

MISURE E STRUMENTAZIONE**martedì 23 giugno 2020****Prof. Michele Norgia****Terzo appello AA 2019/2020****Tempo a disposizione 1 h 30 min (45 min solo II parte)****ore 15.00**

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****(30 min)****Esercizio 1***(svolgere su questo foglio e sul retro)*

1) Dobbiamo caratterizzare un circuito elettronico (descritto in figura), che utilizza un moltiplicatore analogico M. Per prima cosa forniamo diversi valori in ingresso e misuriamo il valore del coefficiente di moltiplicazione A, ottenendo i seguenti valori:

$$A = [11.05, 9.98, 10.4, 9.75, 10.03] \text{ V}^{-1}$$



1a) Si ricavi la misura di A e la sua incertezza tipo.

1b) La tensione V_1 è fornita da un generatore tarato 1 anno prima, con incertezza dichiarata $9 \cdot 10^{-3} + 10^{-3}/\text{anno}$, con valore impostato a 1 V. La tensione V_2 è invece ottenuta imponendo la corrente $I = 1 \text{ mA}$ (nota con incertezza trascurabile), su di una resistenza R da 100Ω , con specifica di errore massimo del 5% (che interpretiamo come un valore a 3σ). Si calcoli il valore della tensione V_M in uscita dal moltiplicatore e la sua incertezza relativa.

1c) La tensione V_0 a valle del moltiplicatore si ottiene sommando infine la tensione V_1 . Si calcoli V_0 e la sua incertezza estesa con fattore di copertura 95.5%.

1a) Dalle $n=5$ misure ripetute, si ricava un valor medio

$$A = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i = 10.242 \text{ V}^{-1}$$

e una incertezza di categoria A

$$u(A) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (A_i - \bar{A})^2} = 0.23 \text{ V}^{-1}$$

La misura è $A = 10.24(23) \text{ V}^{-1}$.1b) La tensione V_M è data da:

$$V_M = AV_1V_2 = AV_1RI = 1.024 \text{ V}$$

Dato che l'equazione della misura è una produttoria delle grandezze d'ingresso, l'incertezza relativa dell'uscita è semplicemente legata alle incertezze relative degli ingressi dall'espressione

$$u_r(V_M) = \sqrt{u_r^2(A) + u_r^2(V_1) + u_r^2(R) + u_r^2(I)}$$

Calcoliamo le incertezze relative dei singoli ingressi:

$$u_r(A) = u(A)/A \cong 2.3 \%$$

$$u_r(V_1) \cong 9 \cdot 10^{-3} + 10^{-3}/\text{anno} \times 1 \text{ anno} = 1 \%$$

$U_r(R) = 5 \%$, specificata a 3σ , per cui $u_r(R) = 1.7 \%$,

$u_r(I)$ è invece trascurabile (come specificato nel testo).

Si ottiene quindi l'incertezza relativa su V_M

$$u_r(V_M) = \sqrt{u_r^2(A) + u_r^2(V_1) + u_r^2(R)} \cong 3.0 \%$$

e una incertezza assoluta

$$u(V_M) = u_r(V_M) \times V_M = 31 \text{ mV}$$

1c) L'espressione della tensione V_0 è:

$$V_0 = V_M + V_1 = AV_1V_2 + V_1 = AV_1RI + V_1 = 2.024 \text{ V}$$

Per calcolarne l'incertezza non è possibile sommare quadraticamente l'incertezza di V_M con l'incertezza di V_1 , in quanto sono grandezze sicuramente correlate. È necessario quindi utilizzare la formula generale:

$$\begin{aligned} u(V_0) &= \sqrt{\left(\frac{\partial V_0}{\partial A}\right)^2 u^2(A) + \left(\frac{\partial V_0}{\partial V_1}\right)^2 u^2(V_1) + \left(\frac{\partial V_0}{\partial R}\right)^2 u^2(R) =} \\ &= \sqrt{(V_1RI)^2 u^2(A) + (ARI + 1)^2 u^2(V_1) + (AV_1I)^2 u^2(R) =} \\ &= \sqrt{5.3 \cdot 10^{-4} + 4.1 \cdot 10^{-4} + 3.0 \cdot 10^{-4}} \text{ V} \cong 35 \text{ mV} \end{aligned}$$

L'incertezza estesa con fattore di copertura 95.5% (corrispondente a 2σ) vale

$$U(V_0) = 2u(V_0) = 70 \text{ mV}$$

(15 min)

Esercizio 2

(svolgere su questo foglio e sul retro)

2a) Intendiamo acquisire contemporaneamente i seguenti segnali con una scheda DAQ che ha un campionatore interno con dinamica ± 5 V e guadagni impostabili 1, 10, 100:

- Segnale analogico con banda limitata a 100 kHz, con dinamica ± 4 V, di cui si vogliono apprezzare dettagli con risoluzione migliore di 10 mV.
- Segnale di temperatura proveniente da una termocoppia, sensibilità di $40 \mu\text{V/K}$, impiegata per misurare una temperatura intorno ai 120°C con incertezza estesa (fattore di copertura 3) di 300 mK (il giunto freddo viene mantenuto a 20°C esatti).

Si indichino le caratteristiche minime della DAQ per effettuare correttamente la misura.

2b) Intendiamo sostituire il sensore a termocoppia con un NTC ($R_0 = 10 \text{ k}\Omega$ a 25°C , $\beta = 3977 \text{ K}$), alimentato a corrente costante $I = 1 \text{ mA}$. Quanto vale la tensione misurata ai suoi capi?

2a) La scheda di acquisizione deve avere almeno 2 canali di ingresso, operanti in modalità differenziale, cosa indispensabile per misurare il segnale della termocoppia (segnale molto piccolo e non riferito a massa, che verrebbe coperto dai disturbi se connesso in modalità *single-ended*).

Volendo acquisire contemporaneamente i 2 segnali, la scheda di acquisizione deve avere una frequenza di campionamento 2 volte più grande di quella indispensabile per ciascun canale. Inoltre il numero di bit è dettato dal canale che richiede la migliore risoluzione relativa.

Il primo segnale deve essere campionato ad almeno 200 kSa/s (il doppio della sua banda di 100 kHz).

Il secondo segnale è una misura di temperatura, che quindi non presenta particolari problemi di velocità (le fluttuazioni termiche sono molto lente, tipicamente dell'ordine dei secondi).

Le dinamiche d'ingresso selezionabili regolando i guadagni della scheda sono $\pm 5 \text{ V}$, $\pm 500 \text{ mV}$, $\pm 50 \text{ mV}$, il numero di bit necessario per ogni canale diventerebbe:

1° canale – dinamica selezionata $\pm 5 \text{ V}$, $N = \text{dinamica}/\text{risoluzione} = 10 \text{ V} / 10 \text{ mV} = 1000$. Per cui il numero di bit richiesti per questo canale è $n = 10$ ($2^n = 1024$).

2° canale - L'incertezza richiesta come tensione vale $u(V) = 1/3 \times 300 \text{ mK} \times 40 \mu\text{V/K} = 4 \mu\text{V}$ (attenzione al fattore di copertura 3), a cui corrisponde un intervallo di quantizzazione (risoluzione)

$\Delta V = u(V) \times \sqrt{12} \cong 14 \mu\text{V}$ (nell'ipotesi che il contributo d'incertezza dominante sia quello di quantizzazione). Il valore di misura è $100 \text{ K} \times 40 \mu\text{V/K} \cong 4 \text{ mV}$ (si pensa di misurare temperature intorno ai 120°C , con giunto freddo a 20°C).

Dinamica selezionata $\pm 50 \text{ mV}$, $N = \text{dinamica}/\text{risoluzione} = 100 \text{ mV} / 14 \mu\text{V} = 7142$. Per cui il numero di bit richiesti è $n = 13$ ($2^n = 8192$).

Riepilogando, è necessaria una scheda operante in modalità **differenziale**, con frequenza di campionamento di **almeno 400 kSa/s** (il triplo della più alta richiesta dal singolo canale), con **almeno $n = 13$ bit**.

2b) La resistenza dell'NTC, a $120^\circ\text{C} = 393.15 \text{ K}$, vale

$$R = R_0 e^{-\beta(1/T_0 - 1/T)} \cong 398 \Omega$$

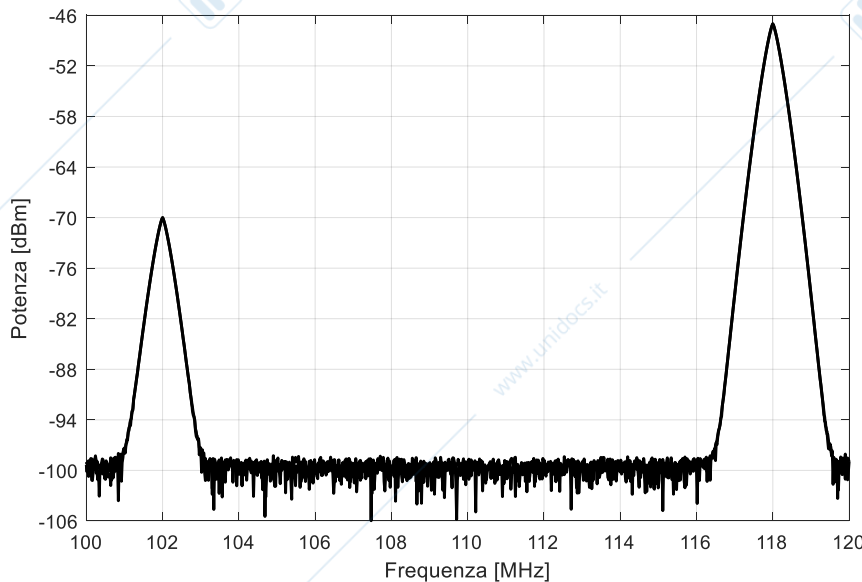
Alimentato alla corrente di 1 mA fornisce una tensione ai suoi capi $V \cong 398 \text{ mV}$.

(30 min)

Esercizio 3

(svolgere su questo foglio e sul retro)

- 3) In figura è riportato lo schermo di un analizzatore di spettro a eterodina.
 3a) Si descrivano le impostazioni dello strumento.
 3b) Si scriva l'espressione analitica del segnale misurato, considerando l'impedenza d'ingresso 50Ω .
 3c) Si calcoli il tempo che occorre per questa misura, sapendo che è stata mediata su 10 tracce.
 3d) Che RBW va impostata per ottenere 40 dB di rapporto segnale/rumore per il segnale a 102 MHz?
 3e) Che cosa vedremmo sullo schermo di un oscilloscopio digitale che misura questo segnale?



3a) Le impostazioni sono:

$f_{START}=100 \text{ MHz}$, $f_{STOP}=120 \text{ MHz}$, dunque con $SPAN=20 \text{ MHz}$, $RL=-46 \text{ dBm}$; $A_y=6 \text{ dB/DIV}$
 Le diverse righe spettrali mostrate hanno una larghezza a -3 dB dal picco pari a $RBW=300 \text{ kHz}$

3b) Il segnale è dato dalla somma di due sinusoidi:

$$s(t) = A_1 \cos(2\pi f_1 t + \varphi_1) + A_2 \cos(2\pi f_2 t + \varphi_2)$$

L'analizzatore di spettro non misura le fasi, quindi non possiamo ricavarle. Le frequenze valgono

$$f_1 = 102 \text{ MHz}; \quad f_2 = 118 \text{ MHz}$$

Le ampiezze si ricavano dalle due potenze (l'impedenza di ingresso vale sempre $R=50 \Omega$):

$$A_1 = \sqrt{2RP_1} \cong 100 \mu\text{V}, \text{ avendo considerato che } -70 \text{ dBm} \text{ corrispondono a } P_1 = 10^{-10} \text{ W}$$

$$A_2 = \sqrt{2RP_2} \cong 1.4 \text{ mV}, \text{ avendo considerato che } -47 \text{ dBm} \text{ corrispondono a } P_2 = 2 \times 10^{-8} \text{ W}.$$

3c) Il tempo di scansione per 1 traccia vale $ST=3 \times SPAN / (RBW)^2 = 0.67 \text{ ms}$ e quindi per 10 medie $T_{mis}=10 \times ST=6.7 \text{ ms}$.

3d) Il rapporto segnale-rumore ora vale circa 30 dB (si vede direttamente sullo schermo: il segnale è a -70 dBm, mentre il fondo di rumore è a circa -100 dBm). Per migliorare di 10 dB è necessario ridurre la RBW di un fattore 10 (si ricordi che il fondo di rumore visualizzato è proporzionale a RBW), quindi sarebbe necessario impostare $RBW=30 \text{ kHz}$

3e) Il segnale è la somma di due sinusodi, ma su di un oscilloscopio digitale si riuscirebbe a visualizzare solo quella a 118 MHz, perché l'altra è troppo piccolo (risulterebbe in una minima perturbazione del segnale a 118 MHz). In conclusione si visualizzerebbe un segnale sinusoidale a 118 MHz ampio 1.4 mV.

(15 min)

Esercizio 4

(svolgere su questo foglio e sul retro)

4) Un voltmetro integratore a doppia rampa, con risoluzione di $5\frac{1}{2}$ cifre e dinamica di ± 19.9999 V, opera con un orologio interno alla frequenza di 20 MHz.

4a) Il voltmetro ha un tempo di salita $T_U=20$ ms. Si calcoli la reiezione ai disturbi alle frequenze $f_1=500$ Hz e $f_2=776$ Hz, esprimendole in dB.

4b) Si calcoli la risoluzione di misura, il valore della tensione di riferimento utilizzata V_R e il numero massimo di conteggi nelle fasi di salita e discesa.

4a) Grazie al processo di integrazione, la reiezione in ampiezza ad un generico disturbo a frequenza f vale:

$$r = \frac{\pi f T_U}{|\sin(\pi f T_U)|}$$

Alla frequenza di $f_1=500$ Hz, multiplo della frequenza di rete, la reiezione sarà infinita essendo T_U pari a 20 ms (il periodo di rete). Lo stesso risultato si ottiene, anziché con il ragionamento, calcolando l'espressione precedente e ottenendo $r_1 \rightarrow \infty$.

Nel caso della frequenza $f_2=776$ Hz, occorre calcolare

$$r_2 = \frac{\pi f_2 T_U}{|\sin(\pi f_2 T_U)|} = 48.85 \text{ corrispondenti a circa } 34 \text{ dB (calcolati come } 20 \log_{10} r_2)$$

4b) Date le $5\frac{1}{2}$ cifre del *display* e la dinamica considerata, si avrà una **risoluzione $\Delta V=0.1$ mV** e un numero di livelli $N=400\,000$, che corrisponde al doppio del massimo conteggio in discesa (il voltmetro è bipolare): dunque $N_{D,MAX}=200\,000$. Il numero di conteggi in salita è invece

$$N_U = T_U / T_C = T_U f_C = 20 \text{ ms} \times 20 \text{ MHz} = 400\,000$$

Dall'equazione della misura, $V_x = -(T_D/T_U)V_R$, otteniamo il valore della tensione di riferimento V_R :

$$V_R = -\frac{T_U}{T_D} V_x = -\frac{N_U}{N_D} V_x = -\frac{N_U}{N_{D,MAX}} V_{x,MAX} = 40 \text{ V}$$