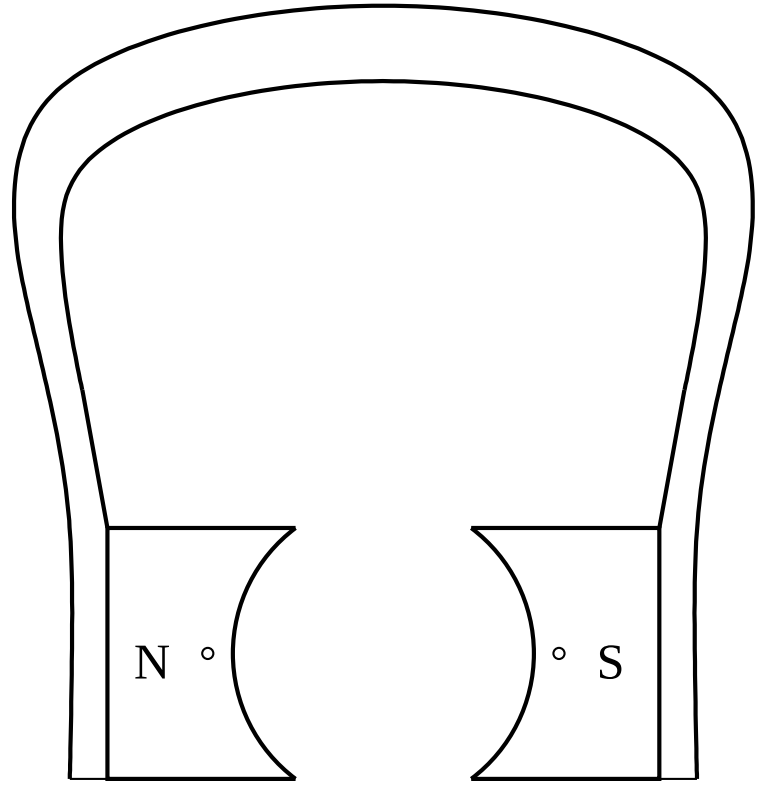
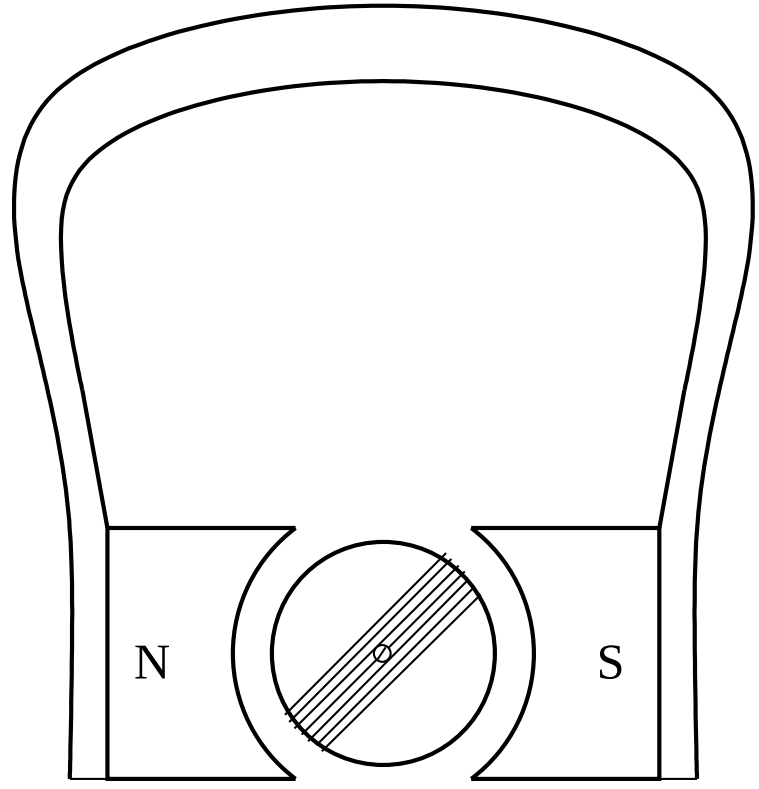
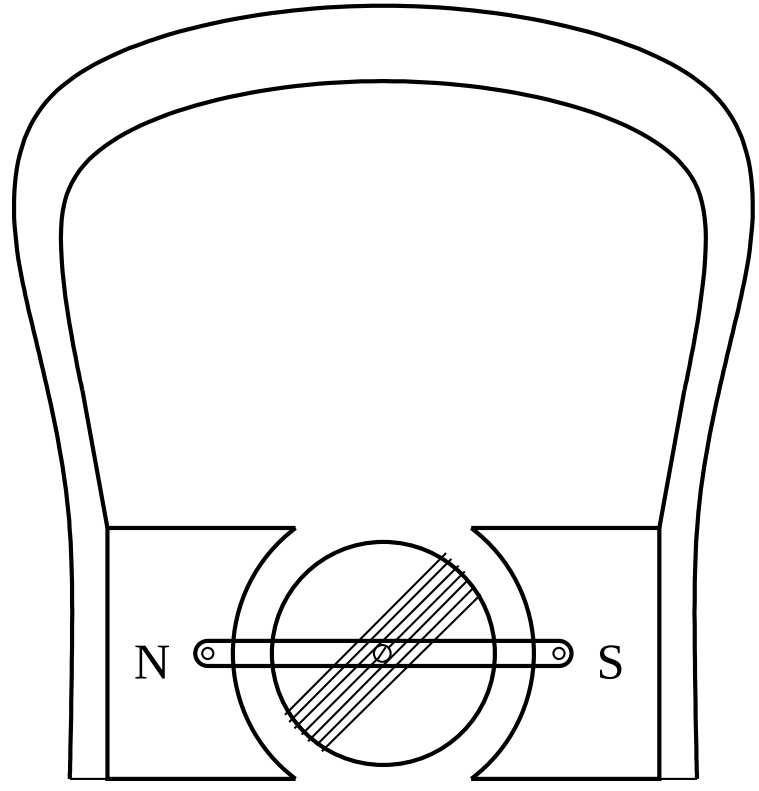
Meccanismo di d’Arsonval



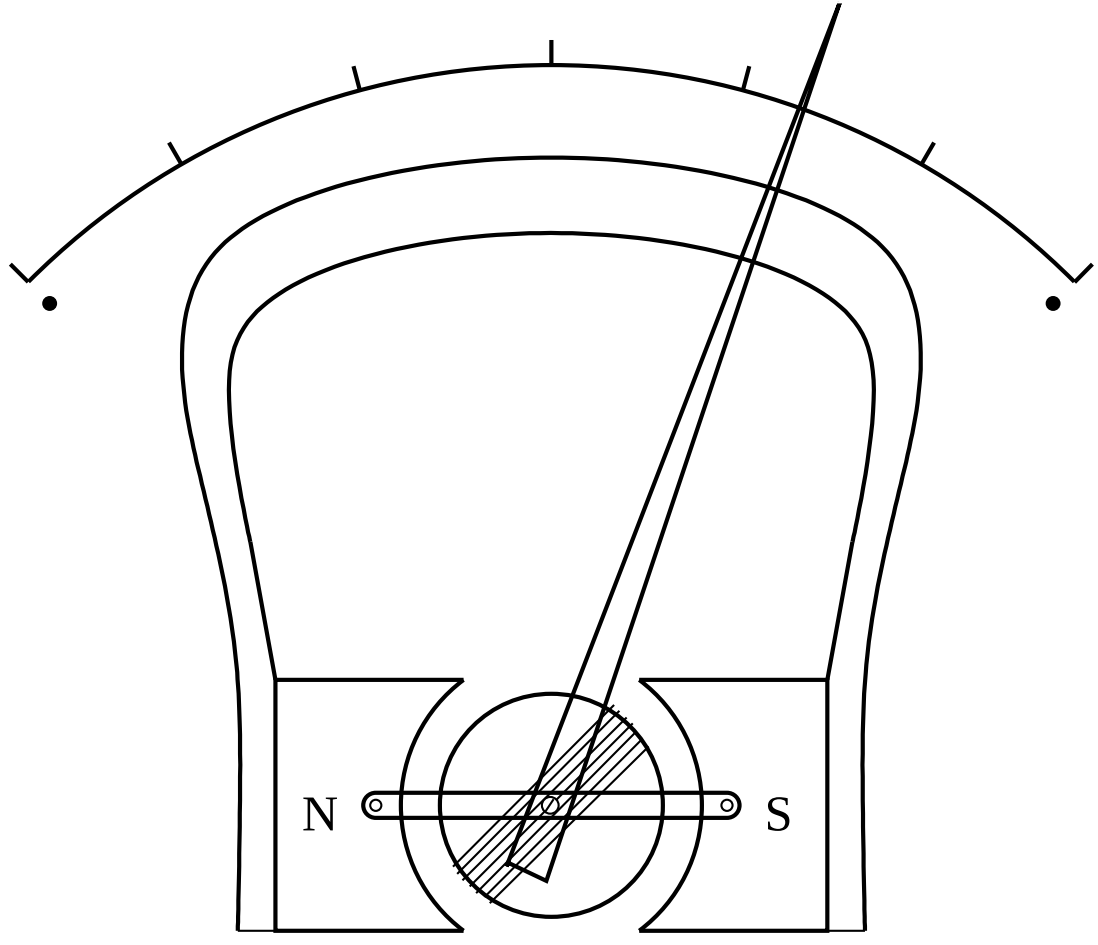
Meccanismo di d'Arsonval



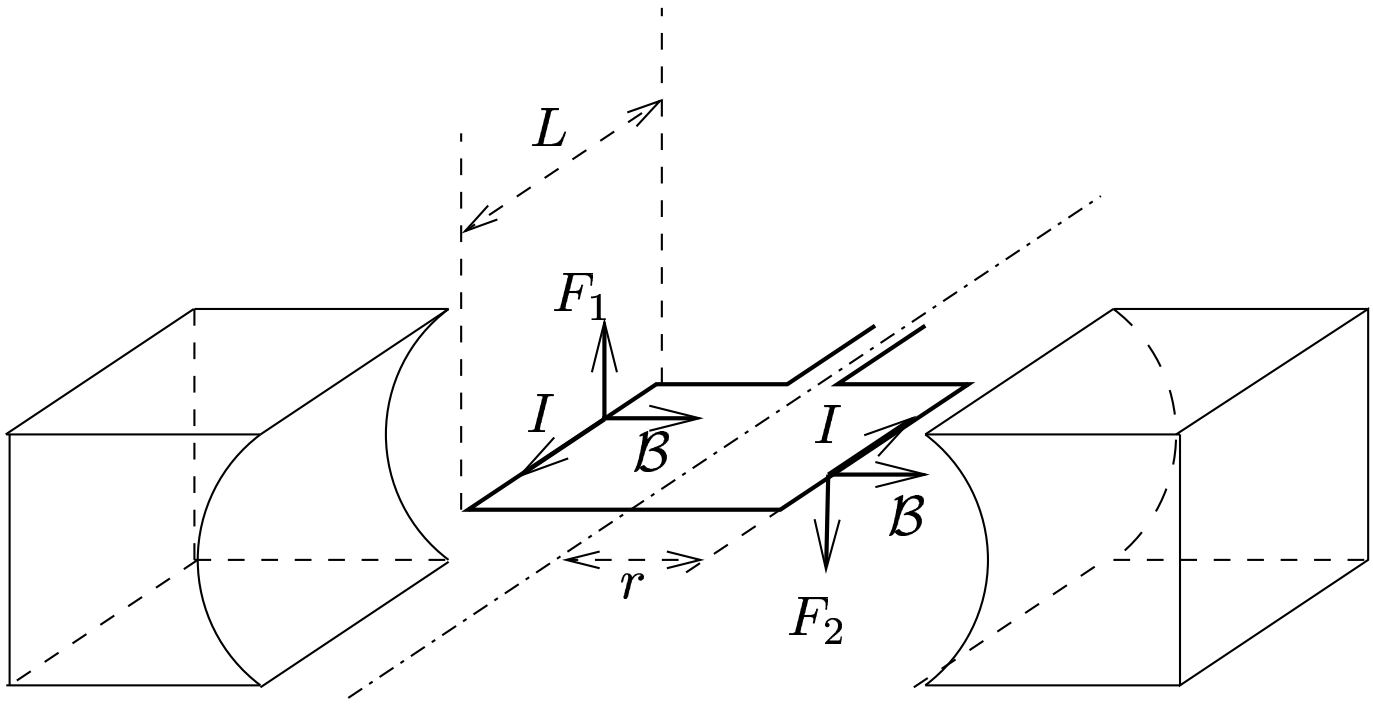
Meccanismo di d'Arsonval



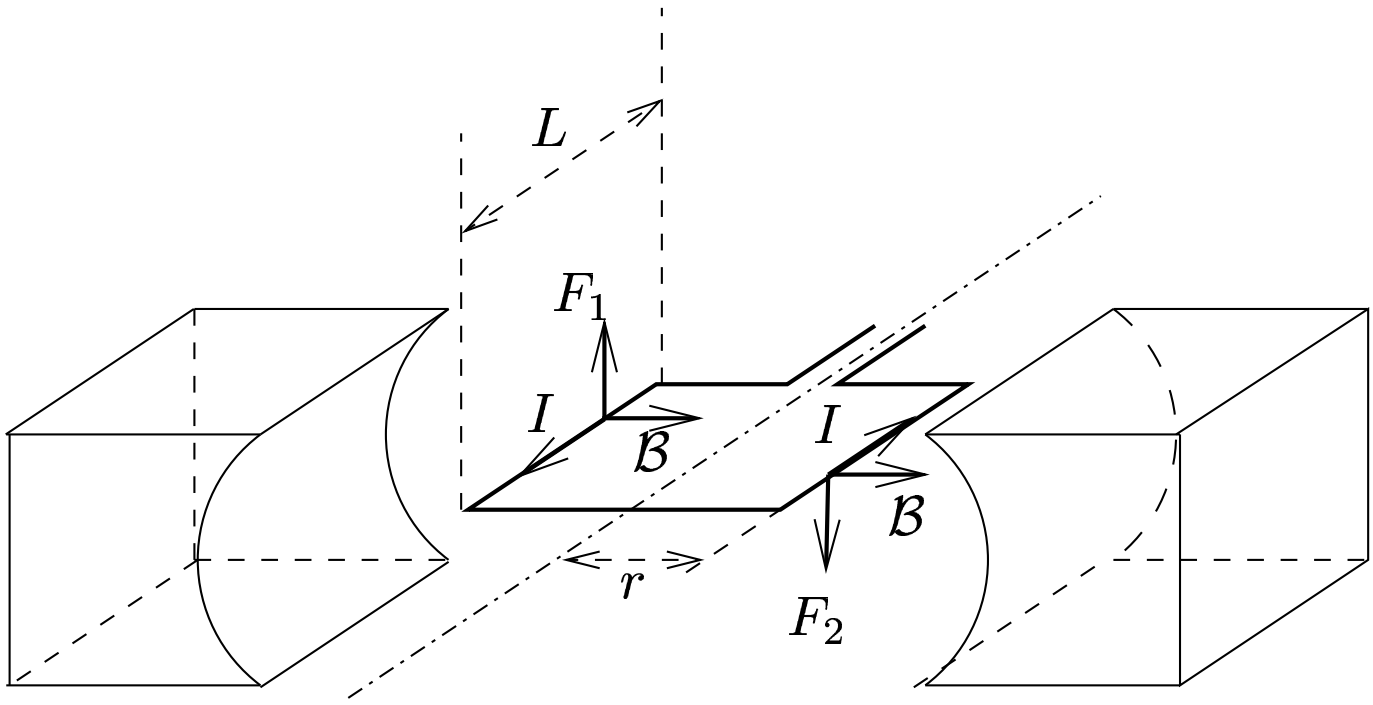
Meccanismo di d'Arsonval



Forze agenti sulle spire



Forze agenti sulle spire



forze (Lorentz): $\overline{F_1} = \overline{F_2} = I \cdot \bar{l} \wedge \overline{\mathcal{B}}$

coppia: $M_I = 2Fr = 2\mathcal{B}LIr = \mathcal{B}IA$

coppia totale: $M_{tot} = n\mathcal{B}IA$

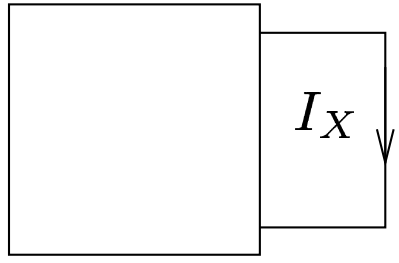
coppia antagonista: $M_m = k\Delta\theta$

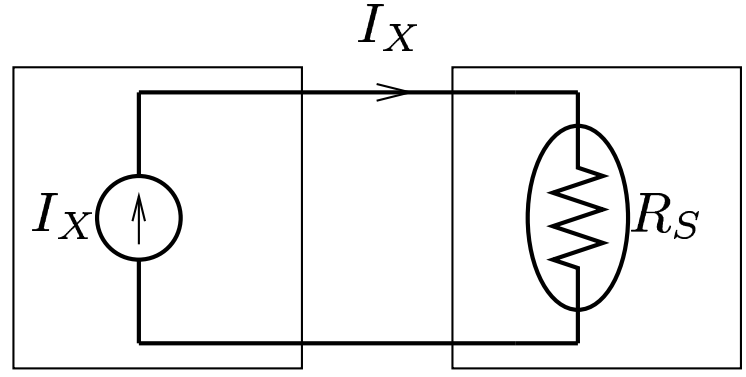
all'equilibrio: $M_{tot} = M_m \quad \rightarrow \quad \Delta\theta = \frac{n\mathcal{B}A}{k} I$

Amperometro di d'Arsonval

Si comporta come una resistenza

che va inserita nel circuito sotto misura:

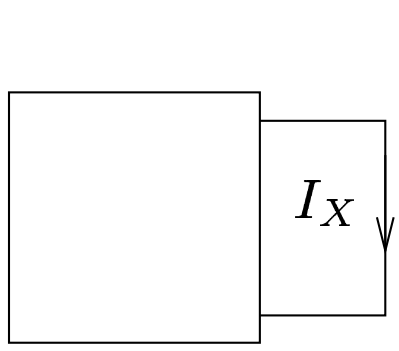


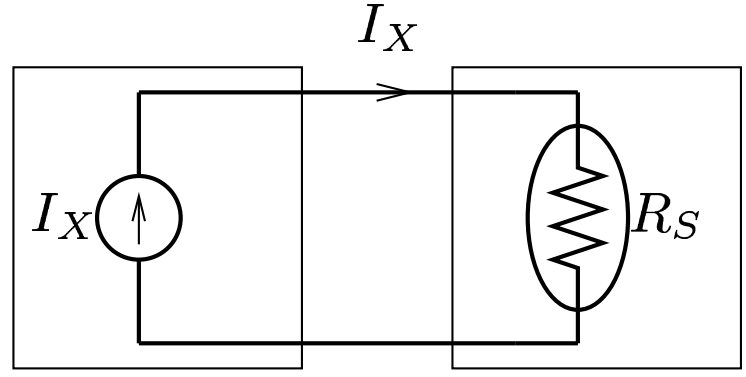


Amperometro di d'Arsonval

Si comporta come una resistenza

che va inserita nel circuito sotto misura:



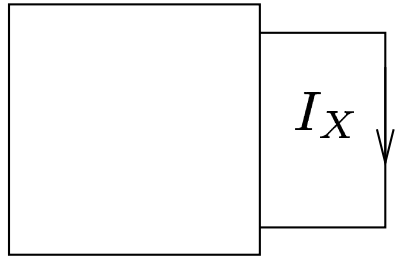


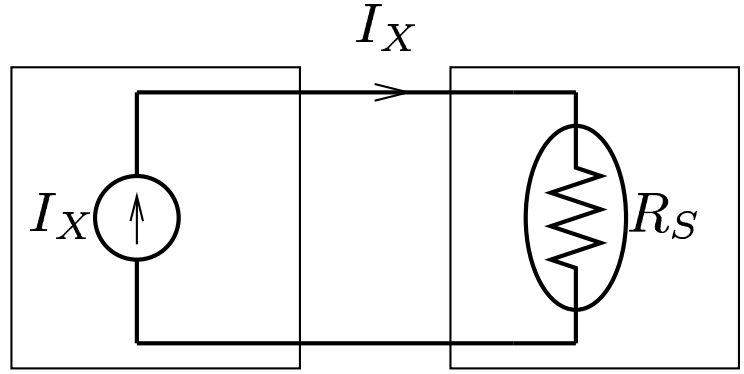
corrente di fondoscala: I_{FS} (decine, centinaia di microampere)

Amperometro di d'Arsonval

Si comporta come una resistenza

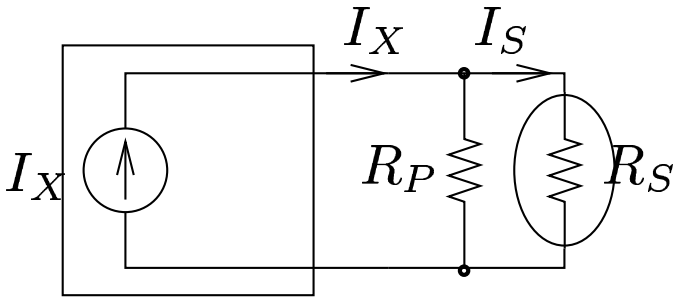
che va inserita nel circuito sotto misura:





corrente di fondoscala: I_{FS} (decine, centinaia di microampere)

aumento della portata:



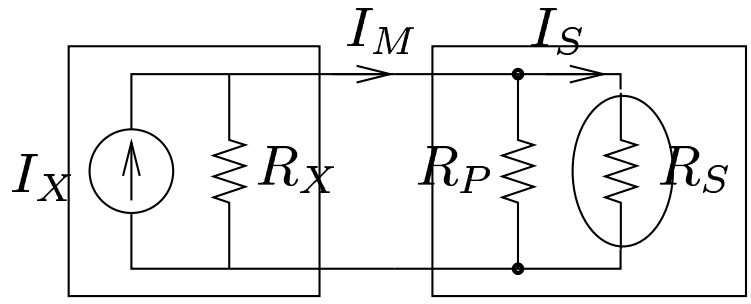
$$I_S = \frac{R_P}{R_S + R_P} I_X$$

$$I_{X,max} = \frac{R_S + R_P}{R_P} I_{FS}$$

$$R_P = f(\underline{R_S}, \underline{I_{FS}}, I_{X,max}) \quad \text{(res. di shunt)}$$

Amperometro - Effetto caricante

La sorgente non è generalmente ideale:

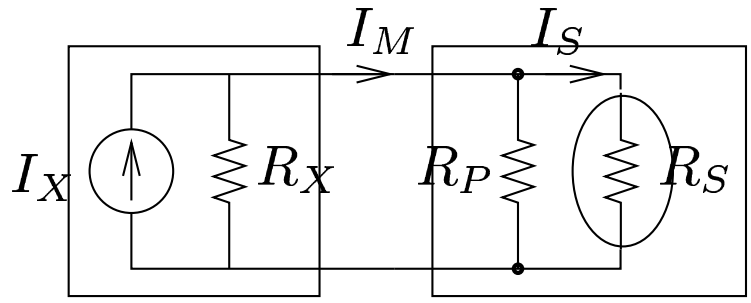


solo una quota di I_X interessa lo strumento!

$$I_M = \frac{R_X}{R_X + (R_P \| R_S)} I_X \quad \simeq I_X \quad \text{se} \quad R_M \triangleq (R_P \| R_S) \ll R_X$$

Amperometro - Effetto caricante

La sorgente non è generalmente ideale:



solo una quota di I_X interessa lo strumento!

$$I_M = \frac{R_X}{R_X + (R_P \| R_S)} I_X \quad \simeq I_X \quad \text{se} \quad R_M \triangleq (R_P \| R_S) \ll R_X$$

L'amperometro deve avere resistenza interna **piccola** per rendere trascurabile l'errore di inserzione (effetto caricante, errore sistematico).

$$|\varepsilon_{\%}| = 100 \left| \frac{I_M - I_X}{I_X} \right| = 100 \frac{R_M}{R_X + R_M}$$

fissato l'errore max accettabile $|\delta|$: $\quad |\varepsilon| < |\delta| \quad \Rightarrow \quad R_M < \frac{|\delta|}{1 - |\delta|} R_X$

Accorgimenti costruttivi, vincoli di funzionamento

- uniformità del campo all’interno del traferro;

Accorgimenti costruttivi, vincoli di funzionamento

- uniformità del campo all'interno del traferro;
- inerzia dello strumento $\Rightarrow$ funziona praticamente solo in c.c.!

Accorgimenti costruttivi, vincoli di funzionamento

- uniformità del campo all'interno del traferro;
- inerzia dello strumento $\Rightarrow$ funziona praticamente solo in c.c.!
- interesse a mantenere **piccola** la res. della bobina (o.g. 100-1000 Ω)

Accorgimenti costruttivi, vincoli di funzionamento

- uniformità del campo all'interno del traferro;
- inerzia dello strumento $\Rightarrow$ funziona praticamente solo in c.c.!
- interesse a mantenere **piccola** la res. della bobina (o.g. 100-1000 Ω)
- *sensitività* del meccanismo (ΔI) legata alla corrente di fondoscala

Accorgimenti costruttivi, vincoli di funzionamento

- uniformità del campo all'interno del traferro;
- inerzia dello strumento $\Rightarrow$ funziona praticamente solo in c.c.!
- interesse a mantenere **piccola** la res. della bobina (o.g. 100-1000 Ω)
- *sensitività* del meccanismo (ΔI) legata alla corrente di fondoscala

• Effetti della resistenza di shunt sulla sensitività: $\Delta I_X = \dfrac{R_P + R_S}{R_P} \Delta I$

Accorgimenti costruttivi, vincoli di funzionamento

- uniformità del campo all'interno del traferro;
- inerzia dello strumento $\Rightarrow$ funziona praticamente solo in c.c.!
- interesse a mantenere **piccola** la res. della bobina (o.g. 100-1000 Ω)
- *sensitività* del meccanismo (ΔI) legata alla corrente di fondoscala

• Effetti della resistenza di shunt sulla sensitività: $\Delta I_X = \dfrac{R_P + R_S}{R_P} \Delta I$

$\rightarrow$ aumentare il fondoscala comporta un peggioramento della sensitività.

Accorgimenti costruttivi, vincoli di funzionamento

- uniformità del campo all'interno del traferro;
- inerzia dello strumento $\Rightarrow$ funziona praticamente solo in c.c.!
- interesse a mantenere **piccola** la res. della bobina (o.g. 100-1000 Ω)
- *sensitività* del meccanismo (ΔI) legata alla corrente di fondoscala

- Effetti della resistenza di shunt sulla sensitività: $\Delta I_X = \dfrac{R_P + R_S}{R_P} \Delta I$

  $\rightarrow$ aumentare il fondoscala comporta un peggioramento della sensitività.
- Per accrescere la sensitività (cioè ridurre I_{FS}):

Accorgimenti costruttivi, vincoli di funzionamento

- uniformità del campo all'interno del traferro;
- inerzia dello strumento $\Rightarrow$ funziona praticamente solo in c.c.!
- interesse a mantenere **piccola** la res. della bobina (o.g. 100-1000 Ω)
- *sensitività* del meccanismo (ΔI) legata alla corrente di fondoscala

- Effetti della resistenza di shunt sulla sensitività: $\Delta I_X = \dfrac{R_P + R_S}{R_P} \Delta I$

  $\rightarrow$ aumentare il fondoscala comporta un peggioramento della sensitività.

- Per accrescere la sensitività (cioè ridurre I_{FS}):

  $M_{tot} = n\mathcal{B}IA$ occorre aumentare n e/o A (aumenta la massa),

Accorgimenti costruttivi, vincoli di funzionamento

- uniformità del campo all'interno del traferro;
- inerzia dello strumento $\Rightarrow$ funziona praticamente solo in c.c.!
- interesse a mantenere **piccola** la res. della bobina (o.g. 100-1000 Ω)
- *sensitività* del meccanismo (ΔI) legata alla corrente di fondoscala

- Effetti della resistenza di shunt sulla sensitività: $\Delta I_X = \dfrac{R_P + R_S}{R_P} \Delta I$

  $\rightarrow$ aumentare il fondoscala comporta un peggioramento della sensitività.

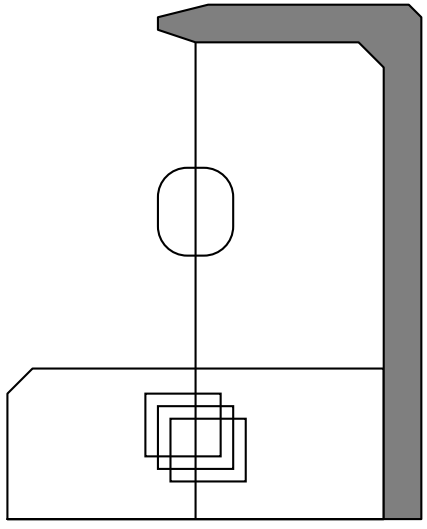
- Per accrescere la sensitività (cioè ridurre I_{FS}):

  $M_{tot} = n\mathcal{B}IA$ occorre aumentare n e/o A (aumenta la massa),

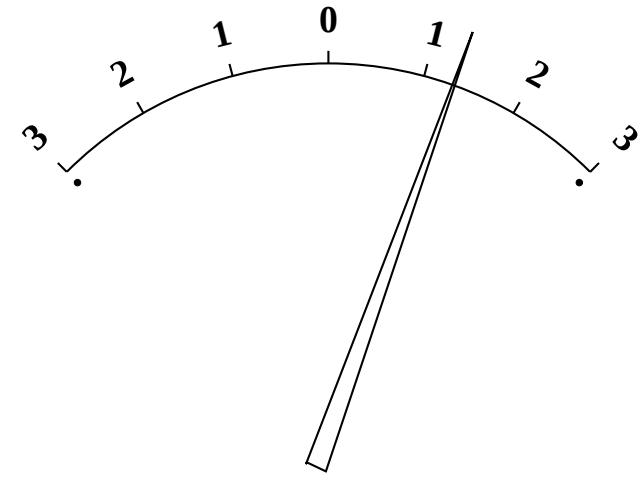
  se si riduce la sezione, aumenta la resistenza.

Galvanometro

“Amperometro” con bassissima inerzia
grazie a opportuni accorgimenti costruttivi



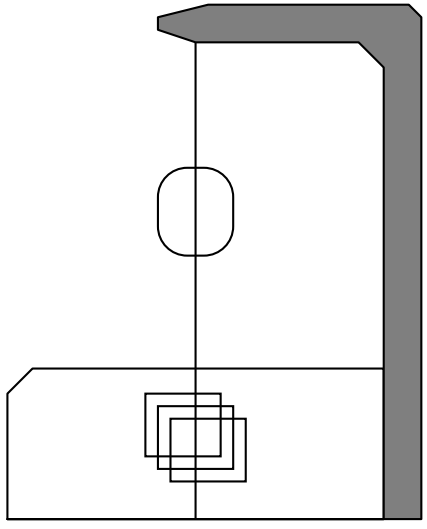
(schema)



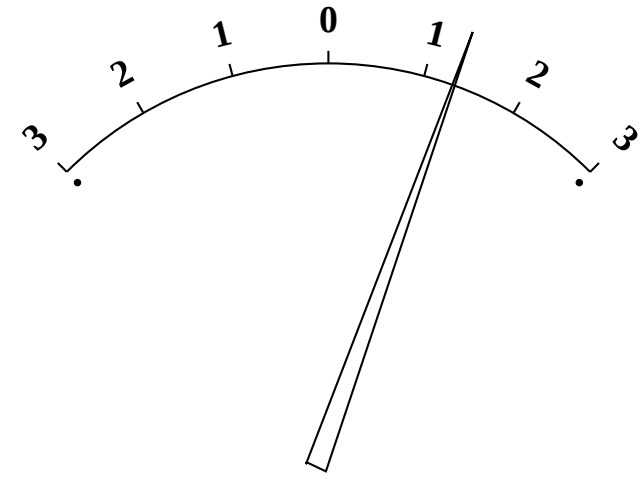
- maggiore sensitività

Galvanometro

"Amperometro" con bassissima inerzia
grazie a opportuni accorgimenti costruttivi



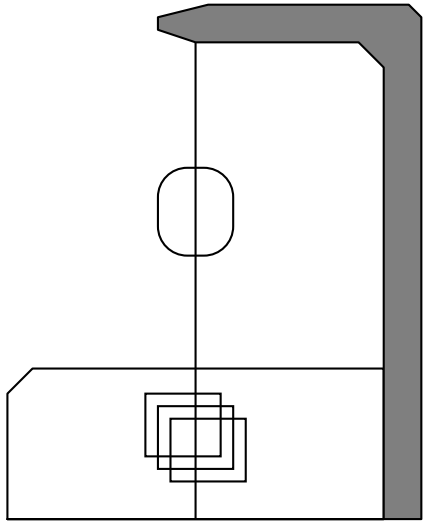
(schema)



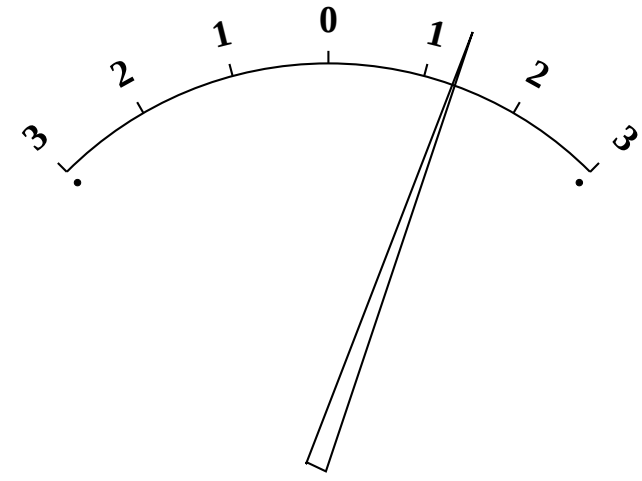
- maggiore sensitività
- scala a zero centrale

Galvanometro

“Amperometro” con bassissima inerzia
grazie a opportuni accorgimenti costruttivi



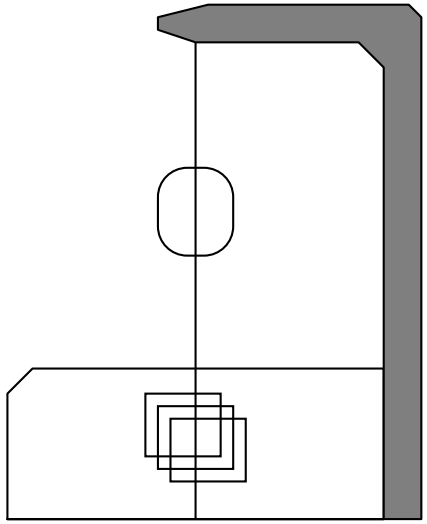
(schema)



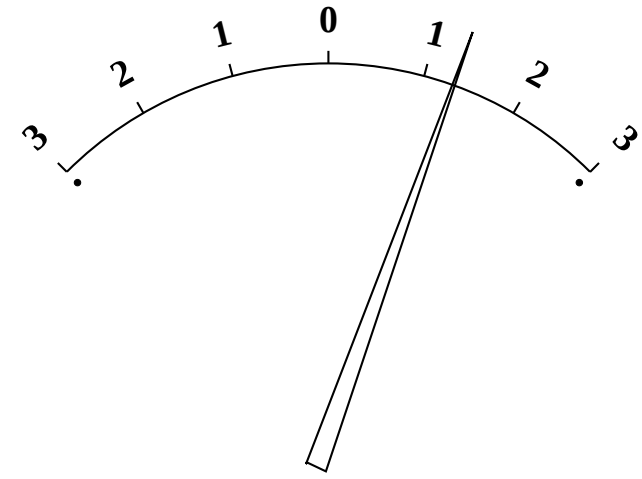
- maggiore sensitività
- scala a zero centrale
- scarsa accuratezza

Galvanometro

“Amperometro” con bassissima inerzia
grazie a opportuni accorgimenti costruttivi



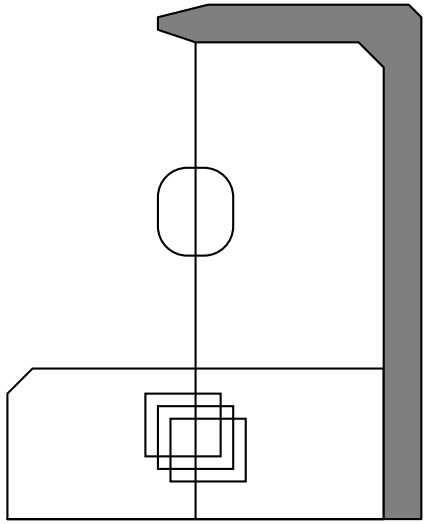
(schema)



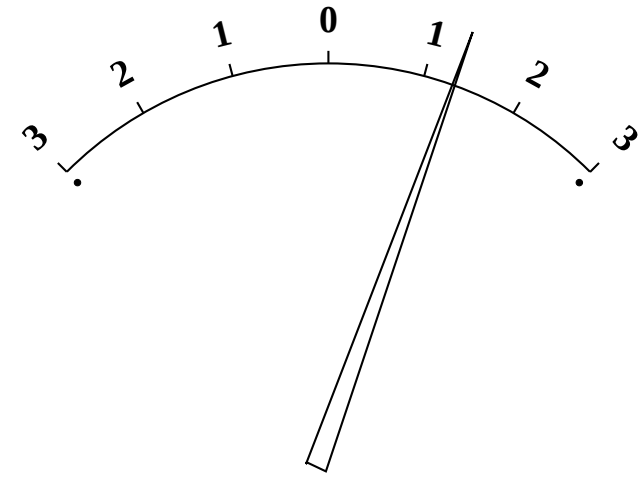
- maggiore sensitività
- scala a zero centrale
- scarsa accuratezza
- si usa come rivelatore di zero.

Galvanometro

“Amperometro” con bassissima inerzia
grazie a opportuni accorgimenti costruttivi

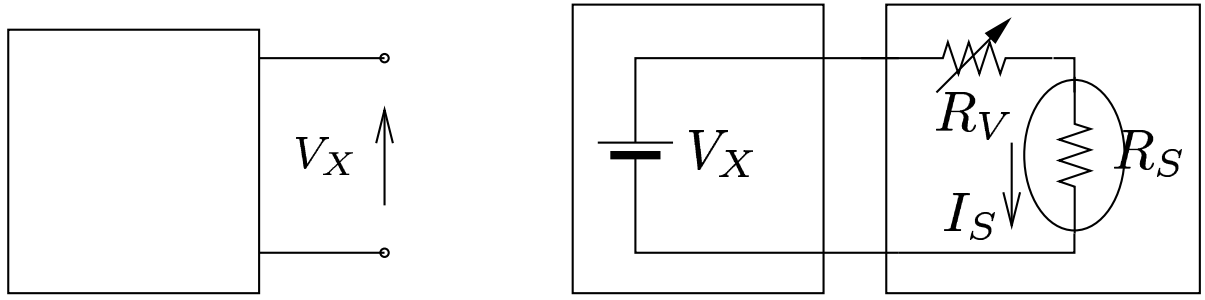


(schema)



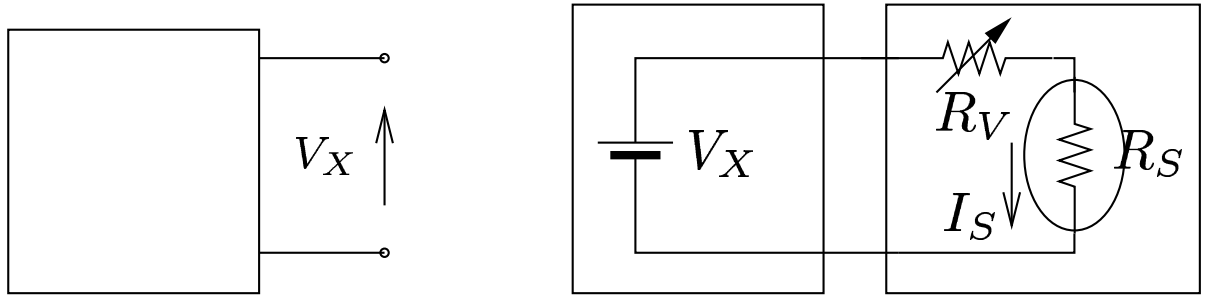
- maggiore sensitività
- scala a zero centrale
- scarsa accuratezza
- si usa come rivelatore di zero.

Voltmetro



$$\theta \propto I_S \qquad I_S = \frac{V_X}{R_V + R_S} \qquad \Rightarrow \quad \theta \propto V_X$$

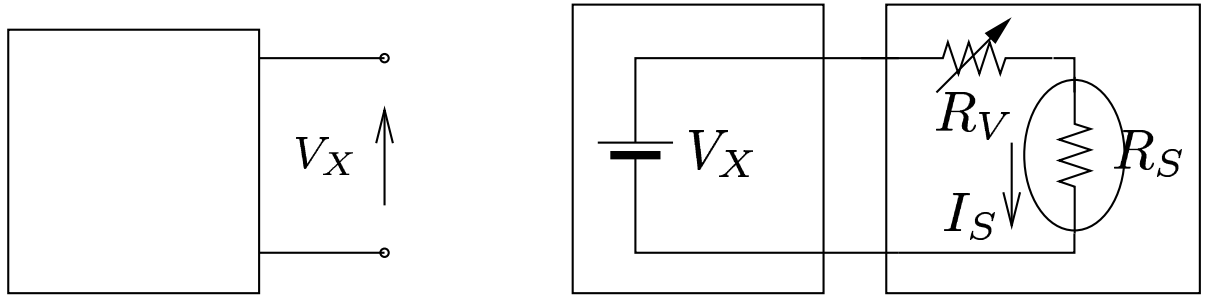
Voltmetro



$$\theta \propto I_S \qquad I_S = \frac{V_X}{R_V + R_S} \qquad \Rightarrow \quad \theta \propto V_X$$

$$I_{FS} = \frac{V_{X,max}}{R_V + R_S} \qquad R_V = \frac{V_{X,max} - R_S I_{FS}}{I_{FS}}$$

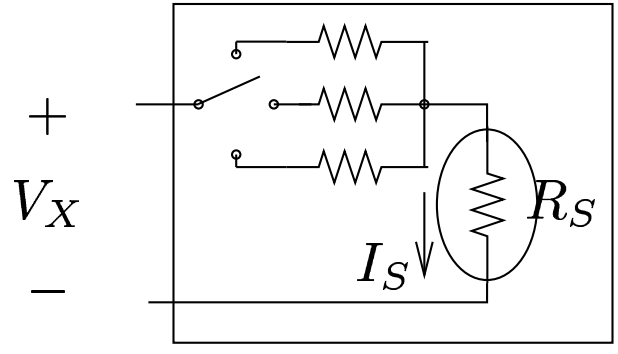
Voltmetro



$$\theta \propto I_S \qquad I_S = \frac{V_X}{R_V + R_S} \qquad \Rightarrow \quad \theta \propto V_X$$

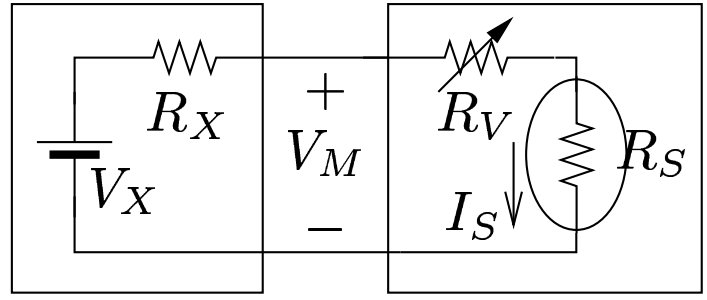
$$I_{FS} = \frac{V_{X,max}}{R_V + R_S} \qquad R_V = \frac{V_{X,max} - R_S I_{FS}}{I_{FS}}$$

$\Rightarrow$ una resistenza (variabile) in serie alla bobina accresce la portata



Voltmetro - Effetto caricante

La sorgente non è generalmente ideale:

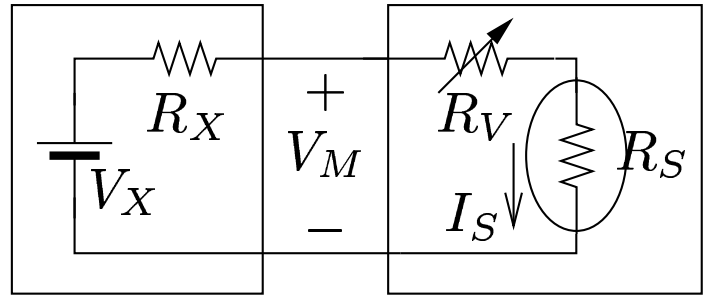


solo una quota di V_X interessa lo strumento!

$$I_S = \frac{V_M}{R_S + R_V} = \frac{V_X}{R_X + R_V + R_S}, \quad R_X = ??$$

Voltmetro - Effetto caricante

La sorgente non è generalmente ideale:



solo una quota di V_X interessa lo strumento!

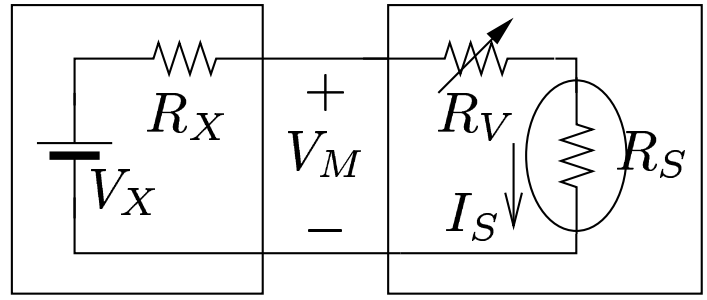
$$I_S = \frac{V_M}{R_S + R_V} = \frac{V_X}{R_X + R_V + R_S}, \quad R_X = ??$$

$$I_S = \frac{V_X}{R_X + R_V + R_S} \simeq \frac{V_X}{R_V + R_S} \quad \text{se} \quad R_M \triangleq R_V + R_S \gg R_X$$

Il voltmetro deve avere resistenza interna **grande** per rendere trascurabile l'errore di inserzione (effetto caricante, errore sistematico).

Voltmetro - Effetto caricante

La sorgente non è generalmente ideale:



solo una quota di V_X interessa lo strumento!

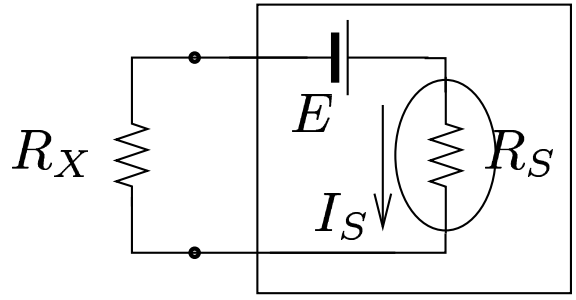
$$I_S = \frac{V_M}{R_S + R_V} = \frac{V_X}{R_X + R_V + R_S}, \quad R_X = ??$$

$$I_S = \frac{V_X}{R_X + R_V + R_S} \simeq \frac{V_X}{R_V + R_S} \quad \text{se} \quad R_M \triangleq R_V + R_S \gg R_X$$

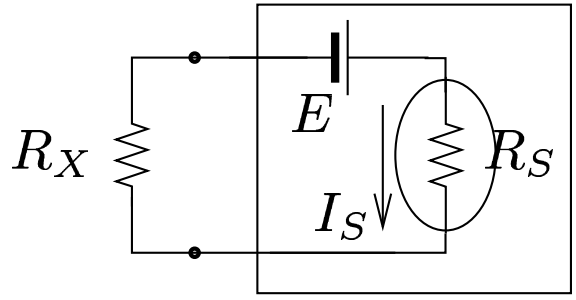
Il voltmetro deve avere resistenza interna **grande** per rendere trascurabile l'errore di inserzione (effetto caricante, errore sistematico).

$$|\varepsilon_{\%}| = 100 \left| \frac{V_M - V_X}{V_X} \right| = 100 \frac{R_X}{R_X + R_M} \qquad |\varepsilon| < |\delta| \Rightarrow R_M > R_X \frac{1 - |\delta|}{|\delta|}$$

Ohmetro



Ohmetro



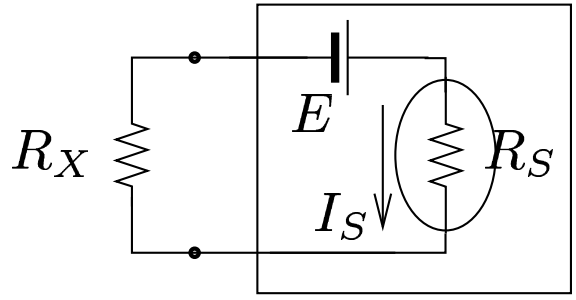
- è uno *strumento composto*

$$I_S = \frac{E}{R_S + R_X} \qquad \text{⚠} \; \theta \not\propto R_X$$

minima deflessione ($I_S = 0$): $R_X \to \infty$

massima deflessione ($I_S = I_{FS}$): $R_X = 0$;

Ohmetro



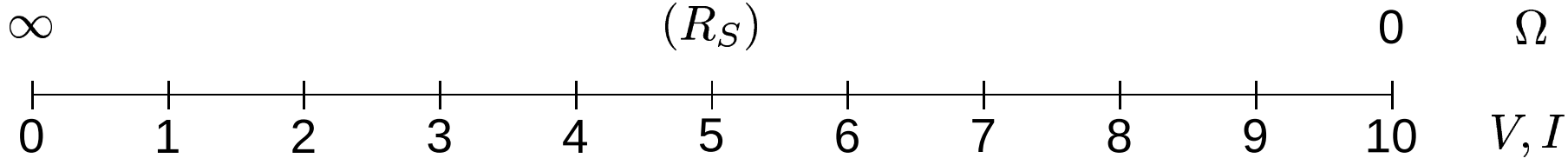
- è uno *strumento composto*

$$I_S = \frac{E}{R_S + R_X} \qquad \text{⚠} \; \theta \not\propto R_X$$

minima deflessione ($I_S = 0$): $R_X \to \infty$

massima deflessione ($I_S = I_{FS}$): $R_X = 0$;

Scala non lineare:



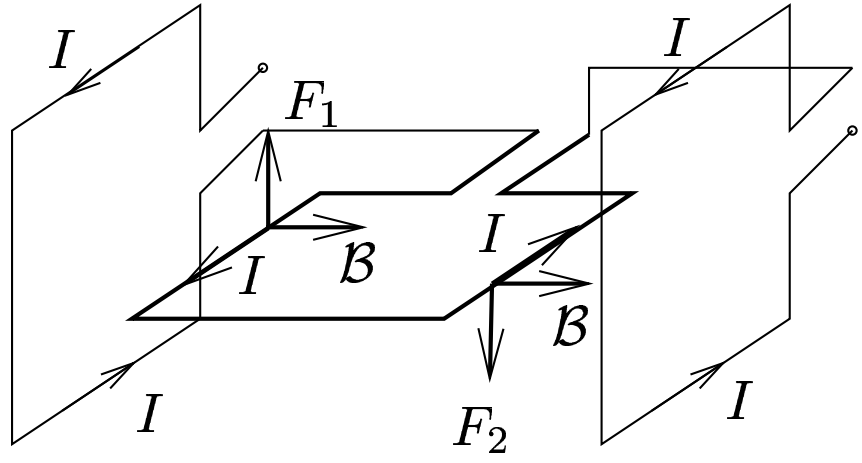
Elettrodinamometro

Misura di correnti alternate

$$M_I = 2Fr = 2\mathcal{B}LIr = \mathcal{B}IA$$

Se $i(t) = I_M \sin(\omega t)$ $(\mathcal{B}$ cost.$)$, $m_i(t) = M_M \sin(\omega t)$ (teoricamente ...)

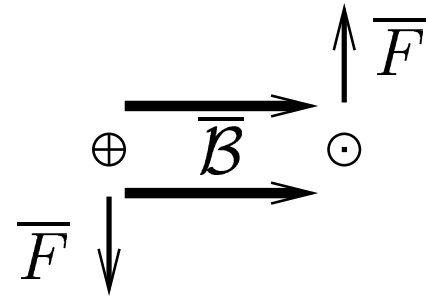
Se I e $\mathcal{B}$ cambiano segno simultaneamente $\rightarrow$ la coppia non si inverte:



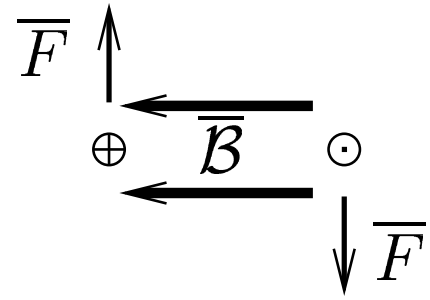
$$M_I \propto \mathcal{B}I, \quad \mathcal{B} \propto I, \qquad \Rightarrow \qquad M_I \propto I^2$$

Elettrodinamometro

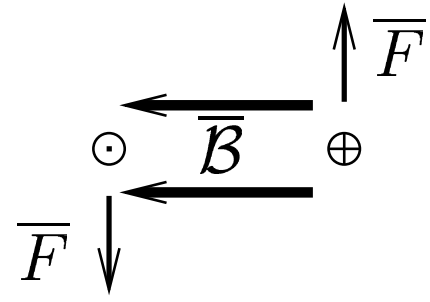
$\overline{F} = I\bar{l} \wedge \mathcal{B}$ ($\bar{l}$ nel verso della corrente)



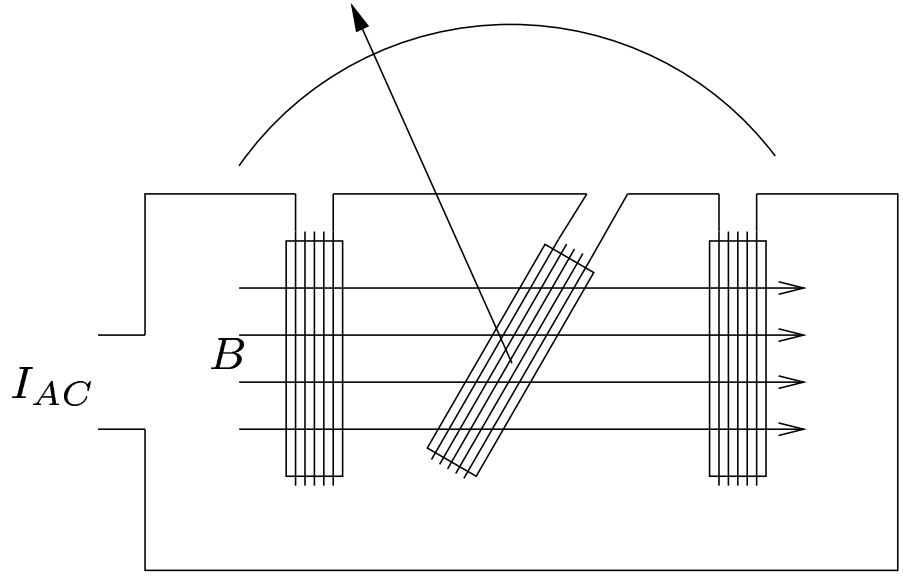
cambia verso solo $\overline{\mathcal{B}}$:



cambiano verso $\overline{\mathcal{B}}$ e I (e dunque $\bar{l}$):



Amperometro Elettrodinamico



Misura di correnti alternate

$$M_i = \beta i^2(t)$$

Misura di correnti alternate

$$M_i = \beta i^2(t) \qquad \overset{\text{p.b.}}{\Rightarrow} \qquad \overline{M_i} = \beta \overline{i^2(t)} \qquad \theta = \frac{\beta}{k} \overline{i^2(t)}$$

Misura di correnti alternate

$$M_i = \beta i^2(t) \qquad \overset{\text{p.b.}}{\Rightarrow} \qquad \overline{M_i} = \beta \overline{i^2(t)} \qquad \theta = \frac{\beta}{k} \overline{i^2(t)}$$

Se $i(t)$ periodica (periodo T): $\left(\overline{i^2(t)} = \frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt = I_{eff.}^2 \right)$

$$\theta = \frac{\beta}{k} I_{eff.}^2$$

Deflessione proporzionale al quadrato del valore efficace della corrente

Misura di correnti alternate

$$M_i = \beta i^2(t) \qquad \overset{\text{p.b.}}{\Rightarrow} \qquad \overline{M_i} = \beta \overline{i^2(t)} \qquad \theta = \frac{\beta}{k} \overline{i^2(t)}$$

Se $i(t)$ periodica (periodo T): $\left(\overline{i^2(t)} = \frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt = I_{eff.}^2 \right)$

$$\theta = \frac{\beta}{k} I_{eff.}^2$$

Deflessione proporzionale al quadrato del valore efficace della corrente

$\Downarrow$

Strumento a **vero** valore efficace

(scala “quadratica”)

Misura di grandezze alternate

Misura di grandezze continue (es.: tensione):



Voltmetro in corrente continua

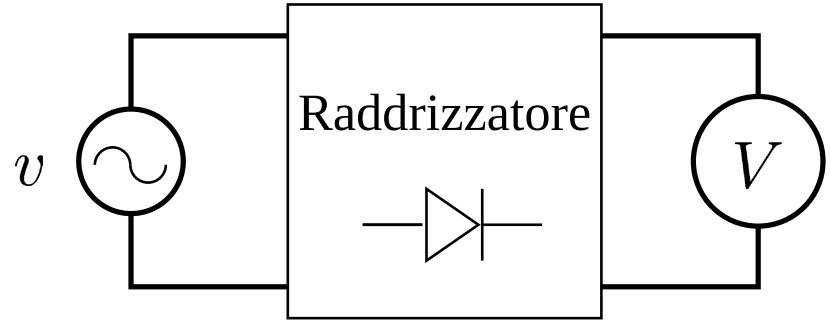
Misura di grandezze alternate

Misura di grandezze continue (es.: tensione):



Voltmetro in corrente continua

Misura di grandezze alternate (es.: tensione):

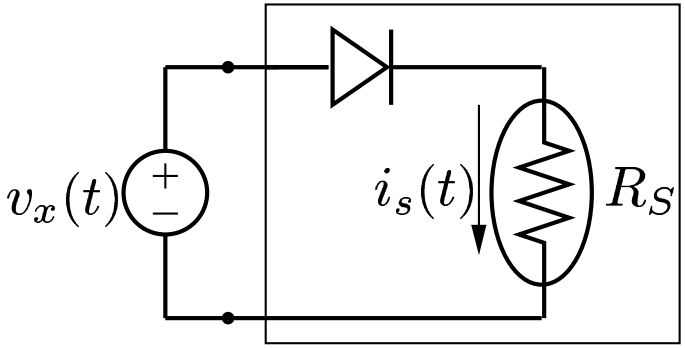


Voltmetro in corrente continua

Circuiti di raddrizzamento

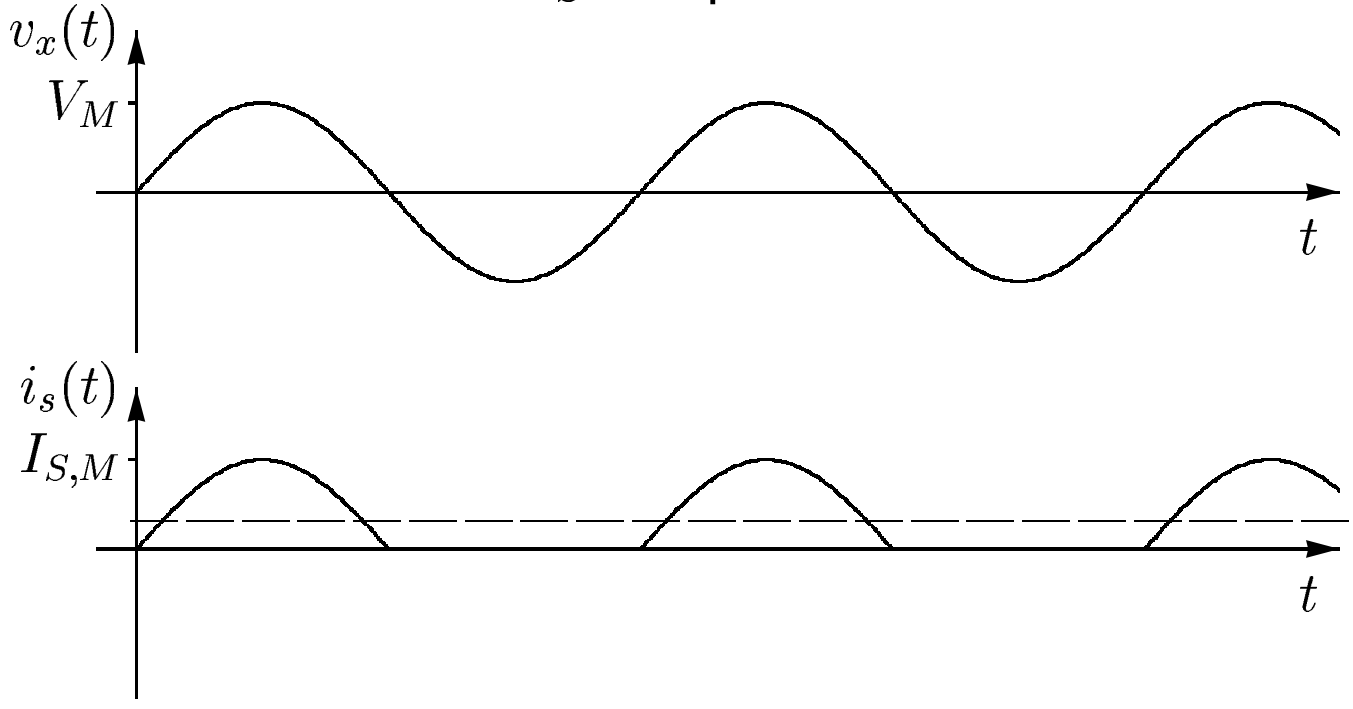
Raddrizzatore a singola semionda

Trascurando la c.d.t sul diodo:



$$i_s(t) = \begin{cases} \dfrac{v_x(t)}{R_S} & \text{per} \quad v_x(t) > 0 \\ 0 & \text{per} \quad v_x(t) \leq 0 \end{cases}$$

R_S comprende la resistenza serie (R_V)



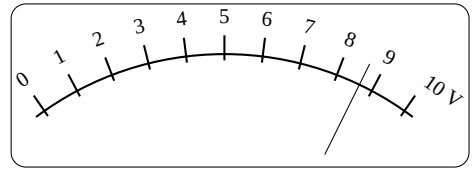
Circuiti di raddrizzamento

- $v_x(t) = V_M \sin(\omega t)$

$$i_s(t) = \begin{cases} I_{S,M} \sin(\omega t) = \dfrac{V_M}{R_S} \sin(\omega t) & \text{per} \quad v_x(t) > 0 \\ 0 & \text{per} \quad v_x(t) \leq 0 \end{cases}$$

Se lo strumento è sensibile al valor medio della corrente (inerzia), **l'indicazione** sarà **proporzionale** al valor medio di $i_s(t)$:

$$\vartheta = k\overline{i_s(t)} = k\frac{V_M}{\pi R_S}$$



e quindi anche **al valor efficace della tensione** (e della corrente)

$$\vartheta = k\overline{i_s(t)} = k\frac{V_M}{\pi R_S} = \frac{k\sqrt{2}}{\pi R_S} \cdot \frac{V_M}{\sqrt{2}} = k' V_{x,eff} \qquad k' = \frac{k\sqrt{2}}{\pi R_S}$$

$\Rightarrow$ Abbiamo ottenuto uno strumento per la misura del valore efficace **di una tensione sinusoidale** (non a vero valore efficace).

Circuiti di raddrizzamento

Ma ...

1. La c. d. t. sul diodo potrebbe non essere trascurabile $(V_M \simeq V_\gamma)$

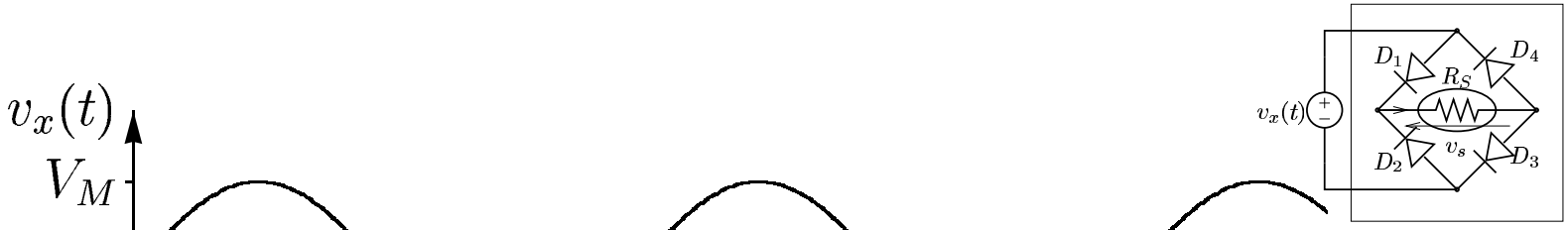
$$i_s(t) = \begin{cases} \dfrac{v_x(t) - V_\gamma}{R_S} & v_x(t) \geq V_\gamma \\ 0 & v_x(t) < V_\gamma \end{cases}$$

   La corrente non è piu “sinusoidale” (su una semionda) e non è più valido il risultato trovato $\rightarrow$ quanto vale k?
   (inoltre la caduta sul diodo dipende dalla corrente e non è costante)

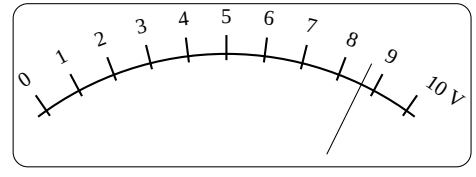
2. La tensione potrebbe non essere sinusoidale
   Il fattore k' dipende dalla forma della tensione.
   Per ricavare il valore efficace bisogna “correggere” la lettura, ma questo è possibile solo se si conosce l’andamento della tensione da misurare.

Circuiti di raddrizzamento

Raddrizzamento a doppia semionda (ponte di Graetz)



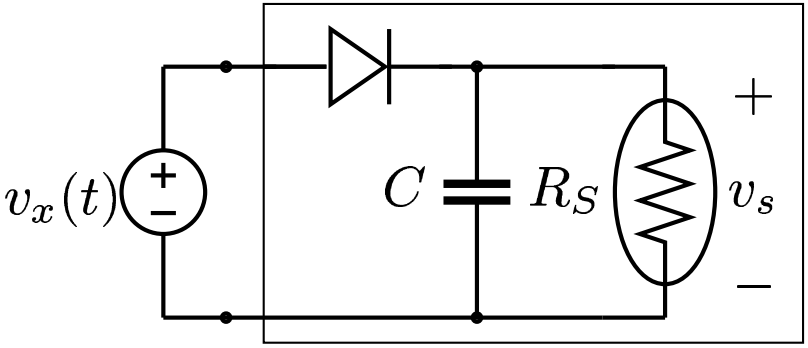
$$\vartheta = k\overline{i_s(t)} = k\frac{\mathbf{2}V_M}{\pi R_S}$$



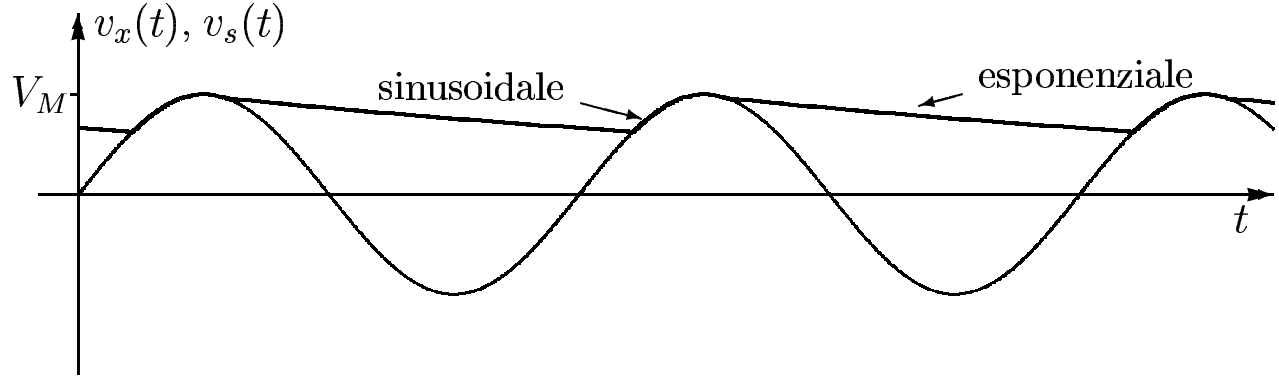
$\Rightarrow$ maggiore sensibilità!

Circuiti di raddrizzamento

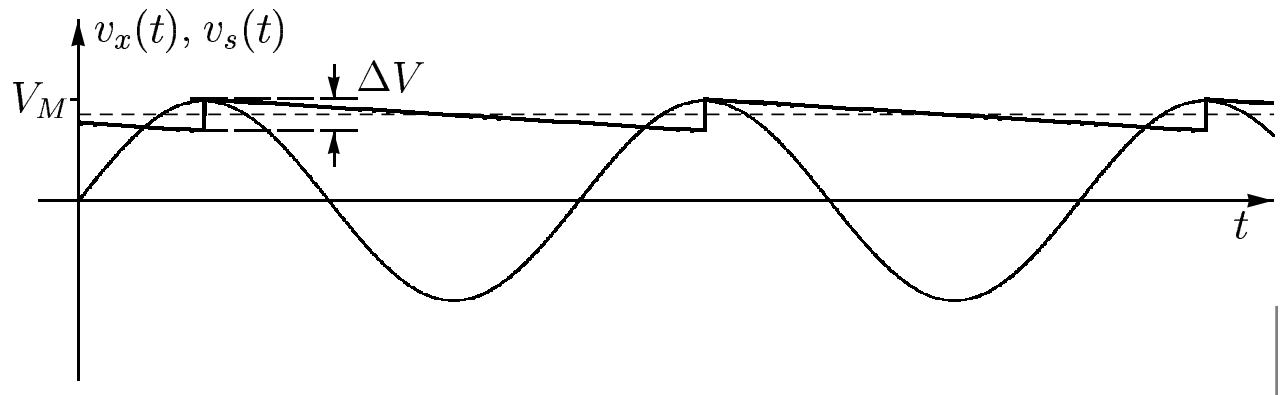
Raddrizzatore con filtro capacitivo



andamento $\simeq$ reale:
c.d.t. sul diodo trascurabile



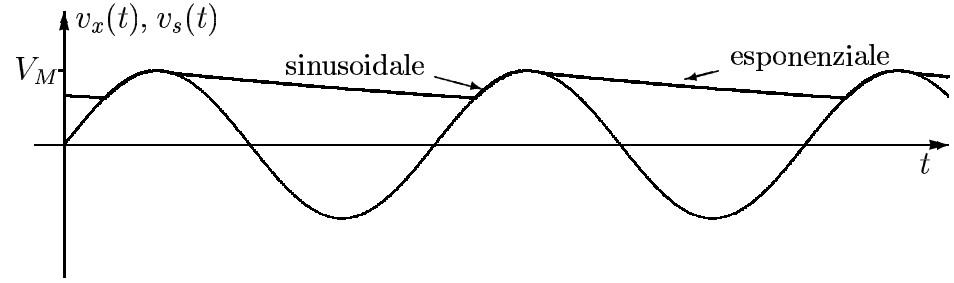
andamento approssimato:
c.d.t. sul diodo trascurabile
scarica lineare del condensatore



Circuiti di raddrizzamento

Andamento esponenziale:

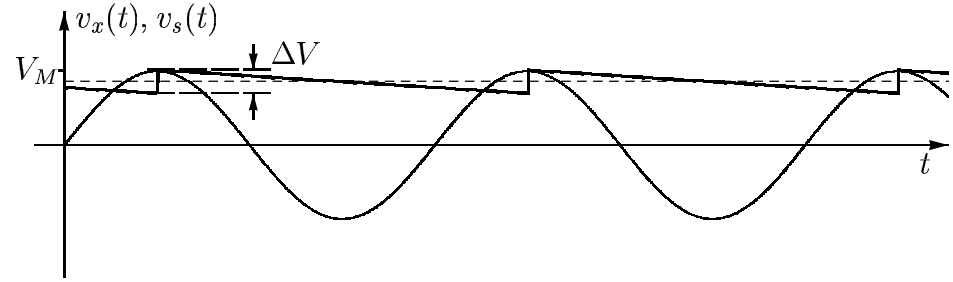
$$v_s(t) \simeq V_M e^{\dfrac{t - T/4}{\tau}}, \quad \tau = R_S C$$



Se $\tau \gg T$, allora

$$v_s(t) \simeq V_M \left[1 - \frac{(t - T/4)}{\tau}\right]$$

per $T/4 \leq t < 5T/4$



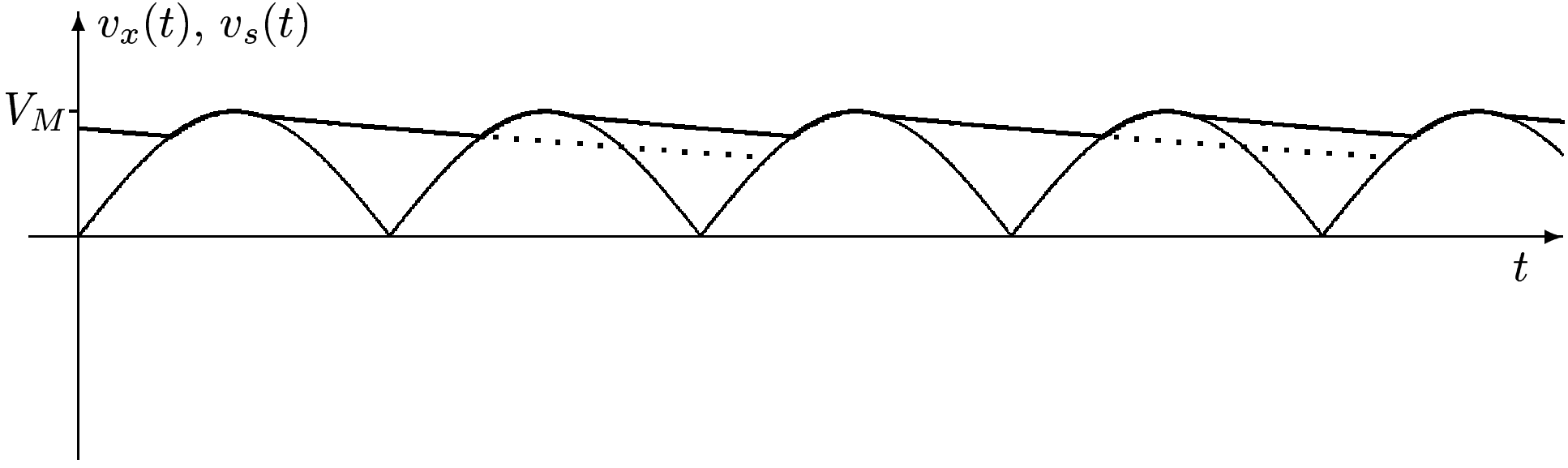
$$\Delta V = V_M \frac{T}{\tau} \qquad \overline{v_s(t)} = V_M - \Delta V/2 \qquad \overline{i_s(t)} = \frac{V_M}{R_S} - \frac{\Delta V}{2R_S}$$

- Sensibilità: come per Voltmetro in c.c.
- *ripple:* errore sistematico ($\neq$ cost.).

$$\vartheta = k\overline{i_s(t)} = k\left(\frac{V_M}{R_S} - \frac{\Delta V}{2R_S}\right)$$

Circuiti di raddrizzamento

Filtro capacitivo + raddrizzamento a doppia semionda:

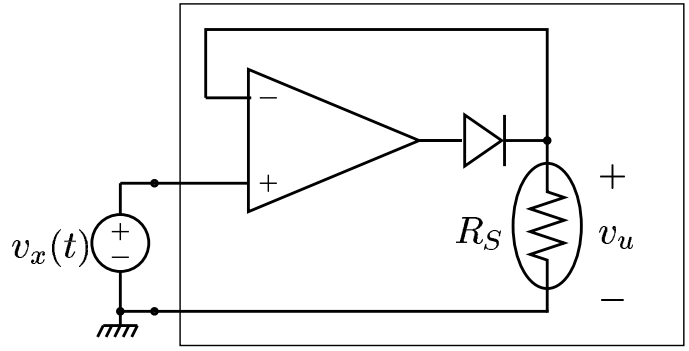


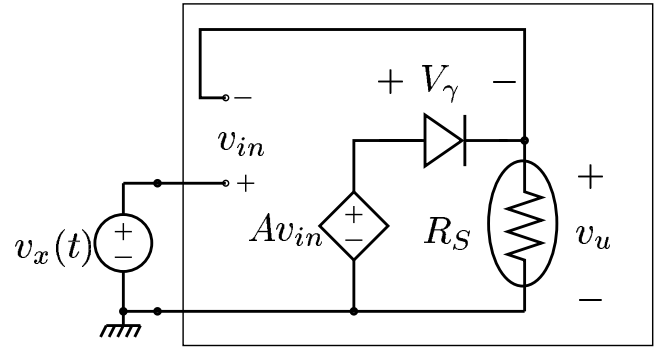
- riduzione del *ripple*;
- ulteriore aumento del valor medio della tensione (e della corrente);
- ulteriore aumento della sensibilità.

⚠ rimane l'errore!

Circuiti di raddrizzamento

Raddrizzatori di precisione - Uso degli A.O.





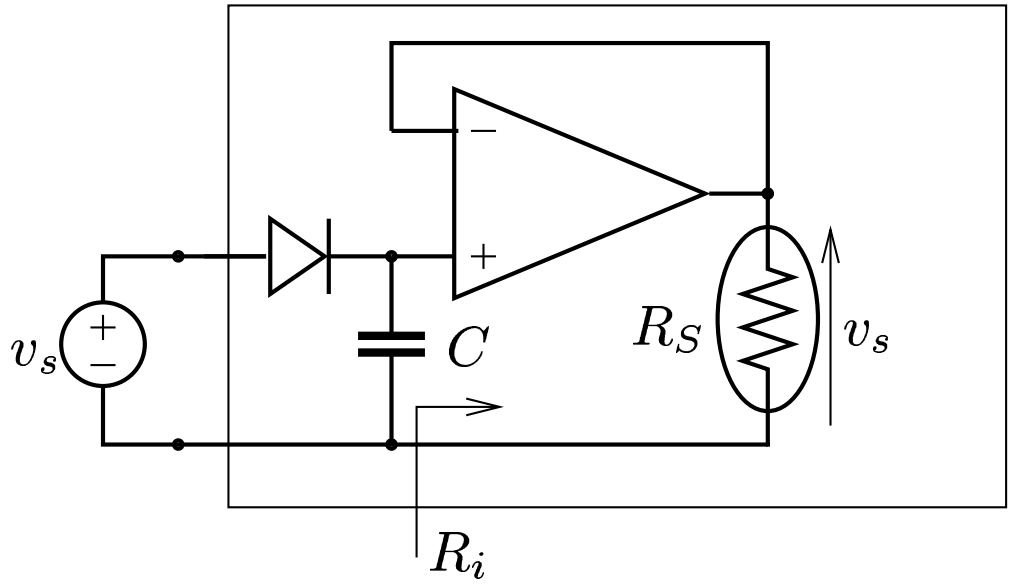
$$v_u(t) = \begin{cases} \dfrac{Av_x(t) - V_\gamma}{1+A} & v_x(t) \geq \dfrac{V_\gamma}{A} \\ 0 & v_x(t) < \dfrac{V_\gamma}{A} \end{cases}$$

$$v_u(t) = \frac{Av_x(t) - V_\gamma}{1+A} = \frac{A}{1+A}v_x(t) - \frac{V_\gamma}{1+A} \simeq v_x(t) \qquad \left(v_x(t) \geq \frac{V_\gamma}{A}\right)$$

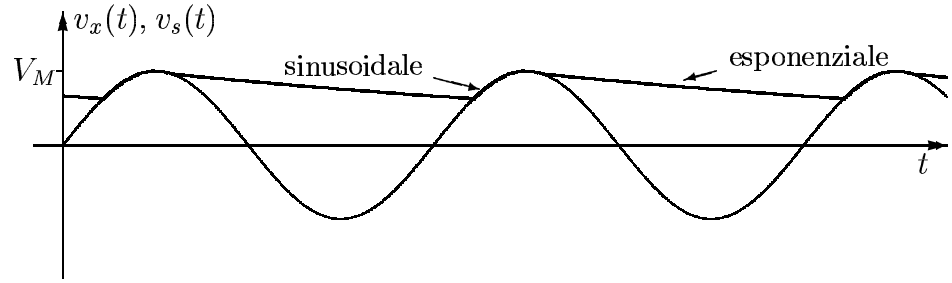
$\Rightarrow$ errore praticamente nullo (*superdiodo*)!

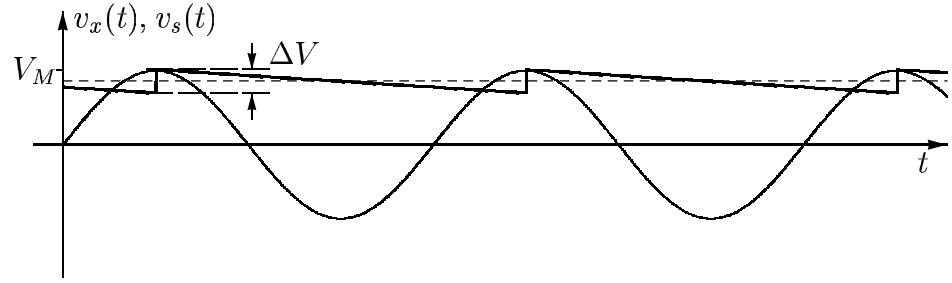
Circuiti di raddrizzamento

Voltmetro con inseguitore di tensione



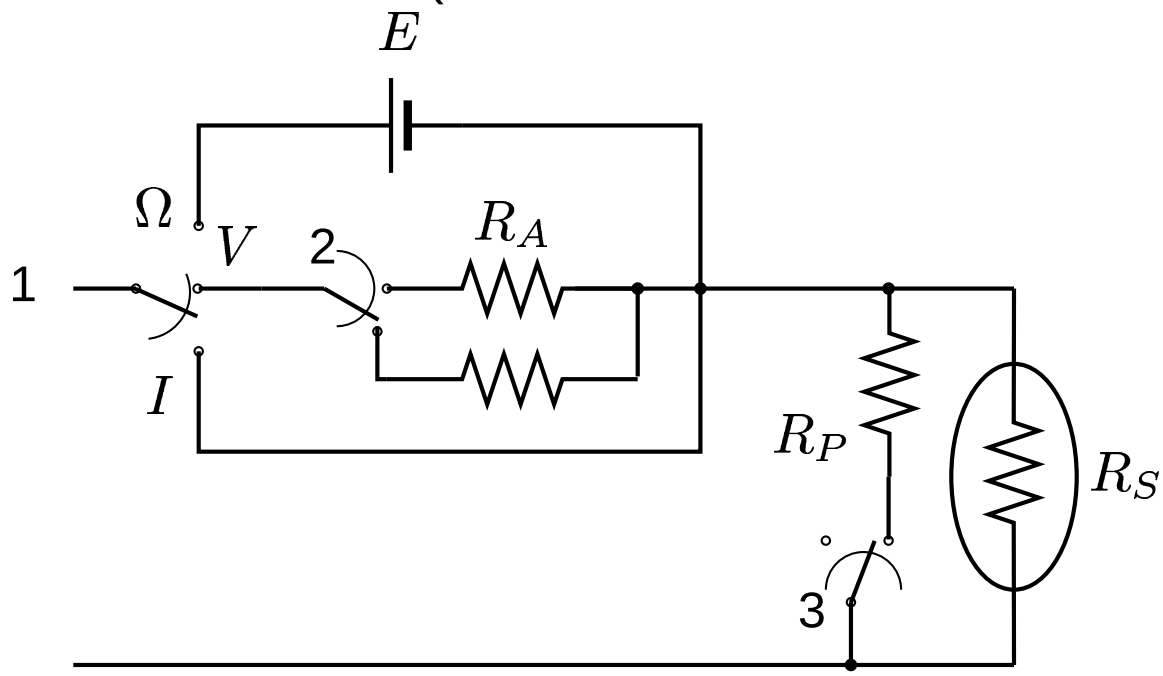
$$R_i = R_{in,A.O.}(1 + A_{vol0})$$
$$> 10^{11}\,\Omega\,!$$
$$\tau \ggg T$$





Multimetro

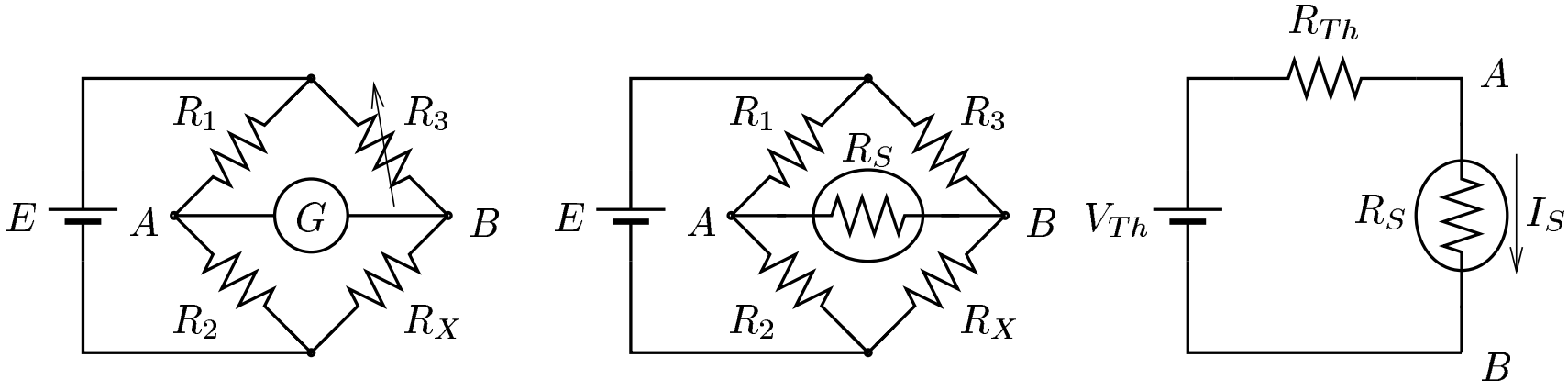
Multimetro in corrente continua (V.O.M.: Volt-Ohm-Milliammeter)



1. selezione funzione (I, V, Ω);
2. selezione resistenza serie (voltmetro);
3. selezione resistenza di *shunt* (amperometro);

Circuiti a ponte

Ponte di Wheatstone

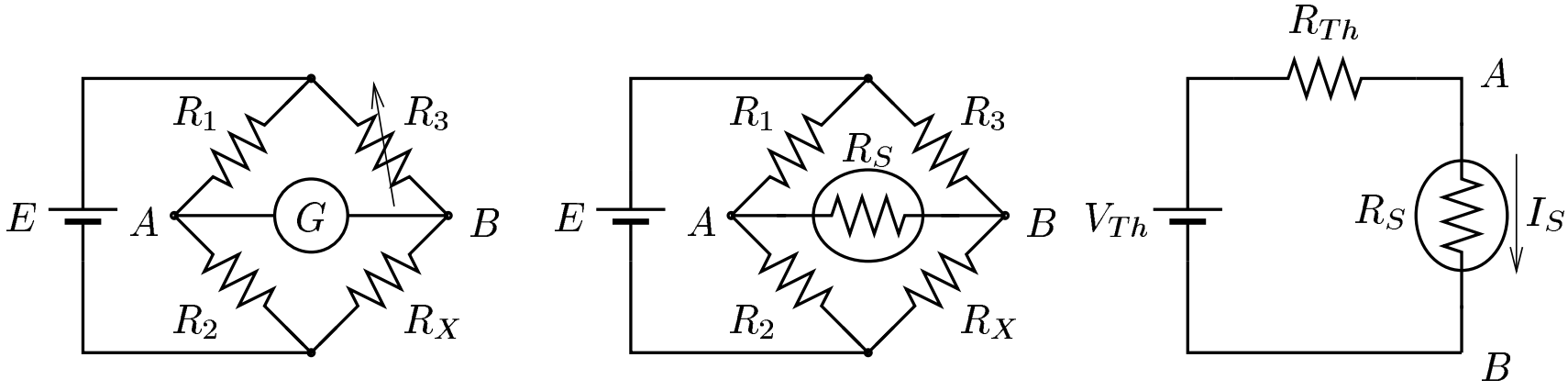


G: galvanometro (rivelatore di zero).

$$R_{Th} = (R_1 \| R_2) + (R_3 \| R_X) \qquad V_{th} = E\left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_X}{R_3 + R_X}\right)$$

Circuiti a ponte

Ponte di Wheatstone



G: galvanometro (rivelatore di zero).

$$R_{Th} = (R_1 \| R_2) + (R_3 \| R_X) \qquad V_{th} = E\left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_X}{R_3 + R_X}\right)$$

$$I_S = 0 \quad \Leftrightarrow \quad V_{Th} = 0 \qquad\qquad V_{Th} = 0 \quad \Leftrightarrow \quad \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{R_X}{R_3 + R_X}$$

Ponte di Wheatstone (2)

$$I_S = 0 \quad \Leftrightarrow \quad \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{R_X}{R_3 + R_X} \qquad (*)$$

- Facendo variare R_3 si rende nulla la corrente nello strumento;

Ponte di Wheatstone (2)

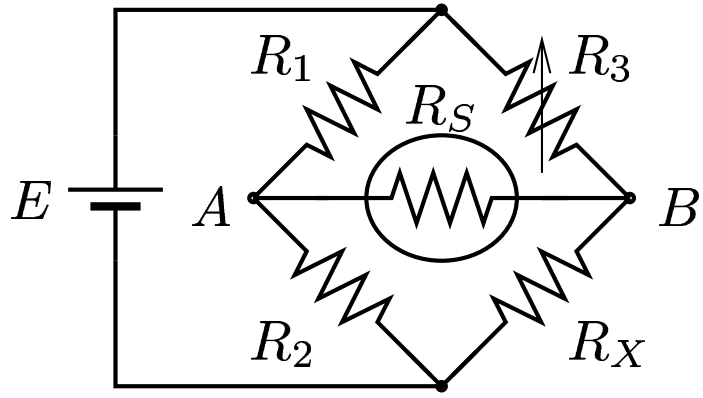
$$I_S = 0 \quad \Leftrightarrow \quad \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{R_X}{R_3 + R_X} \qquad (*)$$

- Facendo variare R_3 si rende nulla la corrente nello strumento;
- Note R_1, R_2 ed $\underline{R_3}$, $\qquad R_X = \frac{R_2}{R_1} R_3$ [dalla $(*)$].

Ponte di Wheatstone (2)

$$I_S = 0 \quad \Leftrightarrow \quad \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{R_X}{R_3 + R_X} \qquad (*)$$

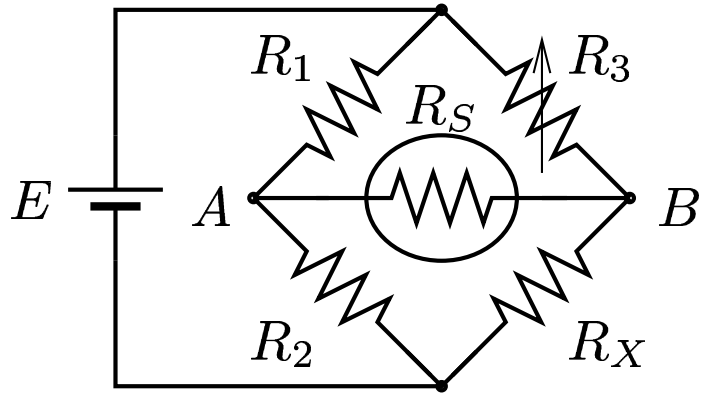
- Facendo variare R_3 si rende nulla la corrente nello strumento;
- Note R_1, R_2 ed $\underline{R_3}$, $\qquad R_X = \dfrac{R_2}{R_1} R_3$ [dalla $(*)$].



Ponte di Wheatstone (2)

$$I_S = 0 \quad \Leftrightarrow \quad \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{R_X}{R_3 + R_X} \qquad (*)$$

- Facendo variare R_3 si rende nulla la corrente nello strumento;
- Note R_1, R_2 ed $\underline{R_3}$, $\qquad R_X = \dfrac{R_2}{R_1} R_3$ [dalla $(*)$].

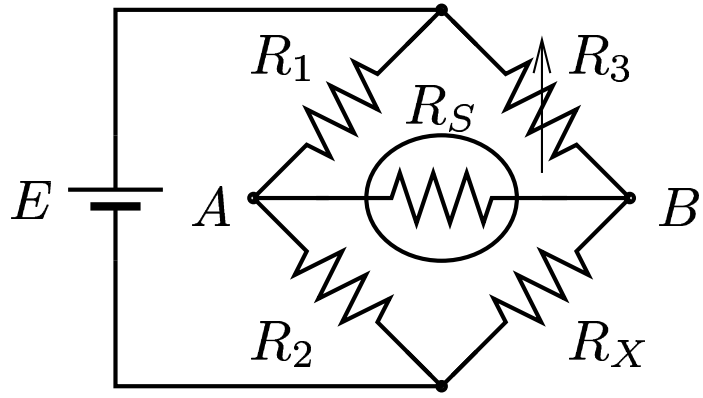


- Serve uno strumento con grande sensibilità (galvanometro!);

Ponte di Wheatstone (2)

$$I_S = 0 \quad \Leftrightarrow \quad \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{R_X}{R_3 + R_X} \qquad (*)$$

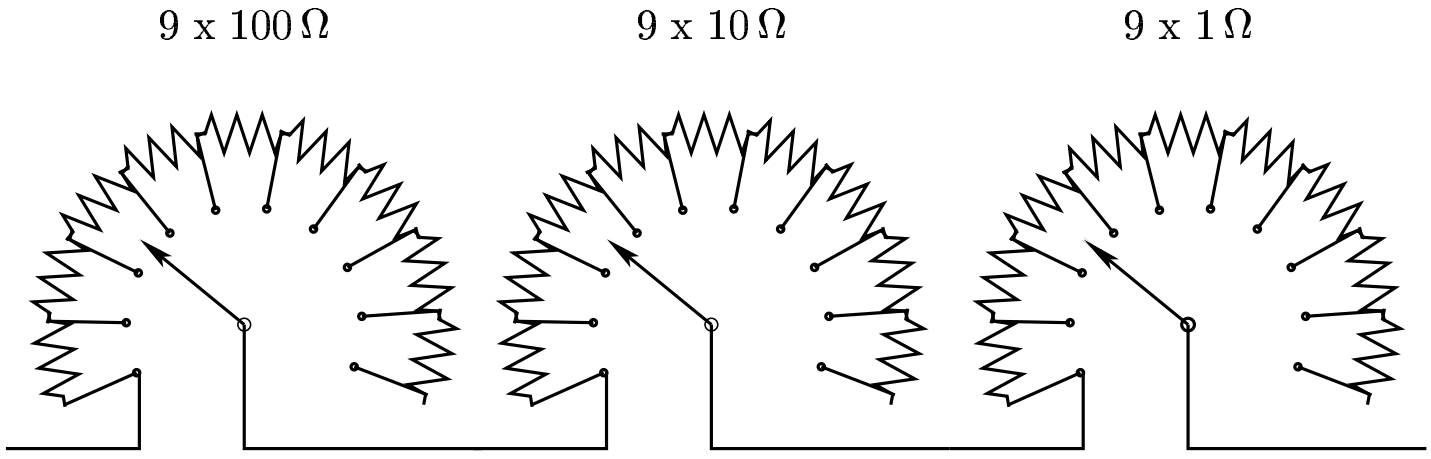
- Facendo variare R_3 si rende nulla la corrente nello strumento;
- Note R_1, R_2 ed $\underline{R_3}$, $\qquad R_X = \dfrac{R_2}{R_1} R_3$ [dalla $(*)$].



- Serve uno strumento con grande sensibilità (galvanometro!);
- R_3 deve essere $\underline{\text{variabile}}$ e $\underline{\text{nota}}$: varia a scatti.

Banco di resistenze

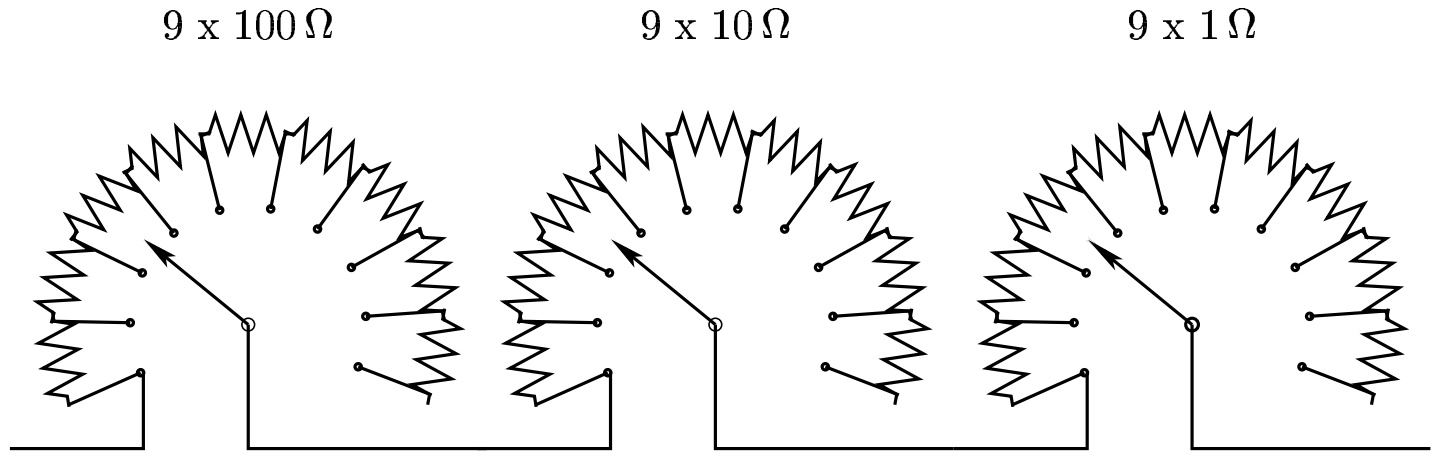
Resistore variabile per decadi



$R_{min} = 0, \quad R_{max} = 999\,\Omega\ (1000\,\Omega), \quad \Delta R = 1\,\Omega.$

Banco di resistenze

Resistore variabile per decadi



$$R_{min} = 0, \quad R_{max} = 999\,\Omega\ (1000\,\Omega), \quad \Delta R = 1\,\Omega.$$

$$I_S = \frac{V_{Th}}{R_S + R_{Th}} \simeq \frac{V_{Th}}{R_S} = \frac{E}{R_S}\left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_X}{R_3 + R_X}\right)$$

$$= \frac{E}{R_S} \cdot \frac{R_2 R_3 - R_1 R_X}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_X)} = E\frac{R_1}{R_S} \cdot \frac{\Delta R}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_X)}$$

$$R_{Th} \ll R_S \quad \text{(sensit.)}, \qquad \Delta R = \frac{R_2 R_3}{R_1} - R_X \quad \text{(incertezza)}$$

Ponte di Wheatstone - incertezza

Detta ΔI la sensitività del galvanometro, si ha indicazione nulla se $I_S < \Delta I$

$$E \frac{R_1}{R_S} \cdot \frac{\Delta R}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_X)} < \Delta I$$

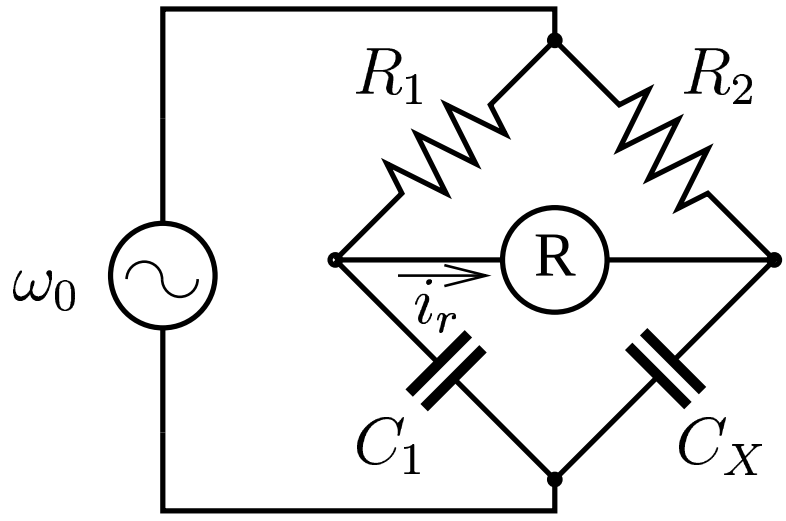
cioè se

$$\Delta R < R_S \frac{(R_1 + R_2)(R_3 + R_X)\Delta I}{R_1 E}$$

L'incertezza ΔR dipende

- dal galvanometro (ΔI),
- dalla tensione di alimentazione (E),
- dalla resistenza incognita (R_X)
- dalle altre resistenze del ponte.

Ponti in corrente alternata



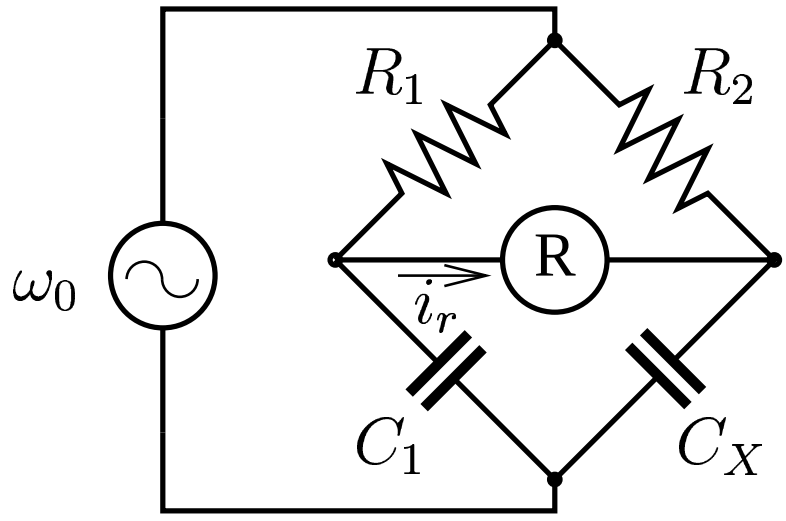
In condizioni di bilanciamento ($i_r = 0$) si ha:

$$\frac{R_1}{j\omega_0 C_X} = \frac{R_2}{j\omega_0 C_1}$$

da cui segue $C_X = C_1 \frac{R_1}{R_2}$

relazione indipendente dalla frequenza di lavoro.

Ponti in corrente alternata



In condizioni di bilanciamento ($i_r = 0$) si ha:

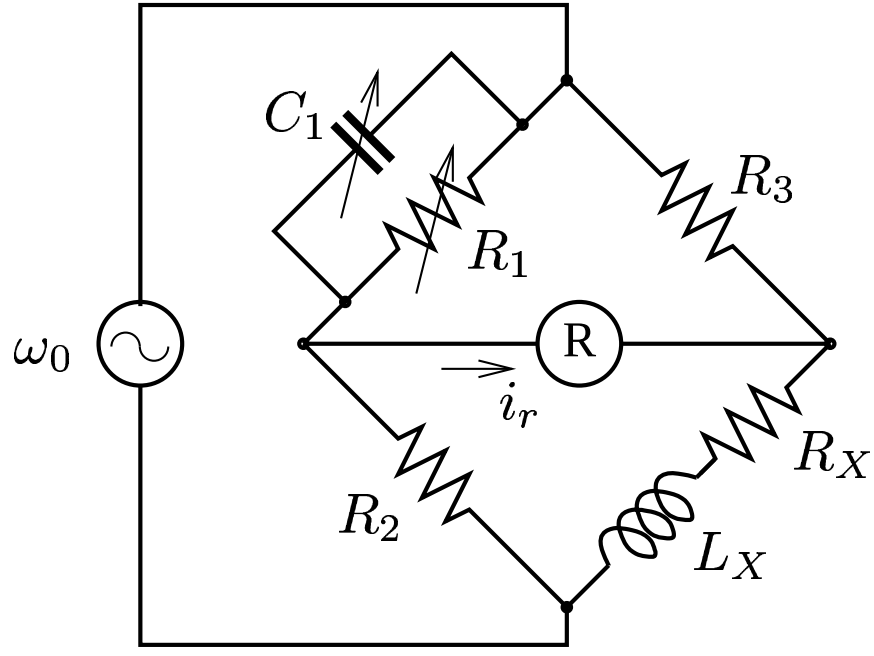
$$\frac{R_1}{j\omega_0 C_X} = \frac{R_2}{j\omega_0 C_1}$$

da cui segue $C_X = C_1 \frac{R_1}{R_2}$

relazione indipendente dalla frequenza di lavoro.

Ponti in corrente alternata

Ponte di Maxwell-Wien



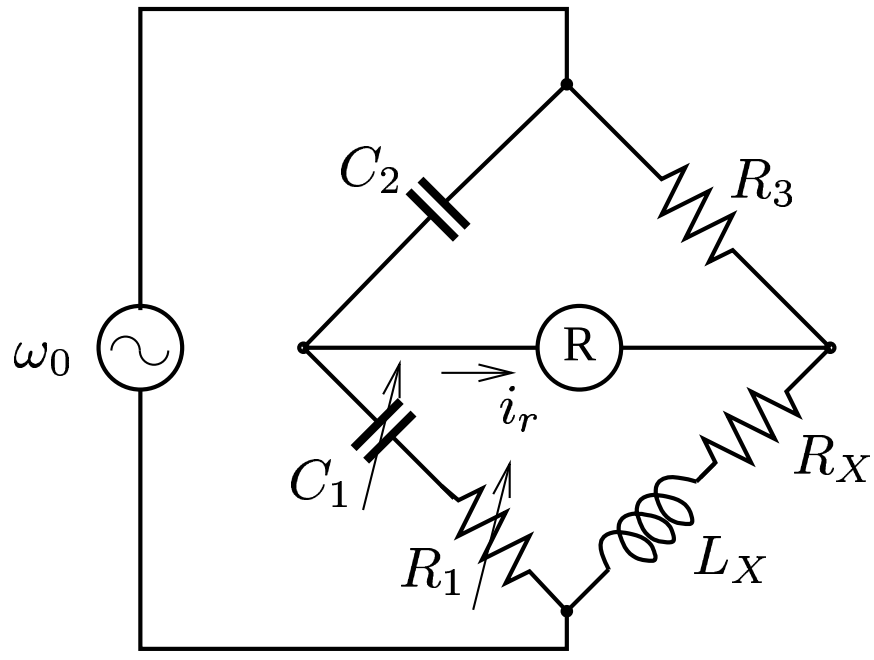
In condizioni di bilanciamento ($i_r = 0$) si ha:

$$R_2 R_3 = \frac{R_1}{1 + j\omega_0 R_1 C_1}(R_X + j\omega_0 L_X)$$

da cui segue $R_X = \dfrac{R_2 R_3}{R_1}$ e $L_X = R_2 R_3 C_1$ $(\forall\, \omega_0)$

Ponti in corrente alternata

Ponte di Owen



In condizioni di bilanciamento ($i_r = 0$) si ha:

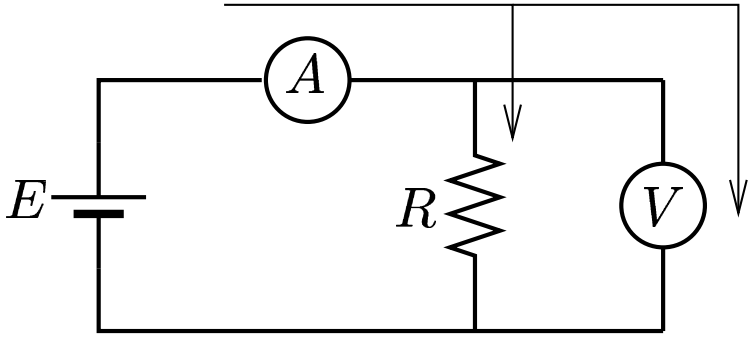
$$R_3 \left(R_1 + \frac{1}{j\omega_0 C_1} \right) = \frac{1}{j\omega_0 C_2} (R_X + j\omega_0 L_X)$$

da cui segue $R_X = R_3 \dfrac{C_2}{C_1}$ e $L_X = R_1 R_3 C_2$ $(\forall\, \omega_0)$

Misure di potenza

In corrente continua: $P = V \cdot I$

Metodo voltamperometrico:



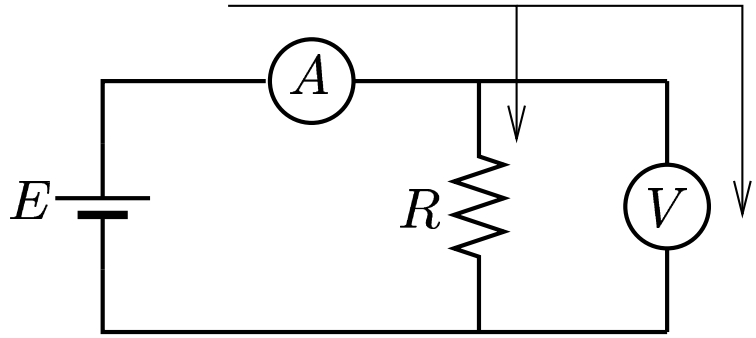
errore in corrente!

trascurabile per resistenze piccole

Misure di potenza

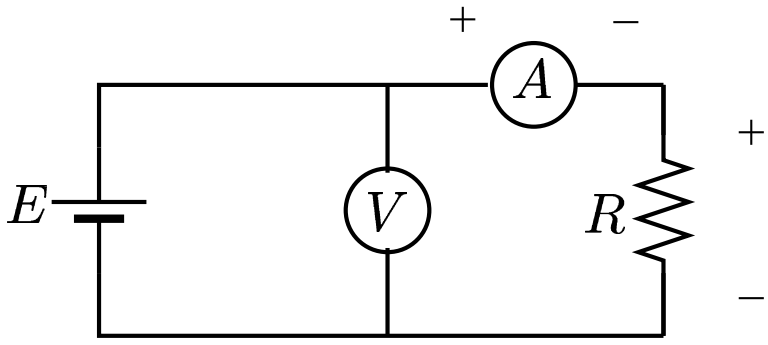
In corrente continua: $P = V \cdot I$

Metodo voltamperometrico:



errore in corrente!

trascurabile per resistenze piccole



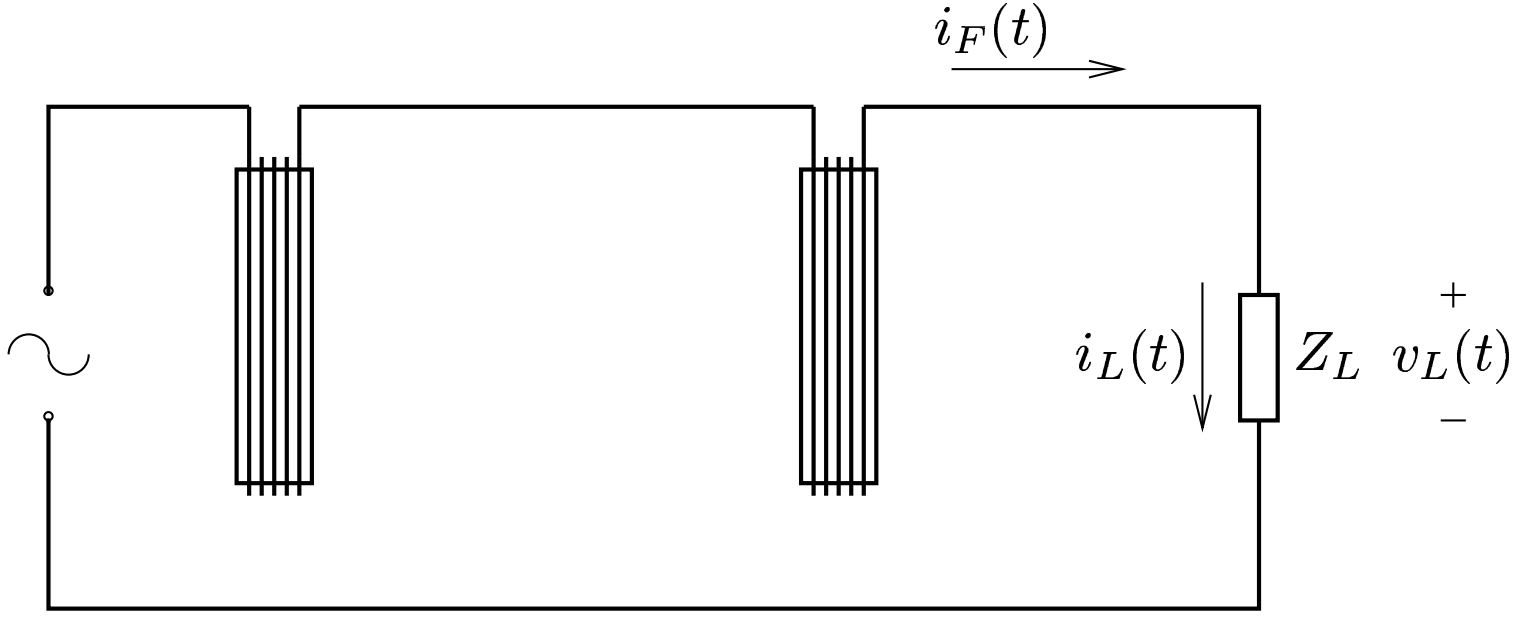
errore in tensione!

trascurabile per resistenze grandi

Misure di potenza (2)

In corrente alternata: $p(t) = v_L(t) \cdot i_L(t)$

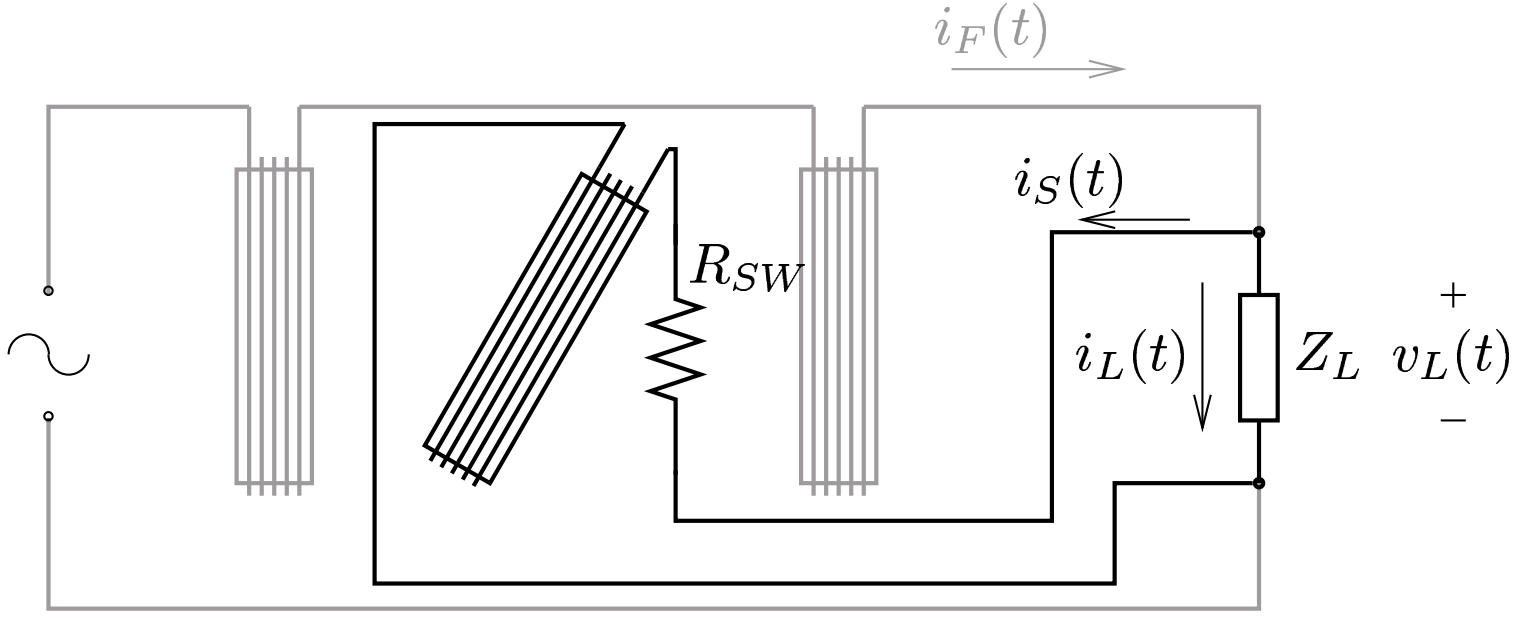
Wattmetro elettrodinamico (Metodo voltamperometrico):



Misure di potenza (2)

In corrente alternata: $p(t) = v_L(t) \cdot i_L(t)$

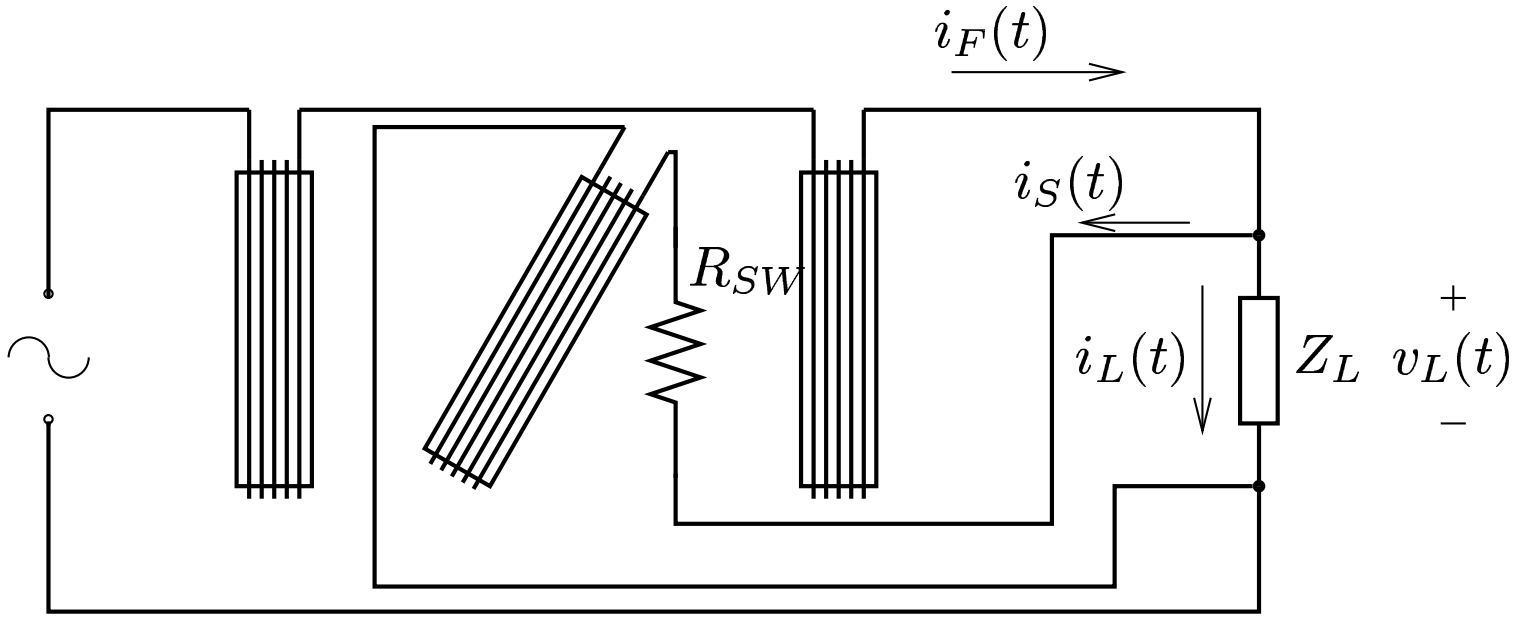
Wattmetro elettrodinamico (Metodo voltamperometrico):



Misure di potenza (2)

In corrente alternata: $p(t) = v_L(t) \cdot i_L(t)$

Wattmetro elettrodinamico (Metodo voltamperometrico):

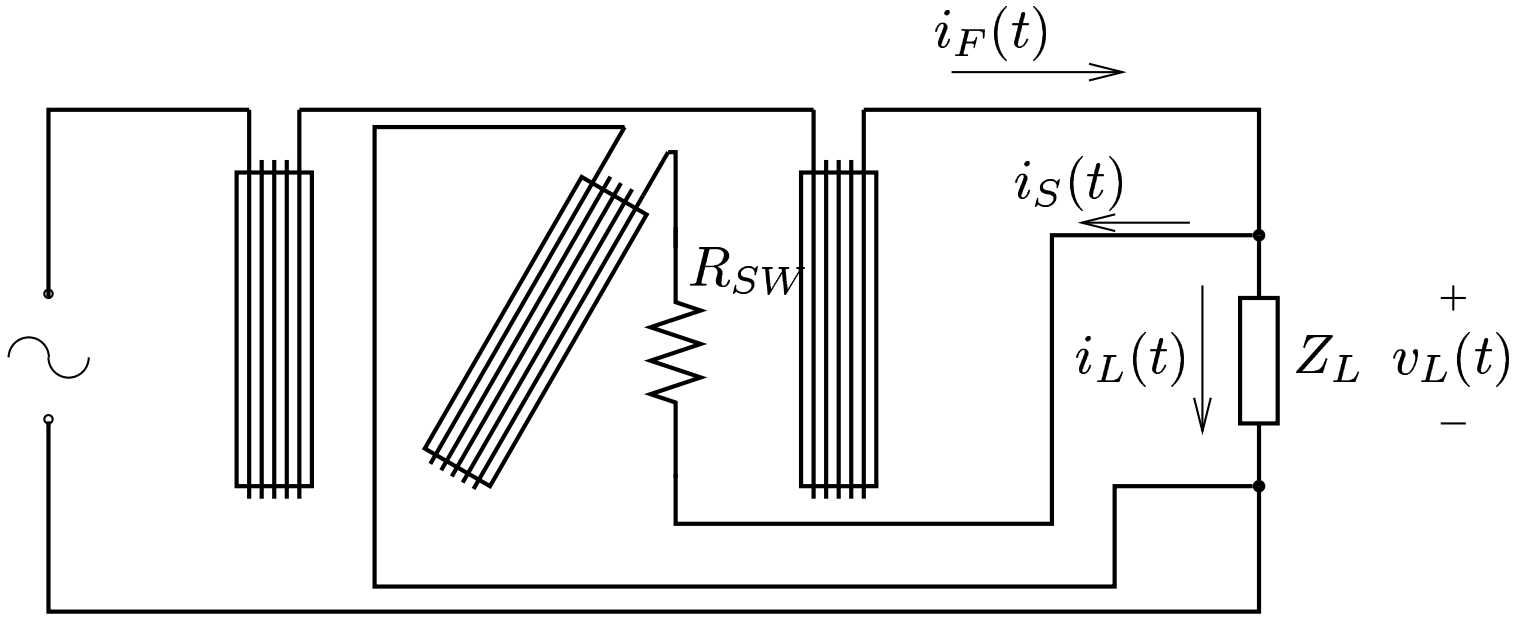


$$m(t) \propto \mathcal{B}(t) i_S(t) \qquad \mathcal{B}(t) \propto i_F(t) \qquad i_S(t) = \frac{v_L(t)}{R_S + R_{SW} + \ldots} \simeq \frac{v_L(t)}{R_{SW}}$$

Misure di potenza (2)

In corrente alternata: $p(t) = v_L(t) \cdot i_L(t)$

Wattmetro elettrodinamico (Metodo voltamperometrico):



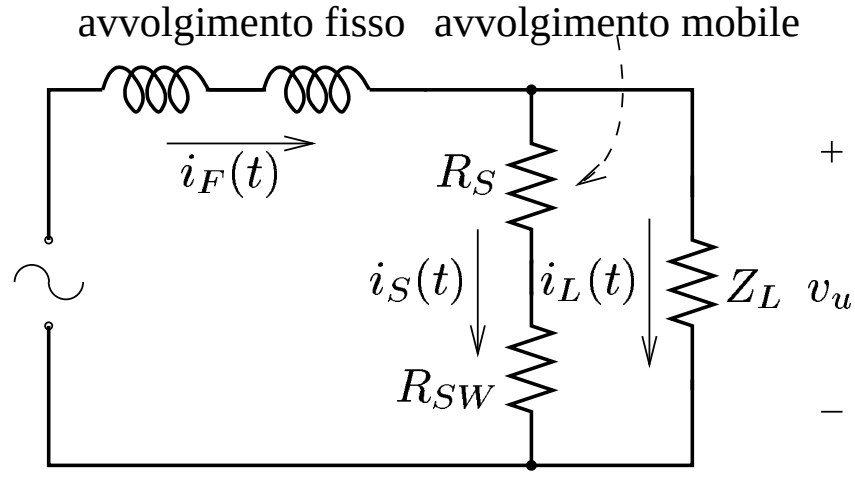
$$m(t) \propto \mathcal{B}(t) i_S(t) \qquad \mathcal{B}(t) \propto i_F(t) \qquad i_S(t) = \frac{v_L(t)}{R_S + R_{SW} + \ldots} \simeq \frac{v_L(t)}{R_{SW}}$$

$$m(t) \propto v_L(t) i_F(t) = v_L(t)[i_S(t) + i_L(t)] \simeq v_L(t) i_L(t) \qquad \text{se} \quad i_S(t) \ll i_L(t)$$

Wattmetro elettrodinamico

Per l'inerzia dell'equipaggio:

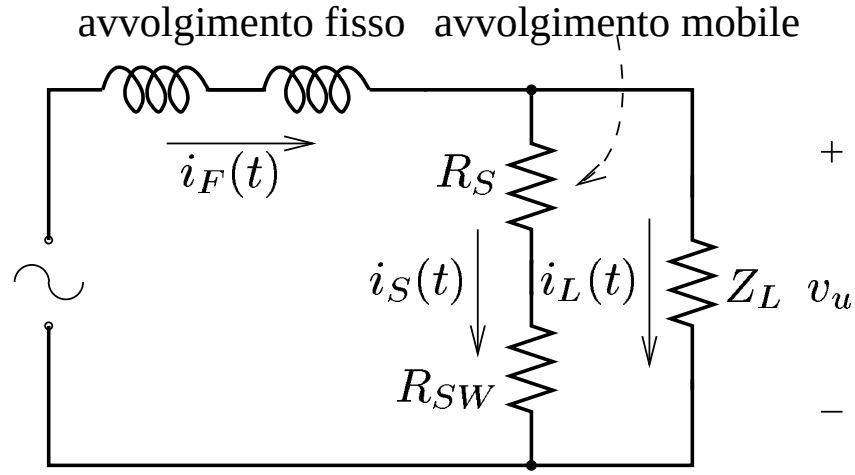
$$\begin{aligned}\theta \propto \overline{m(t)} &= k \cdot \overline{v_L(t) i_L(t)} \\ &= k \cdot \overline{p(t)}\end{aligned}$$



Wattmetro elettrodinamico

Per l'inerzia dell'equipaggio:

$$\begin{aligned}\theta \propto \overline{m(t)} &= k \cdot \overline{v_L(t) i_L(t)} \\ &= k \cdot \overline{p(t)}\end{aligned}$$



In regime sinusoidale:

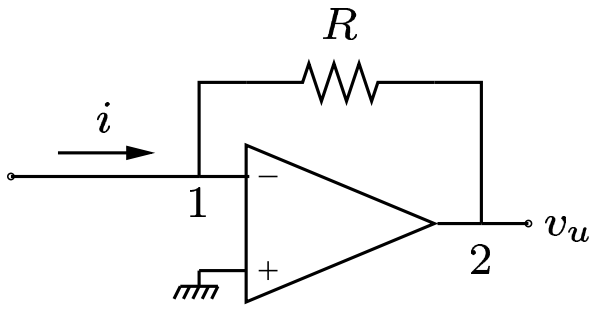
$$i_L(t) = I_M \cos(\omega t) \qquad v_L = V_M \cos(\omega t + \varphi)$$

$$p(t) = \frac{1}{2} I_M V_M [\cos\varphi + \cos(2\omega t + \varphi)]$$

$$\overline{p(t)} = \frac{V_M}{\sqrt{2}} \cos\varphi = \frac{I_M}{\sqrt{2}} \frac{V_M}{\sqrt{2}} \cos\varphi = I_{\text{eff}} V_{\text{eff}} \cos\varphi$$

Strumenti Elettronici - Convertitore corrente - tensione

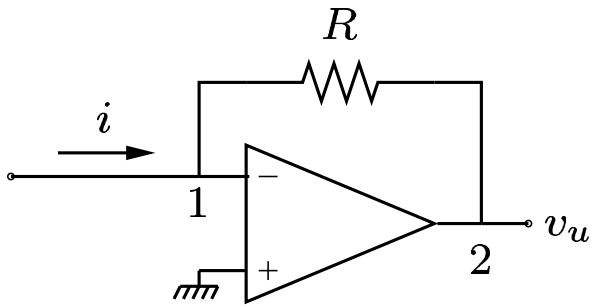
(Amplificatore transresistivo)



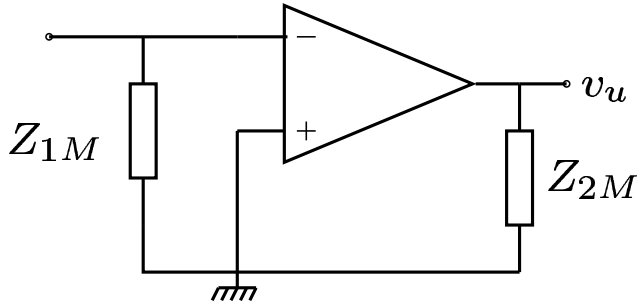
$$v_u = -Ri$$

Strumenti Elettronici - Convertitore corrente - tensione

(Amplificatore transresistivo)



$$v_u = -Ri$$

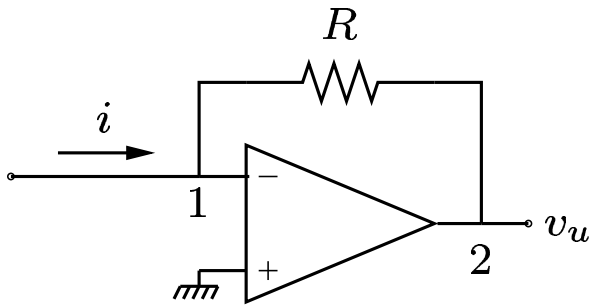


$$k(f) = \frac{v_2}{v_1} = \frac{v_u}{v^-} = -A_{vol}(f)$$

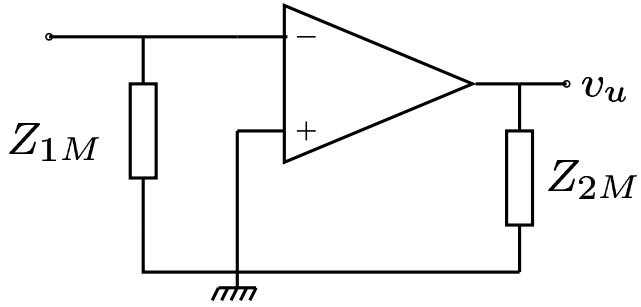
$$Z_{1M} = \frac{R}{1-k} = \frac{R}{1+A_{vol}}, \quad Z_{2M} = \frac{R}{1-1/k}$$

Strumenti Elettronici - Convertitore corrente - tensione

(Amplificatore transresistivo)



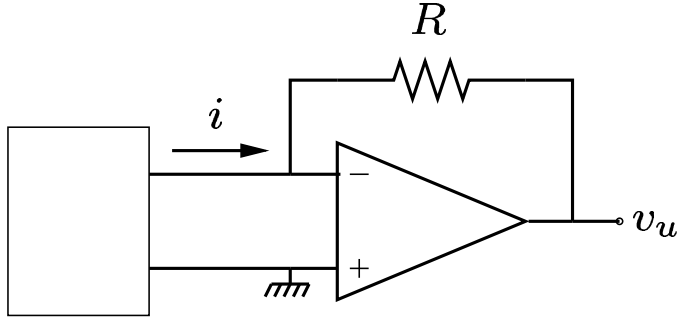
$$v_u = -Ri$$



$$k(f) = \frac{v_2}{v_1} = \frac{v_u}{v^-} = -A_{vol}(f)$$

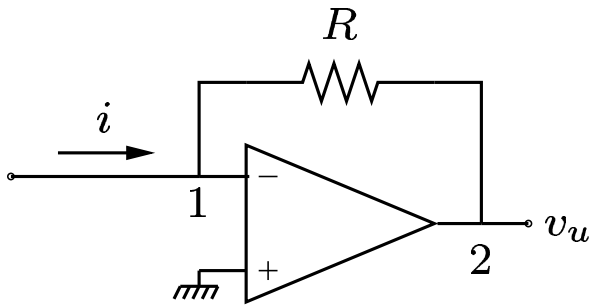
$$Z_{1M} = \frac{R}{1-k} = \frac{R}{1+A_{vol}}, \quad Z_{2M} = \frac{R}{1-1/k}$$

Misura di corrente:

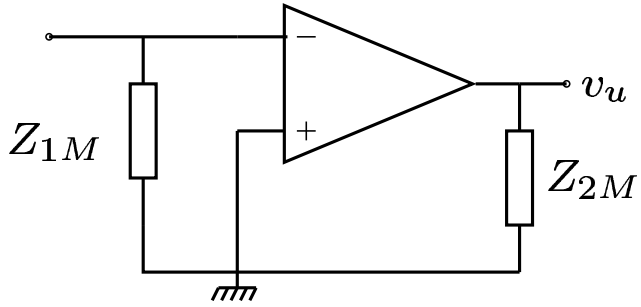


Strumenti Elettronici - Convertitore corrente - tensione

(Amplificatore transresistivo)



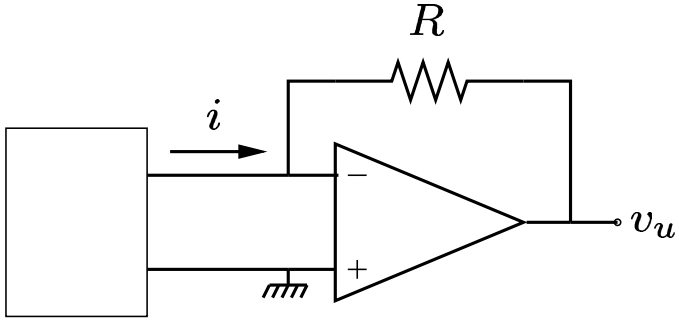
$$v_u = -Ri$$



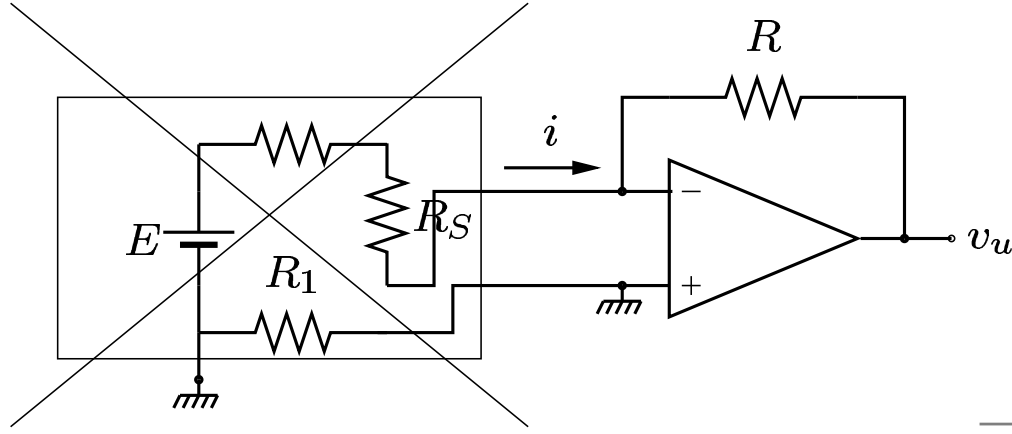
$$k(f) = \frac{v_2}{v_1} = \frac{v_u}{v^-} = -A_{vol}(f)$$

$$Z_{1M} = \frac{R}{1-k} = \frac{R}{1+A_{vol}}, \quad Z_{2M} = \frac{R}{1-1/k}$$

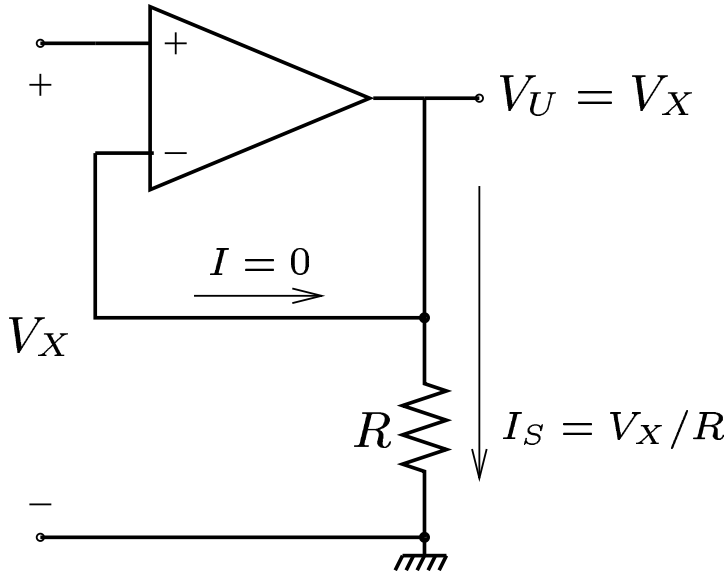
Misura di corrente:



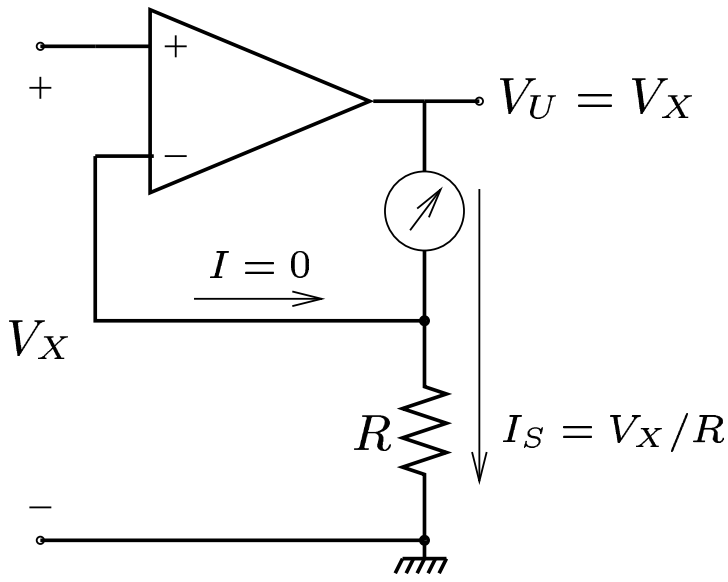
Attenzione:



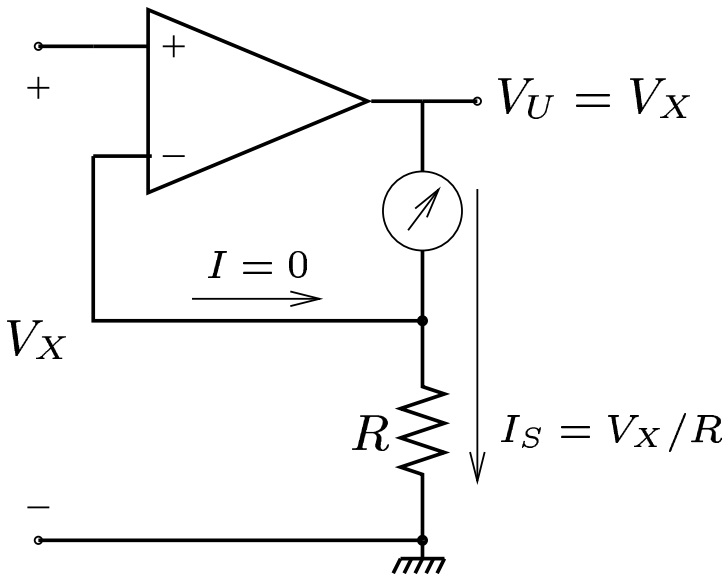
Voltmetro Elettrometrico



Voltmetro Elettrometrico

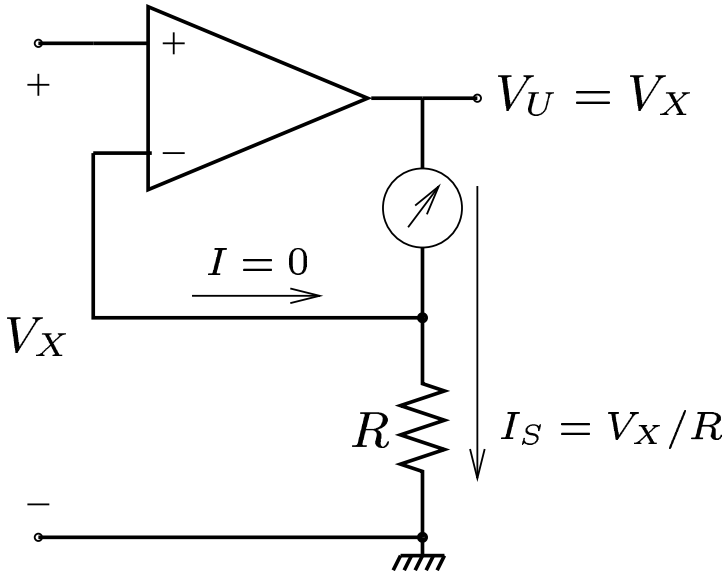


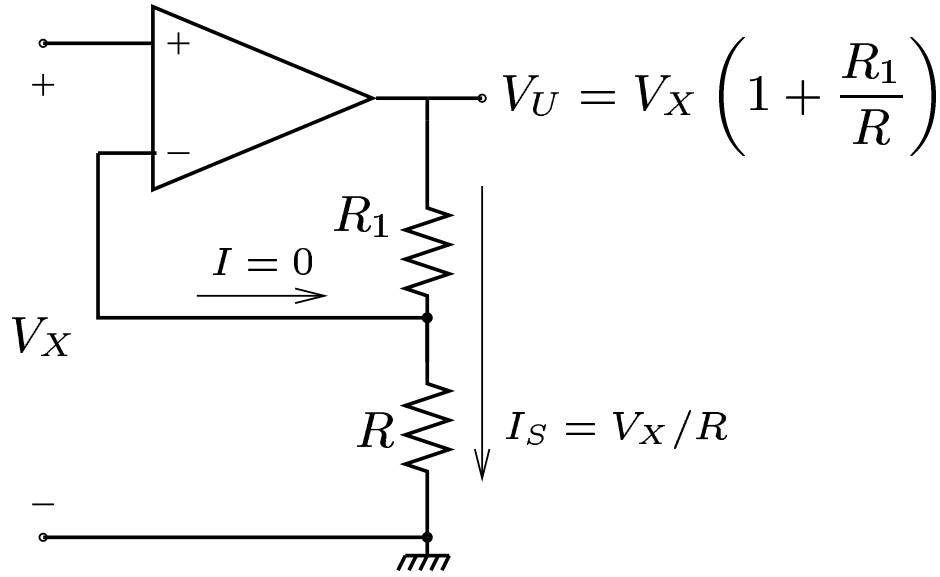
Voltmetro Elettrometrico



- R permette di variare la portata;
- resistenza interna (d'ingresso) alta (▲ Voltmetro);
- resistenza interna (d'ingresso) indipendente dalla portata.
- è disponibile una tensione $V_U = f(V_X)$ (p. es.) per pilotaggio di display digitale;
- anche questa operazione avviene senza caricare la sorgente.

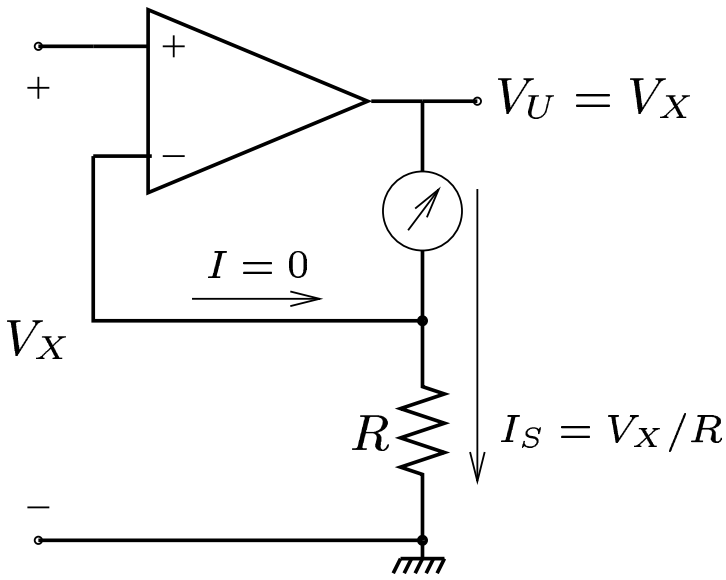
Voltmetro Elettrometrico

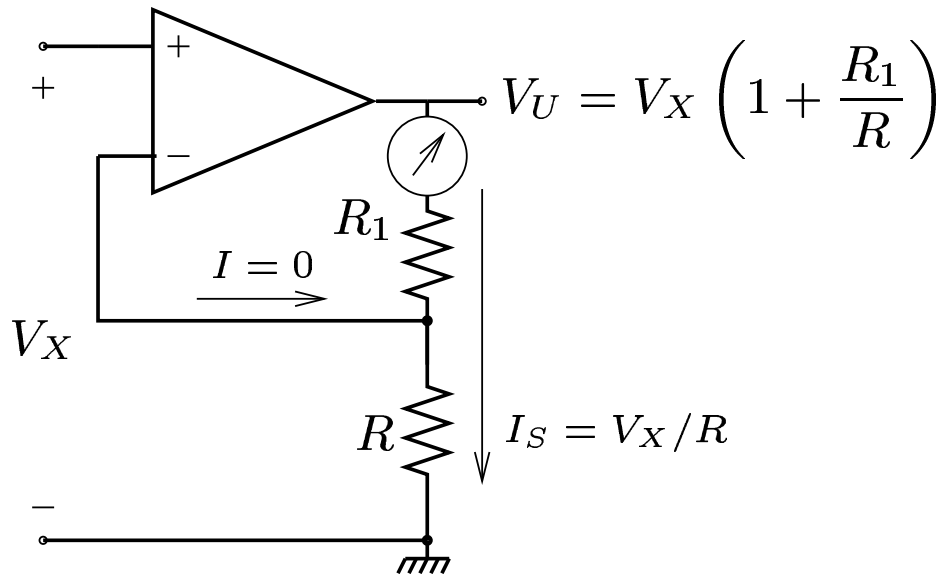




- R permette di variare la portata;
- resistenza interna (d'ingresso) alta (▲ Voltmetro);
- resistenza interna (d'ingresso) indipendente dalla portata.
- è disponibile una tensione $V_U = f(V_X)$ (p. es.) per pilotaggio di display digitale;
- anche questa operazione avviene senza caricare la sorgente.

Voltmetro Elettrometrico





- R permette di variare la portata;
- resistenza interna (d'ingresso) alta (▲ Voltmetro);
- resistenza interna (d'ingresso) indipendente dalla portata.
- è disponibile una tensione $V_U = f(V_X)$ (p. es.) per pilotaggio di display digitale;
- anche questa operazione avviene senza caricare la sorgente.