

ANNO SCOLASTICO 2014-2015
ESAME DI STATO DI ISTRUZIONE SECONDARIA SUPERIORE
Indirizzo: ITAT – ELETTROTECNICA ED ELETTRONICA
ARTICOLAZIONE AUTOMAZIONE

Tema di: SISTEMI AUTOMATICI

Il candidato svolga la prima parte della prova e due tra i quesiti proposti nella seconda parte.

PRIMA PARTE

Si vuole dotare un braccio di un robot, provvisto di una pinza all'estremità, della capacità di misurare la distanza che separa la pinza dall'oggetto da prelevare.

Per evitare di sovraccaricare il meccanismo, il braccio deve anche rilevare la forza peso dell'oggetto da sollevare; a tale scopo il braccio è dotato di un trasduttore di posizione e di uno in grado di rilevare la forza peso.

Il trasduttore di posizione è formato da una coppia emettitore-ricevitore di luce infrarossa, ha un'uscita in tensione con caratteristica lineare come descritta:

- a. alla distanza massima di 80 cm eroga 0,4 V;
- b. alla distanza minima di 5 cm eroga 2,3 V.

Il trasduttore di forza peso è una cella di carico a ponte resistivo e possiede un'uscita di tipo differenziale; alimentando il ponte con una tensione di 12 V e applicando la forza peso massima pari a 80 N si ottiene una tensione differenziale di 0,25 V, mentre in assenza di peso si ottiene una tensione di 0 V.

I segnali provenienti dai due trasduttori devono essere condizionati nell'intervallo di tensione da 0 a 5 V e convertiti in segnali numerici per essere inviati ad una scheda di controllo a microcontrollore o PLC che gestisce la pinza, tenendo conto del fatto che il sistema deve valutare la posizione dell'oggetto con un errore massimo di 2 mm e misurare la forza peso con un errore massimo di 0,2 N.

Le grandezze misurate, oltre ad essere acquisite dal sistema, devono poter essere visualizzate localmente su dei display o visori LCD.

Il candidato, utilizzando un sistema di propria conoscenza e fatte le ipotesi aggiuntive ritenute idonee:

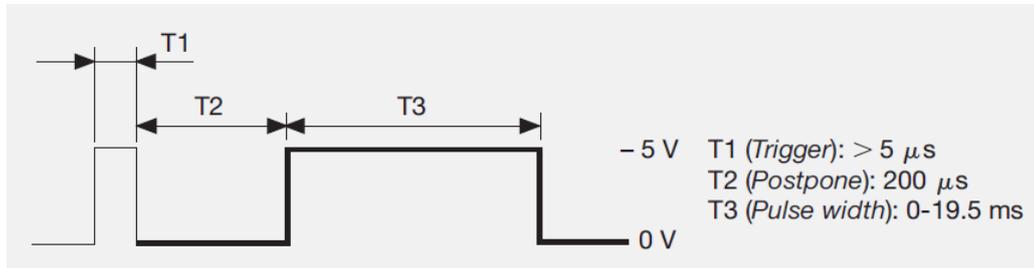
1. disegni lo schema a blocchi del sistema di acquisizione descrivendo la funzione dei singoli blocchi e identificandone le relazioni ingresso/uscita;
2. individui la risoluzione ed il tipo di convertitore analogico-digitale necessario a garantire le condizioni di precisione richieste, scegliendo un intervallo di campionamento idoneo al controllo in oggetto e motivandone la scelta;
3. realizzi il diagramma di flusso di gestione del sistema e ne codifichi un segmento significativo.

SECONDA PARTE

QUESITO 1

Se il trasduttore di posizione anziché essere composto da una coppia emettitore-ricevitore di luce infrarossa fosse composto da una coppia di trasduttori ultrasonici, la misura della

distanza in questo caso sarebbe di tipo indiretto; misurando la larghezza dell'impulso T3 (osservare figura) e conoscendo la velocità del segnale nell'aria (ipotizzando costante la temperatura $T=25^{\circ}\text{C}$) $V = 347$ [m/s], tramite la seguente formula $D = 0,5 \cdot V \cdot T3$ sarebbe possibile risalire alla misura della distanza.



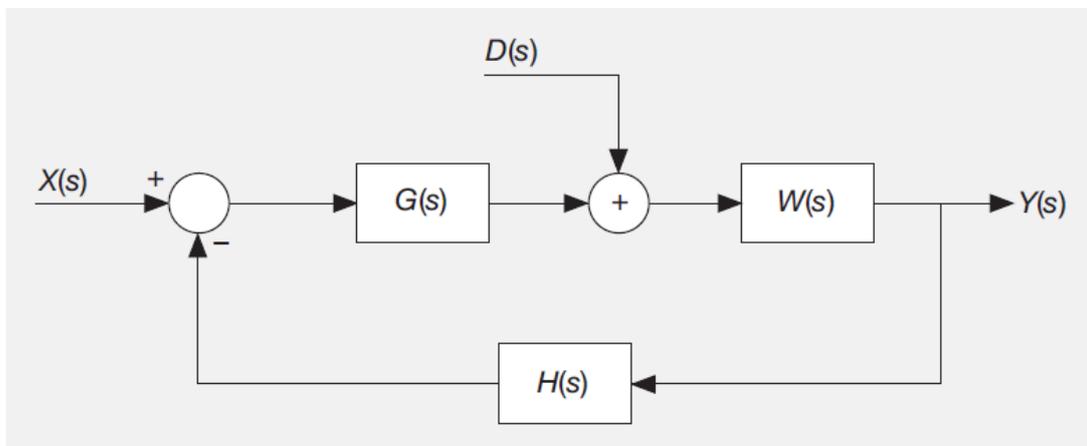
Il candidato proponga una soluzione per la misura della larghezza dell'impulso che utilizzi in parte o totalmente un microcontrollore o un PLC.

QUESITO 2

Il candidato proponga il tipo di strumentazione più idonea per collaudare il funzionamento dei circuiti di condizionamento; inoltre fornisca un algoritmo per verificare il corretto funzionamento del software del sistema.

QUESITO 3

Un impianto è rappresentato dallo schema di figura.



Dalle misure eseguite sull'impianto con un segnale sinusoidale si è rilevato che esso:

- è soggetto in ingresso ad un disturbo additivo non controllabile $D(s)$;
- si comporta come un sistema lineare le cui funzioni di trasferimento sono rispettivamente:

$$G(s) = \frac{400}{s + 40} \quad W(s) = \frac{25000}{s + 12500} \quad H(s) = \frac{1}{10}$$

Per un corretto funzionamento del sistema si progetta un controllo a retroazione inserendo nello schema un blocco compensatore $C(s)$ a monte del blocco $G(s)$.

L'impianto così modificato deve soddisfare la condizione di errore statico in uscita di valore finito e inferiore o uguale a 0,05 con ingresso $x(t)$ a gradino unitario.

Il candidato individui il tipo di sistema che sia in grado di soddisfare la specifica richiesta e calcoli il margine di fase della f.d.t. ad anello aperto con compensatore $C(s) = 1$ e disturbo nullo.

Supponendo il compensatore $C(s) = 100$, valutare l'effetto sulla risposta del sistema, a regime, con il solo segnale di disturbo $d(t) = \sin(1000t)$.

QUESITO 4

Spiegare che cosa si intende per stabilità di un sistema lineare ed indicare almeno due metodologie applicabili per la verifica della stabilità di un sistema ad anello chiuso e ad anello aperto.

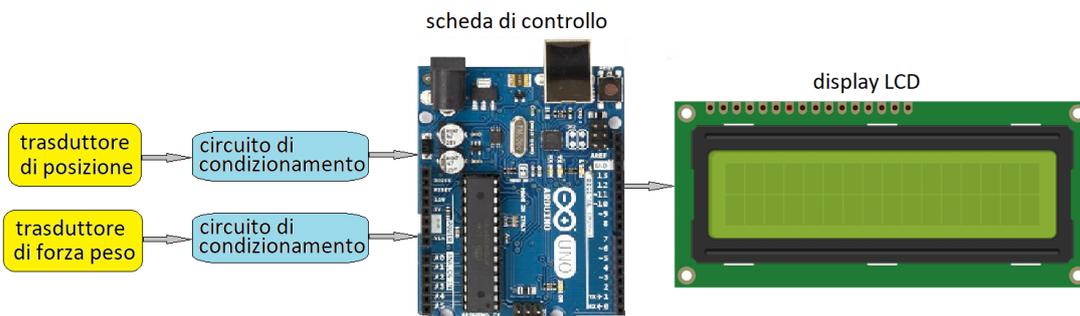
Basandosi sulle proprie competenze in materia di controlli analogici fornire quindi un esempio di sistema reale per il quale applicare le metodologie descritte e trarre le conclusioni dovute.

soluzione PRIMA PARTE

parte 1_schema a blocchi e condizionamento del segnale

Lo schema a blocchi del sistema di controllo viene di seguito riportato.

Il segnale in tensione prodotto dai due trasduttori, opportunamente condizionato, viene inviato ad una scheda di controllo (ad esempio Arduino, ma può anche essere anche una scheda a microcontrollore o un PLC); i risultati delle misure vengono visualizzati su un display LCD.



Il trasduttore di posizione eroga 0,4 V alla distanza massima di 80 cm e 2,3 V alla distanza minima di 5 cm.

Ne consegue che al segnale devono essere sottratti 0,4 V in modo da erogare 0 V alla distanza massima.

Il trasduttore erogherebbe pertanto 1,9 V alla distanza minima.

Di conseguenza, per ottenere 5 V alla distanza minima, deve essere amplificato di un fattore $5/1,9 = 2,63$.

Un circuito adatto allo scopo è un amplificatore differenziale la cui uscita V_{od} risulta dalla relazione

$$V_{od} = 2,63 (V_{tr} - 0,4)$$

essendo V_{tr} la tensione all'uscita del trasduttore.

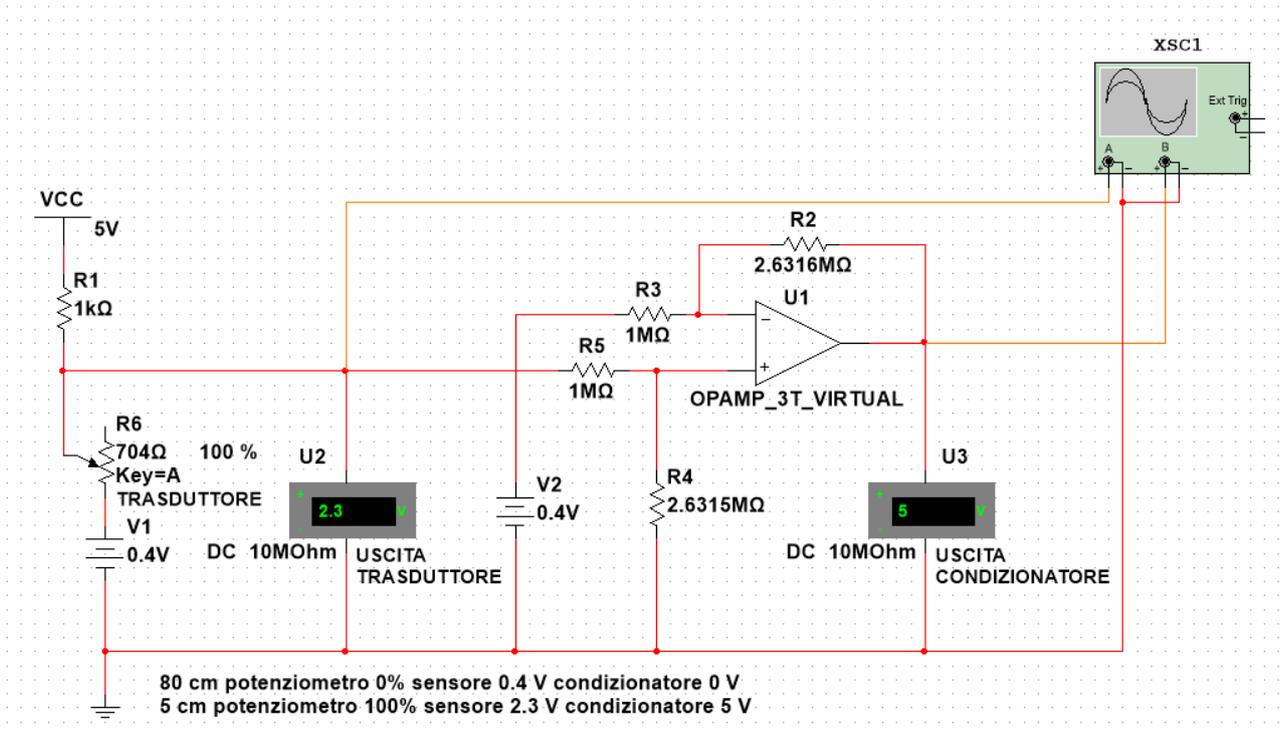
Indicando con d la distanza, risulta vera anche la relazione che esprime l'uscita del differenziale alla distanza

$$V_{od} = \frac{80 - d}{15}$$

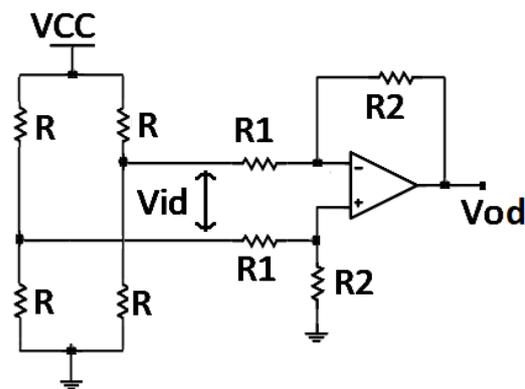
e la relazione inversa che esprime la distanza all'uscita del differenziale:

$$d = 80 - 15 V_{od}$$

Lo schema del circuito di condizionamento realizzato con il programma Multisim viene riportato nella figura seguente.



Un circuito di condizionamento tipico di una cella di carico che ha l'uscita differenziale non riferita a massa viene riportato in figura.



Con una tensione V_{od} pari a quella di alimentazione del ponte risulta

$$A_d = \frac{V_{od}}{V_{id}} = \frac{5}{0,25} = 20$$

essendo A_d l'amplificazione differenziale.

Come conseguenza deve risultare $R_2/R_1=20$ e di conseguenza si possono scegliere i valori $R_2=20\text{ k}\Omega$ e $R_1=1\text{ k}\Omega$.

Indicando con fp la forza peso, risulta vera anche la relazione che esprime l'uscita del differenziale alla forza peso

$$V_{od} = 0,0625 fp$$

e la relazione inversa che esprime la distanza all'uscita del differenziale:

$$fp = 16 V_{od}$$

parte 2_scelta del convertitore A/D

Si ipotizza l'impiego di una scheda Arduino che ha un convertitore interno a 10 bit.

Il sistema deve valutare la posizione dell'oggetto con un errore massimo di 2 mm e misurare la forza peso con un errore massimo di 0,2 N.

L'errore massimo non può essere superiore alla metà dell'intervallo di quantizzazione.

Esprimendo il valore di fondo scala non come tensione ma come grandezza da misurare, risulta:

$$\varepsilon_{max} = \frac{\Delta d}{2 \cdot 2^n} = \frac{750}{2 \cdot 2^{10}} = 0,37\text{ mm} < 2\text{ mm}$$

per la distanza e

$$\varepsilon_{max} = \frac{\Delta fp}{2 \cdot 2^n} = \frac{80}{2 \cdot 2^{10}} = 0,04\text{ N} < 0,2\text{ N}$$

per la forza peso.

La notazione usata è la seguente:

- Δd è il range di misura della distanza ($800-50=750\text{ mm}$) corrispondente al valore di fondo scala di 5 V;
- Δfp è il range di misura della forza peso ($80-0=80\text{ N}$) corrispondente al valore di fondo scala di 5 V.

Si fa presente che in genere per queste applicazioni non è necessario ricorrere ad un modulo S/H in quanto la velocità di variazione del segnale d'ingresso non è elevata.

Ipotizzando un tempo di conversione pari a $100\text{ }\mu\text{s}$ si ottiene che la massima variazione di velocità del segnale d'ingresso ammessa deve risultare pari a:

$$\left(\frac{dv}{dt}\right)_{max} = \frac{V_{FS}}{2^n \cdot T_{conv}} = \frac{5}{1024 \cdot 10^{-4}} = 48,8\text{ V/s}$$

parte 3_diagramma di flusso e programmazione

Il programma si deve occupare dell'acquisizione delle informazioni provenienti dai sensori e della relativa visualizzazione su un display LCD.

Il diagramma di flusso viene riportato in figura.

Il ritardo di acquisizione dipende dalla distanza temporale con la quale si vuole effettuare la lettura; la conversione in analogico dei dati acquisiti si rende necessaria in quanto il convertitore interno a 10 bit rende disponibili per la distanza e la forza peso valori digitali compresi tra 0 e 1023.

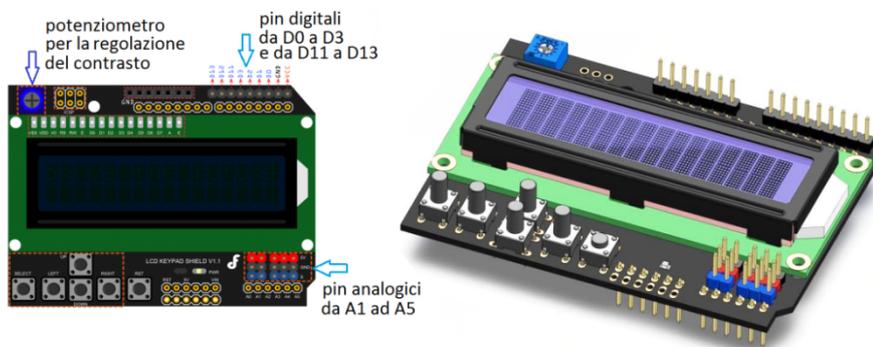


Si suppone di utilizzare un comune display LCD 16x2 (costituito da 16 colonne e 2 righe) e di riportare il la distanza sulla prima riga e la forza peso sulla seconda.

Un esempio molto comune di display identificato con la sigla HD44780 è provvisto di 16 pin.

Sono anche reperibili in commercio delle schede opportunamente predisposte per essere montate pin a pin direttamente su Arduino Uno in modo da semplificare il cablaggio.

Come ad esempio la scheda mostrata in figura e identificata con la sigla *LCD KeyPad Shield V1.1*.



Alcuni pin vengono sacrificati; rimangono quelli evidenziati in figura.

Il modo più semplice per pilotare i display a cristalli liquidi è di utilizzare la libreria *LiquidCrystal* a disposizione per questo tipo di applicazione.

Le istruzioni utilizzate nel programma sono:

- `# include <LiquidCrystal.h>` per includere la libreria *LiquidCrystal*;
- `LiquidCrystal NomeOggetto (rs, enable, d4, d5, d6, d7)` per creare l'oggetto utilizzato per comunicare con il display e definire contemporaneamente la corrispondenza tra pin del display e pin della scheda;
- `NomeOggetto.setCursor (colonna, riga)` per definire la posizione nella quale si deve trovare il cursore quando viene eseguita la successiva istruzione di scrittura;
- `NomeOggetto.print (testo)` per scrivere il testo indicato tra parentesi (nel caso di caratteri alfanumerici il testo deve essere posto tra virgolette) ;

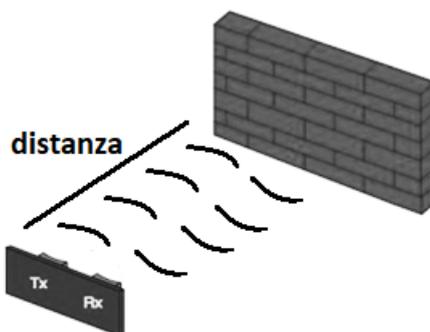
Il listato del programma viene di seguito riportato.

```
int ddigit, fpdigit ; // dichiarazione variabili distanza e forza peso
float dV, fpV, d, fp;
#include <LiquidCrystal.h>
LiquidCrystal lcd (8, 9, 4, 5, 6, 7);
void setup() {
  lcd.begin (16, 2); // definisce il numero di colonne e righe del display
}
void loop() {
  ddigit=analogRead(A1); // acquisizione dato distanza (compreso tra 0 e 1023)
  dV= map (distdigit,0,1023,0,50) //conversione tensione
  dV=distV/10; // esprimo la grandezza con una cifra decimale
  d= 80-15*dV // calcolo la distanza
  fpdigit=analogRead(A2); // acquisizione dato forza peso (compreso tra 0 e 1023)
  fpV= map (fpdigit,0,1023,0,50) //conversione in tensione
  fpV=fpV/10; // esprimo la grandezza con una cifra decimale
  fp=16*fpV // calcolo la forza peso
  lcd.setCursor (0, 0); // cursore su colonna 1 riga 1
  lcd.print ("distanza");
  lcd.setCursor (13, 0); // cursore su colonna 12 riga 1
  lcd.print (dist);
  lcd.print ("cm");
  lcd.setCursor (0, 1); // cursore su colonna 1 riga 2
  lcd.print ("distanza");
  lcd.setCursor (13, 0); // cursore su colonna 12 riga 2
  lcd.print (fp);
  lcd.print ("N");
  delay(1000); // ritardo acquisizione
}
```

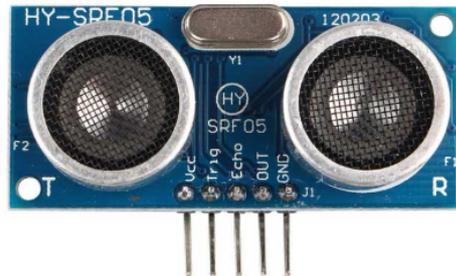
soluzione SECONDA PARTE

QUESITO 1

Per eseguire una misura un sensore a ultrasuoni invia un segnale (trigger) e legge la risposta di quel segnale (eco) che, dopo il rimbalzo su un oggetto, torna indietro (figura). In pratica l'ultrasuono emesso dal trasmettitore (Tx), non udibile dall'orecchio umano in quanto oltre la soglia percepibile, rimbalza sull'oggetto e torna nella stessa direzione in modo che il segnale di ritorno (eco) possa essere captato dal ricevitore (Rx).



Un esempio di sensore a ultrasuoni potrebbe essere il modulo HY-SRF05 (figura) compatibile con la piattaforma Arduino.



Misurando la larghezza dell'impulso (indicata con t) e conoscendo la velocità del segnale nell'aria ($v=0,0347$ cm/s alla temperatura di 25°C), si può misurare una distanza d utilizzando la relazione $d=0,5 \cdot v \cdot t$ che tiene conto del fatto che il suono procede in entrambe le direzioni.

Sostituendo, a 25°C , si ottiene $d=t/57$.

La variabile t rappresenta il tempo intercorso tra l'istante in cui il sensore invia un segnale a ultrasuoni e l'istante in cui il sensore stesso riceve il suo eco.

Il sensore è in grado di generare un treno di impulsi proporzionali al tempo trascorso tra l'invio del suono e la ricezione dell'eco.

Il procedimento di misura è il seguente:

- l'emissione del segnale ultrasonico viene comandata inviando un impulso elettrico della durata di almeno $10\ \mu\text{s}$ sul pin *Trigger*;
- in corrispondenza del fronte di discesa dell'impulso di comando il sensore emette, attraverso la capsula di trasmissione, una sequenza di otto brevi impulsi ultrasonici a $40\ \text{kHz}$, poi porta a livello alti il pin *Echo* per indicare che è iniziata l'attesa del segnale di ritorno;
- utilizzando l'istruzione `pulseIn(pin, STATO)` viene misurato il tempo intercorso tra l'invio del suono e la ricezione del suo eco.

Il listato del programma che consente di misurare una distanza viene di seguito riportato.

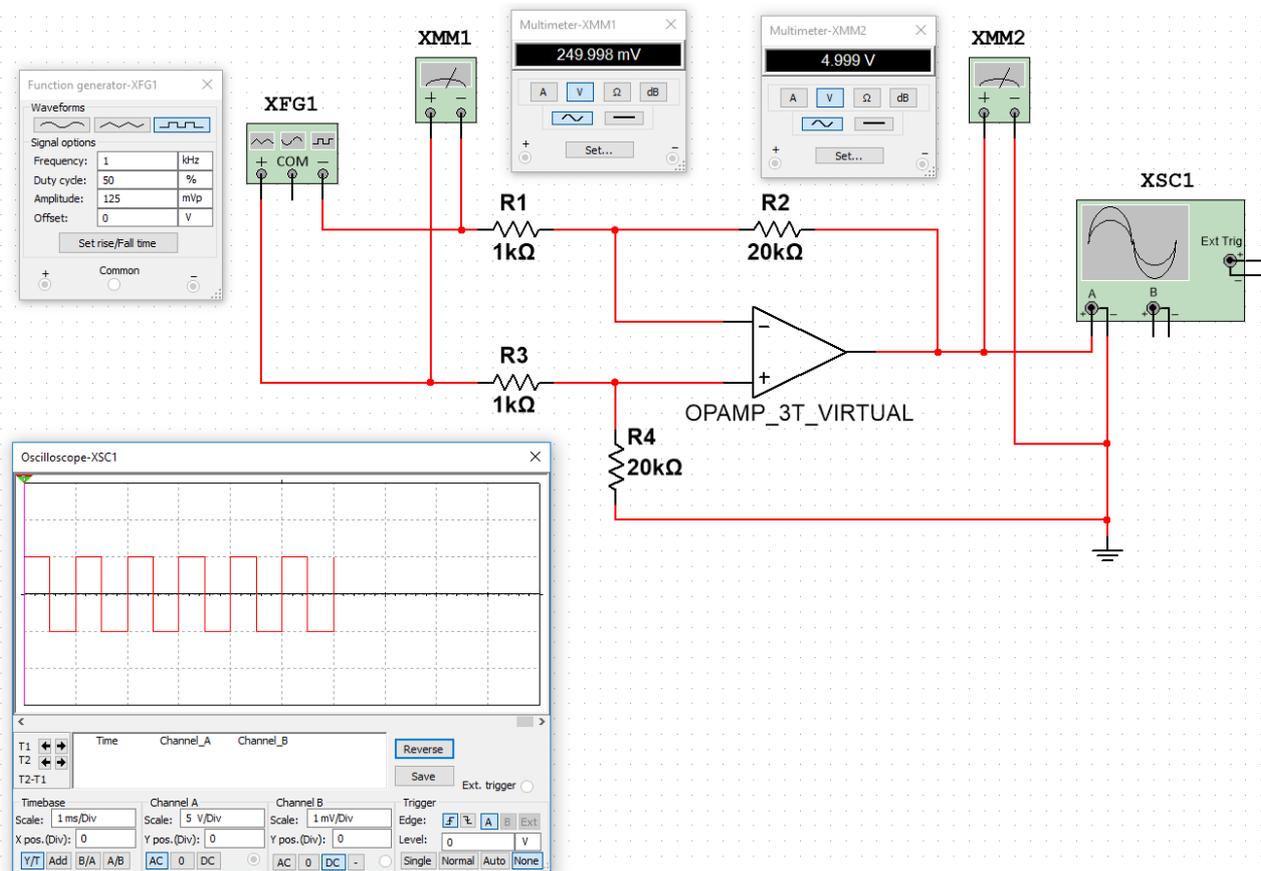
```
// misura di una distanza con sensore a ultrasuoni
int t,d;
void setup() {
  pinMode (3,OUTPUT); // pin trigger
  pinMode (4,INPUT); // pin echo
}
void loop () {
  digitalWrite(3,LOW);
  delayMicroseconds(2);
  digitalWrite(3,HIGH); // invio impulso trigger
  delayMicroseconds(10);
  digitalWrite(3,LOW);
  d=pulseIn(4,HIGH); // misura il tempo
  d=t/57; //calcolo della distanza
  delay(1000); // tempo di attesa tra le misure
}
```

QUESITO 2

I circuiti di condizionamento sono costituiti da amplificatori differenziali.

Una prova tipica di collaudo è la misura del guadagno.

Un esempio di schema che utilizza il programma Multisim viene riprodotto in figura e riguarda il condizionamento del circuito a ponte per la misura della forza peso.



Utilizzando il generatore di segnale (onda quadra con 125 mV di picco e 1 kHz di frequenza) si realizza un ingresso differenziale pari a 250 mV, il valore di tensione prodotto dal trasduttore a 80 N.

Un multimetro misura la tensione all'ingresso del differenziale, un secondo multimetro la tensione all'uscita; l'oscilloscopio visualizza la forma d'onda d'uscita (onda quadra con 5 V di picco).

Ulteriori prove possono essere effettuate modificando il valore di picco del generatore di segnale; facendo variare tale valore a intervalli di 25 mV (partendo da 0 V) si ottengono in uscita tensioni pari a 0 V, 1 V, 2 V, 3 V e 4 V.

Collaudo del software

Intendendo in senso generale con il termine *algoritmo* una procedura che ha lo scopo di risolvere un problema applicando un determinato numero di passi elementari, si può verificare il corretto funzionamento del sistema utilizzando un diagramma di flusso.

Nella stesura del diagramma si presuppone di:

- collegare agli ingressi analogici A1 e A2 della scheda due potenziometri in modo tale da fornire tensioni comprese tra 0 V e 5 V come quelle prodotte dai trasduttori e relativi circuiti di condizionamento;

- visualizzare i risultati ottenuti tramite programma sul monitor seriale.

Il procedimento di verifica potrebbe essere il seguente:

- si imposta il potenziometro collegato all'ingresso A1 in modo da ottenere un valore di tensione nullo visibile sul monitor seriale;
- in corrispondenza, sempre sul monitor seriale, si legge il valore della distanza;
- si verifica che il valore ottenuto per via sperimentale sia concorde con il valore teorico derivante dai calcoli di progetto;
- si imposta successivamente il potenziometro in modo tale da ottenere valori di tensione via via crescenti con passo ad esempio di 0,25 V fino ad ottenere i 5 V di fondo scala;
- ad ogni passo si leggono i valori della tensione e della distanza corrispondente e si confrontano con i valori teorici;
- lo stesso procedimento può essere utilizzato regolando il potenziometro collegato all'ingresso A2.

La sequenza di azioni ora descritta può essere riportata u un diagramma di flusso.

Un collaudo di funzionalità di questo tipo può essere effettuato in modo semplice prima di collegare i trasduttori e il display.

QUESITO 3

Blocco compensatore

Non avendo poli nulli si può adottare un controllore proporzionale con errore limitato da un fattore $1/1+AB$ in risposta ad un segnale a gradino unitario.

La f.d.t. ad anello aperto valutata per $s=0$ è la seguente:

$$G_{aa}(0) = G(0) \cdot W(0) \cdot H(s) \cdot C(s) = \frac{400 \cdot 25000}{10 \cdot 40 \cdot 12500} \cdot C(s) = 0,5 C(s)$$

Viste le specifiche imposte deve risultare:

$$e(\infty) = \frac{1}{1 + 0,5 C(s)} \leq 0,05$$

La relazione risulta verificata per $C(s) \geq 38$.

Margine di fase

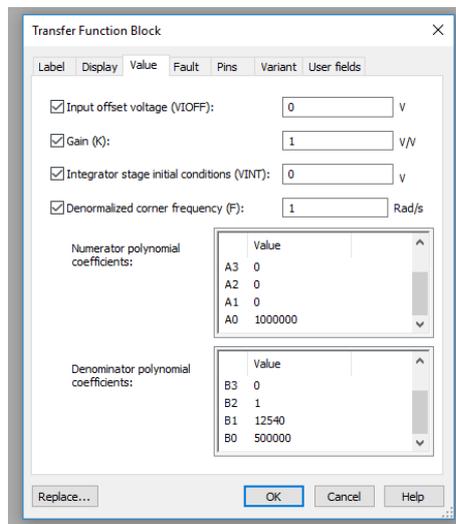
Con $C(s) = 1$ e disturbo nullo la f.d.t. ad anello aperto risulta dal prodotto delle f.d.t. dei singoli blocchi; si ottiene:

$$G_{aa}(s) = G(s) \cdot W(s) \cdot H(s) = \frac{400 \cdot 25000}{10(s + 40)(s + 12500)} = \frac{10^6}{(s + 40)(s + 12500)}$$

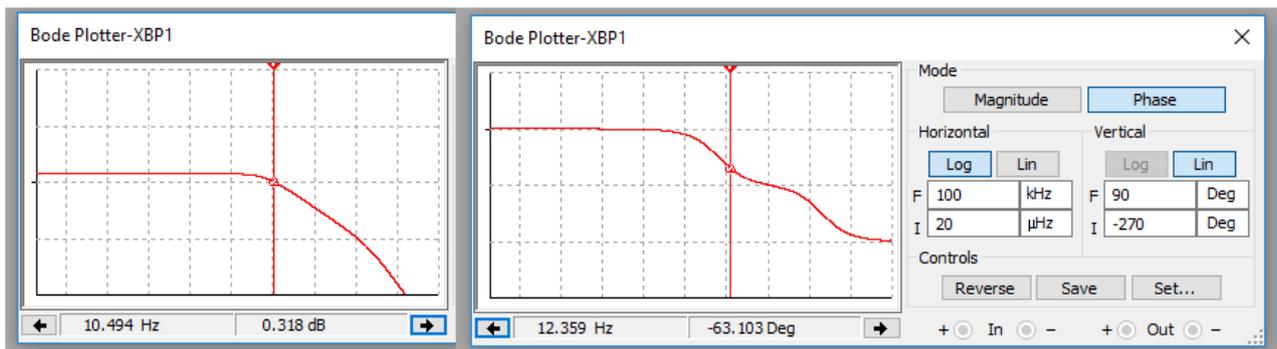
Per studiare la stabilità con il programma Multisim si deve porre il denominatore in forma polinomiale ottenendo:

$$G_{aa}(s) = \frac{10^6}{s^2 + 12540s + 500000}$$

Per ottenere i diagrammi del modulo e della fase si inseriscono nel *Transfer Function Block* i coefficienti dei polinomi al numeratore e al denominatore nel modo indicato in figura.



I diagrammi di Bode del modulo e della fase derivanti dal procedimento di simulazione vengono rappresentati nella figura seguente.



Si evidenzia una frequenza di attraversamento dell'asse a 0 dB pari a circa 12,5 Hz. La fase corrispondente vale circa 63°.

Il margine di fase conseguente pari a circa 117° rappresenta un indice di stabilità sufficiente per la configurazione ad anello chiuso.

Risposta ad un disturbo

In regime sinusoidale, imponendo un disturbo additivo di pulsazione ω , la reazione riduce l'effetto del medesimo sull'uscita di un fattore pari a

$$|1 + G_{aa}(j\omega)|$$

rispetto all'ampiezza che avrebbe in risposta al medesimo disturbo in assenza di retroazione.

Ponendo $C(s)=100$ risulta:

$$G_{aa}(s) = \frac{10^8}{s^2 + 12540s + 500000}$$

Con $s=j\omega$ si ha quindi:

$$G_{aa}(j\omega) = \frac{10^8}{(j\omega)^2 + 12540j\omega + 500000} = \frac{10^8}{-\omega^2 + 12540j\omega + 500000}$$

Ponendo $\omega=1000$ rad/s e semplificando risulta:

$$G_{aa}(j\omega) = \frac{10^4}{-100 + 1254j + 50} = \frac{10^4}{1254j - 50}$$

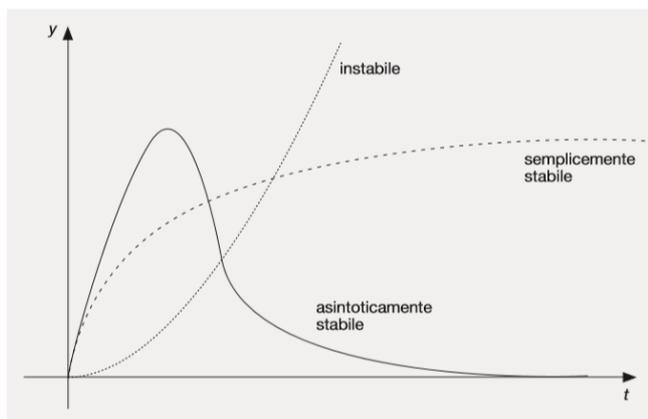
Dopo aver razionalizzato e dopo aver svolto opportuni calcoli risulta infine un'attenuazione pari a:

$$|1 + G_{aa}(j\omega)| = 8$$

QUESITO 4

Facendo riferimento alla sottostante figura in cui viene mostrata la risposta all'impulso un sistema viene definito:

- asintoticamente stabile (se l'uscita converge al valore iniziale supposto nullo);
- semplicemente stabile (se l'uscita tende a un valore finito diverso dal valore iniziale);
- instabile (se l'uscita diverge ossia tende a infinito).



Tra posizione dei poli del sistema sul piano complesso e stabilità sussistono le seguenti relazioni:

- affinché un sistema risulti semplicemente stabile è necessario e sufficiente che la f.d.t. non presenti alcun polo a parte reale positiva e che gli eventuali poli a parte reale nulla siano semplici;
- affinché un sistema risulti asintoticamente stabile è necessario e sufficiente che tutti i poli abbiano parte reale negativa.

Dai diagrammi di risposta in frequenza di un sistema si possono trarre importanti informazioni sul comportamento dei sistemi retroazionati in termini di stabilità.

L'indagine sulla stabilità di un sistema retroazionato può essere effettuata utilizzando il criterio di Bode o il criterio di Nyquist.

I due criteri consentono di individuare la stabilità di un sistema retroazionato facendo riferimento soltanto ai diagrammi della f.d.t. d'anello.

Indicando con A la f.d.t. del blocco di andata e con B la f.d.t. del blocco di ritorno si definisce f.d.t. d'anello (o f.d.t. ad anello aperto) il prodotto delle f.d.t. dei blocchi A e B.

Il criterio di Bode afferma che il sistema è stabile se, in corrispondenza della pulsazione in cui il diagramma del modulo attraversa l'asse tracciato a 0 dB (pulsazione di attraversamento a 0 dB), l'angolo di fase risulta minore di 180° .

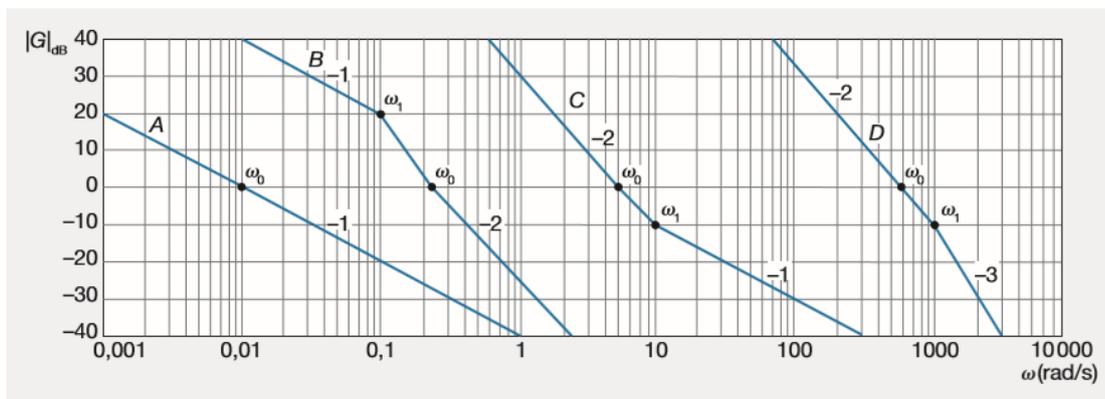
Per avere una stabilità certa l'angolo di fase deve essere sensibilmente minore di 180° (si considera un limite per la stabilità di 135°).

Se poli e zeri sono piuttosto distanti tra loro lo sfasamento di -135° si ha proprio in corrispondenza del punto in cui si verifica il cambiamento di pendenza da -1 a -2 .

Dalla sola lettura del diagramma del modulo si deduce come conseguenza che:

- quando il taglio con l'asse a 0 dB avviene con pendenza -1 il sistema è sicuramente stabile;
- quando il taglio con l'asse a 0 dB avviene con prolungata pendenza -2 e oltre, il sistema è sicuramente instabile;
- quando il taglio con l'asse a 0 dB avviene immediatamente dopo il cambiamento di pendenza da -1 a -2 o immediatamente prima del cambiamento di pendenza da -2 a -1 il sistema potrebbe essere stabile ma si richiedono ulteriori accertamenti utilizzando il diagramma della fase.

In figura vengono riportati alcuni esempi.

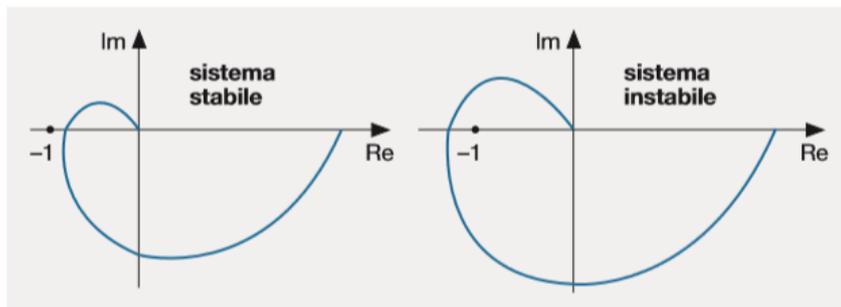


Dall'analisi dei diagrammi si evidenzia che:

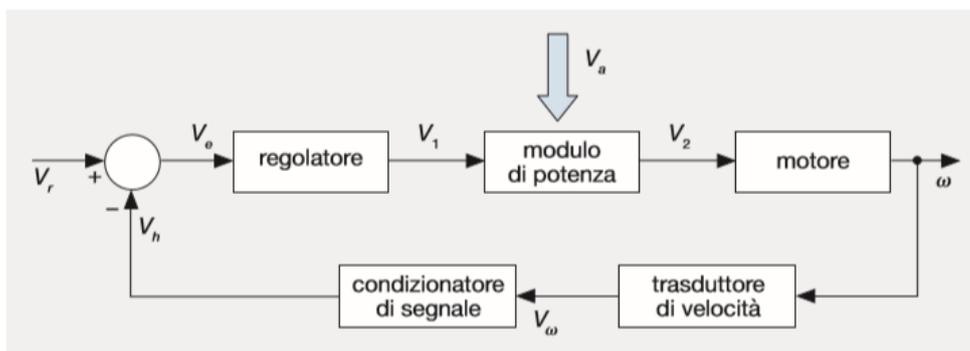
- il sistema A è sicuramente stabile perché il punto d'attraversamento con l'asse a 0 dB avviene alla pulsazione di 0,01 rad/s con prolungata pendenza -1 ;
- il sistema B (teoricamente stabile perché il punto d'attraversamento con l'asse a 0 dB avviene alla pulsazione di circa 0,02 rad/s con pendenza -2 preceduta da pendenza -1) è meglio procedere con ulteriori accertamenti;
- il sistema C (teoricamente stabile perché il punto d'attraversamento con l'asse a 0 dB avviene alla pulsazione di circa 5 rad/s con pendenza -2 seguita da pendenza -1) è meglio procedere con ulteriori accertamenti;
- il sistema D è sicuramente instabile perché il punto d'attraversamento con l'asse a 0 dB avviene alla pulsazione di 600 rad/s con prolungata pendenza -2 seguita da pendenza -3 .

Il criterio di Nyquist semplificato afferma che condizione necessaria e sufficiente affinché un sistema retroazionato sia sicuramente stabile è che il diagramma polare della f.d.t. d'anello sia esterno al punto del piano complesso di coordinate $(-1; 0)$ denominato punto critico.

In figura vengono riportati due esempi di diagrammi corrispondenti a un sistema stabile e a uno instabile.



Tra i numerosi esempi applicati dei principi descritti è il controllo ad anello chiuso della velocità di un motore in continua; lo schema a blocchi viene di seguito riportato.



Il nodo di confronto calcola la differenza tra segnale di riferimento V_r e segnale di retroazione V_h ; l'uscita rappresenta il segnale errore V_e .

Il regolatore, in relazione all'ampiezza del segnale errore, agisce di conseguenza sulla tensione applicata al motore in modo tale da mantenerne costante la velocità.

Il trasduttore di velocità trasforma la grandezza non elettrica (velocità) in una grandezza elettrica (tensione), il condizionatore di segnale amplifica il segnale prodotto dal trasduttore di velocità e lo rende compatibile con il segnale di riferimento.

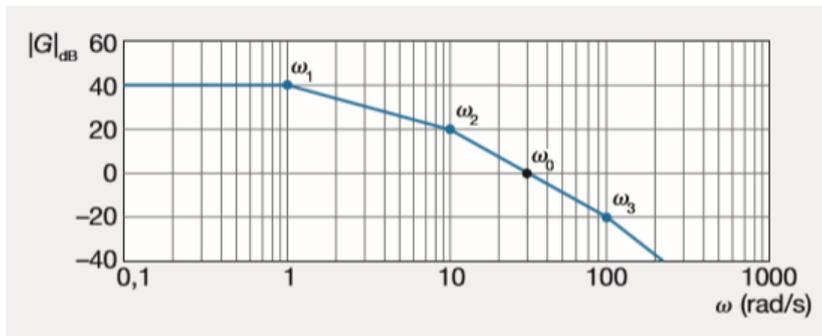
Per poter applicare i criteri di stabilità visti in precedenza e determinare di conseguenza la f.d.t. ad anello aperto è necessario conoscere il guadagno statico e i costanti di tempo dei singoli blocchi che compongono il sistema.

Per il blocco motore (modello del secondo ordine) è necessario conoscere la costante di macchina e le costanti di tempo elettrica e meccanica; per il modulo di potenza (modello del primo ordine) è necessario conoscere il guadagno e la costante di tempo; per gli altri blocchi di tipo proporzionale è sufficiente la conoscenza della costante di tempo.

Un esempio di f.d.t. d'anello che potrebbe essere tipica di questa applicazione è la seguente:

$$G(s) = \frac{100}{(1+s)(1+0,1s)(1+0,01s)}$$

Il diagramma del modulo viene di seguito riportato.



Si può verificare che il margine di fase non è compatibile con la stabilità e che pertanto occorre una rete correttiva (ad esempio ritardatrice) per stabilizzare il sistema.