

MISURE ELETTRICHE

STIMA DELLE INCERTEZZE — MODELLO PROBABILISTICO

IPOTESI: Sono definite e note le incertezze tipo u_{n_i} delle misure dirette n_i e le grandezze sono tutte indipendenti

$$u_{n'}^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial n_1} \right)_{\bar{n}_1, \bar{n}_2, \dots, \bar{n}_m}^2 \cdot u_{n_1}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial n_2} \right)_{\bar{n}_1, \bar{n}_2, \dots, \bar{n}_m}^2 \cdot u_{n_2}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial n_3} \right)_{\bar{n}_1, \bar{n}_2, \dots, \bar{n}_m}^2 \cdot u_{n_3}^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial n_m} \right)_{\bar{n}_1, \bar{n}_2, \dots, \bar{n}_m}^2 \cdot u_{n_m}^2 \Rightarrow u_{n'}^2 = \sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial n_i} \cdot u_{n_i} \right)^2$$

SEMPLIFICAZIONI: Somma/Differenza $u_x^2 = u_a^2 + u_b^2$ Prodotto/Quoziente $\left(\frac{u_x}{x} \right)^2 = \left(\frac{u_a}{a} \right)^2 + \left(\frac{u_b}{b} \right)^2$

PONTE DI WHEATSTONE: La formula per calcolare la resistenza incognita all'equilibrio è $R_x = \frac{R_a \cdot R_c}{R_b}$



CARATTERISTICHE METROLOGICHE DEGLI STRUMENTI

FUNZIONE DI TARATURA: relazione che permette di ricavare da ogni valore dell'uscita la corrispondente fascia di valori del misurando.

INCERTEZZA DI TARATURA: larghezza della fascia di valore assegnata al misurando come misura.

CURVA DI TARATURA: relazione biunivoca tra uscita e punto centrale della fascia di valore relativa al misurando.

SENSIBILITÀ: è l'inverso della pendenza, punto per punto, della curva di taratura (se la curva è lineare la sensibilità è costante e il suo inverso è detto costante di taratura).

LINEARITÀ: scostamento massimo della curva di taratura da una retta.

RISOLUZIONE: capacità del dispositivo a funzionare come rivelatore differenziale nell'intorno del valore assegnato al misurando.

VALORE DELLA RISOLUZIONE: variazione del valore del misurando che provoca una variazione della lettura di ampiezza pari all'incertezza di lettura.

ISTERESI: Proprietà di uno strumento di fornire valori di lettura diversi per il medesimo misurando quando questo viene fatto variare per valori crescenti o decrescenti.

VALORE D'ISTERESI: differenza dei valori di lettura per il medesimo misurando quando viene fatto variare per valori crescenti e decrescenti.

RIPETIBILITÀ: attitudine di uno strumento a fornire valori di lettura poco diversi fra loro quando si applica più volte lo stesso misurando nelle stesse condizioni operative.

VALORE DI RIPETIBILITÀ: intervallo dei valori di lettura entro il quale si prevede che cada una percentuale assegnata di valori di lettura applicando più volte lo stesso misurando nelle stesse condizioni.

STABILITÀ: capacità di conservare inalterate le caratteristiche di funzionamento per un determinato valore di tempo

CAMPO DI MISURA: intervallo comprendente tutti i valori delle misure che il dispositivo può segnare.

PORTATA: Limite superiore assoluto del campo di misura

CAMPO DI SICUREZZA: intervallo comprendente tutti i valori che il misurando può assumere, senza che il funzionamento del dispositivo risulti permanentemente alterato rispetto alla funzione di taratura.

CAMPO DI NORMALE FUNZIONAMENTO: intervallo dei valori assunti dall'uscita corrispondentemente al campo di misura del misurando.

RISPOSTA IN FREQUENZA

RISPOSTA AL GRADINO

INDICE DI CLASSE: $C = \frac{|G - G_m|}{G_{F.S.}} \cdot 100 = \frac{a}{G_{F.S.}} \cdot 100$ dove a è l'accuratezza e $G_{F.S.}$ è il fondo scala dello strumento.

PARAMETRI TENSIONI ALTERNATE

Tensione istantanea in forma sinusoidale: $v(t) = V_{OP} \sin(2\pi f \cdot t + \varphi) = V_{OP} \sin(\omega t + \varphi)$

Tensione efficace: $V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} v^2(t) dt} = \frac{V_{OP}}{\sqrt{2}}$ Tensione media: $V_{AVG} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} |v(t)| dt = \frac{2 \cdot V_{OP}}{\pi}$

I SENSORI

Sono tutti quei dispositivi che convertono una grandezza non elettrica in una elettrica.

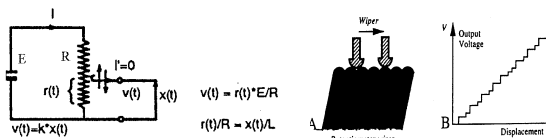
Si usano per determinare i valori di una grandezza, e si applicano nei processi di misura e robotica. I sensori si dividono in due tipologie:

ATTIVI: convertono direttamente l'energia dell'ingresso in energia d'uscita senza l'ausilio di sorgenti esterne.

PASSIVI: richiedono un intervento energetico esterno per la conversione.

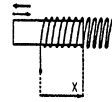
I SENSORI SI DIVIDONO NELLE SEGUENTI TIPOLOGIE:

POTENZIOMETRICI: la resistenza elettrica dipende dalla lunghezza di $r(t)$. Le maggiori cause di errore sono dovute alla conduzione non perfetta tra la resistenza e il gancio mobile.

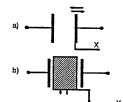


CAPACITIVI: mettendo dei sali come dielettrico tra le armature del condensatore, questi risentono dell'umidità e aumentando il loro volume fanno spostare le armature e conseguentemente varia il valore di capacità (dove ϵ è la costante dielettrica del materiale e ϵ_0 quella nel vuoto).

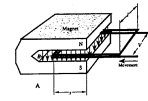
$$L = \mu \mu_0 n^2 \frac{A}{\ell}$$



$$C = \epsilon \epsilon_0 \frac{A}{d}$$



INDUTTIVI: il valore dell'induttanza diminuisce se il cilindro di ferro penetra tra gli avvolgimenti della bobina (dove n è il numero di spire, A è la sezione del nucleo di ferro magnetico ed ℓ è la sua lunghezza).



$$e = n B \ell \vec{v}$$

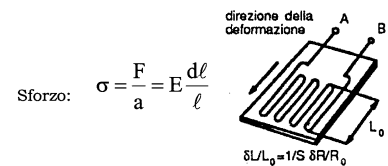
INDUZIONE ELETTRO-MAGNETICA: la corrente passante nella bobina è proporzionale al numero di spire, a quanto queste sono penetrate all'interno del magnete, alla loro velocità e al campo magnetico B .

EFFETTO SEEBECK: un conduttore, con un'estremità posta ad una temperatura T_1 e l'altra ad una temperatura T_2 , diventa sede di un passaggio d'energia dalla parte calda alla parte fredda. Il gradiente termico genera un campo elettrico che si manifesta con un incremento di tensione.

EFFETTO Peltier: consiste nel manifestarsi di una quantità di calore assorbita o ceduta da una termocoppia (o più in generale da due materiali diversi saldati insieme) in funzione del senso di percorrenza della corrente.

PIEZOELETRICI: si genera una carica energetica da parte di un materiale cristallino sottoposto ad una sollecitazione meccanica (pressione). L'effetto è reversibile.

PIEZORESISTIVI: formato da un resistore saldato su un substrato elastico, che viene fissato all'oggetto che si deforma. La resistenza in genere varia da circa 100 Ω fino a migliaia di Ω . Per avere una buona sensibilità il sensore deve avere lunghi segmenti longitudinali e corti segmenti trasversali, così la sensibilità trasversale è di soli pochi percento di quella longitudinale. La resistenza varia in maniera direttamente proporzionale alla deformazione (2° legge di Ohm). Sono usati soprattutto per accelerometri e microfoni. Ovviamente la sensibilità è maggiore quanto è maggiore la lunghezza in base



alla legge $R = \frac{\rho}{V} \cdot l^2$.

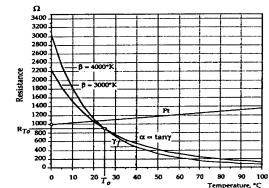
PIROELETRICO: una carica elettrica si genera per effetto del flusso di calore. A differenza delle termocoppie le cariche vengono generate in risposta ad una variazione di temperatura.

TERMORESISTIVO: Nei PTC (metalli) e negli NTC (molti semiconduttori e ossidi) si verifica una variazione di resistenza in funzione della temperatura. I due modelli matematici sono $\rho_T = \rho_0 [1 + \alpha(T - T_0)]$ dove

ρ_0 è la resistività alla temperatura T_0 ($0^\circ\text{C} \div 25^\circ\text{C}$) e α è il coefficiente di temperatura resistivo (TCR). La resistività si misura in $\Omega \cdot m$. L'altro

modello è $R_T = R_0 \cdot e^{\beta(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0})}$ dove R_0 è la resistenza alla temperatura T_0 ($0^\circ\text{C} \div 25^\circ\text{C}$) e β è la temperatura caratteristica del materiale in Kelvin.

$$R_T = R_0 e^{\beta(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0})}$$



EFFETTO HALL: un conduttore sottoposto ad un campo d'induzione magnetica B , normale al flusso della corrente I : genera una d.d.p. in direzione perpendicolare sia a I che a B . I sensori Hall sono utilizzati soprattutto per rilevare campi magnetici e per tenere sotto controllo spostamento e posizione di oggetti. Questi sensori non sono molto lineari: richiedono perciò una calibrazione per misure di precisione, e hanno bisogno di una interfaccia elettronica per misure di posizione e di spostamento.

EFFETTO FOTOCONDUITIVO: quando il sensore viene investito da radiazioni di varia lunghezza d'onda determina il passaggio di corrente in quanto le radiazioni promuovono gli elettroni in banda conduzione. È necessario collegare il sensore ad un generatore di tensione per avere un flusso di corrente elettrica variabile nel tempo con la radiazione incidente.

EFFETTO FOTOVOLTAICO: l'energia radiante viene convertita in energia elettrica. Nelle giunzioni p-n dei semiconduttori si formano coppie elettroni-lacune generando così una f.e.m. I sensori sono costituiti da fotodiodi o fototransistor, in cui una piccola quantità di luce permettono la commutazione del circuito dalla condizione di minima corrente a quella di massima corrente.

EFFETTO DOPPLER: consiste nella variazione di frequenza delle onde acustiche (oppure ottiche e radio) trasmesse da un TX e ricevute da un RX. Si usano per: rilevare la velocità di un fluido dentro un condotto, misura delle inclusioni dei pezzi meccanici.

PARAMETRI DEI SENSORI:

SENSIBILITÀ: rapporto tra la variazione del segnale d'uscita e la variazione d'ingresso (esempio $45\text{mV}/^\circ\text{C}$)

RISOLUZIONE: più piccola quantità di segnale misurabile, o minima variazione del segnale in ingresso che produce un'apprezzabile variazione in uscita.

TARATURA: misurazione della grandezza d'uscita per valori noti della grandezza d'ingresso. Per ciclo di taratura s'intende una prova che copra tutto il campo di misura del dispositivo, la prova si divide in due parti: una per valori crescenti, l'altra per valori decrescenti.

ISTERESI: è la massima differenza tra i due cammini: uno d'andata uno di ritorno dall'uscita del dispositivo. Viene espressa in percentuale del fondo scala (% f.s.)

LINEARITÀ: massimo scostamento (espresso in % f.s.) tra curva di calibrazione e retta di riferimento.

TEMPO DI RISPOSTA: in ingresso applichiamo un gradino della grandezza da misurare, l'uscita varia fino a raggiungere dopo un periodo di tempo un nuovo valore. Si definiscono perciò:

TEMPO DI SALITA: tempo impiegato per passare dal 10% al 90% del valore finale.

TEMPO DI RISPOSTA: tempo impiegato per raggiungere una prefissata percentuale del valore finale.

VITA UTILE: tempo entro il quale il dispositivo opera senza modificare le sue prestazioni.

RIPETIBILITÀ: attitudine del trasduttore a fornire valori della grandezza in uscita poco diversi tra loro a parità del segnale d'ingresso nelle stesse condizioni di lavoro.

STABILITÀ: attitudine a conservare inalterate le caratteristiche di funzionamento per un certo intervallo di tempo.

ACCURATEZZA: esprime un'incaccuratezza considerando la maggiore deviazione tra il valore presentato in uscita e il vero valore in ingresso.

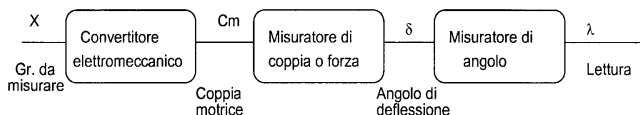
AFFIDABILITÀ: capacità del sensore a fornire specificate prestazioni per determinate condizioni e per un certo periodo. È espressa in termini statistici come la probabilità che il dispositivo funzioni senza guasti per un periodo specificato.

CAMPO DI MISURA: Definisce i limiti entro i quali deve variare il misurando affinché il sensore funzioni secondo le specifiche fornite dal costruttore.

CAMPO DI NORMALE FUNZIONAMENTO: Campo di valori assunti dall'uscita in funzione del campo di misura del misurando.

MODELLO: Scelto per rappresentare il comportamento del sensore, può essere diverso a seconda del campo di variabilità del segnale d'ingresso.

STRUMENTI INDICATORI ANALOGICI ELETTROMECCANICI



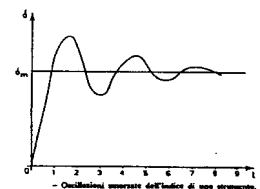
FUNZIONAMENTO: Hanno un equipaggio mobile che da una posizione iniziale di riposo si sposta sotto l'azione di una forza proporzionale al misurando. Si contrappone una forza resistente, di natura elastica, che tenta sempre di riportare l'equipaggio mobile nella posizione di riposo. Le coppie di forze che regolano il

funzionamento degli strumenti elettromeccanici sono:

- **Coppia motrice:** proporzionale al valore del misurando, viene convertita in un angolo di deflessione che viene misurato su una scala graduata sfruttando la relazione $\lambda = h \cdot \delta$. Dove con λ indichiamo l'arco di cerchio percorso dall'indice, con h la lunghezza dell'indice e con δ la deviazione angolare rispetto alla posizione di riposo.
- **Coppia resistente:** di natura elastica, perché prodotta da nastri o molle che tentano di riportare l'e.m. in posizione di riposo. La sua forza è proporzionale all'angolo di deviazione.
- **Coppia smorzante:** Permette all'indice di raggiungere la condizione d'equilibrio stabile dopo un periodo di tempo transitorio. In mancanza di questa componente l'e.m. arriverebbe all'equilibrio dopo una serie d'oscillazioni che andranno smorzandosi molto più lentamente.
- **Coppia d'attrito:** dovuta agli attriti del sistema di sospensione dell'e.m., si oppone al moto e per ciò dovrà essere trascurabile rispetto alle precedenti. Questa condizione s'ottiene con sospensioni a nastri o fili.

Sistema di smorzamento elettromagnetico: per eseguire l'azione frenante sfrutta le correnti di Foucault che si generano in un conduttore che ruota tra due poli di un magnete taglia le linee di flusso.

Indici e scale: esistono vari tipi di scale graduate (lineare, logaritmica, quadratica, ticonica...) ma bisogna fare attenzione all'errore di parallasse. Molto spesso si usa uno specchio per vedere quando si sbaglia a leggere.



STRUMENTI MAGNETOELETTRICI

Sono tutti quei strumenti in cui il campo magnetico costante viene generato da un magnete permanente creando così un'azione motrice su una o più bobine libere di muoversi e attraversate da corrente continua.

La corrente entra circola negli avvolgimenti e crea delle linee di forza; è presente anche un cilindro di ferro dolce che permette alle linee di forza di presentarsi ortogonalmente alla spira.

$$F = n^{\circ}_{spire} \cdot B \cdot I \cdot l \quad c_m = m \cdot B \cdot l \cdot I \cdot d \quad k_m = m \cdot B \cdot l \cdot d \quad \text{L'angolo di deflessione } \delta \text{ è direttamente proporzionale alla}$$

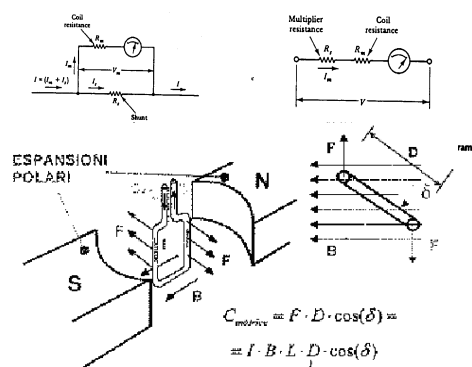
$$c_r = k_{molla} \cdot \delta_{angolo}$$

corrente che scorre nelle spire. Dalla prima formula la forza non può essere incrementata aumentando il numero delle spire, perché a sua volta aumenterebbe anche il peso.

PRESTAZIONI E CARATTERISTICHE: lo strumento è un amperometro di piccola portata perché la corrente che può percorrere le spire è la stessa che dovrà percorrere le molle senza farle scaldare troppo. Questo porterebbe ad un'alterazione della coppia resistente che non risulterebbe più proporzionale a δ . Per far fronte a questo problema si potrebbe aumentare la sezione del filo, ma ciò comporterebbe un aumento del peso dell'e.m. e per ciò una maggiore deteriorazione del sistema di sospensione, e inoltre aumentando la portata si riduce la sensibilità. Per questi motivi questi strumenti hanno portate sull'ordine dei mA anche se possiamo estendere il campo di misura fino a correnti molto più elevate (20A) inserendo degli shunt in parallelo. Il limite inferiore di misura è invece posto dalla coppia d'attrito, sull'ordine delle poche decine di μA , che può essere abbassato usando sospensioni a nastri o fili.

VOLTMETRI E AMPEROMETRI DI PORTATA QUALSIASI

Questi schemi mostrano che per realizzare voltmetri e amperometri di portata qualsiasi si utilizzano dei resistori di shunt collegati rispettivamente in serie e in parallelo allo strumento e alla sua resistenza interna.

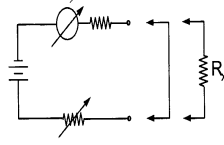


OHMETRI DI PORTATA QUALSIASI

1. Si cortocircuita i morsetti e si regola il ohm.
2. Colleghiamo la resistenza da misurare e la aumenta fino a indicare il valore della

ALTRI SVANTAGGI DI QUESTI STRUMENTI: v'è una resistenza d'ingresso che commette un errore di

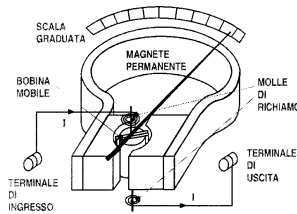
FORZE ESERCITATE SULLE SPIRE: Il $\cos \delta = 1$ perché grazie al nucleo di ferro dolce le linee di forza sono ortogonali alla spira, riuscendo a sfruttare così tutto il contributo energetico delle linee di forza.



potenziometro finché non arriviamo a 0 corrente scende e la scala retrograda resistenza. componente d'incertezza dovuta alla consumo.

GALVANOMETRO D'ARSONVAL

La sua portata è sull'ordine dei mA, perché la corrente deve attraversare le molle senza riscaldarle troppo portandoci così al problema illustrato nel paragrafo di sopra: "prestazioni e caratteristiche degli strumenti elettromagnetici".

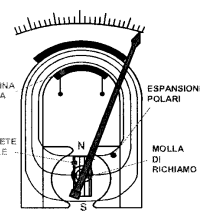


Equipaggi a magnete mobile

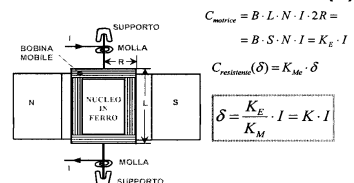
$$C_m(I) = B(i) \cdot r = K_E \cdot i$$

$$C_r(\delta) = K_M \cdot \delta$$

$$\Rightarrow \delta = \frac{K_E}{K_M} \cdot i = K \cdot i$$



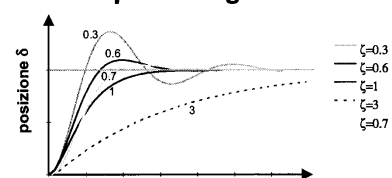
Galvanometro D'Arsonval (2)



Molle di richiamo: negli strumenti con sospensione a perno le molle sono a spirale piatta, un capo è fissato al telaio dello strumento mentre l'altro al perno dell'indice rotante. Inoltre conducono corrente all'organo mobile che deve essere limitata per non scaldarle troppo, altrimenti un riscaldamento eccessivo porta ai problemi già citati. Il dimensionamento del sistema di sospensione si effettua tenendo conto dei problemi di non sollecitare troppo i materiali e di ottenere una piccola coppia d'attrito.

Risposta al gradino: è interessante vedere come lo strumento s'assesta al valore finale quando al suo ingresso viene dato un gradino. Uno strumento che di colpo indica il valore del misurando fa nascere il dubbio che la coppia smorzante non sia mai entrata in funzione, e per ciò la lettura può essere non attendibile. Nel normale funzionamento l'indice dello strumento non arriva subito al valore finale: esegue una serie di oscillazioni smorzate che andranno man mano ad affievolirsi fino a fermarsi sul valore corrispondente.

Risposta al gradino



AMPEROMETRO IN CORRENTE CONTINUA

L'amperometro prevede che la sua resistenza interna sia il più possibile tendente a 0Ω perché ai suoi capi non deve stabilirsi alcuna d.d.p. Per realizzare un amperometro a più portate si collocano più shunt in parallelo che possiamo selezionare con uno switch.

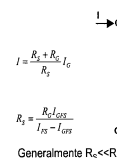
VOLTMETRI IN CORRENTE CONTINUA

$\frac{1}{I_{FS}} = R_{specifica}$ che si misura in $A^{-1} = (\Omega/V)$. Ci permette di

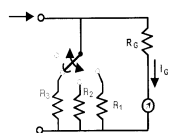
conoscere la resistenza d'ingresso per ogni fondo scala.

Il voltmetro a più portate sfrutta gli shunt in serie connessi in cascata, selezionabili con un opportuno switch.

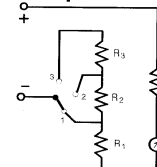
Amperometro in cc



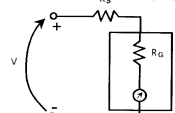
Amperometro a più portate



Voltmetro a più portate per cc



Voltmetri per cc: sensibilità



$$V_{FS} = (R_s + R_G) \cdot I_{FS}$$

$$\frac{(R_s + R_G)}{V_{FS}} = \frac{1}{I_{FS}} = K_{Q/V}$$

• Resistenza di ingresso data come:

$$R_{ingresso} = K_{Q/V} \cdot V_{FS} = V_{FS} / I_{FS}$$

STRUMENTI UNIVERSALI

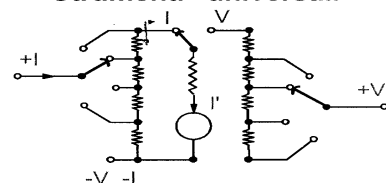
Spostando il primo switch da V a I scegliamo se usare lo strumento come amperometro o voltmetro, mentre invece se spostiamo gli switch sui lati della figura scegliamo il fondo scala che lo strumento assumerà nelle due configurazioni.

STRUMENTI ELETTRONICI ANALOGICI

Lo strumento più importante e più pratico per fare misure elettriche è il voltmetro. Questo dovrebbe avere, visto il suo inserimento in parallelo ad un elemento circuitale, una grande (meglio grandissima) resistenza di ingresso per non fare errore di consumo. Con i voltmetri a bobina mobile questo non è possibile in quanto il consumo ci deve essere per far funzionare lo strumento. Con gli strumenti elettronici si risolve questo problema e soprattutto si può avere una R_{IN} non più in funzione della portata di lavoro.

Gli strumenti di misura valutano le grandezze alternate secondo valori: medio, efficace, picco, picco picco.

Strumenti "universali"



VOLTMETRO ELETTRONICO AD ACCOPPIAMENTO DIRETTO

In ingresso c'è un partitore resistivo di alta risoluzione e sensibilità che funziona da attenuatore, eventualmente preceduto da un condensatore per tagliare tutte le componenti alternate del segnale (filtro passa-basso). In ingresso all'amplificatore operazionale avremo una impedenza dell'ordine dei $M\Omega$, mentre in uscita sarà molto piccola. In questo modo si può ottenere un disaccoppiamento tra il trasduttore e lo strumento e un aumento della sensibilità. L'inconveniente maggiore si ha quando si vuole misurare piccoli valori di tensione. Infatti l'effetto di deriva, dato da piccole correnti che circolano tra i circuiti del multimetro anche quando non sono collegate le due sonde, non permette di discernere i valori misurati dal "rumore". Le misure sono perciò fattibili tra 1 mV f.s. e 1500V f.s. con una opportuna rete di partitori. L'impedenza d'uscita è molto bassa.

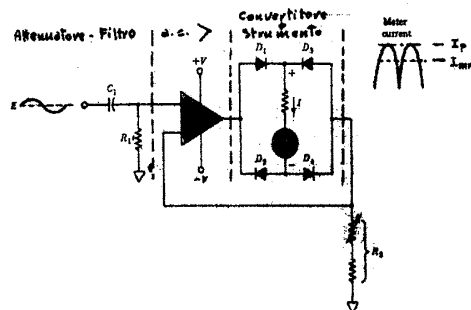
VOLTMETRI A VALOR MEDIO

L'amplificatore (operazionale) precede il convertitore (costituito da un raddrizzatore a doppia semionda a ponte di Graetz).

Il galvanometro centrale a bobina mobile, a causa della sua inerzia non è capace di seguire la variazione istantanea della corrente e indicherà perciò il valore medio raddrizzato della forma d'onda raddrizzata. Infatti il percorso della corrente alternata si divide in due fasi: polarizzazione diretta ed inversa.

L'amplificatore AC caratterizzato da un elevato guadagno ha in aggiunta un'elevata impedenza di ingresso, la risposta in frequenza dipende dai diodi, per quelli al silicio si va da pochi Hz a qualche MHz.

Il difetto più grosso è che si commette un errore di forma in quanto il convertitore rileva il valor medio della tensione raddrizzata ma fornisce il risultato in valore efficace della sinusoide. Tutto bene per la sinusoide ma se il segnale di ingresso non è più una sinusoide si possono commettere anche errori grossolani.



VOLTMETRI A VALORE DI PICCO

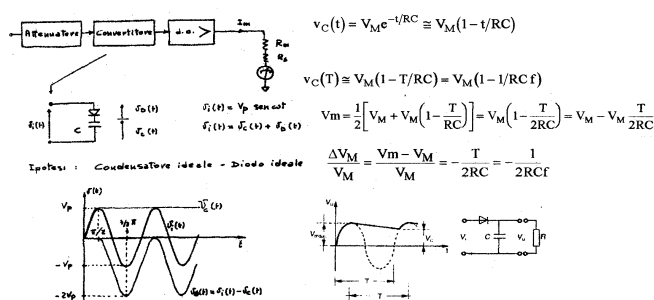
Se abbiamo un condensatore e un diodo ideali e preleviamo l'uscita sul condensatore questo rende una continua equivalente al valore di picco in quanto si è caricato a quel valore. Il problema è che se al nostro segnale perfettamente sinusoidale è sovrapposto ad una componente continua, il condensatore la registra. Per ovviare a questo problema si preferisce perciò prelevare l'uscita sul diodo eseguendo una misura di valor medio per individuare il valore di picco. Anche in questi strumenti se il segnale non è sinusoidale si incorre in un errore di forma.

Se diodo e capacità non sono ideali, abbiamo un limite inferiore in frequenza. La resistenza del diodo per polarizzazioni inverse non è infinita e il condensatore dopo aver raggiunto il massimo di carica comincia a scaricarsi con funzione esponenziale fino a che non ricomincia a caricarsi. Per questo motivo se fissiamo una accuratezza e il tipo di convertitore, con la sua relativa costante di tempo $\tau = R \cdot C$, viene automaticamente a fissarsi un limite inferiore in frequenza.

Per quanto piccola la costante di tempo τ non può essere zero in quanto la resistenza del diodo, nell'intorno dello zero, è fortemente non lineare e la tensione ai capi del condensatore ritarda a raggiungere il valore massimo. Per questo è impossibile anche un limite inferiore in portata dipendente fortemente dalla tensione di soglia del diodo.

In ultima analisi dobbiamo ricordare che esiste anche un limite superiore in frequenza in quanto si deve tenere conto del tempo di transito degli elettroni all'interno del diodo e delle capacità parassite che si vengono a formare nel circuito e nella giunzione p-n che costituiscono un circuito risonante serie.

VOLTMETRI A VALORE DI PICCO



CONVERTITORI A VERO VALORE EFFICACE

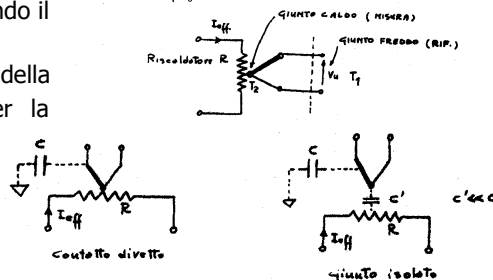
I voltmetri elettronici a vero valore efficace utilizzano solitamente delle termocoppie e sono detti a vero valore efficace in quanto operano secondo il vero significato di valore efficace.

Dette T_1 e T_2 le temperature del giunto caldo e del giunto freddo della termocoppia e a e b i coefficienti dei due metalli impiegati per la realizzazione del trasduttore si ottiene: $V_u = a(T_2 - T_1) + b(T_2^2 - T_1^2)$.

La tensione è evidentemente funzione non lineare del salto termico ma se b è di due o tre ordini inferiore ad a possiamo trascurarlo rendendo lineare l'espressione. È realizzato sfruttando l'effetto Seebeck e ponendo un resistore, percorso da corrente, in contatto con una termocoppia. Questo si riscalda per effetto Joule e il calore generato è proporzionale alla potenza dissipata sul resistore. Per avere un massimo trasferimento di calore si potrebbe unire la termocoppia alla resistenza. Alle alte frequenze la notevole massa metallica sarebbe causa della formazione di capacità parassite verso massa e il resistore non si riscalderebbe interamente. La scelta più intelligente sembrerebbe allora distanziare di poco la termocoppia dal resistore: in questo modo si verrebbe a creare l'ennesima capacità parassita tra il loro collegamento e non vi sarebbe passaggio di corrente tra i due. Questo procedimento porta inevitabilmente ad una perdita di sensibilità da parte dello strumento al quale occorre un maggiore salto termico per ottenere la stessa variazione del segnale in uscita. Il

CONVERTITORI A VERO VALORE EFFICACE

$$V_{\text{eff}} = V_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} \quad V_{\text{RMS}} = \sqrt{V_{\text{DC}}^2 + V_{\text{eff1}}^2 + V_{\text{eff2}}^2 + \dots + V_{\text{effn}}^2}$$



convertitore a termocoppia è intrinsecamente nato per scopi amperometrici (frequenza del segnale fino ai GHz), ma se preceduto da un amplificatore può essere utilizzato al contrario: si misurano le variazioni di corrente in funzione della tensione d'ingresso amplificata (frequenza del segnale limitata dall'amplificatore sull'ordine dei MHz). Gli svantaggi di questo sistema sono soprattutto l'inerzia termica che lo rende lento nella risposta e il comportamento assolutamente non attendibile se si lavora con tensione e corrente continue a causa dell'effetto Peltier.

STRUTTURA GENERALE DELL'OSCILLOSCOPIO ANALOGICO

FUNZIONALITÀ XY: date due generiche tensioni V_1 e V_2 possiamo rappresentare V_2 in funzione di V_1 : $V_2 = f(V_1)$ su due assi ortogonali. Si realizzano così le figure di Lissajoux che a seconda della figura visualizzata ci permette di capire come sia la fase tra le due tensioni.

FUNZIONALITÀ IN BASE DEI TEMPI: se la tensione V_1 è proporzionale al tempo, si ottiene l'andamento temporale di V_2 : $V_2 = g(t)$.

Il segnale che sta alla base di questo sistema di visualizzazione (applicato alle placche di deflessione orizzontale) è un dente di sega che permette di visualizzare la tensione sotto analisi linearmente in funzione del tempo.

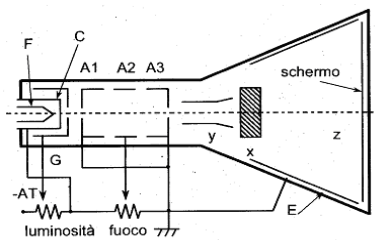
STRUTTURA GENERALE DELL'OSCILLOSCOPIO: è costituito dai seguenti blocchi:

1. CRT: il tubo a raggi catodici viene pilotato da due distinte coppie di placche di deflessione tra loro perpendicolari.
2. Circuiti elettronici per la deflessione verticale
3. Circuiti elettronici per la deflessione orizzontale

Oscilloscopio in XY: il blocco per la deflessione orizzontale è simile a quello per la deflessione verticale.

Oscilloscopio in base dei tempi: il blocco per la deflessione orizzontale genera i segnali per la relativa deflessione considerando anche la sincronia per riuscire a mantenere stabile la traccia.

Funzionamento e struttura del CRT: F è il riscaldatore che fornendo energia



termica a materiali ricchi di elettroni formano un fascio elettronico che può essere più o meno intenso variando il potenziale della griglia di controllo G rispetto al catodo C.

A_1 A_2 A_3 sono gli anodi che, grazie al loro potenziale di qualche migliaio di volt, accelerano e focalizzano il fascio.

X e Y sono due coppie di placche di deflessione, posizionate ortogonalmente tra loro, che grazie al loro potenziale spostano la traccia sullo schermo.

Gli elettroni del fascio, dopo essere stati accelerati e focalizzati, colpiscono un sottile strato di fosfori depositati sullo schermo emettendo così fotoni e quindi ci

viene mostrata la traccia. I fosfori dopo essere stati "accesi" dagli elettroni hanno un'inerzia, cioè si spengono gradualmente. Si rende necessario un percorso di ritorno per gli elettroni che colpiscono lo schermo: vengono raccolti da un ulteriore elettrodo formato da uno strato di miscela conduttiva sulla parte terminale del tubo.

Altro particolare importante è l'efficienza dei fosfori: che di solito è inferiore al 10%, quindi non tutta l'energia è convertita in energia luminosa mentre il restante si dissipa in calore. Un problema in cui è possibile incorrere è il surriscaldamento dei fosfori che provoca un'alterazione permanente delle loro proprietà ed il conseguente pericolo di bruciarli. Per difendersi da quest'inconveniente si usa l'oscilloscopio con la traccia alla minima intensità.

La deflessione: prima d'affrontare questo paragrafo poniamo delle ipotesi semplificative ipotizzando che il fascio elettronico sia di spessore nullo e che gli elettroni hanno una sola componente di velocità solo lungo l'asse z. Il parametro più significativo è la sensibilità di deflessione:

$$\text{Data da } S_y = \frac{D}{V_y} = \frac{l \cdot L}{2 \cdot d \cdot V_a} \left[\frac{\text{mm}}{\text{V}} \right]. \text{ Per aumentare}$$

questo parametro possiamo aumentare l o L oppure diminuire d o V_a . Ma l'aumento della corrente e la diminuzione della distanza tra le placche di deflessione sono vincolate rispettivamente dalla capacità di carico dell'amplificatore e dalla probabilità che il fascio collida contro le placche. Allora potremo aumentare L e ridurre V_a . Ma l'ingombro del tubo aumenterebbe e se V_a venisse diminuita gli elettroni sarebbero lenti compromettendo così il funzionamento dei fosfori che sarebbero debolmente eccitati visualizzando una traccia poco luminosa.

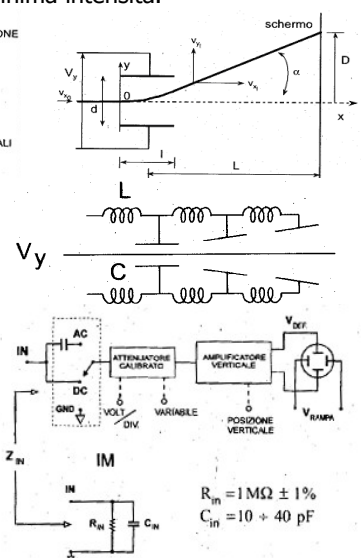
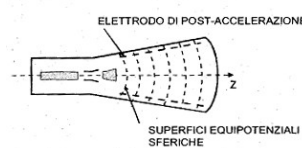
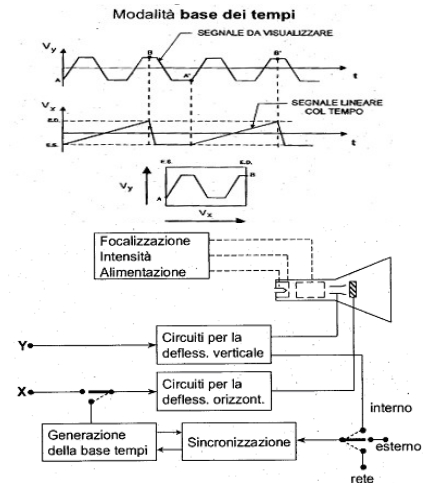
Allora quali soluzioni si adoperano per aumentare la sensibilità? Si deflettono tutti gli elettroni con bassa velocità e si accelerano gli elettroni deflessi con anodi di post-accelerazione usando spirali di grafite o una griglia a forma di calotta sferica.

Analizzando il comportamento dinamico può succedere che V_y vari durante il

tempo di transito degli elettroni all'interno delle placche (ad esempio volessimo vedere un qualsiasi segnale periodico).

Per svincolarci da questa variazione bisogna rispettare la seguente condizione: $f \ll \frac{1}{l} \cdot \sqrt{\frac{2eV_a}{m}}$. Tutto ciò s'ottiene

realizzando delle placche molto corte e usando tensioni d'accelerazione (V_a) molto alte andando inevitabilmente incontro



ad una riduzione della sensibilità. Ma anche qui riusciamo a risolvere il problema usando una deflessione distribuita, applicando cioè V_y mediante linee di ritardo.

A parità del valore assoluto di V_y devo ottenere lo stesso valore assoluto di deviazione, quindi bisogna che la tensione sia bilanciata (asse x a potenziale nullo).

Blocco di condizionamento verticale: la sua normale sensibilità di deflessione è di $0,2-1\text{mm/V}$. Il blocco amplificatore verticale ha le seguenti caratteristiche:

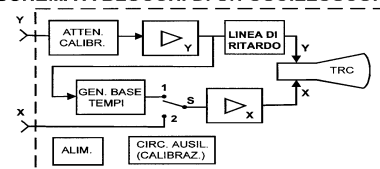
- Ingresso a JFET
- Stadi differenziali
- Guadagno tarato
- Uscita bilanciata

Blocco adattatore di livelli: serve a fissare il coefficiente per la deflessione verticale, ovvero stabilisce quanti volt corrispondono ad una divisione dello schermo.

Caratterizzazione metrologica del blocco di condizionamento per la deflessione:

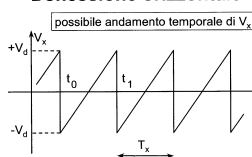
- Banda passante
- Amplificazione
- Tempo di risposta
- Impedenza d'ingresso

SCHEMA A BLOCCHI DI UN OSCILLOSCOPIO

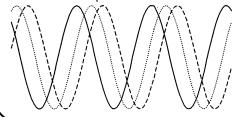


OSCILLOSCOPI ANALOGICI

Deflessione orizzontale



• se la relazione $T_x = mT_y$ non è soddisfatta ad ogni spazzolata si ha una traccia diversa dalla precedente



perché l'oscilloscopio non parte a ridisegnare ogni volta la traccia dallo stesso punto, parte ogni volta da un punto diverso, a ogni spazzolata viene ridisegnata una traccia diversa dalla precedente. Poi la lentezza del nostro occhio percepisce la traccia in movimento.

Per avere un'unica traccia basta che il pennello elettronico parta dal margine sinistro dello schermo quando il segnale da visualizzare assume un valore prefissato o ha la derivata di un certo segno.

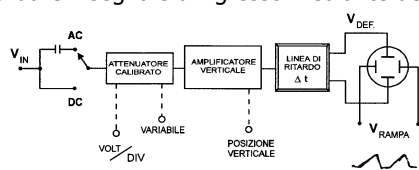
Sincronizzazione: per ottenere la coincidenza tra istante in cui far partire la rampa e punto iniziale da visualizzare si usa l'impulso di trigger, che viene generato in base a V_y quando assume valori prefissati di livello e di pendenza.

Base dei tempi: genera la rampa di pendenza variabile occupandosi di portare il pennello dal margine sinistro a quello destro. Dopo aver spostato il pennello per disegnare il segnale lo interdice riportandolo a sinistra per un nuovo trigger.

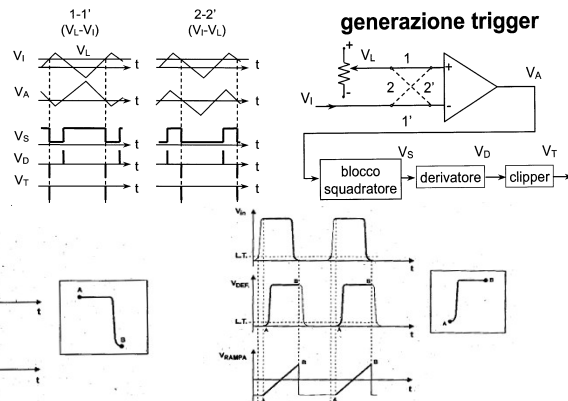
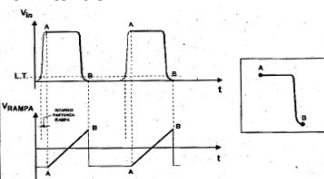
Tipi di trigger:

- INT: ricavato dal segnale inviato all'asse y
- EXT: ricavato da un segnale fornito dall'esterno
- LINE: ricavato dall'alimentazione di rete

Osservazione dei fronti ripidi: la rampa impiega più tempo per arrivare alle placche di deflessione, rispetto al segnale sotto analisi, perché deve attraversare più circuiti. Quindi è necessario ritardare il segnale d'ingresso mediante delle linee di ritardo.



C



ANALOGICO/DIGITALI

Generalità: consentono di valutare numericamente l'ampiezza di una tensione applicata al loro ingresso restituendo un numero corrispondente.

Gli ADC si dividono in due grandi famiglie:

- Spot: flash, ad approssimazioni successive
- Ad integrazione: a rampa semplice, doppia rampa

CONVERTITORI SPOT: l'uscita è legata al valore dell'ingresso in uno specifico istante di campionamento.

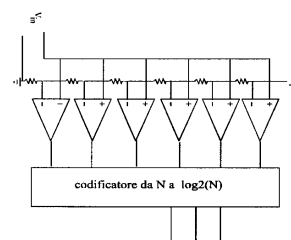
Convertitore flash: si confronta la tensione da misurare con una serie di comparatori, ogni comparatore per un livello.

Vantaggi:

- Veloce: il tempo di conversione è pari al tempo di azione del comparatore

Svantaggi:

- Costo elevato: per avere 8 bit occorrono 256 comparatori
- Bassa impedenza d'ingresso: 8 bit => 256 comparatori con gli ingressi in parallelo



Convertitore ad approssimazioni successive: la tensione d'ingresso viene confrontata con la tensione generata da un DAC. Si comincia a metà del valore di fondo scala, e ogni volta si confronta con la tensione d'ingresso incrementando o decrementando il codice del DAC ogni volta di un valore pari a metà del passo prima.

Vantaggi:

- Costo basso
- Converte n bit in n colpi di clock

Svantaggi:

- Poco veloce rispetto al flash
- Richiede una tensione d'ingresso molto stabile per tutta la durata della conversione.

CONVERTITORI AD INTEGRAZIONE: l'uscita è legata al valore medio dell'ingresso in un intervallo di tempo. Le loro caratteristiche principali sono:

- Tempo d'integrazione
- Tempo di conversione
- Risoluzione

A rampa semplice: effettua l'integrale del segnale in ingresso tramite l'integratore di Miller. Parte la rampa e conseguentemente il comparatore fa partire il conteggio che si blocca quando la rampa raggiunge la tensione di soglia (V_r). Il numero dei fronti di salita contati corrisponde al valore della grandezza T_T da cui si può ricavare V_X .

Il convertitore è accurato, semplice e di basso costo.

A doppia rampa: si chiude l'interruttore I_U e la capacità si carica con la tensione da convertire, l'uscita dall'integratore è una rampa. Dopo il tempo fisso T_U la tensione della rampa raggiunge il valore $V_U(T_U)$. All'istante T_U si apre l'interruttore I_U e si chiude I_D . Avviene la scarica della capacità con una tensione di riferimento (V_R) di polarità opposta a V_X , dopo un tempo T_D il condensatore è scarico e, analogamente a quello a singola rampa, si conta il numero d'impulsi da cui si può ricavare la tensione incognita.

Se confrontiamo questo convertitore con quello precedente notiamo che:

- Rampa semplice: devono essere misurati V_r , T_T , R , $C \Rightarrow V_X = -\frac{V_r}{T_T} \cdot R \cdot C$
- Doppia rampa: devono essere misurati V_R ed il rapporto $\frac{T_D}{T_U} \Rightarrow V_X = V_R \cdot \frac{T_D}{T_U}$. Ci siamo liberati della dipendenza di resistenza e capacità nella conversione della tensione incognita.

Numero di bit e risoluzione:

- Se il convertitore è unipolare il valore dell'LSB (least significant bit) è definito come: $LSB_U = \frac{F.S.}{2^n}$
- Se il convertitore è bipolare il valore dell'LSB è definito come: $LSB_B = \frac{F.S.}{2^{n-1}}$
- Una relazione generale si ottiene considerando il full range, definito come la differenza tra la massima tensione misurabile e la minima tensione misurabile. Quindi LSB è definito come: $LSB = \frac{F.R.}{2^n}$

Caratteristiche degli ADC:

- Errore di quantizzazione: corrisponde a metà dell'intervallo di quantizzazione.
- Non linearità differenziale: scostamento della risposta di un convertitore ideale di un singolo gradino.
- Non linearità integrale: scostamento massimo della caratteristica di un ADC dal valore di un ADC ideale.
- Accuratezza statica assoluta: massimo scarto tra valore presente all'ingresso del convertitore e valore ideale ottenuto dalla funzione di traduzione inversa.
- Accuratezza statica ridotta: grandezza adimensionale calcolata come rapporto tra il massimo scarto tra valore presente all'ingresso del convertitore e valore ideale ottenuto dalla funzione di traduzione inversa ed il full range.

OSCILLOSCOPI DIGITALI

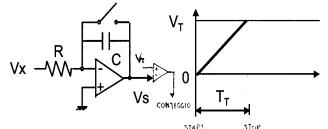
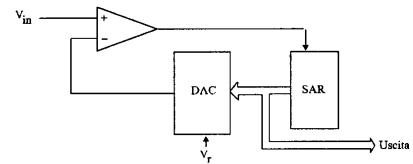
Strumenti digitali: per questa categoria di strumenti è previsto il collegamento con un host computer per inviare e ricevere comandi, organizzando un SAM.

Ai fini dell'analisi temporale dei segnali le caratteristiche portanti dello strumento sono:

- conversione A/D del segnale
- ricostruzione della forma d'onda dai campioni ottenuti.

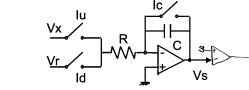
Schema a blocchi di un oscilloscopio digitale (DSO): la loro velocità dei blocchi in serie pari a quella del blocco più lento, invece per i blocchi in parallelo possono lavorare a diverse velocità tra loro indipendenti.

Oscilloscopi analogici o digitali: i DSO si stanno diffondendo molto rapidamente rispetto a quelli analogici grazie all'aumento della frequenza di campionamento e della capacità delle memorie. Il limite principale è dovuto alla qualità della traccia e dalle interpolazioni dei risultati.

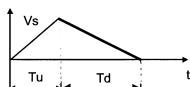


Se la tensione in ingresso è costante:

$$V_u(t) = -\frac{1}{RC} V_x t \Rightarrow V_x = -\frac{V_r}{T_T} RC$$

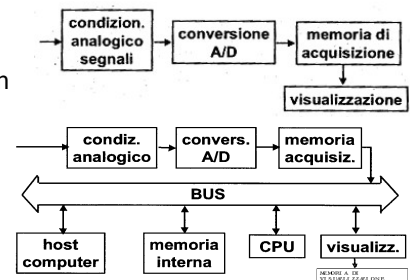


$$V_u(T_u) = -\frac{1}{RC} V_x T_u \quad V_u(t) = V_s - \frac{1}{RC} V_r t$$



• dopo un tempo T_d C è scarico

$$V_u(T_u) - \frac{1}{RC} V_r T_d = 0 \Rightarrow V_x = V_r \frac{T_d}{T_u}$$



Schermo del DSO: usano tubi raster come i calcolatori. Lo schermo è una matrice di N righe per M colonne, composta a sua volta da pixel. Ogni pixel è un'area molto minuta di sostanze che dopo essere state eccitate dal pennello elettronico emettono radiazioni luminose.

Visualizzazione della traccia: avviene mediante l'acquisizione dei campioni del segnale che viene visualizzata mediante punti o linee che collegano i punti.

Acquisizione: si usa la quantizzazione del segnale analogico che consiste nel rappresentare un valore con un numero finito di bit. Conseguentemente s'introduce l'errore di quantizzazione, che è in funzione del numero di bit.

Conversione A/D: molto spesso si usano 8 bit, ma in strumenti di qualità è possibile arrivare fino a 10 bit, ma già una risoluzione di 8 bit è paragonabile a quella fornita da un oscilloscopio analogico. Infatti il segnale in ingresso viene suddiviso in 2^n bit, nel caso di 8 bit in 2^8 livelli.

Campionamento: consiste nel trasformare un segnale analogico in una sequenza di campioni sfruttando il teorema di Shannon che prevede: per evitare la perdita d'informazioni la frequenza di campionamento deve essere maggiore a due volte la banda $f_c \gg 2 \cdot B$.

Per risalire al segnale tempo continuo si usa la formula di pesatura del sinc
$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x[nT] \frac{\text{sen} \pi F_c (t - nT_c)}{\pi F_c (t - nT_c)}$$

Ricostruzione nel tempo: i nuclei sinc sono tutti centrati nell'istante di campionamento, ognuno con ampiezza in funzione del valore del campione. Per questa ricostruzione è necessario conoscere infiniti campioni sia futuri che passati rispetto all'istante t, per questo è necessario introdurre delle approssimazioni.

Aliasing: quando la condizione di Shannon non viene soddisfatta durante il campionamento una parte delle informazioni vanno perse, ciò comporta che la forma d'onda che si osserva viene mal convertita e scambiata per un altro segnale.

Per evitare d'incorrere nell'aliasing intuitivamente è necessario aumentare la frequenza di campionamento per evitare di attribuire i campioni del segnale ad un altro segnale.

Aliasing nel dominio della frequenza: ogni periodo dello spettro a meno di una traslazione è uguale allo spettro di partenza. Ciò non comporta l'aliasing perché è rispettata la condizione di Shannon e gli spettri non si sovrappongono tra loro.

Viceversa se non rispettiamo la condizione impostaci dalla relazione di Shannon lo spettro differisce da quello di partenza, e la ricostruzione genera un segnale diverso da quello campionato.

Possiamo trarre le seguenti conclusioni:

- Non possiamo osservare segnali con contenuto in frequenza superiore a $\frac{f_c}{2}$
- La massima frequenza di campionamento dei DSO è un parametro fondamentale che incide nel costo dello strumento
- Se i segnali non sono ripetitivi possiamo ricorrere al campionamento in tempo equivalente, il segnale viene ricostruito prelevando dei campioni ad ogni spazzolata.

Sequential sampling: il convertitore viene comandato a campionare il segnale d'ingresso con dei ritardi sempre crescenti rispetto all'istante di trigger. Con questo sistema barattiamo la velocità di campionamento con il tempo di attesa, che è sempre più lungo, prima di vedere il risultato. Il campionamento può essere a random, e ci si accorge che stiamo usando questa modalità dal pannello dello strumento che scrive:

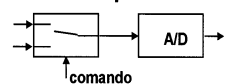
- Normal: non usa la relazione di Shannon offrendo una banda passante maggiore ma impiegabile solo per segnali ripetitivi
- One shot: da usare per segnali transitori – usa la relazione di Shannon

Doppia base dei tempi e doppia traccia: Non esiste una doppia base dei tempi, i problemi si risolvono con il post-trigger e il pre-trigger impostando rispettivamente ritardi ed anticipi. Le varie tracce si ottengono campionando i canali con più ADC o con un multiplexer.

Altri comandi del DSO: è possibile visualizzare: valor medio, massimi e minimi per una serie di tracce, mostrare tutte le tracce senza cancellare lo schermo, eseguire la FFT e impostare misure automatiche.

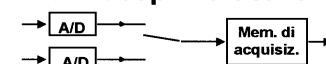
Oscilloscopi multicanale: per realizzarli abbiamo a nostra disposizione i seguenti tre modi

Oscilloscopi multicanali



- struttura con un funzionamento che ricorda la modalità **chopped** di un oscilloscopio analogico
- Frequenza di campionamento $F_c/2$
- campioni dei due canali **fra loro traslati temporalmente**
- cautela nel confronto temporale fra segnali

Oscilloscopi multicanali



- Un convertitore per canale
- Frequenza di campionamento F_c
- campioni ottenuti contemporaneamente
- necessaria memoria (di acquisizione) con tempo di accesso dimezzato

Oscilloscopi multicanali



- U_i
- Fr
- campioni ottenuti contemporaneamente
- due memorie (di acquisizione) con tempo di accesso 'normale'

Circuiti di trigger: se gli oscilloscopi analogici avevano solo un trigger basato su livello e pendenza e post-trigger, i DSO hanno compiuto un'evoluzione, il trigger è basato su: livello, pendenza, pre-trigger, post-trigger e altre varie opzioni.

Trigger con isteresi: ci sono due soglie, una alta (S_H) e una bassa (S_L). Se il segnale supera solo la soglia bassa lo strumento memorizza e poi elimina i campioni, mentre se si supera anche la soglia alta memorizza e mantiene.

Trigger su più canali: è possibile configurare il trigger su più canali impostando diverse modalità sugli stessi. Ad esempio: sul primo canale imposto livello e pendenza negativa, mentre sul secondo canale imposto lo stato logico basso.

Visualizzazione: sullo schermo sono disponibili N_v pixel, mentre in memoria d'acquisizione sono disponibili N_i campioni; lo strumento si comporterà nei seguenti modi in base a determinate condizioni:

- Se $N_i > N_v$ esegue una selezione dei campioni
- Se $N_i < N_v$ esegue un'interpolazione

Visualizzazione $N_i > N_v$: con questa condizione è possibile traslare la parte di segnale visualizzata e si può ingrandire parte del segnale.

Visualizzazione $N_i < N_v$: abbiamo N_D punti equispaziati nel tempo con frequenza equivalente pari a $f_{EV} = \frac{N_D}{T_x}$.

A questo punto abbiamo due possibilità:

- Visualizzare dei soli campioni in cui ogni pixel rappresenta un campione
- Si adopera un algoritmo d'interpolazione per avere un numero di punti sufficienti tali da rappresentare la traccia

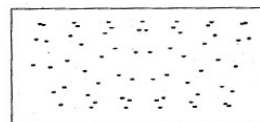
Naturalmente tutto ciò permette che Shannon sia rispettato e che l'operatore garantisca che $f_{EV} > 2 \cdot f_s$.

Esempio 1:

- Asse orizzontale con 10 divisioni
- Coefficiente di deflessione $1V/div$
- Traccia di 500 punti

Trovo la frequenza equivalente: $f_{EV} = \frac{500S}{10s} = 50S/s \Rightarrow T_{EV} = \frac{1}{50} = 20ms$

- ADC a $20MS/s \Rightarrow 20MHz$
- Segnale d'ingresso a $10kHz \Rightarrow T_s = 0,1ms$



RAPPORTO
IRRAZIONALE



RAPPORTO
RAZIONALE

In acquisizione non abbiamo aliasing perché il convertitore rispetta la relazione di Shannon, ma con $T_{EV} = 20ms$ e

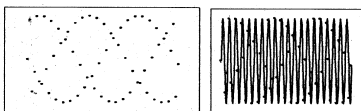
$T_s = 0,1ms$ si visualizza un campione ogni $\frac{20}{0,1} = 200$ periodi del segnale d'ingresso e quindi l'operatore provoca

l'aliasing. Ciò che si vedrebbe sullo schermo di un oscilloscopio analogico è una fascia di ampiezza V_{pp} e si riuscirebbe a capire il problema, mentre su un DSO ciò che si vede dipende dalla relazione tra la frequenza equivalente e la frequenza del segnale secondo questi due casi:

1. $\frac{F_s}{F_{EV}}$ IRRAZIONALE: sul display avremo dei campioni distribuiti in modo del tutto casuale capendo così il problema.
2. $\frac{F_s}{F_{EV}}$ RAZIONALE: non avvertiamo nessun errore perché la forma d'onda è quella attesa, l'ampiezza accettabile anche se la frequenza è del tutto errata.

Un altro errore tipico è rispettare il limite di Shannon per poco. Infatti se teoricamente la frequenza di campionamento deve essere superiore di due volte la banda, in pratica deve essere molto più grande della banda, visualizzando una forma d'onda errata ma con frequenza esatta e ampiezza accettabile.

Aliasing di visualizzazione percettivo: le due immagini mostrano due tipiche visualizzazioni dell'aliasing percettivo: la prima di queste mostra che a prima valutazione l'errore sia dovuto alla mancanza del sincronismo. Mentre nella seconda immagine l'errore è commesso dal nostro sistema visivo che interpola i campioni presentati associando ad ogni punto quello spazialmente più vicino, mentre invece la traccia va ricostruita associando ad ogni punto quello temporalmente più vicino.



Verifica della corretta predisposizione: se una variazione della costante di taratura della base dei tempi comporta una variazione non coerente della forma d'onda è necessario l'intervento dell'operatore onde evitare di sbagliare la misura/e.

Visualizzazione per punti: per una corretta percezione visiva bisogna assicurarsi che la distanza tra due campioni temporalmente successivi sia minore della distanza tra i due campioni e i rimanenti.

Interpolazione: si usa per migliorare la qualità della traccia unendo i pixel rappresentativi dei campioni. Il più semplice metodo d'interpolazione è a segmenti.

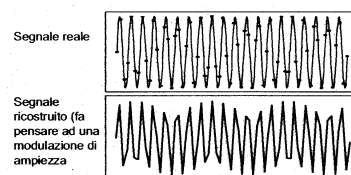
Interpolazione lineare: l'accuratezza di questa è tanto più elevata quanto più vicini sono i campioni. Per una rappresentazione abbastanza fedele sono necessari una decina di punti per ogni periodo. L'oscilloscopio è meglio sfruttato rispetto al caso a punti ma non del tutto. L'inconveniente è rappresentato dalla scarsità di punti, nel caso ce ne siano pochi il segnale potrebbe essere confuso in una modulazione d'ampiezza.

Interpolazione sinc: con il sinc troncato nascono vari problemi: come la ricostruzione dei fronti di salita e di discesa e le

$$\text{orecchie di Gibbs. } x(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x[nT] \frac{\sin \pi F_c (t - nt)}{\pi F_c (t - nt)}$$

Specifiche DSO:

- Bit equivalenti: spesso la causa d'errore è dovuto all'ADC ideale che ha un numero di bit superiore a quello reale
- Banda passante: sono riportate due bande passanti riferite al campionamento one-shot e a quello casuale, riferite alla frequenza di taglio superiore (frequenza alla quale il segnale subisce un'attenuazione di 3dB)
- Frequenza di campionamento: riferita al campionamento one-shot (effettivo) e al campionamento in tempo equivalente.
- Accuratezza statica verticale



si usano per misure di periodo, frequenza e altri misurandi riconducibili a misure temporali. Lo strumento è: semplice, economico, versatile, accurato ed interfacciabile ad un host computer.

Blocchi fondamentali del contatore:

1. Blocco d'ingresso: serve ad adattare il segnale ai successivi stadi della struttura, è costituito da:
 - a. Circuiti normalizzatori che amplificano o attenuano il segnale d'ingresso
 - b. Circuiti formatori del segnale che in uscita forniscono un segnale di tipo digitale in base al tipo di misure da effettuare
2. Blocco di porta o gate: discrimina gli impulsi da contare al blocco d'ingresso. L'inizio e la fine del conteggio sono forniti dai comandi di start e stop forniti dalla base dei tempi o dai circuiti di controllo. Questo blocco può essere una porta AND.
3. Base dei tempi e riferimento in frequenza: elemento fondamentale del sistema in quanto rappresenta il riferimento temporale dello strumento e molto sensibile a temperatura e invecchiamento.
 - a. Ha il compito di eseguire le quattro operazioni con le frequenze in base alla frequenza di riferimento
 - b. La sua accuratezza dipende dalla stabilità dell'oscillatore interno
 - c. Gli oscillatori adottati hanno frequenze sull'ordine della decina di MHz.
4. Blocco di conteggio: conta gli impulsi compresi tra lo start e lo stop, è formato da più contatori elementari in cascata.
5. Blocco di visualizzazione: composto da circuiti di decodifica dei dati (forniti dal blocco di conteggio) e loro visualizzazione. Forniscono in uscita da 3 a 10 cifre decimali, dove ciascuna necessita di un suo contatore.

Contatore d'eventi: nel contatore di fianco si nota che tra start e stop possiamo perdere degli impulsi che costituiscono un'incertezza relativa che è minore tanto quanto è maggiore il numero di impulsi.

Misure di frequenza: la frequenza è ottenuta come il rapporto tra l'unità di tempo e il numero d'impulsi contati al suo interno. Se l'unità di tempo è in secondi avremo la lettura in Hz , se invece usiamo i ms avremo la lettura in kHz . Ad ogni periodo del segnale otterremo degli impulsi da contare che vengono ricavati regolando il livello e la pendenza del trigger. Inoltre la porta deve restare aperta per un determinato e noto periodo di tempo ottenuto dalla base dei tempi.

Relazioni principali: definiamo i seguenti parametri:

- T_{ON} : intervallo di tempo tra start e stop
- T_X : distanza temporale tra i due impulsi
- N_X : numero impulsi contati

$$T_{ON} = N_X \cdot T_X \quad F_X = \frac{1}{T_X} = \frac{N_X}{T_{ON}} \quad (\text{frequenza segnale})$$

La risoluzione assoluta e relativa è: $\Delta_F = \frac{1}{T_{ON}} = \Delta_F' = \frac{\Delta_F}{F_X} = \frac{1}{T_{ON} \cdot F_X} = \frac{1}{N_X}$.

L'incertezza relativa diminuisce al crescere di N_X .

Quindi come già detto: le misure di frequenza sono più precise per segnali ad alta frequenza.

Misure di periodo: la misura può essere ridotta a quella dell'intervallo di tempo corrispondente al passaggio del segnale per lo stesso valore e con la stessa pendenza. Gli impulsi di conteggio sono forniti dalla base dei tempi, mentre l'apertura della porta è ottenuta dal periodo del segnale.

Relazioni principali: definiamo i seguenti parametri:

- T_X : periodo incognito
- T_C : periodo del segnale dato dalla base dei tempi
- N_C : numero impulsi contati

Per la determinazione di T_X basta contare gli impulsi che transitano dalla porta durante il tempo d'apertura.

La risoluzione assoluta e relativa sono: $\Delta_T = T_C \quad \Delta_T' = \frac{\Delta_T}{T_X} = \frac{T_C}{T_X \cdot N_C} = \frac{1}{N_C}$

Riassumendo: le misure di periodo si adoperano per basse frequenze.

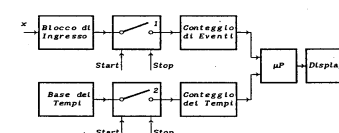
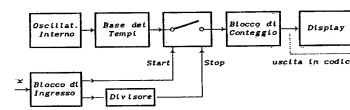
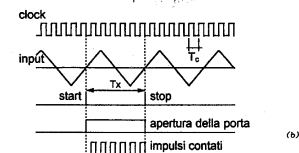
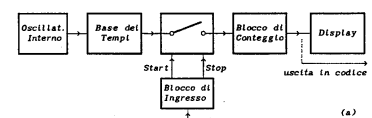
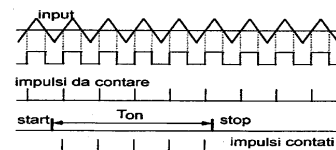
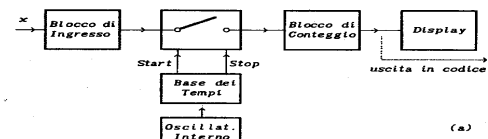
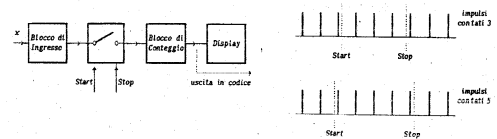
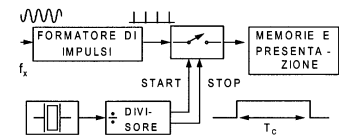
Misure di più periodi - contatore reciproco:

- nella misura del periodo medio il numero dei conteggi è maggiore rispetto a quello ottenuto in un solo periodo, si riduce la risoluzione relativa.
- L'utilizzatore deve regolare il tempo di misurazione, ma la presenza di una CPU permette di eseguire una scelta più conveniente del tipo di misurazione.
- Il display fornisce la grandezza richiesta dopo che lo strumento ha calcolato il reciproco della grandezza misurata.

Incertezze del contatore reciproco: nelle misure di periodo l'incertezza non dipende dalla frequenza del segnale, mentre nelle misure di frequenza più è alta la frequenza incognita e più è piccola l'incertezza relativa.

Se $F_X < F_C$ si ricorre alla misura di periodo.

MISURAZIONI DI FREQUENZA



VOLTMETRI NUMERICI

la tensione d'ingresso viene convertita in un intervallo temporale mediante un integratore e un contatore di periodo. Nell'integrazione abbiamo due fasi:

1. carica del condensatore C tramite V_X
2. scarica del condensatore con una tensione di riferimento V_R

Successivamente si valuta il tempo di scarica e si risale alla tensione. In dettaglio:

- si resetta il sistema chiudendo l'interruttore I_C
- si apre I_C e si chiude I_U
- la tensione d'ingresso viene integrata
- quando la capacità s'è caricata apro I_U e chiudo I_D
- parte il conteggio e la capacità si scarica
- quando ho raggiunto il valore di 0V il comparatore blocca il conteggio
- il numero d'impulsi contati corrisponde al valore di tensione iniziale

Relazioni fondamentali: dopo un tempo T_U fissato è possibile risalire al valore della

$$\text{rampa: } V_S(T_U) = -\frac{1}{RC} \cdot V_X \cdot T_U$$

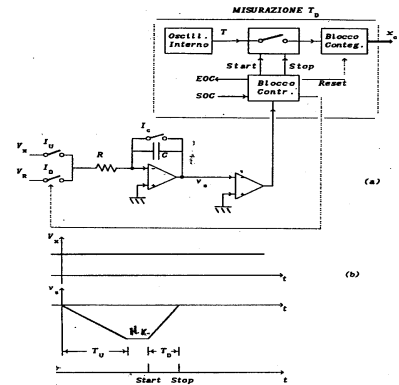
$$V_S(T_U + T_D) = V_S(T_U) - \frac{1}{RC} \cdot V_R \cdot T_D = 0 \quad V_X = -V_R \cdot \frac{T_d}{T_u} = -V_R \cdot \frac{N_d}{N_u} \quad \begin{cases} N_u = n^\circ \text{ periodi in run-up} \\ N_d = n^\circ \text{ periodi in run-down} \end{cases}$$

La risoluzione assoluta è data da: $\frac{V_R}{N_U}$. Dalle formule è possibile notare che l'accuratezza del voltmetro è indipendente

dai valori di resistenza e capacità, dipende solo dalla linearità della tensione integrata e dalla stabilità di V_R .

Legame tra misurazione e tempo di misurazione: nella fase di run-up non abbiamo errore di quantizzazione perché la durata del tempo T_U viene presa pari a un multiplo di T_C , invece nella fase di run-down ho errore di quantizzazione che si

propaga in V_X che viene valutata con la seguente risoluzione: $\Delta_V = \frac{|V_R|}{N_u} = \frac{|V_X|}{N_d} \cong \frac{F.S.}{N_{d \max}}$



MULTIMETRI NUMERICI

Multimetri numerici per misure di tensione, resistenza e corrente: questi strumenti permettono la misurazione di correnti, tensioni e resistenze con un tempo ridotto e un'accuratezza elevata. Il loro funzionamento è basato su un ADC.

Risoluzione adimensionale: siccome i DMM hanno più portate, bisogna caratterizzare la sua risoluzione indipendentemente dalla portata usata. Definiamo risoluzione adimensionale $\delta = \log_B N_{\max} \Rightarrow \epsilon$ i B è la base di numerazione usata $\delta \equiv C \in \mathbb{S}$ solo se $N_{\max} \equiv B^C$.

Risoluzione dimensionale: espressa come la minima variazione del misurando che provoca un'apprezzabile variazione del risultato della misurazione, per un passo di quantizzazione costante è pari a $\Delta = \frac{F.S.}{N_{\max}}$

Struttura generale di un DMM: ci sono cinque morsetti, il morsetto 2 serve per il riferimento (GND). Il blocco d'ingresso serve a non far risentire al circuito dell'effetto di carico provocato dal DMM. Nel caso in cui si adotti la funzione di scala automatica il tempo di misura aumenta notevolmente.

Anche qui è presente il blocco AC/DC che permette l'esclusione della componente continua.

Misura di tensioni continue e alternate: si usano i morsetti 1 e 2. Si possono misurare tensioni di alcuni mV alle centinaia di volt. Le portate del multimetro sono sovrapposte tra loro (vedi figura).

Definiamo i seguenti termini:

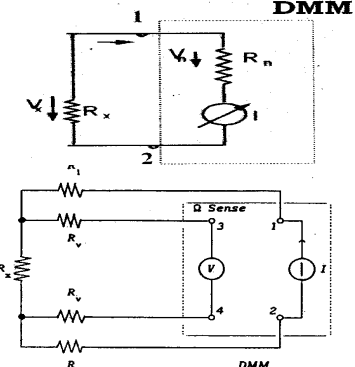
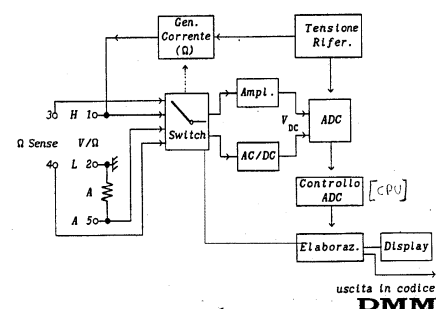
- Portata: valore convenzionale corrispondente (ad esempio 3V)
- Fondo scala: valore massimo relativo ad ogni sottoinsieme (ad esempio 3,039V)

Per ricavare il valore efficace possiamo seguire due tipi di elaborazioni:

1. Analogica: tramite circuiti integrati è possibile realizzare la forma analitica dell'espressione
2. Digitale: si converte il campione del segnale in forma numerica e lo si elabora tramite CPU.

Misura di correnti continue e alternate: si usano i morsetti 5 e 2. Si realizzano portate dai nA a qualche decina di A. La corrente da misurare viene fatta passare attraverso una resistenza nota del DMM, dell'ordine dei 0,1 Ω , ai suoi capi si stabilisce una d.d.p. che viene misurata dall'ADC. Come prima i valori efficaci vengono valutati con metodi analogici o digitali misurando le cadute sulla resistenza nota.

Misura di resistenze qualsiasi: si usano i morsetti 1 e 2. Si possono misurare resistori dai $\mu\Omega$ ai $G\Omega$. Nella resistenza incognita viene fatta circolare una corrente nota e



se ne misura la caduta di tensione ai suoi capi. La conoscenza della corrente è ottenuta dalla valutazione della caduta sulla R_n . Si misurano due tensioni e si elaborano i risultati. $R_x = \frac{V_x}{I} = R_n \frac{V_x}{V_n}$

Resistenze di contatto: per tentare di ridurre l'influenza si usano quattro morsetti: 1 e 2 forniscono la corrente di misurazione, mentre 3 e 4 prelevano la tensione ai capi della resistenza incognita. Facendo così le resistenze di contatto e collegamento (R_1) non influenzano la misura della caduta di tensione perché la resistenza interna ai capi di 3 e 4 (elevata) le rende trascurabili.

Negli strumenti dotati di auto-range la misura viene effettuata in due tempi: prima si valuta il valore più appropriato di corrente da erogare, poi si valuta la resistenza incognita. Tutto ciò si paga nell'allungamento del tempo di misurazione.

Misura di piccole resistenze: si effettuano due misurazioni:

1. valutazione della caduta di tensione dovuta alla corrente erogata dal DMM, tenendo conto di eventuali disturbi (ad esempio l'effetto Seebeck dovuto ad un collegamento tra due metalli)
2. valutazione della caduta di tensione in assenza di corrente per tenere conto di eventuali disturbi, si sottrae questo valore da quello ottenuto nella fase 1.

Misura di grandi resistenze: per aumentare il campo di misura lo strumento pone in parallelo a R_x una resistenza nota R_N ,

otterremo la seguente relazione: $R_x = \frac{R_N \cdot R_M}{R_N - R_M}$ con R_M è il risultato della misura.

Inoltre possiamo effettuare elaborazioni sui risultati della misurazione per aumentare l'accuratezza della misura

Valutazione dell'accuratezza: di solito viene fornita con la seguente equazione: $\Delta_x = k_1 |X| + k_2 \Delta$.

k_1 = componente dell'incertezza dipendente dal valore misurato X

Con: k_2 = componente dell'incertezza dipendente solo dalla portata scelta

L'incertezza relativa è: $\Delta_x = \frac{\Delta_x}{|X|} = k_1 + k_2 \frac{\Delta}{|X|}$

Componenti dell'incertezza relativa: anche per il DMM è conveniente usare lo strumento in fondo scala. Come manutenzione richiede che venga tarato periodicamente secondo norme specificate dal costruttore e svolta in certi campi di valori di temperatura, perché lo strumento risponde con diverse incertezze in base alla temperatura dell'ambiente in cui viene effettuata la lettura: per ciò si usano coefficienti correttivi.

La caratteristica del DMM è che può presentare una lettura di tensioni a circuito aperto dovuta alle correnti di deriva, per superare quest'inconveniente esiste un comando di autozero che permette di valutare l'offset.

ANALIZZATORI DI STATI LOGICI

Generalità: lo strumento fornisce la successione degli stati logici assunti da alcuni nodi di circuiti. In un circuito digitale può interessare solo la conoscenza delle tensioni corrispondenti al livello logico alto o basso.

L'oscilloscopio non è lo strumento indicato perché:

- deve ricavarsi lo stato logico della traccia
- le forme d'onda non sono periodiche
- ha troppi pochi canali
- non fornisce informazioni codificate

Questo strumento è nato dalla rapida evoluzione dell'MPU che ha obbligato i progettisti a costruirlo in modo da avere la caratteristica di possedere decine d'ingressi con frequenze interne di clock di alcune centinaia di MHz.

Schema a blocchi: l'operatore deve conoscere molto bene, sia dal punto di vista hardware che software, il D.U.T. Lo strumento converte tensioni in livelli logici, li memorizza e poi li visualizza nella forma più conveniente per l'analisi.

Blocco di acquisizione: le linee d'ingresso sono raggruppate fisicamente in pod che contengono 8-16 linee. Il segnale di tensione viene convertito in livelli logici a cui corrisponde un bit ciascuno, con la possibilità di specificare le tensioni di soglia corrispondenti a determinate famiglie (TTL, ECL...) e impostarle manualmente anche per ogni pod.

Generatore di clock:

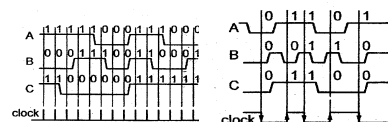
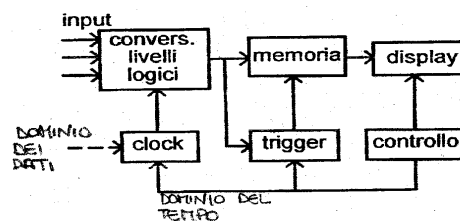
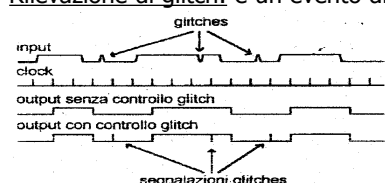
- **NEL DOMINIO DEL TEMPO:** è un segnale periodico generato dallo strumento. L'acquisizione di ogni stato logico avviene per ogni periodo di clock. I dati vengono mostrati in funzione del tempo (modalità asincrona - l'acquisizione avviene secondo una frequenza fissa indipendente da quella del D.U.T.)
- **NEL DOMINIO DEI DATI:** i segnali che determinano l'acquisizione sono esterni e forniti dal D.U.T. Il funzionamento è detto sincrono perché si ha sincronia tra frequenza d'acquisizione e quella del D.U.T.

Memoria d'acquisizione: i campioni acquisiti vengono memorizzati in un buffer a struttura FIFO. Però la sua capacità è limitata perché la velocità con cui la memoria lavora è alta introducendo alti costi. Per superare questo limite s'introduce la modalità transitional, che consiste nel memorizzare il nuovo stato solo se differisce da quello vecchio.

Visualizzazione: esistono due modalità:

1. I dati acquisiti vengono presentati in forma codificata e raccolti tra loro secondo dei criteri. Sullo schermo compare una successione di valori logici codificati nella forma preferita.
2. Sullo schermo si rappresentano le forme d'onda corrispondenti agli stati logici dei segnali in ingresso ai pod.

Rilevazione di glitch: è un evento di carattere impulsivo che può manifestarsi tra due istanti di campionamento adiacenti, non può essere acquisito e può sconvolgere lo stato del circuito. Però è possibile rilevarli se lo strumento opera nel dominio del tempo, vedendoli come un impulso di tensione di salita o di discesa all'interno di un ciclo di clock.



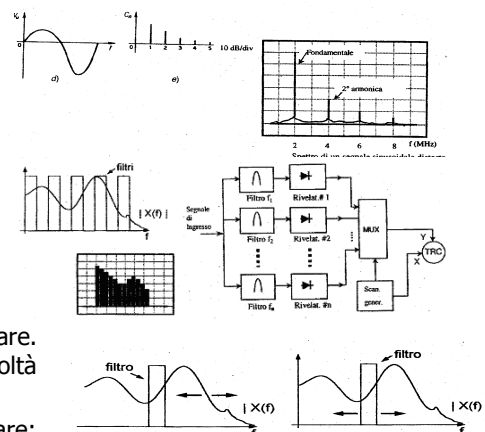
Procedure di test in un sistema a M.P.U.: con questo strumento è possibile vedere se i dati sono stati correttamente trasferiti da C.P.U. a RAM. Ovviamente tutto ciò prevede una conoscenza approfondita dei segnali e dello strumento.

ANALISI DEL SEGNALE NEL DOMINIO DELLA FREQUENZA

Analisi armonica delle forme d'onda: le forme d'onda viste nel dominio del tempo hanno la classica rappresentazione di una sinusoidale, una rampa... Ma viste nel dominio della frequenza sono delle righe posizionate nello spettro delle frequenze con un'ampiezza corrispondente al loro valore effigie e sono chiamate armoniche.

Possibili strutture per l'analisi dei segnali nel dominio della frequenza:

1. Banco di filtri selettivi a sintonia fissa (analizzatore di spettro in real time): consiste nel determinare l'ampiezza del segnale dall'uscita di ogni filtro, ma offre le seguenti caratteristiche: notevole velocità d'analisi, poca difficoltà realizzativi e costo molto elevato.
2. Filtro a sintonia variabile: costituito da un unico filtro selettivo con frequenza d'accordo variabile su tutta la porzione di spettro da studiare. Questa struttura presenta le seguenti caratteristiche: notevole difficoltà realizzativi, scarsa velocità e costo medio.
3. Filtro selettivo fisso e spostamento in frequenza del segnale da studiare: costituito da un unico filtro a frequenza d'accordo fissa, consiste nel traslare il segnale in su e giù dello spettro. Offre le seguenti caratteristiche: media difficoltà realizzativi, media velocità e costo basso.



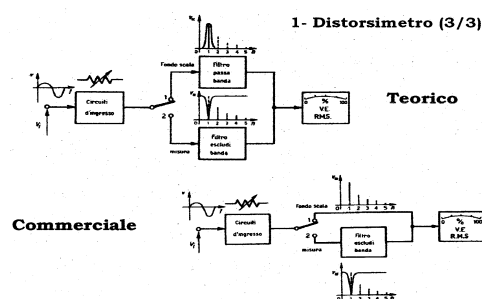
IL DISTORSIMETRO

Le relazioni del distorsimetro:

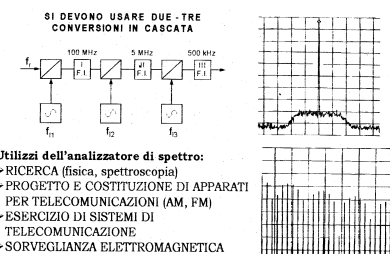
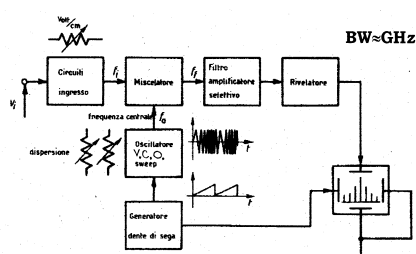
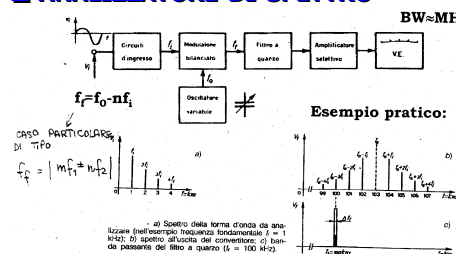
$$THD = \frac{\sqrt{C_2^2 + C_3^2 + \dots + C_n^2}}{C_1} \quad DA = \frac{\sqrt{C_2^2 + C_3^2 + \dots + C_n^2}}{\sqrt{C_1^2 + C_2^2 + \dots + C_n^2}} \quad DAT = \frac{DA}{\sqrt{1 - (DA)^2}}$$

se $DA \ll 1 \Rightarrow DA \equiv DAT$

Uso dello strumento: lo strumento è stato progettato per vedere se, ad esempio, all'interno di un mezzo trasmissivo sarebbero nate distorsioni d'intermodulazione, cioè: se altre frequenze sarebbero nate grazie alla combinazione di quelle contenute nel segnale.



L'ANALIZZATORE DI SPETTRO



Analizzatore di spettro numerici: questi strumenti numerici soffrono dei seguenti problemi:

1. Risoluzione: il segnale non può essere campionato da meno infinito a più infinito, ma solo per un periodo limitato di tempo. Definiamo come frame una finestra temporale di 1024, 2048, ... punti.
2. Aliasing: se nello spettro sono contenute frequenze più elevate il campionamento può produrre aliasing, quindi in ingresso va posto un filtro anti aliasing.
3. Leakage: il frame non coincide con il periodo della fondamentale.

Confronto tra le prestazioni dei due strumenti:

Analizzatore di spettro analogico:

1. Velocità di risposta ridotta a causa dello sweep time.
2. Selettività limitata alla banda passante del filtro usato.
3. Campo di frequenze analizzabile sul GHz.
4. Costo elevato.

Analizzatore di spettro digitale:

1. Velocità di risposta elevata
2. La larghezza di banda limitata dall'ADC alle centinaia di KHz
3. Misure sul segnale eseguite anche in differita
4. Visualizzazione spettro d'ampiezze con fase, parte reale e immaginaria
5. Costo più contenuto

