

BLOCCHI FUNZIONALI DI UNA CATENA DI MISURA:

- Iniziamo lo studio dagli strumenti terminali.
- Nel campo dell'ingegneria sono stati usati molti tipi diversi di visualizzatori per porgere all'operatore il valore numerico della misura.
- Oggi, con la diffusione quasi totale degli strumenti elettrici ed elettronici, assumono importanza fondamentale gli **strumenti terminali elettrici**.

- In ambito industriale, la catena di misura è quasi sempre elettrica, cioè già al livello del trasduttore si ottiene in uscita una tensione o una corrente elettrica da inviare per l'elaborazione negli stadi successivi: *l'informazione passa attraverso i diversi stadi come segnale di tensione o di corrente*.

- Gli strumenti terminali elettrici possono essere tutti ricondotti a 3 sole classi:

1. Il **galvanometro** (a bobina mobile)
2. **L'oscilloscopio** (analogico)
3. Il **voltmetro digitale** (a cui appartiene anche l'oscilloscopio digitale)

1. Del **galvanometro** se ne è già parlato negli strumenti del secondo ordine: con l'inserimento in serie alla sua resistenza di una resistenza aggiuntiva di valore opportuno (elevato), può diventare (entro certi limiti) un misuratore di tensione.

2. **L'oscilloscopio analogico** è uno strumento terminale che permette di visualizzare in tempo reale la forma dell'onda che costituisce il segnale della misura.

Dato che è possibile visualizzare, su un piccolo monitor, l'onda che rappresenta la grandezza in esame in funzione del tempo, si può immediatamente valutare se la forma del segnale è distorta, qual è l'ampiezza dell'onda, il periodo e (se si vogliono comparare due segnali) lo sfasamento tra due segnali.

Anche se è classificato come strumento terminale di una catena di misura, è uno strumento a se stante che accetta all'ingresso segnali in tensione.

Se il segnale in ingresso è periodico, lo strumento visualizza in uscita la forma d'onda "ferma" sullo schermo.

Il suo equipaggio mobile è costituito da un fascetto collimato di elettroni, generato all'interno del tubo a raggi catodici (CRT).

Tubo a raggi catodici: è un tubo di vetro a simmetria cilindrica, all'interno del quale viene fatto il vuoto, per consentire agli elettroni (generati ad uno dei suoi estremi) di percorrere il loro cammino senza urtare continuamente con le molecole d'aria (cioè senza perdere energia cinetica e senza deviare dalla traiettoria voluta).

Il **filamento** (alimentato da una tensione) viene portato ad incandescenza scaldando l'intorno.

Il filamento è racchiuso nel **catodo**: un cilindretto di nichel, il cui fondo è ricoperto da metalli alcalino-terrosi, che portati alla giusta temperatura emettono elettroni con facilità. La temperatura del catodo è regolata dall'intensità di corrente che viene fatta scorrere nel filamento.

Gli elettroni sono attratti dagli **anodi** (che si trovano a potenziale positivo rispetto al catodo).

Prima di raggiungere gli anodi, gli elettroni devono superare l'ostacolo posto dalla **griglia** (il cui potenziale è negativo rispetto al catodo e regolabile dall'esterno da un potenziometro). Tale griglia attraverso un foro lascia passare un certo numero di elettroni.

Aumentando la differenza di potenziale tra la griglia e il catodo aumenta il numero di elettroni respinti verso il catodo, cioè diminuisce il numero di elettroni che passano attraverso la griglia e che vanno a formare il fascetto (che una volta focalizzato riuscirà ad impattare sullo schermo cosparso di fosfori all'estremo opposto del tubo).

Gli anodi hanno il compito di catturare, accelerare e focalizzare gli elettroni per la formazione definitiva del fascetto collimato: questo sistema si chiama **CANNONE ELETTRONICO**.

Proseguendo nel loro cammino, gli elettroni che costituiscono il fascio passano attraverso **due coppie di placchette deflettrici** che hanno il compito di deviare in maniera coordinata il fascetto di elettroni dalla traiettoria assiale secondo le direzioni x ed y: le placche di deflessione verticale (Y1-Y2, sono orizzontali) e le placche di deflessione orizzontale (X1-X2 sono verticali).

La tensione applicata a ciascuna coppia di placche determina un campo elettrico che agisce sul fascio deviandolo: alle placche orizzontali viene inviato il segnale V_y in ingresso allo strumento per ottenere una deflessione verticale, le placche verticali determinano una deflessione orizzontale.

Se si vuole visualizzare il segnale esterno in funzione del tempo, alle placchette verticali viene applicato un segnale generato internamente all'oscilloscopio da un circuito elettronico apposito: il **generatore dente di sega**.

Se si vogliono, invece, visualizzare due segnali (uno in funzione dell'altro, $y=f(x)$) è possibile escludere il circuito interno del dente di sega.

Si invia alle placchette verticali il segnale $x=x(t)$ e alle placchette orizzontali il segnale $y=y(t)$.

Questa tecnica produce la modalità di visualizzazione detta "xy".

Le placchette deflettrici operano una deflessione elettrostatica degli elettroni che transitano al loro interno.

È possibile anche la deflessione elettrodinamica: si fa transitare il fascio di elettroni attraverso il campo elettromagnetico generato da due coppie di bobine.

Cosa accade ad ogni singolo elettrone quando abbandona gli anodi che lo hanno accelerato verso lo schermo fluorescente e focalizzato in un fascetto ben collimato? L'elettrone che appartiene al fascetto focalizzato arriva all'ingresso delle placchette deflettrici (O) con una velocità solamente assiale (u).

Alle placchette è applicato il segnale V_y che produce nella zona (ON) compresa tra le due placchette un campo elettrico di intensità V_y/h (h è la distanza tra le due placchette).

Quando l'elettrone supera il punto di ingresso O , è sottoposto ad un campo di forze ($F = e \cdot E$) diretto come il campo elettrico, di intensità $F = e \cdot (V_y/h)$.

Questo campo di forze agisce per tutto il tempo che l'elettrone impiega ad attraversare lo spazio compreso tra le placchette ($ON=l$): $t=l/u$ (essendo $u=l/t$).

L'elettrone subisce un'accelerazione verticale $a_v = F/m = (e \cdot V_y)/(m \cdot h)$ ed acquista quindi una velocità verticale $v = a \cdot t = [(e \cdot V_y)/(m \cdot h)] \cdot [l/u]$.

Quando l'elettrone abbandona la zona (ON) compresa tra le placchette orizzontali cessa l'azione del campo di forze verticali e l'elettrone continua la sua corsa indisturbato fino ad impattare contro lo schermo fluorescente a distanza Y ($Y = L \cdot \text{tg} \vartheta$) dall'asse del tubo a raggi catodici.

Il tubo a raggi catodici è il cuore dell'oscilloscopio: accetta in ingresso una tensione V_y e fornisce in uscita sullo schermo una deflessione y .



Si valuta la sensibilità dello strumento: $S = du/di = dy/dV_y$.

Per un segnale in ingresso V_y non infinitesimo:

1. la deflessione totale vale $Y = L \cdot \text{tg} \vartheta = L \cdot (v/u) = L \cdot [(e \cdot V_y)/(m \cdot h)] \cdot [l/u] = Le \cdot V_y / mhu^2$,

essendo $\text{tg} \vartheta = v/u$.

2. la sensibilità vale $S = Y/V_y = [Le \cdot V_y / mhu^2] / V_y = (Le \cdot l) / mhu^2$, non dipende dall'intensità dell'ingresso (da V_y), quindi **l'oscilloscopio è uno strumento lineare**.

Da quando l'elettrone abbandona gli anodi vale il **teorema della conservazione dell'energia in senso longitudinale** (asse z del CRT):

l'energia cinetica acquistata dall'elettrone è pari all'energia potenziale ceduta dagli anodi prima di entrare nella zona di azione delle placchette deflettrici, $1/2mu^2 = e \cdot V_{\text{crt}}$, per la sensibilità risulta:

$S = (Le \cdot l) / (2he \cdot V_{\text{crt}}) = (Ll) / 2hV_{\text{crt}}$, dipende solo dai parametri costruttivi del tubo CRT e dalla tensione di accelerazione assiale degli elettroni V_{crt} .

Per studiare la rapidità si fa riferimento a cosa al tempo netto che l'elettrone impiega per transitare attraverso le placchette (tempo in cui l'elettrone è soggetto al campo delle forze deflettrici).

Dalla **conservazione dell'energia in senso assiale**: $1/2mu^2 = e \cdot V_{\text{crt}}$, si ricava la velocità assiale degli elettroni: $u = \sqrt{[(e \cdot V_{\text{crt}} \cdot 2)/m]}$, quindi $t = l/u = l \cdot \sqrt{[m/e \cdot V_{\text{crt}} \cdot 2]}$.

Gli oscilloscopi sono tra gli strumenti analogici più rapidi che si possano avere a disposizione. C'è proporzionalità inversa tra sensibilità e banda passante.

Quando si vuole avere sullo schermo una rappresentazione di V_y in funzione del tempo, il segnale V_x da applicare alle placchette verticali per avere deflessione orizzontale viene

prodotto internamente all'oscilloscopio da un apposito circuito elettronico: il **generatore di denti di sega** ($v_x(t)=Kt-V_x$).

Si tratta di una serie continua di rampe di tensione di periodo T regolabile dall'operatore che si estendono da un minimo $-V_x$ ad un massimo $+V_x$; t_r è il tempo di ritorno impiegato dal generatore di denti di sega a riportare il segnale v_x al punto di partenza (t_r non dà luogo a nessuna visualizzazione, dura pochi punti % del periodo T e può essere trascurato). Il coefficiente K rappresenta la velocità di variazione della tensione v_x applicata alle placchette verticali.

La composizione del segnale sullo schermo avviene applicando contemporaneamente il dente di sega alle placchette verticali (asse x) ed il segnale periodico V_y alle placchette orizzontali (asse y).

Per avere una forma d'onda intera e ferma sullo schermo il periodo del dente di sega deve coincidere col periodo del segnale in ingresso.

Se così non fosse, un apposito circuito elettronico dell'oscilloscopio è in grado di sincronizzare la partenza di ogni rampa con un punto preciso del segnale periodico, cioè di mettere in attesa la rampa successiva per il tempo che il segnale in ingresso impiega per concludere ciò che rimane del periodo dell'onda.

Così si visualizzano ferme sullo schermo frazioni di forme d'onda o multipli non interi di onde periodiche.

Per la visualizzazione in modalità xy il segnale $v_x(t)$ del generatore di denti di sega viene scollegato per mezzo di un selettore dalle placchette verticali e ad esse viene inviato dall'esterno un secondo segnale in tensione V_x per ottenere una *deflessione combinata* del fascetto secondo la legge $Y=f(X)$.

Si può visualizzare nello schermo in uscita l'evoluzione nel tempo di esperimenti nei quali esiste una dipendenza funzionale tra le due grandezze misurate (es. ciclo di isteresi $B=f(H)$).

3. **L'oscilloscopio digitale** permette di ottenere in uscita sempre la visualizzazione delle forme d'onda su uno schermo VGA, ma si tratta di un'onda ricostruita per mezzo dei campioni digitalizzati.

Lo schermo dell'oscilloscopio digitale è concettualmente più simile a un monitor di un computer che non ad un tubo a raggi catodici con le placchette deflettrici alle quali viene applicato direttamente il segnale in tensione.

Le modalità di conversione analogico-digitale (A/D) di un segnale in tensione saranno accennate insieme alle qualità metrologiche fondamentali dei dispositivi atti ad eseguire tale operazione.

CIRCUITI DI MANIPOLAZIONE DEL SEGNALE

Il segnale in uscita dal trasduttore (v o i) normalmente non è idoneo per essere immediatamente visualizzato: deve essere quasi sempre sottoposto ad una serie di trasformazioni e manipolazioni che avvengono nello stadio intermedio dello strumento.

Tutte le elaborazioni che il segnale subisce sono funzionali ad una migliore visualizzazione e ad un'efficace comprensione dell'informazione che esso trasporta: bisogna fare attenzione a non degradare il contenuto informativo del segnale.

Il blocco centrale di una catena di misure può essere concettualmente esploso in molti sotto-blocchi, ciascuno dei quali rappresenta un possibile stadio interno allo strumento che esegue un'operazione ben precisa.

Trattando nello specifico di **segnali elettrici** bisogna fare delle considerazioni generali sulla modalità di trasferimento dell'informazione x connessa alla misura della grandezza X . Quando il "mezzo" che trasferisce l'informazione è un *segnale elettrico*, vuol dire che il valore numerico x può essere associato o alla tensione v o alla corrente i che viaggiano sui cavi di collegamento.

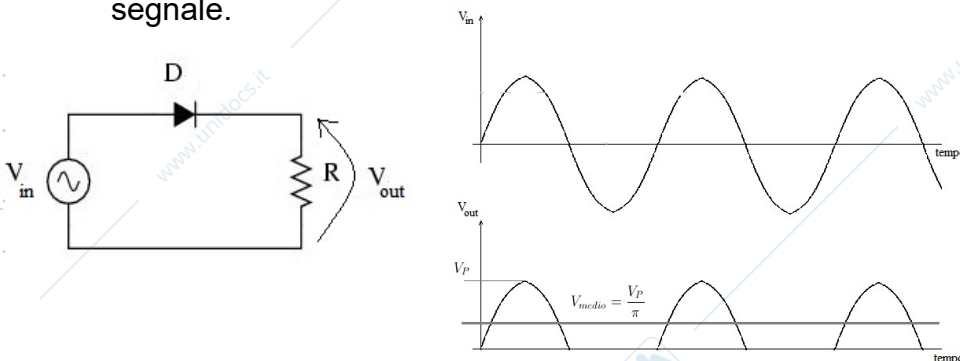
Anche se le due grandezze sono intimamente legate dalla legge di Ohm ($v=R*i$), i costruttori di strumentazione specificano sempre se il segnale in ingresso o in uscita ad uno stadio o ad uno strumento è in tensione oppure in corrente.

Abbiamo già visto (a proposito dell'errore di inserzione) che un segnale emesso in uscita da un trasduttore e la sua misura da parte dello strumento che segue nella catena, comporta esigenze di interfacciamento opposte a seconda che si tratti di un segnale in tensione o in corrente (misuriamo il voltaggio con un galvanometro e la corrente con un voltmetro, con le dovute accortezze).

Spesso per la corrente i si richiede il valore efficace i_{eff} , occorre quindi eseguire un **raddrizzamento del segnale**. Questa operazione può essere eseguita:

1. per mezzo di un **diodo SCR** (raddrizzamento ad una semi-onda), o meglio;
2. con quattro diodi disposti a **ponte di Gretz** (raddrizzamento a doppia semi-onda).

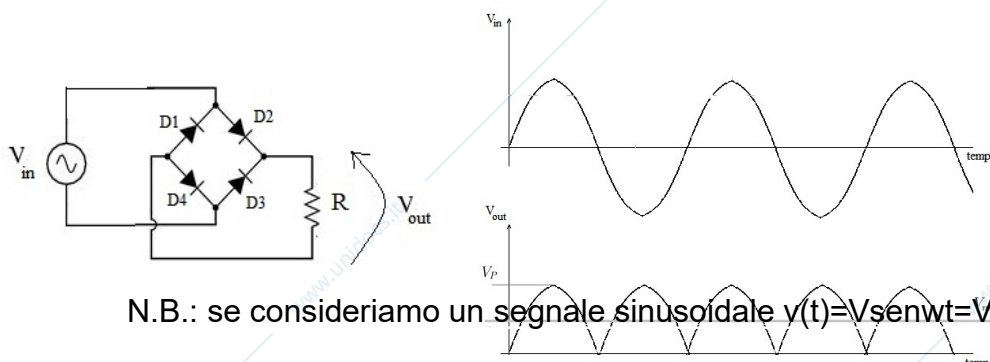
Questi elementi possono essere pensati come uno stadio intermedio di manipolazione del segnale.



Eseguito il raddrizzamento conviene misurare la tensione risultante $v_u=R*i_u$ con galvanometro lento, per filtrare automaticamente l'ondulazione residua ed ottenere la misura del valore medio. Il valore medio di una corrente sinusoidale $i(t)=I_0\sin\omega t$ vale $I_m=(2/\pi)*I_0$, mentre il valore

efficace $I_{eff}=I_0/\sqrt{2}$, da cui ricavo il fattore di forma $K_f=I_{eff}/I_m=[I_0/\sqrt{2}]/(2/\pi)*I_0=1.11$ solo per forme d'onda puramente sinusoidali.

Oggi in commercio ci sono circuiti elettronici integrati che effettuano l'estrazione del vero valore efficace (true RMS) da qualunque forma d'onda.



N.B.: se consideriamo un segnale sinusoidale $v(t)=V\sin\omega t=V e^{j\omega t}$

1. lo integriamo: $\int v(t)dt = \int V e^{j\omega t} dt = (V/j\omega) * v(t)$

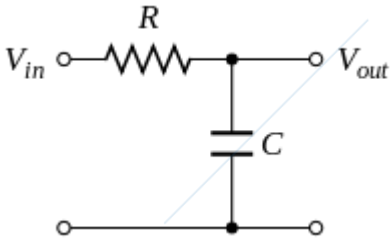
$(1/j\omega)$ è l'operatore di integrazione;

2. lo deriviamo: $dv(t)/dt = dV e^{j\omega t}/dt = (j\omega) * v(t)$

$(j\omega)$ è l'operatore di integrazione.

FILTRO RC.

Filtro RC: rete bipolare con due morsetti di ingresso, due di uscita e due elementi passivi (una resistenza R e un condensatore C).



Per comprendere il tipo di manipolazione che un circuito così fatto può fare su un segnale in tensione occorre impostare e svolgere le equazioni del circuito:

$v_i = (R + X_c) * i$ segnale in ingresso

$v_o = X_c * i$ segnale in uscita

da cui la corrente $i = v_i / (R + X_c)$ e $v_o = X_c * [v_i / (R + X_c)] = v_i / (R/X_c + 1)$

X_c è la reattanza capacitiva, allora $v_o/v_i = 1/j\omega RC + 1$.

Ponendo $\omega_c = 1/RC = 1/\lambda$ pulsazione caratteristica (l'inverso della costante di tempo λ del sistema), la funzione di trasferimento diventa $v_o/v_i = 1/(j\omega\lambda + 1)$.

Questo indica che il circuito RC è un **sistema elettrico del 1° ordine** dal punto di vista dinamico.

Possiamo calcolare il **guadagno** (modulo della funzione complessa di trasferimento):

$G = v_o/v_i = 1/\sqrt{[\omega/\omega_c]^2 + 1}$ e lo sfasamento: $\phi = \arctg(-\omega/\omega_c)$

La risposta in frequenza è quella di uno strumento meccanico del 1° ordine.

Dallo studio del guadagno in funzione della frequenza si riconosce che è un **filtro passa-basso** (filtro di Butterworth ad un polo):

$$\begin{cases} \text{per } \omega \rightarrow 0 & G = 1 \\ \text{per } \omega \rightarrow \infty & G = 0 \\ \text{per } \omega \rightarrow \omega_c & G = 1/\sqrt{2} \end{cases}$$

La frequenza di taglio del filtro a -3dB è: $f_c = 1/2\pi RC$.

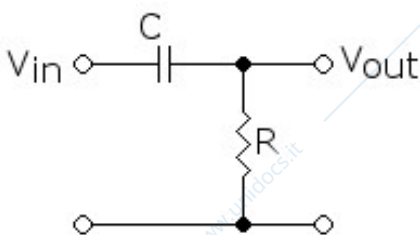
Il filtro RC possiede una particolarità:

per $|j\omega RC| \gg 1$, cioè $\omega \gg \omega_c$ vale $G = v_o/v_i \approx 1/j\omega RC = 1/j\omega * 1/\lambda$, ovvero $v_o(t) = 1/\lambda * 1/j\omega * v_i(t)$, cioè il segnale in uscita è l'integrale del segnale in ingresso.

Il filtro RC esegue un'operazione analogica di integrazione sul segnale in tensione (tale operazione avviene per quel campo di frequenze dove il segnale in uscita viene fortemente attenuato).

FILTRO CR.

Filtro CR: vale un discorso analogo.



Le equazioni del circuito in questo caso sono:

$v_i = (X_c + R) * i$ segnale in ingresso

$v_o = R * i$ segnale in uscita

da cui $v_o = R * [v_i / (X_c + R)]$ e con le stesse nozioni di sopra

$X_c = 1/j\omega C$ e $\omega_c = 1/RC = 1/\lambda$

si ottiene $v_o/v_i = R / (X_c + R) = j\omega CR / (1 + j\omega CR) = j\omega\lambda / (j\omega\lambda + 1)$.

Si tratta ancora di un **sistema elettrico del 1° ordine**, con guadagno:

$$G = v_o/v_i = (w/w_c) / \sqrt{[(w/w_c)^2 + 1]}.$$

Il filtro CR possiede una proprietà speculare rispetto a quella del filtro RC:

per $|jwCR| \ll 1$, cioè $w \ll w_c$, vale $G = v_o/v_i \approx jwCR \ll 1$, ovvero $v_o(t) = \lambda * jw * v_i(t)$ **il segnale in uscita è la derivata del segnale in ingresso** (anche in questo caso l'operazione di derivazione avviene per un campo di frequenze dove il segnale in uscita viene fortemente attenuato).

AMPLIFICATORE OPERAZIONALE.

Quando parliamo di un segnale in tensione, l'elemento più importante per la manipolazione (sempre presente in qualche punto della catena di misura) è l'**amplificatore A**.

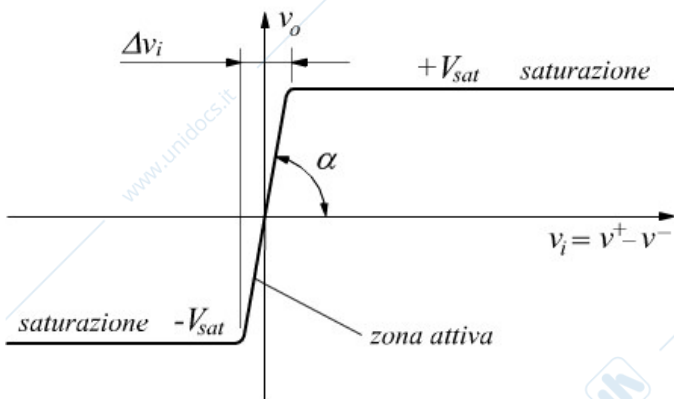
Uno degli amplificatori per segnali più comuni e versatili è l'amplificatore operazionale AO. In ogni schema circuitale l'AO è rappresentato da un triangolino con due ingressi (non invertente V_+ , invertente V_-) e un'uscita V_o .

Questo significa che l'AO accetta in ingresso una differenza di potenziale e l'uscita è un potenziale (riferito sempre alla massa dello strumento).

Le **caratteristiche ideali** dell'AO sono:

1. Amplificazione $A \rightarrow \infty$ (10^7)
2. Impedenza di ingresso $Z_i \rightarrow \infty$ ($10^{10} \Omega$)
3. Impedenza di uscita $Z_o \rightarrow 0$ (10Ω)
4. Banda passante $BW \rightarrow \infty$

Per quanto ideali, l'AO approssima queste caratteristiche nel funzionamento ad "anello aperto", cioè nella zona della curva caratteristica di funzionamento a destra della rampa crescente:



Nessun amplificatore può amplificare una tensione in ingresso producendo tensioni in uscita superiori alla propria tensione di alimentazione (mediamente $\pm 10V$), quindi con i valori ideali dell'amplificazione, *l'intervallo utile dei valori della differenza di potenziale in ingresso coperto dalla rampa di amplificazione si estende solo per alcuni μV .*

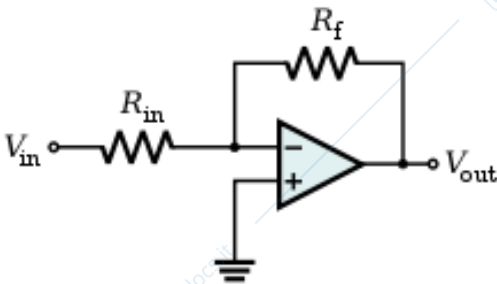
Quando la tensione in ingresso supera queste piccole differenze, l'AO va in saturazione ed emette in uscita una delle tensioni continue di alimentazione ($\pm V_{cc}$), positiva o negativa a seconda del segno dell'ingresso.

In questa configurazione, l'AO può essere usato efficacemente solo come **comparatore**.

Per questo motivo per amplificare un segnale di misura l'AO viene usato sempre ad "anello chiuso".

I costruttori limitano la banda passante ad anello aperto degli AO a pochi Hz per evitare che i piccoli rumori elettromagnetici esterni (ad alta frequenza) conducano l'AO ad oscillare tra $\pm V_{CC}$ rendendo impossibile anche il funzionamento da comparatore.

CONFIGURAZIONE INVERTENTE



Essendo l'impedenza in ingresso elevatissima, le poche cariche elettriche che riescono ad entrare per pilotare il dispositivo costituiscono una corrente trascurabile rispetto i_i .

La caduta di potenziale tra i due morsetti è quindi anch'essa trascurabile, ed essendo un morsetto collegato a massa, risulta che anche l'altro morsetto si troverà all'incirca al potenziale di riferimento: massa virtuale.

massa virtuale: $V_i \approx V_+ = 0$

$$V_i = R_i \cdot i_i$$

$$V_o = R_f \cdot i_f$$

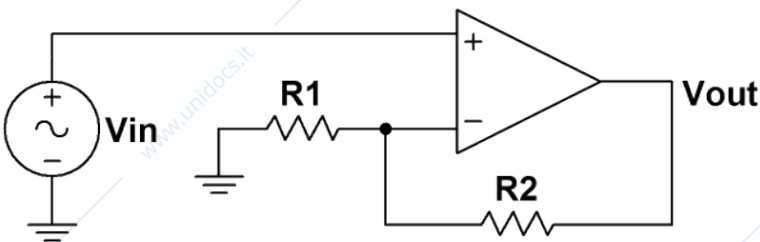
al nodo vale la somma delle correnti: $i_i + i_f = 0$ da cui $i_f = -i_i$, quindi $V_o = -R_f \cdot i_i = -R_f \cdot (v_i / R_i)$ che è la curva di graduazione del dispositivo.

Il guadagno è $G = V_o / V_i = -R_f / R_i$.

Non c'è più traccia dell'elevata amplificazione ad anello aperto A , il guadagno dipende unicamente dal rapporto tra le resistenze di controreazione e di ingresso (tale rapporto è sempre molto più basso di A).

Il segno negativo sta ad indicare che nella configurazione invertente il segnale in uscita risulta amplificato e invertito di segno rispetto all'ingresso.

CONFIGURAZIONE NON INVERTENTE



$V_i \approx V_+ = V_i$ non si ha più la massa virtuale.

Tutta la corrente che scorre nel ramo di controreazione, essendo l'impedenza in ingresso molto alta, non riesce praticamente ad entrare nell'ingresso invertente dell'AO e se ne va verso massa attraverso R_2 .

$$i_f = i$$

$$V_o = V_f + V_i \text{ con } V_f = R_f \cdot i_f \text{ e } V_i \approx V_+ = R_i \cdot i \text{ allora } V_o = R_f \cdot i + V_i = R_f \cdot (V_i / R_i) + V_i$$

guadagno $V_o = V_i \cdot [(R_f / R_i) + 1]$, è leggermente maggiore rispetto alla configurazione invertente e non si ha inversione di segno nel passaggio del segnale dall'ingresso all'uscita.

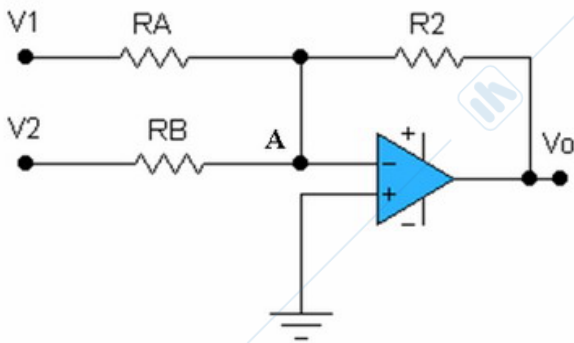
In entrambe le configurazioni si osserva che l'amplificazione può essere progettata convenientemente dal rapporto tra le resistenze di controreazione e di ingresso.

Gli AO in uscita sono considerati generatori di tensione e, generalmente, non sono in grado di pilotare in corrente un carico connesso a valle di v_o .

Per apprezzare il guadagno sul segnale il dispositivo a valle di v_o deve avere impedenza di ingresso elevata.

L'amplificatore operazionale si chiama così proprio perché tramite esso è possibile **compiere operazioni matematiche sui segnali**.

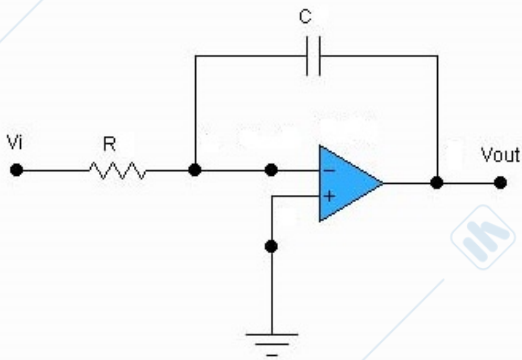
Sommatore di tensioni.



Si vogliono sommare due tensioni V_1 e V_2 .
Dalla $V_o = -(R_f/R_i)V_i = -R_f \cdot i_i$ dove
 $i_i = V_i/R_i = i_a + i_b = V_1/R_a + V_2/R_b$ ottengo
 $V_o = -R_f \cdot (V_1/R_a + V_2/R_b)$.

Se progetto l'ingresso del circuito con $R_a = R_b = R$
Ottengo $V_o = -(R_f/R) \cdot (V_1 + V_2)$, cioè la somma delle due tensioni in ingresso.

Amplificatore operazionale integratore (filtro passa-basso attivo).

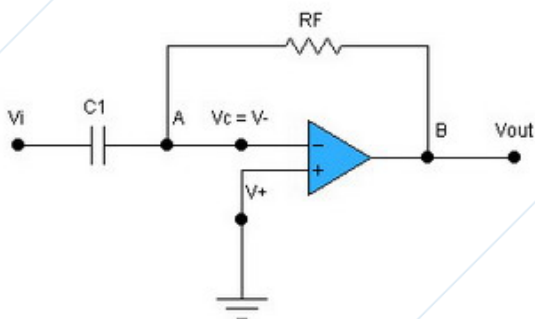


Ha una configurazione circuitale analoga all'amplificatore invertente, ma al posto della resistenza di controreazione presenta un condensatore C_f .

Per il guadagno vale:
 $V_o = -Z_f/Z_i \cdot (v_i)$ con $Z_i = R$ e $Z_f = X_{Cf} = 1/j\omega C_f$
allora $V_o = -(1/j\omega R C_f) \cdot v_i = -(1/j\omega) \cdot \omega_c \cdot v_i$
in uscita ho l'integrale dell'ingresso.

Se si vuole amplificare il segnale in uscita (integrato o no) basta collegare sul ramo di controreazione in parallelo al condensatore una resistenza R_f opportuna e si ottiene un guadagno $G (= R_f/R_i)$ che si "sovrappone" all'integrazione.

Amplificatore operazionale derivatore (filtro passa-alto attivo).



Ha una configurazione circuitale analoga all'amplificatore invertente, ma al posto della resistenza d'ingresso presenta un condensatore C_1 .

Per il guadagno vale:
 $V_o = -Z_f/Z_i \cdot (v_i)$ con $Z_f = R_f$ e $Z_i = X_{C1} = 1/j\omega C_1$
allora $V_o = -j\omega R_f C_1 \cdot v_i = -j\omega \cdot (1/\omega_c) \cdot v_i$
in uscita ho la derivata dell'ingresso.

Anche nel caso dei filtri attivi appena illustrati, l'integrazione e la derivazione elettrica del segnale hanno luogo rispettivamente per $\omega \gg \omega_c$ (integrazione) e per $\omega \ll \omega_c$ (derivazione), frequenze per cui il guadagno G è molto minore di 1.

Per amplificare il segnale in uscita:

1. per l'integratore basta aggiungere sul ramo di controreazione una R in parallelo al condensatore;
2. per il derivatore basta aggiungere una resistenza R in serie al condensatore in ingresso. Così facendo si sposta il valore della frequenza caratteristica del filtro.

Punto critico degli amplificatori operazionali:

CASO IDEALE: l'AO accetta ai suoi ingressi due potenziali $V_+=V_2$ e $V_-=V_1$ (entrambi riferiti a massa) e ne amplifica la differenza secondo $V_o=A(V_2-V_1)$.

CASO REALE (per inevitabili imperfezioni costruttive): le tensioni inviate ai due terminali di ingresso (invertente e non) potrebbero non essere amplificate esattamente con lo stesso guadagno A.

È più realistico schematizzare la caratteristica ingresso-uscita dell'AO con $V_o=A_2V_2-A_1V_1$, dove A_1 e A_2 rappresentano le due amplificazioni "quasi" uguali con le quali l'AO elabora le due tensioni inviate ai due morsetti di ingresso.

È utile descrivere le due tensioni d'ingresso mediante l'ingresso differenza $V_d=V_2-V_1$ e l'ingresso di modo comune $V_c=(V_1+V_2)/2$, che rappresenta la "distanza" dal riferimento di massa del segnale V_2-V_1 in ingresso.

Se l'AO fosse ideale, $A_1=A_2=A$, amplificherebbe solo l'ingresso differenza V_d eliminando completamente l'ingresso di modo comune.

Nessun dispositivo è ideale, quindi si descrive l'amplificazione dell'AO con due componenti: l'amplificazione differenziale $A_d=(A_1+A_2)/2$ che agisce su V_d e l'amplificazione di modo comune $A_c=A_2-A_1$ che agisce su V_c (indesiderata).

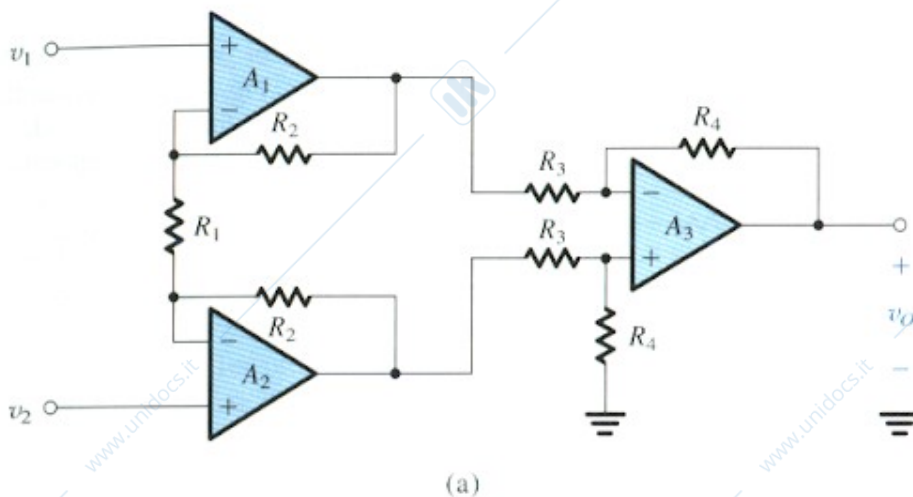
Per minimizzare questo problema si cerca di rendere le due amplificazioni A_1 e A_2 più uguali possibili.

Il rapporto tra le amplificazioni A_d e A_c è un parametro importante per gli AO: $CMRR=A_d/A_c$ (**rapporto di reiezione comune**).

Dato che si producono AO con A_d elevate e A_c basse, il rapporto CMRR risulta elevato (10^5 circa), quindi è conveniente esprimerlo in scala logaritmica: $CMRR=\log(A_d/A_c)$.

Solitamente i valori di CMRR possono variare dai 60dB ad oltre 120dB per AO di elevata qualità.

Amplificatore per strumentazione.



Quasi sempre, i trasduttori non sono buoni generatori di tensione poiché non sono in grado di inviare correnti significative ad un carico collegato a valle.

Questo dispositivo ha impedenza d'ingresso molto elevata ($10^{10} \Omega$) su entrambi i terminali d'ingresso ed ha intrinsecamente un'alta reiezione del segnale di modo comune V_c .

È usato nelle misure perché è ottimo per amplificare segnali flottanti (v_2-v_1), cioè non riferiti alla massa dello strumento.

Il guadagno (differenziale) vale: $G=v_o/v_i=R_4/R_3(1+2R_2/R_1)$.

L'amplificatore per strumentazione è molto diffuso e viene venduto come circuito integrato.

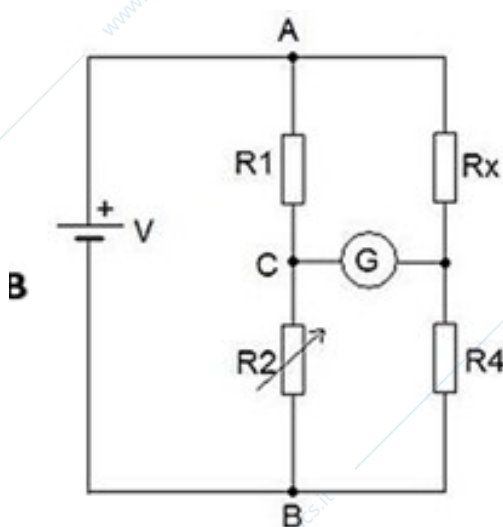
In alcune applicazioni particolari (per esempio per trasduttori che producono un segnale periodico sovrapposto a una forte componente continua, o un segnale che deriva nel tempo, o trasduttori che presentano in uscita un segnale "modulato") è sconsigliabile amplificare il segnale in continua → si usa **l'amplificatore in alternata (AC) o Carrier**.

Tale amplificatore è un dispositivo che riesce a modulare in ampiezza il segnale proveniente dal trasduttore o, in generale, dallo stadio che precede.

1. Il segnale con frequenza f_s viene modulato con un'onda portante a frequenza $f_c \gg f_s$.
2. La portante viene amplificata, poi demodulata: un circuito discriminatore di fase riconosce se la portante trasporta una semi-onda positiva o negativa e utilizza questa informazione nello stadio di demodulazione.

Condizione fondamentale per una corretta modulazione e demodulazione: la frequenza massima del segnale f_s deve essere di almeno un ordine di grandezza inferiore alla frequenza f_c dell'onda portante.

Concludiamo questa rassegna di strumenti e circuiti per la manipolazione del segnale di misura studiando una rete passiva particolare, dedicata ad elaborare le informazioni che viaggiano sotto la forma di *variazione della resistenza* (molto utile nelle applicazioni di misure meccaniche).



Considero la rete elettrica costituita da due resistenze in parallelo (non necessariamente uguali) e da un galvanometro collegato a ponte su di esse.

Sulle due resistenze in parallelo è sempre possibile individuare due punti (C e D) a cavallo dei quali il galvanometro G segnala corrente zero (vuol dire che il potenziale in questi due punti è uguale: $V_C=V_D$).

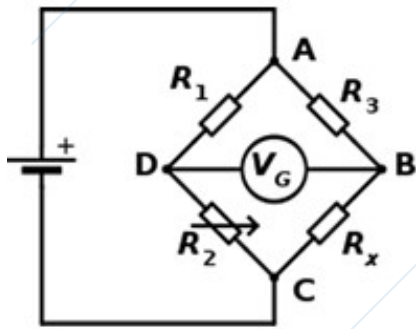
Tra i punti A e B si individuano 4 resistenze: R_1, R_2, R_3, R_4 ; con cui posso scrivere le seguenti relazioni:

$$V_{AC}=V_{AD} \rightarrow R_1 I_1=R_3 I_3$$

$$V_{CB}=V_{DB} \rightarrow R_2 I_1=R_4 I_3$$

e si ottiene: $R_1/R_2=R_3/R_4$, ovvero $R_1 R_4=R_2 R_3 \rightarrow$ **relazione di equilibrio del ponte**.

Il galvanometro G realizza fisicamente un ponte per il passaggio della corrente tra C e D . Se non si osserva tale passaggio di corrente vuol dire che $V_D - V_C = 0$ e che il ponte è *in equilibrio*.



Questa situazione è molto utile nelle applicazioni pratiche e viene realizzata sempre secondo lo schema della figura a fianco. La rete resistiva che risulta da tale configurazione prende il nome di **ponte di Wheatstone**.

Il ponte di Wheatstone può essere usato per la misura di una resistenza incognita R_x .