

**MISURE E STRUMENTAZIONE****16 gennaio 2018****Prof. Michele Norgia****Primo appello AA 2017/2018****Tempo a disposizione 2 h 5min (1 h 5min solo II parte)****Aula T.1.1 e T.2.2 ore 13.15**

Cognome e nome: \_\_\_\_\_ (stampatello)

Matricola e firma \_\_\_\_\_ (firma leggibile)

**Esercizi svolti (almeno parzialmente): precompito 1 2 3 4 (7+8+5+7+5 =32p)** (croccettare)N.B. si consiglia di croccettare, qui sopra, gli esercizi almeno parzialmente svolti. **Si richiede di croccettare tutti i sottopunti, ad es. 1c), 1d), degli esercizi ai quali si è dato risposta.**Croccettare  **SOLO SECONDA PARTE (ESERCIZI 3 e 4)****SOLUZIONI****(35 min)****Esercizio 1***(svolgere su questo foglio e sul retro)*

1) Si vuole misurare la massa  $M$  di acqua contenuta in una cisterna cilindrica completamente riempita. Si conosce la densità dell'acqua  $\rho=1 \text{ kg/dm}^3$ , nota con incertezza di 5 ppm, e si effettuano misure indipendenti per determinare la miglior stima di  $M$ .

1a) La prima è una misura indiretta della massa  $M_I$ , ottenuta dal calcolo del volume della cisterna. Le misure di diametro  $D$  e altezza  $h_1$  sono effettuate con risoluzione 1 cm, ottenendo  $D=4.00 \text{ m}$  e  $h_1=1.00 \text{ m}$ . Si ricavi la misura della massa  $M_I$  e la sua incertezza.

1b) La seconda misura di massa  $M_{II}$  ricava indirettamente l'altezza  $h_2$  del fluido attraverso una misura assoluta di pressione  $P=0.111 \text{ MPa}$ , eseguita con un sensore di pressione (con incertezza tipo del 5 %) posto sul fondo della cisterna. Per il diametro  $D$  si utilizza la misura del punto 1a). La pressione atmosferica vale  $P_{\text{atm}}=101.3 \text{ kPa}$  con incertezza estesa di 100 ppm al 99.7%. Si ricavi  $M_{II}$  esprimendone l'incertezza in notazione concisa.

Si tenga presente che la pressione  $P$  è data dalla somma della pressione dovuta alla massa d'acqua ( $P_{\text{H}_2\text{O}}=\rho \cdot g \cdot h_2$ ) e della pressione atmosferica che agisce sul pelo libero dell'acqua. Si consideri per l'accelerazione di gravità il valore  $g=9.8 \text{ m/s}^2$ , noto con incertezza trascurabile.

1c) La terza misura  $M_{III}$  è effettuata con un flussimetro non tarato: si riempie per 7 volte la cisterna e si misura la massa di acqua che occorre per riempire la cisterna. I valori delle misure ripetute di  $M_{III}$  (in kg) sono: 42 500; 42 700; 42 900; 42 600; 42 700; 42 800; 42 700. Si ricavi la misura della massa  $M_{III}$  e la sua incertezza.

1d) Si commenti il risultato di misura che presenta incertezza più elevata e si spieghi come si potrebbe migliorare l'accuratezza di tale determinazione.

1e) Si valuti la compatibilità delle diverse misure della massa  $M$  (si presti attenzione a come sono state ricavate).

1f) Si ricavi la miglior stima,  $M_{\text{MP}}$ , della massa d'acqua contenuta nella cisterna: il valore di misura e la sua incertezza tipo.

**1a)** La risoluzione del telemetro digitale  $\Delta L=1 \text{ cm}$  comporta una incertezza di quantizzazione nelle misure di  $D$  e  $h_1$  che è  $u(L)=\Delta L/\sqrt{12} \cong 2.9 \text{ mm}=u(D)=u(h_1)$ . Le corrispondenti incertezze relative sono  $u_r(D)=u(D)/D=2.9/4 \times 10^{-3}=7.2 \times 10^{-4}$  e  $u_r(h_1)=u(h_1)/h_1=2.9/1 \times 10^{-3}=2.9 \times 10^{-3}$ .

Il volume  $V$  della cisterna è  $V=h \cdot (\pi D^2/4)=\pi/4 \cdot h_1 \cdot D^2$  e la massa dell'acqua così indirettamente ricavata è:

$$M_I=\rho \cdot V=\pi/4 \cdot \rho \cdot h_1 \cdot D^2 \cong 3.14159/4 \cdot 1000 \text{ kg/m}^3 \cdot 1 \text{ m} \cdot 16 \text{ m}^2 \cong 12\,566 \text{ kg}$$

con una incertezza relativa  $u_r(M_I)=[u_r^2(\rho)+u_r^2(h_1)+4\cdot u_r^2(D)]^{1/2}\cong[8.33\times 10^{-6}+2.08\times 10^{-6}]^{1/2}\cong 3.2\times 10^{-3}$ , avendo trascurato  $u_r(\rho)=5\times 10^{-6}<u_r(h_1)\approx 2\cdot u_r(D)\approx 10^{-3}$ . Infine, l'incertezza assoluta è  $u(M_I)=u_r(M_I)\cdot M_I\cong 41$  kg.

La prima misura è  $M_I=12\ 566(41)$  kg.

**1b)** Poiché  $P=P_{\text{atm}}+P_{\text{H}_2\text{O}}$ , si ricava  $P_{\text{H}_2\text{O}}=P-P_{\text{atm}}=(111\ 000-101\ 300)$  Pa=9 700 Pa con una incertezza tipo  $u(P_{\text{H}_2\text{O}})=[u^2(P)+u^2(P_{\text{atm}})]^{1/2}=[(5\times 10^{-2}\cdot P)^2+(33\times 10^{-6}\cdot P_{\text{atm}})^2]^{1/2}\cong 5\times 10^{-2}\cdot P=5.6\times 10^3$  Pa, con l'approssimazione che vale essendo  $P\cong P_{\text{atm}}$  e  $u_r(P)\gg u_r(P_{\text{atm}})$ . Inoltre,  $u_r(P_{\text{H}_2\text{O}})=u(P_{\text{H}_2\text{O}})/P_{\text{H}_2\text{O}}=0.57=57\%$ , **molto elevata a causa della elevata incertezza del sensore di pressione (5 %) e del fatto che la pressione dovuta all'acqua contenuta nella cisterna è circa 1/10 della pressione atmosferica e il sensore misura queste due pressioni sommate e con incertezza complessiva del 5 %.**

Da questa misura di pressione si deduce una altezza del liquido  $h_2=P_{\text{H}_2\text{O}}/(\rho\cdot g)=0.99$  m con una incertezza relativa  $u_r(h_2)\cong u_r(P_{\text{H}_2\text{O}})=57\%$ , essendo  $u_r(g)\cong 0$  e  $u_r(P_{\text{H}_2\text{O}})\gg u_r(\rho)$ .

Si osservi come l'altezza  $h_2$  del liquido nel recipiente misurata indirettamente con il sensore di pressione assume un valore diverso dalla stessa altezza  $h_1$  misurata con il telemetro, e peraltro  $h_2$  è nota ora con incertezza veramente molto grande, la stima dell'altezza fatta in questo modo non è molto accurata.

La massa dell'acqua misurata indirettamente dalla seconda misura risulta essere:

$$M_{II}=\pi/4\cdot\rho\cdot h_2\cdot D^2\cong 3.14159/4\cdot 1000\text{ kg/m}^3\cdot 0.99\text{ m}\cdot 16\text{ m}^2\cong 1.2441\times 10^4\text{ kg} = 12\ 438\text{ kg}$$

con una incertezza relativa  $u_r(M_{II})=[u_r^2(\rho)+u_r^2(h_2)+4\cdot u_r^2(D)]^{1/2}\cong u_r(h_2)\cong u_r(P_{\text{H}_2\text{O}})=57\%$ , avendo trascurato le due incertezze relative di  $\rho$  e di  $D$  che sono decisamente inferiori a quella di  $h_2$ . Infine, l'incertezza assoluta è  $u(M_{II})=u_r(M_{II})\cdot M_{II}\cong 7.1\times 10^3$  kg.

La seconda misura è  $M_{II}=12.4(71)\times 10^3$  kg.

**1c)** Nella terza misura, il valor (medio) della misura è:

$$M_{III}=\frac{1}{7}\sum_{i=1}^7 M_{III,i} = 42\ 700\text{ kg}$$

con una incertezza tipo (di categoria A):

$$u(M_{III})=\sqrt{\frac{1}{7\cdot 6}\sum_{i=1}^7 (M_{III,i} - M_{III})^2} \cong 49\text{ kg}$$

La terza misura è  $M_{III}=42700(49)$  kg.

**1d)** Il risultato che presenta la maggiore incertezza è quello della **seconda misura**. Come detto, **la elevata incertezza di questa misura dipende dall'incertezza del sensore di pressione (al 5 %) e dal fatto che la pressione parziale dell'acqua ( $P_{\text{H}_2\text{O}}$ ) è una piccola frazione (circa 1/10 di quella della pressione  $P_{\text{atm}}$  misurata dal sensore). L'accuratezza sarebbe notevolmente migliorabile impiegando un sensore di pressione relativo, che legge in differenziale la pressione rispetto a quella atmosferica, da cui si otterrebbe direttamente la pressione della sola massa d'acqua.**

**1d)** Valutiamo la compatibilità tra coppie di misure indipendenti, secondo la formula della compatibilità standard:

$$d_{\alpha-\beta}=\left|M_{\alpha}-M_{\beta}\right|\leq k\sqrt{u^2(M_{\alpha})+u^2(M_{\beta})}$$

Nel caso della verifica di compatibilità tra  $M_I$  e  $M_{III}$ , risulta evidente la incompatibilità tra le due misure anche per  $k=3$  essendo  $d_{I-III}>3[u(M_I)+u(M_{III})]$ .

Nel caso della verifica di compatibilità tra  $M_{II}$  e  $M_{III}$ , risulta evidente la incompatibilità tra le due misure anche per  $k=3$  essendo  $d_{II-III} > 3[u(M_{II})+u(M_{III})]$ .

Nel caso invece della verifica di compatibilità tra  $M_I$  e  $M_{II}$ , va considerata la correlazione tra le misure: non sono misure indipendenti in quanto entrambe impiegano la stessa misura del diametro  $D$ . In questo caso non ci sono problemi nei calcoli, in quanto il contributo di incertezza di  $D$  è assolutamente trascurabile in  $M_{II}$ , quindi possiamo valutare direttamente la compatibilità (esprimendo i valori di massa in kilogrammi):

$$128 = |12566 - 12400| \leq k \sqrt{41^2 + 7100^2} \cong k \cdot 7100$$

e dunque  $k \geq 0.023$ , il che evidenzia una **compatibilità tra  $M_I$  e  $M_{II}$  per fattori di copertura  $k=1$** .

Per tenere conto delle correlazioni avremmo potuto scorporare il contributo di  $D$  nell'incertezza di  $M_I$  e  $M_{II}$  e valutare quindi la compatibilità.

**1e)** La media pesata tra le due misure compatibili è

$$M_{MP} = \frac{\frac{M_I}{u^2(M_I)} + \frac{M_{II}}{u^2(M_{II})}}{\frac{1}{u^2(M_I)} + \frac{1}{u^2(M_{II})}} = 12\,566 \text{ kg}$$

con una incertezza tipo  $u(M_{MP}) = \sqrt{\frac{1}{\frac{1}{u^2(M_I)} + \frac{1}{u^2(M_{II})}}} = 40.999 \text{ kg} \cong 41 \text{ kg}$

(25 min)

**Esercizio 2**

(svolgere su questo foglio e sul retro)

2) Il nostro datore di lavoro ci ha incaricato di acquistare una scheda di acquisizione dati per due impieghi. Da catalogo troviamo una serie di schede con dinamica ADC  $\pm 5V$  e guadagni impostabili 1, 10 e 100. Possiamo scegliere modelli a 12, 16 o 18 bit, con frequenza di campionamento di 200 kSa/s, 400 kSa/s o 1 MSa/s, 8 o 16 canali single-ended o differenziali. Gli impieghi desiderati sono (ovviamente non contemporanei):

- A. Acquisizione di 10 sensori di luce ambiente con banda analogica di 1 kHz, con risoluzione di  $10 \mu V$  e dinamica 0-100 mV.
- B. Misura della qualità spettrale di un segnale a 15 kHz ampio circa 3 V, dovendo valutare le sue armoniche fino alla decima.

2a) Si scelgano le caratteristiche della scheda, a costo minimo, per ciascun impiego.

2b) Si scelgano le caratteristiche minime della scheda che soddisfino i requisiti di tutti gli impieghi e si calcoli la migliore risoluzione ottenibile con questa scheda.

2c) Intendiamo utilizzare la scheda scelta per misurare la temperatura ambiente con un sensore a NTC ( $\beta=4000 K$  e  $R_0=10 k\Omega$  a  $25^\circ C$ ), connesso in un ponte alimentato a 0.1 V, con altre tre resistenze uguali di valore  $R = 10 k\Omega$ . Si descriva come organizzare la misura e si calcoli la risoluzione in temperatura ottenibile nell'intorno di  $25^\circ C$ .

**2a)** Valutiamo un impiego alla volta.

- A. Acquisizione di 10 sensori di luce ambiente, con risoluzione di  $1 \mu V$  e dinamica 0-100 mV.

La frequenza di campionamento minima di 200 kSa/s è sicuramente sufficiente, anche divisa su 10 sensori (20 kSa/s per canale, più che sufficienti per una banda di 1 kHz). I 10 canali devono sicuramente essere differenziali, in quanto si richiede  $10 \mu V$  di risoluzione. Dovremo impostare guadagno 10, in modo da lavorare con dinamica  $\pm 500 mV$ . Il numero di livelli richiesto è quindi  $N = 1V/10 \mu V = 10^5$ , che richiedono di lavorare con il modello a 18 bit.

- B. Misura della qualità spettrale di un segnale a 10 kHz ampio circa 3 V, dovendo valutare le sue armoniche fino alla decima.

In questo caso c'è un solo canale da usare, senza esplicite richieste di risoluzione né di connessione. La sua ampiezza di 3V ben si sposa con la dinamica dell'ADC, per cui possiamo impostare guadagno 1 e probabilmente accontentarci di una connessione single-ended. Per quanto riguarda la frequenza di campionamento, è necessario ricostruire lo spettro del segnale fino alla decima armonica (150kHz), che richiede quindi un campionamento a frequenza più alta di 300kSa/s. Questo implica la scelta del modello a 400 kSa/s.

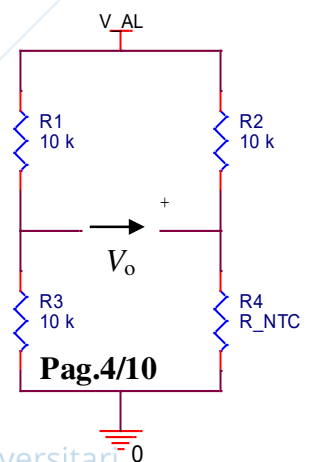
**2b)** Per soddisfare tutte le richieste dobbiamo scegliere la scheda con :

**16 canali differenziali; 18 bit; 400 kSa/s**

La migliore risoluzione si ha in corrispondenza del guadagno massimo pari a 100:

$$\Delta V = \frac{D}{2^{18}} = \frac{100 mV}{2^{18}} = 0.38 \mu V$$

**2c)** Si può utilizzare il ponte in figura, bilanciato per la temperatura di  $25^\circ C$ , che fornisce come tensione di uscita (da misurare con il voltmetro)



$$V_0 = \left( \frac{R_{NTC}}{R_{NTC} + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_1} \right) \times V_{AL}$$

In prima approssimazione la resistenza di un NTC è data dalla relazione esponenziale  $R_{NTC} = R_0 e^{-\beta \left( \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right)}$ ,  
dove  $T_0 = 298.15 \text{ K}$  ( $25^\circ\text{C}$ ),

Alla temperatura di  $25^\circ\text{C}$  il ponte è bilanciato e fornisce quindi  $V_0 = 0 \text{ V}$ .

Per ottenere la risoluzione in temperatura è necessario calcolare la sensibilità del sensore.

La sensibilità del sistema di misura, derivata della variabile di uscita rispetto all'ingresso, vale:

$$S = \frac{\partial V}{\partial T} = \frac{\partial V}{\partial R_{NTC}} \frac{\partial R_{NTC}}{\partial T} = V_{AL} \frac{R_2}{(R_{NTC} + R_2)^2} R_{NTC} \left( -\frac{\beta}{T^2} \right)$$

Dove  $V_{AL} = 0.1 \text{ V}$  è la tensione di alimentazione del ponte.

Sostituendo i valori, la sensibilità a  $25^\circ\text{C}$  vale  $S = -1.125 \text{ mV/K}$ .

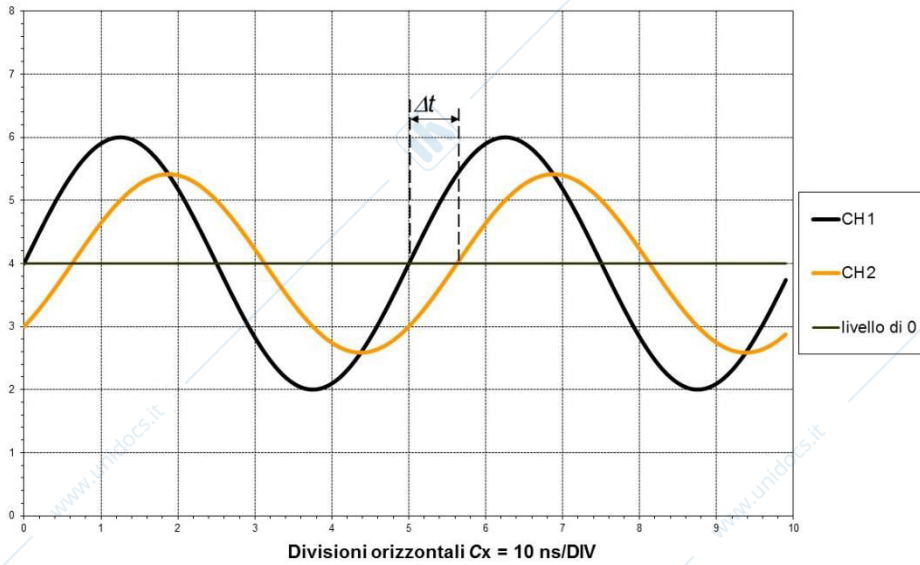
Per cui la risoluzione in temperatura a  $25^\circ\text{C}$  vale  $\Delta T_{25} = \Delta V / S \cong 340 \mu\text{K}$

(35 min)

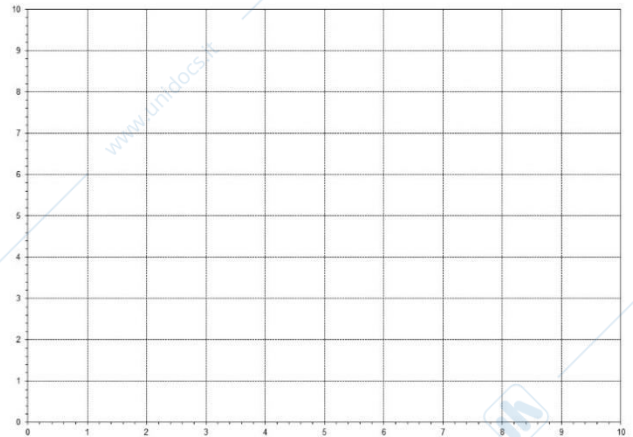
**Esercizio 3**

(svolgere su questo foglio e sul retro)

3) Con un oscilloscopio digitale (500 MHz, 2 canali) si misura la risposta in frequenza di un filtro passa-basso a singolo polo. In figura è riportata una misura con le seguenti impostazioni: scala orizzontale a **10 ns/DIV**; e le due scale verticali a **10 mV/DIV**



- 3a) Come sono stati connessi i segnali all'oscilloscopio? Si riporti l'espressione analitica dei segnali che stiamo misurando.
- 3b) Si indichino le impostazioni dell'oscilloscopio probabilmente impiegate in questa misura.
- 3c) Possiamo stimare la frequenza del polo del filtro? Si motivi la risposta.
- 3d) Si intende visualizzare il segnale connesso a CH2 con un analizzatore di spettro a supereterodina, impostando  $SPAN = 100$  kHz. Si scelgano le impostazioni rimanenti per visualizzare bene il segnale a centro schermo, considerando che l'analizzatore di spettro ha una figura di rumore  $NF = 30$  dB.
- 3e) Si disegni la schermata corrispondente dell'analizzatore nel riquadro sottostante.



**3a)** Si può notare che il segnale su CH2 è meno ampio e sfasato in ritardo (dallo schermo si misurano circa  $45^\circ$  di ritardo e attenuazione di un fattore 0.7), per cui rappresenta l'uscita del filtro passa basso, mentre su CH1 è connesso l'ingresso. I due segnali sono:

$$\text{CH1: } s_1(t) = A_1 \sin(2\pi ft) \quad \text{con } A_1 = 20 \text{ mV} \text{ e } f = 20 \text{ MHz} \text{ (periodo } T = 50 \text{ ns)}$$

$$\text{CH2: } s_2(t) = A_2 \sin(2\pi ft + \varphi) \quad \text{con } A_2 = 14 \text{ mV}, f = 20 \text{ MHz} \text{ e } \varphi = -45^\circ$$

**3b) Impostazioni oscilloscopio:**

- L'accoppiamento potrebbe essere in DC come in AC (dallo schermo non possiamo saperlo).
- Il trigger dovrebbe essere su CH1 a level 0V, potrebbe essere posizionato sia a inizio sia a centro schermo
- Modalità AUTO o NORM (dallo schermo non possiamo saperlo e per questi segnali sarebbe indifferente).

**3c)** Considerando l'attenuazione (3 dB) e lo sfasamento (45° in ritardo), stiamo misurando proprio la frequenza del polo, che quindi è a **20 MHz**.

**3d)** La potenza del segnale a 20 MHz si calcola come  $P=V^2/R$  se  $V$  è il valore efficace e  $R=50\ \Omega$  è l'impedenza d'ingresso dell'analizzatore di spettro. Come noto, per una sinusoide  $V_{\text{eff}}=V_p/\sqrt{2}$ .

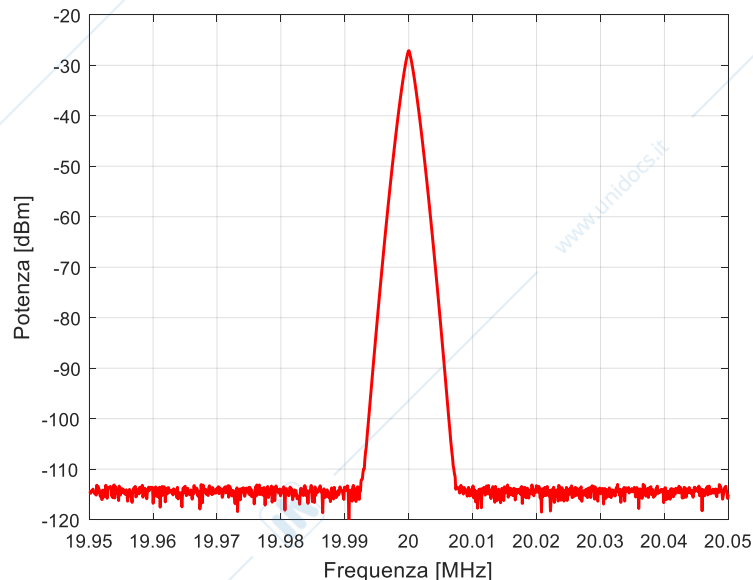
$$P = \frac{(0.014\ \text{V})^2}{2 \times 50\ \Omega} = 2\ \mu\text{W} \text{ corrispondenti a } -27\ \text{dBm}$$

Il segnale è a 20 MHz ed è richiesto uno SPAN di 100 kHz, per cui  $f_{\text{START}}=19.95\ \text{MHz}$ ,  $f_{\text{STOP}}=20.05\ \text{MHz}$ . Dobbiamo visualizzare una singola sinusoide, per cui non ci sono richieste stringenti sulla risoluzione in frequenza. Scegliamo ad esempio **RBW=1 kHz**.

Il fondo di rumore è pari al rumore dell'AS  $P_{\text{AS}}$ :

$$P_{N,AS,(\text{dBm})} = kT(\text{dBm/Hz}) + NF(\text{dB}) + 10\log(RBW/1\ \text{Hz}) = -174\ \text{dBm/Hz} + 30\ \text{dB} + 30\ \text{dBHz} = -114\ \text{dBm}$$

Dunque possiamo ad esempio scegliere un **Reference Level RL= -20 dBm** e una amplificazione verticale  $A_y=10\ \text{dB/DIV}$ , con quindi un fondo scala di visualizzazione a -120 dBm.

**3e)**

(30 min)

**Esercizio 4**

(svolgere su questo foglio e sul retro)

4a) Si intende realizzare un voltmetro a doppia rampa con reiezione infinita alle frequenze di rete 50 Hz e 60 Hz, che presenti inoltre almeno 50 dB di reiezione alla frequenza di 753 Hz. Si calcoli il minimo tempo di integrazione che soddisfi queste specifiche.

4b) Il voltmetro da realizzare deve avere  $4 \times 10^6$  livelli, con dinamica di  $\pm 200$  mV. Si progettino i parametri del voltmetro ( $V_r$  e  $f_{\text{clock}}$ ) in modo tale che il massimo tempo di discesa coincida con il tempo di salita.

4c) Il voltmetro ha un rumore elettronico interno pari a 100 nV (efficaci). Se ne calcoli la risoluzione  $\Delta V$  e il numero di bit equivalenti.

4d) Intendiamo impiegare il voltmetro per misurare con accuratezza un segnale proveniente da un sensore. Come conviene effettuare la connessione tra il sensore e il voltmetro, al fine di minimizzare i disturbi dovuti ad accoppiamenti induttivi e capacitivi?

**4a)** È possibile rendere la misura immune da disturbi a frequenza fissa utilizzando un tempo di integrazione  $T_1$  che sia multiplo intero del periodo del disturbo (si vedano le dispense del corso).

In questo caso si vuole annullare il contributo di due frequenze:  $f_1 = 50$  Hz e  $f_2 = 60$  Hz, per cui  $T_1 = n T_1$  e anche  $T_1 = m T_2$  con  $m$  e  $n$  numeri interi da determinare.

$$\text{Ricaviamo quindi i due numeri: } \frac{n}{f_1} = \frac{m}{f_2} \Rightarrow \frac{n}{m} = \frac{f_1}{f_2} = \frac{50}{60} = \frac{5}{6}$$

Il tempo di integrazione deve essere un multiplo intero di  $n T_1 = 5 \times 20 \text{ ms} = 0.1 \text{ s}$  ( $=m T_2$ ).

A questo punto verifichiamo la reiezione a 753 Hz. La reiezione del voltmetro a integrazione a un disturbo a frequenza  $f$  vale  $R = \frac{\pi f T_1}{|\sin(\pi f T_1)|}$ , per cui a  $f = 753$  Hz, con  $T_1 = 0.1$  s, la reiezione vale

$$R = 20 \log_{10} \left( \frac{\pi f T_1}{|\sin(\pi f T_1)|} \right) = 20 \log_{10} \left( \frac{\pi \times 753 \times 0.1}{|\sin(\pi \times 753 \times 0.1)|} \right) \cong 49.3 \text{ dB}$$

Tale valore non soddisfa le specifiche, per cui ripetiamo i calcoli con  $T_1 = 0.2$  s.

$$R = 20 \log_{10} \left( \frac{\pi f T_1}{|\sin(\pi f T_1)|} \right) = 20 \log_{10} \left( \frac{\pi \times 753 \times 0.2}{|\sin(\pi \times 753 \times 0.2)|} \right) \cong 54 \text{ dB}$$

In conclusione scegliamo un tempo di integrazione  $T_1 = 0.2$  s.

**4b)** Dato che il massimo tempo di discesa deve coincidere con il tempo di salita, la tensione di riferimento  $V_r$  dovrà essere pari al fondo scala dello strumento:  $V_r = 200 \text{ mV}$ .

Il periodo  $T_{\text{clock}}$  dell'orologio interno del voltmetro può essere ricavato dalla relazione funzionale che lega la tensione in ingresso al voltmetro a doppia rampa con il tempo di discesa:

$$\frac{V_{\text{in}}}{T_{\text{down}}} = \frac{-V_r}{T_{\text{up}}}$$

In questo caso si può anche ricavare direttamente: per la massima tensione d'ingresso (200 mV) nel tempo di discesa dovranno essere contati  $2 \times 10^6$  livelli (si ricordi che il voltmetro è a dinamica bipolare). Dato che il tempo di discesa massimo è pari al tempo di salita  $T_1 = 0.2$  s, si ricava che

$$T_{\text{clock}} = \frac{T_1}{2 \times 10^6} = 0.1 \mu\text{s}$$

Corrispondenti a una frequenza  $f_{\text{clock}} = 10 \text{ MHz}$ .

**4c)** La risoluzione dimensionale del voltmetro è pari alla dinamica dello strumento divisa per il suo numero di livelli e quindi:  $\Delta V = D / N = 400 \text{ mV} / 4 \times 10^6 = 100 \text{ nV}$

Il numero di bit dello strumento vale  $n = \log_2(4 \times 10^6) = 21.93 \cong 22 \text{ bit}$ . (avendo incluso in tale numero anche il “bit di segno”). L’incertezza di quantizzazione, essendo la risoluzione  $\Delta V = 100 \text{ nV}$ , vale  $\sigma_q = \Delta V / \sqrt{12} \cong 29 \text{ nV}$ , mentre la deviazione standard del rumore (pari al suo valore efficace) vale  $\sigma_N = 100 \text{ nV}$ .

Il numero di bit equivalenti vale dunque

$$n_e = n - (1/2) \log_2(1 + \sigma_N^2 / \sigma_q^2) = 21.93 - (1/2) \log_2[1 + (100 \text{ nV})^2 / (29 \text{ nV})^2] \cong 20.1 \text{ bit}$$

**4d)** Si può utilizzare un doppino intrecciato e schermato, con schermo conduttivo connesso a massa solo da un lato. L’intreccio è utile per minimizzare gli accoppiamenti induttivi, la schermatura attenua gli accoppiamenti capacitivi.

**Esercizio \_\_\_\_ (continua)**

*[foglio aggiuntivo per eventuale esercizio "lungo"]*

**INDICARE IL RICHIAMO IN FONDO ALLA PAGINA DELL'ESERCIZIO CORRISPONDENTE**

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari