

(25 min)

## Esercizio 1

1) Con una scheda di acquisizione dati, con dinamica d'ingresso bipolare, si devono misurare i seguenti segnali su un circuito:

$V_1$  tensione di alimentazione di una connessione USB (5 V);

$V_2$  segnale di *clock* della parte digitale: onda quadra TTL (0-5 V) a 18 000 Hz;

$V_3$  tensione generata ai capi di un circuito con 4 pile AAA messe in serie (ogni pila eroga una tensione di 1.5 V);

$V_4$  onda quadra alternata di ampiezza picco-picco 6 V con un periodo 1 ms;

$V_5$  segnale analogico con banda 20 kHz, dinamica  $\pm 100$  mV e risoluzione richiesta  $\Delta V \leq 0.1$  mV.

1a) Si descriva brevemente la struttura e il funzionamento di una scheda di acquisizione dati (DAQ), attraverso la spiegazione delle funzioni dei suoi blocchi principali.

1b) Si valuti la frequenza di campionamento  $f_c$ , la modalità di acquisizione e numero e tipo di canali della scheda per correttamente tutti i segnali "simultaneamente".

1c) Si imposti il guadagno ottimale per ciascun canale, sapendo che il convertitore A/D ha dinamica [- 5 V; +5 V] e i guadagni selezionabili sono  $G = 0.5, 1, 10$  e  $100$ .

1d) Si valuti il numero di bit della scheda necessario per l'applicazione specifica.

**1a)** Vedi libro e appunti del corso.

**1b)** Valutiamo la frequenza di campionamento sufficiente per acquisire bene i singoli canali.

$V_1$  e  $V_3$  sono tensioni in continua, non pongono quindi restrizioni sulla scelta della frequenza di campionamento.

$V_2$ , segnale di *clock* a 18 000 Hz, può essere acquisito correttamente con almeno 2 punti per periodo per vedere sia il livello alto che quello basso, quindi ad almeno 36 kSa/s.

$V_4$  onda quadra a frequenza un 1 kHz, per acquisirla correttamente bisognerà avere il contenuto informativo portato da almeno 3 armoniche fondamentali dell'onda. Avendo l'onda quadra unicamente armoniche dispari sarà necessario acquisire il segnale fino alla 5<sup>a</sup> armonica. La quinta armonica si trova a 5 kHz quindi per il teorema di Shannon bisognerà acquisire ad una frequenza superiore a 10 kHz per ricostruire il segnale correttamente, quindi 10 kSa/s.

$V_5$ , un segnale analogico con banda 20 kHz, deve essere campionato almeno a frequenza doppia della sua banda (teorema di Shannon), cioè ad almeno 40 kSa/s.

Il segnale che richiede la frequenza di campionamento superiore è il  $V_5$  quindi lavoreremo con  $f_{\text{sample}}=40$  kSa/s. Essendo 5 i segnali da acquisire la frequenza necessaria alla scheda per acquisire i 5 segnali simultaneamente è di 200 kSa/s.

Essendo presente un segnale di natura differenziale (la batteria è una tensione flottante e dovrà essere acquisita per forza leggendo la differenza di potenziale su due canali analogici) possiamo operare in modalità *differenziale* usando 10 canali analogici per l'acquisizione (2 canali per ogni segnale).

Se disponibile, potremmo usare un canale digitale per l'acquisizione del segnale di *clock* dotato di un tempo di risposta sufficiente all'acquisizione del segnale (per esempio 10 ns), diminuendo così la frequenza minima di campionamento necessaria alla scheda per acquisire i segnali da 200 kSa/s (per 5 segnali) a 160 kSa/s (per 4 segnali).

**1c)** Il blocco che regola la dinamica d'ingresso, per adattarla a quella del convertitore A/D è l'amplificatore da strumentazione. Nell'esercizio i valori delle dinamiche impostate (e quindi dei guadagni dell'amplificatore) sono:

$V_1$  ha ampiezza +5 V (alimentazione di un connettore USB), dinamica d'ingresso  $\pm 5$  V con  $G=1$ .

$V_2$  ha ampiezza +5 V, dinamica d'ingresso  $\pm 5$  V con  $G=1$ .

$V_3$  ha ampiezza +6 V (4 pile da 1.5 V in serie), dinamica d'ingresso  $\pm 10$  V con  $G=0.5$ .

$V_4$  ha dinamica di 6 V (da -3 V a +3 V), dinamica d'ingresso  $\pm 5$  V con  $G=1$ .

$V_5$  ha dinamica  $\pm 100$  mV, dinamica d'ingresso  $\pm 0.5$  V con  $G=10$ .

**1d)** L'unico segnale che pone delle condizioni stringenti sul numero di bit è  $V_5$  per il quale si richiede una risoluzione  $\Delta V \leq 0.1$  mV.

La risoluzione è  $\Delta V = D/2^n$  dove  $n$  è il numero di bit. Quindi se la risoluzione deve essere di almeno 0.1 mV e su una dinamica  $D = \pm 0.5$  V = 1 V il numero  $n$  di bit necessario è:

$$n \geq \log\left(\frac{1\text{ V}}{0,1\text{ mV}}\right) = \log_2(10000) \cong 13.3.$$

Quindi  $n = 14$  bit ( $N = 16384$  livelli) va bene per l'applicazione.

(35 min)

## Esercizio 2

2) Disponendo di un sistema di acquisizione dati costituito da una scheda DAQ con 8 ingressi (in modalità *single-ended*), amplificatore per strumentazione con guadagno unico (anche per più canali acquisiti) una variabile (1, 10, 100 e 1000), 12 bit di risoluzione, dinamica del convertitore  $\pm 5$  V, e massima frequenza di campionamento 1 MHz, si vogliono acquisire i seguenti segnali:

Segnale	Dinamica tensione	Dinamica spettrale
$s_1$	da 0 V a 0.05 V	da 0 Hz a 100 kHz
$s_2$	da 0 $\mu$ V a 250 $\mu$ V	da 0 Hz a 10 Hz
$s_3$	da -0.1 V a 0.1 V	da 0 Hz a 50 kHz
$s_4$	sinusoide alternata con ampiezza di picco 500 mV	$f_4=10$ kHz

2a) Impiegando una configurazione di acquisizione differenziale, quali segnali possono essere contemporaneamente acquisiti?

2b) Sapendo che il guadagno dell'amplificatore per strumentazione è fisso per tutti i canali acquisibili si determini il valore ottimale di tale guadagno e la risoluzione della scheda (sul segnale d'ingresso).

2c) La presenza di disturbi e rumori elettronici sulla alimentazione della scheda induce un rumore elettronico equivalente all'interno del convertitore A/D pari a 2 mV (valore efficace). Determinare il numero di bit equivalenti con cui opera il convertitore A/D in presenza di tale rumore e la risoluzione effettiva della scheda.

2d) Per uno strumento di misura, in generale, si riportino le definizioni di: stabilità, risoluzione e accuratezza.

**2a)** In configurazione differenziale i canali di acquisizione possibili sono  $N_{\text{single}}/2=4$ , dove  $N_{\text{single}}$  è il numero di ingressi *single-ended*.

In questa configurazione ciascun canale/segnale può quindi essere acquisito se il segnale applicato ha una banda contenuta entro  $(f_c/2)/4=0.5$  MHz/4=125 kHz.

Poiché la massima banda dei segnali da acquisire è 100 kHz (segnale  $s_1$ ), possono essere acquisiti correttamente (senza fenomeni di *aliasing*) tutti e quattro i segnali "contemporaneamente".

**2b)** Per ottenere la massima risoluzione per una dato segnale in ingresso, si deve impostare il guadagno dell'amplificatore per strumentazione in modo da avere in ingresso al convertitore A/D un segnale con dinamica quanto più prossima alla dinamica del convertitore ( $\pm 5$  V in questo esercizio).

Il guadagno si ricava dalle seguenti relazioni:  $G = \frac{D_{\text{ADC}}}{D_{\text{in}}}$  quando la dinamica di ingresso è bipolare e

simmetrica (segnali  $s_3$  e  $s_4$ );  $G = \frac{D_{\text{ADC}}}{2D_{\text{in}}}$  quando la dinamica di ingresso è unipolare (segnali  $s_1$  e  $s_2$ ). Tra i

differenti valori di guadagno che ottimizzano la dinamica per i quattro canali occorre scegliere quello di valore minore (in questo modo tutti i segnali presenti all'ingresso del convertitore A/D rientrano all'interno della sua dinamica). Essendo

$$G = \frac{10}{2 \times 0.05} = 100 \text{ V/V}$$

$$G_2 = \frac{10}{2 \times 0.25 \times 10^{-3}} = 2 \times 10^4 \text{ V/V (valore disponibile } 10^3),$$

$$G_3 = \frac{10}{0.2} = 50 \text{ V/V (valore disponibile } 10 \text{ V/V),}$$

$$G_4 = \frac{10}{1} = 10 \text{ V/V}$$

il valore da impostare per il guadagno dell'amplificatore è dunque  $G = \min(G_1, G_2, G_3, G_4) = 10 \text{ V/V}$ .

La risoluzione della scheda (in ingresso) è pari alla risoluzione dell'ADC divisa per il guadagno adattato per l'amplificatore, pertanto si ha:

$$\Delta V = \Delta V_{in} = \Delta V_{ADC} / G = [(D_{ADC} / 2^n) / G] = \frac{10 \text{ V}}{2^{12} \cdot 10 \text{ V/V}} = 0.244 \text{ mV.}$$

**2c)** Il numero di bit equivalenti con cui opera il convertitore A/D in presenza di rumore

$$\text{è: } n_e = n - \frac{1}{2} \log_2 \left( 1 + \frac{\sigma_{n,ADC}^2}{\sigma_q^2} \right)$$

$$\text{dove } \sigma_q^2 = \frac{q^2}{12} = \frac{(D_{ADC} / 2^n)^2}{12} = \frac{100}{2^{24} \times 12} \cong 5 \times 10^{-7} \text{ V}^2 \quad \text{è il rumore di quantizzazione e}$$

$$\sigma_{n,ADC}^2 = (\sqrt{V_n^2})^2 = (2 \times 10^{-3})^2 = 4 \times 10^{-6} \text{ V}^2 \text{ è il rumore elettronico del convertitore A/D.}$$

Il numero di bit equivalenti è quindi:

$$n_e = 12 - \frac{1}{2} \log_2 \left( 1 + \frac{4 \times 10^{-6}}{5 \times 10^{-7}} \right) = 10.4 \text{ bit}$$

Alternativamente:

$$n_e = \frac{1}{2} \log_2 \left( \frac{\sigma_s^2}{\sigma_n^2} \right) = \frac{1}{2} \log_2 \left[ \frac{(10 \text{ V})^2 / 12}{(2 \times 10^{-3} \text{ V})^2} \right] = \frac{21}{2} = 10.5 \text{ bit e come valore intero, naturalmente per difetto, } n_e = 10$$

bit.

La risoluzione della scheda (in ingresso) è ora:

$$V = \Delta V_{in} = \Delta V_{ADC} / G = \frac{D_{ADC}}{2^{n_e} G} = \frac{10 \text{ V}}{2^{10} \times 10 \text{ V/V}} \cong 1 \text{ mV (976 } \mu\text{V).}$$

Utilizzando  $n_e$  non intero (10.4 bit anziché 10 bit), si ottiene  $\Delta V_{in} \cong 740 \mu\text{V} \sim 1 \text{ mV}$ , risultato comunque prossimo a quello ottenuto con  $n_e = 10$  bit.

**2d)** Vedi Libro di testo e appunti del corso.

## ESERCIZIO SULLE DAQ (da esame del 9 maggio 2001)

Avendo a disposizione una scheda di acquisizione con le seguenti caratteristiche:  
16 ingressi analogici *single-ended* (singoli); periodo di campionamento  $T_c=1 \mu\text{s}$ , 12 *bit* di risoluzione con una dinamica della tensione di ingresso da  $-5 \text{ V}$  a  $+5 \text{ V}$ ,

a) Dire se i seguenti segnali possono essere acquisiti “simultaneamente” (acquisizione sequenziale):

$S_1: f_{\max, 1}=250 \text{ kHz}$ , dinamica segnale  $-1 \text{ V} \leq V_1 \leq 1 \text{ V}$ ;

$S_2: f_{\max, 2}=2 \text{ kHz}$ , dinamica segnale  $-10 \text{ mV} \leq V_2 \leq 10 \text{ mV}$ ;

$S_3: f_{\max, 3}=10 \text{ Hz}$ , dinamica segnale  $100 \text{ mV} \leq V_3 \leq 2 \text{ V}$ ;

$S_4: f_{\max, 4}=10 \text{ kHz}$ , dinamica segnale  $-500 \text{ mV} \leq V_4 \leq 0 \text{ V}$ .

$S_5: f_{\max, 5}=0.1 \text{ MHz}$ , dinamica segnale  $-0.05 \text{ mV} \leq V_5 \leq 0.05 \text{ mV}$ .

b) Per i segnali acquisibili “simultaneamente” calcolare il guadagno dell’amplificatore per strumentazione a monte del convertitore A/D al fine di ottenere la massima risoluzione su ogni canale (N.B. il guadagno per ogni canale può essere differente).

c) Data la configurazione di acquisizione scelta, quale è la massima frequenza acquisibile per un singolo canale?

## SOLUZIONE

- a) La frequenza di campionamento della scheda di acquisizione è  $f_c=1/T_c=1$  MHz. Se si vuole acquisire tutti i segnali a disposizione, cinque, la frequenza di campionamento effettiva per canale è quindi  $f_{c,\text{eff}}=f_c/(\text{numero di canali acquisiti})=1 \text{ MHz}/5=200 \text{ kHz}$ . Il segnale su singolo canale risulta quindi acquisibile se  $f_{\text{max}} \leq 2f_{c,\text{eff}}=200 \text{ kHz}/2=100 \text{ kHz}$  (teorema di Nyquist). In conclusione solo il segnale  $S_1$  non può essere acquisito essendo  $f_{\text{max},1}=250 \text{ kHz}>100 \text{ kHz}$ .
- b)
- c) Per la determinazione dei guadagni dell'amplificatore per strumentazione si impone l'uguaglianza tra la dinamica del segnale all'uscita dell'amplificatore con la dinamica del convertitore A/D ( $\Delta V_{\text{ADC}}=5 \text{ V} \div (-5 \text{ V})=10 \text{ V}$ ).
- $S_2$  ha una dinamica  $\Delta V_2=10 \text{ mV} \div (-10 \text{ mV})=20 \text{ mV}$ , simmetrica rispetto 0 V (come quella dell'ADC) e quindi  $G_2 = \Delta V_{\text{ADC}}/\Delta V_2 = 10 \text{ V}/0.02 \text{ V}=500$ .
- $S_3$  ha una dinamica  $\Delta V_3=(2 \text{ V}-0.1 \text{ V})=1.9 \text{ V}$ , ma il segnale è sempre positivo (simmetrico rispetto 1.05 V). Il guadagno viene quindi calcolato come  $G_3 = V_{\text{ADC,Max}}/V_{3,\text{Max}} = 5 \text{ V}/2 \text{ V}=2.5$ .
- $S_4$  ha una dinamica  $\Delta V_4=0 \text{ mV}-(-500 \text{ mV})=500 \text{ mV}$ , ma il segnale è sempre negativo (simmetrico rispetto  $-250 \text{ mV}$ ). Il guadagno viene quindi calcolato come  $G_4 = |V_{\text{ADC,Min}}|/|V_{4,\text{Min}}| = 5 \text{ V}/0.5 \text{ V}=10$ .
- $S_5$  ha una dinamica  $\Delta V_5=50 \mu\text{V}-(-50 \mu\text{V})=100 \mu\text{V}$ , simmetrica rispetto 0 V (come quella dell'ADC) e quindi  $G_5 = \Delta V_{\text{ADC}}/\Delta V_5 = 10 \text{ V}/100 \times 10^{-6} \text{ V}=10^5$ .
- d) La configurazione di acquisizione è caratterizzata dalla lettura sequenziale di quattro canali (poiché il segnale  $S_1$  non è acquisibile). La frequenza di campionamento sul singolo canale è quindi  $f_{c,\text{eff}}=f_c/(\text{numero di canali acquisiti})=1 \text{ MHz}/4=250 \text{ kHz}$ . Per il teorema di Nyquist la massima frequenza acquisibile è quindi  $f_{\text{max}} \leq 2f_{c,\text{eff}}=(250 \text{ kHz})/2=125 \text{ kHz}$ .