Cognome: Nome: N. Matr.: ☐☐☐☐☐☐

☐ Sistemi di Controllo ☐ Controlli Automatici ☐ Ho superato la Parte A in data (mese/anno)________
☐ Intendo svolgere la tesina con Matlab/Simulink

Sistemi di Controllo - Controlli Automatici (Parte B)

Ingegneria Meccanica e Ingegneria del Veicolo

Compito del 25 luglio 2019 - Quiz

Per ciascuno dei seguenti quesiti, segnare con una crocetta le risposte che si ritengono corrette. Alcuni quesiti possono avere più risposte corrette.
I quiz si ritengono superati se vengono individuate almeno metà delle risposte esatte (punti 5 su 10), diversamente il compito verrà ritenuto insufficiente a prescindere dal risultato della seconda prova.

1. Se un sistema dinamico presenta un margine di ampiezza $M_a = 20$ dB, posto in retroazione unitaria negativa con un regolatore $R(s) = K$ (K positivo):

   ◯ è stabile solo per $K < 0.1$
   ◯ è stabile solo per $K < 10$
   ◯ è stabile solo per $K < 20$
   ◯ è stabile solo per $0.1 < K < 10$

2. Una rete anticipatrice $R(s) = \dfrac{1+\tau s}{1+\alpha\tau s}$:

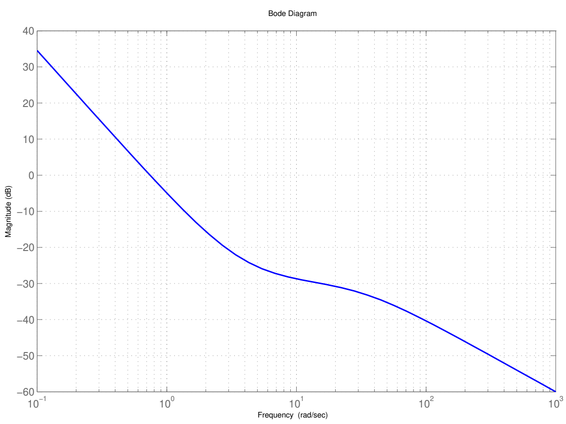
   ◯ ha come effetto utile l'attenuazione ad alta frequenza
   ◯ ha la costante di tempo dello zero più bassa di quella del polo
   ◯ ha come effetto negativo l'amplificazione in alta frequenza
   ◯ introduce un anticipo di fase che ha un valore massimo dipendente solo da α

3. Il prefiltraggio del segnale di riferimento:

   ◯ può servire per ridurre lo sforzo di controllo
   ◯ può servire per eliminare dinamiche parassite (es. cancellazione parziale polo-zero) eventualmente presenti nel sistema in retroazione
   ◯ può servire per cancellare disturbi sull'uscita
   ◯ può servire per aumentare l'attenuazione dei disturbi di misura

4. Con riferimento alla funzione di anello $L(s)$ il cui diagramma di Bode delle ampiezze è riportato in figura si può affermare che, posta in retroazione unitaria negativa:

   ◯ l'errore a regime per ingresso di riferimento a gradino è nullo
   ◯ l'errore a regime per ingresso di riferimento a gradino è costante ma non nullo
   ◯ l'errore a regime per ingresso di riferimento a rampa è nullo
   ◯ l'errore a regime per ingresso di riferimento a rampa è costante ma non nullo



5. Nella progettazione di un sistema di controllo in retroazione per un impianto affetto da un ritardo non trascurabile si dovrà assumere:

   ◯ una pulsazione di incrocio elevata per rendere il sistema veloce
   ◯ una pulsazione di incrocio limitata per ridurre il peggioramento al margine di fase dovuto al ritardo
   ◯ un margine di ampiezza elevato per garantire la stabilità del sistema retroazionato
   ◯ un margine di fase elevato per compensare lo sfasamento negativo dovuto al ritardo

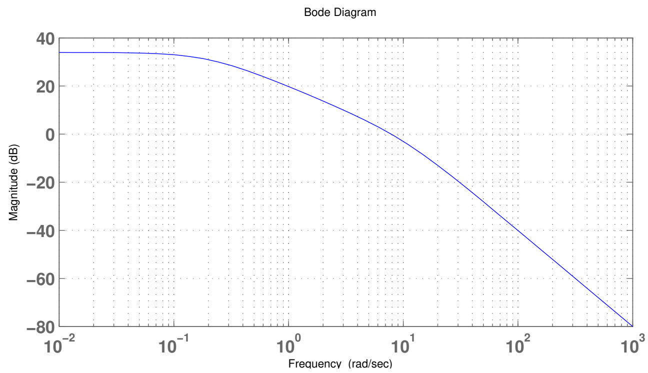
6. Dato il sistema retroazionato, di cui in figura è riportato il diagramma delle ampiezze della funzione d'anello $L(s)$, un eventuale disturbo di tipo "n" agente a $\omega_n = 0.3$ rad/s verrà attenuato di circa:

   ◯ 10 volte

   ◯ 30 volte

   ◯ 100 volte

   ◯ non viene attenuato affatto



7. La taratura di un regolatore PID basata su tabelle mediante i cosiddetti metodi ad anello chiuso necessita di:

   ◯ un modello del sistema del tipo $G(s) = \dfrac{\mu}{1+\tau s}e^{-Ts}$

   ◯ la stima del margine di fase M_f e della pulsazione critica ω_f

   ◯ la stima del margine di ampiezza M_a e della pulsazione critica ω_f

   ◯ la stima del margine di ampiezza M_a e della pulsazione di incrocio ω_c

8. L'operazione di campionamento di un segnale tempo-continuo $x(t)$ a banda limitata, con pulsazione massima ω_m, è reversibile (nel senso che è possibile ricostruire esattamente $x(t)$ a partire dalla sequenza dei campioni $x_k = x(kT_s)$):

   ◯ mai

   ◯ se il tempo di campionamento $T_s \leq \frac{\pi}{2\omega_m}$

   ◯ se il tempo di campionamento $T_s \leq \frac{\pi}{\omega_m}$

   ◯ se il tempo di campionamento $T_s \leq \frac{2\pi}{\omega_m}$

9. Un sistema di controllo in retroazione (con $\omega_c = 50$) basato su un regolatore digitale è affetto da un elevato rumore di misura e pertanto è stato dotato di un filtro anti-aliasing del secondo ordine, la cui pulsazione di taglio è stata collocata a $\omega_{aa} = 300$ rad/s. Quale dovrebbe essere la pulsazione di campionamento tale da garantire un'attenuazione dei disturbi di almeno 100 volte?

   ◯ $\omega_s \approx 5000$ rad/sec

   ◯ $\omega_s \approx 6000$ rad/sec

   ◯ $\omega_s \approx 500$ rad/sec

   ◯ $\omega_s \approx 3000$ rad/sec

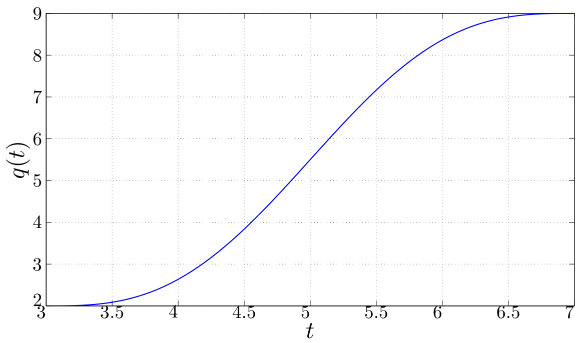
Biagiotti 10. In figura è riportato l'andamento di una traiettoria cicloidale, la cui espressione analitica risulta:

   ◯ $q(t) = 7\left(\dfrac{t-2}{4} + \dfrac{1}{2\pi}\sin\left(\dfrac{2\pi(t-2)}{4}\right)\right) + 3$

   ◯ $q(t) = 7\left(\dfrac{t-3}{4} + \dfrac{1}{2\pi}\sin\left(\dfrac{2\pi(t-3)}{4}\right)\right) + 2$

   ◯ $q(t) = 9\left(\dfrac{t-3}{7} + \dfrac{1}{2\pi}\sin\left(\dfrac{2\pi(t-3)}{7}\right)\right) + 2$

   ◯ $q(t) = 9\left(\dfrac{t-2}{7} + \dfrac{1}{2\pi}\sin\left(\dfrac{2\pi(t-2)}{7}\right)\right) + 3$



Cognome: Nome: N. Matr.: ☐☐☐☐☐☐

☐ Sistemi di Controllo ☐ Controlli Automatici ☐ Ho superato la Parte A in data (mese/anno)________
☐ Intendo svolgere la tesina con Matlab/Simulink

Sistemi di Controllo - Controlli Automatici (Parte B)

Ingegneria Meccanica e Ingegneria del Veicolo

Compito del 25 luglio 2019 - Problemi

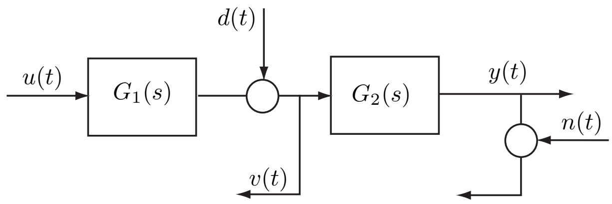
Rispondere in maniera analitica ai seguenti quesiti. I problemi e le domande a risposta aperta si ritengono superati se vengono conseguiti almeno metà dei punti totali (10 su 20), diversamente il compito verrà ritenuto insufficiente a prescindere dal risultato della prima prova.

1. Descrivere il significato delle diverse componenti di controllo che compongono un regolatore PID e riportare gli schemi che risolvono il problema dell'azione di controllo infinita in presenza di un ingresso discontinuo e della saturazione dell'azione integrale dovuta ai limiti fisici del sistema di attuazione.

2. Dato l'impianto di figura con:

$$G_1(s) = \frac{250}{(s+5)(s+25)}$$

$$G_2(s) = \frac{2(s+8)}{(s+0.5)(s+25)}$$



Si procede alla realizzazione di uno schema di controllo in cascata partendo dall'anello più esterno.
Si richiede pertanto di:

a) Progettare il regolatore di complessità minima, denominato $R_2(s)$, per il solo sottosistema $G_2(s)$ che consenta di ottenere
   - errore a regime per ingresso a gradino inferiore al 1%;
   - risposta aperiodica;
   - tempo di assestamento $T_a \leq 2$ s;
   - azione di controllo minima.

b) Disegnare il diagramma di Bode delle ampiezze di $L_2(s) = R_2(s)G_2(s)$.

c) Progettare l'anello di controllo interno con il regolatore $R_1(s)$, di complessità minima, che consenta il soddisfacimento delle seguenti specifiche:
   – errore a regime nullo per un disturbo $d(t)$ a gradino;
   – margine di fase M_f di almeno 50^o;
   – pulsazione di incrocio ω_c compatibile con il disaccopiamento frequenziale richiesto dal progetto del regolatore in cascata.

d) Tracciare i diagrammi di Bode delle ampiezze di $L_1(s) = R_1(s)G_1(s)$ e della funzione di sensitività complementare $F_1(s)$. Infine sovrapporre il diagramma di $|F_1(j\omega)|$ a quello di $|L_2(j\omega)|$, tracciato al punto b), e discutere la fattibilità del progetto in cascata.

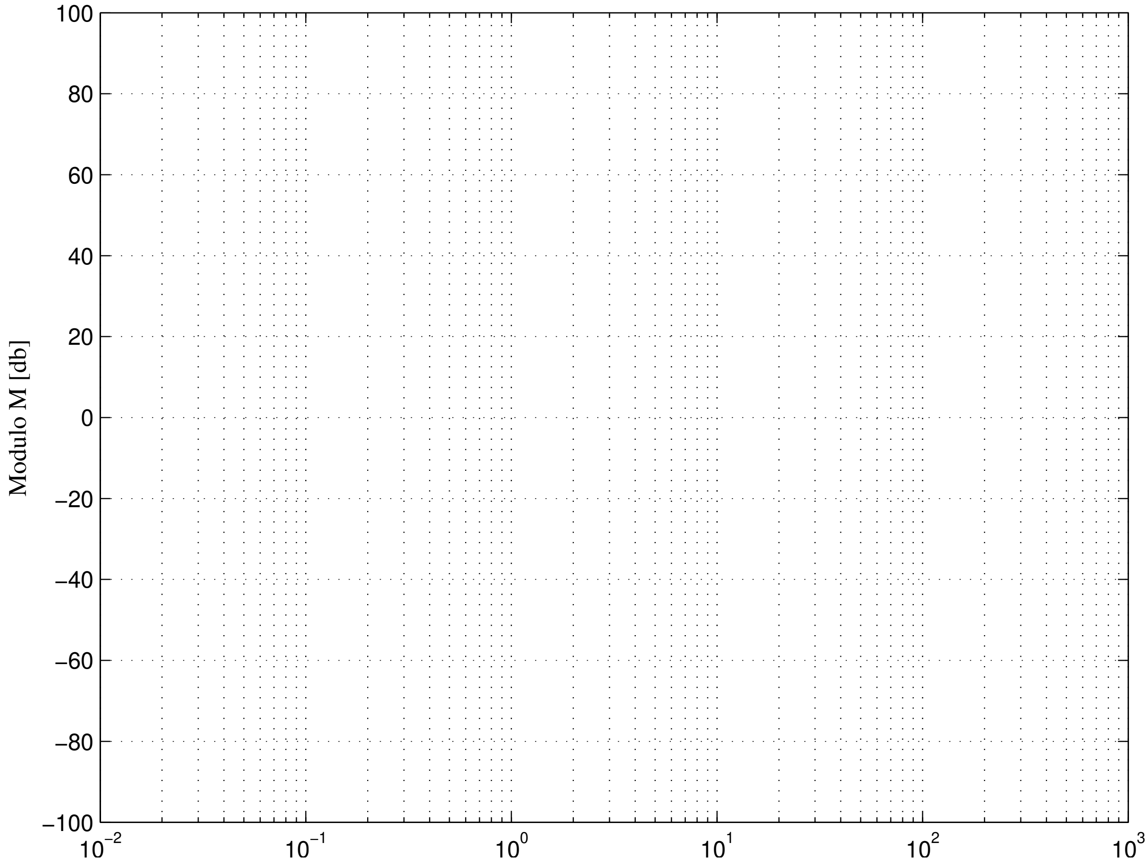
e) Supponendo che il sistema "veloce" $G_1(s)$ si comporti in maniera ideale, mentre $G_2(s)$ non faccia altrettanto, progettare un'azione di feed-forward $u_{ff}(t)$ per il sottosistema $G_2(s)$ che consenta di inseguire senza errore il riferimento $y_{sp}(t)$, di cui è nota l'espressione analitica insieme a quella delle sue derivate. Riportare lo schema di controlo basato sui due anelli di retroazione e sull'azione in avanti che sono stati progettati.

f) Dopo aver scelto il tempo di campionamento più idoneo discretizzare i regolatori $R_1(s)$, $R_2(s)$ con il metodo delle differenze all'indietro.

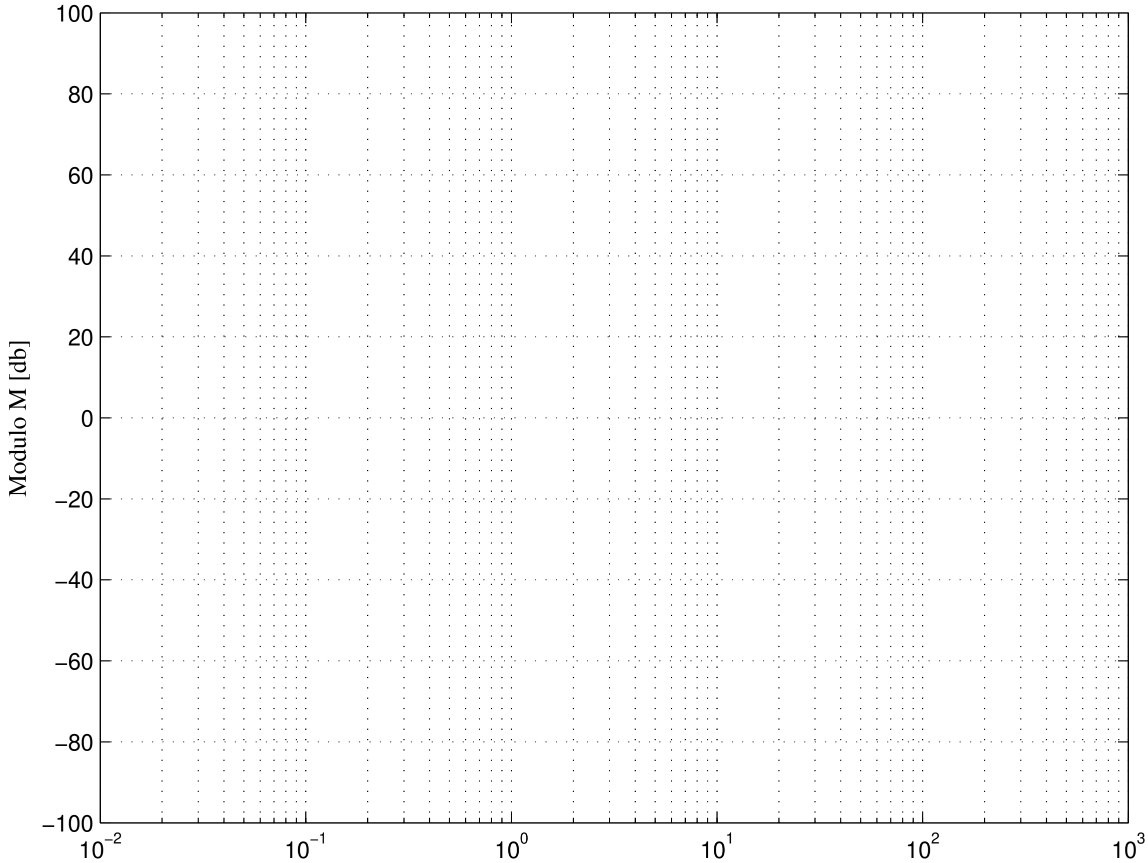
g) Scrivere le equazioni alle differenze corrispondenti ai regolatori $R_1(z) = \dfrac{U_1(z)}{E_1(z)}$, $R_2(z) = \dfrac{U_2(z)}{E_2(z)}$ discretizzati al punto precedente.

Cognome: Nome: N. Matr.:

Diagrammi di Bode delle ampiezze di $L_2(s)$ e di $F_1(s)$



Diagrammi di Bode delle ampiezze di $L_1(s)$ e di $F_1(s)$



Cognome: Nome: N. Matr.: ☐☐☐☐☐☐

☐ Sistemi di Controllo ☐ Controlli Automatici ☐ Ho superato la Parte A in data (mese/anno)________
☐ Intendo svolgere la tesina con Matlab/Simulink

Sistemi di Controllo - Controlli Automatici (Parte B)

Ingegneria Meccanica e Ingegneria del Veicolo

Compito del 25 luglio 2019 - Quiz

Per ciascuno dei seguenti quesiti, segnare con una crocetta le risposte che si ritengono corrette. Alcuni quesiti possono avere più risposte corrette.
I quiz si ritengono superati se vengono individuate almeno metà delle risposte esatte (punti 5 su 10), diversamente il compito verrà ritenuto insufficiente a prescindere dal risultato della seconda prova.

1. Se un sistema dinamico presenta un margine di ampiezza $M_a = 20$ dB, posto in retroazione unitaria negativa con un regolatore $R(s) = K$ (K positivo):

   ◯ è stabile solo per $K < 0.1$
   ⊗ è stabile solo per $K < 10$
   ◯ è stabile solo per $K < 20$
   ◯ è stabile solo per $0.1 < K < 10$

2. Una rete anticipatrice $R(s) = \dfrac{1+\tau s}{1+\alpha\tau s}$:

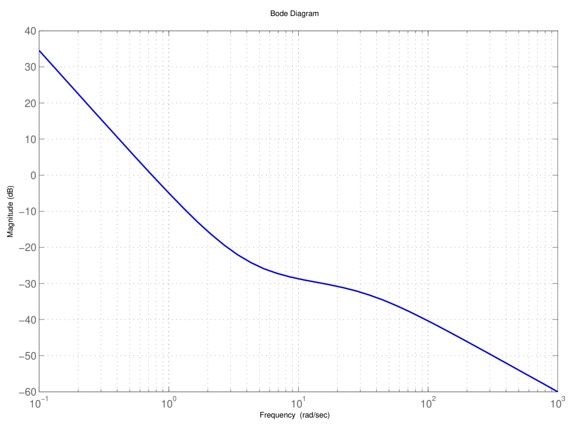
   ◯ ha come effetto utile l'attenuazione ad alta frequenza
   ◯ ha la costante di tempo dello zero più bassa di quella del polo
   ⊗ ha come effetto negativo l'amplificazione in alta frequenza
   ⊗ introduce un anticipo di fase che ha un valore massimo dipendente solo da α

3. Il prefiltraggio del segnale di riferimento:

   ⊗ può servire per ridurre lo sforzo di controllo
   ⊗ può servire per eliminare dinamiche parassite (es. cancellazione parziale polo-zero) eventualmente presenti nel sistema in retroazione
   ◯ può servire per cancellare disturbi sull'uscita
   ◯ può servire per aumentare l'attenuazione dei disturbi di misura

4. Con riferimento alla funzione di anello $L(s)$ il cui diagramma di Bode delle ampiezze è riportato in figura si può affermare che, posta in retroazione unitaria negativa:

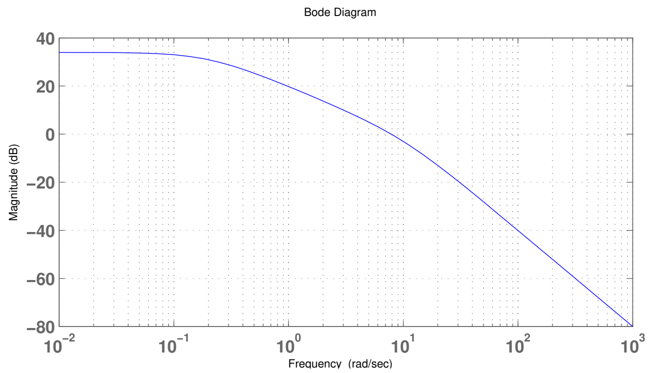
   ⊗ l'errore a regime per ingresso di riferimento a gradino è nullo
   ◯ l'errore a regime per ingresso di riferimento a gradino è costante ma non nullo
   ⊗ l'errore a regime per ingresso di riferimento a rampa è nullo
   ◯ l'errore a regime per ingresso di riferimento a rampa è costante ma non nullo



5. Nella progettazione di un sistema di controllo in retroazione per un impianto affetto da un ritardo non trascurabile si dovrà assumere:

   ◯ una pulsazione di incrocio elevata per rendere il sistema veloce
   ⊗ una pulsazione di incrocio limitata per ridurre il peggioramento al margine di fase dovuto al ritardo
   ◯ un margine di ampiezza elevato per garantire la stabilità del sistema retroazionato
   ⊗ un margine di fase elevato per compensare lo sfasamento negativo dovuto al ritardo

6. Dato il sistema retroazionato, di cui in figura è riportato il diagramma delle ampiezze della funzione d'anello $L(s)$, un eventuale disturbo di tipo "n" agente a $\omega_n = 0.3$ rad/s verrà attenuato di circa:



- ◯ 10 volte
- ◯ 30 volte
- ◯ 100 volte
- ⊗ non viene attenuato affatto

7. La taratura di un regolatore PID basata su tabelle mediante i cosiddetti metodi ad anello chiuso necessita di:

- ◯ un modello del sistema del tipo $G(s) = \frac{\mu}{1+\tau s}e^{-Ts}$
- ◯ la stima del margine di fase M_f e della pulsazione critica ω_f
- ⊗ la stima del margine di ampiezza M_a e della pulsazione critica ω_f
- ◯ la stima del margine di ampiezza M_a e della pulsazione di incrocio ω_c

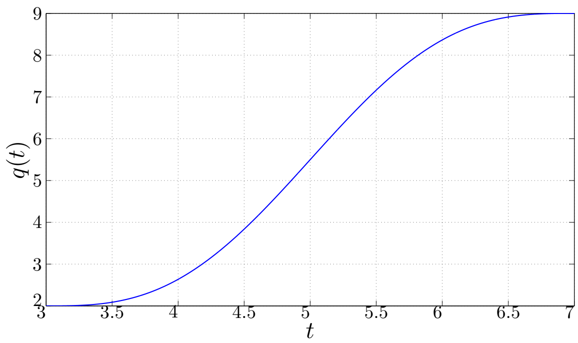
8. L'operazione di campionamento di un segnale tempo-continuo $x(t)$ a banda limitata, con pulsazione massima ω_m, è reversibile (nel senso che è possibile ricostruire esattamente $x(t)$ a partire dalla sequenza dei campioni $x_k = x(kT_s)$):

- ◯ mai
- ◯ se il tempo di campionamento $T_s \leq \frac{\pi}{2\omega_m}$
- ⊗ se il tempo di campionamento $T_s \leq \frac{\pi}{\omega_m}$
- ◯ se il tempo di campionamento $T_s \leq \frac{2\pi}{\omega_m}$

9. Un sistema di controllo in retroazione (con $\omega_c = 50$) basato su un regolatore digitale è affetto da un elevato rumore di misura e pertanto è stato dotato di un filtro anti-aliasing del secondo ordine, la cui pulsazione di taglio è stata collocata a $\omega_{aa} = 300$ rad/s. Quale dovrebbe essere la pulsazione di campionamento tale da garantire un'attenuazione dei disturbi di almeno 100 volte?

- ◯ $\omega_s \approx 5000$ rad/sec
- ⊗ $\omega_s \approx 6000$ rad/sec
- ◯ $\omega_s \approx 500$ rad/sec
- ◯ $\omega_s \approx 3000$ rad/sec

Biagiotti 10. In figura è riportato l'andamento di una traiettoria cicloidale, la cui espressione analitica risulta:



- ◯ $q(t) = 7\left(\frac{t-2}{4} + \frac{1}{2\pi}\sin\left(\frac{2\pi(t-2)}{4}\right)\right) + 3$
- ⊗ $q(t) = 7\left(\frac{t-3}{4} + \frac{1}{2\pi}\sin\left(\frac{2\pi(t-3)}{4}\right)\right) + 2$
- ◯ $q(t) = 9\left(\frac{t-3}{7} + \frac{1}{2\pi}\sin\left(\frac{2\pi(t-3)}{7}\right)\right) + 2$
- ◯ $q(t) = 9\left(\frac{t-2}{7} + \frac{1}{2\pi}\sin\left(\frac{2\pi(t-2)}{7}\right)\right) + 3$

Cognome: Nome: N. Matr.:☐☐☐☐☐☐

☐ Sistemi di Controllo ☐ Controlli Automatici ☐ Ho superato la Parte A in data (mese/anno)________
☐ Intendo svolgere la tesina con Matlab/Simulink

Sistemi di Controllo - Controlli Automatici (Parte B)

Ingegneria Meccanica e Ingegneria del Veicolo

Compito del 25 luglio 2019 - Problemi

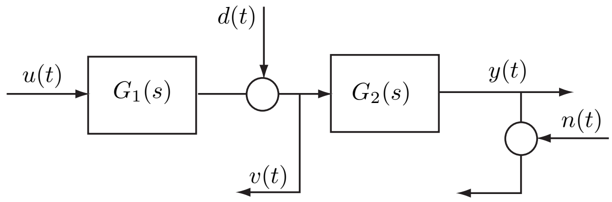
Rispondere in maniera analitica ai seguenti quesiti. I problemi e le domande a risposta aperta si ritengono superati se vengono conseguiti almeno metà dei punti totali (10 su 20), diversamente il compito verrà ritenuto insufficiente a prescindere dal risultato della prima prova.

1. Descrivere il significato delle diverse componenti di controllo che compongono un regolatore PID e riportare gli schemi che risolvono il problema dell'azione di controllo infinita in presenza di un ingresso discontinuo e della saturazione dell'azione integrale dovuta ai limiti fisici del sistema di attuazione.

2. Dato l'impianto di figura con:

$$G_1(s) = \frac{250}{(s+5)(s+25)}$$

$$G_2(s) = \frac{2(s+8)}{(s+0.5)(s+25)}$$



Si procede alla realizzazione di uno schema di controllo in cascata partendo dall'anello più esterno. Si richiede pertanto di:

a) Progettare il regolatore di complessità minima, denominato $R_2(s)$, per il solo sottosistema $G_2(s)$ che consenta di ottenere
   - errore a regime per ingresso a gradino inferiore al 1%;
   - risposta aperiodica;
   - tempo di assestamento $T_a \leq 2$ s;
   - azione di controllo minima.

SOLUZIONE:

Dal momento che è richiesto errore a regime per ingresso di riferimento a gradino inferiore al 1%, il regolatore statico avrà la forma di una semplice costante

$$R_{2s}(s) = \mu$$

in cui il guadagno μ è determinato imponendo la condizione statica sull'ingresso a gradino

$$|e_\infty| \leq 0.01$$

Questa condizione può essere riscritta come

$$|e_\infty| = \lim_{s\to 0} |sE(s)| = \lim_{s\to 0} \left| s \frac{1}{1+R_{2s}(s)G_2(s)} \frac{1}{s} \right| = \frac{1}{1+\mu|G_2(0)|} \leq 0.01$$

da cui, essendo $|G_2(0)| = 1.28$, si ottiene $\mu \geq 77.3438$. Per semplicità si assume $\mu = 78$.

A questo punto è necessario progettare la prate dinamica del regolatore per soddisfare le specifiche rimaste:

- risposta aperiodica $\rightarrow M_f^\star = 80^o$
- tempo di assestamento $T_a \leq 2$ s $\rightarrow T_a = \dfrac{3}{\omega_c} \leq 2$s $\rightarrow \omega_c \geq \dfrac{3}{2}$. Si assume il valore minimo $\omega_c^\star = 1.5$ rad/s per minimizzare l'azione di controllo, come richiesto.

Assunto

$$G_{2e}(s) = \mu G_2(s) = \frac{156(s+8)}{(s+25)(s+0.5)}$$

si procede al calcolo di $|G_{2e}(j1.5)| = 32.0647$ e $\arg\{G_{2e}(j1.5)\} = -64.3790^o$. Risulta chiaramente che occorre una riduzione del modulo per imporre la pulsazione di incrocio desiderata. Non potendo modificare il guadagno statico, deve essere impiegata una rete ritardatrice che attenui di

$$M^\star = \frac{1}{|G_{2e}(j1.5)|} = 0.0312$$

e sfasi di

$$\varphi^\star = -180^o + M_f^\star - \arg(G_{2e}(j1.5)) = -35.6210^o$$

Dopo avere verificato analiticamente le condizioni di applicabilità di una rete ritardatrice, dalle formule di inversione si ricava che $\tau = 35.7723$ e $\alpha = 0.0250$ per cui

$$R_{2d}(s) = \frac{0.8948s + 1}{35.77s + 1}.$$

Complessivamente il regolatore $R_2(s)$ varrà

$$R_2(s) = 78\,\frac{0.8948s + 1}{35.77s + 1}.$$

---

b) Disegnare il diagramma di Bode delle ampiezze di $L_2(s) = R_2(s)G_2(s)$.

SOLUZIONE:
Vedere diagramma in fondo

---

c) Progettare l'anello di controllo interno con il regolatore $R_1(s)$, di complessità minima, che consenta il soddisfacimento delle seguenti specifiche:

- errore a regime nullo per un disturbo $d(t)$ a gradino;
- margine di fase M_f di almeno 50^o;
- pulsazione di incrocio ω_c compatibile con il disaccopiamento frequenziale richiesto dal progetto del regolatore in cascata.

SOLUZIONE:
Per garantire errore a regime nullo a fronte di un disturbo $d(t)$ a gradino, il regolatore $R_1(s)$ avrà la forma di un PI

$$R_1(s) = \mu\frac{\tau_z s + 1}{s}.$$

Per soddisfare le altre specifiche occorre imporre al sistema esteso

$$G_{1e}(s) = \frac{G_1(s)}{s} = \frac{250}{s(s+5)(s+25)}$$

un margine di fase $M_f^\star = 50^o$ e la pulsazione di incrocio $\omega_{c1}^\star = 15$ rad/s (si assume una pulsazione di incrocio almeno una decade a destra rispetto a quella dell'anello di controllo esterno) scegliendo opportunamente lo zero e il guadagno del regolatore PI. Per la progettazione del PI si sceglie di procedere in cancellazione con il polo dell'impianto in -5, per cui

$$\tau_z = 1/5 = 0.2$$

mentre il guadagno μ viene selezionato imponendo come pulsazione di incrocio $\omega_{c1}^\star = 15$. Si procede al calcolo di $|G_{1e}(j15)| = 0.0362$ per cui

$$\mu = \frac{1}{|G_{1e}(j15)| \cdot \sqrt{1 + (\tau_z\, 15)^2}} = 8.7464.$$

Occorre verificare infine che il margine di fase ottenuto sia compatibile con le specifiche:

$$M_f = 180^o + \arg(G_{1e}(j\omega_{c1}^\star)) + \varphi_z(\omega_{c1}^\star) \geq M_f^\star$$

dove $\varphi_z(\omega_{c1}^\star)$ indica il contributo di fase dello zero del PI. Nel caso specifico si ha

$$180^o - 192.5288^o + 71.5651^o = 59.0363^o \geq 50.$$

L'espressione finale del regolatore PI risulta

$$R_1(s) = 8.75\,\frac{0.2\,s + 1}{s}.$$

dove, per semplicità, si è assunto $\mu = 8.75$.

d) Tracciare i diagrammi di Bode delle ampiezze di $L_1(s) = R_1(s)G_1(s)$ e della funzione di sensitività complementare $F_1(s)$. Infine sovrapporre il diagramma di $|F_1(j\omega)|$ a quello di $|L_2(j\omega)|$, tracciato al punto b), e discutere la fattibilità del progetto in cascata.

SOLUZIONE:

Vedere diagramma in fondo.

e) Supponendo che il sistema "veloce" $G_1(s)$ si comporti in maniera ideale, mentre $G_2(s)$ non faccia altrettanto, progettare un'azione di feed-forward $u_{ff}(t)$ per il sottosistema $G_2(s)$ che consenta di inseguire senza errore il riferimento $y_{sp}(t)$, di cui è nota l'espressione analitica insieme a quella delle sue derivate. Riportare lo schema di controlo basato sui due anelli di retroazione e sull'azione in avanti che sono stati progettati.

SOLUZIONE:

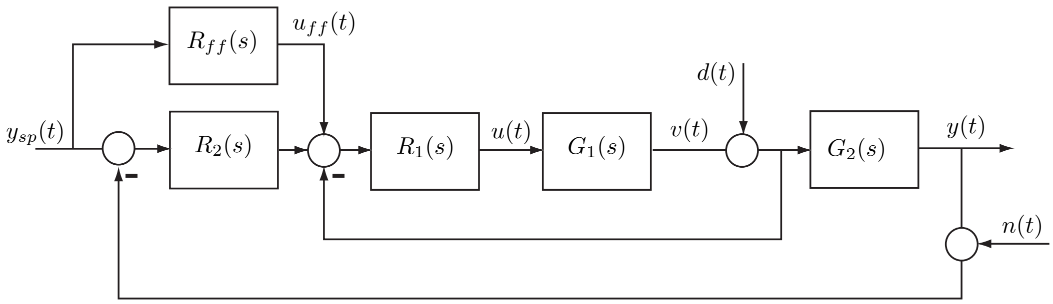
Invertendo la sola funzione di trasferimento $G_2(s) = \dfrac{2(s+8)}{(s+0.5)(s+25)} = \dfrac{2s+16}{s^2+25.5s+12.5}$ e interpretando l'operatore s come operatore di derivazione l'espressione dell'azione in avanti risulta immediata

$$U_{ff}(s) = G^{-1}(s)Y_{sp}(s) = 0.5\,sY_{sp}(s) + 8.75\,Y_{sp}(s) - \frac{127.5}{2s+16}Y_{sp}(s)$$

$$\Downarrow$$

$$u_{ff}(t) = 0.5\,\dot{y}_{sp}(t) + 8.75\,y_{sp} - \mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{127.5}{2s+16}Y_{sp}(s)\right\}.$$

Lo schema di controllo complessivo risulta



Notare che l'azione in avanti $u_{ff}(t)$ si somma all'azione di controllo del regolatore $R_2(s)$ per realizzare il riferimento per l'anello di controllo interno.

f) Dopo aver scelto il tempo di campionamento più idoneo discretizzare i regolatori $R_1(s)$, $R_2(s)$ con il metodo delle differenze all'indietro.

SOLUZIONE:

Il tempo di campionamento può essere scelto considerando la più restrittiva delle condizioni derivanti dai due regolatori:

(a) per $R_1(s)$, $\omega_c^\star = 15\ rad/s \quad \Rightarrow \quad \omega_s = 10\omega_c^\star = 150\ rad/s \quad \Rightarrow \quad T = \dfrac{2\pi}{\omega_s} = 0.0419\ s$

(b) per $R_2(s)$, $\omega_c^\star = 1.5\ rad/s \quad \Rightarrow \quad \omega_s = 10\omega_c^\star = 15\ rad/s \quad \Rightarrow \quad T = \dfrac{2\pi}{\omega_s} = 0.419\ s$

Il valore $T = 0.04$ soddisfa entrambe le specifiche.

Assumendo $s = \dfrac{1-z^{-1}}{T}$ i corrispondenti sistemi discretizzati risultano

$$R_1(s) = 8.75\,\frac{0.2\,s+1}{s} \quad \Rightarrow \quad R_1(z) = \frac{2.1-1.75z^{-1}}{1-z^{-1}} = \frac{2.1\,z-1.75}{z-1}$$

$$R_2(s) = 78\,\frac{0.8948s+1}{35.77s+1} \quad \Rightarrow \quad R_2(z) = \frac{2.036-1.949z^{-1}}{1-0.9989z^{-1}} = \frac{2.036\,z-1.949}{z-0.9989}$$

g) Scrivere le equazioni alle differenze corrispondenti ai regolatori $R_1(z) = \dfrac{U_1(z)}{E_1(z)}$, $R_2(z) = \dfrac{U_2(z)}{E_2(z)}$ discretizzati al punto precedente.

SOLUZIONE:

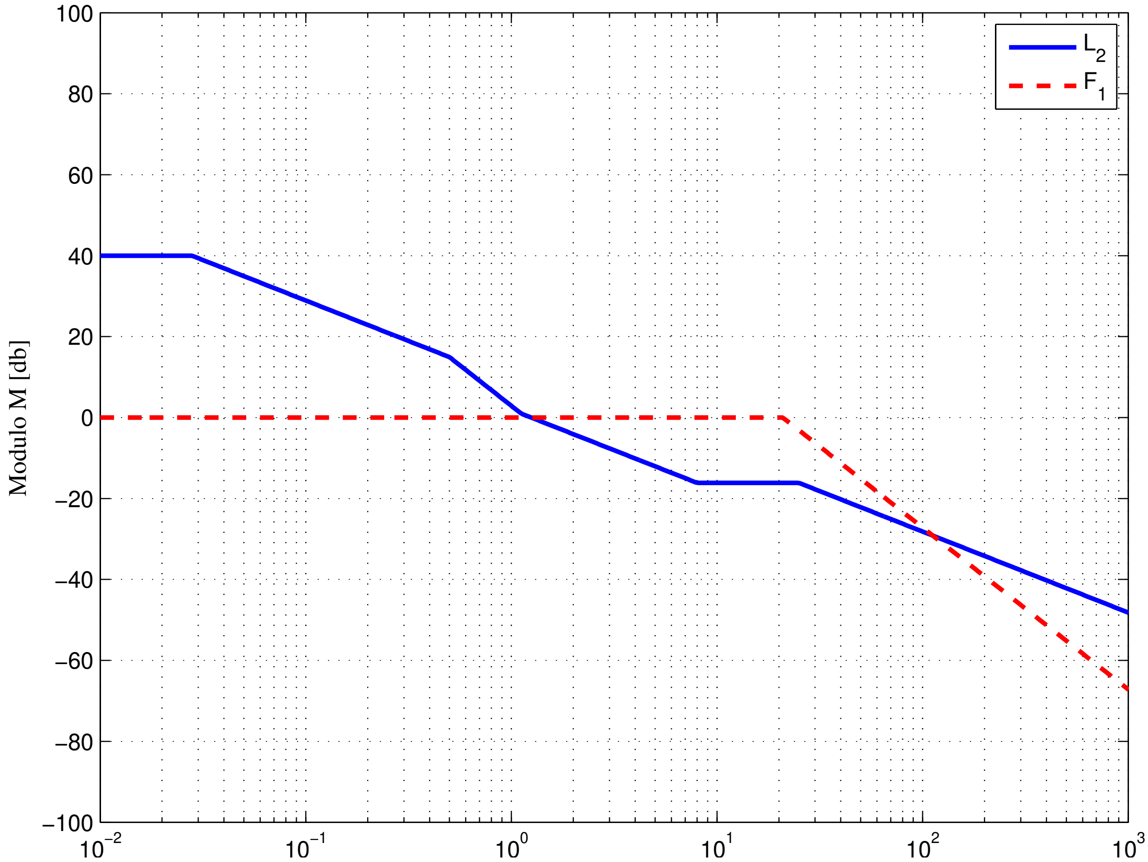
Interpretando z^{-1} come l'operatore ritardo unitario segue immediatamente che le equazioni alle differenze corrispondenti a $R_1(z)$, $R_2(z)$, $R_{ff}(s)$ sono:

$$R_1(z) = \frac{2.1 - 1.75z^{-1}}{1 - z^{-1}} = \frac{U_1(z)}{E_1(z)} \quad \Rightarrow \quad u_{1k} = u_{1k-1} + 2.1e_{1k} - 1.75e_{1k-1}$$

$$R_2(z) = \frac{2.036 - 1.949z^{-1}}{1 - 0.9989z^{-1}} = \frac{U_2(z)}{E_2(z)} \quad \Rightarrow \quad u_{2k} = 0.9989u_{2k-1} + 2.036e_{2k} - 1.949e_{2k-1}$$

Cognome: Nome: N. Matr.:

Diagrammi di Bode delle ampiezze di $L_2(s)$ e di $F_1(s)$



Diagrammi di Bode delle ampiezze di $L_1(s)$ e di $F_1(s)$