29 novembre 2024 Prova intermedia di Controlli Automatici - A.A. 2024-2025

Es. 1 (9 punti)

Si consideri il sistema di controllo in Figura 1

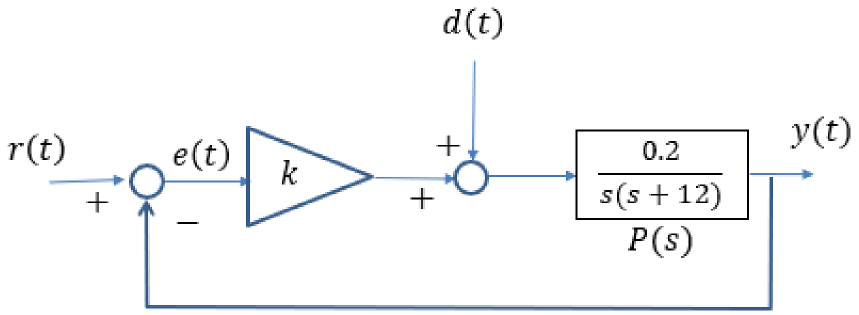


Figura 1

1.A (7 punti) Individuare l'intervallo di valori del guadagno k che garantisce il soddisfacimento delle seguenti specifiche

S1 Precisione statica
S2 Attenuazione minima di un disturbo costante $d(t) = D$ pari al 98%
S3 Errore a regime relativo al set-point $r(t) = 5 + 2t$ non superiore a 1.3
S4 Tempo di assestamento non superiore a 3.5 secondi.
S5 Sovraelongazione percentuale non superiore al 5%.

1.B (2 punti) Disegnare la risposta a ciclo chiuso ad un set point $r(t) = 10$ in corrispondenza dei valori minimo e massimo dell'intervallo individuato nel precedente quesito (se non si è risolto il precedente quesito, considerare i valori $k_{min} = 60$ e $k_{max} = 500$)

Es.2 (8 punti)

Si consideri il sistema di controllo in Figura 2

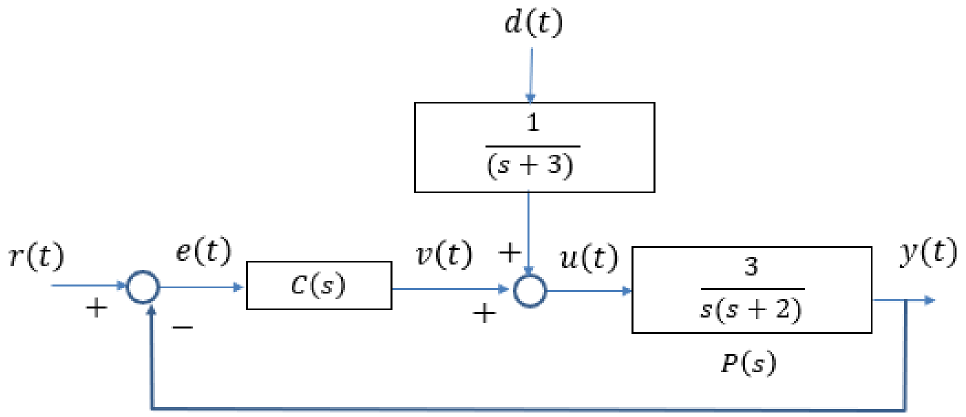


Figura 2

2.A (6 punti) Progettare un controllore $C(s)$ tale da garantire che la risposta a ciclo chiuso ad un set-point costante di ampiezza unitaria sia quella riportata nella seguente Figura 3.
2.B (2 punti) Con riferimento al controllore progettato nel precedente quesito 2.A, determinare l'evoluzione di regime dell'uscita y(t) in corrispondenza di: $r(t) = 10$ e $d(t) = -6$. (se non è risolto il precedente quesito, considerare il controllore $C(s) = \frac{10\,(s+2)}{s+6}$)

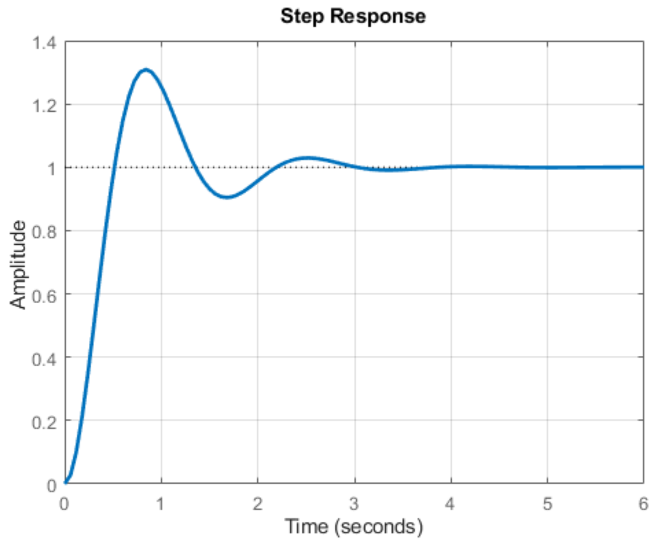


Figura 3

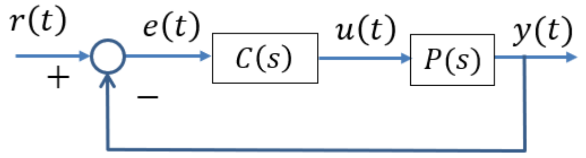


Figura 4

Es. 3 (5 punti)

Si consideri il sistema di controllo in Figura 4 con $P(s) = \frac{4}{(s+1)(s+2)(s+3)(s+4)}$, in cui la legge di controllo di tipo proporzionale-integrale è la seguente

$$u(t) = k\, e(t) + 3k \int_0^t e(\tau) d\tau$$

Si analizzi la stabilità a ciclo chiuso al variare del guadagno k determinando esplicitamente, se esiste, il valore del guadagno critico

Es. 4 (6 punti)

Si consideri il sistema di controllo in Figura 4 con $P(s) = \frac{3(1-s)}{(s+1)(s+2)}$. Progettare un controllore $C(s)$ tale da garantire che il sistema a ciclo chiuso soddisfi la proprietà della precisione statica.

Es. 5 (5 punti) – argomento non svolto nell'AA 2025-26

Enunciare sotto quali condizioni il sistema di controllo riportato nella seguente Figura 5 garantisce che un set-point della forma $r(t) = K_0 + K_1 t + K_2 \sin(10t + \phi)$ venga riprodotto a regime con un errore nullo qualunque sia il valore delle costanti K_0, K_1, K_2, ϕ.

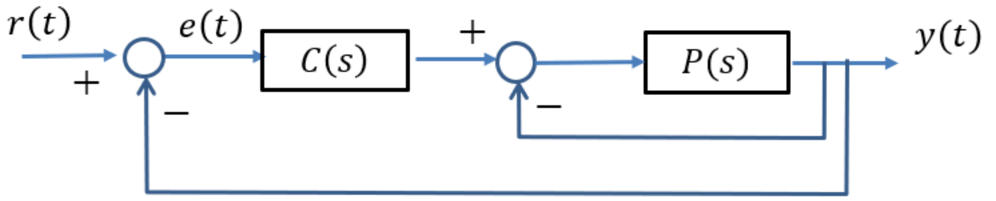
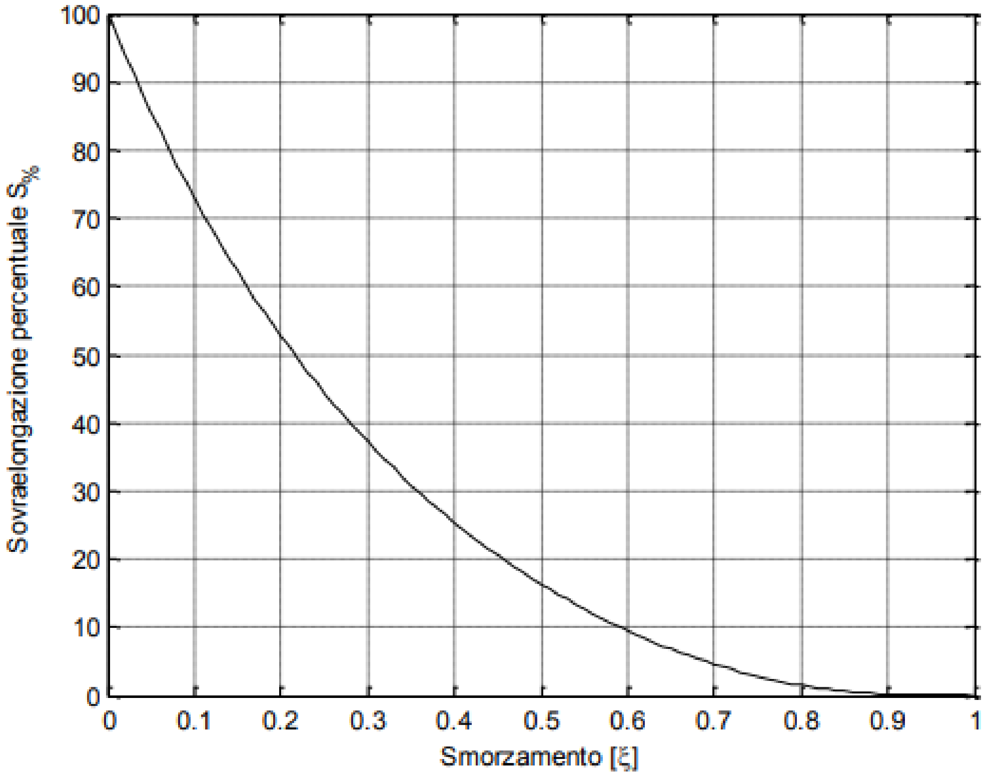


Figura 5

Numerare e firmare i fogli da consegnare.

Indicare chiaramente l'inizio e la fine dello svolgimento di ciascun esercizio.



Funzione del tempo	Trasformata di Laplace
$\delta_{-1}(t)$ (gradino unitario)	$\frac{1}{s}$
$\delta_{-2}(t) = t\delta_{-1}(t)$ (rampa unitaria)	$\frac{1}{s^2}$
e^{at} (esponenziale)	$\frac{1}{s-a}$
$\frac{t^{n-1}}{(n-1)!}e^{at}$ (esponenziale polinomiale)	$\frac{1}{(s-a)^n}$
$\sin(\omega t)$ (sinusoide)	$\frac{\omega}{s^2+\omega^2}$
$\cos(\omega t)$ (cosinusoide)	$\frac{s}{s^2+\omega^2}$
$\frac{1}{\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}}e^{-\zeta\omega_n t}\sin(\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}t)$	$\frac{1}{s^2+2\zeta\omega_n s+\omega_n^2}$ (fattore trinomio)
$e^{-at}\cos(\omega t)$	$\frac{s+a}{(s+a)^2+\omega^2}$
$e^{-at}\sin(\omega t)$	$\frac{\omega}{(s+a)^2+\omega^2}$

SOLUZIONE ESERCIZIO 1

1.A

Il polinomio caratteristico viene determinato moltiplicando fra loro le FdT del controllore e del processo, e sommandone numeratore e denominatore:

$$C(s)P(s) = k \cdot \frac{0.2}{s(s+12)} = \frac{0.2k}{s(s+12)}$$

$$P_{car}(s) = s(s+12) + 2k = s^2 + 12s + 0.2k$$

Il sistema di controllo è asintoticamente stabile a ciclo chiuso qualunque sia il valore di k (criterio di Cartesio).
La specifica S1 è sempre garantita indipendentemente dal valore di k (sistema di controllo di tipo 1).
La specifica S2 è garantita se il guadagno statico $W_d^y(0)$ della FdT a ciclo chiuso fra il disturbo e l'uscita è minore di 0.02

$$W_d^y(s) = \frac{P(s)}{1+kP(s)} = \frac{\frac{0.2}{s(s+12)}}{1+\frac{0.2k}{s(s+12)}} = \frac{0.2}{s^2+12s+0.2k}$$

$$W_d^y(0) = \frac{1}{k} \leq 0.02 \quad \rightarrow \quad k \geq \frac{1}{0.02} = 50$$

La specifica S3 va analizzata unicamente con riferimento alla componente a rampa del set point, in quanto la componente costante del set point viene riprodotta a regime con errore nullo, sulla base della specifica S1. Calcoliamo il valore a regime del segnale di errore nel caso in cui sia impiegato un set-point a rampa $r(t) = 2t$

FdT a ciclo chiuso fra il set point e l'errore:

$$W_r^e(s) = \frac{1}{1+kP(s)} = \frac{1}{1+\frac{0.2k}{s(s+12)}} = \frac{s(s+12)}{s^2+12s+0.2k}$$

TdL del segnale di errore:

$$E(s) = W_r^e(s)R(s) = \frac{s(s+12)}{s^2+12s+0.2k} \cdot \frac{2}{s^2} = \frac{(s+12)}{s^2+12s+0.2k} \cdot \frac{2}{s}$$

$E(s)$ soddisfa i requisiti di applicabilità del Teorema del valore finale in quanto i suoi poli coincidono con le radici del polinomio caratteristico (che hanno tutte parte reale negativa) più un ulteriore polo semplice nell'origine.

Applichiamo il Teorema del valore finale

$$\lim_{t\to\infty} e(t) = E^* = [sE(s)]_{s=0} = \left[s \cdot \frac{(s+12)}{s^2+12s+0.2k} \cdot \frac{2}{s}\right]_{s=0} = \left[\frac{2(s+12)}{s^2+12s+0.2k}\right]_{s=0} = \frac{24}{0.2\,k} = \frac{120}{k}$$

$$E^* = \frac{120}{k} \leq 1.3 \quad \rightarrow \quad k \geq \frac{120}{1.3} \approx 92.3$$

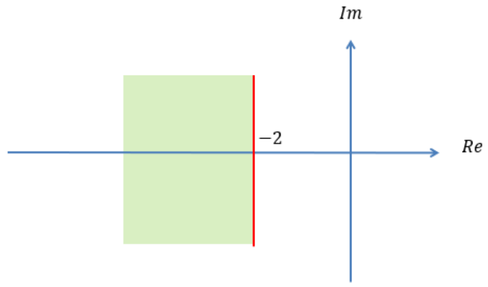
Le specifiche sul comportamento a regime sono pertanto complessivamente garantite se $k \geq 92.3$.

L'espressione di E^* poteva anche essere dedotta mediante la formula preconfezionata

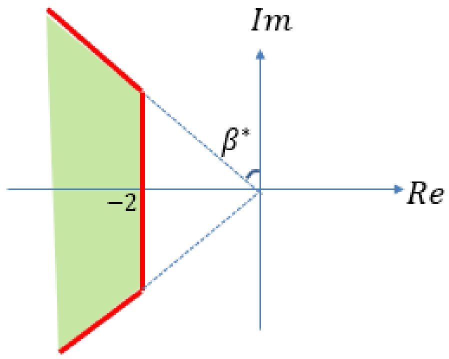
$$E^* = \frac{\Sigma}{\mu_C\,\mu_P}$$

In cui Σ è la pendenza del set point a rampa, μ_C è il guadagno statico (eventualmente generalizzato) del controllore e μ_P è il guadagno statico (eventualmente generalizzato) del processo. Nel caso in esame, $\Sigma = 2, \mu_C = k$ è il guadagno statico del controllore, mentre $\mu_P = \frac{0.2}{12} = 0.0167$ è il guadagno statico generalizzato del processo.

Passiamo alla analisi delle specifiche sul transitorio. Determiniamo la regione ammissibile per i poli del sistema a ciclo chiuso. La specifica S4 ($T_a \leq T^* = 3.5s$) implica la seguente regione ammissibile

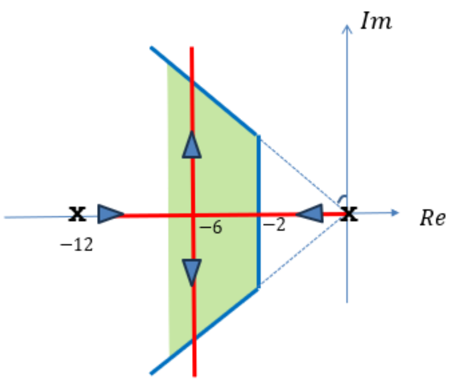


Poiché il sistema a ciclo chiuso è di ordine superiore al primo, per la determinazione di A^* si deve infatti impiegare la formula $A^* = -\frac{7}{T^*} = -2$
La specifica S5 ($S_{\%} \leq 5$) implica invece che lo smorzamento debba essere maggiore o uguale di 0.7 ($\xi \geq 0.7$). La regione ammissibile corrispondente alle specifiche S4 e S5 è pertanto complessivamente la seguente:



In cui $\beta^* = \operatorname{asin}(0.7) = 0.77\,rad$

Sovrapponiamo la regione ammissibile con il LdR associato a $L(s) = \frac{0.2}{s(s+12)}$



Determiniamo i poli a ciclo chiuso in corrispondenza del minimo valore di k che soddisfa le specifiche sul comportamento a regime, pari a $k = 92.3$

$$P_{car}(s) = s^2 + 12s + 0.2k = s^2 + 12s + 18.46$$

$p_{1,2} = \frac{-12 \pm \sqrt{(12)^2 - 4 \cdot 18.46}}{2}$ $\qquad p_1 = -1.81 \quad p_2 = -10.18$

Uno dei due poli è esterno alla regione ammissibile

Il valore minimo consentito per il guadagno k sarà pertanto pari a quello associato, nel LdR, al punto -2, punto in cui il ramo «destro» del LdR (quello che ha come punto di partenza l'origine) entra nella regione ammissibile. Determiniamolo mediante la taratura.

$k = \frac{1}{\bar{k}} \rho_1 \rho_2 = \frac{1}{0.2} \cdot 2 \cdot 10 = 100$ $\qquad \boldsymbol{k_{min} = 100}$

$\bar{k} = 0.2$: Guadagno in alta frequenza di $L(s) = \frac{0.2}{s(s+12)}$

$\rho_1 = 2$: Distanza fra il punto che stiamo tarando (-2) e l'origine

$\rho_1 = 10$: Distanza fra il punto che stiamo tarando (-2) e il punto -12

Ora determiniamo il valore $\boldsymbol{k_{max}}$ di k in corrispondenza del quale i rami del LdR escono dalla regione ammissibile, cioè il valore di k in corrispondenza del quale lo smorzamento dei poli complessi coniugati è pari a 0.7.

$P_{car}(s) = s^2 + 12s + 0.2k$

$s^2 + 12s + 0.2k = s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2$

Uguagliando membro a membro il polinomio caratteristico con la forma standard del termine trinomio possiamo determinare la pulsazione naturale e lo smorzamento in funzione del guadagno k:

$\omega_n^2 = 0.2k \qquad 2\xi\omega_n = 12$

Pulsazione naturale: $\quad \omega_n = \sqrt{0.2k}$

Smorzamento: $\quad \xi = \frac{12}{2 \cdot \omega_n} = \frac{12}{2 \cdot \sqrt{0.2k}} \approx \frac{6}{\sqrt{0.2\,k}}$

Ora andiamo a cercare il valore di k in corrispondenza del quale lo smorzamento vale 0.7:

$\frac{6}{\sqrt{0.2\,k}} = 0.7 \quad \rightarrow \quad \sqrt{0.2k} = \frac{6}{0.7} = 8.57 \quad \rightarrow \quad k = \frac{1}{0.2}(8.57)^2 \approx 367.2$

Tale valore costituisce la soglia massima consentita per k, oltre la quale lo smorzamento dei poli complessi coniugati diventa minore di 0.7

Pertanto, l'intervallo di valori del guadagno k che garantisce il soddisfacimento delle specifiche S1-S5 è:

$\boldsymbol{100 \leq k \leq 379.1} \qquad \boldsymbol{k_{min} = 100} \qquad \boldsymbol{k_{max} = 367.2}$

1.B

Il quesito 1.B richiede che si tracci l'evoluzione della risposta al gradino di ampiezza 10 del seguente sistema

$$W_r^y(s) = \frac{kP(s)}{1 + kP(s)} = \frac{\frac{0.2k}{s(s+12)}}{1 + \frac{0.2k}{s(s+12)}} = \frac{0.2k}{s^2 + 12s + 0.2k}$$

che rappresenta la FdT a ciclo chiuso fra il set-point e l'uscita in corrispondenza dei due valori del guadagno $k = k_{min} = 100$ e $k = k_{max} = 367.2$

$$r(t) = 10 \longrightarrow \boxed{\dfrac{0.2k}{s^2 + 12s + 0.2k}} \longrightarrow y(t) = ???$$

Poiché il guadagno statico di $W_r^y(s)$ è unitario indipendentemente dal valore di k, il valore di regime della risposta y(t) sarà sempre pari a 10.

$\boldsymbol{k = k_{min} = 100}$

Determiniamo i poli della FdT quando $k = \mathrm{k}_{min} = 100$ (sulla base di quanto visto in precedenza, uno è sicuramente pari a -2)

$P_{car}(s) = s^2 + 12s + 0.2k = s^2 + 12s + 20$

$p_{1,2} = \frac{-12 \pm \sqrt{(12)^2 - 4 \cdot 20}}{2} = \frac{-12 \pm 8}{2} \qquad p_1 = -2 \qquad p_2 = -10$

La FdT a ciclo chiuso fra il set point e l'uscita è pertanto

$$W_r^y(s) = \frac{20}{(s+2)(s+10)} = \frac{1}{(0.5s+1)(0.1s+1)}$$

Il polo in -2 è **dominante.** Possiamo quindi "rimuovere" il polo in -10 e tracciare la risposta riferendoci ad un semplice sistema STC:

$W_{r,APPROX}^y(s) = \frac{2}{s+2} = \frac{1}{(0.5s+1)}$

Avremo pertanto una risposta y(t) che tende asintoticamente al valore 10, monotona esponenziale, e con tempo di assestamento facilmente determinabile sulla base della costante di tempo del polo, che vale 0.5 secondi. Il tempo di assestamento è pertanto $T_a \approx 4.6 \cdot 0.5 = 2.3\ s$

$\boldsymbol{k = k_{max} = 367.2}$

I poli a ciclo chiuso in corrispondenza del massimo valore consentito per il guadagno k, pari a $k = \mathrm{k}_{max} = 367.2$ sono complessi coniugati con parte reale -6 e smorzamento $\xi = 0.7$.

Il prodotto $\xi\omega_n$, che rappresenta la parte reale dei poli cambiata di segno, vale pertanto 6

Si ha quindi $\omega_n = \frac{6}{\xi} = 8.57\ rad/s$

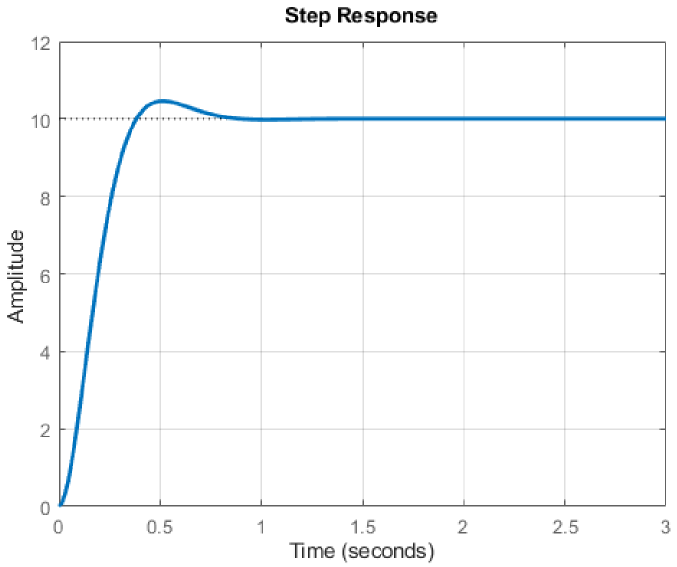
La costante di tempo equivalente è $\tau_{eq} = \frac{1}{\xi\omega_n} = \frac{1}{6} \approx 0.16s$

Avremo pertanto una risposta y(t) che tende asintoticamente al valore 10, oscillatoria, con sovraelongazione del 5% (che comporta quindi un valore massimo di $Y_{max} = 10 + 10 \cdot 0.05 = 10.5$), istante del primo punto di massimo

$$t_{max} = \frac{\pi}{\omega_n\sqrt{1-\xi^2}} = \frac{\pi}{8.57 \cdot \sqrt{1-(0.7)^2}} \approx 0.51$$

e tempo di assestamento $T_a = \frac{4.6}{\xi\omega_n} \approx 0.76s$

La seguente figura mostra il grafico esatto realizzato mediante Matlab:



Le oscillazioni successive al primo punto di massimo sono invisibili in quanto risultano quasi completamente smorzate gia dopo il primo periodo

SOLUZIONE ESERCIZIO 2

2.A

La risposta mostrata in Figura 3 è la risposta al gradino unitario della FdT a ciclo chiuso fra il set point e l'uscita, e mostra le caratteristiche della risposta al gradino di una FdT avente una coppia di poli complessi coniugati:

$$W_r^y(s) = \frac{\mu\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$$

Sulla base delle caratteristiche della curva in Figura 3 ricaviamo i parametri della $W_r^y(s)$ (i parametri esatti sulla base dei quali è stato realizzato il grafico in Figura 3 sono $\mu = 1$, $\xi = 0.35$, $\omega_n = 4\, rad/s$).

Poiché il valore di regime è unitario, il guadagno statico μ della $W_r^y(s)$ vale 1.

Poiché la sovraelongazione percentuale è pari a circa il 30%, lo smorzamento ξ della coppia di poli complessi coniugati sarà $\xi \approx 0.35$.

Il valore della pulsazione naturale può essere dedotto in vari modi.

L'istante del primo punto di massimo ha l'espressione:

$$t_{max} = \frac{\pi}{\omega_n\sqrt{1-\xi^2}}$$

Dalla figura 3 notiamo come $t_{max} \approx 0.85$

Si ha quindi

$$\omega_n = \frac{\pi}{t_{max}\sqrt{1-\xi^2}} \approx \frac{\pi}{0.85\sqrt{1-(0.35)^2}} = 3.95\, rad/s$$

Un modo alternativo per dedurre la pulsazione naturale ω_n può anche basarsi sul tempo di assestamento. Dalla figura 3 si può stimare che $T_{a1\%} \approx 3.5\, s$.

Poiché $T_a = \frac{4.6}{\xi\omega_n}$ si deduce

$$\omega_n = \frac{4.6}{\xi T_a} \approx \frac{4.6}{0.35 \cdot 3.5} = 3.75\, rad/s$$

Ovviamente si ottengono risultati differenti da quelli esatti poiché i parametri t_{max} e T_a sono letti sulla curva in Figura 3 con un inevitabile errore di approssimazione. Scegliamo di utilizzare $\omega_n = 3.95\, rad/s$.

Quindi

$$W_r^y(s) \approx \frac{(3.95)^2}{s^2 + 2 \cdot 0.35 \cdot 3.95\, s + (3.95)^2} = \frac{15.6}{s^2 + 2.76\, s + 15.6}$$

Il controllore $C(s)$ tale da garantire che la FdT a ciclo chiuso coincida con quella che abbiamo determinato può immediatamente determinarsi mediante sintesi diretta scegliendo come FdT desiderata $W_d(s) = \frac{N_{W_d}(s)}{D_{W_d}(s)} = \frac{15.6}{s^2+2.76\, s+15.6}$. La formula mediante la quale ricavare la FdT del controllore è:

$$C(s) = \frac{W_d(s)}{1 - W_d(s)} \cdot \frac{1}{P(s)} = \frac{N_{W_d}(s)}{D_{W_d}(s) - N_{W_d}(s)} \cdot \frac{D_P(s)}{N_P(s)}$$

La FdT del processo è: $P(s) = \frac{N_P(s)}{D_P(s)} = \frac{3}{s(s+2)}$.

Sostituendo nella formula per il calcolo della FdT del controllore si ottiene pertanto:

$$C(s) = \frac{N_{W_d}(s)}{D_{W_d}(s) - N_{W_d}(s)} \cdot \frac{D_P(s)}{N_P(s)} = \frac{15.6}{s^2 + 2.76\,s} \cdot \frac{s(s+2)}{3} = \frac{15.6}{3}\frac{(s+2)}{(s+2.76)} = \frac{5.2 \cdot (s+2)}{(s+2.76)}$$

2.B

Poiché il sistema di controllo è di tipo 1 esso gode della proprietà di precisione statica. Il valore di regime dell'uscita y(t) in corrispondenza di $r(t) = 10$ è pertanto $Y_{\infty,r} = 10$.

Poiché il controllore non contiene poli nell'origine, un disturbo costante si traduce in un contributo costante non nullo sul valore di regime dell'uscita.

Tale contributo è pari a: $Y_{\infty,d} = -6 \cdot W_d^y(0)$

Calcoliamo la FdT a ciclo chiuso $W_d^y(s)$ fra il disturbo e l'uscita, e poi estraiamone il guadagno statico.

$$W_d^y(s) = \frac{1}{s+3} \cdot \frac{P(s)}{1 + C(s)P(s)} = \frac{1}{s+3} \cdot \frac{\frac{3}{s(s+2)}}{1 + \frac{5.2 \cdot (s+2)}{(s+2.76)} \frac{3}{s(s+2)}} = \frac{1}{s+3} \cdot \frac{\frac{3}{s(s+2)}}{1 + \frac{5.2}{(s+2.76)}\frac{3}{s}}$$

$$= \frac{1}{s+3} \cdot \frac{\frac{3}{(s+2)}}{s + \frac{5.2 \cdot 3}{(s+2.76)}}$$

Si ha quindi $W_d^y(0) = \frac{1}{3} \cdot \frac{\frac{3}{2}}{\frac{5.2 \cdot 3}{(2.76)}} = 0.088 \quad \rightarrow \quad Y_{\infty,d} = -6 \cdot W_d^y(0) = -6 \cdot 0.088 = -0.53$

Sommiamo fra loro il contributo del set point ed il contributo del disturbo

$$Y_\infty = Y_{\infty,r} + Y_{\infty,d} = 10 - 0.53 = 9.47$$

SOLUZIONE ESERCIZIO 3

La FdT del controllore è

$$C(s) = k + \frac{3k}{s} = \frac{k(s+3)}{s}$$

Deduciamo il polinomio caratteristico moltiplicando fra loro la FdT del controllore e la FdT del processo, e successivamente sommando fra loro i rispettivi numeratore e denominatore

$$C(s)P(s) = \frac{k\cancel{(s+3)}}{s} \cdot \frac{4}{(s+1)(s+2)\cancel{(s+3)}(s+4)} = \frac{4k}{s(s+1)(s+2)(s+4)}$$

$$P_{car}(s) = s(s+1)(s+2)(s+4) + 4k = s^4 + 7s^3 + 14s^2 + 8s + 4k$$

Applichiamo il criterio di Routh Hurwitz

1	1	14	$4k$
2	7	8	
3	A	B	
4	C		

$$A = -\frac{1}{7}\begin{vmatrix} 1 & 14 \\ 7 & 8 \end{vmatrix} = \frac{14 \cdot 7 - 8}{7} = \frac{90}{7}$$

$$B = -\frac{1}{7}\begin{vmatrix} 1 & 4k \\ 7 & 0 \end{vmatrix} = 4k = 4k$$

Prima di inserirli nella tabella, moltiplichiamo sia A che B per 7, onde evitare di avere coefficienti espressi sotto forma di frazioni

1	1	14	$4k$
2	7	8	
3	90	28k	
4	C		

$$C = -\frac{1}{90}\begin{vmatrix} 7 & 8 \\ 90 & 28k \end{vmatrix} = \frac{1}{90}[8 \cdot 90 - 28k \cdot 7] = \frac{1}{90}[720 - 196k]$$

Prima di inserire C nella tabella, moltiplichiamolo per 90

1	1	14	4k
2	7	8	
3	90	28k	
4	$720 - 196k$		

Ora andiamo a imporre che tutti gli elementi della prima colonna (evidenziati in rosso) abbiano segno concorde, siano cioè tutti positivi

$$720 - 196k > 0 \;\; \rightarrow \;\; k < k_{cr} = \frac{720}{196} = 3.67$$

Il sistema di controllo a ciclo chiuso è:

Asintoticamente stabile se $\quad k < k_{cr} = 3.67$

Al limite di stabilità se $\quad k = k_{cr} = 3.67$

Instabile se $\quad k > k_{cr} = 3.67$

Il guadagno critico è pertanto pari a 3.67.

SOLUZIONE ESERCIZIO 4

Conviene procedere mediante Sintesi Diretta, scegliendo una FdT **desiderata** a ciclo chiuso che sia asintoticamente stabile, abbia grado relativo uno, guadagno statico unitario, e che allo stesso tempo, per evitare che venga compromessa la stabilita interna del sistema di controllo, abbia il medesimo zero a parte reale positiva del processo.

Una possibile scelta è:

$$W_d(s) = \frac{N_{W_d}(s)}{D_{W_d}(s)} = \frac{1-s}{(1+s)^2} = \frac{1-s}{s^2+2s+1}$$

La formula mediante la quale ricavare la FdT del controllore è:

$$C(s) = \frac{W_d(s)}{1-W_d(s)} \cdot \frac{1}{P(s)} = \frac{N_{W_d}(s)}{D_{W_d}(s) - N_{W_d}(s)} \cdot \frac{D_P(s)}{N_P(s)}$$

La FdT del processo è: $P(s) = \frac{N_P(s)}{D_P(s)} = \frac{3(1-s)}{(s+1)(s+2)}$.

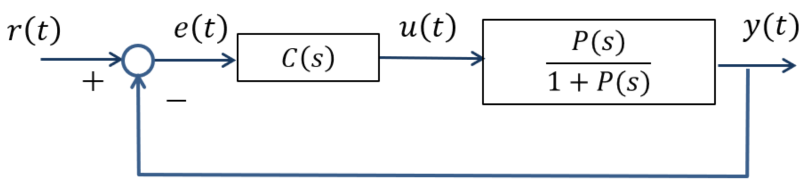
Sostituendo nella formula per il calcolo della FdT del controllore si ottiene:

$$C(s) = \frac{\cancel{(1-s)}}{s^2+2s+1-(1-s)} \cdot \frac{(s+1)(s+2)}{3\cdot\cancel{(1-s)}} = \frac{1}{s^2+3s} \cdot \frac{(s+1)(s+2)}{3} = \frac{1}{3} \cdot \frac{(s+1)(s+2)}{s(s+3)}$$

Si noti come data l'assenza di qualunque specifica sul cmportamento transitorio, la scelta dei poli di $W_d(s)$ è del tutto arbitraria, purché siano entrambi a parte reale negativa.

SOLUZIONE ESERCIZIO 5 - – argomento non svolto nell'AA 2025-26

Il sistema di controllo in Figura 5 può essere rappresentato come segue:



Le condizioni sono le seguenti:

1. Il sistema di controllo deve essere asintoticamente stabile a ciclo chiuso sia esternamente che internamente
2. La funzione di trasferimento a ciclo aperto $F(s) = C(s)\frac{P(s)}{1+P(s)}$ deve avere almeno due poli nell'origine
3. La funzione di trasferimento a ciclo aperto $F(s) = C(s)\frac{P(s)}{1+P(s)}$ deve avere una coppia di poli immaginari puri $p_{1,2} = \pm\sqrt{10}i$, deve quindi presentare nel suo denominatore il fattore $s^2 + 100$