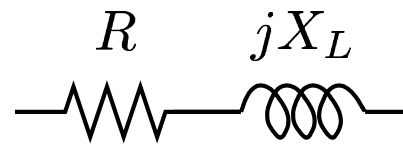


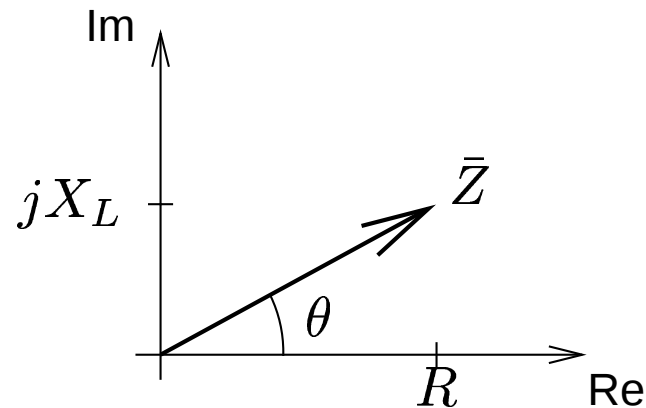
Misura di impedenze

Impedenza

- in un bipolo misura opposizione al passaggio di corrente.



$$\bar{Z} = R + jX_L \in \mathbb{C}$$



- anche in quadripoli o in sistemi a più terminali:

Es.: impedenza di trasferimento:

$$\bar{Z}_{tr} = \frac{\dot{V}_{out}}{\dot{I}_{in}}$$

- è espressa da un numero complesso.

Coefficiente di qualità

$$Q = \frac{E_{imm.}}{E_{diss.}} = \frac{E_r}{E_a}$$

- impedenza serie:

$$Q = \frac{X}{R}$$

$$R + j\omega L : \quad Q = \frac{\omega L}{R}$$

$$R + \frac{1}{j\omega C} : \quad Q = \frac{1}{\omega C R}$$

- impedenza parallelo:

$$Q = \frac{R}{X}$$

$$R // j\omega L : \quad Q = \frac{R}{\omega L}$$

$$R // \frac{1}{j\omega C} : \quad Q = \omega C R$$

Esprime la “purezza” di un elemento reattivo.

Coefficiente di dissipazione/perdita

$$D = \frac{E_{diss.}}{E_{imm.}} = \frac{E_a}{E_r} = \frac{1}{Q}$$

- impedenza serie:

$$D = \frac{R}{X}$$

$$R + j\omega L : \quad D = \frac{R}{\omega L}$$

$$R + \frac{1}{j\omega C} : \quad D = \omega C R$$

- impedenza parallelo:

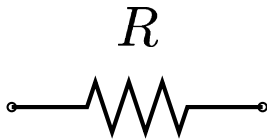
$$D = \frac{X}{R}$$

$$R // j\omega L : \quad D = \frac{\omega L}{R}$$

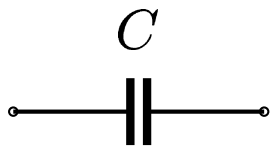
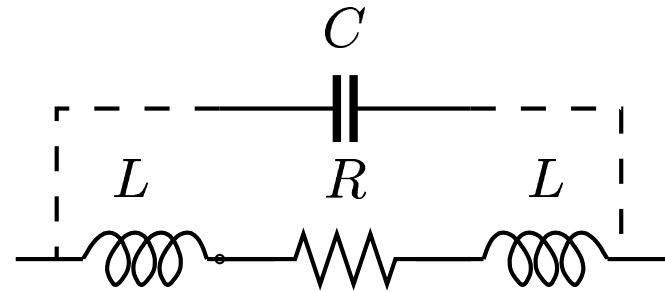
$$R // \frac{1}{j\omega C} : \quad D = \frac{1}{\omega C R}$$

Impedenze reali

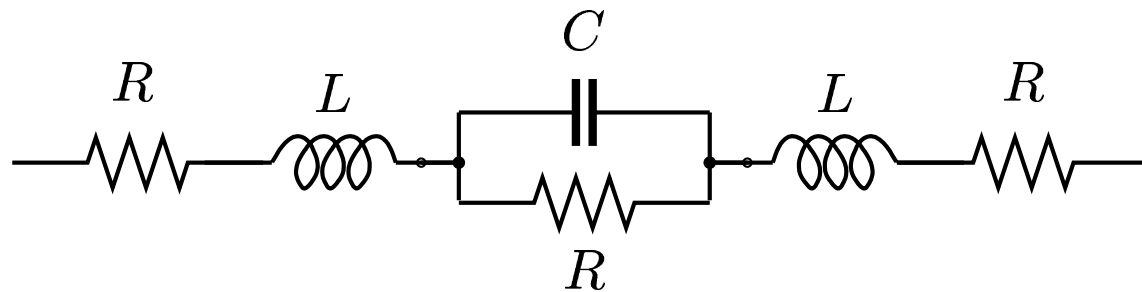
- Non esistono impedenze “pure”



$\Rightarrow$

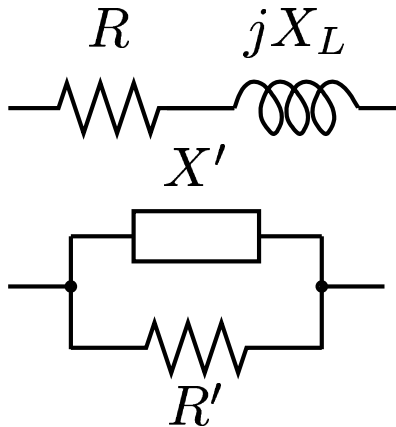


$\Rightarrow$



Modelli di impedenze

Esempio:



$$\bar{Z} = R + j\omega L$$

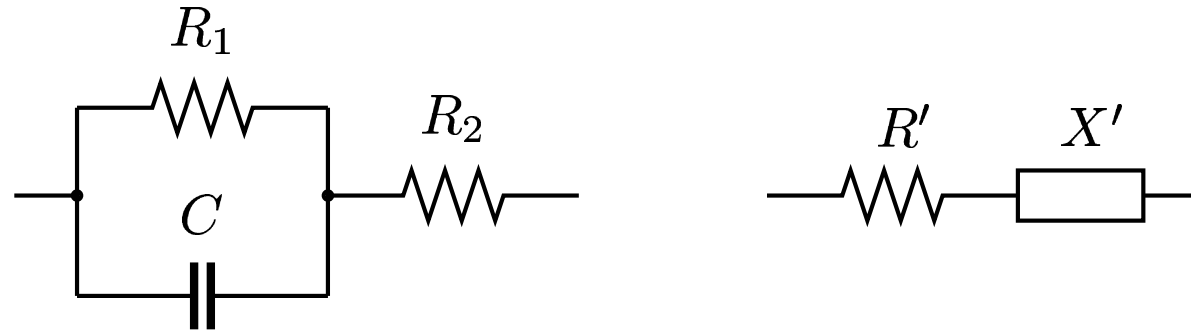
$$\bar{Y} = \frac{1}{\bar{Z}} = \frac{1}{R'} + \frac{1}{X'} =$$

$$= \frac{1}{R + j\omega L} = \frac{R - j\omega L}{R^2 + \omega^2 L^2} = \frac{R}{R^2 + \omega^2 L^2} - j \frac{\omega L}{R^2 + \omega^2 L^2}$$

$$R' = \frac{R^2 + \omega^2 L^2}{R} \quad X' = \frac{R^2 + \omega^2 L^2}{\omega L}$$

Modelli di impedenze

Esempio:

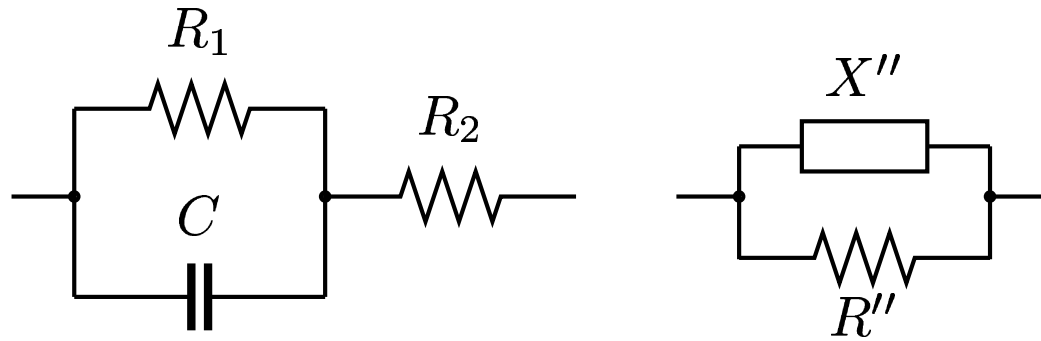


$$\begin{aligned} Z &= R_2 + \frac{R_1}{1 + j\omega R_1 C} = \frac{R_1 + R_2 + j\omega R_1 R_2 C}{1 + j\omega R_1 C} \\ &= \frac{R_1 + R_2 + \omega^2 R_1^2 C^2 R_2 - j\omega R_1 C}{1 + \omega^2 R_1^2 C^2} = R' + jX' \end{aligned}$$

$$R' = \frac{R_1 + R_2 + \omega^2 R_1^2 C^2 R_2}{1 + \omega^2 R_1^2 C^2} \quad X' = -\frac{\omega R_1 C}{1 + \omega^2 R_1^2 C^2}$$

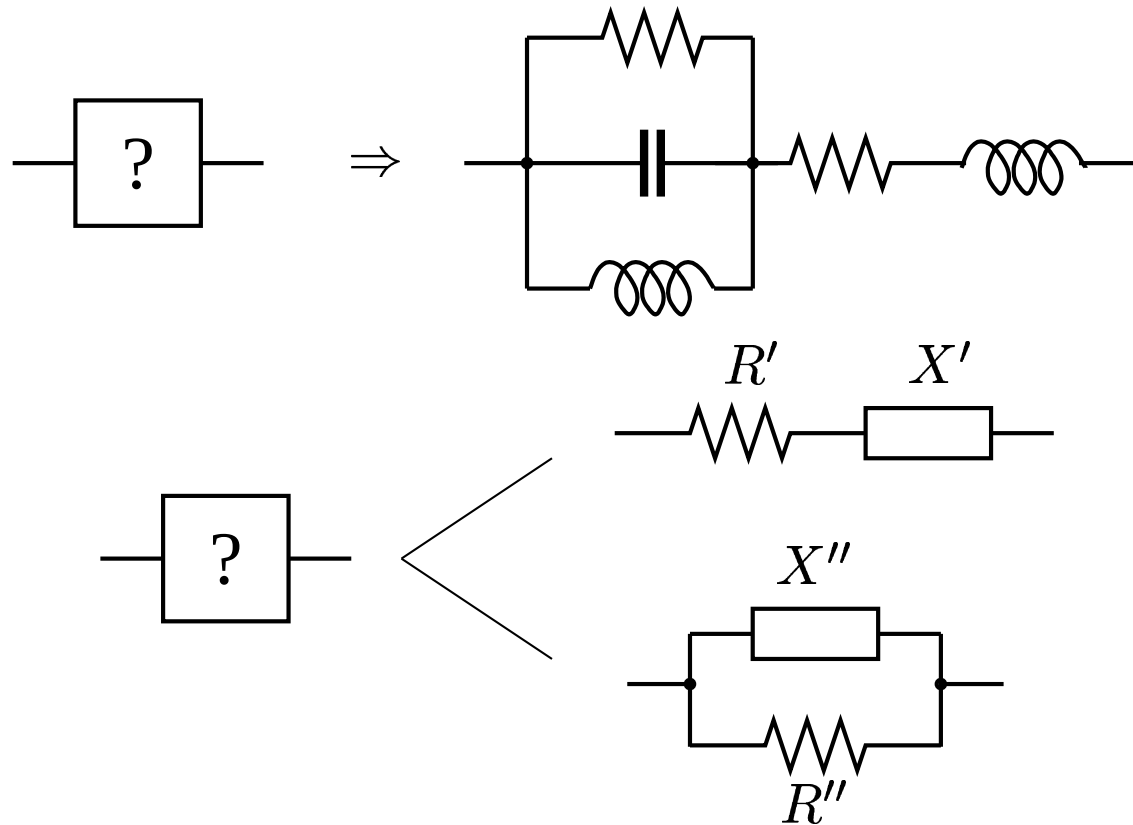
Modelli di impedenze

Analogamente:



Impedenze reali

Strutture composite, tessuti biologici ...



$$R'(f), X'(f), R''(f), X''(f)$$

Impedenze reali

Dipendenza (dei parametri) da:

- frequenza
- tensione applicata, corrente
- livello di segnale
- temperatura, umidità, tempo (invecchiamento)
- campo magnetico
- ...



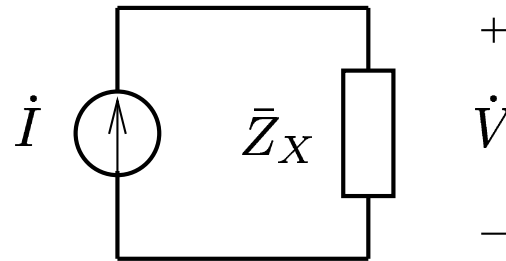
Strumenti anche di elevata complessità

Misura di impedenze

Metodi di misura:

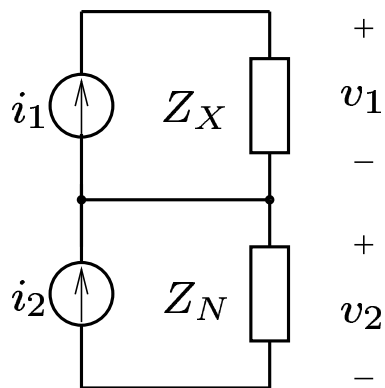
- confronto di corrente/tensione;
- metodi a ponte
(derivati da p. di Wheatstone);
- risonanza;
- costante di tempo;
- metodo voltamperometrico;
- coefficiente di riflessione;
- ...
- *ponte autobilanciato.*

Metodo di misura



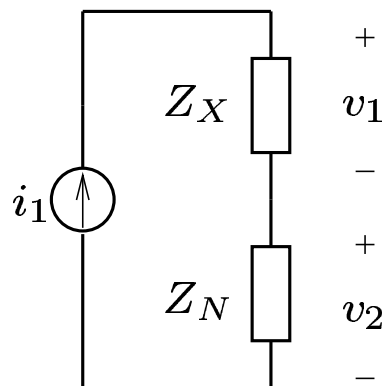
- imporre tensione $\dot{V}$ e misurare corrente $\dot{I}$.
 - imporre corrente $\dot{I}$ e misurare tensione $\dot{V}$.
- ! misure “vettoriali” $(|\cdot|, \angle)$

Confronto di tensione



$$Z_X = Z_N \frac{v_1 i_2}{v_2 i_1}$$

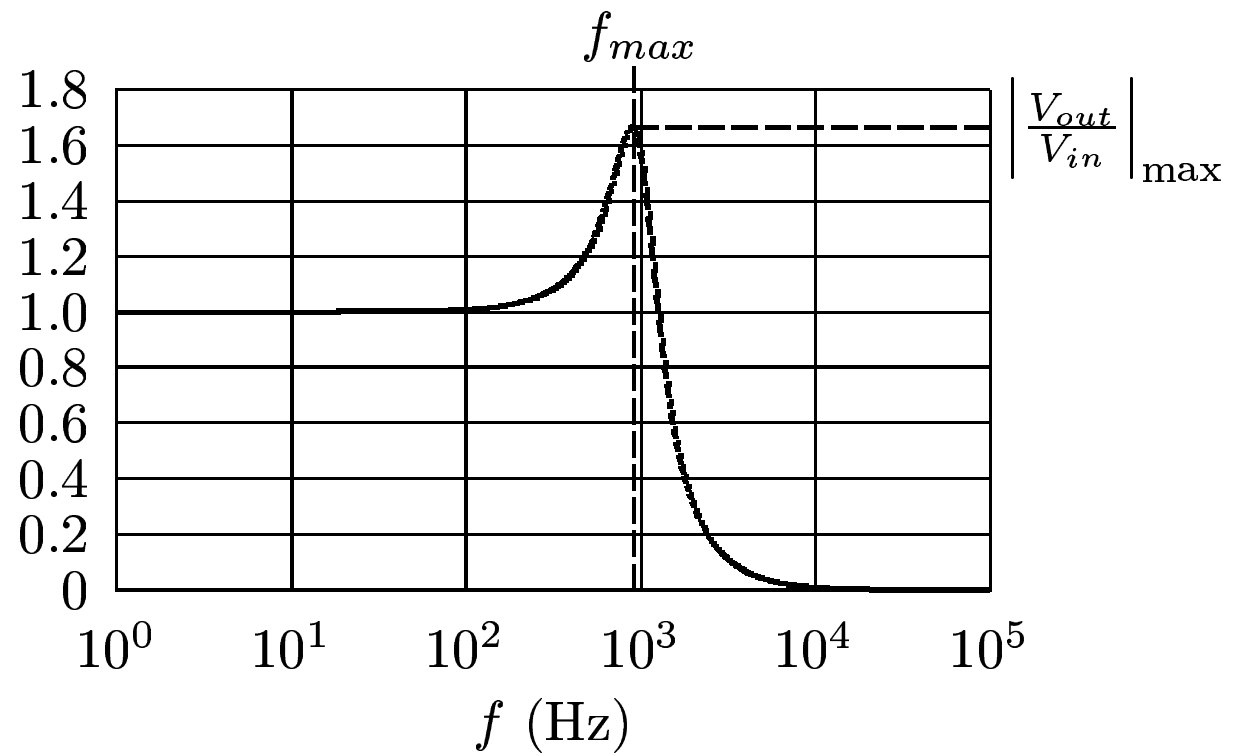
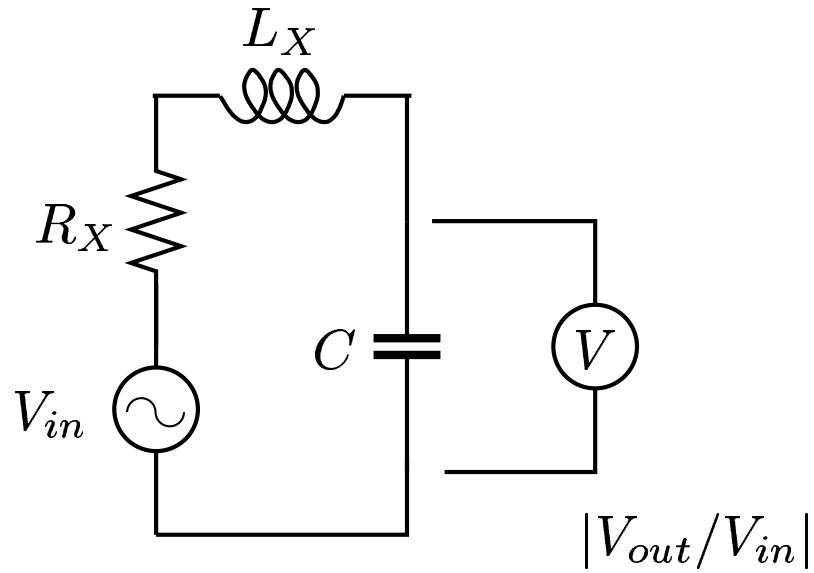
basta conoscere i_2/i_1 (e Z_N) e misurare v_1/v_2



$$Z_X = Z_N \frac{v_1}{v_2}$$

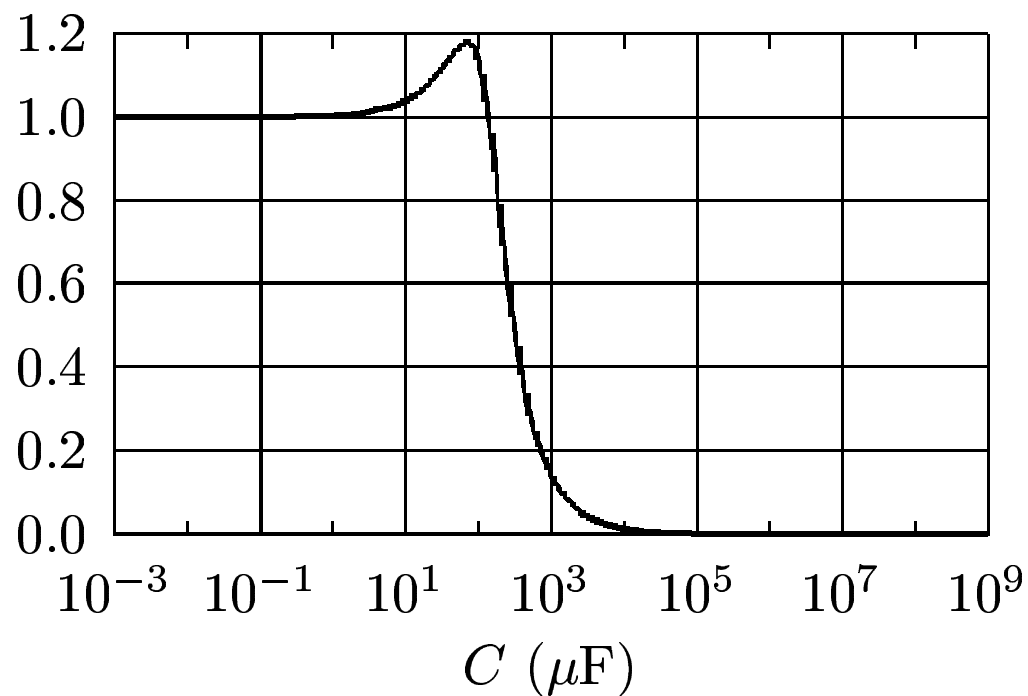
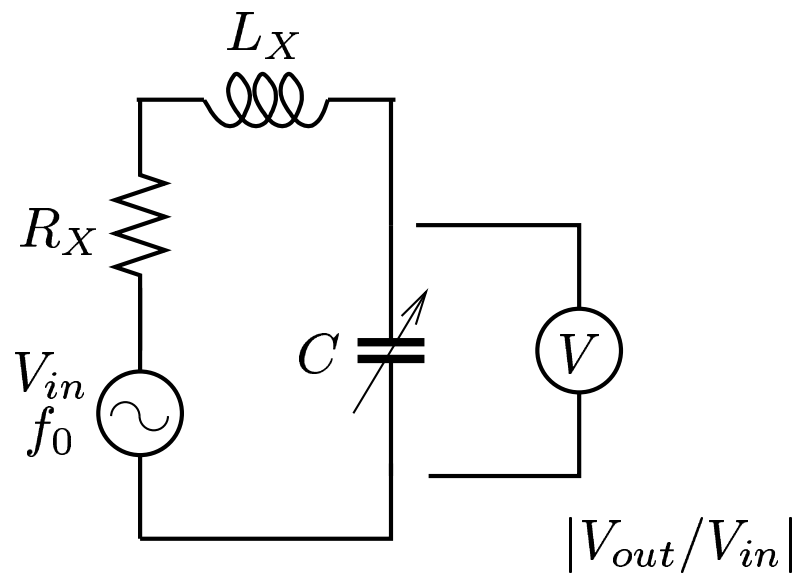
$i_2/i_1 = 1 \rightarrow$ basta misurare v_1/v_2

Risonanza



$$f_{max}, \quad \left| \frac{V_{out}}{V_{in}} \right|_{max} \Rightarrow L, R$$

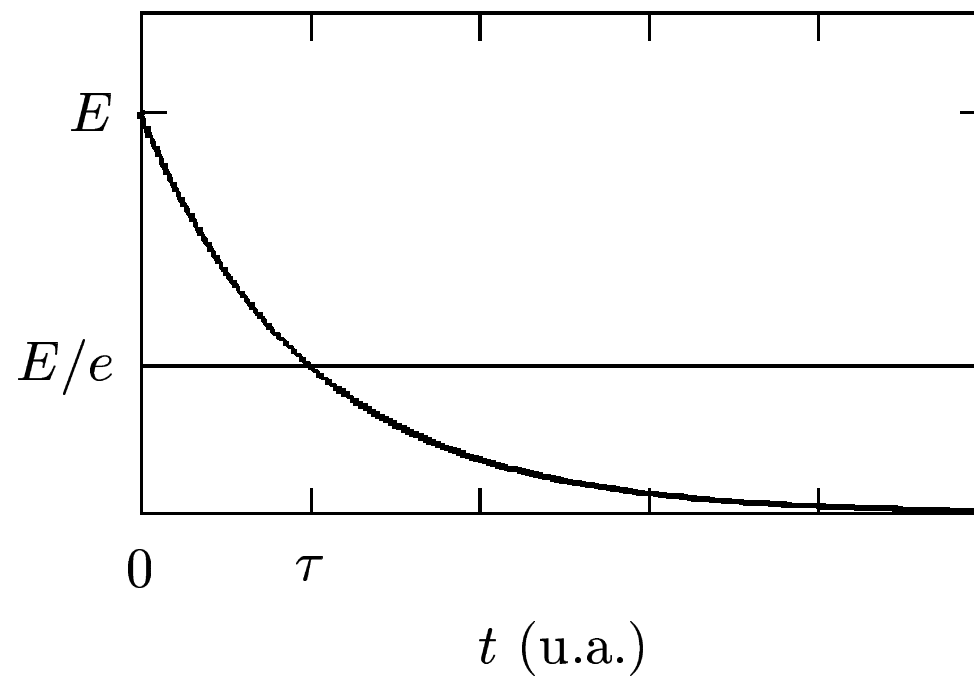
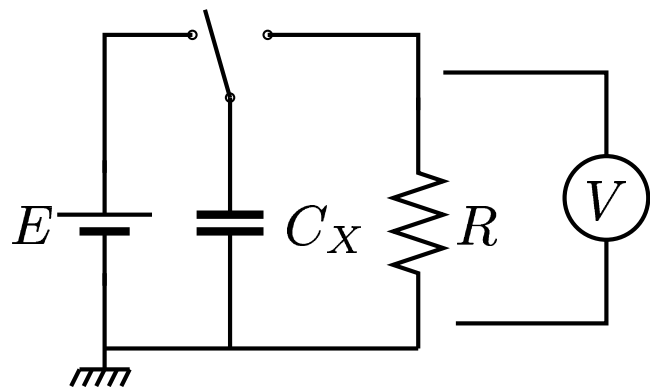
Risonanza (2)



$$\left| \frac{V_{out}}{V_{in}} \right|_{\max} = \sqrt{1 + Q^2}$$

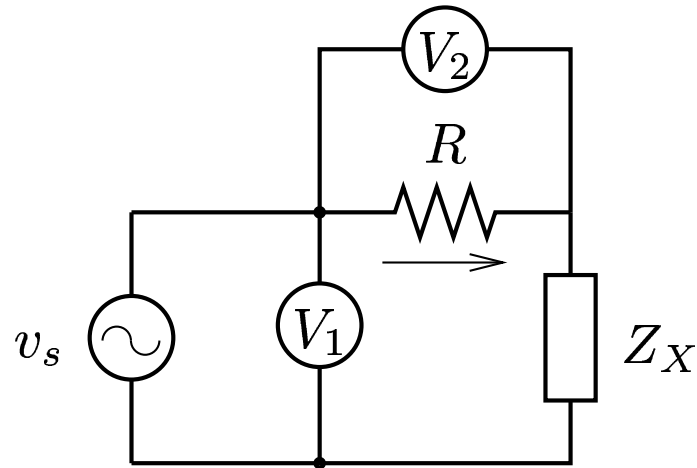
$$L = \frac{Q^2}{C_r (2\pi f_0)^2 (1 + Q^2)}$$

Costante di tempo

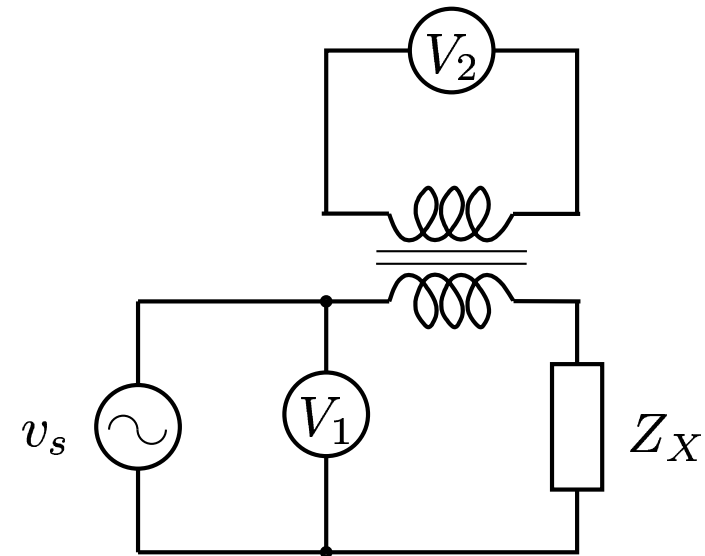


$$\tau = RC_X$$

Metodo voltamperometrico



- $R \ll |Z_X|$



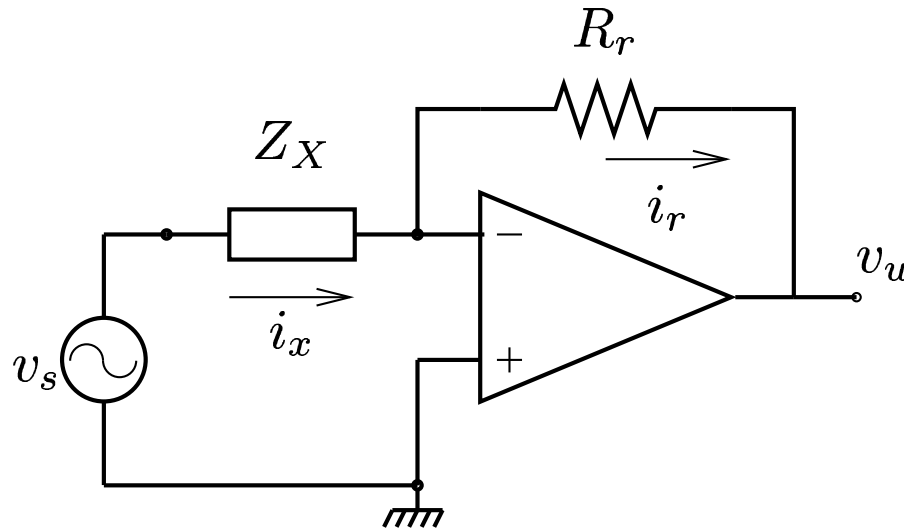
- anche con trasformatore
(limiti alle bb. ff.)

Coeff. di riflessione

- misura del rapporto tra segnale incidente e segnale riflesso in linea di trasmissione terminata con Z_X .

Ponte autobilanciato (sch. di principio)

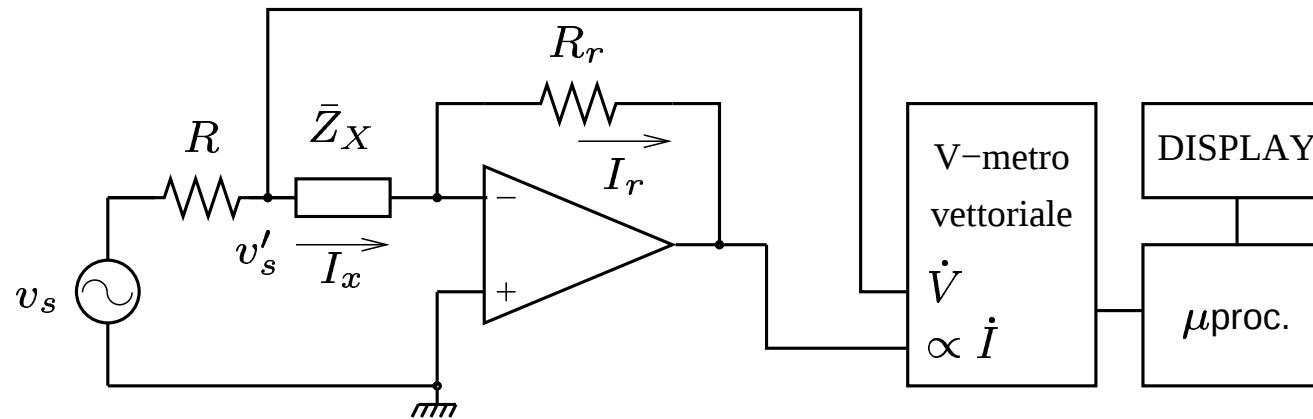
- Principio:



$$\frac{v_u}{v_s} = -\frac{R_r}{Z_X}$$
$$\rightarrow Z_X = -\frac{v_s}{v_u} R_r$$
$$(i_r = i_x)$$

- metodo voltamperometrico: $v_s \Leftrightarrow \dot{V}$ $v_u \Leftrightarrow \dot{I}$
- modulo e fase !! (strumento vettoriale);
- R_r : fattore di scala.

Ponte autobilanciato (sch. di principio)



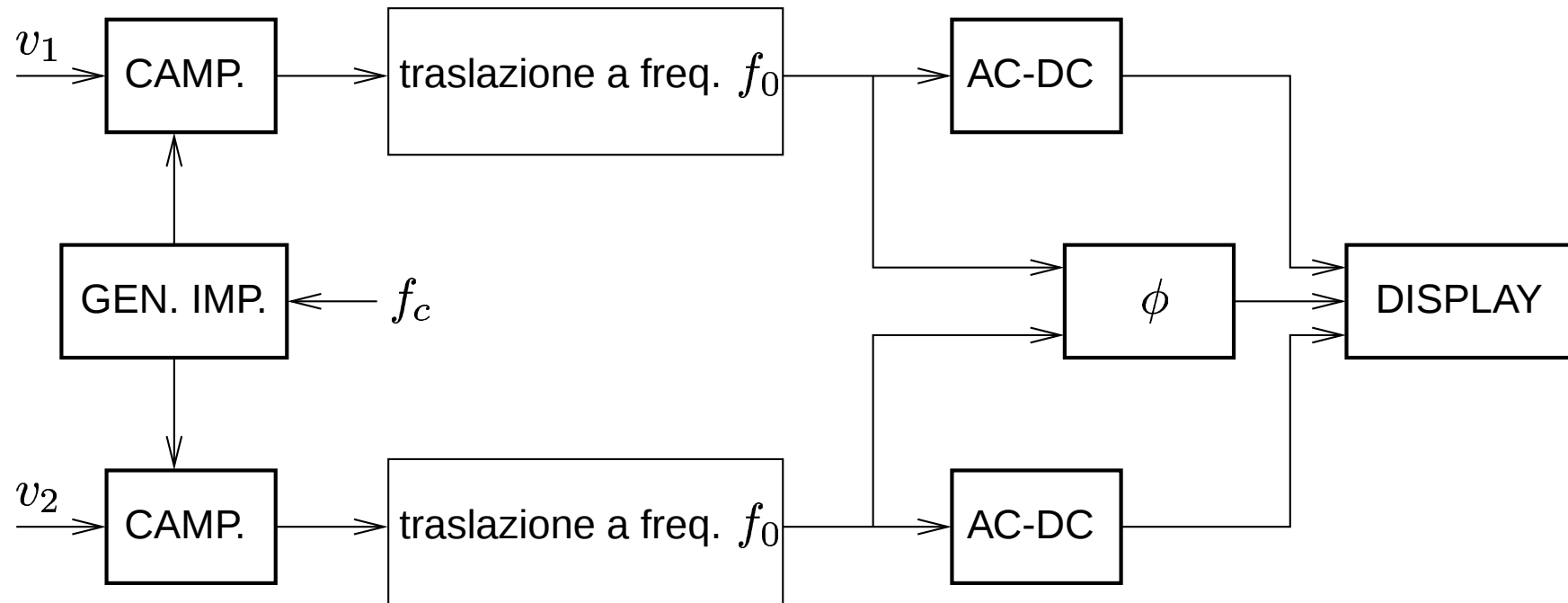
- Da utente: f , V_s , serie/parallelo ...

$$\Rightarrow R, L, C, G, B, Q, D, |Z|, \theta, I_{ass} \dots$$

- necessità di misurare la tensione su Z_X (v'_s).

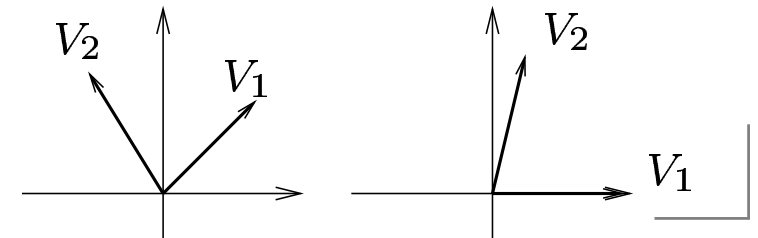
Voltmetro vettoriale

Conversione a campionamento



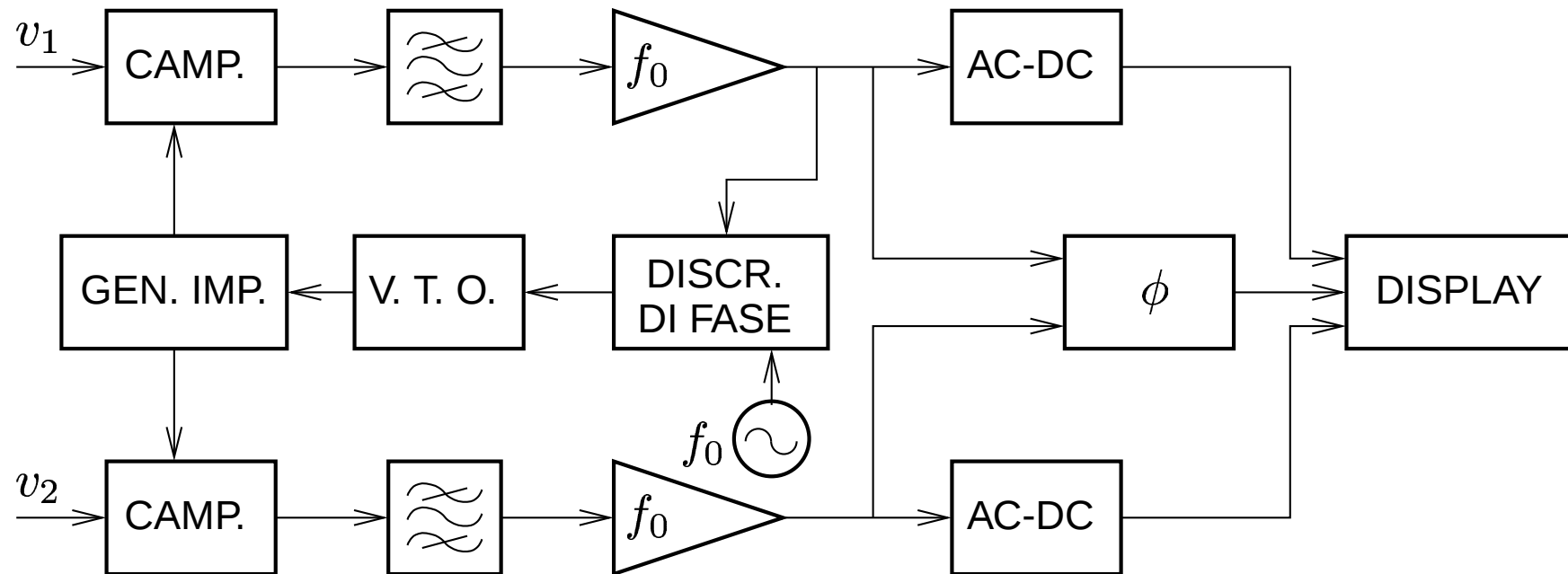
Misura:

- ampiezze, rapporto tra ampiezze, anche in dB
- sfasamento
- Re e Im (fase e quadratura)



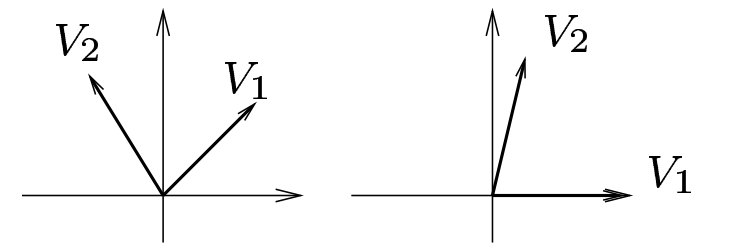
Voltmetro vettoriale

Conversione a campionamento



Misura:

- ampiezze, rapporto tra ampiezze, anche in dB
- sfasamento
- Re e Im (fase e quadratura)



Voltmetro vettoriale - impieghi

Misure di trasferimento

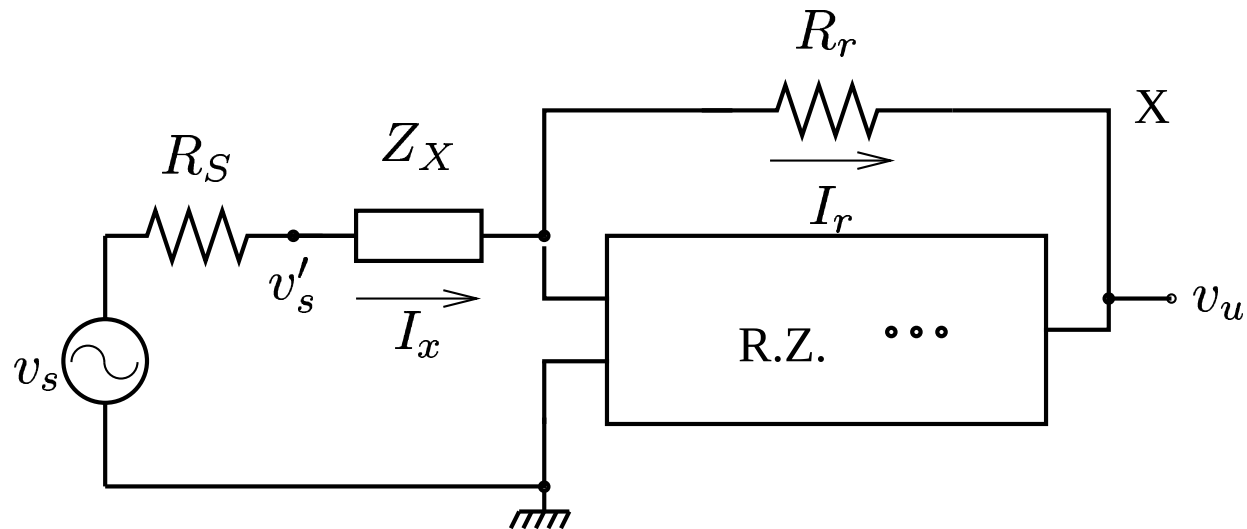


Es.: HP 8508A (fuori produzione, dati del 1988):

- $f_0 = 20 \text{ kHz}$, $\Delta f = 1 \text{ kHz}$
- $f_{in,max} = 2 \text{ GHz}$
- Processore numerico
- Display numerico
- Interfaccia HP-IB, uscite analogiche

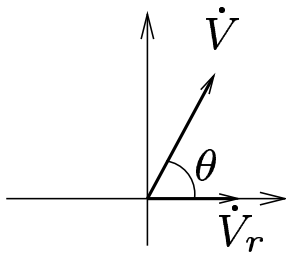
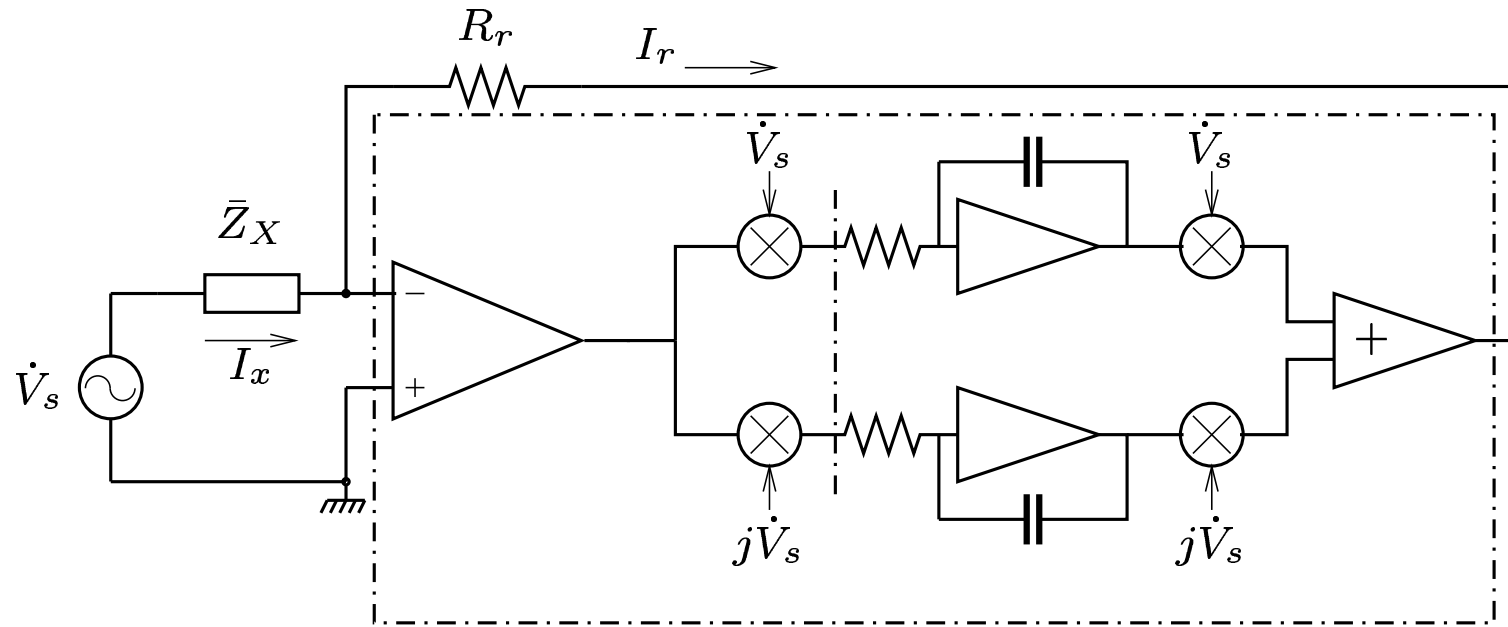
Ponte autobilanciato (limiti)

- A.O. solo per “basse” frequenze (< 100 kHz)
- altre soluzioni circuitali per f più alte



- R.Z.: pilota $X \Rightarrow i_x = i_r$

Rivelatore di zero

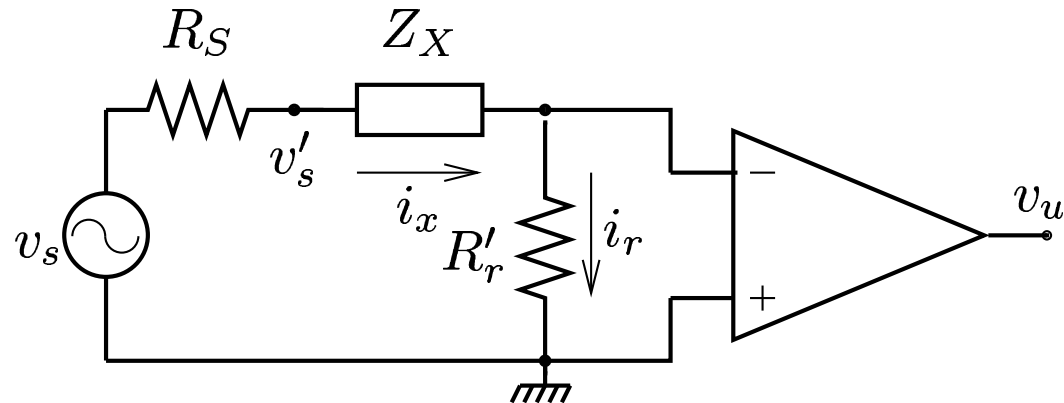


$$\sin(\omega t + \theta) \cdot \sin(\omega t) = \frac{1}{2} [\cos(-\theta) - \cos(2\omega t + \theta)]$$

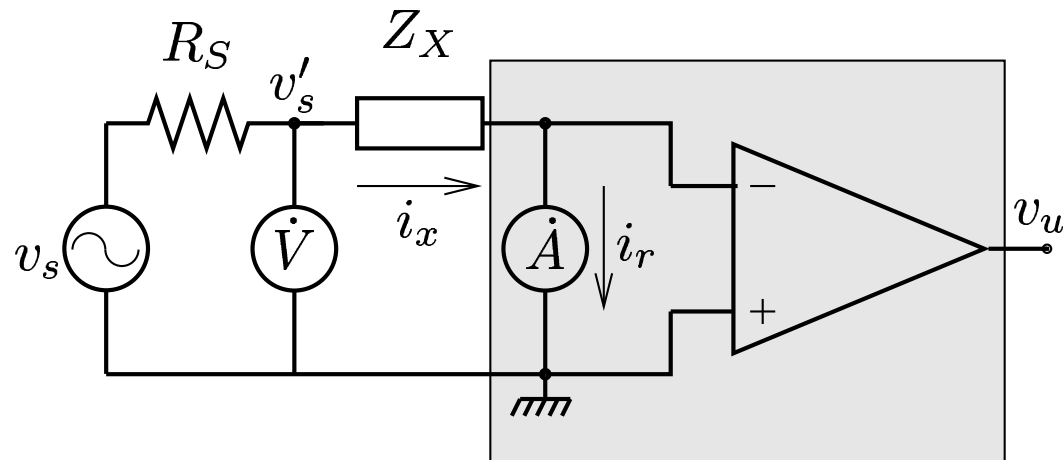
$$\sin(\omega t + \theta) \cdot \cos(\omega t) = \frac{1}{2} [\sin(-\theta) + \sin(2\omega t + \theta)]$$

Ponte autobilanciato (analisi)

- Th. di Miller:



$$R'_r = \frac{R_r}{1 + A_{vol}} (// R_{in})$$



$$\begin{aligned} v_u &= A_{vol} v_{in} \\ &= -A_{vol} i_r R'_r \\ &= -A_{vol} i_r \frac{R_r}{1 + A_{vol}} \\ &= k i_r \end{aligned}$$

Ponte autobilanciato

specifiche

- Range (per $C, L, R, \dots$), dipende da R_r (!)
- Accuratezza (dipende da f , livello di segnale, ...)
- Livello di segnale (per talune applicazioni definito da normativa)
- Tempo di misura (assestamento, bilanciamento, ...): particolarmente significativo per misure in linea di produzione.
- Temperatura di funzionamento.

Agilent 4263B - specifiche

- parametri misurati: $|Z|, R, X, |Y|, G, B, C, L, D, Q$
- frequenze: 100 Hz, 120 Hz, 1 kHz, 10 kHz, 100 kHz, (opt. 20 kHz);
- liv. segnale: $20 \text{ mV}_{\text{eff}} \div 1 \text{ V}_{\text{eff}}, \Delta V = 5 \text{ mV}$;
- tempo di misura: 25 ms;
- accuratezza (base): 0.1% lettura;
- opt. Misure su trasformatori ($N_1/N_2, M, R_{\text{DC}}$)

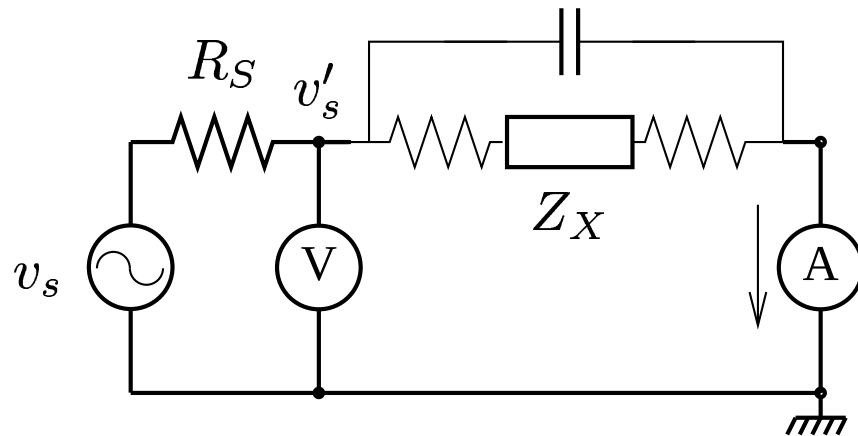
Agilent 4294A - specifiche

- parametri misurati: $|Z|, |Y|, \theta, R, X, G, B, L, C, D, Q$
- range di frequenze: 40 Hz ÷ 110 MHz, $\Delta f = 1$ mHz;
- livello di segnale: 5 mV_{eff} ÷ 1 V_{eff};
- range: 3 mΩ ÷ 500 MΩ;
- accuratezza (base): 0.08% lettura;
- polarizzazione: 0 ÷ ±40 V, 0 ÷ ±100 mA;
- display grafico a colori, 6 cifre;
- programmabile via GPIB.

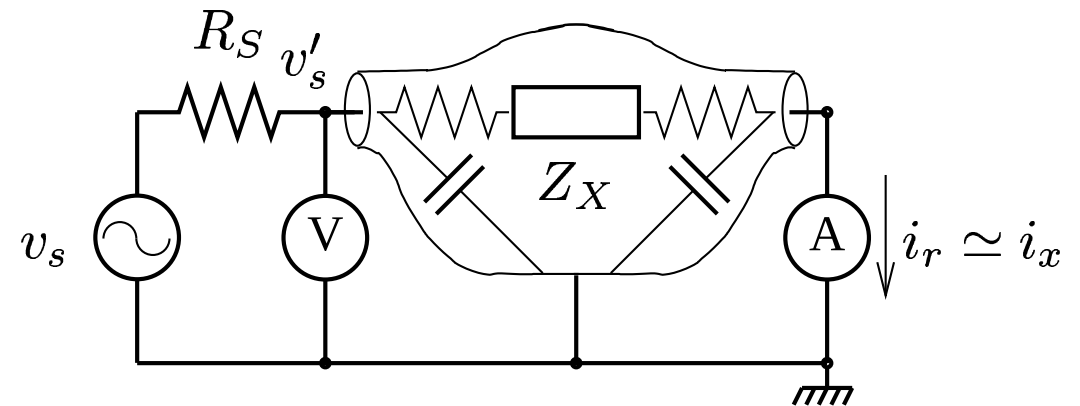
Ponte autobilanciato (collegamento del campione)

Errori sistematici:

- 2 terminali:

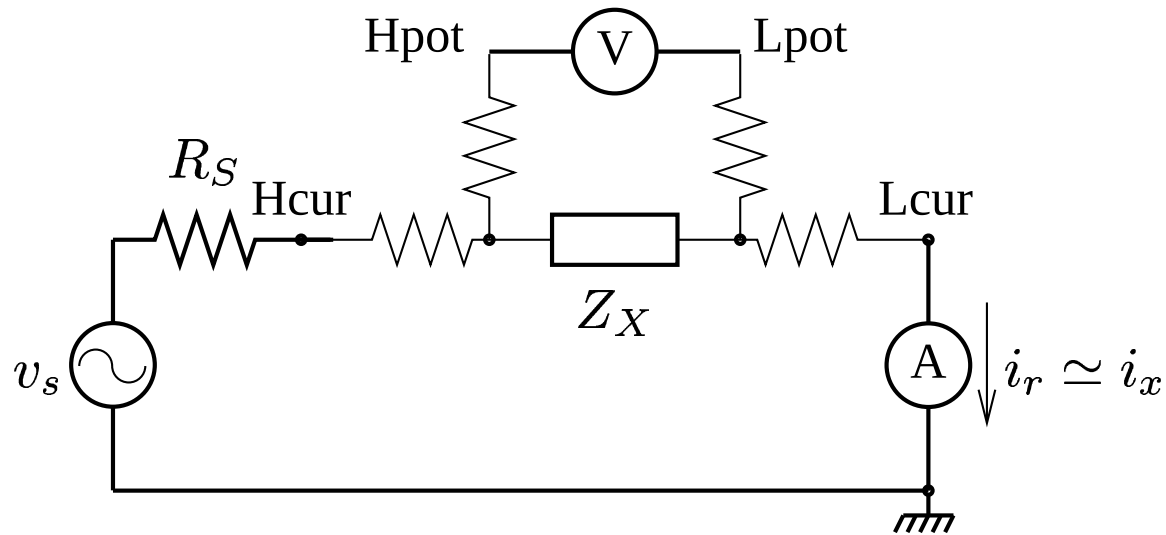


- 3 terminali:

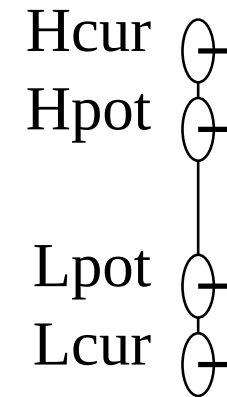


Ponte autobilanciato (collegamento del campione)

- 4 terminali:

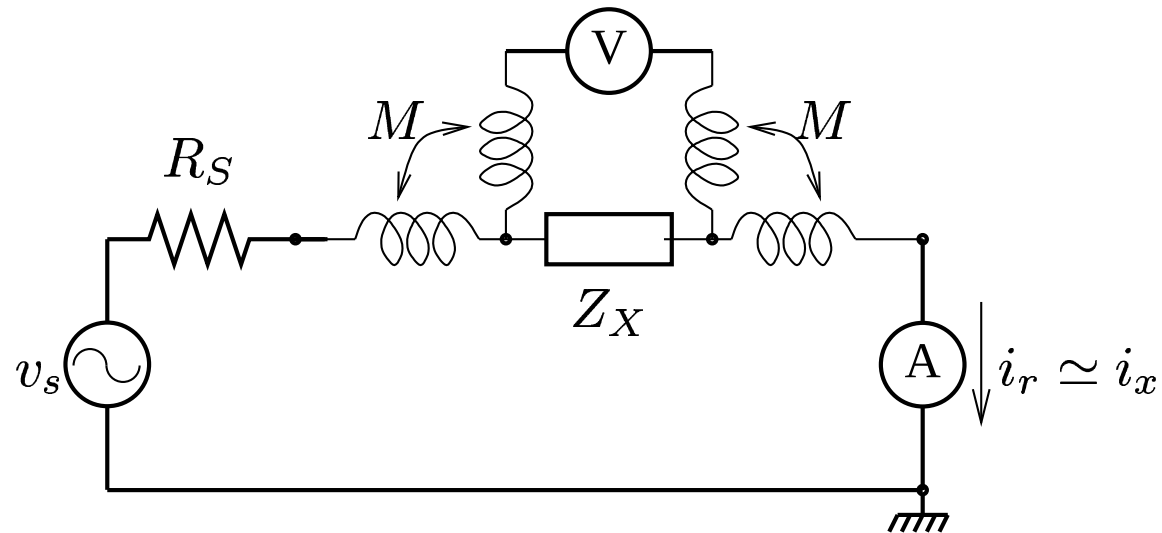


- sullo strumento:



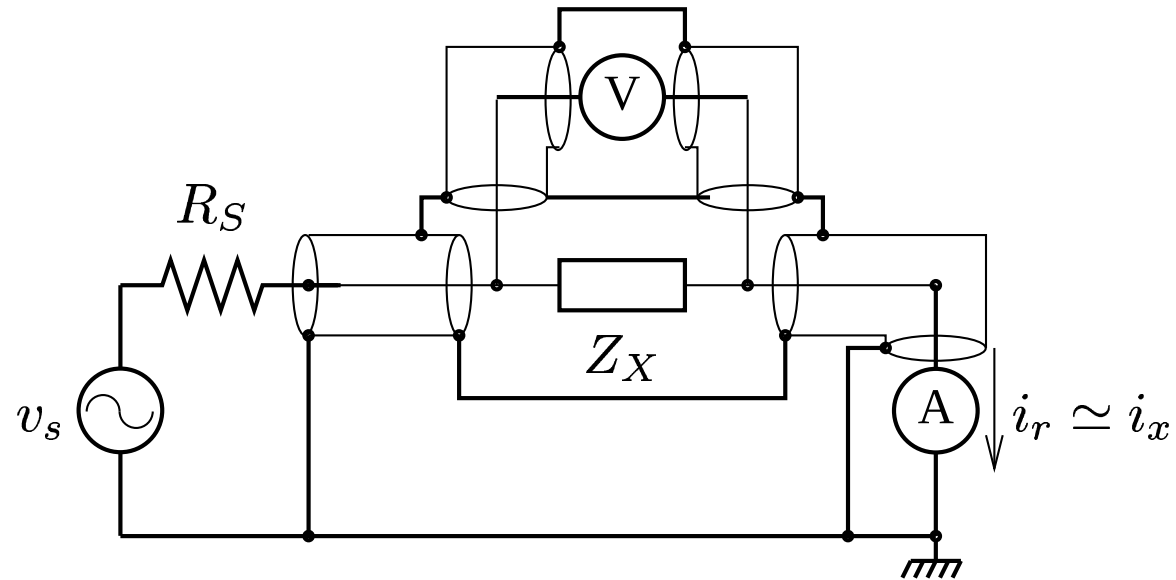
Ponte autobilanciato (collegamento del campione)

- inconvenienti (piccole Z_X):



Ponte autobilanciato (collegamento del campione)

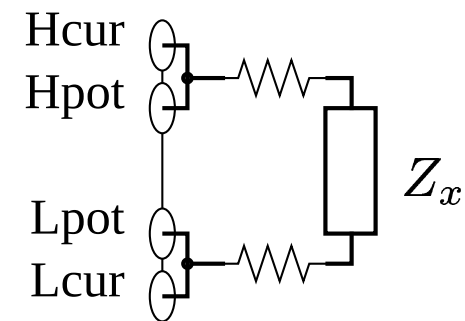
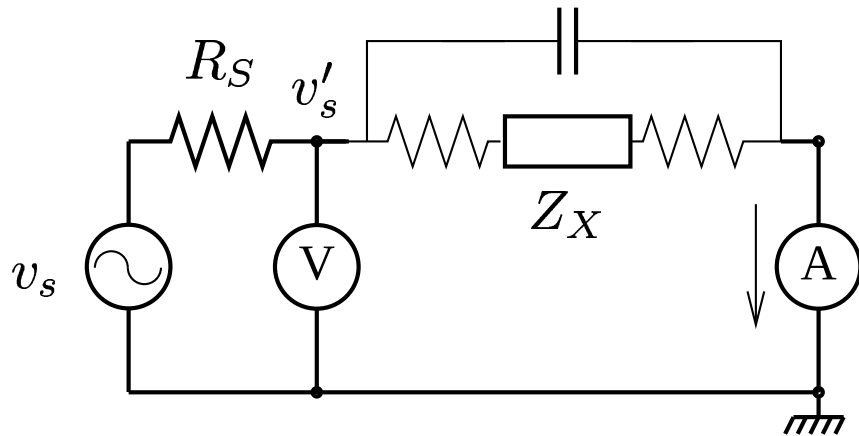
- 4 coppie di terminali:



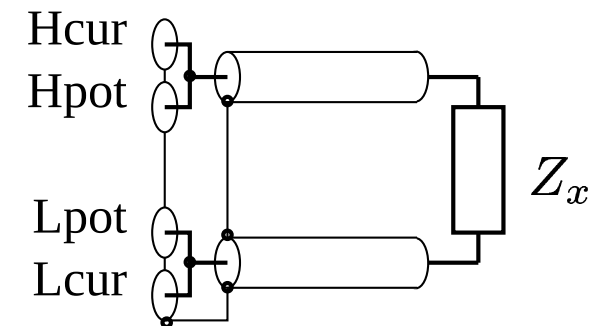
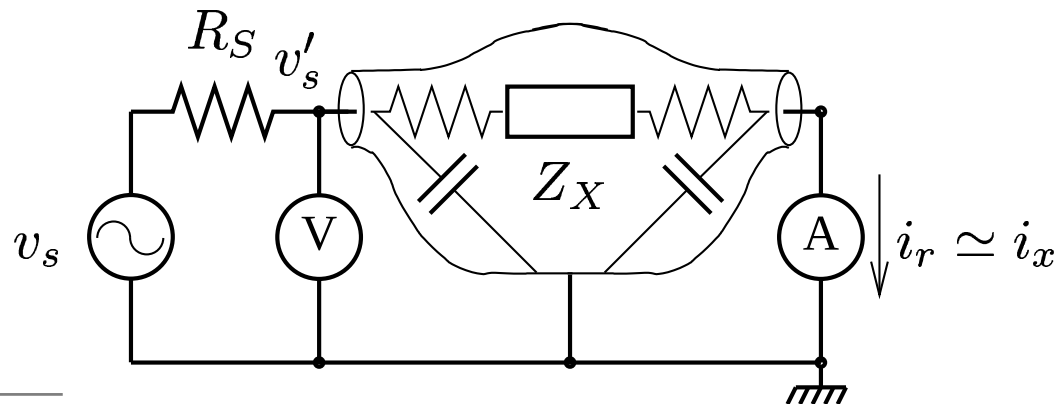
Ponte autobilanciato

(collegamento del campione)

- 2 terminali: $H_{pot} \equiv H_{cur}$ $L_{pot} \equiv L_{cur}$



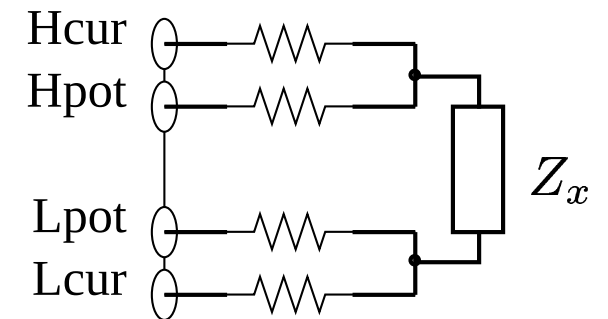
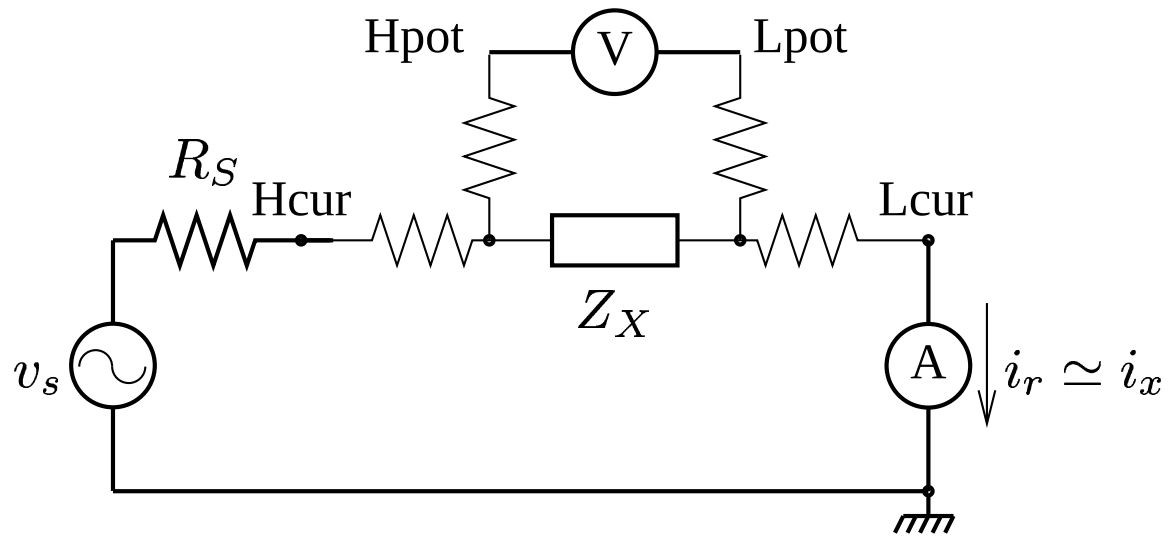
- 3 terminali: (cavo coassiale)



Ponte autobilanciato

(collegamento del campione)

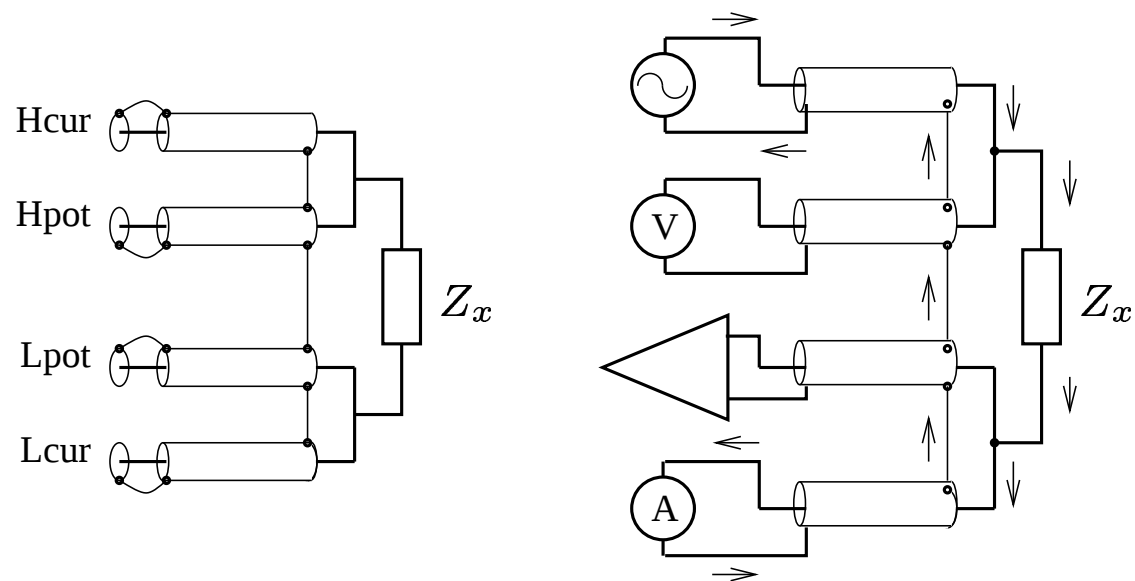
- 4 terminali:



Ponte autobilanciato

(collegamento del campione)

- 4 coppie di terminali:



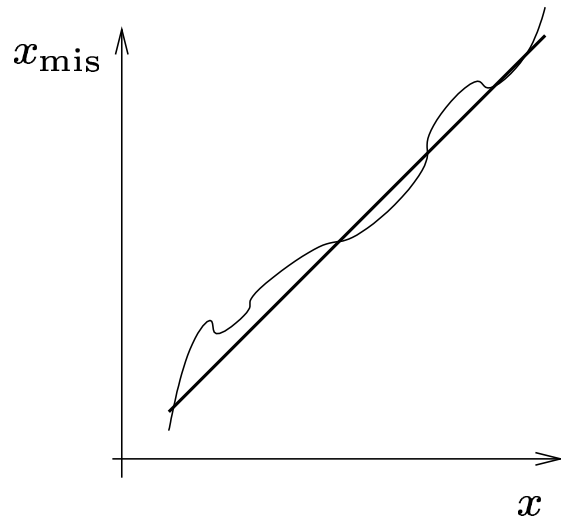
Impedenzimetri

Osservazioni:

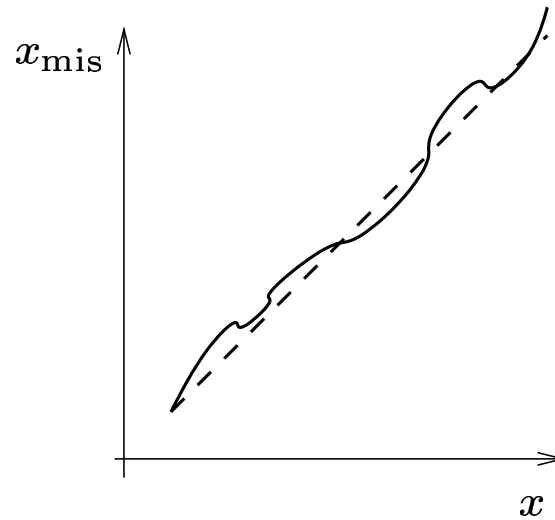
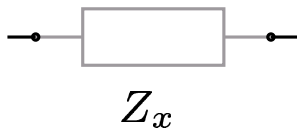
- nel caso di impedenze di strutture composite (materiali, tessuti biologici), più che parlare di *misure di impedenza* si dovrebbe parlare di *misura di parametri* (L , C , Q , ecc.) di impedenze;
- importanza della *test fixture*;
- calibrazione/compensazione (0, open, load);
- collegamenti lunghi;
- prove su wafer;
- misure su giunzioni: (curve C - V , livello di segnale);
- misure su trasformatori (M , N , capacità tra avvolgimenti, ...)

Impedenzimetri - errori

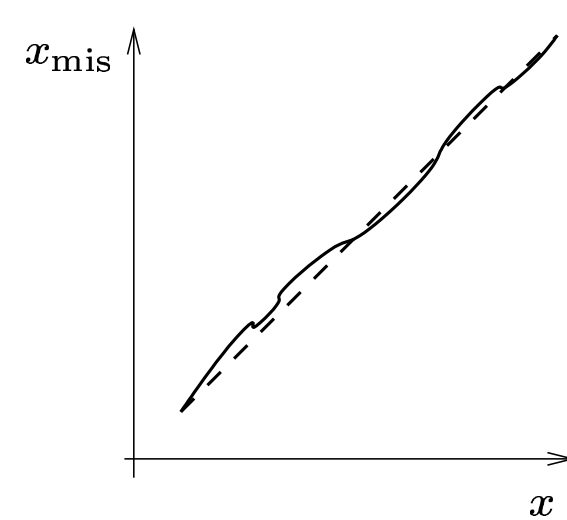
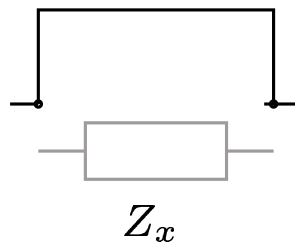
Correzione dell'errore



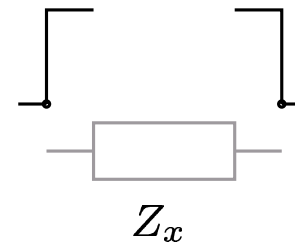
senza correzione



correzione "short"



correzione "open"



eventuali correzioni con impedenze "standard"