

Misure Meccaniche e Termiche

Esercizi II parte

Esercizi risolti

- 1) Si deve eseguire l'analisi in frequenza di un segnale tramite elaborazione del segnale digitalizzato, scegliere i parametri del sistema di acquisizione se la banda del segnale è 0-500 Hz e si vuole ottenere una risoluzione spettrale di 0.1 Hz.

La frequenza di acquisizione, f_c deve essere $> 2 \times f_{max}$ quindi $f_c > 1000$ Hz

La risoluzione spettrale è pari a $1/T$ dove T è la durata della finestra di osservazione quindi $T > 10$ s

In alternativa si può precisare il n° di punti da usare, $N = T f_c$, quindi $N > 10^4$

- 2) Determinare il n° di bit del convertitore A/D che si deve porre a valle di uno strumento affinché l'accuratezza dello stesso risulti non inferiore allo 0.1 % f_s ipotizzando che l'uscita di f_s dello strumento e il f_s del convertitore coincidano.

Risoluzione $r = f_s / 2^n$ pertanto $2^n = f_s / r$. Se l'accuratezza a è limitata solo dalla risoluzione $a = 0.1\% f_s = r / 2$ dunque $2^n = 1 / (0.001 * 2) = 500$. Essendo $2^9 = 512$ il convertitore deve avere almeno 9 bit. Oppure $b = \log(1 / (0.001 * 2)) / \log(2) = 8.96 \rightarrow 9$ bit. Siccome solitamente i convertitori disponibili in commercio hanno un numero pari di bit, si sceglierà un convertitore a 10 bit.

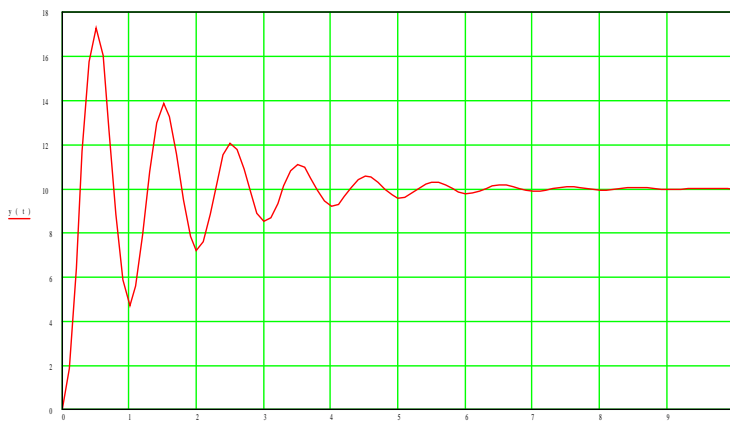
- 3) Confrontare l'incertezza nella misura di deformazione tramite estensimetri elettrici sfruttando i due metodi seguenti, nell'ipotesi che l'incertezza di misura dipenda principalmente dalla risoluzione dei convertitori A/D:
- Misura diretta della resistenza con un multimetro che sfrutta un convertitore A/D a 16 bit, $f_s = 1000 \Omega$
 - Inserimento in un ponte di Wheatstone, alimentato a 10 V, bilanciato ad estensimetro scarico e in cui la lettura dello sbilanciamento viene fatta con multimetro avente un convertitore A/D ad 8 bit e $f_s = 10$ mV.

- a) Risoluzione nella misura di resistenza $r = 1000 / 2^{16} \Omega = 0.015 \Omega$. La deformazione viene ottenuta da $\epsilon = (R - R_0) / (R_0 G_f)$, in ogni misura di resistenza si ha la risoluzione vista sopra, propagando l'incertezza e assumendo $G_f = 2$, $R_0 = 120 \Omega$ si ottiene $i_\epsilon = 2.6 * 10^{-5}$
- b) Risoluzione in tensione $r_v = 10 / 2^8$ mV = 0.039 mV. Con singolo estensimetro la legge del ponte si riduce a $V = E / 4 * G_f * \epsilon$, quindi $\epsilon = 4 * V / (E * G_f)$. L'incertezza della differenza di tensione si ottiene come $i_v = 2 * r_v / (2 * 3)$. Quindi propagando l'incertezza si ottiene $i_\epsilon = 3.2 * 10^{-6}$

- 4) Esprimere l'incertezza sulla frequenza di risonanza di una struttura ottenuta dal massimo della trasformata di Fourier della risposta all'impulso nel caso in cui lo spettro in frequenza sia ottenuto da un analizzatore di spettro che ha frequenza di campionamento 2 kHz ed elabora gruppi di 1024 dati.

La durata della finestra di osservazione $T = N / f_c = 1024 / 2000 = 0.05$ s. Risoluzione spettrale $= 1/T = 1.9$ Hz, per esprimere l'incertezza standard $i = r / 2\sqrt{3} = 0.56$ Hz

- 5) Uno strumento soggetto ad un ingresso a gradino unitario ha fornito la risposta di figura, cui corrispondono i valori dei massimi e minimi relativi di tabella. Ipotizzare di che tipo di strumento si tratta e determinarne i parametri caratterizzanti il comportamento dinamico.



Tempo [s]	0.5	1	1.5	2	2.5	3.0	3.5	4.0
Ampiezza [V]	17.29	4.68	13.87	7.18	12.06	8.50	11.09	9.21

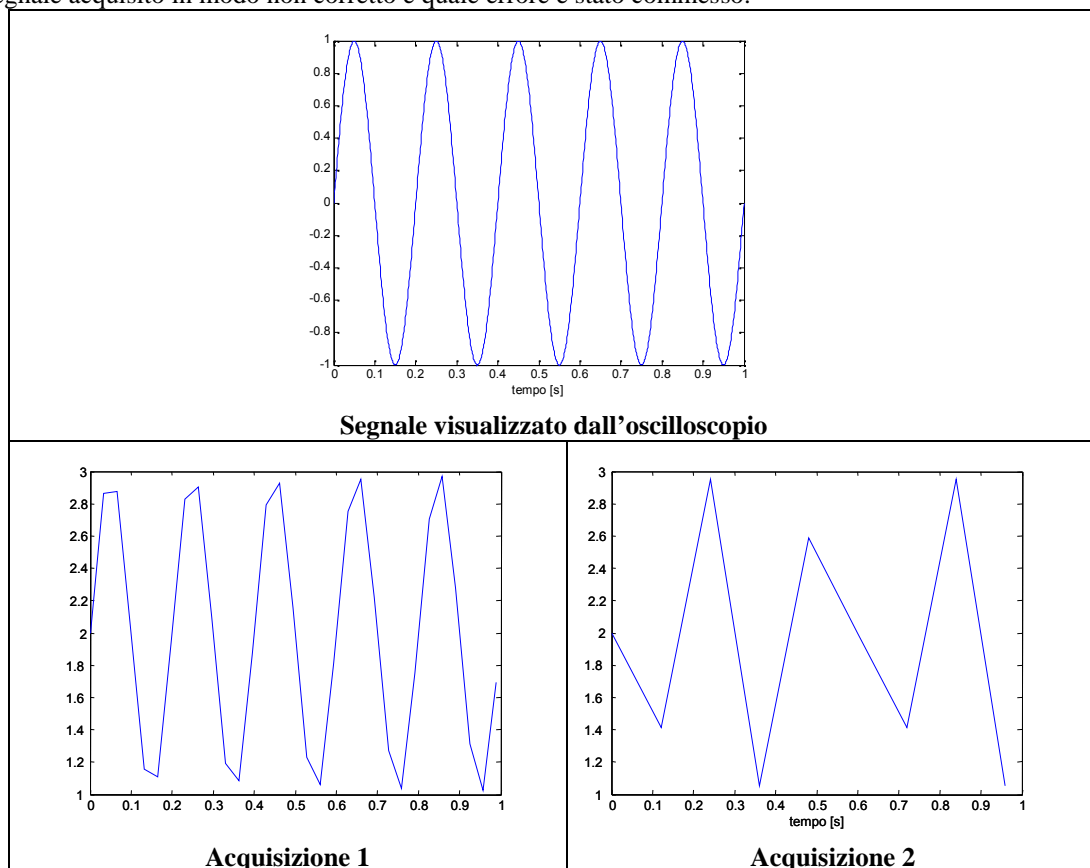
La risposta oscillante smorzata suggerisce uno strumento del II ordine con rapporto di smorzamento sottocritico, il periodo risulta essere di un secondo mentre il rapporto di smorzamento si può ottenere dal decremento logaritmico. Il valore asintotico appare essere 10 dal diagramma quindi l'ampiezza $A_1=17.29-10=7.29$, $A_2=13.87-10=3.87$ quindi $\zeta=\ln(7.29/3.87)/2\pi=0.10$. La pulsazione naturale vale allora $\omega_0=2\pi/T\sqrt{1-\zeta^2}=6.3$ rad/s. Per verifica si calcola il decr. logaritmico usando A_1, A_3 $\zeta= \ln(7.29/2.06)/(2*2\pi)=0.10$, è verificata l'ipotesi di strumento del secondo ordine.

Esercizi non risolti

Esercizio 1

Un segnale viene visualizzato su un oscilloscopio (vedi figura), e viene acquisito con un sistema di acquisizione impostando diversi parametri (fondo scala, frequenza di acquisizione, ecc.).

B1. Le due acquisizioni sono state fatte in modo corretto? In caso negativo di almeno una delle due, specificare quale è il segnale acquisito in modo non corretto e quale errore è stato commesso.



B2. Viene ricavato lo spettro del segnale sopra riportato. Quale è la risoluzione in frequenza dello spettro?

Si supponga che il segnale visualizzato dall'oscilloscopio sia originato da un trasduttore di spostamento. Il trasduttore di spostamento ha uscita nel campo 0-10 V.

B3. In quale modalità è stato utilizzato l'oscilloscopio per ottenere il diagramma presentato?

La sensibilità del sensore di spostamento è pari a 100 V/m. La scheda è a 12 bit e si può scegliere tra i seguenti fondo scala: ± 0.1 V, ± 2.5 V, ± 5 V, ± 10 V.

B4. Quale fondo scala va scelto?

B5. Quanto vale il LSB per il trasduttore di spostamento?

B6. Quanto vale l'ampiezza dello spostamento che ha generato il segnale?

[B1: aliasing in acq2; B2: 1 Hz; B3: AC; B4: ± 5 V; B5: 24 μ m; B6: 10 mm]

Esercizio 2

C1. Dato il segnale $y(t) = 2 + 4 \cos(16t + 60^\circ) - 10 \sin(30t - 45^\circ)$, disegnarne lo spettro in modulo e fase.

C2. Si vuole acquisire il segnale senza commettere leakage: su quale parametro bisognerà porre attenzione? E quanto dovrà valere in questo caso?

[C1: freq: 0, 8, 15 Hz; mod: 2, 4, 10; fase: 0, 60, 45°; C2: $\text{mcm}(1/8, 1/15)=1$ s o multiplo intero]

Esercizio 3

Si deve effettuare una misura di vibrazione flessionale di una trave vincolata al terreno ai due estremi, con due appoggi. La trave ha le seguenti caratteristiche: $L=1$ m, $E=70$ GPa, $b=10$ mm, $h=2$ mm, $\rho=2700$ kg/m³. Si dispone dei seguenti trasduttori, con le caratteristiche riportate:

- Accelerometro piezoelettrico: banda passante 1 Hz-20 kHz, sensibilità 1 mV/(m/s²), fondoscala ± 5000 m/s², massa 1 g;
- Servo accelerometro: banda passante 0-250 Hz, sensibilità 1000 mV/(m/s²), fondoscala ± 100 m/s², massa 80 g;
- Laser triangolazione: banda passante <1000 Hz, fondoscala ± 5 mm, sensibilità 2 V/mm, massa 200 g.

Il sistema di acquisizione è composto da una scheda di acquisizione con convertitore a 12 bit e fondo scala ± 2.5 V.

A1. Con quali trasduttori, nel caso in esame, sono in grado di misurare correttamente una vibrazione di 1 mm

di spostamento per il primo modo? [si ricorda che $f_n = \frac{\left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 \sqrt{\frac{EJ}{\rho A}}}{2\pi}$ e $J = \frac{1}{12}bh^3$]

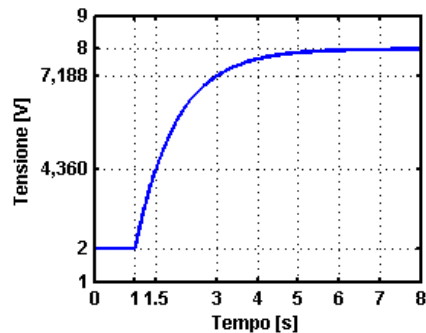
A2. Si acquisisce il segnale in tensione e si vuole ottenere le misure delle prime quattro frequenze proprie con una risoluzione di 0.01 Hz, quanto dovranno valere frequenza di acquisizione e tempo di acquisizione? (motivare le risposte)

A3. Ai fini del punto precedente, è opportuno utilizzare un filtro antialiasing? Dove deve essere posizionato nella catena di misura? (motivare le risposte)

Esercizio 4

Si utilizza un termometro a termocoppia di sensibilità 1 V/°C per misurare un gradino di temperatura da 2 °C a 8 °C. Il diagramma temporale del segnale acquisito [V] è riportato nella figura seguente.

a) Si determini graficamente la costante di tempo.



b) Se gli unici due punti del transitorio di cui si conoscono le coordinate sono quelli riportati in tabella seguente determinare analiticamente la costante di tempo τ della termocoppia. (Si suggerisce di utilizzare il metodo logaritmico).

t [s]	[V]
1.5	4.360
3	7.188

Esercizio 5

Si vuole misurare una temperatura che varia con legge sinusoidale, avendo a disposizione un termometro con costante di tempo pari a 15 s. Qual è la frequenza massima del segnale misurabile, supponendo accettabile un'attenuazione in modulo < 30%?

Esercizio 6

Si consideri un generico segnale periodico con componenti in frequenza comprese tra 0 e 10 Hz.

a) A che frequenza è necessario acquisire il segnale per non commettere aliasing?

Si supponga di aver acquisito il segnale con una frequenza di campionamento di 50 Hz per un tempo $T = 5.12$ s e di aver applicato l'algoritmo FFT (Fast Fourier Transform) per calcolarne lo spettro. Il quinto elemento del vettore restituito dalla FFT vale $1.81 \cdot 10^{-12} - 2.5 \cdot 10^2 \cdot i$:

b) Quale componente in frequenza (Hz) rappresenta?

c) Quanto valgono modulo e fase di tale componente?

Esercizio 7

Si vuole misurare lo spostamento di un pistone che si muove di moto sinusoidale con frequenza 1.5 Hz ed ampiezza 50 mm, utilizzando un LVDT di sensibilità nota 100 mV/mm. Il segnale restituito dal trasduttore viene acquisito con un sistema di acquisizione a 8 bit e fondo scala selezionabile a ± 0.5 V, ± 2.5 V, ± 5 V.

a) Quale risoluzione si ottiene utilizzando un fondo-scala ± 5 V?

b) Quanto vale la misura realizzata con i parametri proposti?

c) Com'è possibile aumentare la risoluzione ottenibile? Che risoluzione si può ottenere?

d) Volendo utilizzare un accelerometro di sensibilità $1000 \frac{\text{mV}}{\text{m/s}^2}$ per misurare l'accelerazione del pistone, quale fondo-scala si dovrebbe utilizzare?

Esercizio 8

Si desidera acquisire in modo corretto il segnale di spostamento rappresentato in figura 1:

- A1. Si desidera eseguire un'analisi in frequenza del segnale di spostamento in figura 1. Operativamente quale metodologia si dovrà impiegare sui dati acquisiti? Disegnare inoltre lo spettro del segnale di spostamento (modulo e fase).
- A2. A quale frequenza dovrà essere campionato il segnale?
- A3. E' possibile utilizzare lo strumento di spostamento la cui funzione di trasferimento è riportata in figura 2? Giustificare.
- A4. Qualora il trasduttore utilizzato abbia la stessa sensibilità del trasduttore descritto dalla FdT di figura 2, scegliere il fondo scala da impostare sulla scheda di acquisizione [12 bit, fondo scala possibili: ± 0.5 V, ± 1 V, ± 2.5 V, ± 5 V, ± 10 V]. E quanto vale la risoluzione in termini di spostamento?
- A5. Si decide di acquisire il segnale anche tramite un accelerometro avente sensibilità 10 mV/ms^2 . Quali vantaggi si avrebbero da questa soluzione? Disegnare lo spettro in accelerazione (modulo e fase).

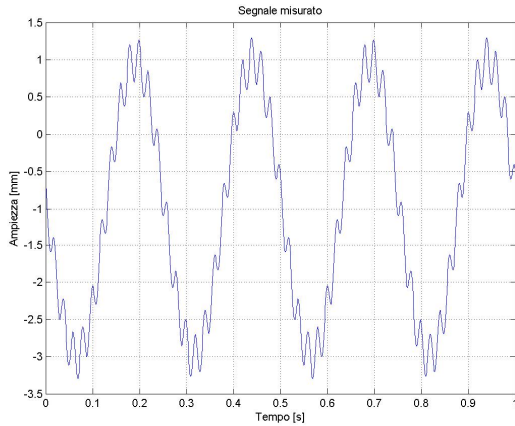


Fig. 1

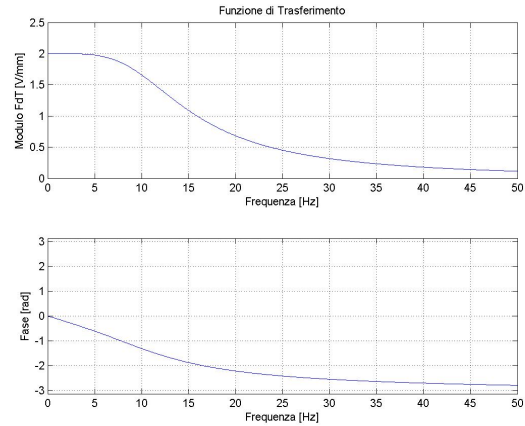


Fig. 2

[A1: freq:0, 4, 50 Hz, mod: 1, 2, ~ 0.3 mm, fase: 180° , 90° , boh (ovvero non si può capire dal grafico)]; A2: >100 Hz;
 A3: no se interessa anche 50 Hz; A4: ± 10 V, $2.5 \mu\text{m}$; A5: si vede meglio il segnale ad alta frequenza, freq:0, 4, 50 Hz,
 mod: 0, 1.3, $\sim 30 \text{ m/s}^2$, fase 0° , -90° , boh+ 180°]

Esercizio 9

- B1. Si misurano le vibrazioni libere di un sistema tramite un trasduttore di spostamento senza contatto. Si sollecita il sistema con un gradino di 3 mm e si misura l'uscita in figura 3. Si determinino i parametri del sistema meccanico.
- B2. Un trasduttore a contatto con effetto di carico non trascurabile avrebbe fornito la stessa risposta? In caso negativo indicare qualitativamente come si sarebbero modificati i parametri del sistema meccanico.
- B3. Indicare graficamente almeno un altro metodo per la determinazione dei parametri del sistema meccanico.

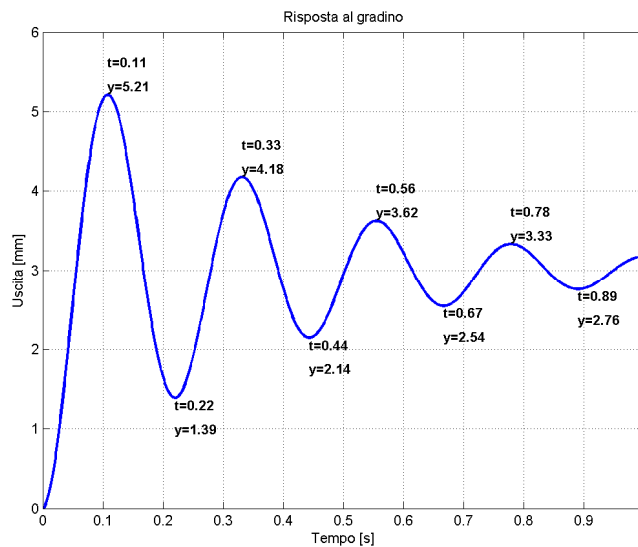


Fig. 3

[B1: $k=1$, $f_n=4.5$ Hz, $h=10\%$]

Esercizio 10

Volendo misurare il comportamento di una struttura con tre accelerometri e sapendo che il segnale utile è nella banda compresa tra 0 e 600 Hz,

- A1. quale frequenza di campionamento si deve impostare sulla scheda di acquisizione dati?
- A2. Si hanno a disposizione tre schede di acquisizione dati con frequenze massime di 1 kHz, 3 kHz, 5 kHz. Quale delle tre va scelta nel caso in cui la scheda disponga di un solo convertitore A/D?
- A3. E se la scheda avesse un convertitore A/D per ciascun canale?
- A4. Qualora vi siano disturbi elettromagnetici ad elevata frequenza e il sistema disponga di filtri anti-aliasing, a quale frequenza va regolato il filtro passa basso antialiasing? Si può mantenere la frequenza di campionamento scelta in precedenza?

Si vuole misurare uno spostamento con ampiezza di 10 mm. Il trasduttore di spostamento utilizzato ha uscita nel campo 0-10 V: lo zero meccanico (uscita in tensione con sistema in quiete) è pari a 3.5 V. La sensibilità del sensore di spostamento è pari a 100 V/m. La scheda è a 12 bit e si può scegliere tra i seguenti fondo scala: ± 0.1 V, ± 2.5 V, ± 5 V, ± 10 V.

- A5. Quale fondo scala bisogna scegliere?
- A6. Quanto vale l'incertezza nella misura di spostamento? (in millimetri)
- A7. Se si riuscisse ad eliminare il valor medio, la risoluzione del convertitore migliorerebbe? Nel caso di risposta affermativa spiegare di quanto. Illustrare inoltre le tecniche adatte a togliere il valor medio e mostrarne vantaggi e svantaggi.

Esercizio 11

Si vuole effettuare una misura di temperatura in un bagno di liquido caldo. Si decide di impiegare una termocoppia con una $\tau=30$ s. La termocoppia si trova inizialmente a temperatura ambiente (20°C). La termocoppia dopo 45 s di immersione nel bagno fornisce il valore di 135°C .

- B1. Si vuole conoscere la reale temperatura del liquido.
- B2. Quanto tempo bisogna attendere al fine di avere una lettura che non si discosti più di 3°C dal valore di temperatura del liquido.

[B1: 168°C ; B2: 117 s]

Esercizio 12

Tramite un accelerometro di cui è sono dichiarate sensibilità $10\text{ mV}/(\text{m/s}^2)$, frequenza di risonanza 15 kHz, rapporto di smorzamento del 10 %, tempo di scarica 50 s, si misura una vibrazione acquisendo tramite un convertitore A/D a 12 bit, range ± 5 V, con una frequenza di campionamento di 50 kHz, per 10 s. Dallo spettro ottenuto tramite FFT si evidenzia una componente alla frequenza di 10 kHz di ampiezza 2 m/s^2 . Determinare:

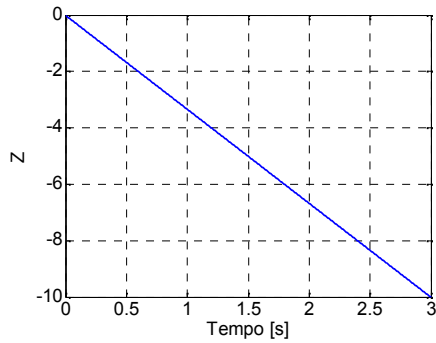
- 1) se il valore letto sia corretto o se sia utile applicare una correzione per tener conto del comportamento dinamico dell'accelerometro (*suggerimento: si scriva preliminarmente la funzione di trasferimento dell'accelerometro*)
- 2) non essendo presente un filtro antialiasing nel sistema la frequenza e l'ampiezza di una componente che in aliasing fosse vista come la componente precedente a 10 kHz
- 3) la risoluzione spettrale che si ottiene dalla FFT.
- 4) se si registra un valore di picco di accelerazione pari a 120 m/s^2 quale sia l'incertezza da associare assumendo che questa dipenda dal solo convertitore A/D.

Esercizio 13

In un ambiente si misura con una macchina in funzione un livello di pressione acustica di 80 dB quando a macchina spenta il livello misurato è di 60 dB.

- 1) Scrivere i valori di pressione corrispondenti ai due livelli
- 2) Valutare il livello di pressione acustica dovuto alla sola macchina.

Esercizio 14



Una termocoppia di sensibilità $0.5 \text{ V}/^\circ\text{C}$ e costante di tempo incognita è utilizzata per acquisire un gradino termico di 40°C . Volendo calcolare la costante di tempo τ con il metodo logaritmico, si ottiene il diagramma a lato. Calcolare la costante di tempo.

Esercizio 15

Una termocoppia con costante di tempo $\tau=2 \text{ s}$ e sensibilità $10 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ è utilizzata per acquisire la temperatura all'interno di un forno con andamento: $T(^\circ\text{C}) = 220 + 10 \cdot \sin(5t + 0.2) + 2 \cdot \sin(50t + \pi)$. Determinare il segnale in tensione restituito dalla termocoppia.

Esercizio 16

Avendo a disposizione una scheda di acquisizione con le seguenti caratteristiche: 16 ingressi analogici (con multiplexer), intervallo di campionamento minimo $1 \mu\text{s}$, 12 bit di risoluzione e fondoscala da $+5 \text{ V}$ a -5 V , dire se i seguenti segnali possono essere acquisiti "simultaneamente":

- 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 $-0.05 \text{ mV} \leq V_5 \leq 0.05 \text{ mV}$.

Per i segnali acquisibili "simultaneamente" definire la frequenza di campionamento, indicare quale guadagno dell'amplificatore a monte del convertitore A/D verrà utilizzato al fine di ottenere la massima risoluzione su ogni canale (Il guadagno per ogni canale può essere differente ma sono disponibili i valori 1, 10, 100, 1000) e l'incertezza della misura di tensione su ciascun canale.

Esercizio 17

Si misura la vibrazione di una piastra con un accelerometro di sensibilità $1 \text{ mV}/(\text{m/s}^2)$. Il segnale di uscita (V) viene acquisito con frequenza di campionamento 16384 Hz . Si applica l'algoritmo di FFT ad una finestra temporale di 4096 punti.

Si riportano in tabella a lato i primi 9 elementi del vettore restituito dalla FFT di Matlab.

0.005
0.2+0.4i
0.3-0.5i
0.5-0.1i
0.25+0.1i
0.13+0.16i
0.07-0.8i
0.1-0.01i
0.4+0.05i
...

- a) Di quanti elementi è composto il vettore fornito in uscita dall'algoritmo FFT?
- b) Qual è la risoluzione in frequenza dello spettro generato?
- c) Calcolare modulo (m/s^2) e fase della componente della vibrazione a 12 Hz .

Esercizio 18

Un accelerometro piezoelettrico con frequenza naturale $f_n=2 \text{ kHz}$, rapporto di smorzamento $\zeta=0.05$, tempo di scarica $\tau=10 \text{ s}$, sensibilità $1 \text{ mV}/(\text{m/s}^2)$ viene usato per misurare una accelerazione periodica con periodo di circa 0.02 s di cui è noto che sono significative le prime 20 componenti armoniche. Si tracci il diagramma di Bode della funzione di trasferimento dell'accelerometro e si discuta se è adeguato alla misura proposta valutando il modulo dell'errore relativo massimo che viene commesso sulle componenti armoniche significative del segnale.

Esercizio 19

Nella misura di cui all'esercizio precedente il segnale in uscita all'accelerometro è stato acquisito con una scheda di conversione A/D a 16 bit e range $\pm 10 \text{ V}$, leggendo un valore di massimo pari a 278.2 mV , si scriva la misura corrispondente di massima accelerazione.

Esercizio 20

Per la misura di cui agli esercizi precedenti si scelga la frequenza di campionamento corretta tra quelle disponibili: $f_c=1; 2; 5; 10; 20; 50; 100; 200; 500; 1000; 2000; 5000; 10000; 20000; 50000; 100000; 200000; 500000$ Hz.

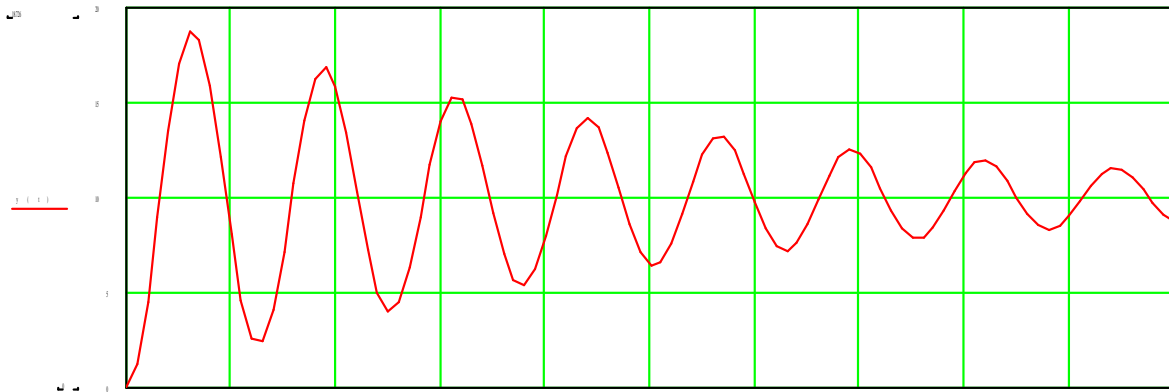
Noto che il sistema acquisisce 16384 campioni si scriva l'incertezza nelle misure di frequenza fatte sulla FFT del segnale acquisito.

Esercizio 21

Una termocoppia con costante di tempo $\tau=2.5$ s viene utilizzata in un sistema di sicurezza di un forno per misurare la temperatura dell'aria in uscita di un banco di resistenze elettriche che viene regolato con logica di tipo on/off al fine di evitare che possa essere prodotta aria ad una temperatura superiore ai 165°C per un tempo superiore a 5 s. Considerando che l'inerzia termica delle resistenze sia trascurabile e quindi l'andamento di temperatura sul termometro sia approssimabile con un gradino al momento dell'accensione delle resistenze, noto che nella situazione peggiore all'avviamento la temperatura di partenza può essere di 15°C dire a quale valore di temperatura letta dal termometro si inserirebbe il comando di spegnimento delle resistenze.

Esercizio 22

1. Uno strumento ha fornito la risposta ad un ingresso a gradino unitario illustrata in figura ed i cui primi massimi e minimi relativi sono riportati in tabella. Ipotizzare il tipo di strumento (ordine) e valutarne i parametri dinamici.



t [s]	0.6	1.3	1.9	2.5	3.1	3.8	4.4	5.0	5.7	6.3	regime
Y(t)	18.73	2.40	16.84	3.97	15.20	5.34	14.15	6.39	13.16	7.16	10