

**Controlli Automatici - Compito
Completo
6 Settembre 2022 - Esercizi**

Nome:	L
Nr. Mat.	
Firma:	
C.L.:	Info. Elet. Telec. Altro.

Si risolvano i seguenti esercizi.

a) Calcolare la trasformata di Laplace $X(s) = \mathcal{L}[x(t)]$ dei seguenti segnali temporali $x(t)$:

$$x_1(t) = (2 \sin(7t) - 4) e^{3t}, \quad x_2(t) = 5\delta(t) + 2 e^{-3t} \cos(5t)$$

Soluzione:

$$X_1(s) = \frac{14}{(s-3)^2 + 49} - \frac{4}{(s-3)}, \quad X_2(s) = 5 + \frac{2(s+3)}{(s+3)^2 + 5^2}.$$

b) Calcolare la trasformata di Laplace inversa $y(t) = \mathcal{L}^{-1}[Y(s)]$ delle seguenti funzioni $Y(s)$:

$$Y_1(s) = \frac{30}{s(s+3)(s-2)}, \quad Y_2(s) = \frac{6}{(s+4)^3} + 2e^{-3s}$$

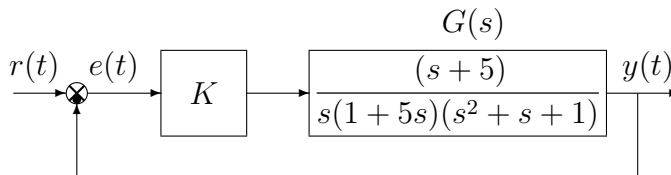
Soluzione:

$$y_1(t) = -5 + 2e^{-3t} + 3e^{2t}, \quad y_2(t) = 3t^2 e^{-4t} + 2\delta(t-3)$$

Infatti, per la funzione $Y_1(s)$ si ha:

$$\mathcal{L}^{-1}[Y_1(s)] = \mathcal{L}^{-1}\left[\frac{30}{s(s+3)(s-2)}\right] = \mathcal{L}^{-1}\left[-\frac{5}{s} + \frac{2}{(s+3)} + \frac{3}{(s-2)}\right] = -5 + 2e^{-3t} + 3e^{2t}$$

c) Sia dato il seguente sistema retroazionato:



c.1) Determinare per quali valori di K il sistema retroazionato è asintoticamente stabile.

Soluzione.

L'equazione caratteristica del sistema retroazionato è:

$$1 + \frac{K(s+5)}{s(1+5s)(s^2+s+1)} = 0 \quad \rightarrow \quad 5s^4 + 6s^3 + 6s^2 + (K+1)s + 5K = 0$$

La tabella di Routh ha la seguente struttura:

$$\begin{array}{c|ccc} 4 & 5 & 6 & 5K \\ 3 & 6 & K+1 & \\ 2 & 31-5K & 30K & \\ 1 & (31-5K)(K+1)-180K & & \\ 0 & 30K & & \end{array}$$

Dalla tabella di Routh si ricavano i seguenti vincoli:

$$K < \frac{31}{6}, \quad 5K^2 + 154K - 31 < 0, \quad K > 0.$$

In base alla regola dei segni dei coefficienti di una equazione di secondo grado, è possibile affermare che le due soluzioni K_1 e K_2 dell'equazione di secondo grado della riga 1 sono reali e di segni opposti: $K_1 < 0$ e $K_2 > 0$:

$$K_{1,2} = \frac{-154 \pm \sqrt{154^2 - 4(5)(-31)}}{10} = \begin{cases} K_1 = -31 \\ K_2 = 0.2 \end{cases}$$

La disequazione è negativa all'interno dei valori K_1 e K_2 . Quindi il sistema retroazionato è asintoticamente stabile per:

$$0 < K < K_2 = K^* = 0.2.$$

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

$$\omega^* = \sqrt{\frac{K^* + 1}{6}} = \sqrt{\frac{1.2}{6}} = 0.447.$$

c.2) Tracciare i diagrammi asintotici di Bode delle ampiezze e delle fasi della funzione $G(s)$.

Soluzione. I diagrammi "asintotici" di Bode della funzione $G_d(s)$ sono mostrati in Fig. 1.

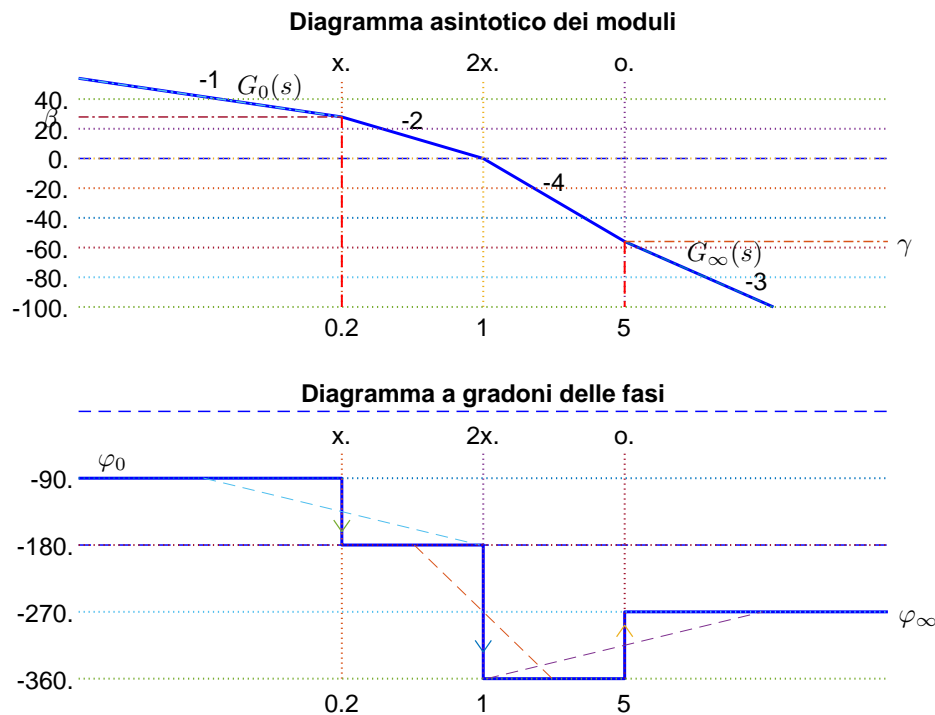


Figura 1: Diagrammi asintotici di Bode della funzione $G_d(s)$.

I diagrammi di Bode delle ampiezze e delle fasi della funzione $G(s)$ sono mostrati in Fig. 2.

Le funzioni approssimanti $G_0(s)$ e $G_\infty(s)$ per $\omega \rightarrow 0$ ed $\omega \rightarrow \infty$ sono le seguenti:

$$G_0(s) = \frac{5}{s}, \quad G_\infty(s) = \frac{1}{5s^3}.$$

Le corrispondenti fasi φ_0 e φ_∞ hanno il seguente valore:

$$\varphi_0 = -\frac{\pi}{2}, \quad \varphi_\infty = -\frac{3\pi}{2}.$$

Sul diagramma asintotico delle ampiezze il guadagno β alla pulsazione $\omega = 0.2$ e il guadagno γ alla pulsazione $\omega = 5$ sono:

$$\beta = |G_0(s)|_{s=0.2} = 25 = 27.96 \text{ db}, \quad \gamma = |G_\infty(s)|_{s=5} = \frac{1}{625} = -55.92 \text{ db}.$$

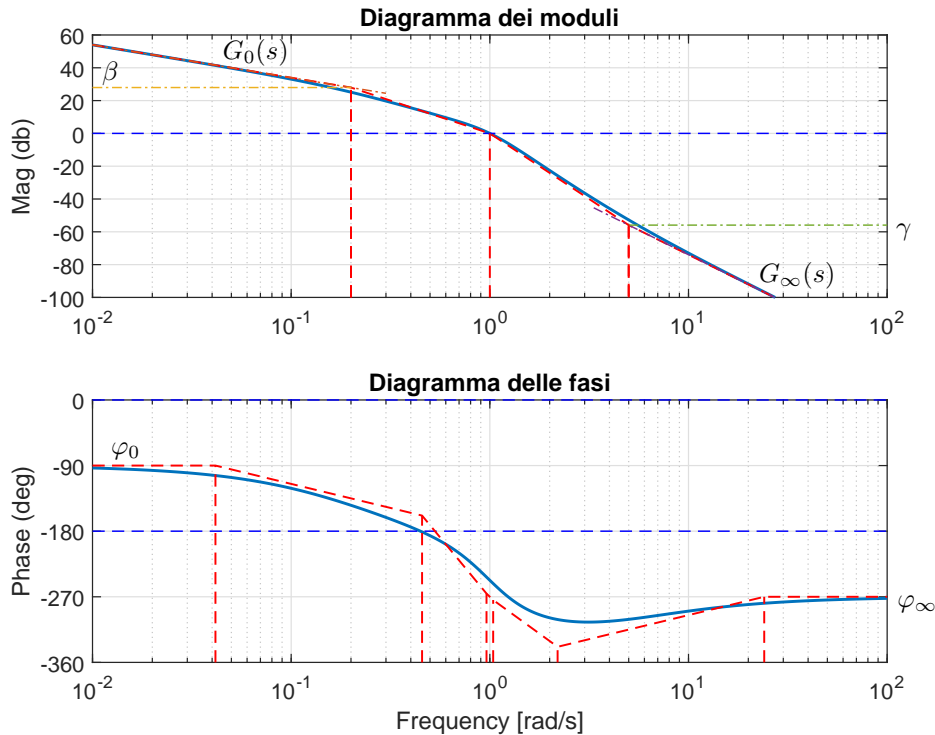


Figura 2: Diagrammi di Bode della funzione $G(s)$.

Il coefficiente di smorzamento della coppia di poli instabili è $\delta = 1/(2\omega_n) = 0.5$.

c.3) Disegnare qualitativamente il diagramma di Nyquist “completo” della funzione $G(s)$. Calcolare esattamente la posizione σ_a di un eventuale asintoto verticale, le eventuali intersezioni σ_i^* con l’asse reale e i corrispondenti valori delle pulsazioni ω_i^* .

Soluzione. Il diagramma di Nyquist della funzione $G(s)$ è mostrato in Fig. 3.

La fase iniziale del sistema è $\varphi_0 = -\frac{\pi}{2}$. Per $\omega \rightarrow 0^+$ il diagramma parte in ritardo rispetto a tale fase in quanto la somma delle costanti di tempo del sistema è negativa:

$$\Delta\tau = \frac{1}{5} - 5 - 1 = -5.8 < 0.$$

Il sistema è di tipo 1 per cui esiste un asintoto:

$$\sigma_a = K\Delta\tau = 5 \cdot (-5.8) = -29.$$

La variazione di fase che il sistema subisce per $\omega \in]0, \infty[$ è:

$$\Delta\varphi = \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{2} - \pi = -\pi$$

Ne segue che il vettore $G(j\omega)$ ruota di $-\pi$ in senso orario per raggiungere la fase finale $\varphi_\infty = -\frac{3\pi}{2}$. Per $\omega \rightarrow \infty$ il diagramma arriva in ritardo rispetto alla fase finale $\varphi_\infty = -\frac{\pi}{2}$ in quanto la somma Δ_p delle pulsazioni critiche del sistema è negativa:

$$\Delta_p = -5 + \frac{1}{5} + 1 = -3.8 < 0.$$

Esiste una sola intersezione con il semiasse reale negativo. L’intersezione avviene nel punto:

$$\sigma^* = -\frac{1}{0.2} = -5$$

in corrispondente della pulsazione $\omega^* = 0.447$.

d) Si faccia riferimento ai diagrammi di Bode della funzione $G(s)$ mostrati in figura.

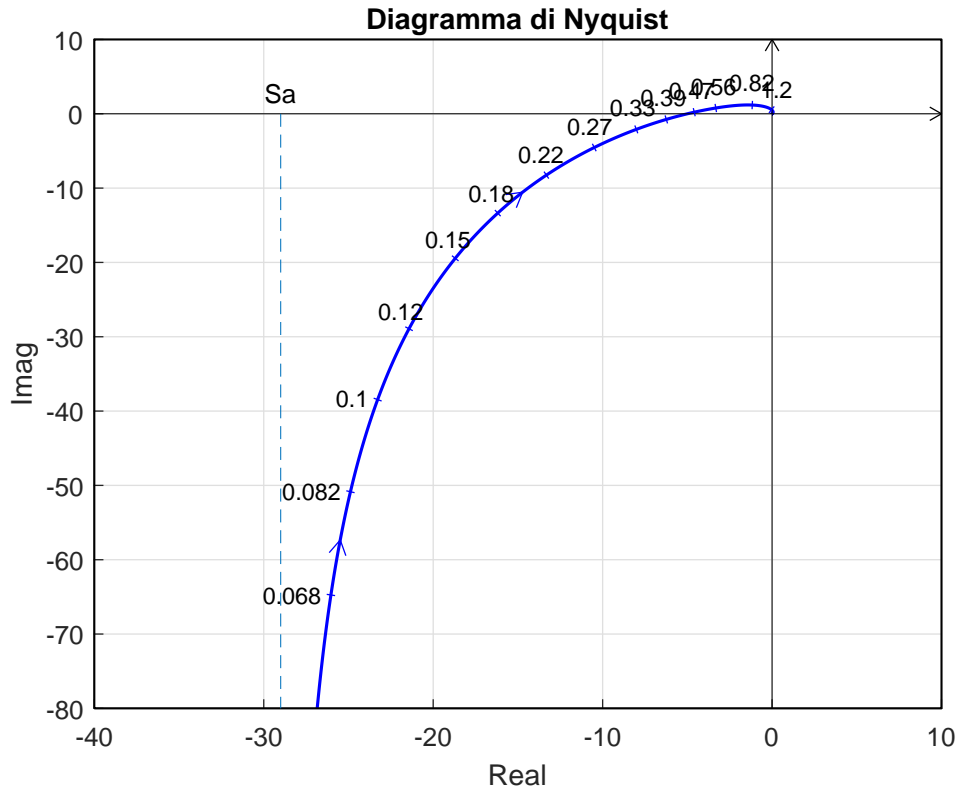
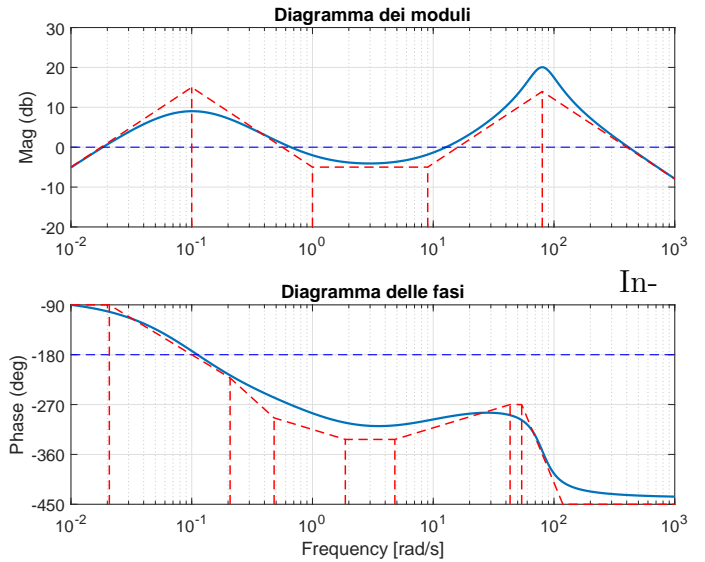


Figura 3: Diagramma di Nyquist della funzione $G(s)$ per $\omega \in [0, \infty]$.

Nei limiti della precisione consentita dal grafico, ricavare l'espressione analitica della funzione $G(s)$.

$$G(s) = \frac{400s(s-1)(s+9)}{(s+0.1)^2(s^2+40s+6400)}$$

Stimare in modo approssimato eventuali valori di δ .



fatti si ha che $G(80j) \simeq 10 e^{-360^\circ j}$.

Soluzione:

d) La funzione di trasferimento del sistema è la seguente:

$$G(s) = \frac{400s(s-1)(s+9)}{(s+0.1)^2(s^2+40s+6400)}$$

Il valore $K = 100$ si determina, per esempio, calcolando il modulo β dell'approssimante $G_0(s)$ in corrispondenza della pulsazione $\omega = 0.1$:

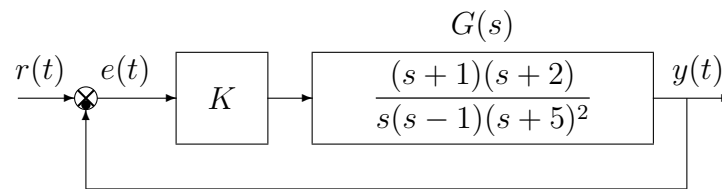
$$|G_0(s)|_{s=0.1j} = \left| \frac{-9Ks}{64} \right|_{s=0.1j} = \frac{0.9K}{64} = \beta \simeq 15 \text{ db} \simeq 5.62 \quad \rightarrow \quad K \simeq 400.$$

Il coefficiente di smorzamento della coppia di zeri complessi coniugati stabili è il seguente:

$$\delta = \frac{1}{2M_{\omega_n}} \simeq \frac{1}{4} = 0.25.$$

La distanza $M_{\omega_n} \simeq 6 \text{ db} \simeq 2$ si legge dal diagramma di Bode dei moduli.

e) Sia dato il seguente sistema retroazionato:



Tracciare qualitativamente il luogo delle radici del sistema retroazionato al variare del parametro $K > 0$. Determinare esattamente la posizione degli asintoti, le intersezioni ω^* con l'asse immaginario e i corrispondenti valori del guadagno K^* . Determinare la posizione di eventuali punti di diramazione "solo in modo qualitativo".

Sol. L'equazione caratteristica del sistema retroazionato è:

$$1 + K_1 G_1(s) = 0 \quad \Leftrightarrow \quad 1 + K \frac{(s+1)(s+2)}{s(s-1)(s+5)^2} = 0$$

dove $K_1 = K$. L'andamento qualitativo del luogo delle radici del sistema $G_1(s)$ per $K = K_1 > 0$ è mostrato in Fig. 4. Il luogo delle radici ha due asintoti verticali. Il centro degli asintoti è:

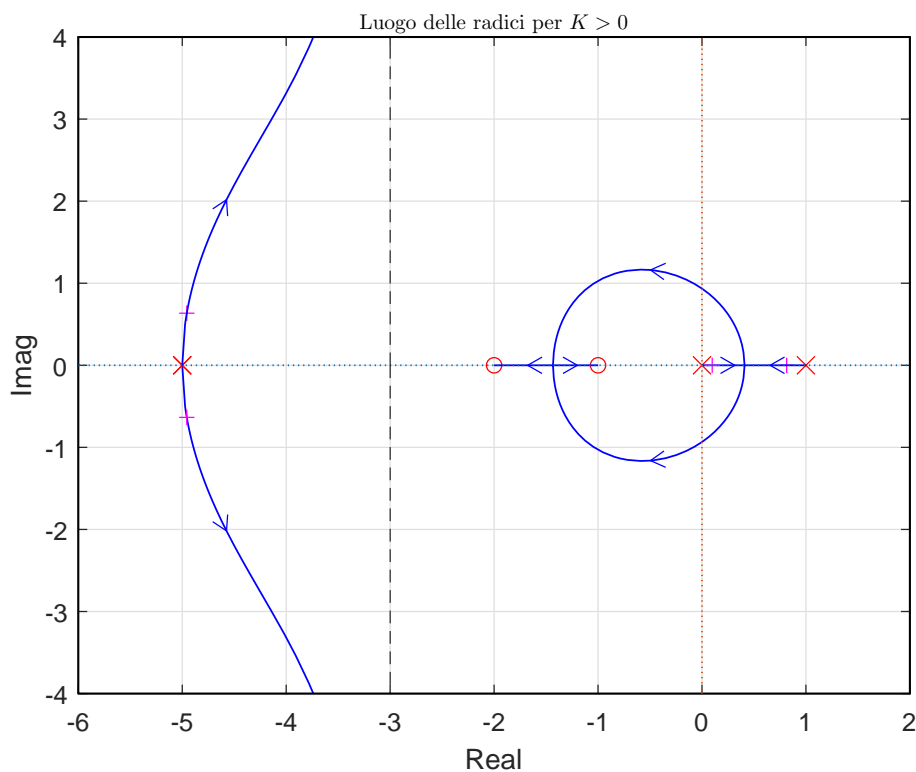


Figura 4: Luogo delle radici del sistema $G_1(s)$ per $K = K_1 > 0$

$$\sigma_a = \frac{1}{2} (-5 - 5 + 1 + 1 + 2) = -3.$$

L'intersezione con l'asse immaginario si calcola applicando il criterio di Routh alla seguente equazione caratteristica:

$$1 + K \frac{(s+1)(s+2)}{s(s-1)(s+5)^2} = 0 \quad \rightarrow \quad s^4 + 9s^3 + (K+15)s^2 + (3K-25)s + 2K = 0$$

La corrispondente tabella di Routh è la seguente

4	1	$K + 15$	$2K$
3	9	$3K - 25$	
2	$6K + 160$	$18K$	
1	$(6K + 160)(3K - 25) - 162K$		
0	$18K$		

Il sistema retroazionato é stabile se

$$K > -\frac{110}{6}, \quad 18K^2 + 168K - 4000 > 0, \quad K > 0.$$

Dalla seconda disequazione si ha che:

$$K < -\frac{14}{3} - 2\sqrt{61} = -20.28, \quad K > -\frac{14}{3} + 2\sqrt{61} = 10.95,$$

Quindi il sistema retroazionato é stabile se

$$K > -\frac{14}{3} + 2\sqrt{61} = 10.95 = K^*$$

L'intersezione con l'asse immaginario si ha in corrispondenza della pulsazione:

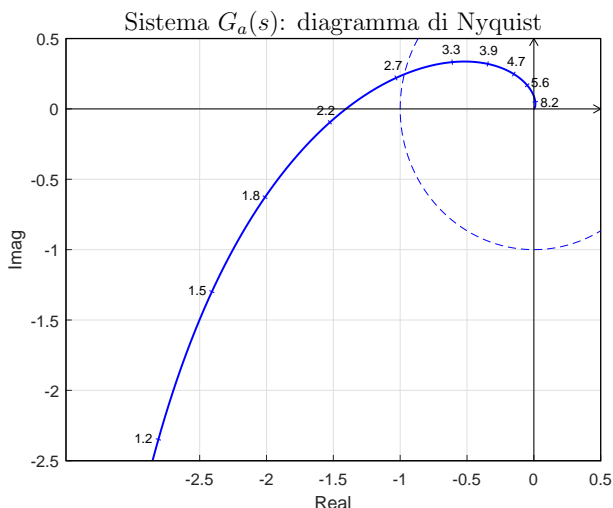
$$\omega^* = \sqrt{\frac{3K^* - 25}{9}} = 0.934.$$

f) Sia data la funzione $G_a(s)$ riportata a fianco.

Progettare una rete correttiva

$$C_a(s) = \frac{1 + \tau_1 s}{1 + \tau_2 s}$$

in modo da garantire che la funzione di risposta armonica del sistema compensato $C_a(s)G_a(s)$ abbia un margine di ampiezza $M_a = 10$. Scegliere il valore della pulsazione ω che si ritiene più opportuno.



Sol. La specifica sul margine di ampiezza $M_a = 10$ definisce completamente la posizione del punto $B = M_B e^{j\varphi_B}$: $M_B = 0.1$ e $\varphi_B = 180^\circ$. In questo caso è possibile utilizzare una rete ritardatrice. La regione ammissibile è mostrata in grigio in Fig. 5.

Il punto $A = G_b(j\omega_A)$ scelto per la sintesi della rete correttiva è quello corrispondente alla pulsazione $\omega_A = 1.8$:

$$M_A = |G(j\omega_A)| = 2.1, \quad \varphi_A = \arg[G(j\omega_A)] = 197.3^\circ.$$

Sostituendo i valori di M , φ e $\omega = \omega_A$ all'interno delle formule di inversione si ottengono i valori dei parametri $\tau_1 = 1.693$ e $\tau_2 = 37.54$ della rete correttiva $C(s)$:

$$M = \frac{M_B}{M_A} = 0.0474, \quad \varphi = \varphi_B - \varphi_A = -17.3^\circ \quad \rightarrow \quad C_1(s) = \frac{(1 + 1.693 s)}{(1 + 37.54 s)}.$$

Il diagramma di Nyquist delle funzioni $G_a(s)$ e $C_a(s)G_a(s)$ sono mostrati in Fig. 5.

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

$$\begin{aligned} \omega_A &= [\quad 2.2 \quad 1.8 \quad 1.5 \quad 1.2] \\ M_A &= [\quad 1.529 \quad 2.107 \quad 2.736 \quad 3.661] \\ \varphi_A &= [-176.4 \quad -162.7 \quad -151.7 \quad -140.1] \\ M &= [\quad 0.0654 \quad 0.0474 \quad 0.0365 \quad 0.0273] \\ \varphi &= [-3.568 \quad -17.32 \quad -28.33 \quad -39.9] \\ \tau_1 &= [\quad 6.813 \quad 1.693 \quad 1.185 \quad 0.9611] \\ \tau_2 &= [\quad 104.4 \quad 37.54 \quad 37.2 \quad 46.57] \end{aligned}$$

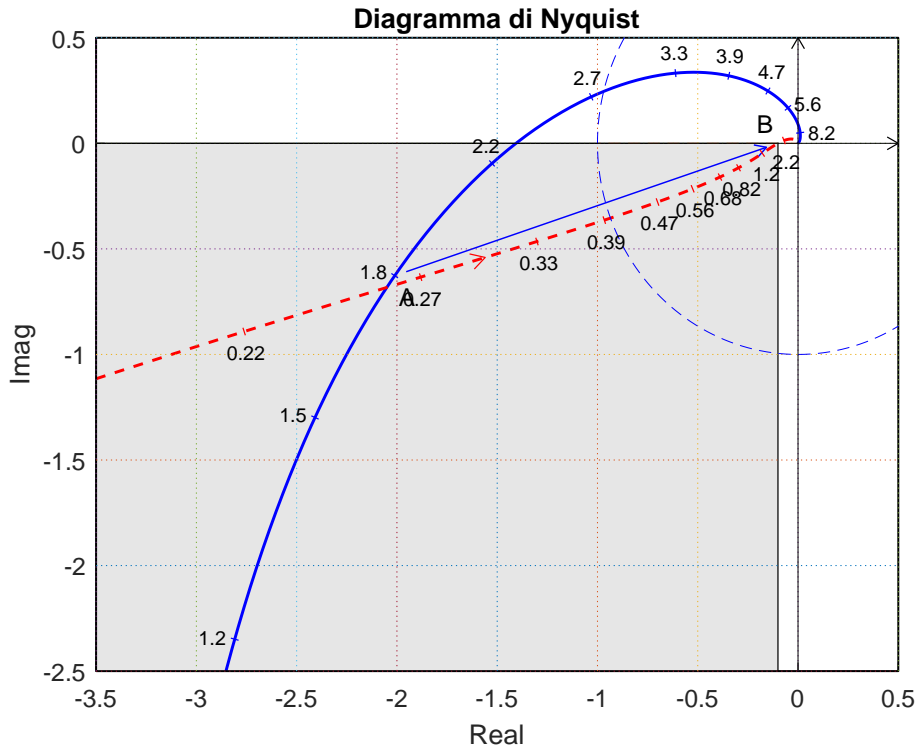
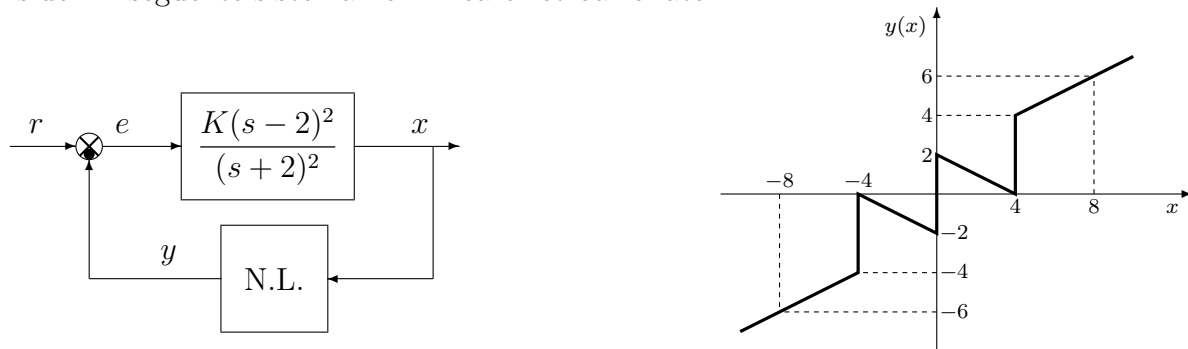


Figura 5: Diagrammi di Nyquist delle funzioni $G_a(s)$ e $C_a(s)G_a(s)$.

g) Si consideri il seguente sistema non lineare retroazionato:



g.1) Posto $K = 1$, determinare per quali valori r_0 ed r_1 dell'ingresso r i punti di lavoro del sistema retroazionato sono posizionati in $(x_0, y_0) = (0, 0)$ e in $(x_1, y_1) = (8, 6)$.

Soluzione. Il sistema è caratterizzato dai seguenti guadagni statici: $K_1 = 1$, $K_2 = 1$ e $K_3 = 1$. La retta di carico della parte lineare del sistema è una retta orizzontale di ordinata:

$$x = r - y$$

I valori r_0 e r_1 si ottiene ponendo $(x_0, y_0) = (0, 0)$ e $(x_1, y_1) = (8, 6)$ nella retta di carico:

$$r_0 = 0, \quad r_1 = 14.$$

g.2) Posto $K = 1$ ed utilizzando il criterio del cerchio, dire se il sistema retroazionato è stabile o meno nell'intorno del punto $(x_1, y_1) = (8, 6)$.

Soluzione. Le pendenze α e β di 2 rette che centrate in $(x_0, y_0) = (8, 6)$ racchiudono a settore tutta la non linearità sono le seguenti:

$$\alpha = \frac{1}{2}, \quad \beta = \frac{3}{2}.$$

Il cerchio critico interseca il semiasse reale negativo nei punti:

$$-\frac{1}{\alpha} = -2, \quad -\frac{1}{\beta} = -\frac{2}{3}.$$

Il margine di ampiezza \bar{K}^* e la pulsazione ω^* della funzione $G_1(s)$ si determinano utilizzando il criterio di Routh: $\bar{K}^* = 1$, $\omega^* = 2$.

$$1 + K G_1(s) = 0 \quad \rightarrow \quad (s + 2)^2 + K(s - 2)^2 = 0$$

$$(1 + K)s^2 + 4(1 - K)s + 4(K + 1) = 0$$

$$\begin{array}{l|l} 2 & (1 + K) \quad 4(1 + K) \\ 1 & 4(1 - K)s \\ 0 & 4(1 + K) \end{array}$$

Il sistema retroazionato é stabile per:

$$(1 - K > 0) \cup (1 + K > 0) \quad \rightarrow \quad -1 = \tilde{K} < K < \bar{K}^* = 1$$

L'intersezione con l'asse immaginario si ha alla pulsazione:

$$\omega^* = \sqrt{4} = 2$$

Il valore di \bar{K}^* è minore di β :

$$\alpha < \bar{K}^* < \beta$$

per cui in base al criterio del cerchio non si può concludere niente relativamente alla stabilità del sistema retroazionato.

In Fig. 6 è mostrato il diagramma di Nyquist della funzione $G(s)$ sovrapposto al cerchio critico.

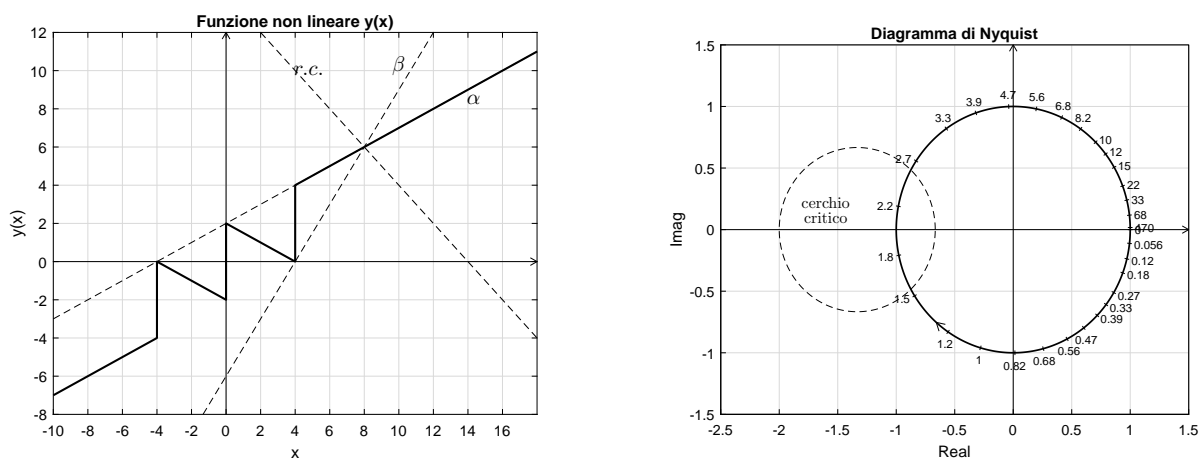


Figura 6: Diagramma di Nyquist della funzione $G(s)$ e cerchio critico.

- g.3) Disegnare in modo qualitativo l'andamento della funzione descrittiva $F(X)$ della non linearità $y(x)$ nell'intorno del punto $(0, 0)$. Utilizzare delle variabili (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.

Per $X < 4$ la funzione descrittiva $F(X)$ coincide con quella di un relè ideale sommata ad una retta di pendenza negativa:

$$F(X) = \frac{8}{\pi X} - \frac{1}{2}.$$

Il valore m_1 del primo minimo si ottiene dalla $F(X)$ in corrispondenza di $X = 4$:

$$m_1 = F(X)|_{X=4} = \frac{2}{\pi} - \frac{1}{2} = 0.1366.$$

Il valore m_2 del massimo intermedio può essere calcolato solo conoscendo la $F(X)$ per $X > 4$. Per $X \rightarrow \infty$ la $F(X)$ tende al valore finale minimo $m_3 = \frac{1}{2}$.

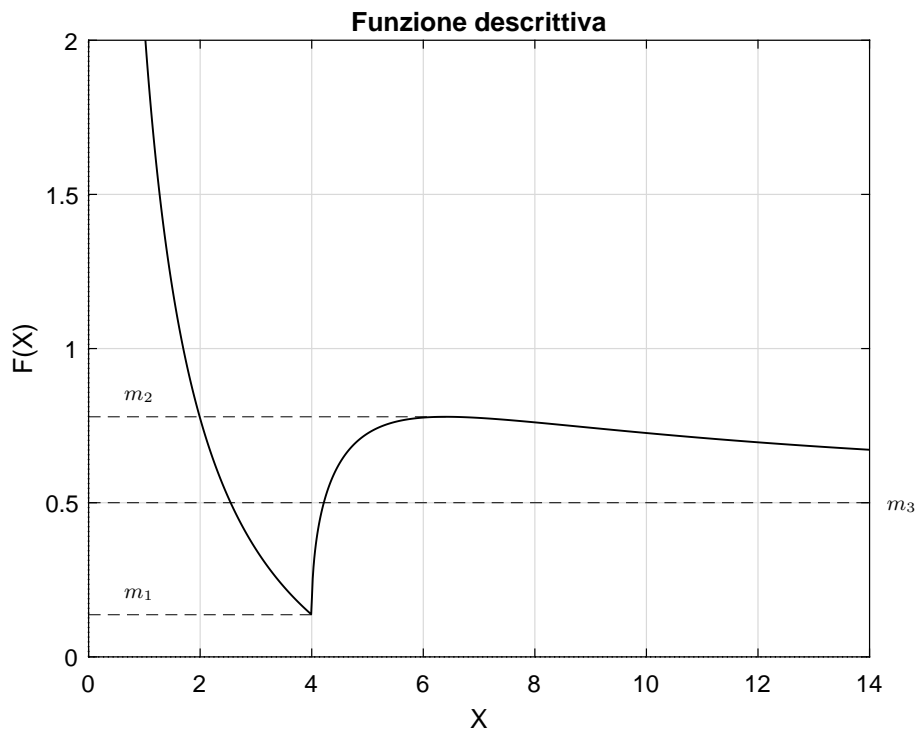


Figura 7: Andamento della funzione descrittiva $F(X)$.

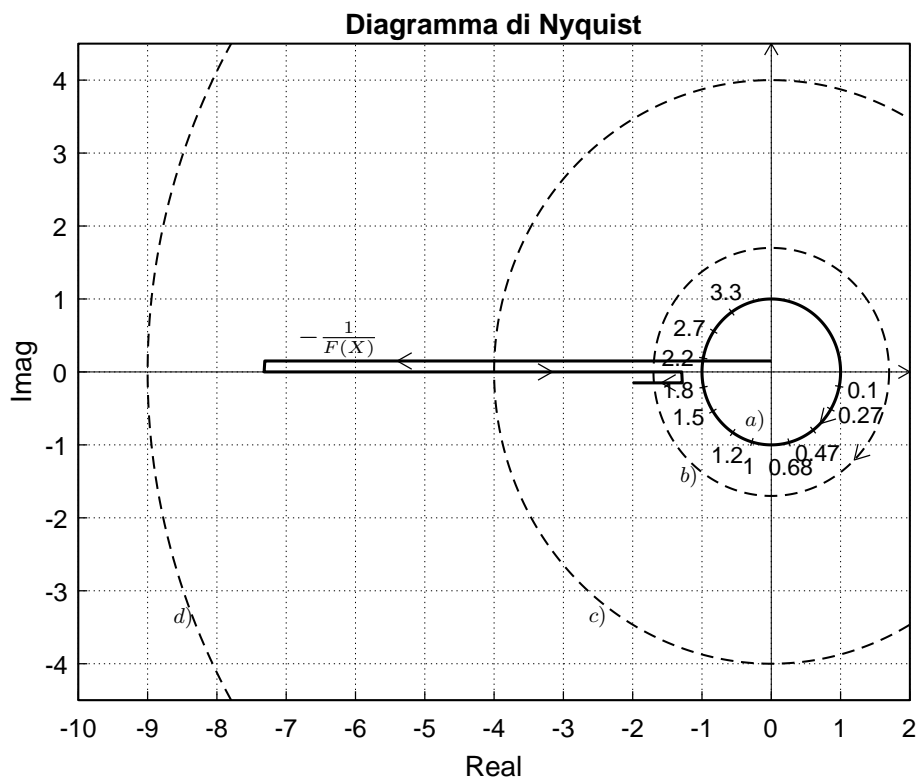


Figura 8: Discussione grafica al variare di K .

g.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 $K > 0$.

Soluzione. Per $K = 1$, il margine di ampiezza \bar{K}^* del sistema $G_1(s)$ è $\bar{K}^* = 1$. Per $K \neq 1$, il margine di ampiezza K^* del sistema $K G_1(s)$ è $K^* = \frac{\bar{K}^*}{K}$. Al variare di K^* si possono avere le seguenti condizioni di funzionamento:

- Per $K^* > m_2$, il diagramma di Nyquist della $G_1(s)$ interseca la funzione $-1/F(X)$ in un solo punto a cui corrisponde un ciclo limite stabile.
- Per $m_3 < K^* < m_2$, il diagramma di Nyquist della $G_1(s)$ interseca la funzione $-1/F(X)$ in tre punti: i due punti esterni corrispondono a due cicli limite stabili, il punto intermedio rappresenta un ciclo limite instabile.
- Per $m_1 < K^* < m_3$ il diagramma di Nyquist della $G_1(s)$ interseca la funzione $-1/F(X)$ in due punti: il primo corrisponde un ciclo limite stabile e il secondo ad un ciclo limite instabile.
- Per $K^* < m_1$ la funzione $-1/F(X)$ è tutta interna al diagramma polare completo della funzione $G_1(s)$ per cui non vi sono cicli limite e il sistema retroazionato è instabile.

h) Utilizzando il metodo delle differenze all’indietro, discretizzare la seguente rete correttiva

$$D(s) = \frac{M(s)}{E(s)} = \frac{(s+2)}{s(s+5)}$$

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:

$$D(z) = \frac{(s+2)}{s(s+5)} \Big|_{s=\frac{1-z^{-1}}{T}} = \frac{T(1-z^{-1}+2T)}{(1-z^{-1})(1-z^{-1}+5T)}$$

Per $T = 0.1$ si ha:

$$D(z) = \frac{M(z)}{E(z)} = \frac{0.1(1.2-z^{-1})}{(1-z^{-1})(1.3-z^{-1})} = \frac{0.12-0.1z^{-1}}{1.5-2.5z^{-1}+z^{-2}}$$

La corrispondente equazione alle differenze assume la forma seguente:

$$m(k) = \frac{1}{1.5} [2.5 m(k-1) - m(k-2) + 0.12 e(k) - 0.1 e(k-1)]$$

cioè:

$$m(k) = 1.6667 m(k-1) - 0.6667 m(k-2) + 0.08 e(k) - 0.0667 e(k-1)]$$

Nome:	
Nr. Mat.	
Firma:	
C.L.:	Info. Elet. Telec. Altro.

Si risponde alle seguenti domande.

1. Calcolare la risposta a regime $y(t)$ del sistema $G(s)$ quando in ingresso è presente il seguente segnale sinusoidale $x(t)$:

$$x(t) = 5 + 3 \cos(2t + \frac{\pi}{3}) \quad \xrightarrow{\begin{matrix} G(s) \\ \frac{4}{s+1} \end{matrix}} \quad y(t) \simeq 20 + \frac{12}{\sqrt{5}} \cos(2t + \frac{\pi}{3} - \arctan 2)$$

2. Calcolare l'evoluzione libera del sistema $3\dot{y}(t) + 2y(t) = 0$ partendo dalla condizione iniziale $y(0) = 4$. Applicando la trasformata di Laplace si ha:

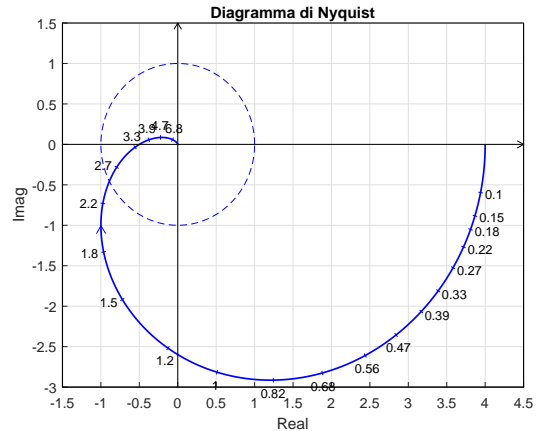
$$3(sY(s) - 4) + 2Y(s) = 0 \quad \rightarrow \quad Y(s) = \frac{4}{s + 0.666} \quad \rightarrow \quad y(t) = 4e^{-0.666t}$$

3. Sia dato il diagramma di Nyquist della funzione $G(s) = \frac{18}{(s+2)^3}$.

In base al criterio di Nyquist è possibile affermare che il sistema retroazionato $K G(s)$ è stabile per i seguenti valori di K :

$$-0.25 = -\frac{1}{4} < K < 2$$

Calcolare dal grafico, in modo approssimato, i valori limite dell'intervallo di ammissibilità del parametro K .



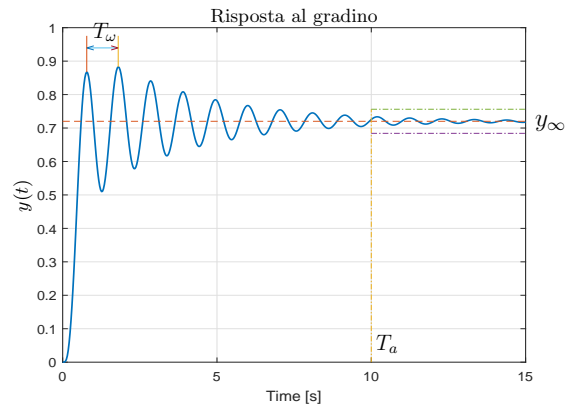
4. Disegnare l'andamento qualitativo $y_1(t)$ della risposta al gradino unitario del seguente sistema:

$$G(s) = \frac{500(2 + 0.3s)(s^2 + 25s + 70^2)}{(5s + 21)(3s + 10)(s^2 + 10s + 900)(s^2 + 0.6s + 36)}$$

Calcolare inoltre:

- a) il valore a regime y_∞ della risposta al gradino per $t \rightarrow \infty$;
- b) il tempo di assestamento T_a della risposta al gradino $y_1(t)$;
- c) il periodo T_w dell'eventuale oscillazione smorzata presente sul segnale $y_1(t)$:

$$y_\infty = 0.72, \quad T_a \simeq 10 \text{ s}, \quad T_w \simeq \frac{2\pi}{6} = 1.05$$



5. Scrivere il modulo $M(\omega) = |G(j\omega)|$ e la fase $\varphi(\omega) = \arg G(j\omega)$ della funzione di risposta armonica del seguente sistema $G(s)$:

$$G(s) = \frac{(1 - 2s)}{s(s - 5)^2} e^{-3s} \quad \rightarrow \quad \begin{cases} M(\omega) = \frac{\sqrt{1+4\omega^2}}{\omega(\omega^2+25)} \\ \varphi(\omega) = -\arctan 2\omega - \frac{\pi}{2} - 2(\pi - \arctan \frac{\omega}{5}) - 3\omega \end{cases}$$

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

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

7. A fianco è riportato il luogo delle radici del sistema $G(s) = \frac{-10}{(s+6)(s^2+16)}$ al variare del parametro $K > 0$. Calcolare:

- a) L'ascissa σ_0 corrispondente alla condizione di allineamento dei tre poli:

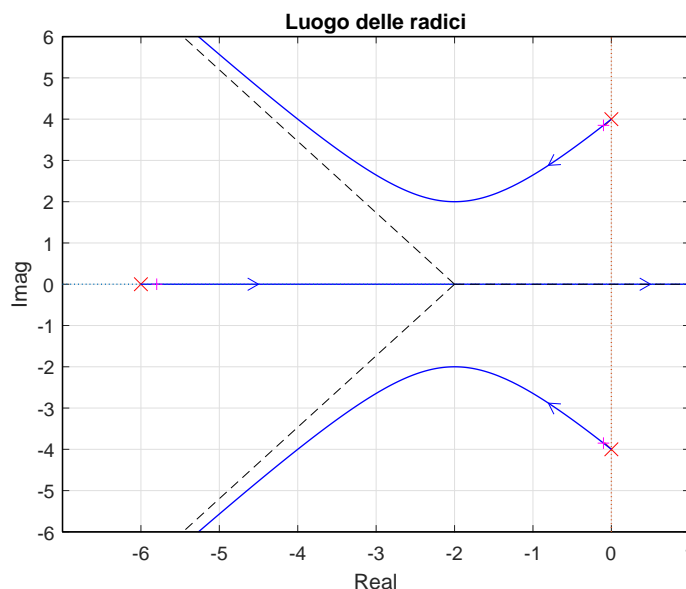
$$\sigma_0 = -2$$

- b) Il valore K_0 corrispondente alla condizione di allineamento dei tre poli:

$$K_0 = -\frac{1}{G(s)} \Big|_{s=-2} = 8$$

- c) Per quali valori di K il sistema retroazionato è stabile:

$$0 < K < K^* = -\frac{1}{G(s)} \Big|_{s=0} = 9.6$$



8. Il valore a regime $x(\infty)$ della sequenza $x(k)$ corrispondente alla funzione $X(z) = \frac{z+2}{(z-1)(z+0.5)}$ è:

- $x(\infty) = 0$ $x(\infty) = 1$ $x(\infty) = 2$ $x(\infty) = 6$

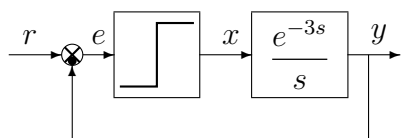
9. La funzione di risposta armonica $F(\omega)$ di un sistema discreto $G(z)$ si determina nel seguente modo:

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

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

$$x(t) = 3t \quad \rightarrow \quad X(z) = \frac{3Tz}{(z-1)^2} \quad \quad \quad x(t) = 5^{-3t} \quad \rightarrow \quad X(z) = \frac{z}{(z-5^{-3T})}$$

11. Sia dato il seguente sistema retroazionato. Per la presenza del relé ideale il sistema sicuramente oscilla. Fornire il valore della pulsazione ω^* di oscillazione:



$$\omega^* = \frac{\pi}{6} = 0.524.$$

12. Il metodo di Ziegler-Nichols per determinare i valori di primo tentativo dei parametri di un regolatore standard PID

- è applicabile solo al controllo di sistemi lineari
 richiede la conoscenza della risposta impulsiva del sistema da controllare
 richiede la conoscenza della risposta al gradino del sistema da controllare
 è applicabile in modo approssimato anche al controllo di sistemi non lineari
 richiede la conoscenza esatta del modello dinamico del sistema da controllare