Unità 4

Strumentazione numerica

Indice unità 4

- Frequenzimetri numerici
- Voltmetri numerici

2

Strumentazione numerica

Frequenzimetri numerici

Frequenzimetri numerici

- Generalità e tecnica di conteggio
- Misura diretta di frequenza
- Misura diretta di periodo
- Incertezze di misura
- Misura di intervalli di tempo

4

Frequenzimetri numerici

Generalità e tecnica di conteggio

Generalità sulle misure di frequenza 1/2

- La frequenza è una delle grandezze fisiche che si riesce a misurare con maggiore accuratezza
- Con sistemi relativamente semplici si riesce ad ottenere incertezze relative dell'ordine di $10^{-5} \div 10^{-6}$

6

Generalità sulle misure di frequenza 2/2

- Con sistemi sofisticati si raggiungono accuratezze dell'ordine di $10^{-12} \div 10^{-13}$ e questo è reso possibile perché:
  - i campioni di frequenza sono i più accurati che si possano realizzare (accuratezze di $10^{-13} \div 10^{-14}$)
  - i metodi con cui si confronta la frequenza incognita e quella campione sono molto sensibili

7

Misuratore numerico di frequenza

8

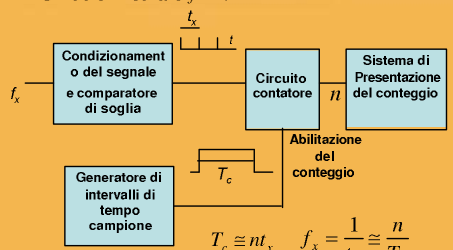
Tecnica di conteggio

- La frequenza di un segnale periodico, può essere misurata conteggiando il numero di cicli (periodi) che si ripetono in un intervallo di tempo campione
- Per ottenere ciò occorre disporre di vari dispositivi in grado di:
  - individuare gli istanti che identificano il periodo del segnale
  - conteggiare degli eventi
  - generare intervalli di tempo campione

9

Misura di frequenza per conteggio

- Misura diretta della frequenza
  - Si vuole misurare $fx=1/tx$

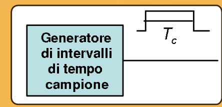


$$T_c \cong n t_x \qquad f_x = \frac{1}{t_x} \cong \frac{n}{T_c}$$

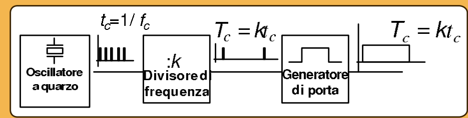
10

Generatore di intervallo campione

- Come viene generato T_c?



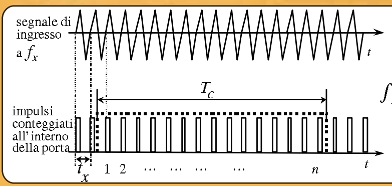
- Si parte da un oscillatore a quarzo
- Frequenza f_c accurata e stabile che è divisa per k



Frequenzimetri numerici

Misura diretta di frequenza

Misura diretta di frequenza



$$f_x = \frac{1}{t_x} \cong \frac{n}{T_c}$$

- La relazione di proporzionalità tra f_x e n è approssimata infatti:
  - n è intero (numero di impulsi contati)
  - T_c non è "multiplo esatto" di t_x
  - se T_c=1s, n esprime numericamente la frequenza in hertz

13

Misura di frequenza media

- NOTA:
  - la misurazione ha una durata pari a T_c
  - in realtà si misura un valore di frequenza f_x mediato nel tempo T_c
  - eventuali fluttuazioni di frequenza che avvengono all'interno di T_c non vengono rilevate

14

Esempio 1/2

- Supponiamo di misurare f_x= 1kHz (cioè t_x= 1ms)
- Si imposta T_c= 1s
- Si contano n= 1000 impulsi
  - il sistema di presentazione numerico indicherà 1000 Hz oppure 1.000 kHz (con risoluzione 1 Hz)

15

Esempio 2/2

- Se si imposta T_c=10s si contano n_1= 10000 impulsi
- Il sistema di presentazione numerico indicherà 1000.0 Hz oppure 1.0000 kHz (con risoluzione 0.1 Hz)

16

Risoluzione di lettura

- La risoluzione di lettura è la minima variazione apprezzabile sull'indicatore di uscita
- Nel caso di indicatore numerico la minima variazione apprezzabile della lettura è di una unità di ***n***
- Essendo $f_x = \dfrac{n}{T_c}$
- La risoluzione assoluta di frequenza è: $\Delta f_x = \dfrac{1}{T_c}$
- La risoluzione relativa è $\dfrac{\Delta f_x}{f_x} = \dfrac{1}{n}$

17

Aumentare la risoluzione

- Per aumentare la risoluzione occorre aumentare ***n***
- E quindi aumentare T_c (durata della misurazione)
- Un aumento di T_c ha due conseguenze:
  - aumento della durata della misura (questione di praticità)
  - mascheramento delle variazioni della frequenza per tempi brevi (spesso è questo il parametro che interessa rilevare)

18

Soluzione per Bassa frequenza

- Misura di Frequenze Basse
  - se f_x è bassa occorrono tempi di misurazione T_c molto elevati per ottenere risoluzioni accettabili
    - esempio: con f_x= 100 Hz (t_x=10^{-2} s) occorre T_c= 100 s per avere n=10^4 e quindi una risoluzione di 10^{-4}
  - conviene cambiare la tecnica di misura
  - si fa una misura diretta di periodo

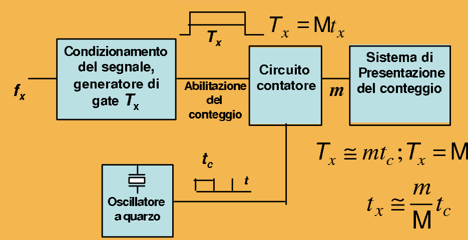
19

Frequenzimetri numerici

Misura diretta di periodo

Misura diretta di periodo 1/2

- Con la f_x si genera la durata del conteggio T_x
- Si contano gli impulsi campione di periodo t_c



$$T_x \cong m t_c ; T_x = M t_x$$

$$t_x \cong \frac{m}{M} t_c$$

21

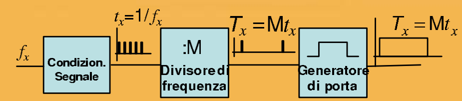
Misura diretta di periodo 2/2

- Il numero contato m è proporzionale al periodo incognito
- Il sistema di presentazione può indicare indifferentemente
  - il periodo misurato t_x (M e t_c sono costanti strumentali note al sistema)
  - la frequenza f_x (semplice operazione di inversione numerica)

22

Da f_x a T_x (durata della misurazione)

- Come viene generato T_x?



- Il segnale di frequenza f_x viene condizionato per generare impulsi di periodo t_x
- Si divide per M (regolabile da operatore)
- M si sceglie in base alla durata della misurazione e della risoluzione richiesta

23

Esempio 1/2

- Supponiamo di misurare f_x= 1kHz (cioè t_x= 1ms)
- Si imposta T_x= 1s (divisore H= 1000)
- Se si usa un quarzo con f_c=1 MHz (t_c= 1µs)
- Si contano n= 10^6 impulsi

24

Esempio 2/2

- Il sistema di presentazione numerico indicherà 1000.000 Hz oppure 1.000000 kHz (con risoluzione 1 mHz)
- Se si imposta T_x=10s si contano n_1=10^7 impulsi
- Il sistema di presentazione numerico indicherà 1000.0000 Hz oppure 1.0000000 kHz (con risoluzione 0.1 mHz)

25

Confronto fra i due metodi 1/2

- Nella misura di f_x=1kHz (cioè t_x=1ms)
- Impostata una durata della misurazione di 1s
- Se si usa un quarzo con f_c=1 MHz (t_c=1μs)
- Con la misura diretta di frequenza si ottiene f_x=1000 Hz (con risoluzione di frequenza 1 Hz)

26

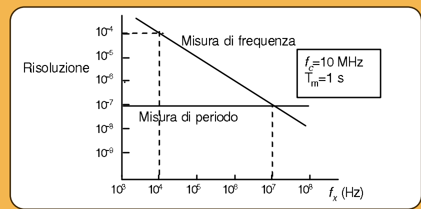
Confronto fra i due metodi 2/2

- Con la misura diretta di periodo si ottiene t_x=1000.000 μs oppure f_x=1.000000 kHz (la risoluzione temporale è 1 μs, periodo del campione, la risoluzione di frequenza è 1 mHz)
- Il vantaggio sulla risoluzione di lettura è evidente

27

Diagramma della risoluzione

- L'andamento della risoluzione relativa al variare della frequenza f_x in misura, nell'ipotesi di:
  - f_c=10 MHz (t_c=0.1μs), e
  - durata della misurazione T_m=1s.



28

Scelta per la migliore risoluzione 1/3

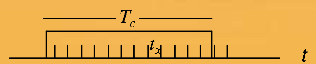
Esercizio

- Si vuole misurare una frequenza f_x=100kHz con un tempo di misura T_m≅1s, frequenza del quarzo f_c=10MHz
- Quale metodo conviene utilizzare per ottenere la migliore risoluzione possibile?

29

Scelta per la migliore risoluzione 2/3

Misura diretta di frequenza



- il numero di impulsi contati è:

$$n = T_c f_x = 1 \cdot 100 \cdot 10^3 = 10^5$$

- quindi, la risoluzione relativa è:

$$\frac{\Delta f_x}{f_x} = \frac{1}{n} = 10^{-5}$$

30

Scelta per la migliore risoluzione 3/3

Misura diretta di periodo

- avendo a disposizione T_m=1s per eseguire la misura, si sceglie un gate T_x=Mt_x = 1s , e quindi M=1/10^{-5}=10^5
- il numero di impulsi contati è: $$m = \frac{T_x}{t_c} = \frac{1}{\frac{1}{10 \cdot 10^6}} = 10^7$$
- quindi, la risoluzione relativa è: $$\frac{\Delta t_x}{t_x} = \frac{1}{n} = 10^{-7}$$

31

Frequenzimetro contatore 1/2

- Le moderne logiche veloci consentono di usare oscillatori campione interno con frequenza f_c≥10MHz
- I moderni frequenzimetri eseguono normalmente misure dirette di periodo
- L'operatore decide la durata della misurazione T_m

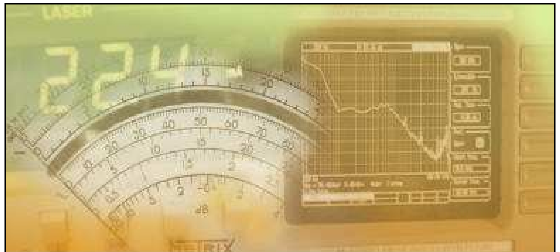
32

Frequenzimetro contatore 2/2

- La frequenza incognita f_x viene divisa per un fattore M in modo che la durata della misurazione sia
- $$T_m \cong T_x = \mathrm{M}t_x$$
- Lo strumento inserisce automaticamente vari valori di M in modo da soddisfare la condizione

$$T_x \cong T_m$$

33



Frequenzimetri numerici

Incertezze di misura

Incertezza di misura 1/2

- Nel precedente paragrafo si è sempre considerata la risoluzione di misura e si è cercata la tecnica migliore per massimizzarla
- Risoluzione di lettura elevata non è sinonimo di accuratezza di misura altrettanto elevata
- Quest'ultima infatti dipende da varie cause che influenzano il valore numerico presentato

35

Incertezza di misura 2/2

- Alcune sono comuni sia alla misurazione diretta di frequenza sia alla misurazione diretta di periodo
- Altre differiscono per gli aspetti diversi legati alla particolare tecnica di misura

36

Incertezza Misura di frequenza 1/2

- Dalle relazioni ricavate T_c= tempo di misura campione t_c= periodo dell'oscillatore campione

$$f_x = \frac{1}{t_x} \cong \frac{n}{T_c} \qquad T_c = kt_c$$

- La variazione relativa di frequenza

$$\frac{\delta f_x}{f_x} = -\frac{\delta T_c}{T_c} + \frac{\delta n}{n}$$

- Poiché k è quantità nota e priva di errore

$$\frac{\delta T_c}{T_c} = \frac{\delta t_c}{t_c}$$

- Risulta quindi:

$$\frac{\delta f_x}{f_x} = -\frac{\delta t_c}{t_c} + \frac{\delta n}{n}$$

37

Incertezza Misura di frequenza 2/2

- La **frequenza campione** è $f_c = \frac{1}{t_c}$
- La sua **variazione relativa** è $\frac{\delta f_c}{f_c} = -\frac{\delta t_c}{t_c}$
- Passando alle incertezze relative (modello deterministico worst case)

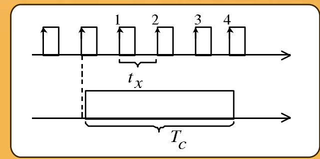
$$\left|\frac{\delta f_x}{f_x}\right| = \left|\frac{\delta t_c}{t_c}\right| + \left|\frac{\delta n}{n}\right| = \left|\frac{\delta f_c}{f_c}\right| + \left|\frac{\delta n}{n}\right|$$

$\left|\frac{\delta n}{n}\right|$ incertezza relativa sul valore numerico n

$\left|\frac{\delta f_c}{f_c}\right|$ l'incertezza relativa della frequenza del campione interno

38

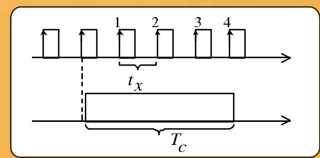
Incertezza di quantizzazione 1/3



- Si vuole misurare quanti intervalli di durata t_x sono compresi nell'intervallo campione T_c
- In realtà si misurano gli impulsi che sono inclusi nell'intervallo T_c (per esempio sui fronti di salita)

39

Incertezza di quantizzazione 2/3

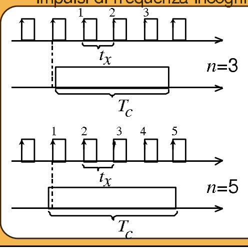


- Una misura idealmente corretta è rappresentata nella figura dove T_c=4 t_x
- La porta dovrebbe iniziare subito dopo (o subito prima) il fronte di salita del primo impulso e terminare subito dopo (o subito prima) il fronte di salita dell'ultimo impulso, con ritardi (o anticipi) perfettamente uguali

40

Incertezza di quantizzazione 3/3

- In realtà poiché:
  - l'intervallo campione non è esattamente un multiplo intero degli intervalli incogniti
  - l'inizio e la fine del conteggio non sono sincronizzati con gli impulsi di frequenza incognita



Risulta

n=4±1, δn= 1

Incertezza relativa

$$\left|\frac{\delta n}{n}\right| = \frac{1}{n}$$

Incertezza del campione a quarzo 1/4

- L'oscillatore al quarzo garantisce valori di accuratezza che sono dell'ordine di:

$$\frac{\delta f_c}{f_c} = \frac{\delta t_c}{t_c} \approx 10^{-4} \div 10^{-6}$$

- Se il quarzo è termostatato diventa:

$$\frac{\delta f_c}{f_c} = \frac{\delta t_c}{t_c} \approx 10^{-8} \div 10^{-9}$$

42

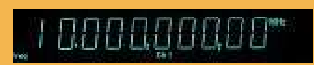
Incertezza del campione a quarzo 2/4

- L'incertezza del quarzo è il limite di accuratezza raggiungibile con le misure di frequenza
- Non serve aumentare n e quindi la durata della misurazione per ridurre l'incertezza di quantizzazione molto al di sotto dell'accuratezza del quarzo

43

Incertezza del campione a quarzo 3/4

- Il numero di cifre che si hanno sul *display* (cioè il numero massimo che si può contare) sono indice della accuratezza del campione di frequenza contenuto nel frequenzimetro



- Talvolta il *display* presenta un numero di cifre esuberante rispetto alla accuratezza del campione interno

44

Incertezza del campione a quarzo 4/4

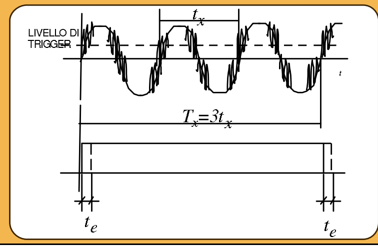
- Possibilità di acquistare, in opzione, campioni interni di accuratezza diverse
- Connettore per collegare oscillatore campione esterno, più accurato rispetto al riferimento interno

Incertezza Misura di periodo

- Valgono le stesse considerazioni sulla incertezza di quantizzazione e sull'incertezza dovuta al campione di frequenza ma in più si aggiunge l'incertezza sulla durata del gate T_x= Mt_x ricavato dal segnale di frequenza incognita f_x
- Il rumore sovrapposto al segnale introduce un'ulteriore incertezza sull'inizio e la fine del gate
- Nella misura di frequenza, questo problema non si pone perché la porta è generata a partire dal campione di riferimento interno

Incertezza di rumore 1/2

- La presenza di impulsi rumore ad occorrenza casuale può variare gli istanti iniziale e finale della porta di due quantità pari a t_e (nel disegno per semplicità sono stati posti uguali)

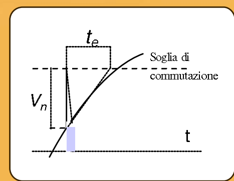


Incertezza di rumore 2/2

- Con un modello di rumore impulsivo di ampiezza V_n si calcola:

$$\frac{V_n}{t_e} = \frac{dv_x}{dt}$$

$$t_e = \frac{V_n}{\frac{dv_x}{dt}}$$



- In termini relativi l'incertezza vale 2t_e/T_x

Incertezza combinata 1/2

- L'incertezza combinata nel caso peggiore vale

$$\frac{\delta t_x}{t_x} = \frac{\delta f_x}{f_x} = \frac{\delta t_c}{t_c} + \frac{\delta n}{n} + \frac{2t_e}{T_x} = \frac{\delta t_c}{t_c} + \frac{1}{n} + \frac{2t_e}{T_x},$$

- $T_x = Mt_x$

49

Incertezza combinata 2/2

- Con M=1 (gate corrispondente ad un solo periodo t_x) della frequenza incognita, si ha il contributo massimo dovuto all'incertezza sulla durata della porta

- Se M>>1 il contributo di incertezza si riduce all'aumentare del numero di periodi mediati

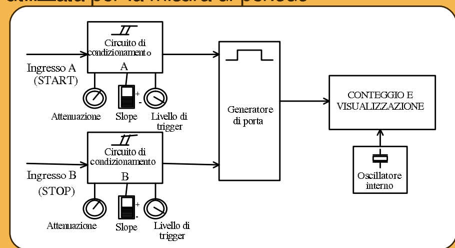
50

Frequenzimetri numerici

Misura di intervalli di tempo

Misura di intervalli di tempo

- Misura del ritardo di tempo tra due eventi singoli
- Si usa una tecnica di conteggio analoga a quella utilizzata per la misura di periodo



Risoluzione di Misura

- L'intervallo di tempo T_0 incognito, se *n* è il risultato del conteggio vale: $T_0 = nt_c$
- La risoluzione assoluta, che corrisponde ad una unità di conteggio, è data da:

$$\Delta(T_0) = t_c = \frac{1}{f_c}$$

- La risoluzione relativa risulta essere:

$$\frac{\Delta(T_0)}{\Delta t} = \frac{t_c}{nt_c} = \frac{1}{n}$$

53

Incertezza di Misura

- L'incertezza da cui è affetta la misura di un intervallo di tempo è data dalla combinazione:
  - incertezza di quantizzazione di $\pm 1/n$
  - l'imprecisione del quarzo
  - l'incertezza sugli istanti di Start e Stop, dovuta al rumore presente sui segnali e sulle soglie $2t_e/T_0$
  - combinando questi contributi, l'espressione dell'incertezza relativa diventa la seguente:

$$\frac{\delta(T_0)}{T_0} = \frac{1}{n} + \frac{\delta f_c}{f_c} + 2\frac{t_e}{T_0}$$

54

Strumentazione numerica

Voltmetri numerici

Voltmetri numerici

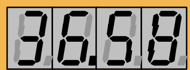
- Generalità sulle modalità di misura numerica di tensione (DVM)
- Voltmetri numerici a integrazione semplice (I.S)
- Voltmetri numerici a integrazione doppia (I.D.)
  - Principio di misurazione
  - Incertezze di misura
- Specifiche di un DVM
- Multimetro numerico (DMM)

Voltmetri numerici

Generalità

Generalità 1/3

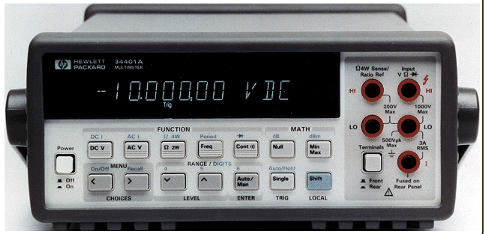
- Detti anche comunemente digitali (DVM *Digital VoltMeters*)
- Presentano il risultato della misurazione su un *display* numerico



- Sono misuratori di tensione continua
- Per misurare grandezze alternate si premettono circuiti che trasformano la tensione, variabile nel tempo, in una componente continua (es. valore efficace)

58

Generalità 2/3



59

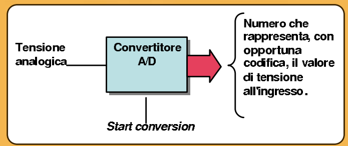
Generalità 3/3

- Principi operativi di alcuni voltmetri numerici, accennando anche a tecniche attualmente superate, per metterne in evidenza i limiti
- Si tratterà principalmente il voltmetro per D.C.
  - tecniche di integrazione semplice (I.S.)
  - tecniche di integrazione doppia (I.D.)
- Per l'estensione all'amperometro in continua e agli strumenti per grandezze alternate si rimanda ad argomenti simili già trattati, per la strumentazione analogica

60

Convertitore A/D 1/3

- Alla base del funzionamento di un DVM c'è il convertitore A/D



- Il comando di start conversion inizia il processo di conversione che dura un certo tempo (tempo di conversione) alla fine del quale è disponibile in uscita il valore N

61

Convertitore A/D 2/3

- Il convertitore A/D è tradizionale argomento dei corsi di Elettronica Applicata
- In questa sede ci si occuperà invece degli aspetti di sistema, più che degli aspetti circuitali
- Sarà analizzato come strumento di misura, del quale saranno evidenziate la funzionalità e le fonti di incertezza
- Si discuterà inoltre come ridurre gli effetti che queste hanno sulle prestazioni complessive

62

Convertitore A/D 3/3

- I convertitori A/D utilizzati per l'acquisizione numerica di f.d.o. (es. oscilloscopio numerico), privilegiano la velocità di conversione
- Il voltmetro numerico da laboratorio, è dedicato alla misurazione di grandezze continue o f.d.o. trasformate in grandezze continue
- Le tecniche di conversione A/D privilegiano quindi l'accuratezza di misura e la reiezione dei disturbi, più che la velocità

63

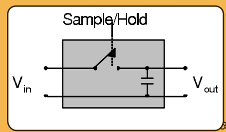
Tipologie del misurando

- Tensioni variabili nel tempo
- Tensioni continue

64

Tensioni variabili nel tempo

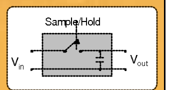
- Il processo di conversione A/D dura un certo tempo (tempo di conversione)
- Durante tutto il tempo di conversione il misurando deve rimanere costante, ma ciò accade solo nel caso di D.C.
- Si antepone al convertitore un elemento di *sample/hold* (S/H)

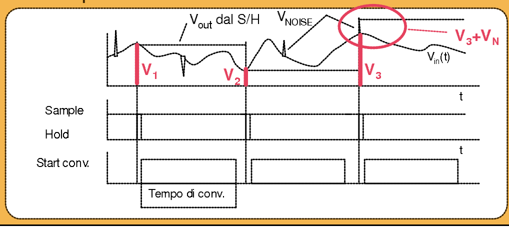


65

Sample/Hold

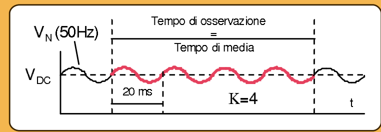
- Impulso di *Sample* chiude l'interruttore per un tempo breve
- Nella successiva fase di *Hold* l'interruttore si riapre mantenendo la capacità carica





Tensioni continue 1/2

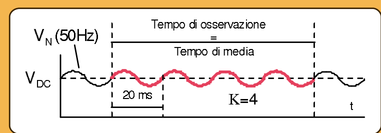
- Il misurando (VDC) può essere osservato per un intervallo di tempo Tm
- Media nella finestra temporale di osservazione



67

Tensioni continue 2/2

- I disturbi (VN), che in Tm hanno valore medio nullo, non producono errore sulla misura
- Contributo nullo dei disturbi residui della tensione di rete a 50 Hz, se si sceglie Tm=Kx20 ms (K intero)



68

Voltmetri a integrazione 1/2

- Il principio di funzionamento dell'integrazione si è evoluto negli anni
- Significativi miglioramenti sia nell'accuratezza sia nei costi
- Tecnica della integrazione semplice (I.S)

69

Voltmetri a integrazione 2/2

- Successivamente si è adottata la integrazione doppia (I.D.)
- E quindi, nell'ottica di aumentare la risoluzione e ridurre i tempi di misurazione, si è arrivati ai voltmetri a integrazioni multiple (non trattati)

70

Voltmetri numerici

Voltmetri numerici I.S.

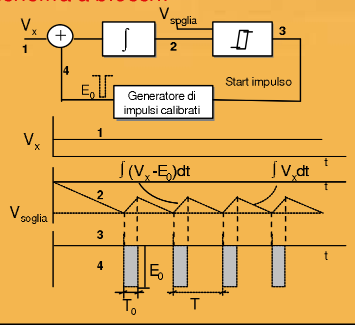
Principio della Integrazione Semplice

- Sostanzialmente è un convertitore Tensione/Frequenza (V/F *converter*) $F=K \times V_{DC}$
- Fattore di proporzionalità K dipende dalle caratteristiche dello strumento.
- La frequenza generata da questa conversione viene misurata direttamente con tecniche di conteggio numerico per risalire indirettamente al valore della tensione

72

Schema funzionale della I.S.

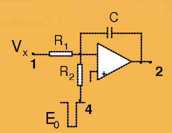
- Schema a blocchi



73

Bilanciamento della carica I.S.

- Nel ciclo di durata T si ha bilanciamento di carica nel condensatore C
- La carica fornita da V_x per tutto il periodo T viene sottratta dall'impulso di ampiezza E_0 nel tempo T_0



- Si può pertanto scrivere $\Rightarrow$ $\frac{1}{R_1 C}\int_T V_x dt = \frac{1}{R_2 C}\int_{T_0} E_0 dt$
- Essendo V_x e E_0 costanti, si ottiene $\Rightarrow$ $\frac{V_x}{R_1}T = \frac{E_0}{R_2}T_0$

74

Misura indiretta della tensione

- In conclusione

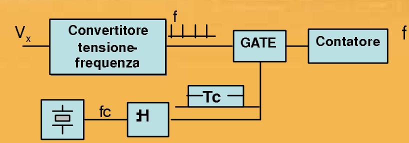
$$V_x = E_0 \frac{T_0}{T}\frac{R_1}{R_2} = E_0 T_0 \frac{R_1}{R_2} f$$

- Dove $f=1/T$ è la frequenza degli impulsi E_0
- La misura diretta della frequenza f è eseguita con tecnica di conteggio
- Si esegue indirettamente la misura di V_x attraverso il fattore

$$K = E_0 T_0 \frac{R_1}{R_2}$$

75

Misura diretta di frequenza nel I.S.



- In conclusione:

$$V_x = E_0 T_0 \frac{R_1}{R_2} f = Kf$$

76

Sorgenti di incertezze in I.S. 1/2

- Dalla relazione $V_x=g(f)$ si ricava

$$\left|\frac{\delta V_x}{V_x}\right| = \left|\frac{\delta E_0}{E_0}\right| + \left|\frac{\delta T_0}{T_0}\right| + \left|\frac{\delta\left(\frac{R_1}{R_2}\right)}{\left(\frac{R_1}{R_2}\right)}\right| + \left|\frac{\delta f}{f}\right|$$

77

Sorgenti di incertezze in I.S. 2/2

- Contribuiscono all'incertezza:
  - l'incertezza sull'ampiezza E_0 e quella sulla durata T_0 dell'impulso calibrato
  - l'incertezza sul rapporto delle resistenze che determinano le costanti di tempo di carica e scarica
  - l'incertezza sulla misura della frequenza f

78

Stima delle incertezze in I.S.

- L'incertezza sull'ampiezza $\left|\frac{\delta E_0}{E_0}\right|$

  e quella sulla durata dell'impulso calibrato $\left|\frac{\delta T_0}{T_0}\right|$ sono valutabili da un'analisi circuitale
- L'incertezza sul rapporto delle resistenze è nota in base alle scelte dei componenti (resistori *matched*)
- L'incertezza sulla misura della frequenza f è valutabile, secondo

$$\left|\frac{\delta f}{f}\right| = \left|\frac{\delta f_c}{f_c}\right| + \frac{1}{n}$$

in base all'accuratezza del campione e del numero di conteggi

79

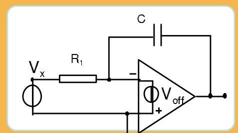
Altre possibili fonti d'incertezza nel I.S. 1/2

- Se si analizza il circuito si possono individuano altre possibili fonti di incertezza quali:
  - la tensione di offset dell'integratore
  - gli offset dei comparatori di soglia
  - la tensione Vsoglia

80

Altre possibili fonti d'incertezza nel I.S. 2/2

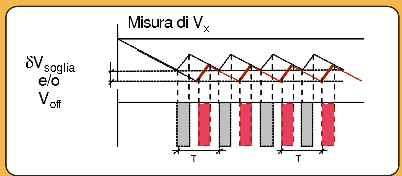
- Tensione di offset dell'integratore
  - si pone in serie alla tensione Vx e quindi si misura Vx+Voff; l'incertezza assoluta vale $(\delta Vx)_{off}$= Voff.



81

Sorgenti a contributo nullo

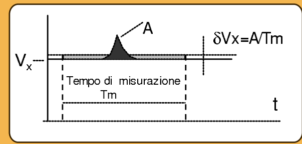
- Offset dei comparatori e la V_{soglia} hanno lo stesso effetto sulla tensione di uscita dell'integratore
- Questi fattori d'influenza non cambiano però la frequenza degli impulsi
- Contributo di errore nullo



82

Reiezione del rumore

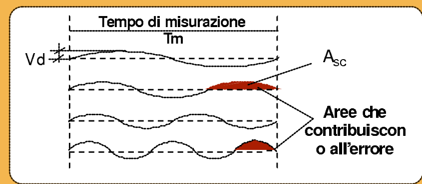
- Un rumore, sovrapposto al segnale, dà un contributo pari al suo valore medio nel tempo di misura Tm (tempo di conteggio)
- Se è di tipo impulsivo di area A, l'errore vale A/Tm



83

Disturbi sinusoidali

- Nel caso di rumori determinati di tipo sinusoidale di periodo Td il contributo si annulla se Tm=kTd (k=1,2,....)
- Il caso peggiore A_{sc}/Tm per Tm=(2k+1)Td/2

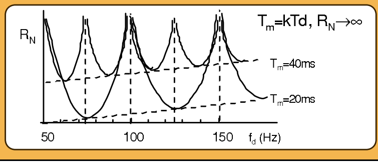


84

Reiezione di disturbi sinusoidali

- Indicando con V_0 la tensione in misura, V_d il valor massimo della sinusoide di frequenza $f_d = 1/T_d$:
  - si può definire reiezione al rumore la quantità

$$R_N = V_0 \left\{ \frac{1}{T_m} \int_{T_m} V_d \sin(2\pi f_d t) dt \right\}^{1}$$



85

Riepilogo delle caratteristiche 1/2

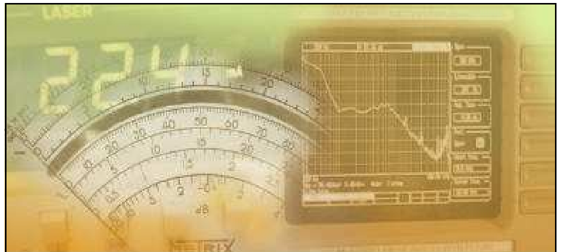
- Riassumendo
  - Buona insensibilità al rumore
  - Tempo di misura (tempo di conversione A/D) piuttosto elevato di alcune decine di millisecondi
  - Oscillatore interno di buona accuratezza per accurata misura di frequenza

86

Riepilogo delle caratteristiche 2/2

- Componenti analogici di elevata precisione (resistori, tensione e durata di impulso, oscillatore interno ecc.)
- Richiede frequenti tarature (derive componenti)
- Sviluppo tecniche per strumenti di migliore qualità a costi inferiori

87



Voltmetri numerici

Voltmetri numerici I.D.

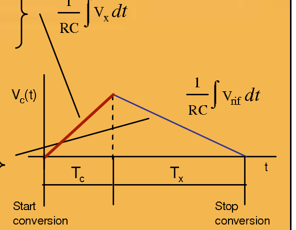
Voltmetro a integrazione doppia I.D.

- Convertitore A/D realizza la conversione tra tensione e un intervallo di tempo
- Tempo misurato con tecnica di conteggio degli impulsi di un oscillatore a quarzo

89

Principio di funzionamento I.D.

- La tensione V_x incognita carica un condensatore C, con costante di tempo RC, per una durata fissa T_c } $\frac{1}{RC}\int V_x\,dt$
- La quantità di carica Qx sarà quindi proporzionale alla V_x
- Trascorso T_c si scarica il condensatore, mediante una tensione nota V_{rif} e costante di tempo RC. } $\frac{1}{RC}\int V_{rif}\,dt$
- La durata della scarica, T_x, sarà proporzionale alla carica Qx accumulata e quindi alla tensione V_x.



90

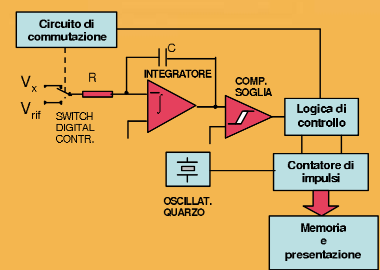
Bilanciamento di carica nel I.D.

- Al termine dell'intervallo campione Tc, la tensione raggiunta vale } $\frac{1}{RC}\int_{T_c} V_x\,dt = \frac{V_x}{RC}T_c$
- Nella fase di scarica la tensione vale } $\frac{1}{RC}\int V_{rif}\,dt$
- Per il bilancio delle cariche si ha } $\frac{V_x}{RC}T_c = \frac{1}{RC}\int_{T_x} V_{rif}\,dt = \frac{V_{rif}}{RC}T_x$
- Da cui $\boxed{V_x = V_{rif}\frac{T_x}{T_c}}$

91

Schema a blocchi I.D.

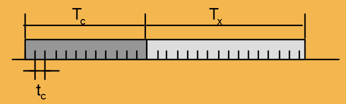
- Voltmetro a doppia integrazione



92

Conteggio impulsi I.D.

- La misura di entrambi gli intervalli T_c e T_x è ottenuta con la tecnica del conteggio degli impulsi dell'oscillatore a quarzo di frequenza campione $f_c = 1/t_c$
- $T_c \cong N_c\, t_c$ $T_x \cong N_x\, t_c$



$$V_x = V_{rif}\frac{T_x}{T_c} \Rightarrow V_x \cong V_{rif}\frac{N_x}{N_c}$$

93

Osservazioni I.D. 1/2

$$V_x \cong V_{rif}\frac{N_x}{N_c}$$

- La costante di tempo RC è la stessa per la carica e la scarica: non interviene nella misurazione
- Si richiede la misura del rapporto di intervalli di tempo e non del singolo intervallo

94

Osservazioni I.D. 2/2

$$V_x \cong V_{rif}\frac{N_x}{N_c}$$

- T_c e T_x si misurano contando gli impulsi dello stesso oscillatore
- Nel rapporto T_x / T_c scompare il periodo t_c
- Non occorre conoscere con esattezza la frequenza f_c dell'oscillatore

95

Confronto tra le tecniche I.S. e I.D. 1/2

- È più semplice realizzare una tensione accurata V_{rif} (caso I.D.) che un impulso di area accurata E_0T_0 (caso I.S.)
- L'incertezza dell'oscillatore di riferimento non contribuisce se si misura un rapporto di intervalli (I.D.), mentre interviene direttamente se si misura una frequenza o un periodo (I.S.)

96

Confronto tra le tecniche I.S. e I.D. 2/2

- Nel voltmetro I.D. non intervengono le incertezze sulla costante di tempo dell'integratore che invece intervengono nel voltmetro S.I.

97

Risoluzione di misura nel I.D. 1/2

- La minima variazione apprezzabile, corrisponde all'incremento di una unità di conteggio di Nx

$V_x \cong V_{rif} \dfrac{N_x}{N_C}$ $\quad (\Delta V_x)_r \cong \dfrac{|V_{rif}|}{N_C} \cong \dfrac{|V_x|}{N_x}$ $\quad V_{rif}$ e N_c costanti

- Fissato il numero $(N_x)_{max}$ che il contatore può contare e il valore $|V_x|_{FS}$ di fondo scala, la risoluzione risulta

$$(\Delta V_x)_r \cong \frac{|V_{rif}|}{N_C} \cong \frac{|V_x|_{FS}}{(N_x)_{max}}$$

98

Risoluzione di misura nel I.D. 2/2

- Dalla relazione $V_x \cong V_{rif} \dfrac{N_x}{N_C}$
- Si ricava $\left|\dfrac{\delta V_x}{V_x}\right| = \left|\dfrac{\delta V_{rif}}{V_{rif}}\right| + \dfrac{1}{N_x} + \dfrac{1}{N_C}$
- Per contare Tc si possono sincronizzare gli impulsi dell'oscillatore, con lo start del contatore in modo che valga esattamente $T_c = N_c t_c$
- Quindi $\left|\dfrac{\delta V_x}{V_x}\right| = \left|\dfrac{\delta V_{rif}}{V_{rif}}\right| + \dfrac{1}{N_x}$

99

Altre possibili fonti di incertezza nel I.D.

- Analisi di possibili contributi all'incertezza
  - tensione di offset dell'integratore
  - tensione di offset del comparatore di soglia
  - eventuali ritardi tra le varie operazioni che devono essere sincronizzate
  - non linearità della rampa di integrazione
  - cariche residue del condensatore

Si ricavano tutte dall'analisi circuitale del sistema non idealità dei componenti elettronici

100

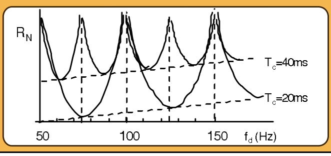
Reiezione del rumore nel I.D. 1/2

- Ha un comportamento simile al voltmetro a I.S.
- L'integrazione di V_x avviene nell'intervallo T_c

101

Reiezione del rumore nel I.D. 2/2

- Per avere una reiezione infinita occorre che $T_c = kT_d$ multiplo del periodo del segnale disturbante
- Si applicano pertanto tutti calcoli fatti nel caso di I.S. e vale il grafico di reiezione (sostituendo $T_m = T_c$)



102

Voltmetri numerici

Specifiche di un DVM

Specifiche dichiarate per un DVM 1/2

- Numero di cifre:
  - si indica 3½ cifre, 4½ cifre ....., intendendo che 3 o 4 sono le cifre a variazione piena (cioè 0÷9)
  - ½ indica che la cifra di peso più elevato può assumere soltanto alcuni valori (0÷1 oppure 0÷3)

104

Specifiche dichiarate per un DVM 2/2

- overrange: lettura massima consentita in % rispetto al fondo scala:
  - overrange 100% (es. 3½ cifre, V_{FS}=1 V, consente una lettura massima di 1.999 V)
  - overrange 50% (es. 3 ½ cifre, V_{FS}=1 V, consente una lettura massima di 1.500 V)
- tensione di fondo scala V_{FS} è il valore a cui si fa riferimento per le valutazioni dell'incertezza di misura

105

Accuratezza di un DVM 1/3

- L'incertezza complessiva è costituita da due contributi
  - a valore assoluto costante per qualunque punto del campo di misura:
    - errori di offset e non linearità
  - a valore relativo costante per qualunque punto del campo di misura
    - errori di guadagno (fattori moltiplicativi sulla funzione di trasferimento)
  - è dichiarata l'incertezza in valore assoluto

106

Misure elettroniche
Strumentazione numerica

Accuratezza di un DVM 2/3

- L'incertezza complessiva è dichiarata con la relazione

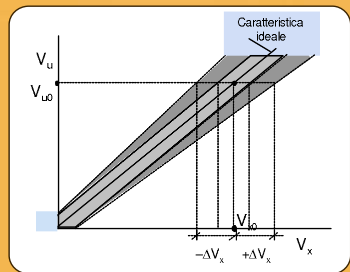
$$\boxed{\left|dV_x\right| = \left|\varepsilon_1\% \cdot V_{FS} + \varepsilon_2\% V_x\right|}$$

  - dove V_x è il valore letto
  - V_{FS} è il valore di fondo scala
- Il termine $\boxed{\left|\varepsilon_1\% \cdot V_{FS}\right|}$ dà il contributo assoluto costante
- Il termine $\boxed{\left|\varepsilon_2\% V_x\right|}$ dà il contributo assoluto proporzionale a V_x (valore relativo costante)

107

Accuratezza di un DVM 3/3

- L'incertezza complessiva dichiarata corrisponde al modello



108

Esempio di specifiche di DVM

Accuratezza (entro 1 anno da taratura)

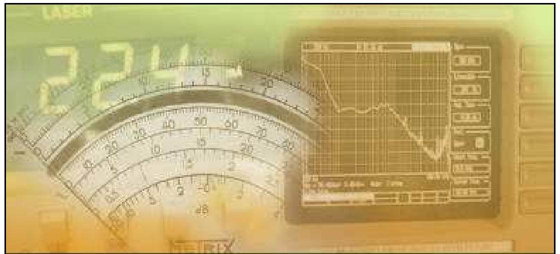
$|dV_x| = |0.1\% \cdot V_{FS} + 0.1\% V_x|$ da 18°C a 28°C

Coefficiente di temperatura:

$|dV_x|/°C = |0.01\% \cdot V_{FS} + 0.01\% V_x|/°C$

Portata	200 mV,	2 V,	20 V,	200 V
Risoluzione	0.1 mV,	1 mV,	10 mV,	100 mV

109

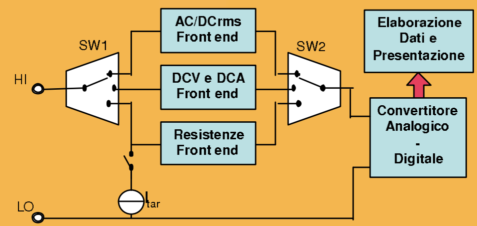


Voltmetri numerici

Multimetro numerico (DMM)

Multimetro numerico DMM

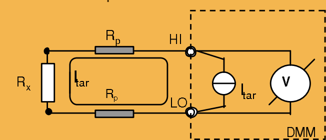
- Estende le funzioni del DVM a misure di correnti DC e AC e a misura di resistenze



111

Misura di piccole resistenze

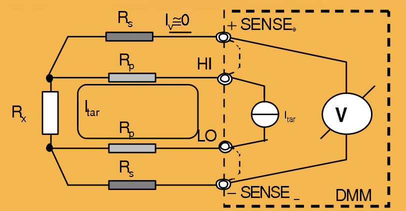
- Tecnica volt-amperometrica
- Se R_x piccole, problema delle resistenze di collegamento
- Si misura $R_x + 2R_p$



112

Misura a 4 fili (4-wire)

- Si utilizzano 4 morsetti



113