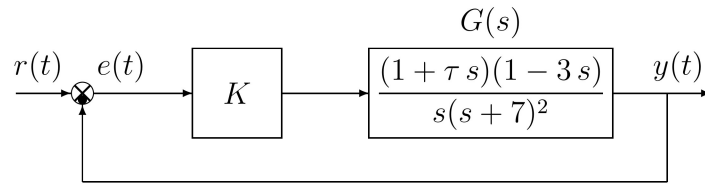


Controlli Automatici B

14 settembre 2023 - Esercizi

Nome:	
Nr. Mat.	
Firma:	

a.1) Sia dato il seguente sistema retroazionato:



Posto $\tau = 0$ tracciare qualitativamente il luogo delle radici del sistema retroazionato al variare del parametro K . Tracciare il luogo delle radici sia per $K > 0$ che per $K < 0$. Determinare esattamente la posizione degli asintoti. Determinare la posizione dei punti di diramazione “solo in modo qualitativo”.

Sol. Posto $\tau = 0$, l'equazione caratteristica del sistema retroazionato diventa:

$$1 + K \frac{(1 - 3s)}{s(s + 7)^2} = 0 \quad \Leftrightarrow \quad 1 + K_1 \frac{(s - 0.333)}{s(s + 7)^2} = 0$$

dove $K_1 = -3K$. L'andamento qualitativo del luogo delle radici del sistema $G(s)$ al variare del parametro $K > 0$ è mostrato in Fig. ???. Sono presenti due asintoti che coincidono con i semiassi

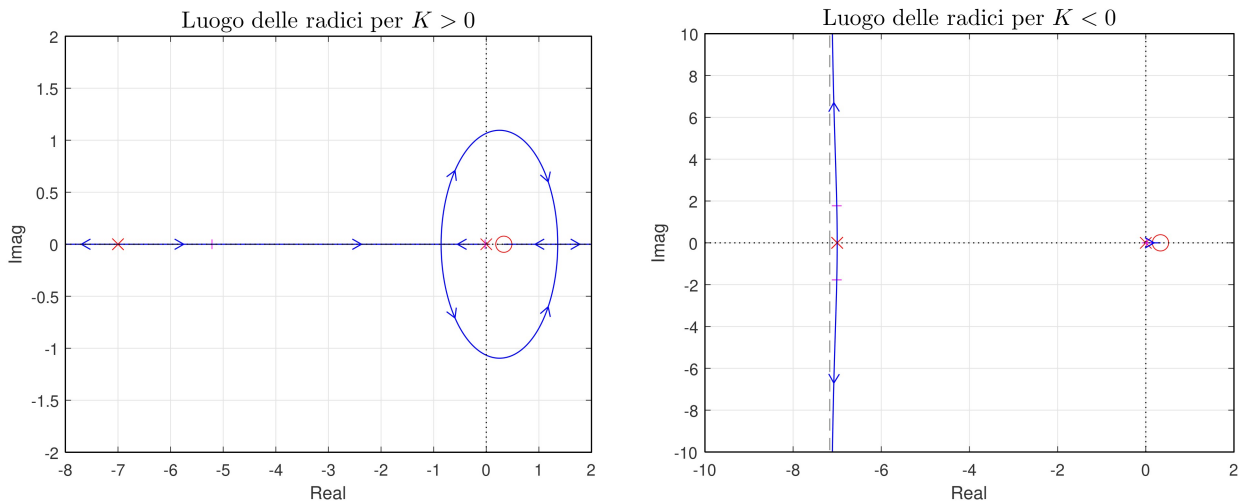


Figura 1: Luogo delle radici del sistema $G(s)$ al variare del parametro K . Le due figure sono relative, rispettivamente, ai casi $K > 0$ e $K < 0$.

reali (positivo e negativo) quando $K > 0$ e hanno una posizione verticale quando $K < 0$. Il centro degli asintoti σ_a è il seguente:

$$\sigma_a = \frac{1}{2} \left(-14 - \frac{1}{3} \right) \quad \longrightarrow \quad \sigma_a = -\frac{43}{6} = -7.16$$

a.2) Posto $K = 1.25$ nel sistema retroazionato sopra definito, tracciare qualitativamente il contorno delle radici del sistema retroazionato al variare del parametro $\tau > 0$. Nella graficazione del contorno si tenga conto che: i) per $\tau = 0$ i poli del contorno sono posizionati in $p_1 = -0.5$, $p_2 = -0.5$ e $p_3 = -5$; ii) il sistema retroazionato è stabile per $\tau < \tau^*$. Determinare la posizione dei punti di diramazione “solo in modo qualitativo”. Il calcolo di τ^* non è necessario.

Sol. Posto $K = K_1$, l'equazione caratteristica del sistema retroazionato è la seguente

$$1 + \frac{K_1(1 + \tau s)(1 - 3s)}{s(s + 7)^2} = 0 \quad \longrightarrow \quad s(s + 7)^2 + K_1(1 + \tau s)(1 - 3s) = 0$$

da cui si ricava l'equazione caratteristica $1 + \tau G_1(s) = 0$:

$$s(s+7)^2 + K_1(1-3s) + \tau K_1 s(1-3s) = 0 \quad \rightarrow \quad 1 + \frac{\tau K_1 s(1-3s)}{s(s+7)^2 + K_1(1-3s)} = 0$$

I poli della funzione $G_1(s)$ sono quelli indicati sopra:

$$1 + \frac{\tau K_1 s(1-3s)}{(s+0.5)^2(s+5)} = 0$$

Il contorno delle radici al variare del parametro $\tau > 0$ è mostrato in Fig. 2.

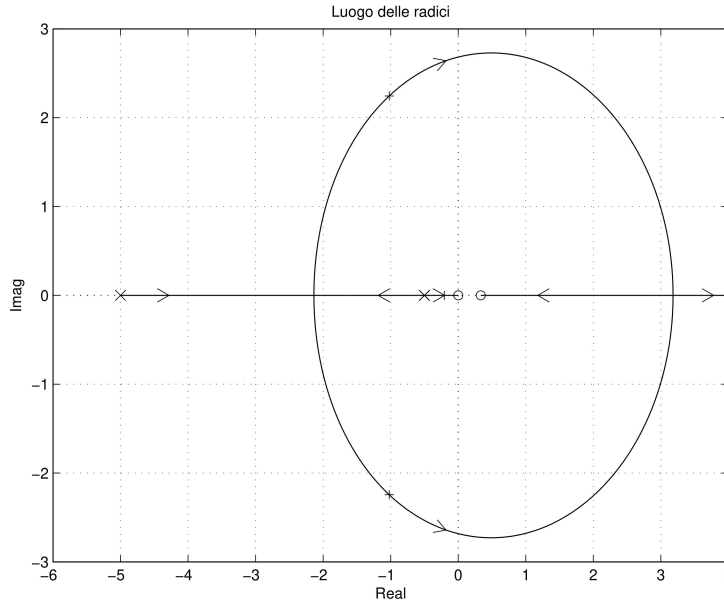


Figura 2: Contorno delle radici del sistema $G_1(s)$ al variare del parametro $\tau > 0$.

a.3) Sia data la funzione $G(s)$ che descrive la dinamica del sistema mostrato in figura:

$$G(s) = \frac{I(s)}{V(s)} = \frac{C s}{C L s^2 + R C s + 1}$$

Posto $C = 1$ e $R = 1$, calcolare il valore dell'induttanza L a cui corrisponde il minimo tempo di assestamento della risposta al gradino del sistema $G(s)$.

Sol. I poli della funzione $G(s)$ sono le soluzioni dell'equazione:

$$L s^2 + s + 1 = 0 \quad \leftrightarrow \quad 1 + L \frac{s^2}{s+1} = 0 \quad \leftrightarrow \quad 1 + L G_1(s) = 0$$

Il contorno delle radici della funzione $G_1(s)$ al variare del parametro $L > 0$ è mostrato in Fig. 3.

Nel contorno delle radici è presente un solo asintoto coincidente con il semiasse reale negativo, percorso dall'infinito a finito.

Il minimo tempo di assestamento della risposta al gradino del sistema $G(s)$ si ottiene quando i poli del sistema $G(s)$ sono alla massima distanza dall'asse immaginario. Questa condizione si ha quando i due poli del sistema si trovano nel punto di diramazione $\sigma_0 = -2$ del contorno delle radici mostrato in Fig. 3. Il corrispondente valore di L si calcola nel seguente modo:

$$L = - \frac{1}{G_1(s)} \Big|_{s=-2} = \frac{1}{4}$$

b) Siano date le seguenti due funzioni di risposta armonica dei sistemi $G_a(s)$ e $G_b(s)$:

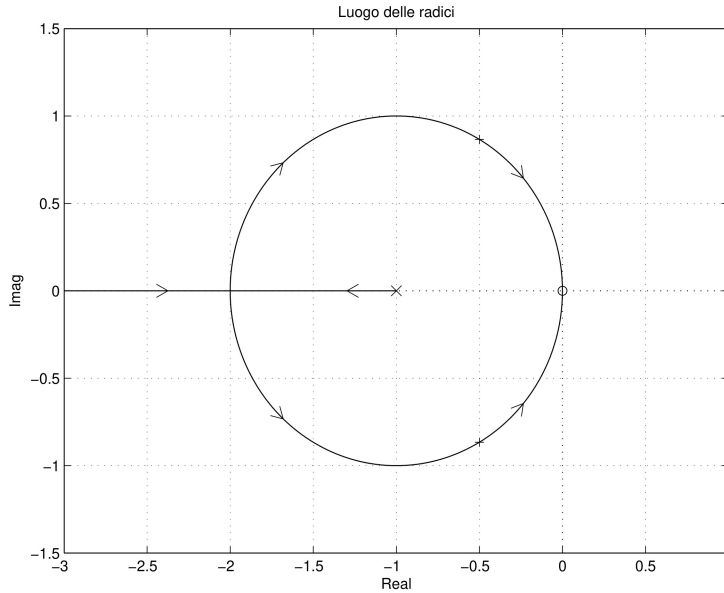
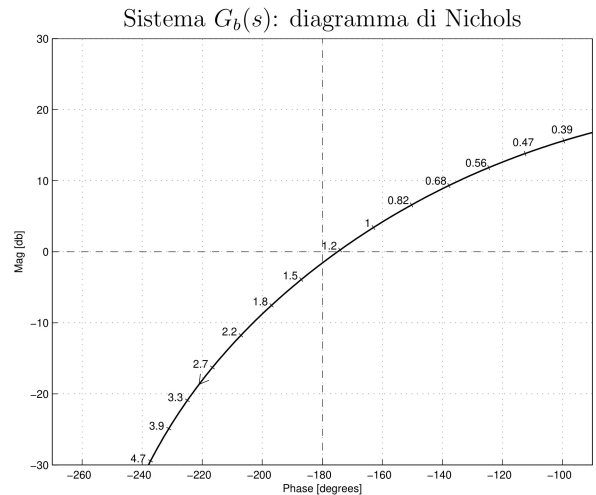
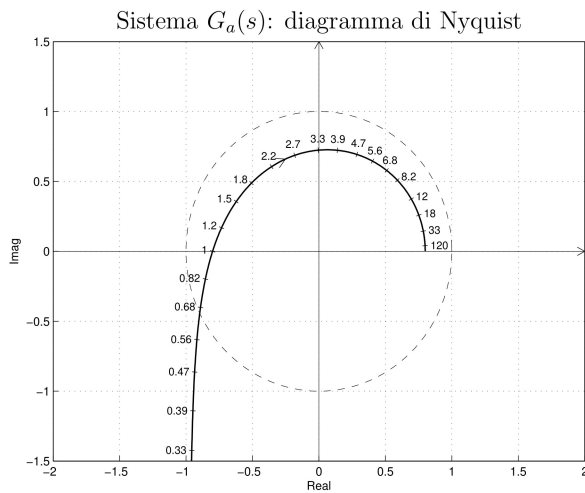


Figura 3: Luogo delle radici del sistema $G_1(s)$ al variare del parametro $m > 0$.



b.1) Per il sistema $G_a(s)$, progettare una rete correttiva in grado di garantire al sistema compensato un margine di ampiezza $M_a = 5$. Scegliere il valore della pulsazione ω che si ritiene più opportuno;

Sol. La specifica sul margine di ampiezza $M_a = 5$ definisce completamente la posizione del punto $B = M_B e^{j\varphi_B}$: $M_B = 0.2$ e $\varphi_B = 180^\circ$. La regione ammissibile è mostrata in grigio in Fig. 4.

Il punto $A = G_b(j\omega_A)$ scelto per la sintesi della rete correttiva è quello corrispondente alla pulsazione $\omega_A = 0.82$:

$$M_A = |G(j\omega_A)| = 0.8769, \quad \varphi_A = \arg[G(j\omega_A)] = 193.1^\circ.$$

Sostituendo i valori di M , φ e $\omega = \omega_A$ all'interno delle formule di inversione si ottengono i valori dei parametri $\tau_1 = 4.024$ e $\tau_2 = 10.44$ della rete correttiva $C(s)$:

$$M = \frac{M_B}{M_A} = 0.22808, \quad \varphi = \varphi_B - \varphi_A = -13.07^\circ \quad \rightarrow \quad C_1(s) = \frac{(1 + 4.024 s)}{(1 + 18.4 s)}.$$

Il diagramma di Nichols delle funzioni $G_a(s)$ e $C_1(s)G_a(s)$ sono mostrati in Fig. 4.

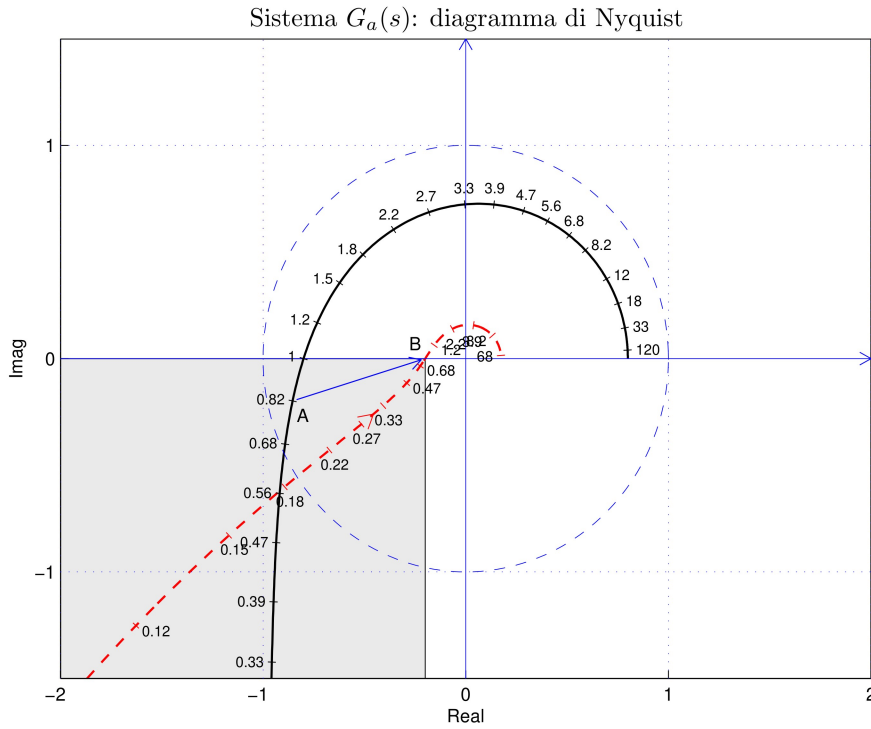


Figura 4: Diagrammi di Nyquist delle funzioni $G_a(s)$ e $C_1(s)G_a(s)$.

Sintesi della rete correttiva $C_1(s)$ con altri valori della pulsazione ω_A :

$$\begin{aligned} \omega_A &= [0.82 \quad 0.68 \quad 0.56 \quad 0.47 \quad 0.39 \quad 0.33] \\ M_A &= [0.8769 \quad 0.977 \quad 1.114 \quad 1.272 \quad 1.483 \quad 1.715] \\ \varphi_A &= [-166.9 \quad -155.8 \quad -145.5 \quad -137.3 \quad -129.7 \quad -123.9] \\ M &= [0.2281 \quad 0.2047 \quad 0.1795 \quad 0.1572 \quad 0.1349 \quad 0.1166] \\ \varphi &= [-13.07 \quad -24.24 \quad -34.54 \quad -42.7 \quad -50.25 \quad -56.09] \\ \tau_1 &= [4.024 \quad 2.533 \quad 2.029 \quad 1.813 \quad 1.683 \quad 1.611] \\ \tau_2 &= [18.4 \quad 14.23 \quad 14.95 \quad 17.66 \quad 22.6 \quad 29.27] \end{aligned}$$

- b.2) Sempre per il sistema $G_b(s)$, progettare una rete ritardatrice in modo che la funzione di risposta armonica del sistema compensato passi per il punto $B = (-160^\circ, -10 \text{ db})$. Scegliere il valore della pulsazione ω che si ritiene più opportuno.

Soluzione. La specifica di progetto definisce completamente la posizione del punto $B = M_B e^{j\varphi_B}$: $M_B = -10 \text{ db} = 0.3162$ e $\varphi_B = -160^\circ$. La regione ammissibile è mostrata in grigio in Fig. 5.

Il punto $A = G(j\omega_A)$ scelto per essere portato in B è quello corrispondente alla pulsazione $\omega_A = 0.82$:

$$M_A = 2.134, \quad \varphi_A = -150.28^\circ.$$

I valori di M e φ da usare nelle formule di inversione sono i seguenti:

$$M = \frac{M_B}{M_A} = 0.1481, \quad \varphi = \varphi_B - \varphi_A = -9.713^\circ \quad \rightarrow \quad C_3(s) = \frac{(1 + 6.054 s)}{(1 + 41.66 s)}.$$

I diagrammi di Nichols delle funzioni $G_b(s)$ e $C_3(s)G_b(s)$ sono mostrati in Fig. 5.

Sintesi della rete correttiva $C_3(s)$ con altri valori della pulsazione ω_A :

$$\begin{aligned} \omega_A &= [0.82 \quad 0.68 \quad 0.56 \quad 0.47 \quad 0.39] \\ M_A &= [2.134 \quad 2.921 \quad 3.904 \quad 4.907 \quad 6.038] \\ \varphi_A &= [-150.3 \quad -137.8 \quad -124.6 \quad -112.4 \quad -99.58] \\ M &= [0.1482 \quad 0.1083 \quad 0.081 \quad 0.0644 \quad 0.0523] \\ \varphi &= [-9.713 \quad -22.15 \quad -35.43 \quad -47.58 \quad -60.42] \\ \tau_1 &= [6.054 \quad 3.19 \quad 2.26 \quad 1.759 \quad 1.301] \\ \tau_2 &= [41.66 \quad 32.41 \quad 35.52 \quad 42.79 \quad 54.85] \end{aligned}$$

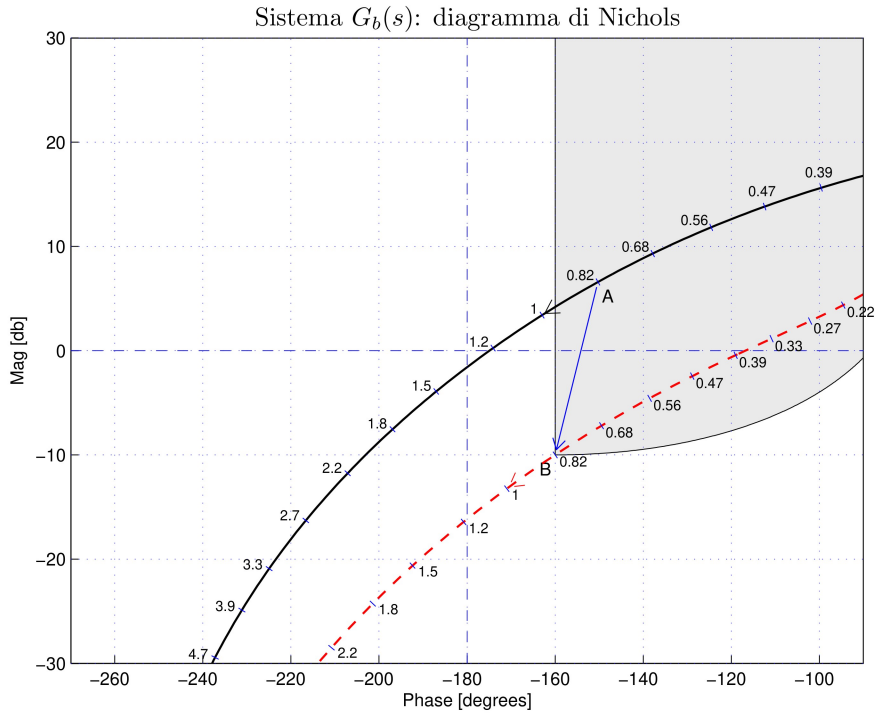
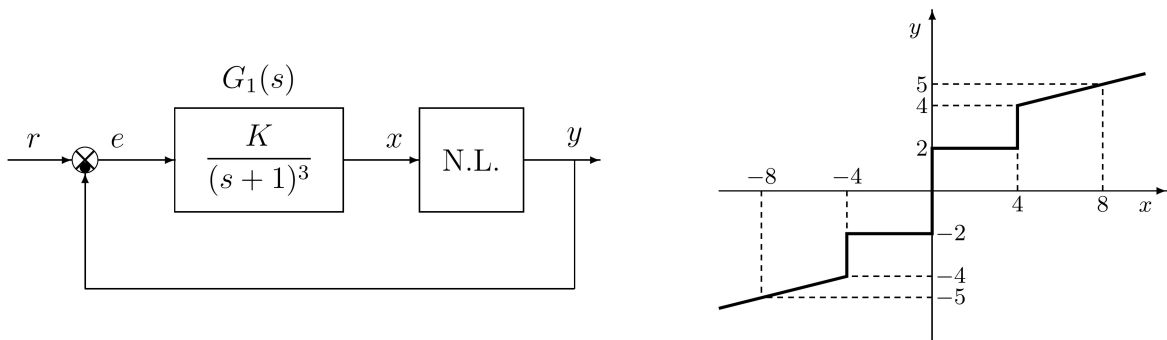


Figura 5: Diagrammi di Nyquist delle funzioni $G_b(s)$ e $C_3(s)G_b(s)$.

c) Si consideri il seguente sistema non lineare retroazionato:



c.1) Posto $K = 1$, determinare per quale valore r^* del riferimento r il punto di lavoro del sistema retroazionato coincide con il punto $(x_0, y_0) = (-8, -5)$.

Sol. La retta di carico della parte lineare del sistema retroazionato è la seguente:

$$x = K_1(r - K_2 K_3 y) \quad \text{dove} \quad K_1 = 1, \quad K_2 = 1, \quad K_3 = 1.$$

Il valore r^* si ottiene ponendo $K_1 = K_2 = K_3 = 1$ e $(x, y) = (-8, -5)$ nella retta di carico:

$$-8 = r^* + 5 \quad \rightarrow \quad r^* = -13.$$

c.2) Posto $K = 1$, $r = r^*$ ed utilizzando il criterio del cerchio, dire se il sistema retroazionato è stabile nell'intorno del punto di lavoro $(x_0, y_0) = (-8, -5)$.

Sol. Per $r = r^*$ il punto di lavoro coincide con il punto $(x_0, y_0) = (-8, -5)$. Le pendenze delle 2 rette che passano nel punto di lavoro e che racchiudono a settore tutta la non linearità sono:

$$\alpha = \frac{1}{4}, \quad \beta = \frac{7}{8}.$$

Per $K = 1$, il guadagno d'anello del sistema è:

$$G(s) = \frac{1}{(s+1)^3}$$

Il margine di ampiezza K^* e la pulsazione ω^* della funzione $G(s)$ si determinano utilizzando il criterio di Routh. Equazione caratteristica:

$$1 + K \frac{1}{(s+1)^3} = 0 \quad \rightarrow \quad s^3 + 3s^2 + 3s + 1 + K = 0$$

Tabella di Routh:

$$\begin{array}{c|cc} 3 & 1 & 3 \\ 2 & 3 & K+1 \\ 1 & 8-K & \\ 0 & K+1 & \end{array}$$

Dalla tabella si ricava che il sistema retroazionato è asintoticamente stabile per:

$$-1 < K < 8 = K^*.$$

La pulsazione ω^* corrispondente al valore limite K^* è:

$$\omega^* = \sqrt{3} = 1.732.$$

In questo caso il diagramma di Nyquist della funzione $G(s)$ non interseca il cerchio critico per cui in base al criterio del cerchio si può affermare che il punto $(x_0, y_0) = (-8, -5)$ è un punto di equilibrio globalmente asintoticamente stabile. In Fig. 6 è mostrato il diagramma di Nyquist della funzione $G(s)$ sovrapposto al cerchio critico.

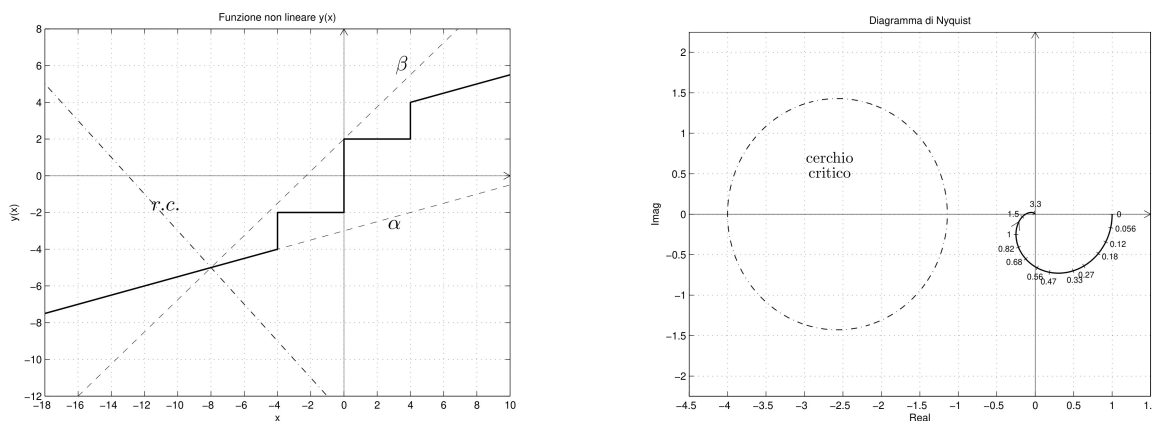


Figura 6: Diagramma di Nyquist della funzione $G(s)$ e cerchio critico.

- c.3) Disegnare in modo qualitativo l'andamento della funzione descrittiva $F(X)$ della non linearità N.L. assegnata, prendendo l'origine come punto di lavoro. Utilizzare dei parametri ausiliari (per esempio: m_1, m_2, \dots) per rappresentare gli eventuali valori non noti minimi e massimi della funzione $F(X)$.

Soluzione. L'andamento qualitativo della funzione descrittiva $F(X)$ è mostrato in Fig. 7 dove: a) $m_0 = \infty$ è il valore iniziale della funzione $F(X)$ per $X = 0^+$; b) $m_1 \simeq 0.65$ è il valore minimo della funzione $F(X)$ per $X \simeq 4$; c) $m_2 \simeq 0.8$ è il valore massimo della funzione $F(X)$ per $X \simeq 5$. d) $m_3 = \frac{1}{4} = 0.25$ è il valore minimo della funzione $F(X)$ per $X \rightarrow \infty$.

Nel primo tratto $X \in [0, 4]$, la funzione descrittiva $F(X)$ coincide con quella di un relè ideale:

$$F(X) = \frac{8}{\pi X}$$

Il valore del parametri m_1 può quindi essere determinato con esattezza:

$$m_1 = F(X)|_{X=4} = \frac{8}{\pi X} \Big|_{X=4} = \frac{2}{\pi} = 0.6366.$$

- c.4) Discutere "qualitativamente" (in funzione anche dei parametri m_1, m_2, \dots) l'esistenza o meno di cicli limite nel sistema retroazionato al variare del guadagno $K > 0$.

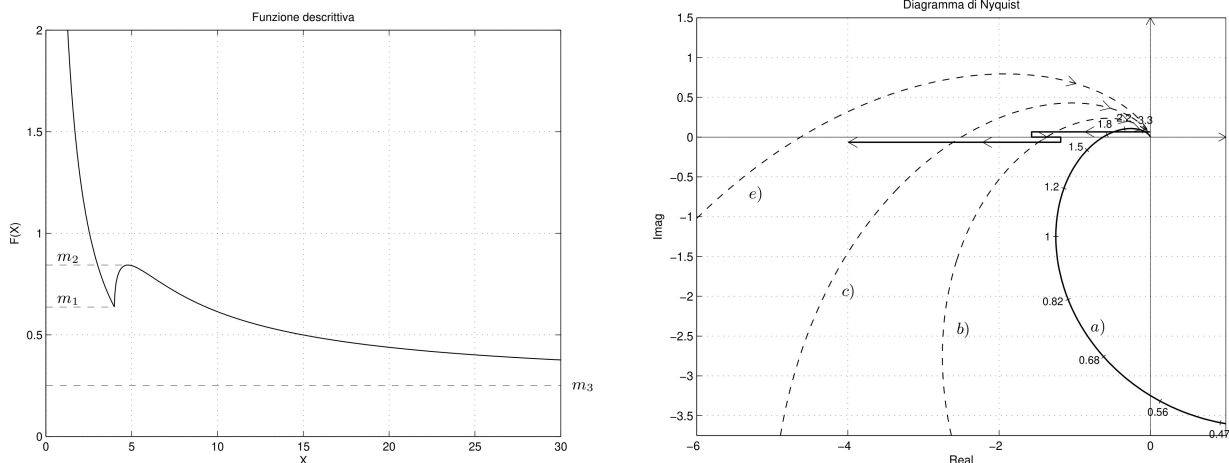
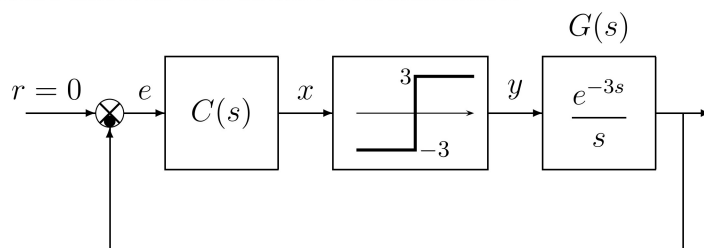


Figura 7: Andamento della funzione descrittiva $F(X)$.

Sol. Per $K = 1$, il margine di ampiezza K^* del sistema $G(s)$ è $K^* = 8$. Al variare di K si hanno queste possibili soluzioni:

- 1) $-\frac{1}{m_2} < -\frac{K}{K^*}$: il diagramma di Nyquist della funzione $G(s)$ interseca la funzione $\frac{-1}{F(X)}$ in un solo punto a cui corrisponde un ciclo limite stabile.
- 2) $-\frac{1}{m_1} < -\frac{K}{K^*} < -\frac{1}{m_2}$: il diagramma di Nyquist della funzione $G(s)$ interseca la funzione $\frac{-1}{F(X)}$ in 3 punti a cui corrispondono 2 cicli limite stabili (quelli uscenti) e un ciclo limite stabile (quello entrante).
- 3) $-\frac{1}{m_3} < -\frac{K}{K^*} < -\frac{1}{m_1}$: il diagramma di Nyquist della funzione $G(s)$ interseca la funzione $\frac{-1}{F(X)}$ in un solo punto a cui corrisponde un ciclo limite stabile.
- 4) $-\frac{K}{K^*} < -\frac{1}{m_3}$: la funzione $\frac{-1}{F(X)}$ è tutta interna al diagramma di Nyquist completo della funzione $G(s)$ per cui non vi sono cicli limite e l'origine è un punto di lavoro instabile per il sistema retroazionato.

d) Si consideri il seguente sistema non lineare retroazionato:



d.1) Posto $C(s) = 1$, determinare l'ampiezza X^* e la pulsazione ω^* dell'oscillazione autosostenuta presente all'interno nel sistema retroazionato.

Soluzione. La funzione descrittiva del relè ideale è:

$$F(X) = \frac{12}{\pi X}$$

Il margine di ampiezza K^* e la pulsazione ω^* della funzione $G(s)$ hanno il seguente valore:

$$K^* = \omega^* = \frac{\pi}{6} = 0.5236$$

L'ampiezza X^* dell'oscillazione autosostenuta si determina nel seguente modo:

$$F(X^*) = K^* \quad \rightarrow \quad \frac{12}{\pi X^*} = \frac{\pi}{6} \quad \rightarrow \quad X^* = \frac{72}{\pi^2} = 7.2951$$

d.2) Progettare una rete correttiva $C(s) = \frac{1+\tau_1 s}{1+\tau_2 s}$ in modo che l'oscillazione autosostenuta presente all'interno del sistema sia caratterizzata da un'ampiezza $X^* = 2$ e da una pulsazione $\omega^* = 0.3$.

Soluzione. Per avere un'oscillazione autosostenuta con ampiezza $X^* = 2$, il margine di ampiezza \bar{K}^* del sistema compensato dovrà avere il seguente valore:

$$\bar{K}^* = F(X^*)|_{X^*=2} = \frac{6}{\pi} = 1.91 \quad \rightarrow \quad B = -\frac{1}{\bar{K}^*} = -0.5236$$

Modulo e fase del punto B :

$$M_B = 0.5236, \quad \varphi_B = -180^\circ.$$

Il punto A è quello che si ottiene dalla funzione $G(s)$ quando $s = j\omega^* = j0.3$:

$$A = G(s)|_{s=j0.3} = \frac{e^{-0.9j}}{j0.3} \quad \rightarrow \quad M_A = 3.333, \quad \varphi_A = -\frac{\pi}{2} - 0.9 = -141.56^\circ$$

I parametri M , φ e ω da inserire nelle formule di inversioni hanno il seguente valore:

$$M = \frac{M_B}{M_A} = \frac{0.5236}{3.333} = 0.1571 \quad \varphi = -38.434^\circ \quad \omega = 0.3.$$

La rete correttiva che si ottiene utilizzando le formule di inversione è la seguente:

$$\tau_1 = \frac{M - \cos \varphi}{\omega \sin \varphi} = 3.358, \quad \tau_2 = \frac{\cos \varphi - \frac{1}{M}}{\omega \sin \varphi} = 29.93 \quad \rightarrow \quad C(s) = \frac{1 + 3.358 s}{1 + 29.93 s}$$

La regione ammissibile è mostrata in grigio in Fig. 8.

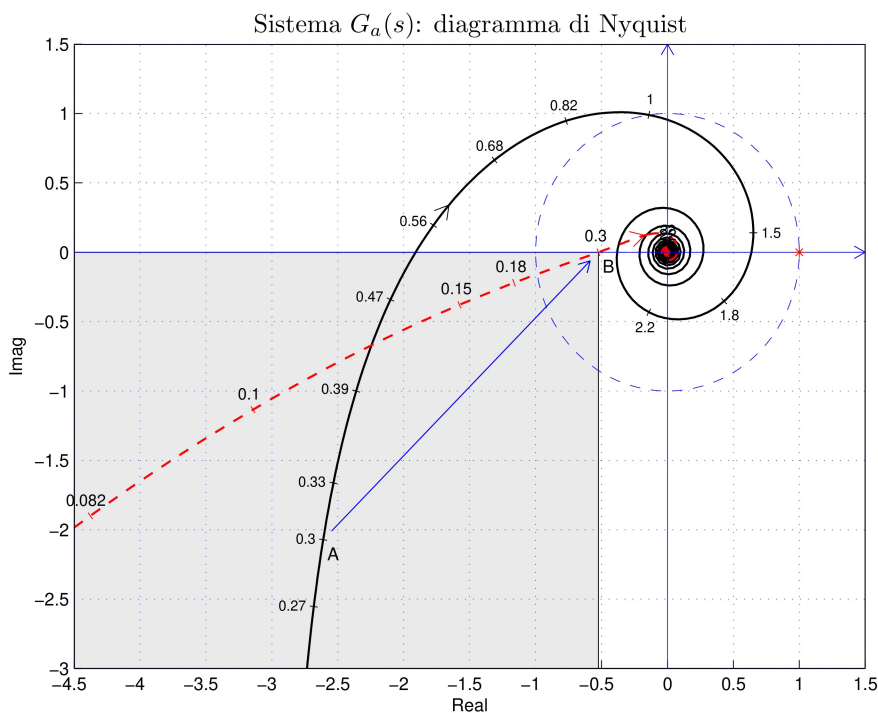


Figura 8: Diagrammi di Nyquist delle funzioni $G(s)$ e $C(s)G(s)$.

e) Partendo dalla condizione iniziale nulla $y(0) = 0$, calcolare la risposta $y(n)$ del seguente sistema dinamico discreto:

$$y(n+1) = 0.5y(n) + 3x(n)$$

quando in ingresso è presente il gradino unitario $x(n) = 1$.

Sol. Applicando la \mathcal{Z} -trasformata alla precedente equazione alle differenze si ottiene:

$$zY(z) = 0.5Y(z) + 3X(z)$$

Esprimendo $Y(z)$ in funzione di $X(z)$ si ottiene:

$$Y(z) = \frac{3}{z - 0.5} X(z) = \frac{3z}{(z - 0.5)(z - 1)}$$

Scomponendo in fratti semplici si ottiene:

$$Y(z) = z \left[\frac{6}{z - 1} - \frac{6}{z - 0.5} \right] = \left[\frac{6z}{z - 1} - \frac{6z}{z - 0.5} \right]$$

Antitrasformando si ottiene:

$$y(n) = 6 - 6(0.5)^n.$$

f) Utilizzando il metodo delle differenze all'indietro, discretizzare la seguente rete correttiva:

$$D(s) = \frac{M(s)}{E(s)} = \frac{(s + 1)}{(s + 2)}$$

giungendo anche alla determinazione della corrispondente equazione alle differenze. Si utilizzi il periodo di campionamento $T = 0.1$.

Sol. Utilizzando il metodo delle differenze all'indietro si ottiene:

$$D(z) = D(s) \Big|_{s=\frac{1-z^{-1}}{T}} = \frac{(1 + T - z^{-1})}{(1 + 2T - z^{-1})} = \frac{1.1 - z^{-1}}{1.2 - z^{-1}}$$

La corrispondente equazione alle differenze assume la seguente forma:

$$\begin{aligned} m_k &= \frac{1}{1.2} (m_{k-1} + 1.1 e_k - e_{k-1}) \\ &= 0.8333 m_{k-1} + 0.9167 e_k - 0.8333 e_{k-1} \end{aligned}$$

Controlli Automatici B
14 settembre 2023 - Domande Teoriche

Nome:	
Nr. Mat.	
Firma:	

Rispondere alle domande e ai test che seguono. Per ciascuno dei test segnare con una crocetta le affermazioni che si ritengono corrette.

1. Scrivere la funzione di trasferimento discreta $G(z) = \frac{Y(z)}{X(z)}$ corrispondente alla seguente equazione alle differenze:

$$y_{k+2} + 3y_{k+1} + 5y_k + 2y_{k-1} = 4x_{k+1} + 6x_k \quad \rightarrow \quad G(z) = \frac{4z + 6}{z^2 + 3z + 5 + 2z^{-1}}$$

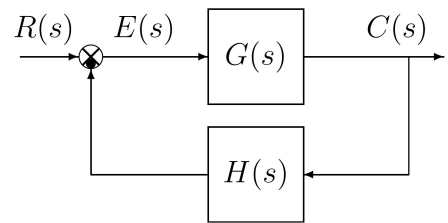
2. Calcolare il valore iniziale $y_0 = \lim_{k \rightarrow 0} y(k)$ e il valore finale $y_\infty = \lim_{k \rightarrow \infty} y(k)$ del segnale $y(k)$ corrispondente alla seguente funzione $Y(z)$:

$$Y(z) = \frac{z(3+z)}{(1-z)(2z+1)} \quad \rightarrow \quad y_0 = -\frac{1}{2}, \quad y_\infty = -\frac{4}{3}$$

3. Posto $T = 0.2$, calcolare il tempo di assestamento T_a della risposta impulsiva $g(k)$ del sistema discreto $G(z) = \frac{z}{z-0.5}$:

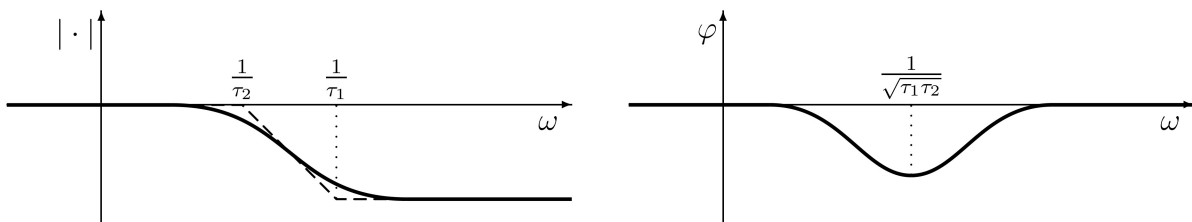
$$T_a = \frac{3}{\frac{1}{T} |\ln(0.5)|} = \frac{0.6}{|\ln(0.5)|} = 0.8656$$

4. Si consideri il sistema retroazionato riportato di fianco. Scrivere il legame che lega la variazione relativa del sistema $G(s)$ alla variazione relativa del sistema retroazionato $G_0(s)$ quando varia un parametro α interno alla funzione di trasferimento $G(s)$:



$$\frac{\Delta G_0(s)}{G_0(s)} = \frac{1}{1 + G(s)H(s)} \frac{\Delta G(s)}{G(s)}$$

5. Tracciare i diagrammi di bode (moduli e fasi) di una rete ritardatrice $C(s) = \frac{(1+\tau_1 s)}{(1+\tau_2 s)}$, ($\tau_1 < \tau_2$):



6. La trasformazione bilineare è definita come segue:

$$\bigcirc s = \frac{2}{T} \frac{1+z^{-1}}{1-z^{-1}} \quad \otimes s = \frac{2}{T} \frac{z-1}{z+1} \quad \bigcirc s = \frac{2}{T} \frac{z+1}{z-1} \quad \otimes s = \frac{2}{T} \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}$$

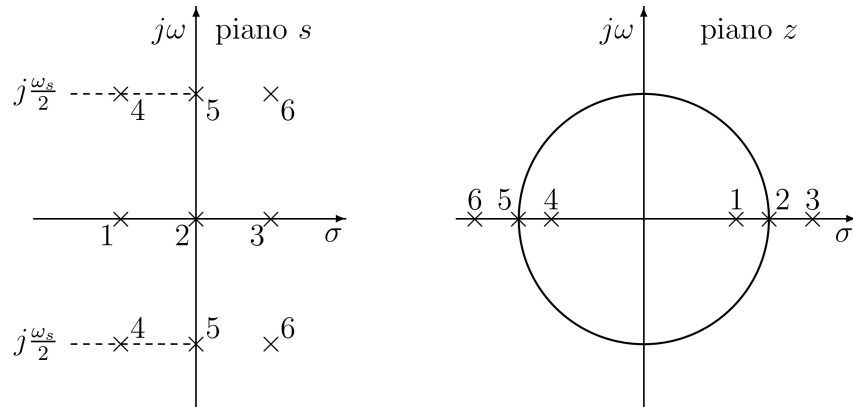
7. Calcolare la \mathcal{Z} -trasformata $X(z)$ dei seguenti segnali tempo continui $x(t)$ quando $t = kT$:

$$x(t) = 3^{-2t} \quad \rightarrow \quad X(z) = \frac{z}{(z - 3^{-2T})} \quad x(t) = 4t \quad \rightarrow \quad X(z) = \frac{4Tz}{(z-1)^2}$$

8. Calcolare la soluzione $y(n)$ della seguente equazione alle differenze a partire dalla condizione iniziale $y(0) = 2$:

$$y(n+1) - 0.7y(n) = 0 \quad \rightarrow \quad y(n) = 2(0.7)^n.$$

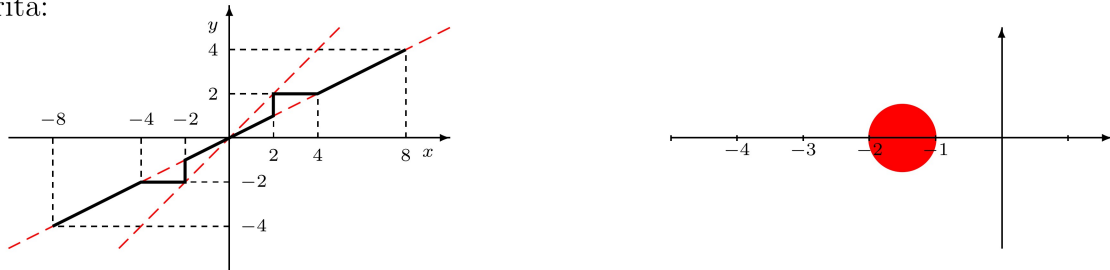
9. In base al legame teorico a tra il piano s e il piano z , tracciare qualitativamente sul piano z le posizioni dei poli 1, 2, 3, ..., 6 che sono stati evidenziati con delle crocette sul piano s :



10. Sia $X(z) = \mathcal{Z}[x(k)]$. Enunciare il teorema della traslazione “in anticipo” nel tempo:

$$\mathcal{Z}[x(t + nT)] = z^n [X(z) - \sum_{k=0}^{n-1} x(kT)z^{-k}]$$

11. Sia $(0, 0)$ il punto di lavoro. Disegnare il cerchio critico corrispondente alle seguente non linearità:



12. Per poter applicare il metodo base della funzione descrittiva ad un sistema $G(s)$ retroazionato su una non linearità $y = f(x)$

- il sistema $G(s)$ deve essere a fase minima
 la non linearità $y = f(x)$ deve essere di tipo “a settore”
 la non linearità $y = f(x)$ deve essere simmetrica rispetto all’origine

13. Sia $Y(X) \sin(\omega t + \varphi(X))$ la fondamentale del segnale periodico $y(t)$ presente all’uscita di una non linearità algebrica $y(t) = f(x(t))$ in risposta al segnale $x(t) = X \sin(\omega t)$ in ingresso. Fornire la definizione di funzione descrittiva $F(X)$:

$$F(X) = \frac{Y(X)}{X} e^{j\varphi(X)}.$$

14. La funzione di risposta armonica $F(\omega)$ di un sistema discreto $G(z)$ si determina nel seguente modo:

- $F(\omega) = G(e^{j\omega})$ $F(\omega) = G(e^{j\omega T})$ $F(\omega) = G(j\omega)$ $F(\omega) = G(j\omega T)$

15. Il teorema del baricentro del luogo delle radici può essere applicato

- anche a funzioni $G(s)$ trascendenti
 solo a funzioni $G(s)$ con grado relativo $r > 2$
 solo a funzioni $G(s)$ con grado relativo $r \geq 2$
 anche a funzioni $G(s)$ razionali fratte e instabili