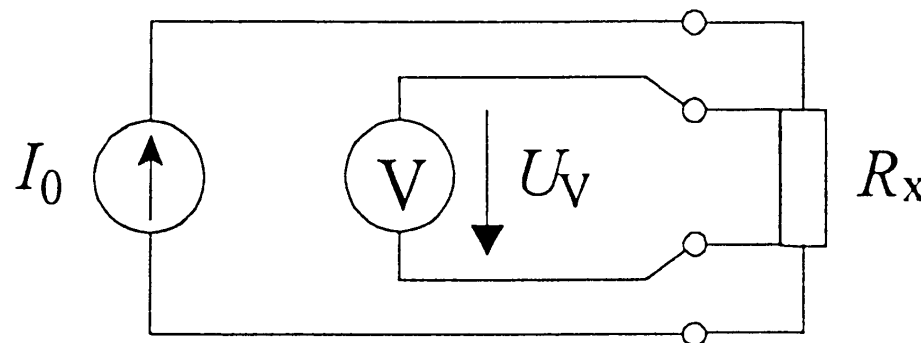
# Merjenje upornosti z voltmetrom in tokovnim virom

Uporablja se pri digitalnih multimetrih ( $R_V > R_x$ ):

$$U_V = I_0 \frac{R_x R_V}{R_x + R_V} = I_0 R_x \frac{1}{1 + R_x/R_V} \approx I_0 R_x$$



a)



b)

Slika 7.35 Dvovodna in štirivodna priključitev ohmometra s tokovnim virom

**Območje ohmetra** se spreminja s tokom  $I_0$ :

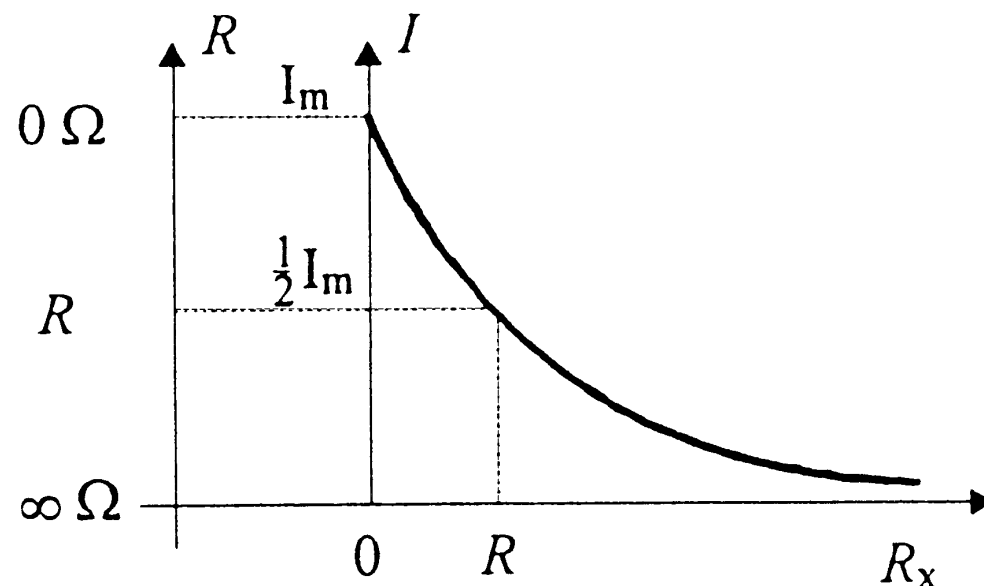
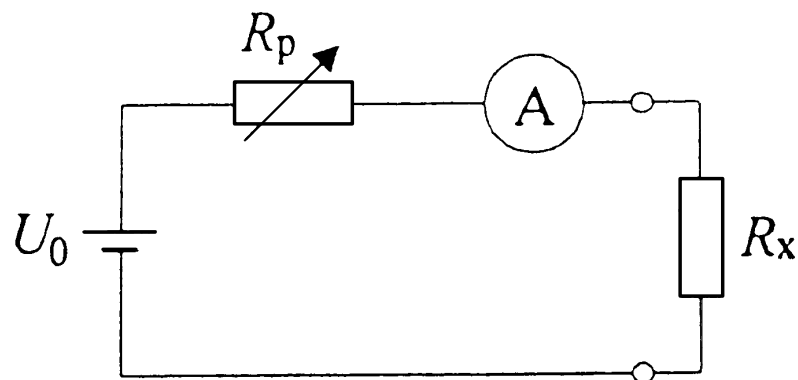
- npr.: merilno območje voltmetra je  $(0 \div 200) \text{ mV}$ ;
  - pri  $I_0 = 1 \mu\text{A}$  je merilno območje  $(0 \div 200) \text{ k}\Omega$ ,
  - pri  $I_0 = 10 \mu\text{A}$  je merilno območje  $(0 \div 20) \text{ k}\Omega$ ,





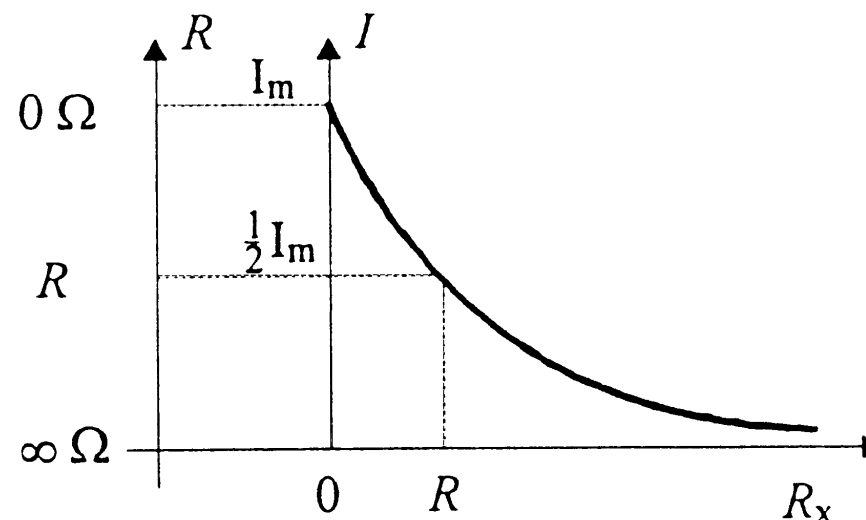
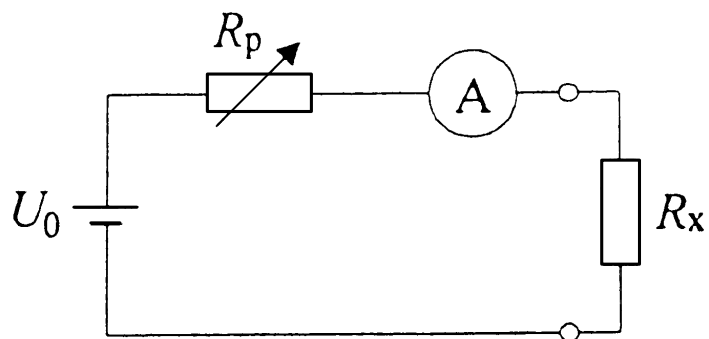
**Klasični instrumenti** z vrtljivo tuljavico ima namesto tokovnega vira galvanski člen.

- pri **majhnih upornostih** je instrument vezan **kot voltmeter**,
- pri **velikih upornostih** je instrument vezan **kot ampermeter**.



Slika 7.36 Ohmmeter za merjenje večjih upornosti





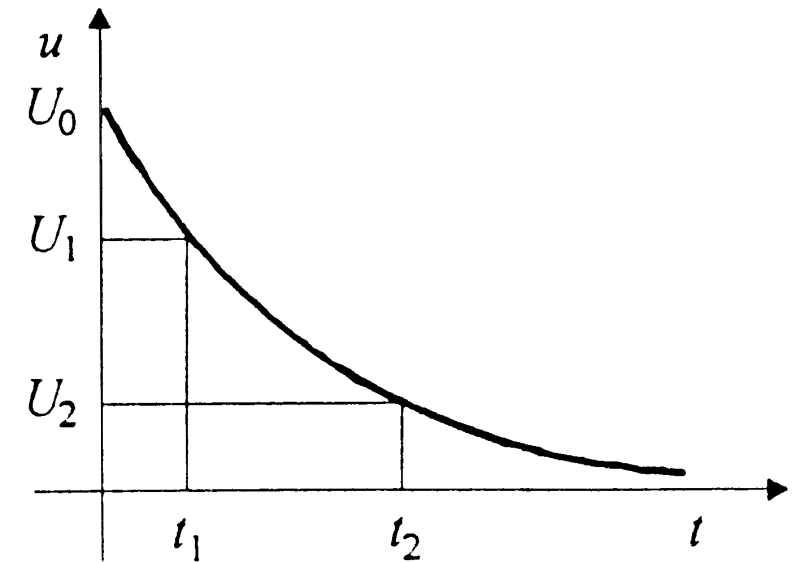
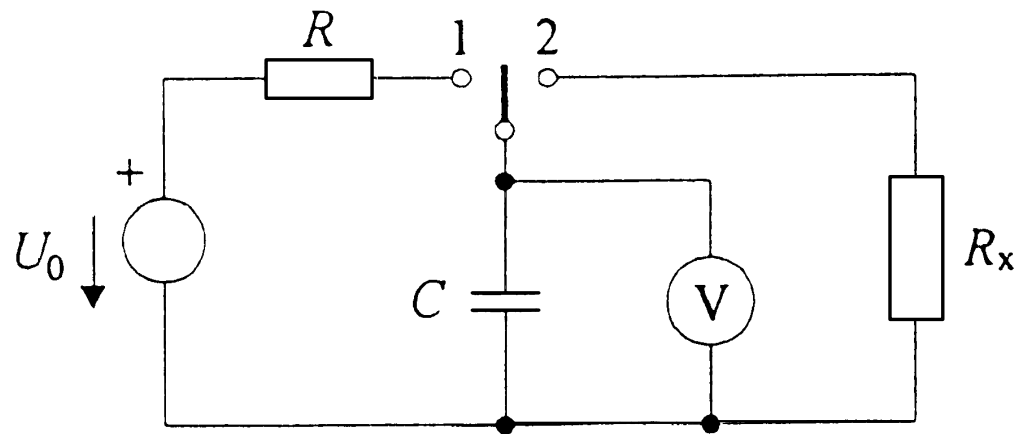
Ker napetost  $U_0$  ni stalna, moramo ohmmeter pred meritvijo **nastaviti**:

- sponke kratko **sklenemo** ( $R_x = 0\Omega$ ) in
  - nastavimo maksimalni tok  $I_m$  z  $R_p$ ,  $\Rightarrow$  oznaka  $0\Omega$ .
- sponke **razklenemo**,  $\Rightarrow$  oznaka  $\infty\Omega$ .
- če priključimo **neznano upornost**  $R_x$ , steče tok: 
$$I = \frac{U_0}{R + R_x}$$
- skala je **hiperbolična**.



# Metoda praznenja kondenzatorja

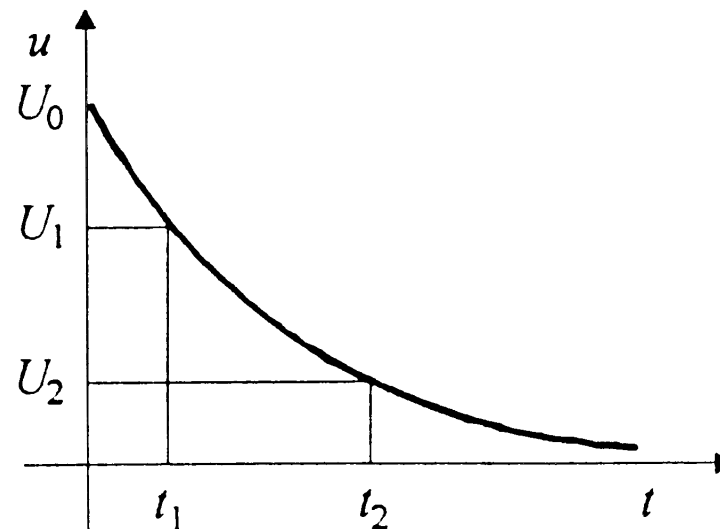
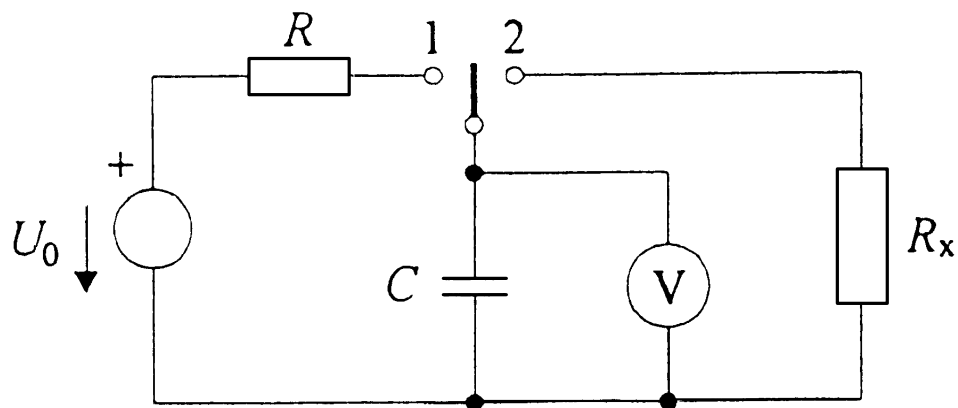
Primerna za velike upornosti.



Slika 7.37 Metoda praznenja kondenzatorja

- položaj 1: kondenzator **se nabije** na napetost  $U_0$ .
- položaj 2: kondenzator **se začne prazniti** pretežno preko  $R_x$  (izolacijska upornost in  $R_V$  zelo veliki).
  - v času  $t_1$ :  $U_1 = U_0 e^{-t_1/R_x C}$ ;
  - v času  $t_2$ :  $U_2 = U_0 e^{-t_2/R_x C}$





**Neznana upornost je:**  $R_x = \frac{t_2 - t_1}{C \ln U_1 / U_2} \iff \begin{cases} U_1 = U_0 e^{-t_1 / R_x C} \\ U_2 = U_0 e^{-t_2 / R_x C} \end{cases}$

Če izolacijske upornosti in  $R_V$  **ne moremo zanemariti:**

- prva meritev brez  $R_x$ :  $R_1 = R_i \parallel R_V$ ,
- druga meritev z  $R_x$ :  $R_2 = R_1 \parallel R_x$ ,
- **neznana upornost je:**  $R_x = \frac{R_1 R_2}{R_1 - R_2}$ .

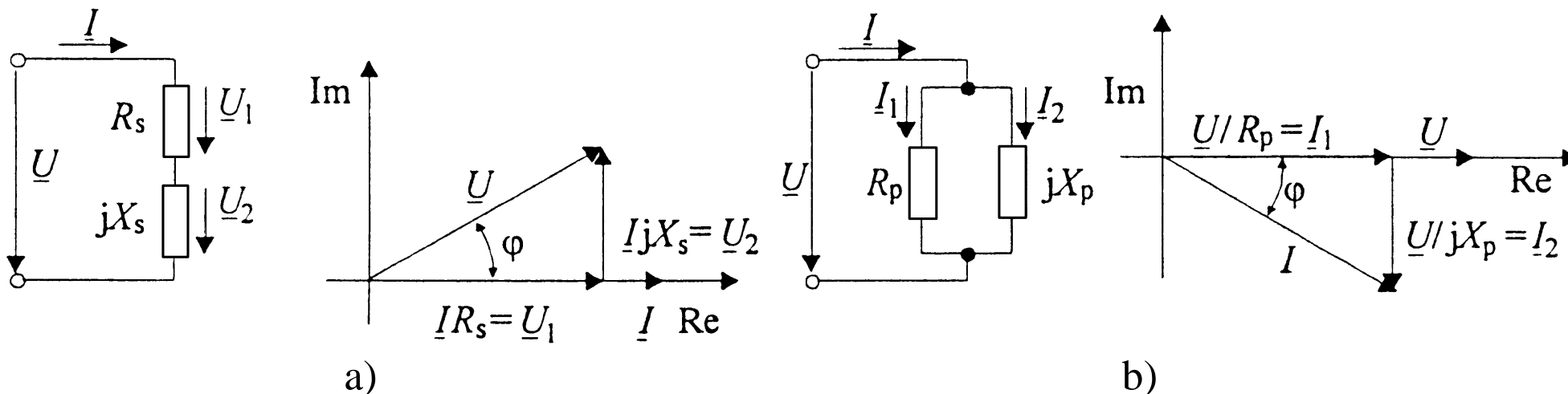




## 7.4 Merjenje induktivnosti

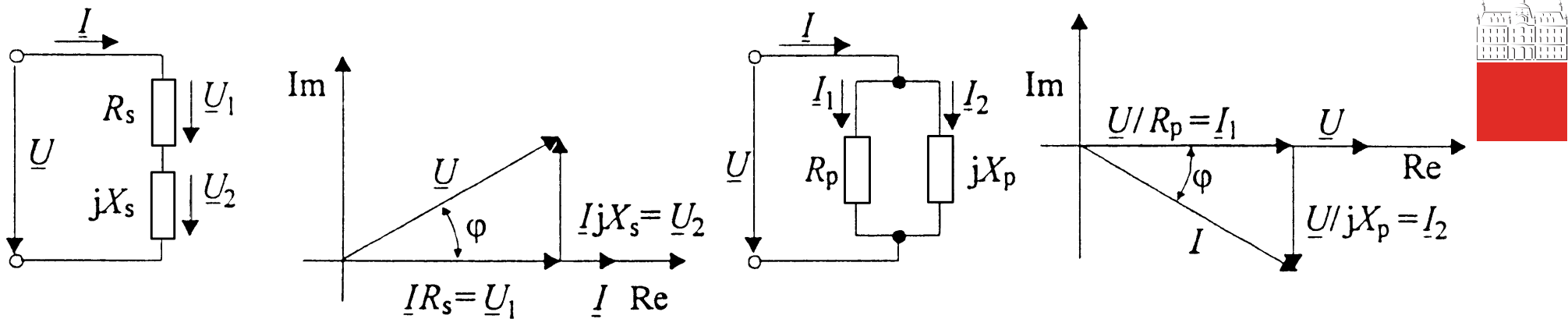
**Induktivnost** (idealne tuljave) je **razmerje** med **napetostjo** in **časovnim odvodom toka**.

- Meritve izvajamo **pri sinusni obliki toka**.
- Določimo jo **iz reaktance**, ker je realno vedno prisotna še ohmska upornost.



Slika 7.30 Nadomestni vezji pasivnega dvopola





**Serijsko nadomestno vezje (a):**

$$U_2 = U \sin \varphi = IX_s = I\omega L_s \quad \Rightarrow \quad L_s = \frac{U \sin \varphi}{\omega I}$$

- izmerimo **jalovo** komponento **napetosti**, tok in frekvenco.

**Paralelno nadomestno vezje (b):**

$$I_2 = I \sin \varphi = \frac{U}{X_p} = \frac{U}{\omega L_p} \quad \Rightarrow \quad L_p = \frac{U}{\omega I \sin \varphi}$$

- izmerimo napetost, **jalovo** komponento **toka** in frekvenco.







## Merjenje **preko moči**:

Iz **zaporedne** nadomestne vezave z  $L_s = \frac{U \sin \varphi}{\omega I}$  dobimo:

$$L_s = \frac{U \sin \varphi}{\omega I} \cdot \frac{I}{I} = \frac{Q}{\omega I^2} = \frac{\sqrt{(UI)^2 - P^2}}{\omega I^2}$$

- izmerimo **jalovo moč**, tok in frekvenco,
- izmerimo **delovno moč**, tok, napetost in frekvenco,

Iz **vzporedne** nadomestne vezave z  $L_p = \frac{U}{\omega I \sin \varphi}$  dobimo:

$$L_p = \frac{U}{\omega I \sin \varphi} \cdot \frac{U}{U} = \frac{U^2}{\omega Q} = \frac{U^2}{\omega \sqrt{(UI)^2 - P^2}}$$

- izmerimo **jalovo moč**, napetost in frekvenco,
- izmerimo **delovno moč**, tok, napetost in frekvenco,





Če poznamo upornost pri **serijski vezavi**:

$$L_s = \frac{1}{\omega} \sqrt{\left(\frac{U}{I}\right)^2 - \left(\frac{P}{I^2}\right)^2} = \frac{1}{\omega} \sqrt{\left(\frac{U}{I}\right)^2 - R_s^2}$$

- izmerimo neposredno **napetost, tok**, frekvenco,
- $R_s$  zmerimo **po U-I metodi**, če ni feromagnetnega jedra.

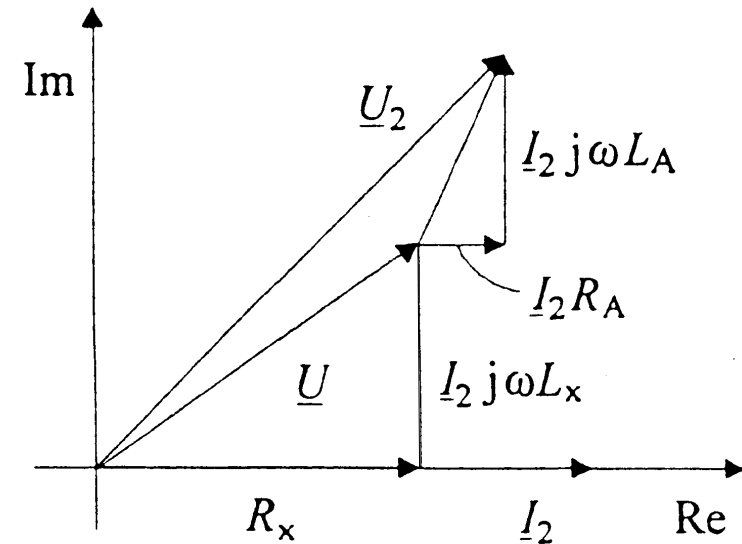
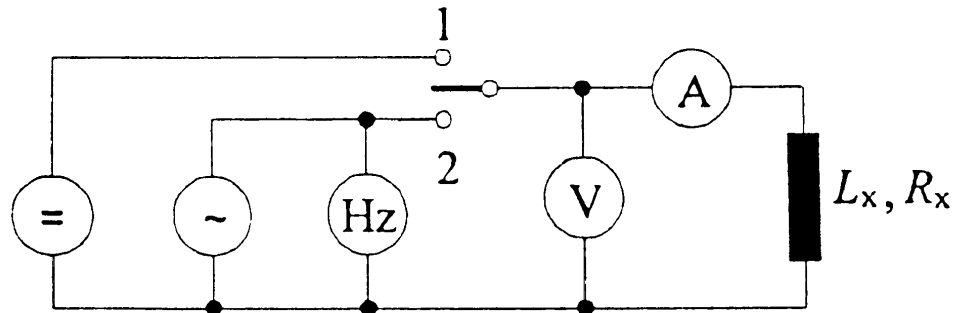
V praksi prevladuje **serijsko nadomestno vezje**.

**Faktor kvalitete  $Q$**  tuljave je **razmerje jalove moči z delovno**.

- **serijsko nadomestno vezje:**  $Q = \frac{I^2 \omega L_s}{I^2 R_s} = \frac{\omega L_s}{R_s}$
- **paralelno nadomestno vezje:**  $Q = \frac{U^2 / \omega L_p}{U^2 / R_p} = \frac{R_p}{\omega L_p}$



# $U$ - $I$ metoda merjenja induktivnosti brez feromagnetnega jedra



Slika 7.38  $U$ - $I$  metoda merjenja induktivnosti

- v položaju **1** merimo z **enosmernim virom**  $\rightarrow U_1, I_1$ :

$$\frac{U_1}{I_1} = R_x + R_A,$$

- v položaju **2** merimo s **sinusnim virom**  $\rightarrow U_2, I_2$ :

$$\frac{U_2}{I_2} = (R_x + R_A) + j\omega(L_x + L_A)$$





$$\frac{U_1}{I_1} = R_x + R_A \quad \frac{U_2}{I_2} = (R_x + R_A) + j\omega(L_x + L_A)$$

Razmerje amplitud:  $\frac{U_2}{I_2} = Z = \sqrt{(R_x + R_A)^2 + \omega^2(L_x + L_A)^2}$

Potrdimo enačbo  $L_s = \frac{1}{\omega} \sqrt{\left(\frac{U}{I}\right)^2 - R_s^2}$ :

$$L_x = \frac{1}{\omega} \sqrt{\left(\frac{U_2}{I_2}\right)^2 - \left(\frac{U_1}{I_1}\right)^2} - L_A$$

- induktivnost ampermetra  $L_A$  je ponavadi zanemarljiva
- če je  $R_v \gg R_x$ , priklopimo **voltmeter neposredno**.

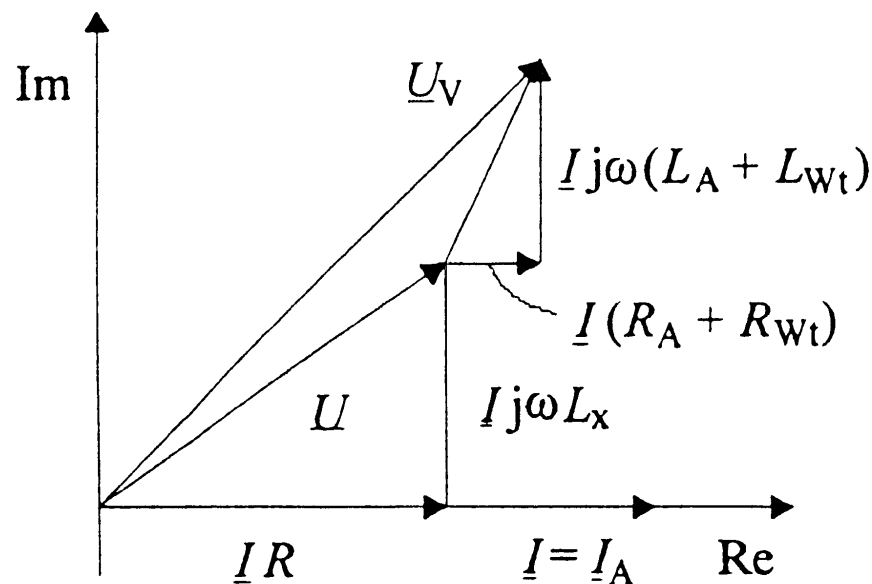
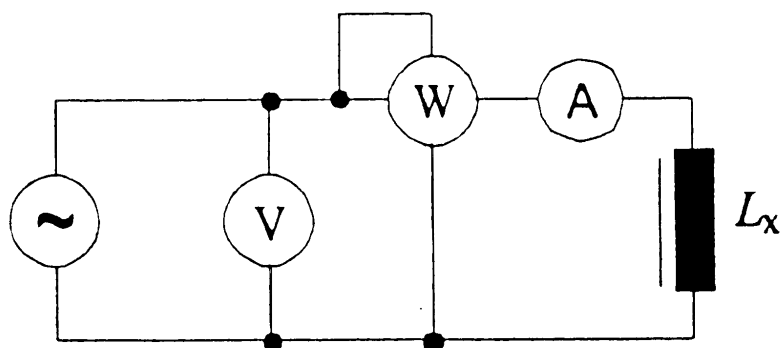




# ***P-U-I* metoda merjenja induktivnosti s feromagnetnim jedrom**

Del upornosti, ki ponazarja **izgube v feromagnetiku pri izmeničnem magnetenju**, merimo preko moči:

$$L_s = \frac{\sqrt{(UI)^2 - P^2}}{\omega I^2}$$



Slika 7.39 *P-U-I* metoda merjenja induktivnosti

$$L_x = \frac{\sqrt{(U_V I_A)^2 - P_W^2}}{\omega I_A^2} - (L_A + L_{Wt})$$





$$L_x = \frac{\sqrt{(U_V I_A)^2 - P_W^2}}{\omega I_A^2} - (L_A + L_{Wt})$$

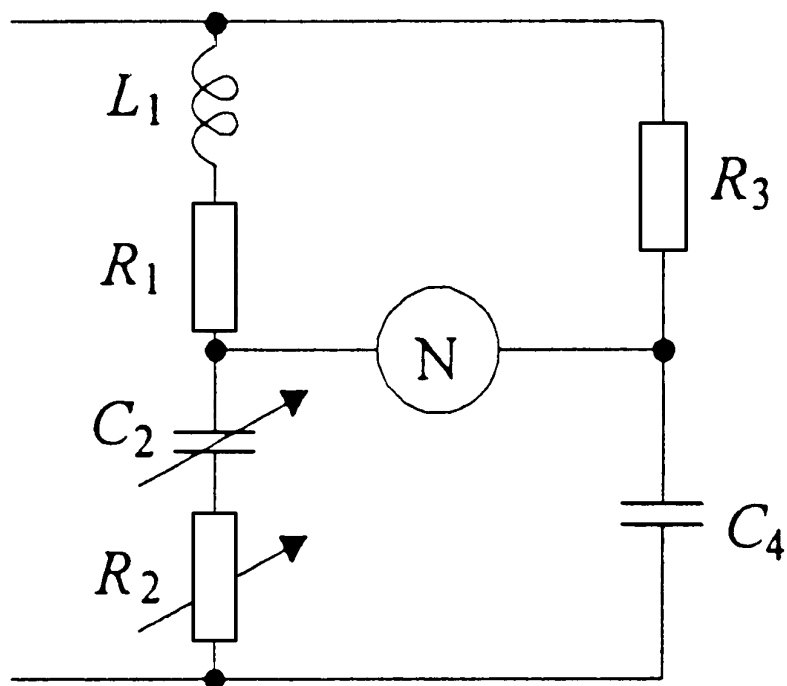
- $L_A + L_{Wt}$  sta vezana zaporedno k  $L_x$

Ker **permeabilnost ni stalna** (nelinearen odnos med  $B$  in  $H$ ), je induktivnost tuljave **odvisna od vrednosti toka**.

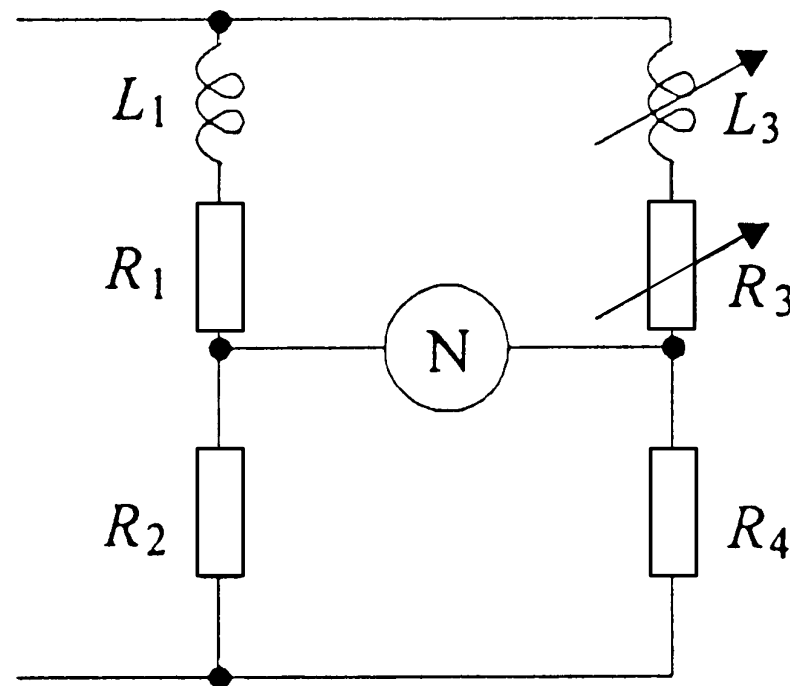
- Pri merjenju induktivnosti s **feromagnetnim jedrom moramo biti pozorni na obliko in velikost toka!**



# Mostična merjenja induktivnosti



a)



b)

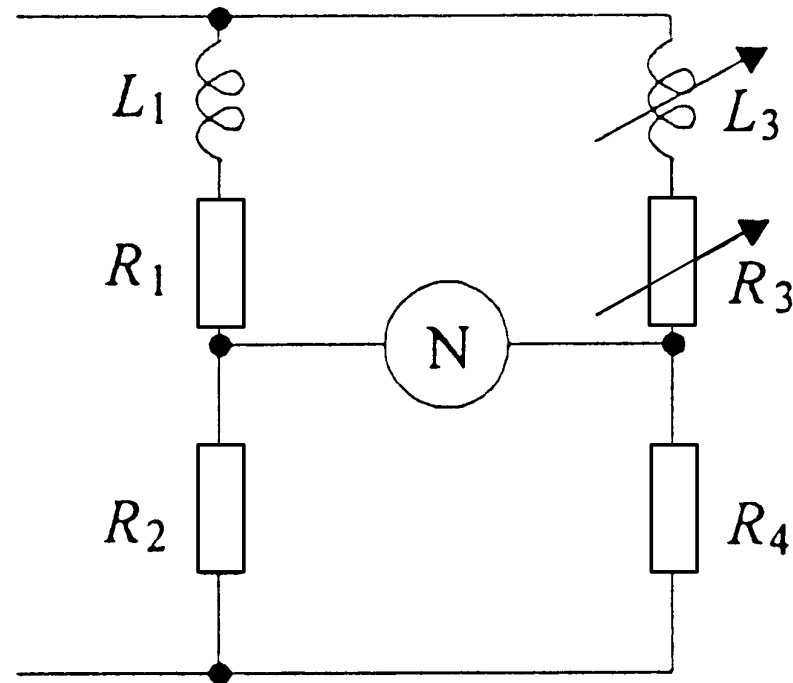
Slika 6.10 Owen in Maxwellov mostič

**Owenv mostič (a):**  $\underline{Z}_1 = R_x + j\omega L_x$

- ravnovesna enačba:  $R_x + j\omega L_x = j\omega R_3 C_4 \left( R_2 + \frac{1}{j\omega C_2} \right)$

$$R_x = R_3 C_4 / C_2, \quad L_x = R_2 R_3 C_4, \quad Q = \omega R_2 C_2$$





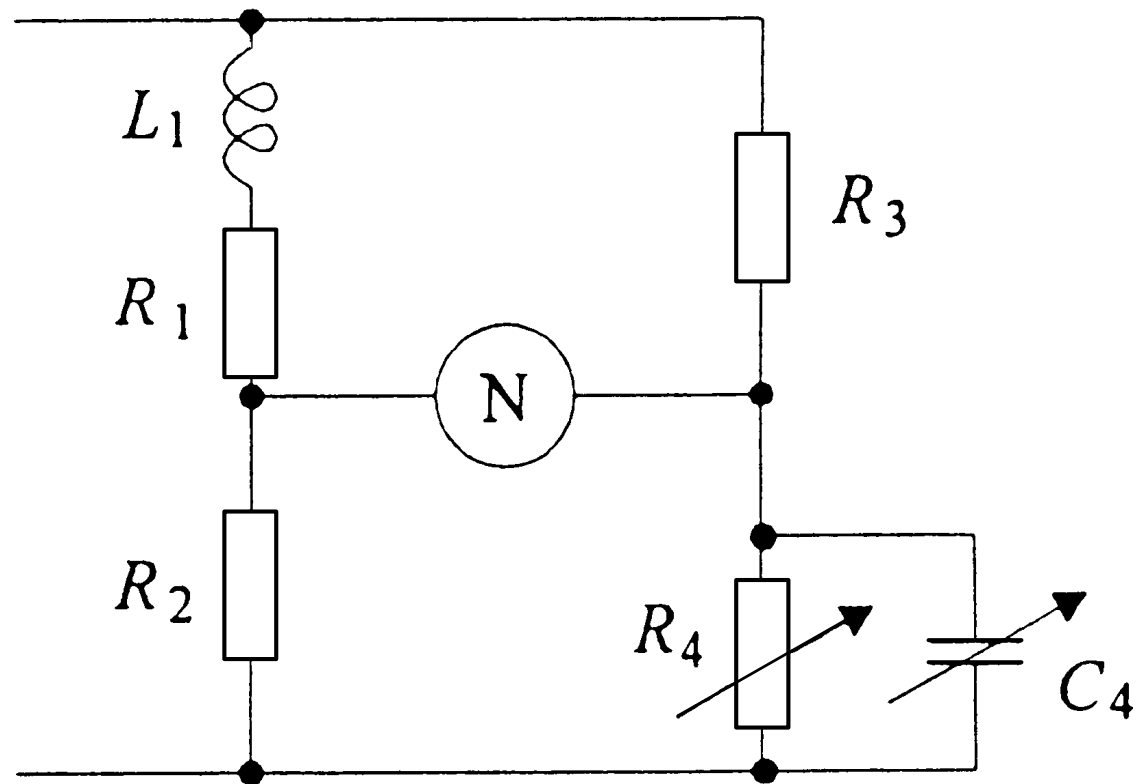
**Maxwellov mostič (b):**  $\underline{Z}_1 = R_x + j\omega L_x$

- ravnovesna enačba:  $R_x + j\omega L_x = \frac{R_2}{R_4} (R_3 + j\omega L_3)$

$$R_x = R_2 R_3 / R_4, \quad L_x = L_3 R_2 / R_4, \quad Q = \omega L_3 / R_3$$







Slika 6.11 Maxwell-Wienov mostič

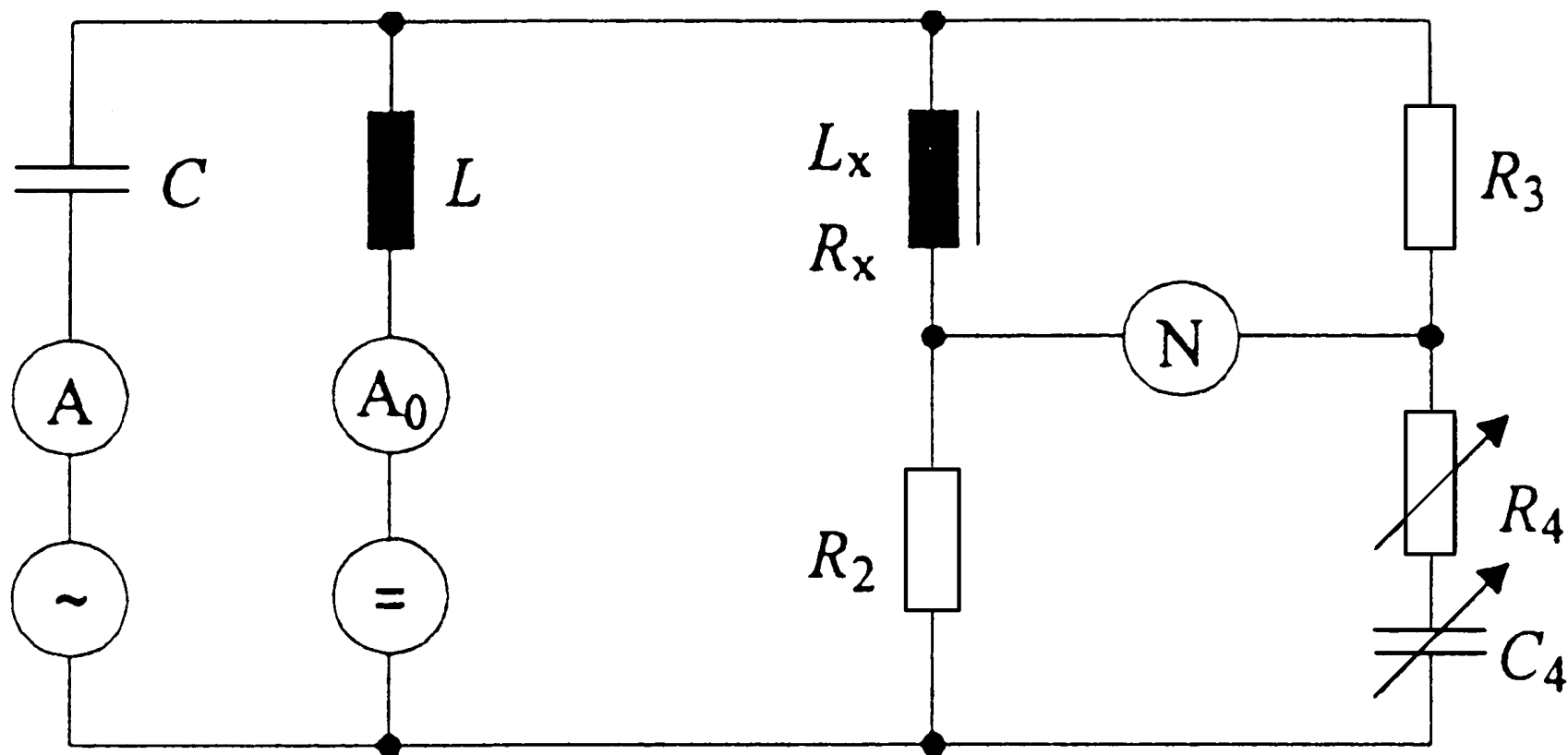
**Maxwell-Wienov mostič:**  $\underline{Z}_1 = R_x + j\omega L_x$

- ravnovesna enačba:  $R_x + j\omega L_x = R_2 R_3 (1/R_4 + j\omega C_4)$

$$R_x = R_2 R_3 / R_4, \quad L_x = R_2 R_3 C_4, \quad Q = \omega R_4 C_4$$



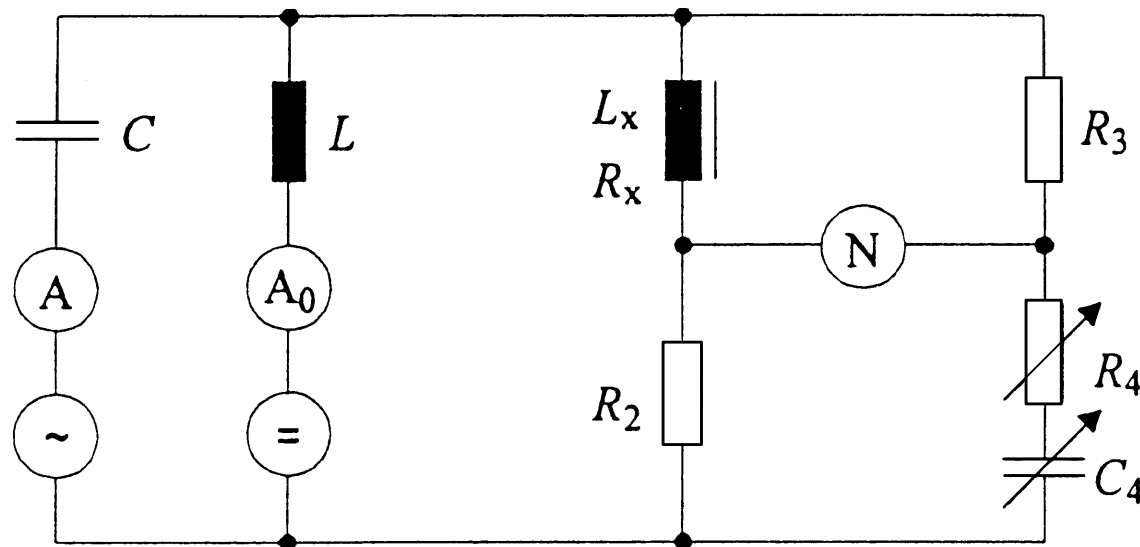
**Hayev mostič** se uporablja za merjenje induktivnosti s feromagnetnim jedrom pri pulzirajočem toku.



Slika 7.40 Hayev mostič za merjenje superpozicijske induktivnosti

Impedance v vejah mostiča:  $\underline{Z}_1 = R_x + j\omega L_x$  ,  $\underline{Z}_3 = R_3$   
 $\underline{Z}_2 = R_2$  ,  $\underline{Z}_4 = R_4 + 1/j\omega C_4$





Iz ravnovesne enačbe:

$$L_x = \frac{R_2 R_3 C_4}{1 + (\omega R_4 C_4)^2}, \quad R_x = \frac{R_2 R_3}{R_4} \frac{(\omega R_4 C_4)^2}{1 + (\omega R_4 C_4)^2}$$

- Hayev mostič je **frekvenčno odvisen**.

Če merimo induktivnosti **z velikim faktorjem kvalitete**

$$Q = \frac{\omega L_x}{R_x} = \frac{1}{\omega R_4 C_4}, \text{ je induktivnost: } L_x = \frac{R_2 R_3 C_4}{1 + 1/Q^2} \approx R_2 R_3 C_4$$

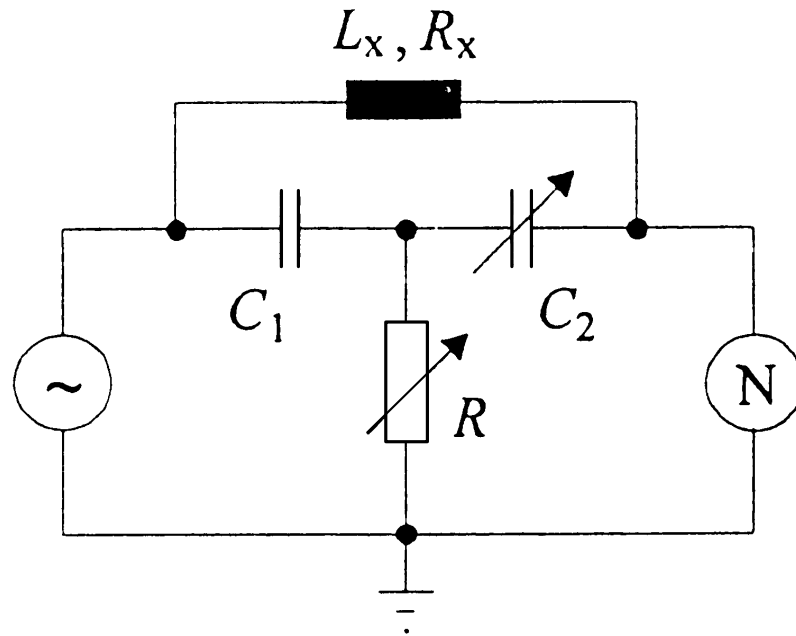
- v tem primeru nam frekvence ni potrebno upoštevati!



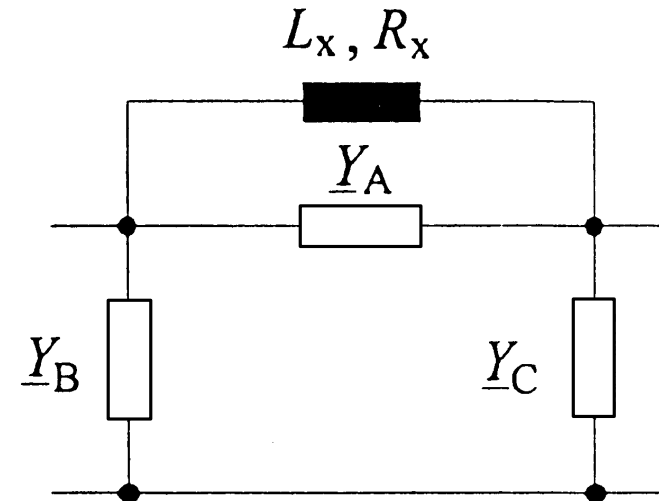
# Premoščeno T-vezje



- ni problema **ozemljenosti!**



a)



b)

Slika 7.41 Merjenje induktivnosti s premoščnim T-vezjem

Ničelni indikator bo ostal brez odklona, ko bo  $\underline{Y}_A + \underline{Y}_x = 0$ :

$$\frac{j\omega C_1 \cdot j\omega C_2}{j\omega C_1 + j\omega C_2 + 1/R} + \frac{1}{R_x + j\omega L_x} = 0$$





$$\frac{j\omega C_1 \cdot j\omega C_2}{j\omega C_1 + j\omega C_2 + 1/R} + \frac{1}{R_x + j\omega L_x} = 0$$

- od tod dobimo:

$$L_x = \frac{1}{\omega^2} \left( \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right), \quad R_x = \frac{1}{\omega^2 R C_1 C_2}, \quad Q = \omega R (C_1 + C_2)$$

- vpliv parazitnih kapacitivnosti je manjši,
- uporablja se **v radiofrekvenčnem območju.**





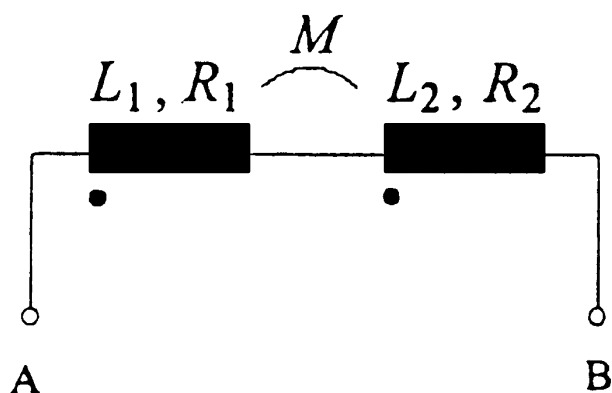
## 7.5 Merjenje medsebojne induktivnosti

Medsebojna induktivnost med dvema **magnetno sklopljenima** krogoma je **razmerje** med:

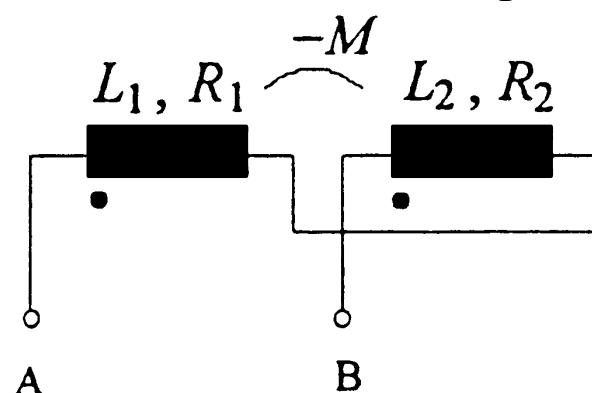
- **inducirano napetostjo** v enem krogu
- in **časovnim odvodom toka** v drugem krogu.

Magnetna pretoka se lahko **podpirata**  $+M$  ali **nasprotujeta**  $-M$ :

- magnetna pretoka se podpirata (a):  $L' = L_1 + L_2 + 2M$
- magnetna pretoka si nasprotujeta (b):  $L'' = L_1 + L_2 - 2M$



a)



b)

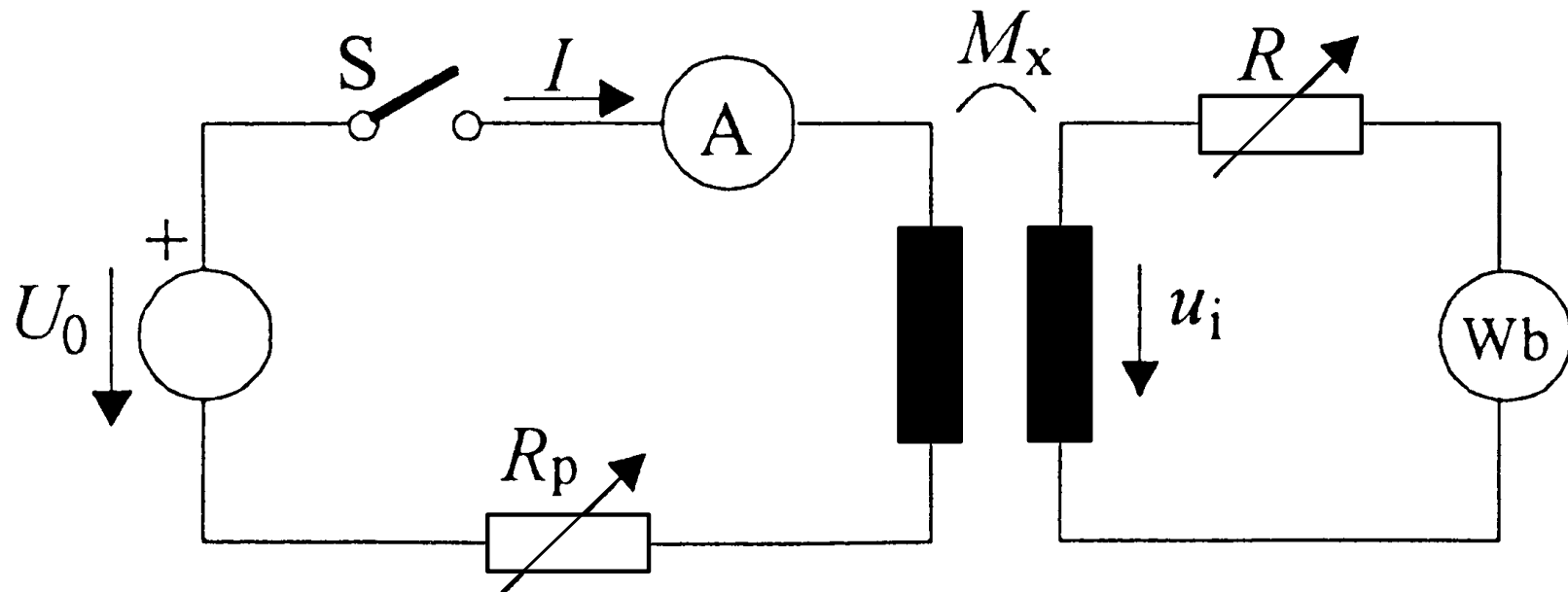
Slika 7.42 Določanje medsebojne induk. z merjenjem dveh induk.

$L'$ ,  $L''$  merimo na znan način in izračunamo:  $M = (L' - L'')/4$





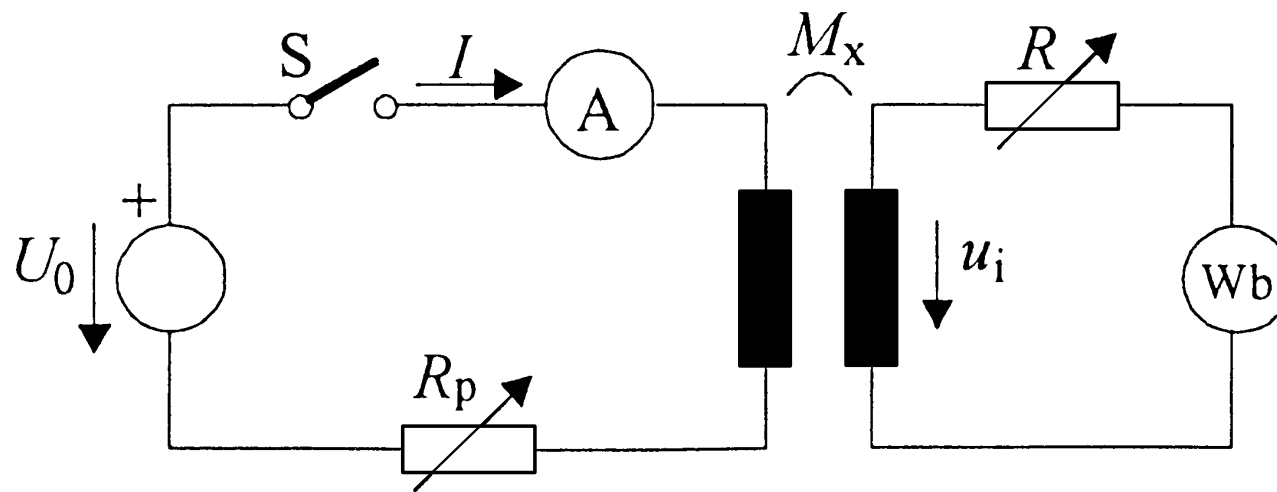
## *Neposredno merjenje medsebojne induktivnosti*



Slika 7.43 Merjenje medsebojne induktivnosti s fluksmetrom

- vezje napajamo z **enosmernim tokom** (primar),
- ker je napetost na sekundarju odvisna le **od spremembe toka**, se **inducira napetost le ob preklopu** stikala.





- napetostni impulz **merimo s fluksmetrom** ( $k_F y = \int u_i dt$ ):

$$u_i = M_x \frac{di}{dt} \Rightarrow \int_{t_1}^{t_2} u_i dt = M_x \int_0^I di \Rightarrow M_x I = k_F y$$

Medsebojna induktivnost je:  $M_x = \frac{k_F y}{I}$

Merilno **točnost** lahko **izboljšamo s substitucijsko metodo**:

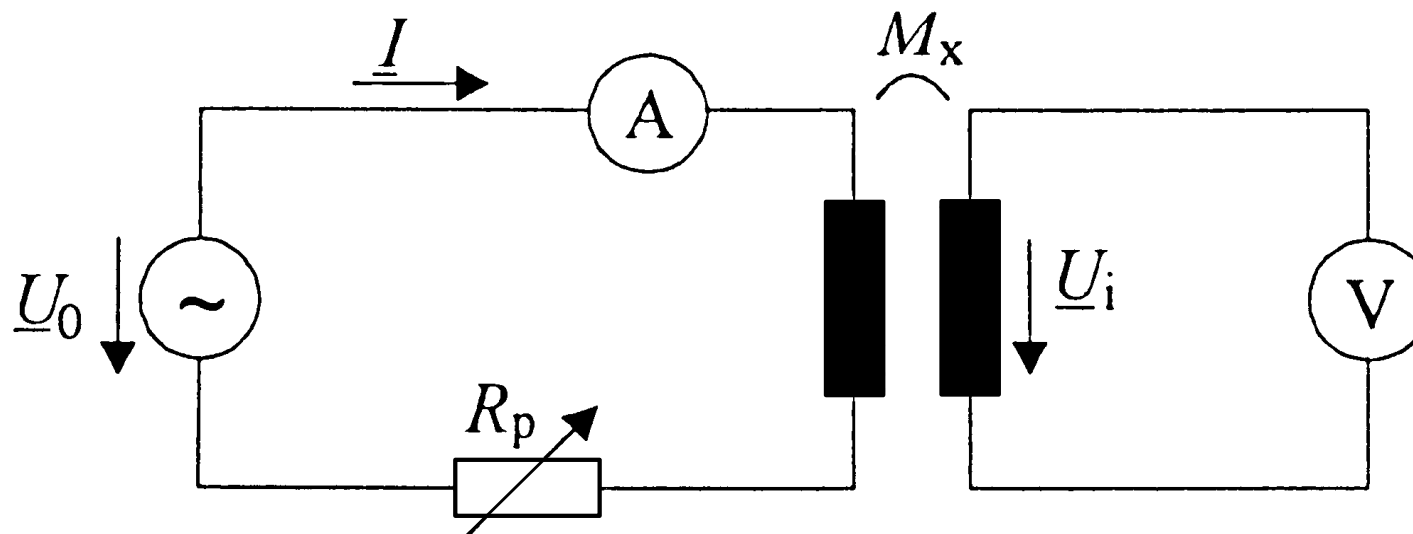
- uporabljamo **spremenljivi etalon medsebojne induktivnosti**,
- fluksmeter ima **enak odklon**:  $M_x \cong M_N$







## Merjenje medsebojne ind. s sinusnim signalom



Slika 7.44 Merjenje  $M_x$  z ampermetrom in voltmetrom

Inducirana napetost na sekundarni strani pri sinusnem toku:

$$U_i = M_x \frac{dI}{dt} = j\omega M_x I$$

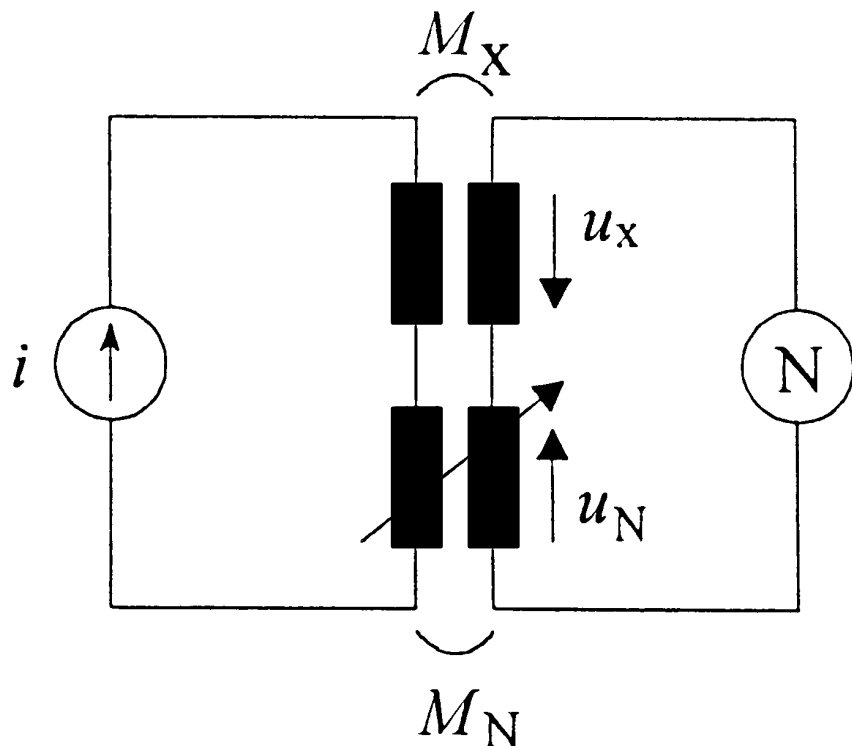
- če je  $R_V \gg 1$ , je  $U_V \approx U_i$  in dobimo:  $M_x = \frac{U_V}{\omega I}$





# Metoda opozicije

Potrebujemo **etalon spremenljive medsebojne induktivnosti**.



Slika 7.45 Metoda opozicije

Skozi primarni navitji teče **isti izmenični tok**,

- **ni nujno sinusne oblike!**

Na sekundarnih straneh se inducirata napetosti:

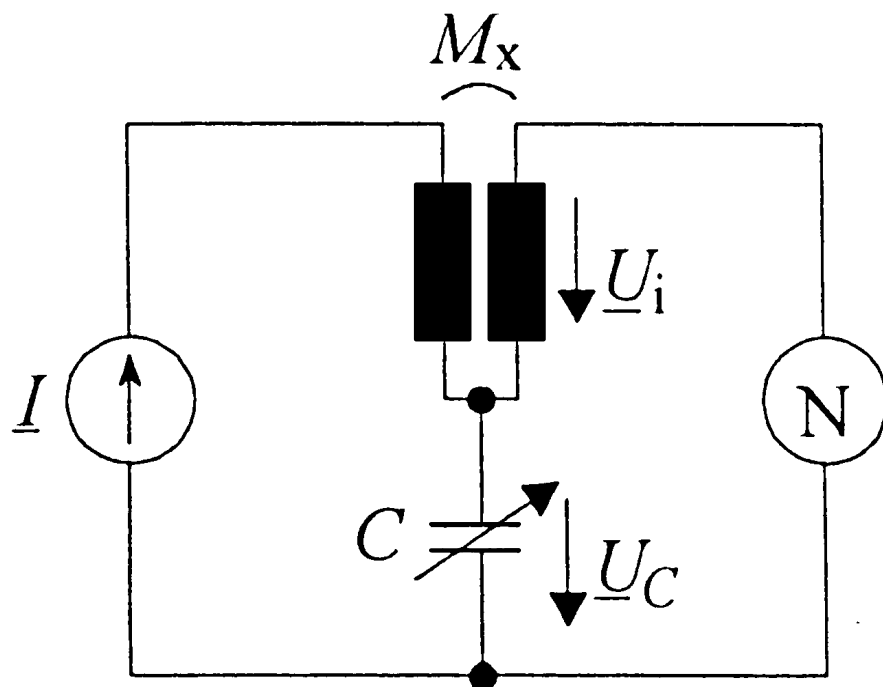
$$u_x = M_x \frac{di}{dt}, \quad u_N = M_N \frac{di}{dt}$$

- če sekundarja vežemo v **protistik** in je ničelni indikator **brez odklona**:  $M_x = M_N$





## Campbellovo vezje



Slika 7.46 Campbellovo vezje

**Tok** skozi primarno navitje in kondenzator **mora biti sinusne oblike,**

- **inducirana napetost** na sekundarju  $M_x$ :

$$\underline{U}_i = j\omega M_x \underline{I}$$

- **napetost na kondenzatorju:**

$$\underline{U}_C = \underline{I} \frac{1}{j\omega C}$$

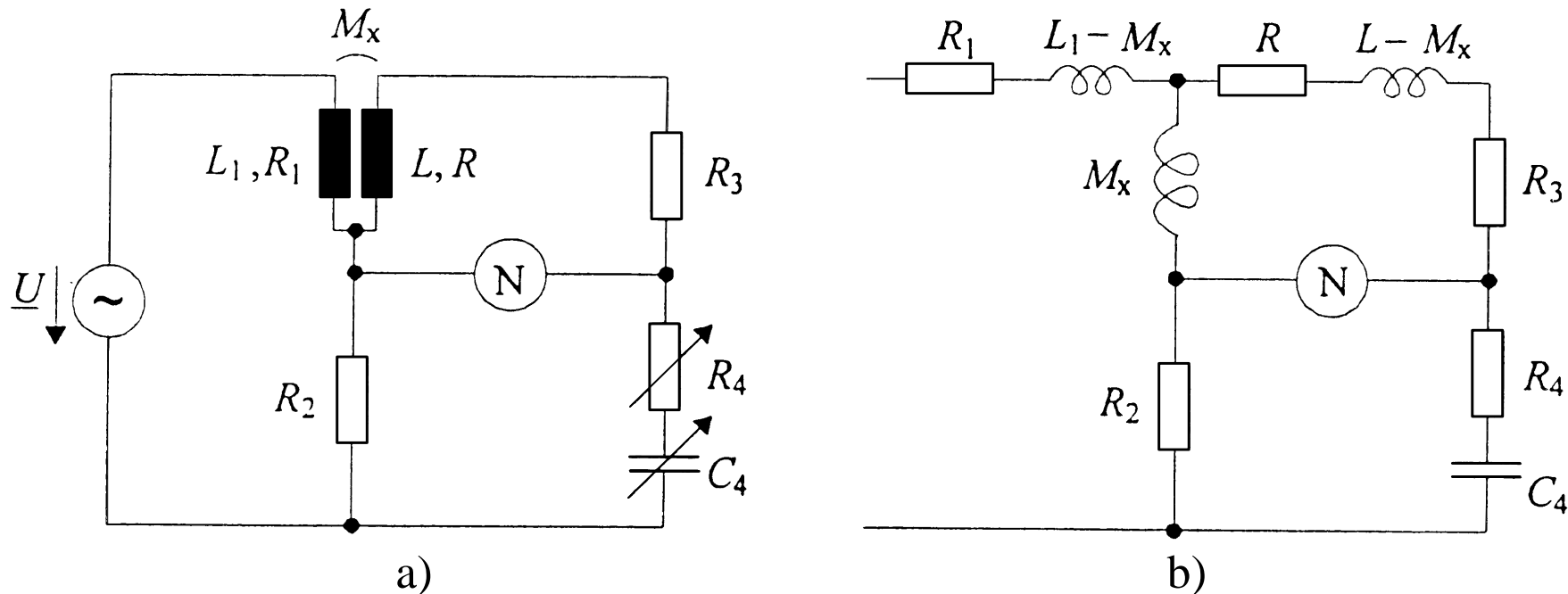
Če se **napetosti odštejeta** in je ničelni indikator **brez odklona**, imamo:  $j\omega M_x \underline{I} + \underline{I} \frac{1}{j\omega C} = 0$

- medsebojna induktivnost:  $M_x = \frac{1}{\omega^2 C}$





# Carey-Fosterjev mostič



Slika 7.47 Carey-Fosterjev mostič in nadomestno vezje

Če nadomestimo magnetno sklopljeni tuljavi z ekvivalentnim **T-vezjem**, dobimo **izmenični Wheatstonov mostič**:

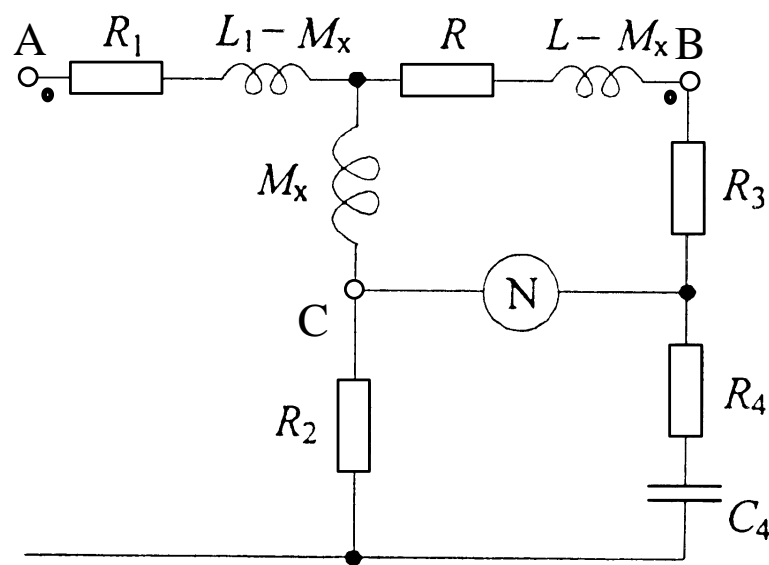
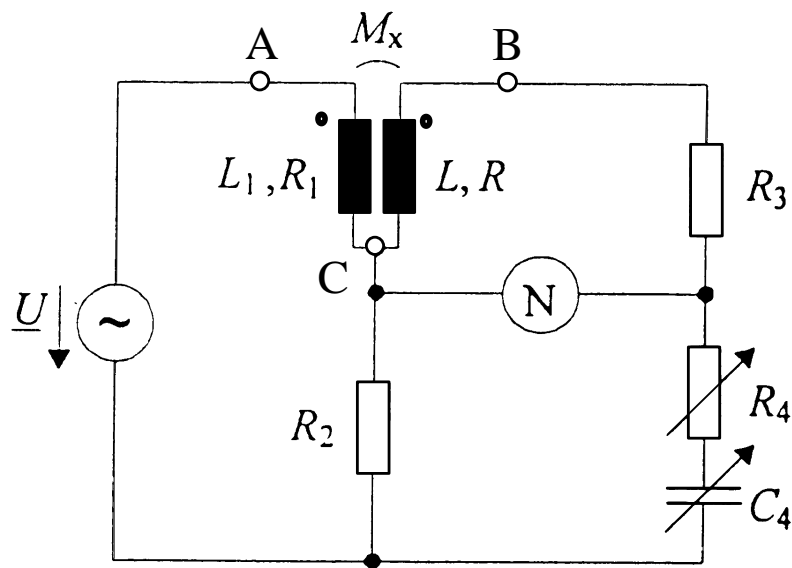
$$\underline{Z}_1 = j\omega M_x, \quad \underline{Z}_3 = (R + R_3) + j\omega(L - M_x)$$

$$\underline{Z}_2 = R_2, \quad \underline{Z}_4 = R_4 + 1/j\omega C_4$$

- iz ravnovesne enačbe dobimo:

$$M_x = R_2(R + R_3)C_4, \quad L = (R + R_3)(R_2 + R_4)C_4$$





Magnetna pretoka si **nasprotujeta** ( $-M$ ):

1. Med točkama A-B :  $L_{AB} = L_1 + L - 2M_x$

$$L_A = L_1 - M_x, \quad L_B = L - M_x$$

2. Med točkama A-C:  $L_A = L_1 - M_x, \quad L_{AC} = L_1$

$$\Rightarrow L_C = L_{AC} - L_A = M_x$$

Induktivnost sekundarne tuljave  $L$  je večja od medsebojne induktivnosti  $M_x \leq L$ . Dokaz:

• **kota v nasprotnih vejah** sta:  $\varphi_1 = +90^\circ, \quad -90^\circ \leq \varphi_4 \leq 0^\circ$

• ker je  $\varphi_1 + \varphi_4 \geq 0^\circ$  in  $\varphi_2 = 0^\circ$ , bo tudi:

$$\varphi_2 + \varphi_3 \geq 0^\circ \text{ - samo pri } (L - M_x) > 0$$

