

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

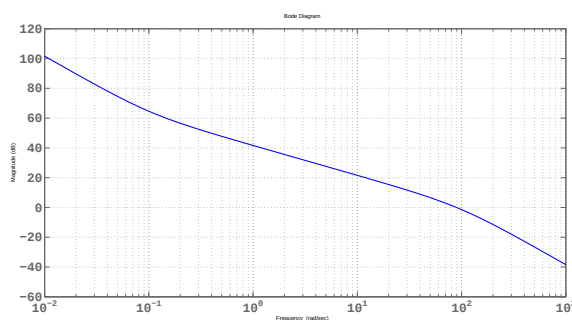
Compito del 23 febbraio 2017 - Quiz

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 5.5 su 11), diversamente il compito verrà ritenuto insufficiente a prescindere dal risultato della seconda prova.

1. Dato il sistema dinamico retroazionato la cui funzione di anello è riportata in figura (diagramma di Bode delle ampiezze) affetto da un disturbo sinusoidale di tipo “d” alla pulsazione 0.1 rad/s, l’attenuazione del disturbo sull’uscita è pari a circa:

- ☐ 1000 volte
☐ 100 volte
☐ 60 volte
☐ 40 volte



2. La banda passante di un filtro passa-banda ha la forma:

- ☐ $[0, \omega_{B1}] \cup [\omega_{B2}, \infty]$
☐ $[\omega_{B1}, \omega_{B2}]$
☐ $[0, \omega_B]$
☐ $[\omega_B, \infty]$

3. Il controllo in feedforward presenta i seguenti svantaggi:

- ☐ performance scadenti in condizioni nominali
☐ scarsa robustezza rispetto a disturbi agenti sull’impianto
☐ necessità di una conoscenza precisa del plant
☐ ottenimento di tempi di assestamento molto più grandi di quelli ottenibili con un controllore in retroazione

4. In un sistema in retroazione, la funzione di sensitività del controllo $Q(s)$:

- ☐ dipende solo dalla funzione di trasferimento dell’impianto $G(s)$
☐ dipende solo dalla funzione di trasferimento del regolatore $R(s)$
☐ dipende sia da $R(s)$ che da $G(s)$
☐ dipende solo dal guadagno d’anello $L(s) = R(s)G(s)$

5. Se si vuole controllare mediante retroazione unitaria negativa un impianto di tipo 1, il regolatore statico di complessità minima (ovvero col minimo numero di poli nell’origine) che garantisce errore a regime nullo per ingresso a rampa ha la struttura

- ☐ $R_s(s) = \mu$
☐ $R_s(s) = \frac{\mu}{s}$
☐ $R_s(s) = \frac{\mu}{s^2}$
☐ $R_s(s) = \frac{\mu}{s^3}$

6. La progettazione di una rete correttiva per cancellazione:

- ☐ permette di imporre in maniera esatta sia il margine di ampiezza che la pulsazione di incrocio della funzione di anello
- ☐ è utile per evitare l'insorgere di code di assestamento
- ☐ può essere effettuata cancellando qualunque polo dell'impianto, anche instabile
- ☐ può essere infattibile nel caso non si riesca a ottenere il margine di fase desiderato alla pulsazione di incrocio scelta

7. In un regolatore PID, l'azione di controllo derivativa

- ☐ riduce i disturbi di misura
- ☐ limita l'azione di controllo
- ☐ si usa per migliorare il margine di fase
- ☐ può essere realizzata fisicamente solo aggiungendo un polo ad alta frequenza

8. Un sistema di controllo in retroazione (con $\omega_c = 4$) basato su un regolatore digitale è affetto da 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 $\omega_{aa} = 40$ rad/s. Quale dovrebbe essere la pulsazione di campionamento tale da garantire un'attenuazione dei disturbi di almeno 100 volte?

- ☐ $\omega_s \approx 40$ rad/sec
- ☐ $\omega_s \approx 80$ rad/sec
- ☐ $\omega_s \approx 400$ rad/sec
- ☐ $\omega_s \approx 800$ rad/sec

9. In un sistema di controllo digitale in retroazione, una riduzione del margine di fase può essere provocata:

- ☐ dall'operazione di campionamento e ricostruzione dei segnali
- ☐ dall'aliasing provocato dal campionamento
- ☐ da un'eventuale filtro anti-aliasing
- ☐ da un eventuale compensatore dei disturbi misurabili realizzato discretizzando il corrispondente compensatore tempo-continuo

10. Data una generica traiettoria normalizzata, l'operazione di scalatura temporale al fine di ottenere una specifica durata T :

- ☐ modifica in maniera lineare ($\frac{1}{T}$) tutte le sue derivate (e quindi velocità, accelerazione, ...)
- ☐ lascia invariate tutte le derivate
- ☐ modifica linearmente ($\frac{1}{T}$) la velocità, quadraticamente ($\frac{1}{T^2}$) l'accelerazione e così via per le derivate successive

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 23 febbraio 2017 - Problemi

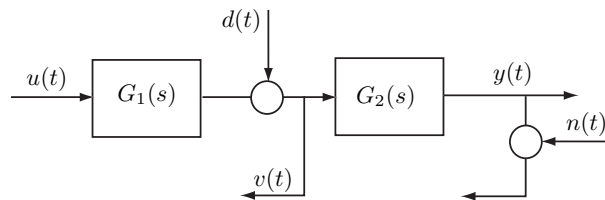
Rispondere in maniera analitica ai seguenti quesiti. I problemi e le domande a risposta aperta si ritengono superati se vengono conseguiti almeno metà dei punti totali (11 su 22), diversamente il compito verrà ritenuto insufficiente a prescindere dal risultato della prima prova.

1. Descrivere le principali tecniche per la taratura dei regolatori PID.

2. Dato l'impianto di figura con:

$$G_1(s) = \frac{18}{s(s+3)}$$

$$G_2(s) = \frac{3}{(s+12)(s+0.4)}$$



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

Si richiede pertanto di:

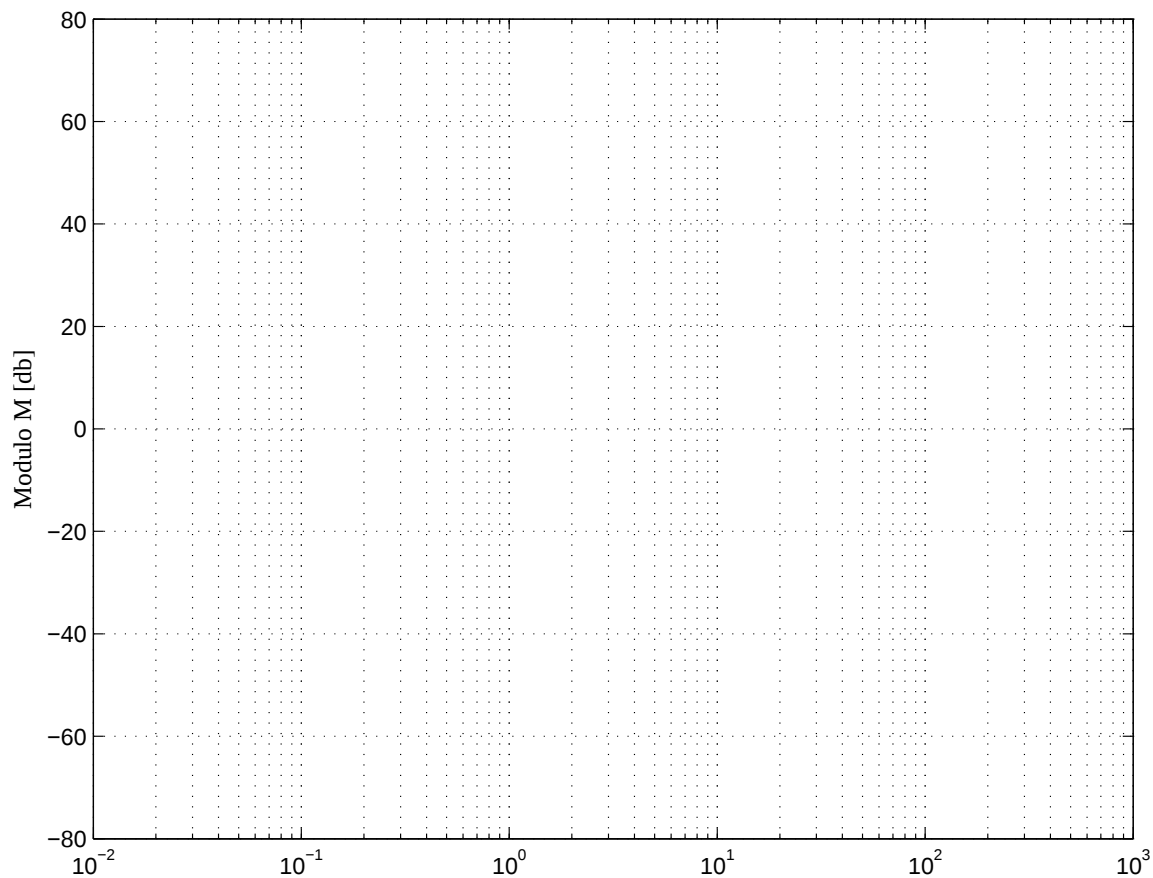
- a) Progettare il regolatore di complessità minima, denominato $R_2(s)$, per il solo sottosistema $G_2(s)$ che consenta di ottenere:
 - errore di posizione nullo;
 - risposta aperiodica;
 - tempo di assestamento $T_a \leq 2$ s;
 - azione di controllo minima.
- b) Disegnare il diagramma di Bode delle 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:
 - attenuazione di un disturbo $d(t)$ frequenzialmente confinato nel range $[0.1, 0.4]$ rad/s di almeno 60 volte;
 - margine di fase M_f di almeno 55° ;
 - 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) Scegliere il tempo di campionamento più idoneo per discretizzare i regolatori $R_1(s)$, $R_2(s)$ tenendo conto della larghezza di banda dei sistemi retroazionati e imponendo che il peggioramento del margine di fase dovuto al ricostruttore di ordine zero non superi i 10° . Discretizzare entrambi i regolatori mediante il metodo di Tustin.
- f) 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.
- g) Progettare un'azione di feed-forward $u_{ff}(t)$ per l'intero impianto che consenta di inseguire senza errore il riferimento $y_{sp}(t)$, di cui è nota l'espressione analitica insieme a quella delle sue derivate. Quale sarà l'ordine di continuità minimo della traiettoria $y_{sp}(t)$ che garantisce un'azione di controllo limitata?

Cognome:

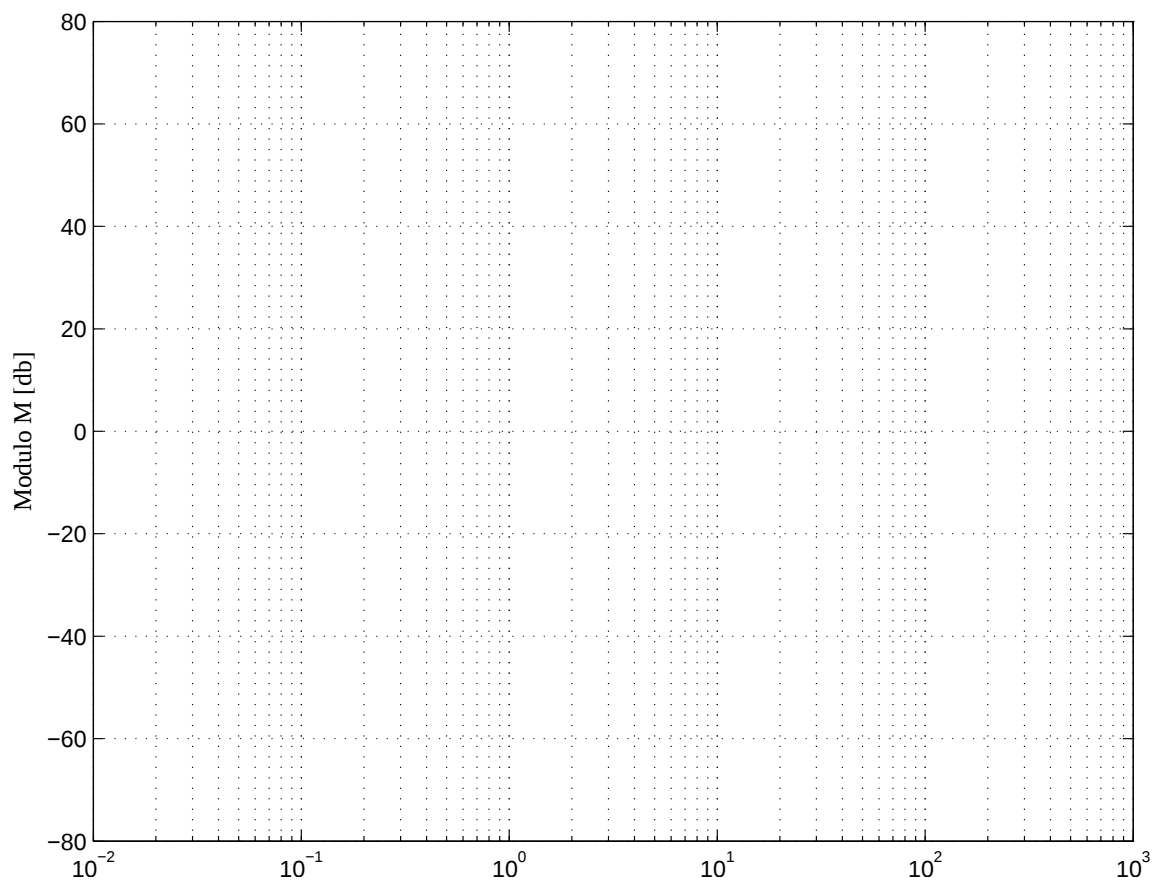
Nome:

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

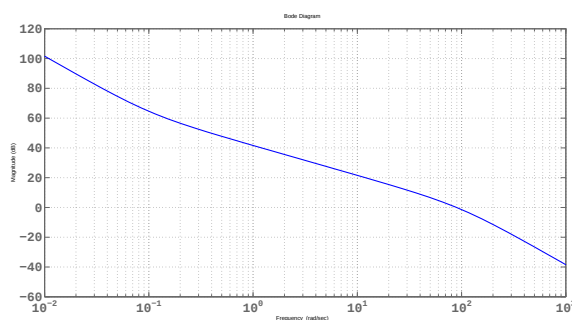
Compito del 23 febbraio 2017 - Quiz

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 5.5 su 11), diversamente il compito verrà ritenuto insufficiente a prescindere dal risultato della seconda prova.

1. Dato il sistema dinamico retroazionato la cui funzione di anello è riportata in figura (diagramma di Bode delle ampiezze) affetto da un disturbo sinusoidale di tipo “d” alla pulsazione 0.1 rad/s, l’attenuazione del disturbo sull’uscita è pari a circa:

- ☒ 1000 volte
☐ 100 volte
☐ 60 volte
☐ 40 volte



2. La banda passante di un filtro passa-banda ha la forma:

- ☐ $[0, \omega_{B1}] \cup [\omega_{B2}, \infty]$
☒ $[\omega_{B1}, \omega_{B2}]$
☐ $[0, \omega_B]$
☐ $[\omega_B, \infty]$

3. Il controllo in feedforward presenta i seguenti svantaggi:

- ☐ performance scadenti in condizioni nominali
☒ scarsa robustezza rispetto a disturbi agenti sull’impianto
☒ necessità di una conoscenza precisa del plant
☐ ottenimento di tempi di assestamento molto più grandi di quelli ottenibili con un controllore in retroazione

4. In un sistema in retroazione, la funzione di sensitività del controllo $Q(s)$:

- ☐ dipende solo dalla funzione di trasferimento dell’impianto $G(s)$
☐ dipende solo dalla funzione di trasferimento del regolatore $R(s)$
☒ dipende sia da $R(s)$ che da $G(s)$
☐ dipende solo dal guadagno d’anello $L(s) = R(s)G(s)$

5. Se si vuole controllare mediante retroazione unitaria negativa un impianto di tipo 1, il regolatore statico di complessità minima (ovvero col minimo numero di poli nell’origine) che garantisce errore a regime nullo per ingresso a rampa ha la struttura

- ☐ $R_s(s) = \mu$
☒ $R_s(s) = \frac{\mu}{s}$
☐ $R_s(s) = \frac{\mu}{s^2}$
☐ $R_s(s) = \frac{\mu}{s^3}$

6. La progettazione di una rete correttiva per cancellazione:

- ☐ permette di imporre in maniera esatta sia il margine di ampiezza che la pulsazione di incrocio della funzione di anello
- ☒ è utile per evitare l'insorgere di code di assestamento
- ☐ può essere effettuata cancellando qualunque polo dell'impianto, anche instabile
- ☒ può essere infattibile nel caso non si riesca a ottenere il margine di fase desiderato alla pulsazione di incrocio scelta

7. In un regolatore PID, l'azione di controllo derivativa

- ☐ riduce i disturbi di misura
- ☐ limita l'azione di controllo
- ☒ si usa per migliorare il margine di fase
- ☒ può essere realizzata fisicamente solo aggiungendo un polo ad alta frequenza

8. Un sistema di controllo in retroazione (con $\omega_c = 4$) basato su un regolatore digitale è affetto da 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 $\omega_{aa} = 40$ rad/s. Quale dovrebbe essere la pulsazione di campionamento tale da garantire un'attenuazione dei disturbi di almeno 100 volte?

- ☐ $\omega_s \approx 40$ rad/sec
- ☐ $\omega_s \approx 80$ rad/sec
- ☐ $\omega_s \approx 400$ rad/sec
- ☒ $\omega_s \approx 800$ rad/sec

9. In un sistema di controllo digitale in retroazione, una riduzione del margine di fase può essere provocata:

- ☒ dall'operazione di campionamento e ricostruzione dei segnali
- ☐ dall'aliasing provocato dal campionamento
- ☒ da un'eventuale filtro anti-aliasing
- ☐ da un eventuale compensatore dei disturbi misurabili realizzato discretizzando il corrispondente compensatore tempo-continuo

10. Data una generica traiettoria normalizzata, l'operazione di scalatura temporale al fine di ottenere una specifica durata T :

- ☐ modifica in maniera lineare ($\frac{1}{T}$) tutte le sue derivate (e quindi velocità, accelerazione, ...)
- ☐ lascia invariate tutte le derivate
- ☒ modifica linearmente ($\frac{1}{T}$) la velocità, quadraticamente ($\frac{1}{T^2}$) l'accelerazione e così via per le derivate successive

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 23 febbraio 2017 - Problemi

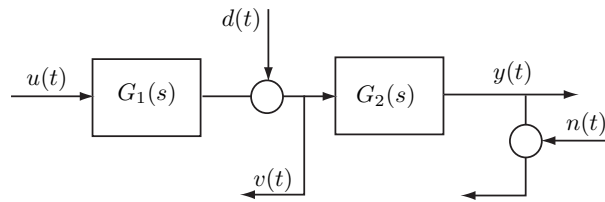
Rispondere in maniera analitica ai seguenti quesiti. I problemi e le domande a risposta aperta si ritengono superati se vengono conseguiti almeno metà dei punti totali (11 su 22), diversamente il compito verrà ritenuto insufficiente a prescindere dal risultato della prima prova.

1. Descrivere le principali tecniche per la taratura dei regolatori PID.

2. Dato l'impianto di figura con:

$$G_1(s) = \frac{18}{s(s+3)}$$

$$G_2(s) = \frac{3}{(s+12)(s+0.4)}$$



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 di posizione nullo;
 - risposta aperiodica;
 - tempo di assestamento $T_a \leq 2$ s;
 - azione di controllo minima.

SOLUZIONE:

Per garantire errore di posizione (cioè errore a regime per ingresso a gradino) nullo, il regolatore $R_2(s)$ dovrà avere un polo nell'origine. Pertanto, con ogni probabilità, il regolatore avrà la forma di un PI (o di un PID)

$$R_2(s) = \mu \frac{\tau_z s + 1}{s}.$$

Le altre specifiche si traducono in:

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

Il sistema esteso

$$G_{2e}(s) = \frac{G_2(s)}{s} = \frac{3}{s(s+12)(s+0.4)}$$

alla pulsazione di incrocio desiderata vale in modulo e argomento $|G_{2e}(j1.5)| = 0.1065$ e $\arg\{G_{2e}(j1.5)\} = -172.1936^\circ$, rispettivamente. Dal momento che la fase è "relativamente" alta, si tenta un progetto per cancellazione, con lo zero del PI utilizzato per migliorare il margine di fase e il guadagno per imporre la ω_c^* desiderata. Si fissa $\tau_z = \frac{1}{0.4}$ (cancellazione del polo in -0.4) e si procede al calcolo di

$$\mu = \frac{1}{|G_{2e}(j1.5)| \cdot \sqrt{1 + (\tau_z \omega_c^*)^2}} = \frac{1}{0.1065 \cdot 3.8810} = 2.4187.$$

Resta da verificare il Margine di fase ottenuto

$$M_f = 180^\circ + \arg\{G_{2e}(j1.5)\} + \varphi_z = 82.8750^\circ > 80^\circ$$

essendo $\varphi_z = 75.0686^\circ$. L'espressione del regolatore PI in grado di soddisfare tutte le specifiche risulta pertanto

$$R_2(s) = 2.4187 \frac{2.5s + 1}{s}.$$

- 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:
- attenuazione di un disturbo $d(t)$ frequenzialmente confinato nel range $[0.1, 0.4]$ rad/s di almeno 60 volte;
 - margine di fase M_f di almeno 55° ;
 - pulsazione di incrocio ω_c compatibile con il disaccoppiamento frequenziale richiesto dal progetto del regolatore in cascata.
-

SOLUZIONE:

Il regolatore $R_2(s)$ sarà costituito da una parte statica (un semplice guadagno μ) più (eventualmente) una parte dinamica. Il guadagno μ deve essere scelto in modo tale a garantire l'attenuazione del disturbo $d(t)$ richiesta, pertanto occorre far sì che alla massima pulsazione del disturbo ($\omega_d = 0.4$ rad/s) si abbia $|S(j\omega_d)| \leq \frac{1}{60}$. Considerando l'espressione approssimata di $|S(j\omega)|$ per basse frequenze risulta

$$|S(j\omega_d)| \approx \frac{1}{|L(j\omega_d)|} \Rightarrow |L(j\omega_d)| \geq 60$$

con $L(s) = \mu G_1(s)$. Svolgendo i calcoli risulta

$$|\mu G_1(j0.4)| \geq 60 \Rightarrow \mu \geq \frac{60}{14.8684} = 4.0354.$$

Per semplicità si assume $\mu = 5$. Per il calcolo del regolatore dinamico si considera il sistema esteso $G_{1e}(s) = \frac{90}{s(s+3)}$ a cui si dovrà imporre un margine di fase $M_f = 55^\circ$ alla pulsazione di incrocio $\omega_c = 15$ rad/s (scelta un ordine di grandezza maggiore rispetto alla pulsazione di incrocio dell'anello esterno progettato al punto a)). Dal calcolo del modulo e dell'argomento di $G_{1e}(j\omega)$, alla pulsazione ω_c^* si evince come sia necessaria una rete anticipatrice. Infatti, $|G_{1e}(j15)| = 0.3922$ e $\arg(G_{1e}(j15)) = -168.6901^\circ$. Pertanto l'amplificazione della rete dovrà essere

$$M^* = \frac{1}{|G_{1e}(j\omega_c^*)|} = 2.5495,$$

mentre lo sfasamento dovrà essere

$$\varphi^* = -180^\circ + M_f^* - \arg(G_{1e}(j\omega_c^*)) = 43.6901^\circ.$$

M^* e φ^* verificano le condizioni di applicabilità di una rete anticipatrice.

Dalle formule di inversione si ricava che $\tau = 0.1763$ e $\alpha = 0.1811$ per cui

$$R_d(s) = \frac{0.1763 s + 1}{0.03193 s + 1}.$$

Alla fine il regolatore $R_1(s)$ vale

$$R_1(s) = 5 \frac{0.1763 s + 1}{0.03193 s + 1}.$$

-
- 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) Scegliere il tempo di campionamento più idoneo per discretizzare i regolatori $R_1(s)$, $R_2(s)$ tenendo conto della larghezza di banda dei sistemi retroazionati e imponendo che il peggioramento del margine di fase dovuto al ricostruttore di ordine zero non superi i 10° . Discretizzare entrambi i regolatori mediante il metodo di Tustin.
-

SOLUZIONE:

Il tempo di campionamento può essere scelto considerando la più restrittiva delle condizioni derivanti dalla larghezza di banda dei due regolatori e dal massimo sfasamento ammissibile:

- (a) 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) per $R_2(s)$, $\omega_c^* = 1.5 \text{ rad/s} \Rightarrow \omega_s = 10\omega_c^* = 15 \text{ rad/s} \Rightarrow T = \frac{2\pi}{\omega_s} = 0.419 \text{ s}$
- (c) $\Delta M_f = \frac{T}{2} \omega_c \frac{180}{\pi} \leq 10^\circ \Rightarrow T \leq \frac{10 \cdot 2\pi}{\omega_c \cdot 180} = 0.0233 \text{ s}$ essendo $\omega_c = 15 \text{ rad/s}$ (si assume la ω_c più grande che corrisponde al caso peggiore).

Il valore $T = 0.02$ soddisfa tutte le specifiche.

Sostituendo $s = \frac{2}{T} \frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}}$ la funzione di trasferimento dei regolatori discretizzati risulta

$$R_1(s) = 5 \frac{0.1763 s + 1}{0.03193 s + 1} \Rightarrow R_1(z) = \frac{22.21 - 19.83z^{-1}}{1 - 0.523z^{-1}} = \frac{22.21z - 19.83}{z - 0.523}$$

$$R_2(s) = 2.4187 \frac{2.5 s + 1}{s} \Rightarrow R_2(z) = \frac{6.071 - 6.023z^{-1}}{1 - z^{-1}} = \frac{6.071z - 6.023}{z - 1}$$

- f) 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 $R_1(z)$ e $R_2(z)$ sono:

$$R_1(z) = \frac{22.21 - 19.83z^{-1}}{1 - 0.523z^{-1}} = \frac{U_1(z)}{E_1(z)} \Rightarrow u_{1k} = 0.523u_{1k-1} + 22.21e_{1k} - 19.83e_{1k-1}$$

$$R_2(z) = \frac{6.071 - 6.023z^{-1}}{1 - z^{-1}} = \frac{U_2(z)}{E_2(z)} \Rightarrow u_{2k} = u_{2k-1} + 6.071e_{2k} - 6.023e_{2k-1}$$

- g) Progettare un'azione di feed-forward $u_{ff}(t)$ per l'intero impianto che consenta di inseguire senza errore il riferimento $y_{sp}(t)$, di cui è nota l'espressione analitica insieme a quella delle sue derivate. Quale sarà l'ordine di continuità minimo della traiettoria $y_{sp}(t)$ che garantisce un'azione di controllo limitata?

SOLUZIONE:

Invertendo la funzione di trasferimento $G(s) = G_1(s)G_2(s) = \frac{54}{s^4 + 15.4s^3 + 42s^2 + 14.4s}$ e interpretando l'operatore s come operatore di derivazione l'espressione dell'azione in avanti risulta immediata

$$U_{ff}(s) = G^{-1}(s)Y_{sp}(s) = \frac{1}{54}s^4Y_{sp}(s) + \frac{15.4}{54}s^3Y_{sp}(s) + \frac{42}{54}s^2Y_{sp}(s) + \frac{14.4}{54}sY_{sp}(s)$$

$$= 0.01852s^4Y_{sp}(s) + 0.2852s^3Y_{sp}(s) + 0.7778s^2Y_{sp}(s) + 0.2667sY_{sp}(s)$$

$\Downarrow$

$$u_{ff}(t) = 0.01852y_{sp}^{(4)}(t) + 0.2852y_{sp}^{(3)}(t) + 0.7778y_{sp}^{(2)}(t) + 0.2667y_{sp}^{(1)}(t)$$

dove $y_{sp}^{(i)}(t)$ denota la derivata i -esima della funzione $y_{sp}(t)$.

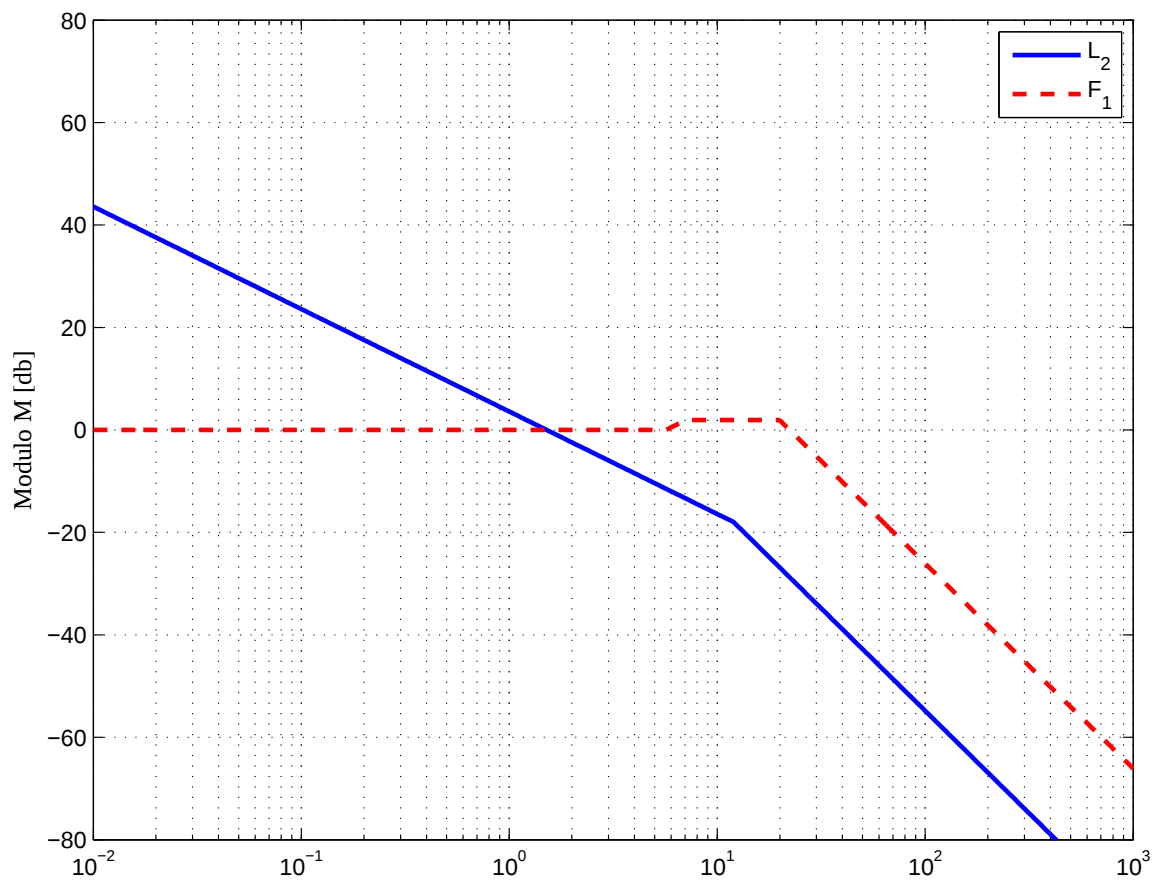
Per garantire la limitatezza dell'azione di controllo $u_{ff}(t)$ è necessario che la traiettoria di riferimento $y_{sp}(t)$ sia almeno $\mathbb{C}^3$, cioè continua fino alla derivata terza.

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 $F_1(s)$

