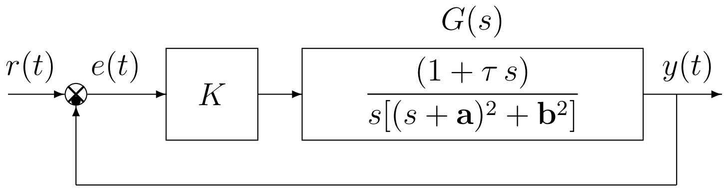
Nr.

Nome:	
Nr. Mat.	
Firma:	

Controlli Automatici B
12 Aprile 2007 - Esercizi
Compito Nr. $\boxed{\mathbf{a} = 6}$ $\boxed{\mathbf{b} = 3}$

Negli esercizi che seguono, si sostituisca ad **a** e **b** i valori assegnati e si risponda alle domande.

a) Sia dato il seguente sistema retroazionato:



a.1) Posto $\tau = 0$, tracciare qualitativamente il luogo delle radici del sistema retroazionato al variare del parametro $K > 0$. Nella graficazione del luogo delle radici si tenga conto del fatto che sull'asse reale negativo sono presenti 2 punti di diramazione. Determinare "esattamente" la posizione dei 2 punti di diramazione. Determinare inoltre esattamente la posizione degli asintoti, le intersezioni ω^* con l'asse immaginario e i corrispondenti valori del guadagno K^*.

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

$$1 + K\frac{(1+\tau\, s)}{s[(s+\mathbf{a})^2+\mathbf{b}^2]} = 0$$

L'andamento qualitativo del luogo delle radici del sistema $G(s)$ al variare del parametro $K > 0$ è mostrato in Fig. 1 per $\mathbf{a} = 6$ e $\mathbf{b} = 3$. Il centro degli asintoti σ_a è il seguente:

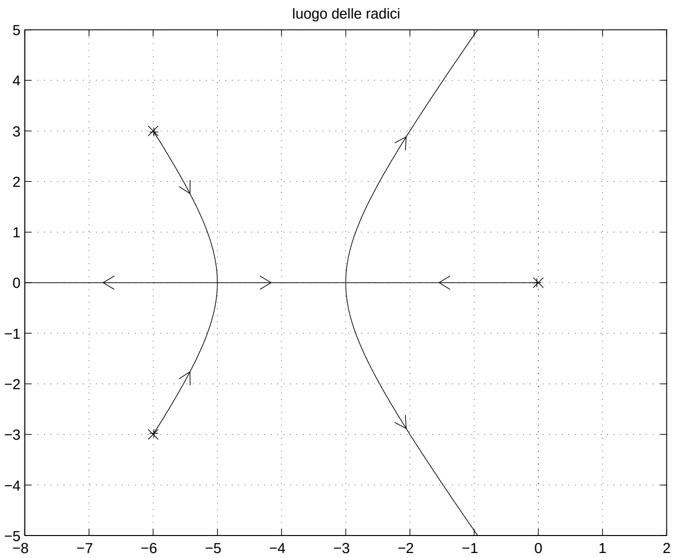


Figura 1: Luogo delle radici del sistema $G(s)$ al variare del parametro $K > 0$ per $\mathbf{a} = 6$ e $\mathbf{b} = 3$.

$$\sigma_a = -\frac{2\mathbf{a}}{3} \qquad \xrightarrow{\mathbf{a}=6,\,\mathbf{b}=3} \qquad \sigma_a = -4$$

L'intersezione con l'asse immaginario si calcola utilizzando il criterio di Routh:

$$1 + K\,G(s) = 0 \qquad \rightarrow \qquad s^3 + 2\mathbf{a}\,s^2 + (\mathbf{a}^2+\mathbf{b}^2)\,s + K = 0$$

e calcolando la tabella di Routh

$$\begin{array}{c|cc} 3 & 1 & \mathbf{a}^2+\mathbf{b}^2 \\ 2 & 2\mathbf{a} & K \\ 1 & 2\mathbf{a}(\mathbf{a}^2+\mathbf{b}^2) - K & \\ 0 & K & \end{array}$$

Il sistema risulta essere stabile per:

$$0 < K < 2\mathbf{a}(\mathbf{a}^2+\mathbf{b}^2) = K^* \qquad \xrightarrow{\mathbf{a}=6,\,\mathbf{b}=3} \qquad K^* = 540$$

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

$$\omega^* = \sqrt{\mathbf{a}^2+\mathbf{b}^2} \qquad \xrightarrow{\mathbf{a}=6,\,\mathbf{b}=3} \qquad \omega^* = \sqrt{45}$$

I punti di diramazione si determinano derivando la $G(s)$ per s ed uguagliando a zero:

$$\frac{\partial}{\partial s}\left[\frac{1}{s[(s+6)^2+3^2]}\right] = 0 \quad \rightarrow \quad s^2+8\,s+15 = 0 \quad \rightarrow \quad (s+3)(s+5) = 0$$

Le soluzioni sono

$$\sigma_1 = -3, \qquad\qquad \sigma_1 = -5$$

a.2) Posto $\tau = 0$ e $K = K^*$, determinare la posizione p_1, p_2 e p_3 dei poli del sistema retroazionato.

Sol. In corrispondenza del valore $K = K^*$ il sistema retroazionato è marginalmente stabile e due dei suoi tre poli si trovano sull'asse immaginario nella posizione $p_{1,2} = \pm j\,\omega^*$. La posizione del terzo polo p_3 si determina, per esempio, utilizzando il teorema del baricentro:

$$p_1+p_2+p_3 = \sum_{i=1}^{3} p_{0i} = -2\mathbf{a} \qquad \xrightarrow{\mathbf{a}=6,\,\mathbf{b}=3} \qquad p_3 = \sum_i p_{0i} = -12$$

a.3) Posto $K = K^*$, tracciare qualitativamente il contorno delle radici del sistema retroazionato al variare del parametro $\tau > 0$. Determinare esattamente la posizione degli asintoti e le intersezioni ω^* con l'asse immaginario. Determinare la posizione degli eventuali punti di diramazione "solo in modo qualitativo". Calcolare per quale valore τ^* il sistema retroazionato presenta il minimo tempo di assestamento alla risposta al gradino.

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

$$s[(s+\mathbf{a})^2+\mathbf{b}^2] + K^*(1+\tau\,s) = 0$$

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

$$s[(s+\mathbf{a})^2+\mathbf{b}^2] + K^* + \tau\,K^*\,s = 0 \qquad \rightarrow \qquad 1+\frac{\tau\,K^*\,s}{s[(s+\mathbf{a})^2+\mathbf{b}^2]+K^*} = 0$$

I poli della funzione $G_1(s)$ sono quelli calcolati al punto a.2):

$$1+\frac{\tau\,K^*\,s}{(s+p_1)(s+p_2)(s+p_3)} = 0 \qquad \rightarrow \qquad 1+\frac{\tau\,K^*\,s}{(s+12)(s+j\,\omega^*)(s-j\,\omega^*)} = 0$$

Il contorno delle radici al variare del parametro $\tau > 0$ è mostrato in Fig. 2 quando $\mathbf{a} = 6$ e $\mathbf{b} = 3$. Il contorno delle radici ha 2 asintoti verticali il cui centro σ_0 è

$$\sigma_0 = -\frac{2\mathbf{a}}{2} = -\mathbf{a} \qquad \xrightarrow{\mathbf{a}=6} \qquad \sigma_0 = -6$$

La condizione di minimo tempo di assestamento si ha quando i poli del sistema retroazionato si trovano alla massima distanza dall'asse immaginario, cioè quando i poli sono allineati. La condizione di allineamento σ_a si determina facilmente utilizzando il teorema del baricentro:

$$3\sigma_a = -2\mathbf{a} \qquad \rightarrow \qquad \sigma_a = -\frac{2\mathbf{a}}{3} \qquad \xrightarrow{\mathbf{a}=6} \qquad \sigma_a = -4$$

Il corrispondente valore τ^* si calcola nel modo seguente:

$$\tau^* = -\frac{1}{G_1(s)}\Big|_{s=\sigma_a} = -\frac{s[(s+\mathbf{a})^2+\mathbf{b}^2]+K^*}{K^*\,s}\Big|_{s=-\frac{2\mathbf{a}}{3}} \qquad \xrightarrow{\mathbf{a}=6} \qquad \tau^* = \frac{61}{270} = 0.2259$$

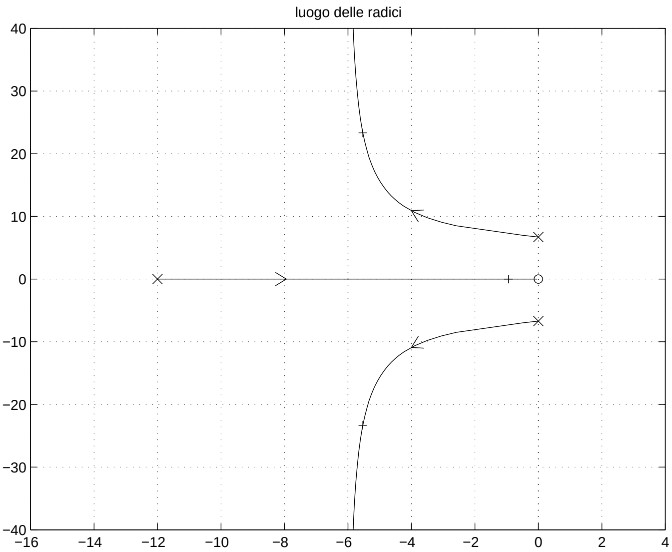
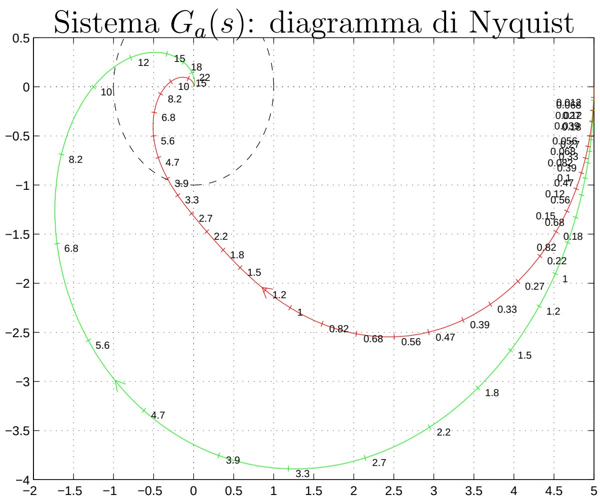
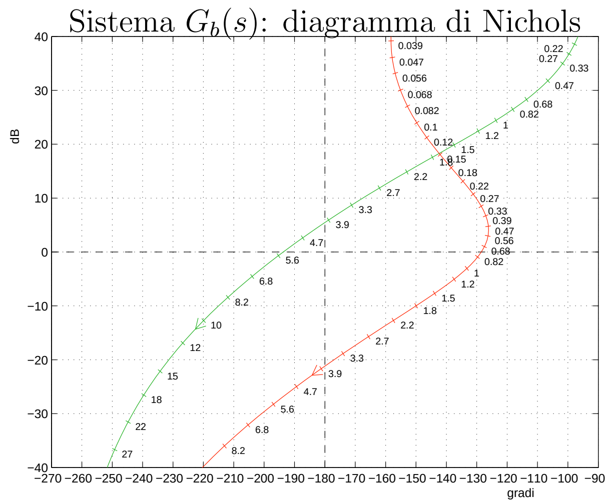


Figura 2: Contorno delle radici del sistema $G_1(s)$ al variare del parametro $\tau > 0$ quando $\mathbf{a} = 6$ e $\mathbf{b} = 3$.

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





b.1) Per il sistema $G_a(s)$, progettare una rete correttrice $C(s)$ in grado di far passare la funzione di risposta armonica del sistema $C(s)G_a(s)$ per il punto B caratterizzato dalle seguenti coordinate: $B = (-0.5,\ -0.5)$;

Sol. Modulo e fase del punto B:

$$M_B = \sqrt{0.5} = 0.707, \quad \varphi_B = 225^o$$

In questo caso è possibile utilizzare solo una rete ritardatrice. Un punto A ammissibile è quello corrispondente alla pulsazione $\omega = 5.6$:

$$M_A = 2.898, \quad \varphi_A = 243^o \qquad \rightarrow \qquad M = \frac{M_B}{M_A} = 0.2440, \quad \varphi = \varphi_B - \varphi_A = -18^o$$

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

$$\tau_1 = \frac{M - \cos\varphi}{\omega \sin\varphi} = 0.4086, \qquad \tau_2 = \frac{\cos\varphi - \frac{1}{M}}{\omega \sin\varphi} = 1.8187 \qquad \rightarrow \qquad C(s) = \frac{1 + 0.4086\, s}{1 + 1.8187\, s}$$

b.2) Per il sistema $G_b(s)$ progettare una rete ritardatrice in grado da garantire al sistema compensato un margine di ampiezza $M_a = \mathbf{a}$. Scegliere il valore della pulsazione ω che si ritiene più opportuno;

Sol. La specifica sul margine di ampiezza definisce completamente la posizione del punto B:

$$M_B = \frac{1}{\mathbf{a}}, \qquad \varphi_B = -180^o \qquad \xrightarrow{\mathbf{a}=6} \qquad M_B = \frac{1}{6} = 0.1667, \qquad \varphi_B = -180^o$$

Il punto A corrispondente alla pulsazione $\omega = 3.3$ può essere portato in B utilizzando una rete ritardatrice:

$$M_A = 2.722 = 8.699 \text{ db}, \qquad\qquad \varphi_A = -171.2^o$$

Per $\mathbf{b} = 5$, i parametri da utilizzare nelle formule di inversione sono:

$$M = \frac{M_B}{M_A} = 0.0612, \qquad\qquad \varphi = -8.8^o$$

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

$$\tau_1 = \frac{M - \cos\varphi}{\omega\,\sin\varphi} = 1.8362, \qquad \tau_2 = \frac{\cos\varphi - \frac{1}{M}}{\omega\,\sin\varphi} = 30.4081 \quad \rightarrow \quad C(s) = \frac{1 + 1.8362\,s}{1 + 30.4081\,s}$$

b.3) Sempre per il sistema $G_b(s)$, progettare i parametri K, τ_1 e τ_2 di una rete correttrice $C(s) = K\,\dfrac{1+\tau_1\,s}{1+\tau_2\,s}$ in modo da garantire al sistema compensato un margine di fase $M_\varphi = (40 + \mathbf{a})^o$ e una larghezza di banda del sistema retroazionato $\omega_{f0} = 3.3$;

Sol. Modulo e fase del punto $B = (-134^o,\ 0 \text{ db})$:

$$M_B = 1, \qquad\qquad \varphi_B = -134^o$$

Il punto A caratterizzato dalla pulsazione $\omega = 3.3$ non può essere portato in B "direttamente" usando una rete ritardatrice o anticipatrice.

$$M_A = 2.722 = 8.699\text{db}, \qquad\qquad \varphi_A = -171.2^o$$

Utilizzando, per esempio, il parametro $K = 0.1$ è possibile portare il punto A in un punto A' che appartiene alla regine ammissibile per la sintesi di una rete anticipatrice:

$$M_{A'} = 0.2722 = -11.301\text{db}, \qquad\qquad \varphi_{A'} = -171.2^o$$

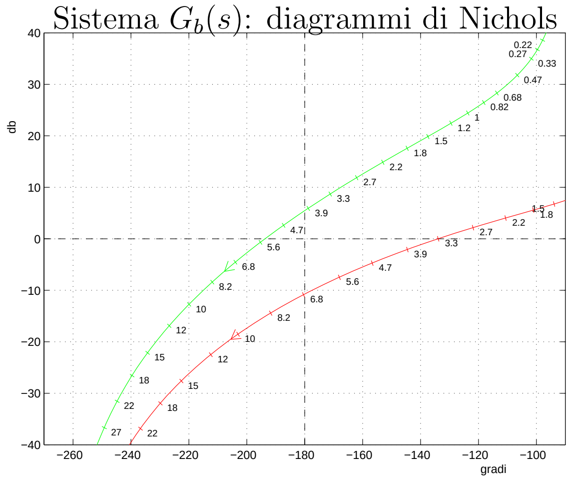
I parametri da utilizzare nelle formule di inversione sono:

$$M = \frac{M_B}{M_{A'}} = 3.6738, \quad \varphi = \varphi_B - \varphi_{A'} = 37.2^o$$

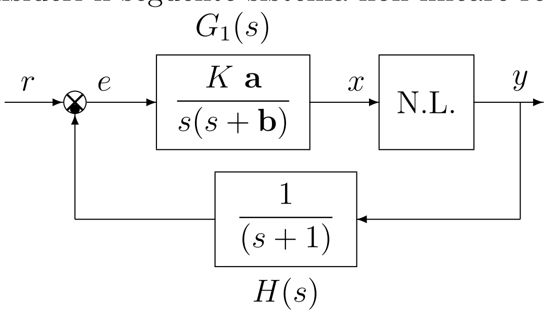
La rete anticipatrice che si ottiene utilizzando le formule di inversione è la seguente:

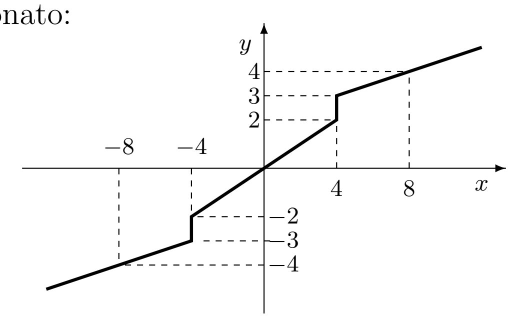
$$\tau_1 = \frac{M - \cos\varphi}{\omega\,\sin\varphi} = 1.4421, \qquad \tau_2 = \frac{\cos\varphi - \frac{1}{M}}{\omega\,\sin\varphi} = 0.2628 \quad \rightarrow \quad C(s) = \frac{1 + 1.4421\,s}{1 + 0.2628\,s}$$

Sistema $G_b(s)$: diagrammi di Nichols



c) Si consideri il seguente sistema non lineare retroazionato:





c.1) Posto $K = 1$, determinare se in base al criterio del cerchio il punto di lavoro (x_0, y_0) corrispondente all'ingresso $r = -1$ è asintoticamente stabile o meno.

Sol. Essendo $K_1 = \infty$, $K_2 = K_3 = 1$, la retta di carico della parte lineare del sistema è una retta orizzontale di ordinata $y = -1$. Il punto di lavoro si trova quindi in

$$(x_0, y_0) = (-2, -1)$$

Le pendenze α e β di 2 rette che centrate in $(x_0,\, y_0) = (-2, -1)$ racchiudono a settore tutta la non linearità sono:

$$\alpha = \frac{1}{4}, \qquad\qquad \beta = 1$$

Il cerchio critico interseca il semiasse reale negativo nei punti:

$$-\frac{1}{\alpha} = -4, \qquad\qquad -\frac{1}{\beta} = -1$$

Il diagramma di Nyquist della funzione $G_1(s)$ è mostrato in Fig. 3. L'intersezione con il semiasse

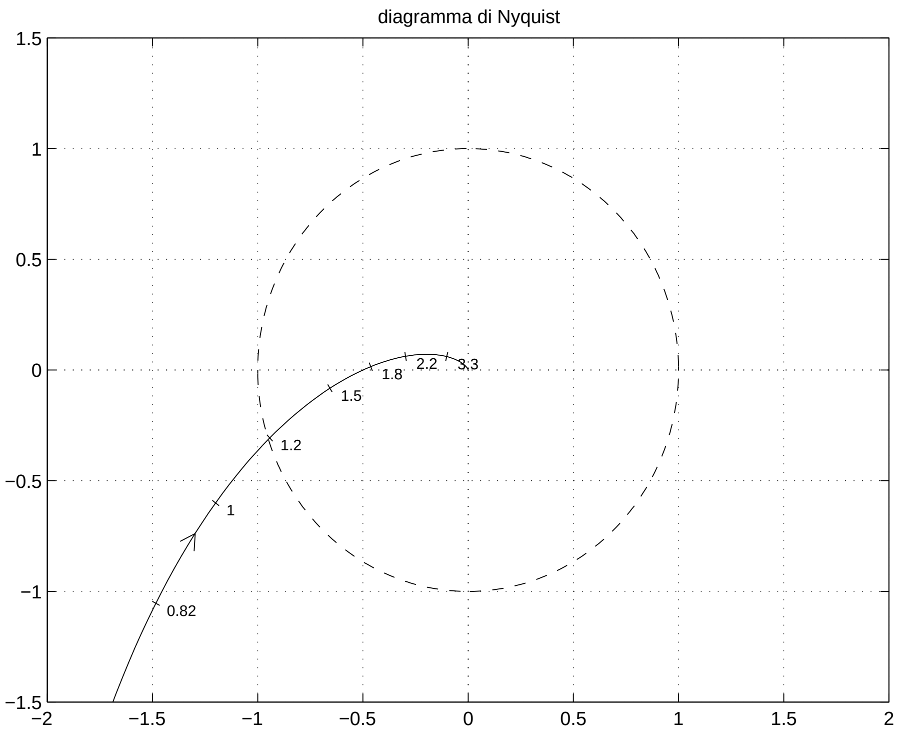


Figura 3: Il diagramma di Nyquist della funzione $G_1(s)$ quando $\mathbf{a} = 6$ e $\mathbf{b} = 3$.

reale negativo si trova scrivendo l'equazione caratteristica del sistema retroazionato e applicando il criterio di Routh. Il sistema retroazionato è stabile per

$$0 < K < \frac{\mathbf{b}(\mathbf{b}+1)}{\mathbf{a}} = \bar{K}^*, \quad \omega^* = \sqrt{\mathbf{b}} \qquad \xrightarrow{\mathbf{a}=6,\ \mathbf{b}=3} \qquad 0 < K < \bar{K}^* = 2, \quad \omega^* = \sqrt{3}$$

Ne segue che il diagramma di Nyquist della funzione $G_1(s)$ non interseca il cerchio critico per cui si può affermare che il sistema retroazionato e globalmente asintoticamente stabile nell'intorno del punto di lavoro.

c.2) Posto $r = 0$ il punto di lavoro coincide con l'origine. 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 delle variabili (per esempio: $m_1,\ m_2, \ldots$) per rappresentare gli eventuali valori non noti minimi e massimi della funzione $F(X)$. Discutere "qualitativamente" l'esistenza o meno di cicli limite nel sistema retroazionato al variare del guadagno $K > 0$.

Sol. L'andamento qualitativo della funzione descrittiva $F(X)$ quando $\mathbf{a} = 6$ e $\mathbf{b} = 3$ è mostrato in Fig. 4. Il valore di partenza della $F(X)$ è $m_1 = 0.5$. Il valore massimo m_2 può essere

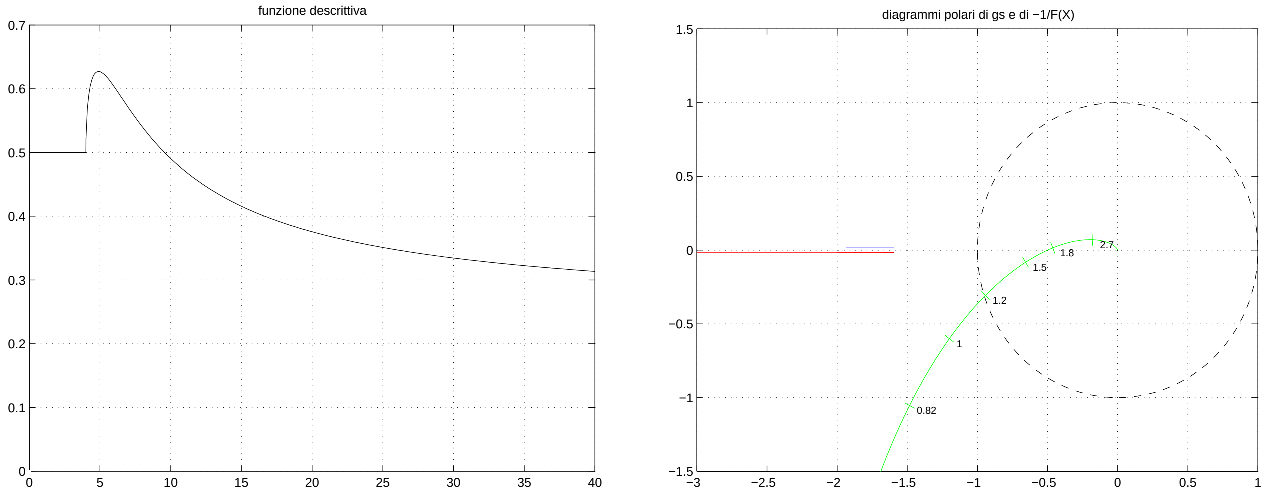


Figura 4: Andamento della funzione descrittiva $F(X)$ quando $\mathbf{a} = 6$ e $\mathbf{b} = 3$.

calcolato sono conoscendo la $F(X)$ per $X > 4$. Per $X \to \infty$ la $F(X)$ tende al valore finale minimo $m_3 = \frac{1}{4} = 0.25$.

Per $K = 1$, il margine di ampiezza $\bar{K}^*$ del sistema $G_1(s)$ è $\bar{K}^* = 2$. 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:

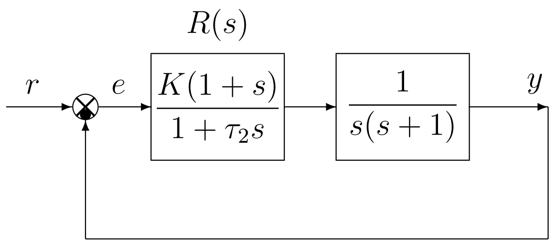
1) Per $K^* < m_3$, la funzione $-1/F(X)$ è tutta interna al diagramma completo della funzione $G_1(s)$ per cui non vi sono cicli limite e il sistema retroazionato è instabile.

2) Per $m_3 < K^* < m_1$, 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.

3) Per $m_1 < K^* < m_2$, il diagramma di Nyquist della $G_1(s)$ interseca la funzione $-1/F(X)$ in due punti a cui corrispondono due cicli limite di cui uno stabile (quello uscente dal diagramma polare) e uno instabile (quello entrante).

4) Per $K^* > m_2$, la funzione $-1/F(X)$ è tutta esterna al diagramma polare completo della funzione $G_1(s)$ per cui non vi sono cicli limite e il sistema retroazionato è stabile.

d) Si faccia riferimento al seguente sistema retroazionato:



Lo zero della rete correttrice $R(s)$ è stato posizionato in corrispondenza del polo in $p_1 = -1$ del sistema $G(s)$ operando in questo modo una cosiddetta "cancellazione polo-zero" (eliminare questi 2 termini dal sistema retroazionato). Calcolare il valore dei parametri K e τ_2 in modo che il sistema retroazionato abbia 2 poli reali coincidenti in $p_{1,2} = -5$.

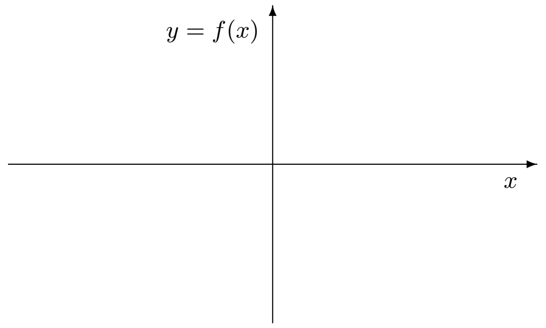
Sol. Dopo aver operato la cancellazione polo-zero, l'equazione caratteristica del sistema retroazionato è:

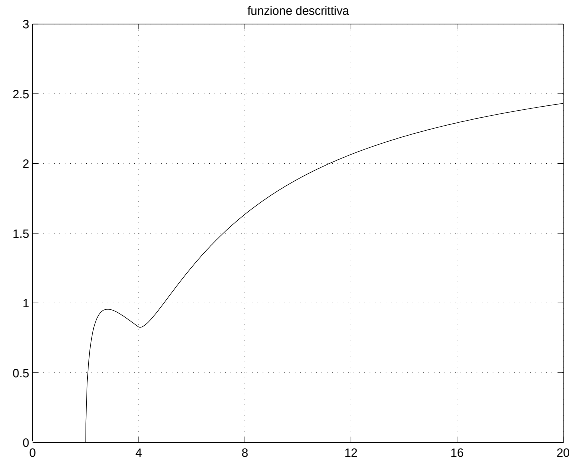
$$1 + \frac{K}{s(s+1)(1+\tau_2 s)} = 0 \qquad \to \qquad s^2 + \frac{s}{\tau_2} + \frac{K}{\tau_2} = 0$$

Il valore dei parametri K e τ_2 si determina imponendo l'uguaglianza dell'equazione caratteristica con il polinomio desiderato $p(s) = (s+5)^2 = s^2 + 10\,s + 25$:

$$\begin{cases} \dfrac{1}{\tau_2} & = & 10 \\[2ex] \dfrac{K}{\tau_2} & = & 25 \end{cases} \qquad \rightarrow \qquad \begin{cases} \tau_2 & = & 0.1 \\ K & = & 2.5 \end{cases}$$

e) Si consideri la funzione descrittiva $F(X)$ mostrata in figura relativa ad una non linearità $y = f(x)$ statica e simmetrica rispetto all'origine.





Dalla forma della $F(X)$ cercare di ricostruire l'andamento "qualitativo" della funzione $y = f(x)$ sapendo che il valore finale F_∞ a cui tende la $F(X)$ quando $X \to \infty$ è $F_\infty = 3$.

L'andamento qualitativo della funzione non lineare $y = f(x)$ corrispondente alla funzione descrittiva $F(X)$ assegnata è mostrato in Fig. 5.

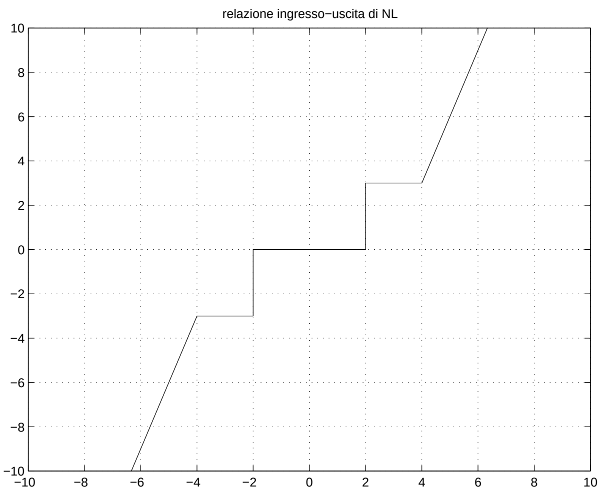


Figura 5: Andamento qualitativo della funzione non lineare $y = f(x)$.

f) Utilizzando il metodo della "trasformazione bilineare", discretizzare la seguente rete correttrice

$$D(s) = \frac{M(s)}{E(s)} = \frac{3 + \mathbf{a}\,s}{6 + \mathbf{b}\,s}$$

giungendo anche alla determinazione della corrispondente equazione alle differenze. Si utilizzi il periodo di campionamento $T = 0.2$.

Sol. Posto $\mathbf{a} = 6$, $\mathbf{b} = 3$ ed utilizzando il metodo della "trasformazione bilineare" si ottiene:

$$D(z) = \left.\frac{1+2\,s}{2+s}\right|_{s=\frac{2(1-z^{-1})}{T(1+z^{-1})}} = \frac{0.2(1+z^{-1}) + 4\,(1-z^{-1})}{0.4(1+z^{-1}) + 2(1-z^{-1})} = \frac{4.2 - 3.8\,z^{-1}}{2.4 - 1.6\,z^{-1}} = \frac{M(z)}{E(z)}$$

da cui si ricava:

$$\begin{aligned} m(k) &= \frac{1}{2.4}\left[1.6\, m(k-1) + 4.2\, e(k) - 3.8\, e(k-1)\right] \\ &= 0.6667\, m(k-1) + 1.75\, e(k) - 1.5833\, e(k-1) \end{aligned}$$

g) Calcolare la risposta all'impulso $g(n)$ del seguente sistema dinamico discreto

$$G(z) = \frac{z(z+1)}{(z-0.1\,\mathbf{a})(z+0.1\,\mathbf{b})}$$

Sol. Posto $\mathbf{a} = 6$, $\mathbf{b} = 3$ la funzione $G(z)$ da antitrasformare è la seguente:

$$G(z) = \frac{z(z+1)}{(z-0.6)(z+0.3)} = \left[\frac{1.6\, z}{0.9(z-0.6)} - \frac{0.7\, z}{0.9(z+0.3)}\right]$$

La risposta all'impulso $g(n)$ ha quindi la seguente espressione:

$$g(n) = \frac{1.6}{0.9}\,(0.6)^n - \frac{0.7}{0.9}\,(-0.3)^n = 1.777\,(0.6)^n - 0.777\,(-0.3)^n$$

Nr.

Nome:	
Nr. Mat.	
Firma:	

Controlli Automatici B

12 Aprile 2007 - Domande Teoriche

Rispondere alle domande e ai test che seguono. Per ciascuno dei test segnare con una crocetta le affermazioni che si ritengono giuste. La risposta al test è considera corretta solo se tutte le affermazioni corrette sono state contrassegnate.

1. La funzione $G(s) = K(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s)$, che rappresenta un regolatore standard PID,

   ○ è fisicamente realizzabile

   ⊗ non è fisicamente realizzabile

   ⊗ è un modello ideale semplificato dei PID realizzati fisicamente

2. 1) Disegnare qualitativamente il luogo delle radici del seguente sistema retroazionato:

$$G(s) = \frac{K}{(s+2)^3}$$

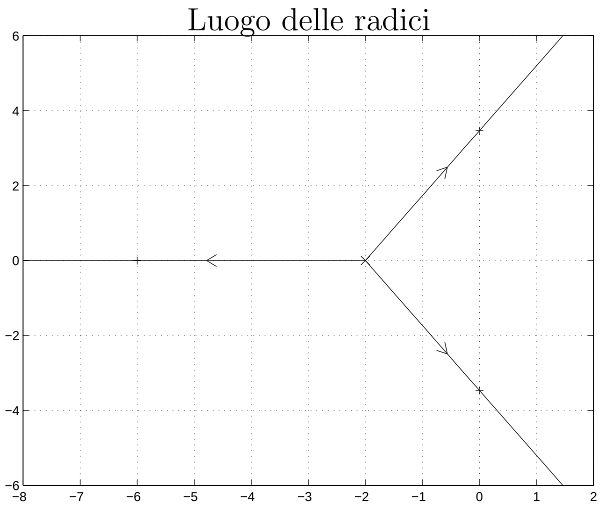
   al variare del parametro $K > 0$.

   2) Quando 2 dei 3 poli del sistema retroazionato si trovano sull'asse immaginario, $p_{1,2} = \pm j\omega^*$, il terso polo p_3 dove si trova?

$$p_3 = -6$$

   3) Determinare per quale valore $\bar{K}$ di K i due poli $p_{1,2} = \pm j\omega^*$ del sistema retroazionato si trovano sull'asse immaginario e il terzo polo p_3 si trova nel punto calcolato in 2):

$$\bar{K} = -\left.\frac{1}{G(s)}\right|_{s=-6} = 64$$



3. L'uso di una rete anticipatrice è consigliato

   ⊗ se si desidera aumentare la larghezza di banda del sistema

   ○ per stabilizzare sistemi con margini di fase fortemente negativi

   ⊗ se si desidera aumentare il coefficiente di smorzamento δ dei poli dominanti

4. Una rete ritardatrice del tipo $D(s) = \frac{1+\tau_1 s}{1+\tau_2 s}$ con $\tau_2 > \tau_1$ viene inserita in un anello di controllo

   ○ per ridurre gli errori a regime per ingresso a gradino

   ○ per migliorare l'andamento "a regime" del sistema retroazionato

   ⊗ per migliorare l'andamento "in transitorio" del sistema retroazionato

5. Fornire l'enunciato del Criterio del cerchio:

   Nell'ipotesi che la funzione di trasferimento della parte lineare del sistema $G(s)$ abbia ...

   ...

   condizione ...

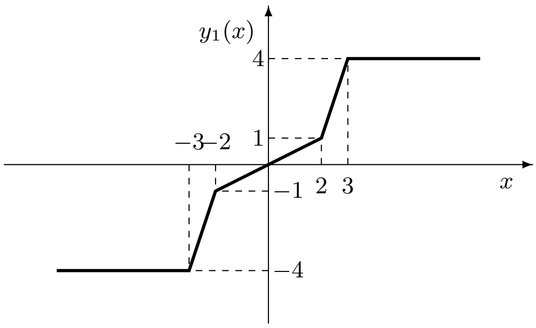
   affinché il sistema in retroazione sia...

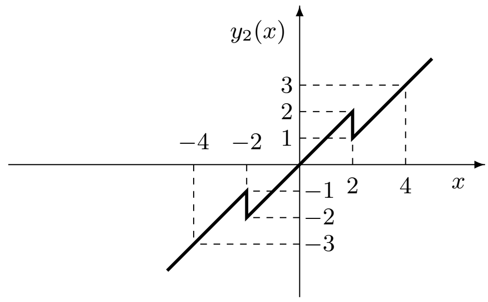
   è che ...

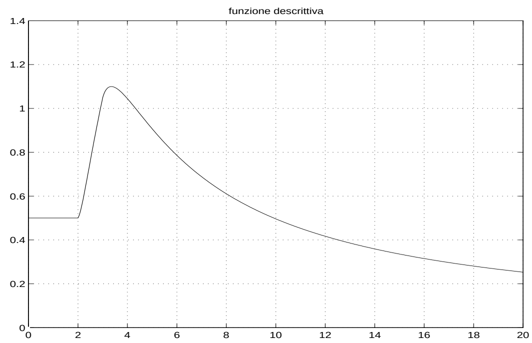
6. Calcolare la funzione di trasferimento $G(z) = \frac{Y(z)}{X(z)}$ corrispondente alla seguente equazione alle differenze:

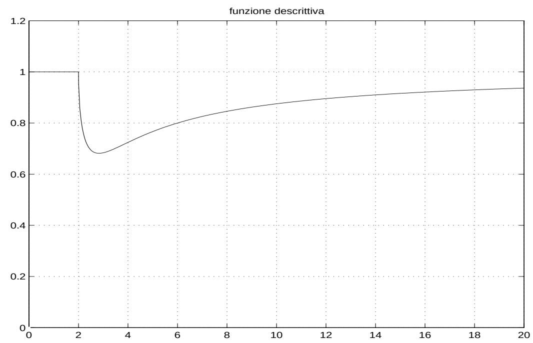
$$y(k+1) + 2\,y(k) + 4\,y(k-1) = 5\,x(k) + 3\,x(k-1) \qquad \rightarrow \qquad G(z) = \frac{5 + 3\,z^{-1}}{z + 2\, + 4\,z^{-1}} = \frac{5\,z + 3}{z^2 + 2\,z + 4}$$

7. Date le seguenti caratteristiche non lineari simmetriche rispetto all'origine, determinare "qualitativamente" gli andamenti delle corrispondenti funzioni descrittive $F_1(X)$ ed $F_2(X)$:









8. Calcolare la $\mathcal{Z}$-trasformata $X(z)$ delle seguenti due successioni numeriche $x(k)$:

$$x(k) = 2\,k\,T \qquad \rightarrow \qquad X(z) = \frac{2\,T\,z}{(z-1)^2} \qquad\qquad x(k) = e^{-3\,k\,T} \qquad \rightarrow \qquad X(z) = \frac{z}{z - e^{-3\,T}}$$

9. Sia $X(z) = \mathcal{Z}[x(k)]$ la $\mathcal{Z}$-trasformata della successione $x(k)$. Per $n = 1, 2, \ldots$, enunciare il teorema della traslazione nel tempo nei 2 casi a) ritardo, e b) anticipo:

$$a) \qquad \mathcal{Z}[x(t - nT)] = z^{-n} X(z)$$

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

10. Scrivere la funzione di trasferimento $G(s)$ di un ricostruttore di ordine zero e disegnare qualitativamente l'andamento della corrispondente funzione di risposta armonica $G(j\omega)$ (solo il diagramma dei moduli in scala lineare):

$$G(s) = \frac{1 - e^{-s\,T}}{s}$$