Voto

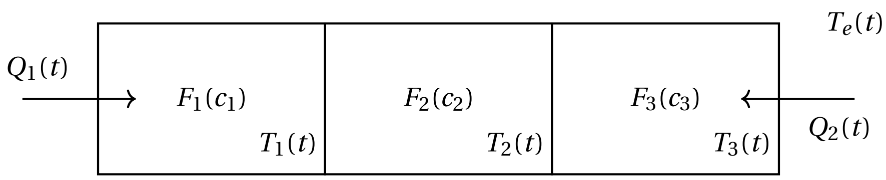
Traccia Matlab

Cognome, Nome e Matricola

CORSO: TEORIA DEI SISTEMI
DOCENTE: VINCENZO LIPPIELLO

Prova scritta del 11/03/2024

Leggere con attenzione
Il corretto svolgimento del compito prevede che lo studente risponda in maniera chiara ai quesiti proposti e, ove necessario, argomenti i diversi passaggi, espliciti le formule usate, motivi le scelte e non si limiti a riportare i soli risultati dei calcoli.
Alla consegna della prova scritta, l'allievo riceverà la traccia dell'elaborato tecnico da svolgere in ambiente Matlab/Simulink.
Non è consentito consultare appunti o altro materiale, così come è assolutamente vietata ogni forma di collaborazione, pena l'annullamento della prova e il non poter partecipare alla successiva seduta d'esame. Durante la seduta, si forniranno spiegazioni soltanto su quesiti inerenti la comprensione della traccia.
Durata della prova: 3 ore.



1. Si calcoli e si classifichi il modello i-s-u del sistema termico rappresentato in figura. I forni non hanno pareti che immagazzinano calore. $T_i(t)$ e c_i, con $i = 1,\dots,3$, rappresentano la temperatura interna e la capacità del forno i-esimo, rispettivamente. Invece, k_1 rappresenta la conduttanza termica fra F_1 e F_2; k_2 è la conduttanza fra F_2 e F_3, mentre k_e è la conduttanza fra i forni e l'ambiente esterno. L'uscita del sistema è la temperatura di F_2. Gli ingressi sono la quantità di calore $Q_1(t)$ e $Q_2(t)$ in entrata ai forni F_1 e F_3, rispettivamente, e la temperatura esterna $T_e(t)$. **[Punti: 5]**

2. Si consideri il sistema dinamico LTI a tempo continuo descritto dalla funzione di trasferimento

$$G(s) = \frac{s^2 + 200}{(s^2+1)(s+100)}.$$

Si provveda a disegnare i diagrammi asintotici di Bode, apportando le dovute correzioni. Laddove possibile, si determini la banda a -3 dB del sistema. **[Punti: 6]**

3. Si consideri un sistema LTI a tempo continuo avente la seguente funzione di trasferimento

$$G(s) = \frac{-50s(s-1)}{(s+5)(s^2+2hs+c)},$$

con $h, c \in \mathbb{R}$.

   a) Si discutano le proprietà di asintotica stabilità, semplice stabilità ed instabilità al variare dei parametri h e c. **[Punti: 3]**

   b) Posto $c = 1$, si determini l'intervallo dei valori del parametro h affinché il sistema presenti dei modi naturali pseudo-periodici con smorzamento $\xi > 0.5$. Scelto il valore minimo di tale intervallo, si scriva la risposta impulsiva dell'uscita del sistema. **[Punti: 5]**

   c) Posti $c = 1$ e $h = 1$, si calcoli la risposta a regime dell'uscita, se possibile, al segnale d'ingresso $u(t) = (-3 + \sin(t + \pi/4) + e^{-0.1t})\delta_{-1}(t)$. **[Punti: 3]**

   d) Posti $c = 1$ e $h = 0.5$, si calcoli la risposta complessiva dell'uscita, $y(t)$, $\forall t \in \mathbb{R}$, quando il sistema è sottoposto all'ingresso $u(t) = (-1 + \cos(\pi t))\delta_{-1}(-t) - \delta_{-1}(t)$. **[Punti: 8]**

Soluzione

1 Esercizio

Il sistema presenta tre forni che costituiscono tre corpi che accumulano calore. È dunque possibile scrivere tre bilanci per la quantità di calore scambiata fra di loro. Gli scambi di quantità di calore sono evidenziati nella Fig. 1.1.

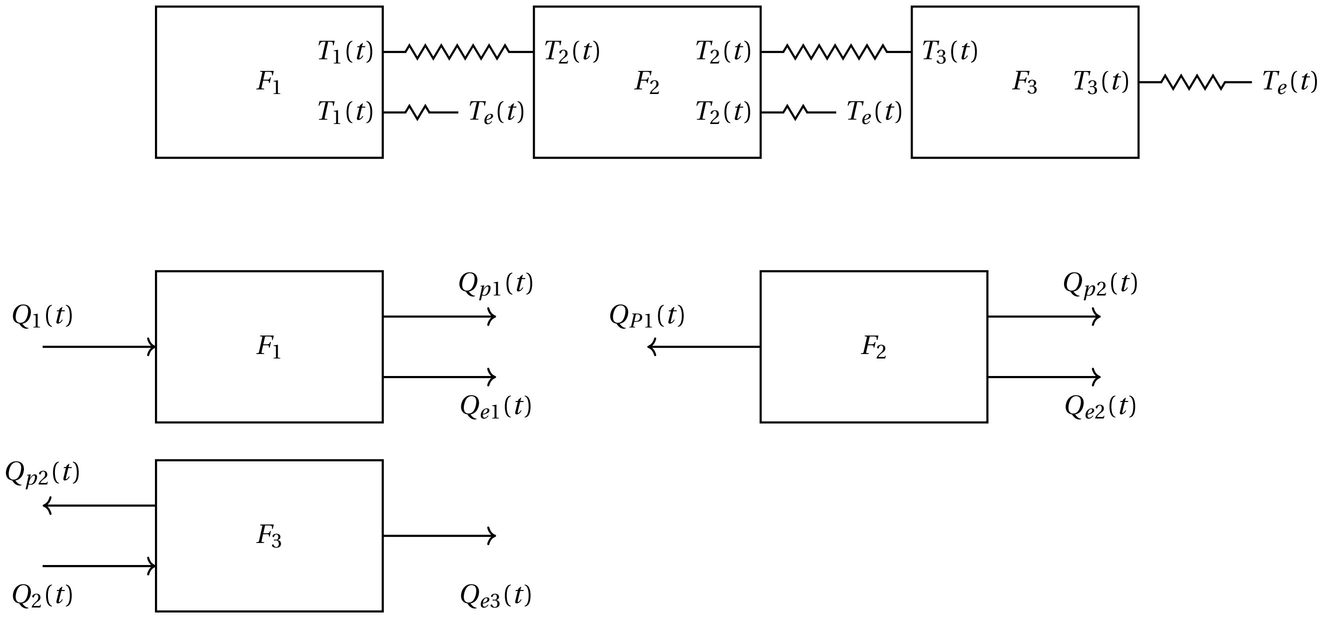


Figura 1.1: Isolamento degli scambi di quantità di calore per il sistema termico in esame.

Ricordando le relazioni costitutive per gli scambi di quantità di calore è possibile scrivere le seguenti relazioni $Q_{p1}(t) = k_1(T_2(t) - T_1(t))$, $Q_{p2}(t) = k_2(T_3(t) - T_2(t))$, $Q_{ei}(t) = k_e(T_e(t) - T_i(t))$, con $i = 1, \dots, 3$. Successivamente, è possibile scrivere le seguenti equazioni di bilancio

$$
\begin{aligned}
c_1\dot{T}_1(t) &= Q_1(t) + Q_{p1}(t) + Q_{e1}(t) = Q_1(t) + k_1(T_2(t) - T_1(t)) + k_e(T_e(t) - T_1(t)),\\
c_2\dot{T}_2(t) &= -Q_{p1}(t) + Q_{p2}(t) + Q_{e2}(t) = -k_1(T_2(t) - T_1(t)) + k_2(T_3(t) - T_2(t)) + k_e(T_e(t) - T_2(t)),\\
c_3\dot{T}_3(t) &= Q_2(t) - Q_{p2}(t) + Q_{e3}(t) = Q_2(t) - k_2(T_3(t) - T_2(t)) + k_e(T_e(t) - T_3(t)).
\end{aligned}
$$

Seguendo la traccia dell'esercizio è possibile assegnare le seguenti variabili di ingresso $u_1(t) = Q_1(t)$, $u_2(t) = Q_2(t)$ e $u_3(t) = T_e(t)$. Scegliendo come variabili di stato le temperature dei forni, $x_1(t) = T_1(t)$, $x_2(t) = T_2(t)$ e $x_3(t) = T_3(t)$, l'uscita del sistema può scriversi come $y(t) = T_2(t) = x_2(t)$. Dalle equazioni di bilancio di cui sopra è possibile scrivere

$$
\begin{aligned}
\dot{x}_1(t) &= -\frac{k_1 + k_e}{c_1}x_1(t) + \frac{k_1}{c_1}x_2(t) + \frac{1}{c_1}u_1(t) + \frac{k_e}{c_1}u_3(t),\\
\dot{x}_2(t) &= \frac{k_1}{c_2}x_1(t) - \frac{k_1 + k_2 + k_e}{c_2}x_2(t) + \frac{k_2}{c_2}x_3(t) + \frac{k_e}{c_2}u_3(t),\\
\dot{x}_3(t) &= \frac{k_2}{c_3}x_2(t) - \frac{k_2 + k_e}{c_3}x_3(t) + \frac{1}{c_3}u_2(t) + \frac{k_e}{c_3}u_3(t),\\
y(t) &= x_2(t).
\end{aligned}
$$

Il sistema risulta di ordine 3, tempo continuo, MISO, strettamente proprio e LTI. Dunque, è possibile scrivere il sistema in forma matriciale tramite le seguenti matrici

$$
\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} -\frac{k_1+k_2}{c_1} & \frac{k_1}{c_1} & 0 \\ \frac{k_1}{c_2} & -\frac{k_1+k_2+k_e}{c_2} & \frac{k_2}{c_2} \\ 0 & \frac{k_2}{c_3} & -\frac{k_2+k_e}{c_3} \end{bmatrix}, \ \boldsymbol{B} = \begin{bmatrix} \frac{1}{c_1} & 0 & \frac{k_e}{c_1} \\ 0 & 0 & \frac{k_e}{c_2} \\ 0 & \frac{1}{c_3} & \frac{k_e}{c_3} \end{bmatrix}, \ \boldsymbol{c} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \ \boldsymbol{d} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.
$$

2 Esercizio

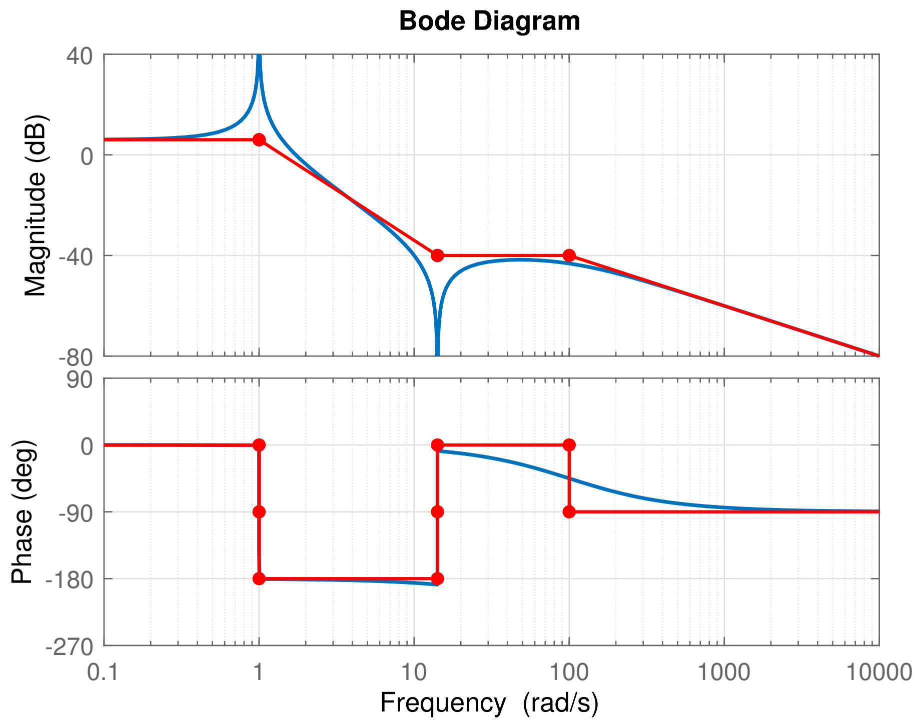


Figura 2.1: Diagramma di Bode di $G(s)$.

I diagrammi di Bode della funzione di trasferimento $G(s)$ data nel testo dell'esercizio sono rappresentati in Fig. 2.1. Per prima cosa, occorre portare la funzione di trasferimento nella sua forma ingegneristica

$$G(s) = \frac{s^2+200}{(s^2+1)(s+100)} = 2\frac{0.005s^2+1}{(s^2+1)(0.01s+1)}.$$

Si riconosce al numeratore un termine trinomio $\left(\frac{s^2}{200}+1\right)$ con zeri immaginari puri. Anche al denominatore vi è un termine trinomio $\left(s^2+1\right)$ con poli immaginari puri, e un termine binomio $(0.01s+1)$ a molteplicità singola. I parametri riguardanti guadagno del sistema, tipo, costanti di tempo, smorzamenti e pulsazioni naturali sono pari a $\mu = 2$, $g = 0$ (questo permette di affermare che è possibile calcolare la banda del sistema), $\alpha_n \simeq 14$, $\zeta = 0$, $\omega_n = 1$, $\xi = 0$, $T_1 = 0.01$. Le pulsazioni di rottura sono quindi pari $\omega_1 = \omega_n = 1$ rad/s, $\omega_2 = \alpha_n \simeq 14$ rad/s e $\omega_3 = 1/T_1 = 100$ rad/s. Poiché il sistema è di tipo zero, il diagramma dei moduli partirà con un tratto piatto pari a $|\mu|_{dB} \simeq 6$ dB. Sempre per il diagramma dei moduli, la prima pulsazione di rottura si incontra a ω_1 per effetto della coppia di poli immaginari puri: si avrà quindi un asintoto verso l'alto. Il grafico tenderà successivamente ad assestarsi sulla retta di -40 dB passante per ω_1 prima di incontrare la successiva pulsazione di rottura in ω_2 dovuta alla coppia di zeri immaginari puri: si avrà quindi un asintoto verso il basso. Il grafico tenderà successivamente ad assestarsi su di una retta orizzontale parallela all'asse delle ascisse. Infine, si incontra la terza e ultima pulsazione di rottura in ω_3 dovuta alla presenza del polo corrispondente. L'effetto risultante è quello di abbassare di 20 dB la retta asintotica con una correzione di -3 dB in ω_3.

Il diagramma delle fasi tiene conto delle solite tecniche di tracciamento (si noti che il sistema è a sfasamento minimo).

Pur essendo il sistema di ordine zero, quindi un potenziale candidato ad essere un filtro passa-basso, esso presenta una risonanza nel primo punto di rottura, che quindi fa decadere le condizioni necessarie (il modulo supera il valore di $|\mu|_{dB} + 3$ dB). Il sistema quindi non sarà classificabile come filtro. Dal grafico disegnato è possibile comunque individuare la banda passante del sistema, se intesa come la più alta pulsazione ω_B per la quale il diagramma dei moduli di Bode è 3 dB in meno del valore $|\mu|_{dB}$, e dopo la quale il grafico non assume valori di guadagno più alti di quest'ultimo. Osservando il grafico si vede che ciò avviene per $\omega_B \simeq 1.5$ rad/s, in cui il grafico assume il valore di circa 3 dB senza poi più superarlo.

3 Esercizio

Quesito a

Come evidente dal denominatore della $G(s)$, pari al polinomio caratteristico, il sistema è del terzo ordine con un autovalore $\lambda_1 = -5$, non creando problemi all'analisi di stabilità. Gli altri due autovalori dipendono dai parametri h e c, così come le proprietà di stabilità del sistema. Si utilizza nel prosieguo la regola di Cartesio per il trinomio al denominatore.

Se $h > 0 \wedge c > 0$, il trinomio al denominatore avrà sicuramente entrambe le radici a parte reale negativa. Il sistema risulterà asintoticamente stabile avendo tutti autovalori a parte reale negativa.

Se $h < 0 \vee c < 0$, il trinomio al denominatore avrà almeno una radice a parte reale positiva ed il sistema risulterà instabile avendo almeno un autovalore a parte reale positiva.

Se $h = 0$, il trinomio può esser scritto come $s^2 + c$, con autovalori $\lambda_{2,3} = \pm\sqrt{-c}$. Se $c > 0$, si hanno due autovalori immaginari puri, e quindi il sistema è semplicemente stabile. Il caso $c < 0$ è già incluso in precedenza.

Invece, se $c = 0$, il trinomio può esser fattorizzato come $s(s+2h)$. I restanti autovalori del sistema sono quindi pari a $\lambda_2 = 0$ e $\lambda_3 = -2h$. Se $h > 0$ il sistema è semplicemente stabile. Il caso $h < 0$ è già incluso in precedenza.

Caso a parte è quando $h = 0$ e $c = 0$. In questo caso, il sistema ha due ulteriori autovalori pari a $\lambda_2 = \lambda_3 = 0$. Occorre verificare che la molteplicità algebrica di λ_2 coincida con quella geometrica per asserire la semplice stabilità, altrimenti il sistema sarà instabile. Il denominatore di $G(s)$ è pari a $s^3 + 5s^2$. Attraverso la procedura di realizzazione e la forma canonica di raggiungibilità è possibile scrivere la seguente matrice

$$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -5 \end{bmatrix},$$

dove si evidenzia la presenza di un mini-blocco di Jordan in corrispondenza dei due autovalori nulli. Se andiamo infatti a verificare la molteplicità geometrica, essa è pari a

$$\nu = 3 - \rho\left(\boldsymbol{A} - \lambda_2 \boldsymbol{I}_3\right) = 3 - \rho(\boldsymbol{A}) = 3 - 2 = 1.$$

Pertanto, la molteplicità geometrica non coincide con quella algebrica, e dunque il sistema con $h = c = 0$ è instabile.

Ricapitolando:

- asintotica stabilità per $h > 0 \wedge c > 0$;
- semplice stabilità per $(h = 0 \wedge c > 0) \vee (h > 0 \wedge c = 0)$;
- instabilità per $h < 0 \vee c < 0 \vee h = c = 0$.

Quesito b

Se $c = 1$, la funzione di trasferimento è pari a

$$G(s) = \frac{-50s(s-1)}{(s+5)(s^2+2hs+1)}.$$

Un autovalore del sistema è ancora una volta pari a $\lambda_1 = -5$. Gli altri autovalori del sistema sono le radici del trinomio $s^2 + 2hs + 1$. Per avere modi naturali pseudo-periodici questi altri due autovalori devono essere complessi coniugati. Ciò accade quando il delta del termine trinomio è negativo, ossia quando $h < 1$. Per trovare il valore di smorzamento tale che esso sia superiore a 0.5, è utile ricordare la seguente espressione parametrica dei termini trinomi dai quali scaturiscono radici complesse coniugate

$$\varphi_2(\lambda) = \lambda^2 + 2\xi\omega_n\lambda + \omega_n^2.$$

Confrontando il precedente con $^2 + 2hs + 1$ si vede che $\omega_n = 1$ e $\xi = h$. Pertanto è facile ottenere che, per avere smorzamento maggiore di 0.5 deve essere $0.5 < h < 1$.
Scelto $h = 0.5$ si ottiene

$$G(s) = \frac{-50s(s-1)}{(s+5)(s^2+s+1)}.$$

La risposta impulsiva dell'uscita è l'antitrasformata di Laplace della funzione di trasferimento, quindi

$$g_y(t) = \mathscr{L}^{-1}[G(s)] = \mathscr{L}^{-1}\left[\frac{-50s(s-1)}{(s+5)(s^2+s+1)}\right] = \left(-\frac{500}{7}e^{-5t} + 21.8218e^{-0.5t}\cos\left(\frac{\sqrt{3}}{2}t - 0.1901\right)\right)\delta_{-1}(t).$$

Quesito c
Con i valori dei parametri dati nel testo del quesito, la funzione di trasferimento è pari a

$$G(s) = \frac{-50s(s-1)}{(s+5)(s+1)^2}.$$

Il sistema è asintoticamente stabile in quanto gli autovalori, ricavabili dal denominatore della funzione di trasferimento, sono pari a $\lambda_1 = -5$, $\lambda_{2,3} = -1$. Il sistema ammette quindi risposta a regime.
Dato il segnale di ingresso, la risposta a regime per l'uscita è pari a

$$y_r(t) = -3G(0) + |G(j)|\sin(t + \arg(G(j)) + \pi/4) + G(-0.1)e^{-0.1t} = 6.9338\sin(t - 0.9828 + \pi/4) - 1.3857e^{-0.1t}.$$

Quesito d
Con i valori dei parametri dati nel testo del quesito, la funzione di trasferimento è pari a

$$G(s) = \frac{-50s(s-1)}{(s+5)(s^2+s+1)}.$$

Per scopi successivi all'interno del quesito, si scrive ora la forma i-s-u del sistema di partenza attraverso la procedura di realizzazione, adottando la forma canonica di raggiungibilità

$$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -5 & -6 & -6 \end{bmatrix},\ \boldsymbol{b} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}},\ \boldsymbol{c} = \begin{bmatrix} 0 & 50 & -50 \end{bmatrix},\ d = 0.$$

Gli autovalori della matrice $\boldsymbol{A}$ si possono ricavare attraverso il polinomio carattistico oppure, molto più semplicemente, a partire dalla funzione di trasferimento. Essi sono pari a $\lambda_1 = -5$, $\lambda_{2,3} = -\frac{1}{2} \pm \frac{\sqrt{3}}{2}j$. Il sistema risulta asintoticamente stabile. Si ricavi, sempre per scopi successivi, la matrice delle risposte impulsive nello stato

$$H(s) = (s\boldsymbol{I}_3 - \boldsymbol{A})^{-1}\boldsymbol{b} = \begin{bmatrix} H_1(s) \\ H_2(s) \\ H_3(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dfrac{1}{(s+5)(s^2+s+1)} \\ \dfrac{s}{(s+5)(s^2+s+1)} \\ \dfrac{s^2}{(s+5)(s^2+s+1)} \end{bmatrix}.$$

L'ingresso $u(t) = (-1 + \cos(\pi t))\delta_{-1}(-t) - \delta_{-1}(t)$ si può scrivere come

$$u(t) = \begin{cases} u_1(t) = -1 + \cos(\pi t), & t < 0 \\ u_2(t) = -1, & t \geq 0. \end{cases}$$

Il sistema è dunque sottoposto ad un ingresso discontinuo in $t = 0$. L'uscita può scriversi come

$$y(t) = \begin{cases} y_1(t), & t < 0 \\ y_2(t), & t \geq 0. \end{cases}$$

Per $t<0$, l'ingresso è applicato ad un tempo pari a $-\infty$, ed essendo il sistema asintoticamente stabile, l'effetto dei modi naturali dell'evoluzione libera dell'uscita e del suo transitorio saranno sicuramente svaniti. Resta solamente la parte a regime. Inoltre, essendoci uno zero nell'origine di $G(s)$, è immediato affermare che il regime per la parte costante dell'ingresso è nullo. Pertanto

$$y_1(t) = |G(\pi j)|\cos(\pi t + \arg(G(\pi j))) \simeq 9.3204\cos(\pi t - 3.054).$$

Lo stato a regime per $t<0$ è invece pari a

$$\boldsymbol{x}(t) = \begin{bmatrix} -|H_1(0)| + |H_1(\pi j)|\cos(\pi t + \arg(H_1(\pi j))) \\ |H_2(\pi j)|\cos(\pi t + \arg(H_2(\pi j))) \\ |H_3(\pi j)|\cos(\pi t + \arg(H_3(\pi j))) \end{bmatrix} \simeq \begin{bmatrix} -0.2 + 0.018\cos(\pi t + 0.018) \\ 0.0565\cos(\pi t - 1.7914) \\ 0.1776\cos(\pi t - 0.2206) \end{bmatrix}.$$

Utile per il prosieguo è particolarizzare lo stato per $t=0$

$$\boldsymbol{x}_0 = \boldsymbol{x}(0) \simeq \begin{bmatrix} -0.182 \\ -0.0124 \\ 0.1733 \end{bmatrix}.$$

Per $t \geq 0$, l'ingresso diventa uno scalino $u_2(t) = -\delta_{-1}(t)$, come facilmente verificabile sostituendo $t \geq 0$ in $u(t)$. Si può quindi procedere a calcolare la risposta complessiva dell'uscita a partire dallo stato iniziale $\boldsymbol{x}_0$ calcolato in precedenza. Pertanto

$$y_2(t) = \mathscr{L}^{-1}\left[\boldsymbol{c}\,(s\boldsymbol{I}_3 - \boldsymbol{A})^{-1}\boldsymbol{x}_0 - G(s)\frac{1}{s}\right] = \mathscr{L}^{-1}\left[-\frac{9.285s^2 + 44.275s - 42.4}{(s+5)(s^2+s+1)} + \frac{50s(s-1)}{s(s+5)(s^2+s+1)}\right].$$

Svolgendo il minimo comune multiplo si ottiene

$$y_2(t) = \mathscr{L}^{-1}\left[-\frac{9.285s^2 - 5.725s + 7.6}{(s+5)(s^2+s+1)}\right] = -\mathscr{L}^{-1}\left[\frac{27.0643}{s+5} + \frac{-8.8896 - 8.6584j}{s + 0.5 - 0.866j} + \frac{-8.8896 + 8.6584i}{s + 0.5 + 0.866j}\right].$$

Svolgendo le antitrasformate notevoli si ottiene

$$y_2(t) \simeq -12.7786e^{-0.5t} + 3.5888e^{-0.5t}\cos\left(\frac{\sqrt{3}}{2}t + 0.2308\right),$$

per $t \geq 0$.
Combinando assieme i risultati si ottiene che la risposta dell'uscita al segnale in ingresso $\forall t$ è pari a

$$y(t) \simeq \begin{cases} 9.3204\cos(\pi t - 3.054), & t<0 \\ -12.7786e^{-0.5t} + 3.5888e^{-0.5t}\cos\left(\frac{\sqrt{3}}{2}t + 0.2308\right), & t \geq 0. \end{cases}$$

ELABORATO TECNICO - TRACCIA N.1 (MATRICOLE PARI)

Risolvere il quesito di seguito riportato utilizzando unicamente lo strumento software Matlab e/o Simulink. Non calcolare nulla a parte su supporti cartacei. Il file generato va consegnato entro il giorno antecedente la prova orale tramite email all'indirizzo del docente con oggetto *[TSI-FSD][Elaborato tecnico]- Cognome Nome Matricola*. In caso di problemi, il discente deve portare un drive USB il giorno della seduta orale. In caso di più files generati, compattare tutto in un file ZIP. ATTENZIONE: nel caso si utilizzi Simulink, salvare il file con compatibilità per la *versione 10.7*. A scanso di equivoci, portare il proprio PC con la versione di Simulink utilizzata.

Sia dato il sistema LTI a tempo continuo definito dalla seguente funzione di trasferimento

$$G(s) = \frac{-50s(s-1)}{(s+5)(s^2+s+1)}.$$

Si determini una rappresentazione i-s-u del sistema. Si disegnino, poi, i diagrammi di Bode e si determini la banda passante. In un'ulteriore finestra, rappresentare la risposta allo scalino; mentre in un'altra ancora raffigurare la risposta all'impulso. Si consideri poi l'ingresso pari a $u(t) = (-1+\cos(\pi t))\delta_{-1}(-t) + \delta_{-1}(t)$: si rappresenti la risposta dell'uscita nell'intervallo temporale $[-10, 10]$ s.
Infine, sia data la seguente funzione di trasferimento a tempo discreto (con tempo di campionamento pari a 1 s)

$$G(z) = \frac{z}{(z-0.1)(z-0.9)(z+0.9)}.$$

Si disegni la risposta dell'uscita all'ingresso $u(k) = 2\delta(k) + (3^k - 1)\delta_{-1}(k)$.

ELABORATO TECNICO - TRACCIA N.2 (MATRICOLE DISPARI)

Risolvere il quesito di seguito riportato utilizzando unicamente lo strumento software Matlab e/o Simulink. Non calcolare nulla a parte su supporti cartacei. Il file generato va consegnato entro il giorno antecedente la prova orale tramite email all'indirizzo del docente con oggetto *[TSI-FSD][Elaborato tecnico]- Cognome Nome Matricola*. In caso di problemi, il discente deve portare un drive USB il giorno della seduta orale. In caso di più files generati, compattare tutto in un file ZIP. ATTENZIONE: nel caso si utilizzi Simulink, salvare il file con compatibilità per la *versione 10.7*. A scanso di equivoci, portare il proprio PC con la versione di Simulink utilizzata.

Sia dato il sistema LTI a tempo continuo caratterizzato dalle seguenti matrici

$$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ k & -1 & -1 \end{bmatrix}, \ \boldsymbol{b} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ k \end{bmatrix}, \ \boldsymbol{c} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \ d = 0,$$

con $k \in \mathbb{R}$ un parametro. Far variare k nell'intervallo $[-10, 10]$, con passo significativo, e classificare automaticamente la proprietà di stabilità, raggiungibilità e osservabilità del sistema.
Sia dato il sistema LTI a tempo continuo definito dalla seguente funzione di trasferimento Sia dato il sistema LTI a tempo continuo caratterizzato dalla seguente funzione di trasferimento

$$G(s) = 2.5\frac{s^2+1}{s(s^2-4.5s-2.5)}.$$

Si disegnino i diagrammi di Bode e di Nyquist del sistema. Infine, scrivere una rappresentazione i-s-u del sistema.