

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 15 settembre 2016 - 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 $M_a = 10$, 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 sempre stabile
- è stabile solo per $0.1 < K < 10$

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

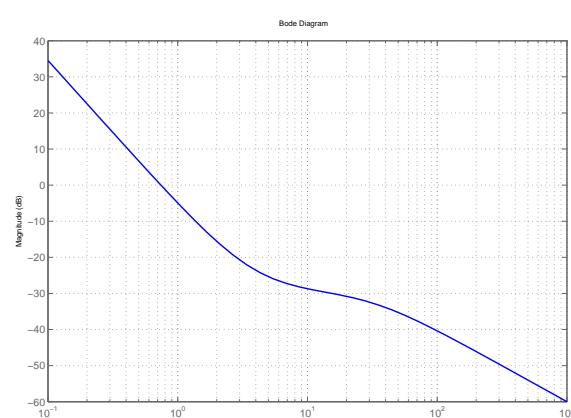
- ha come effetto utile l'attenuazione ad alta frequenza
- ha la costante di tempo dello zero più bassa di quella del polo
- ha come effetto negativo l'amplificazione in alta frequenza
- introduce un anticipo di fase che ha un valore massimo dipendente solo da α

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

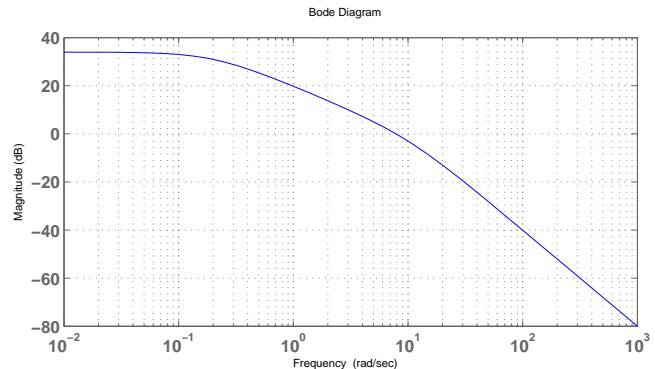


5. Nella progettazione di un sistema di controllo in retroazione per un impianto affetto da un ritardo non trascurabile si dovrà assumere:

- 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 $x_k = x(kT_s)$):

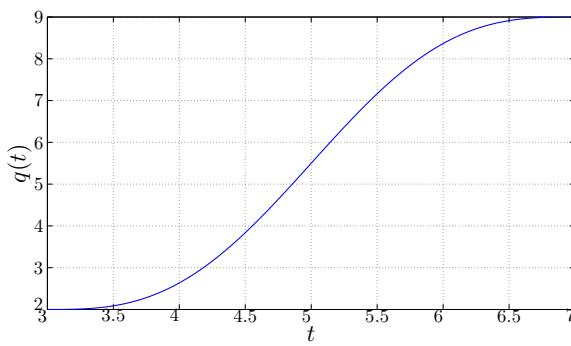
- mai
- se il tempo di campionamento $T_s \leq \frac{\pi}{2\omega_m}$
- se il tempo di campionamento $T_s \leq \frac{\pi}{\omega_m}$
- se il tempo di campionamento $T_s \leq \frac{2\pi}{\omega_m}$

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

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

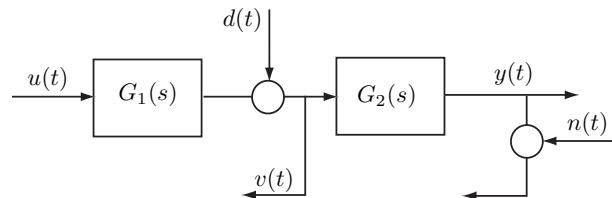
Compito del 15 settembre 2016 - Problemi

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:

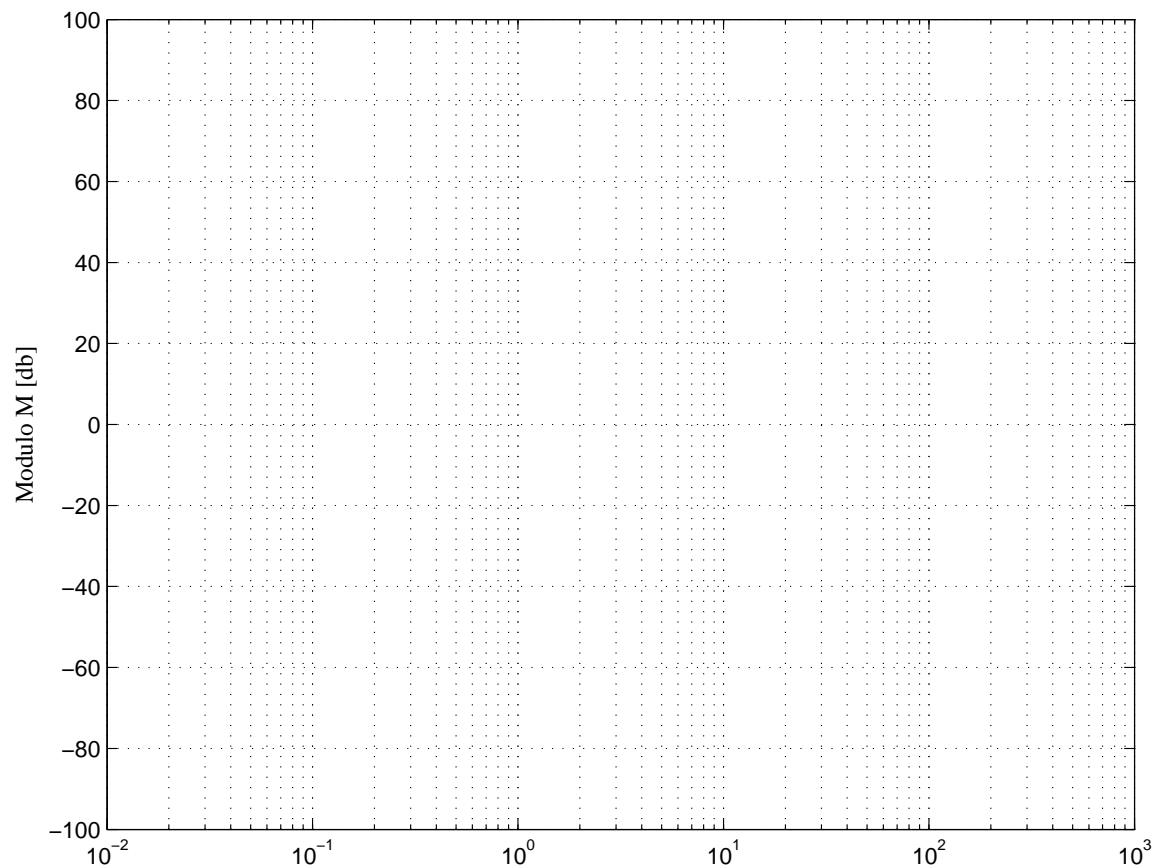
- a) Progettare il regolatore di complessità minima, denominato $R_2(s)$, per il solo sottosistema $G_2(s)$ che consenta di ottenere
 - errore a regime per ingresso a gradino inferiore al 1%;
 - risposta aperiodica;
 - tempo di assestamento $T_a \leq 2$ s;
 - azione di controllo minima.
- b) Disegnare 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° ;
 - pulsazione di incrocio ω_c compatibile con il disaccoppiamento 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 controllo 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 $R_1(z) = \frac{U_1(z)}{E_1(z)}$, $R_2(z) = \frac{U_2(z)}{E_2(z)}$ discretizzati al punto precedente.

Cognome:

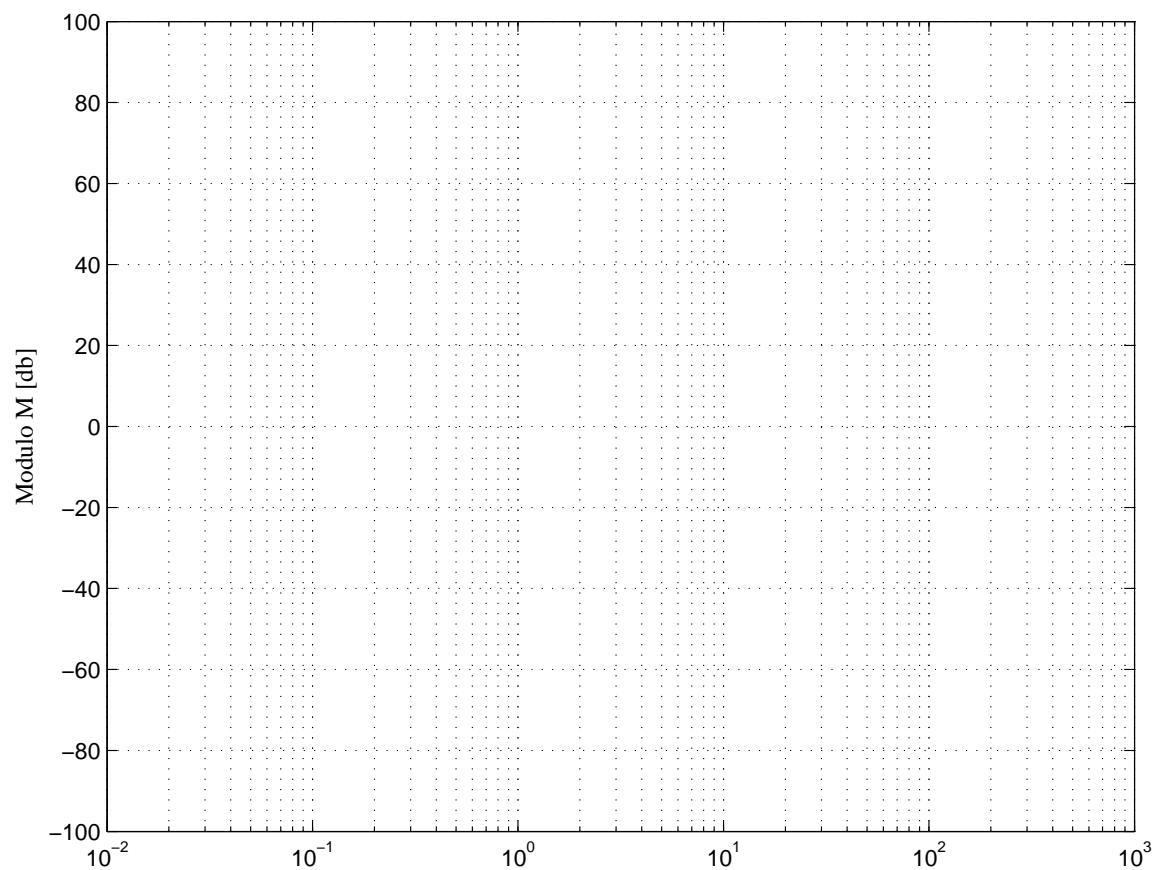
Nome:

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)

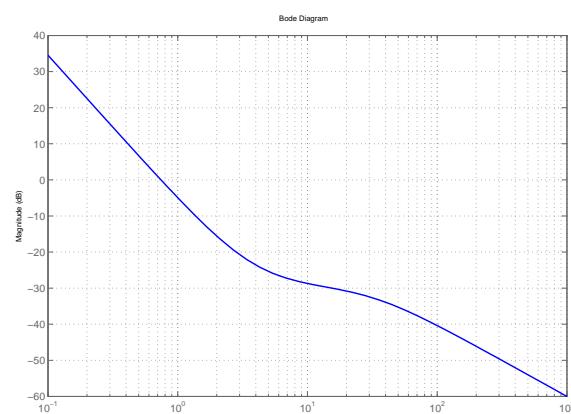
Ingegneria Meccanica e Ingegneria del Veicolo

Compito del 15 settembre 2016 - 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 $M_a = 10$, 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 sempre stabile
 - è stabile solo per $0.1 < K < 10$
2. Una rete anticipatrice $R(s) = \frac{1 + \tau s}{1 + \alpha \tau s}$:
 - 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

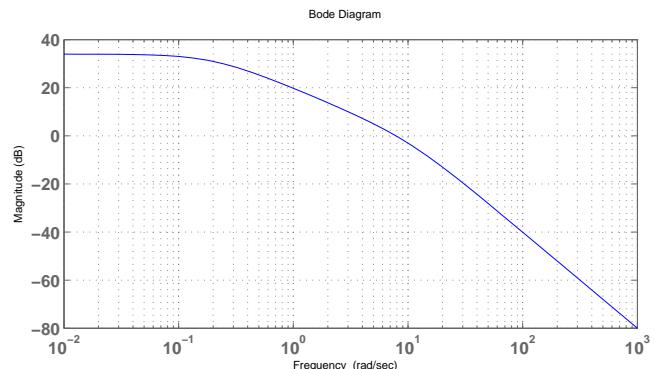


5. Nella progettazione di un sistema di controllo in retroazione per un impianto affetto da un ritardo non trascurabile si dovrà assumere:

- 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 $x_k = x(kT_s)$):

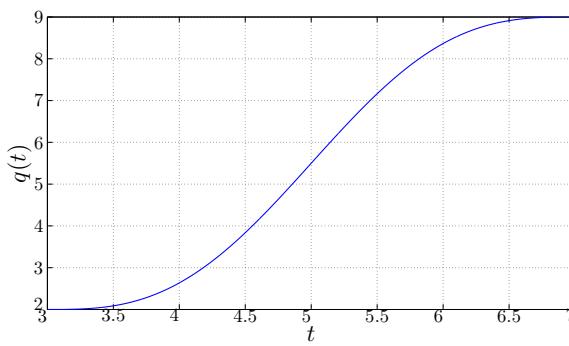
- mai
- se il tempo di campionamento $T_s \leq \frac{\pi}{2\omega_m}$
- se il tempo di campionamento $T_s \leq \frac{\pi}{\omega_m}$
- se il tempo di campionamento $T_s \leq \frac{2\pi}{\omega_m}$

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

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

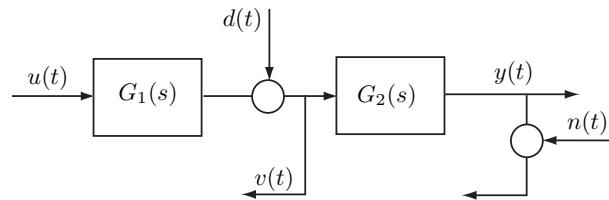
Compito del 15 settembre 2016 - Problemi

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

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

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 $\rightarrow M_f^* = 80^\circ$
- tempo di assestamento $T_a \leq 2$ s $\rightarrow T_a = \frac{3}{\omega_c} \leq 2s \rightarrow \omega_c \geq \frac{3}{2}$. Si assume il valore minimo $\omega_c^* = 1.5$ 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 $\arg\{G_{2e}(j1.5)\} = -64.3790^\circ$. 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

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

e sfasi di

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

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° ;
- pulsazione di incrocio ω_c compatibile con il disaccoppiamento 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 $M_f^* = 50^\circ$ e la pulsazione di incrocio $\omega_{c1}^* = 15$ 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 $\omega_{c1}^* = 15$. 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:

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

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

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

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 controllo basato sui due anelli di retroazione e sull’azione in avanti che sono stati progettati.

SOLUZIONE:

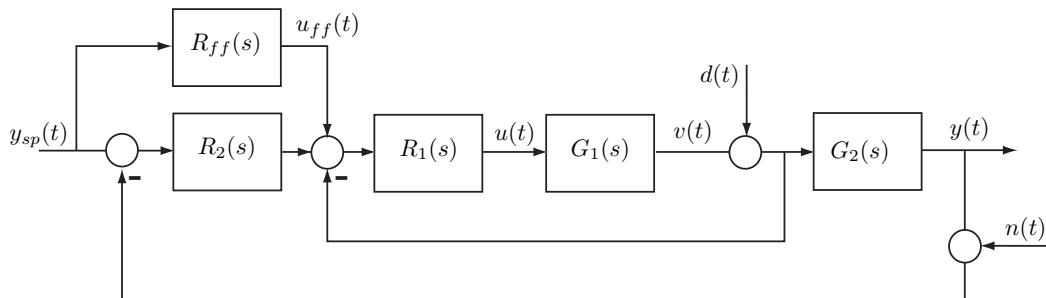
Invertendo la sola funzione di trasferimento $G_2(s) = \frac{2(s+8)}{(s+0.5)(s+25)} = \frac{2s+16}{s^2+25.5s+12.5}$ e interpretando l’operatore s come operatore di derivazione l’espressione dell’azione in avanti risulta immediata

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

↓

$$u_{ff}(t) = 0.5\dot{y}_{sp}(t) + 0.875y_{sp} - \mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{127.5}{2s+16}Y_{sp}(s)\right\}.$$

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:

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

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

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

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

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

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

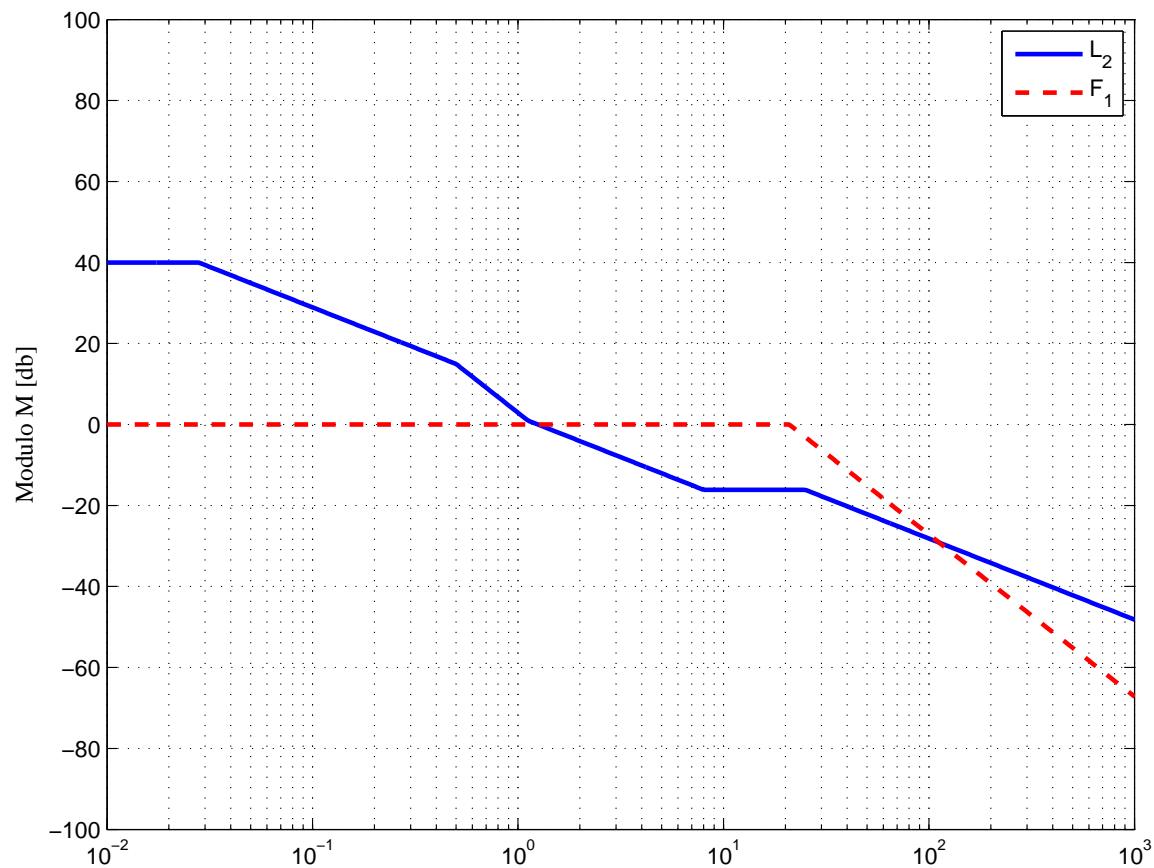
-
- g) Scrivere le equazioni alle differenze corrispondenti ai regolatori $R_1(z) = \frac{U_1(z)}{E_1(z)}$, $R_2(z) = \frac{U_2(z)}{E_2(z)}$ discretizzati al punto precedente.
-

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:

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

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

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 $F_1(s)$ 