

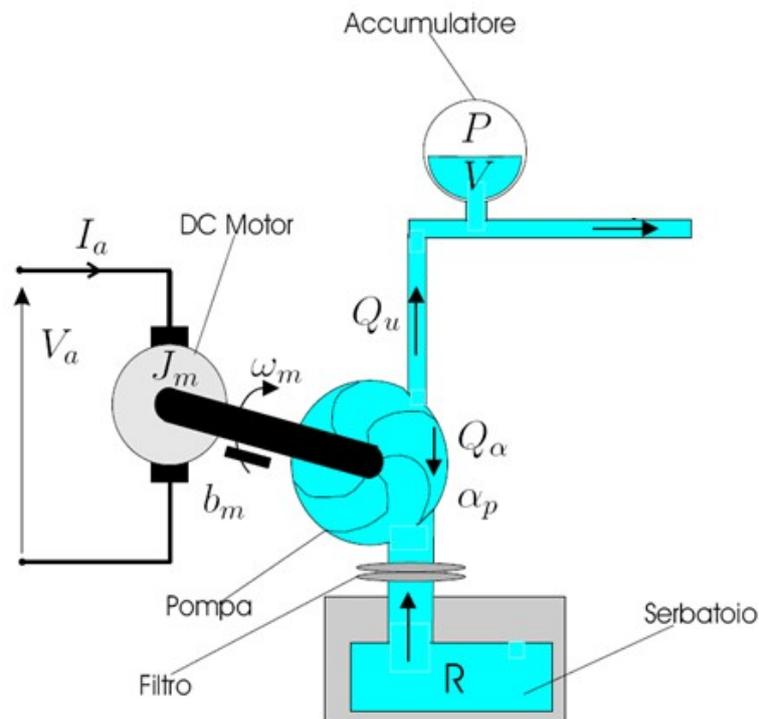
**Esame di “FONDAMENTI DI AUTOMATICA” (9 CFU)
(A.A. fino al 2017/2018)**

Prova scritta – 19 novembre 2019

SOLUZIONE

ESERCIZIO 1.

Si consideri il sistema per la regolazione della pressione in un circuito idraulico, costituito da un motore elettrico a corrente continua, una pompa la cui girante è azionata dal motore stesso, da un serbatoio di fluido e da un accumulatore di volume fissato. Lo schema del circuito è mostrato nella seguente figura:



Applicando le opportune leggi fisiche per il circuito di tipo RL del motore e per la dinamica del fluido attraverso la pompa e l'accumulatore, il modello matematico del sistema può essere descritto tramite le seguenti equazioni differenziali:

$$V_a = RI_a + L\dot{I}_a + K_m\omega_m$$

$$J_m\dot{\omega}_m + b_m\omega_m = K_m I_a - K_p P$$

$$\dot{P} = K_o(K_p\omega_m - \alpha_p P)$$

nelle quali R e L sono rispettivamente la resistenza e l'induttanza dell'avvolgimento del motore elettrico, J_m e b_m il momento di inerzia e il coefficiente di attrito viscoso del motore, K_m è la costante di coppia/BEMF del motore, K_p è la cilindrata della pompa, α_m è la resistenza fluidica del circuito idraulico e K_o è il coefficiente di comprimibilità.

Si determini il corrispondente modello dinamico nello spazio degli stati, di ordine 3 e del tipo:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t); y(t) = Cx(t) + Du(t)$$

fissando le seguenti scelte per le variabili di stato, ingresso e uscita:

$$x_1 = I_a; x_2 = \omega_m; x_3 = P; u = V_a; y = P = x_3;$$

RISPOSTA:

Rielaborando le equazioni, si ottiene le seguenti tre equazioni differenziali del primo ordine, per ciascuna derivata di una singola variabile di stato:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -\frac{R}{L}x_1 - \frac{K_m}{L}x_2 + \frac{1}{L}u \\ \dot{x}_2 &= \frac{K_m}{J_m}x_1 - \frac{b_m}{J_m}x_2 - \frac{K_p}{J_m}x_3 \\ \dot{x}_3 &= K_o K_p x_2 - K_o \alpha_p x_3 \end{aligned}$$

Da queste equazioni si ottiene direttamente la forma delle matrici A e B :

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{K_m}{L} & 0 \\ \frac{K_m}{J_m} & -\frac{b_m}{J_m} & -\frac{K_p}{J_m} \\ 0 & K_o K_p & -K_o \alpha_p \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Le matrici C e D si ottengono in modo immediato dall'espressione dell'uscita $y = x_3$, poiché tale uscita non dipende dall'ingresso $D = 0$ (sistema puramente dinamico) e la matrice di dimensione 1×3 che estrae la terza variabile dal vettore di stato è:

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad D = \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix}$$

ESERCIZIO 2.

Dato il modello ottenuto nell'Esercizio 1, si sostituiscano i seguenti valori per i parametri fisici:

$$R = 2; \quad L = 0,2; \quad K_m = 5; \quad J_m = 0,5; \quad b_m = 0,5;$$

$$K_p = 0,25; \quad K_o = 2; \quad \alpha_p = 1;$$

e si verifichi se il sistema sia o meno completamente controllabile, calcolando la matrice di raggiungibilità ed il relativo rango.

RISPOSTA:

Le matrici del sistema, di interesse per l'analisi di controllabilità (i.e. C non è di interesse), diventano:

$$A = \begin{bmatrix} -10 & -25 & 0 \\ 10 & -1 & -0,5 \\ 0 & 0,5 & -2 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 5 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Pertanto:

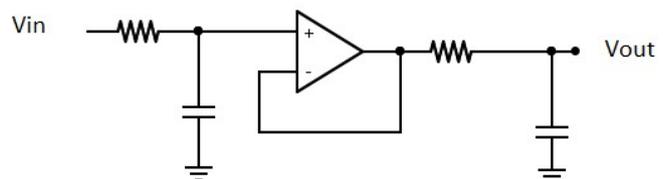
$$P = [B \ AB \ A^2B] = \begin{bmatrix} 5 & -50 & -750 \\ 0 & 50 & -550 \\ 0 & 0 & 25 \end{bmatrix}$$

$$\text{rango}(P) = 3$$

Perciò il sistema **E' /~~NONE~~** completamente controllabile.

ESERCIZIO 3.

Un sistema costituito dal circuito elettronico del tipo mostrato a fianco risulta avere il seguente modello nello spazio degli stati:



$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t); \quad y(t) = Cx(t)$$

con:

$$A = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 1 & -3 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Si determini il valore dell'uscita $y(t)$ (i.e. tensione V_{out}) all'istante $t = 1$ secondo, ponendo l'ingresso $u(t) = 0$ e considerando lo stato all'istante iniziale $t = 0$ pari a:

$$x(0) = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

RISPOSTA:

Nelle condizioni specificate dal testo, cioè con ingresso nullo e stato iniziale non nullo, l'uscita del sistema è determinata dalla seguente formula:

$$y(t_1) = C e^{A(t_1 - t_0)} x(t_0)$$

con $t_1 = 1$ e $t_0 = 0$. Notando che gli autovalori della matrice A sono -1 e -3 ed applicando il metodo del polinomio interpolante per il calcolo dell'esponenziale della matrice A , si ottiene anzitutto:

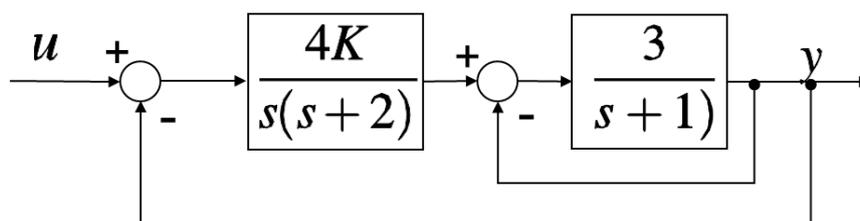
$$e^{At} = \begin{bmatrix} e^{-t} & 0 \\ \frac{1}{2} (e^{-t} - e^{-3t}) & e^{-3t} \end{bmatrix}$$

Pertanto, applicando i valori di tempo e di stato iniziale specificati dal testo si ottiene:

$$y(1) = \frac{e^{-1}}{2} - \frac{e^{-3}}{2} = 0,159$$

ESERCIZIO 4.

Dato il sistema descritto dal seguente diagramma a blocchi:



si calcolino i valori di K per i quali il sistema chiuso in retroazione risulti asintoticamente stabile:

RISPOSTA:

Una volta ridotti entrambi gli anelli di retroazione, il denominatore della funzione di trasferimento ad anello chiuso risulta:

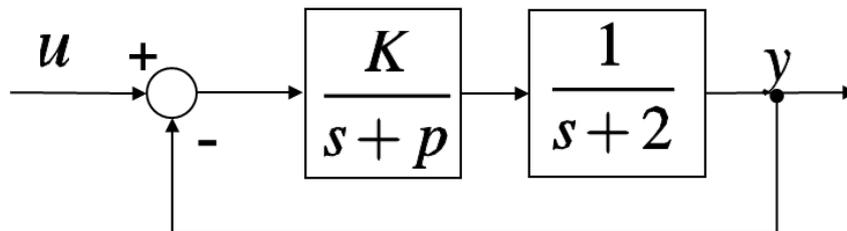
$$D_{cl}(s) = s^3 + 6s^2 + 8s + 12K$$

Applicando il criterio di Routh a tale polinomio, risulta che per avere poli a parte reale negativa (asintotica stabilità) è necessario che sia:

$$0 < K < 4$$

ESERCIZIO 5.

Dato il seguente sistema in retroazione:



si progettino i valori di K e p tali per cui il sistema ad anello chiuso risulti avere tempo di assestamento $T_a = 2$ secondi e coefficiente di smorzamento $\delta = 0,5$.

RISPOSTA:

Il denominatore del sistema ad anello chiuso risulta:

$$D_{cl}(s) = s^2 + (p + 2)s + 2p + K$$

Confrontandolo con il denominatore tipico di un generico sistema del secondo ordine e ricordando che per i sistemi del secondo ordine:

$$T_a = \frac{3}{\delta \omega_n}$$

risulta che per rispettare le specifiche richieste dal testo è necessario imporre $\delta \omega_n = 3/2$, pertanto

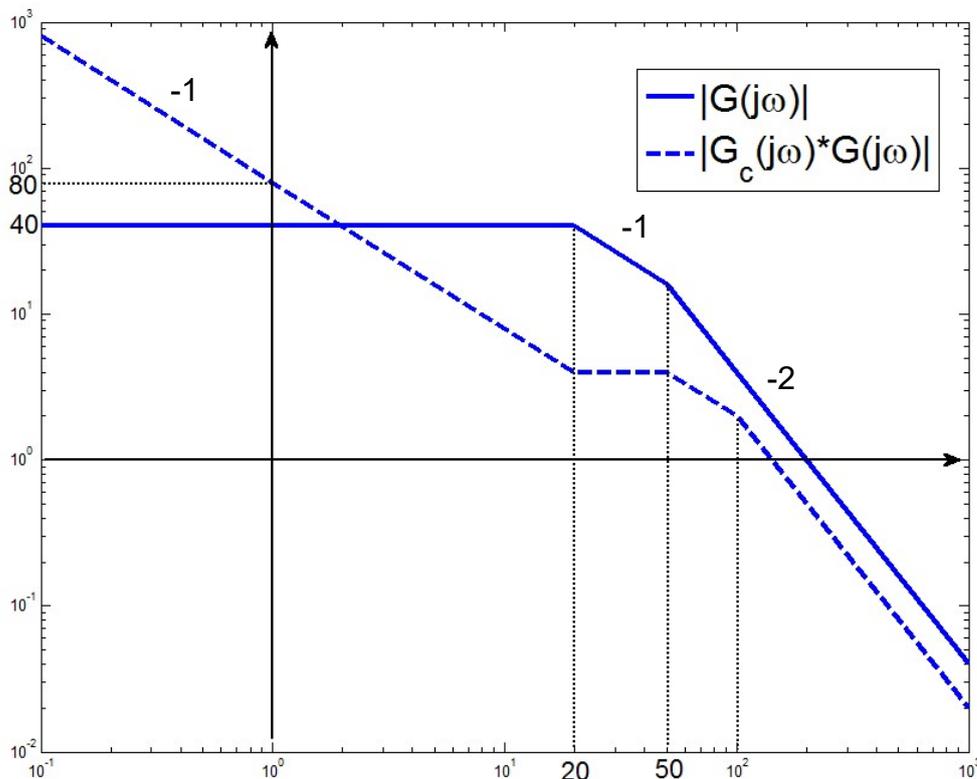
$$(p + 2) = 2\delta \omega_n = 3 \quad \rightarrow \quad p = 1$$

Fissato il valore desiderato di δ si ottiene poi $\omega_n=3$ e quindi:

$$(2p + K) = \omega_n^2 = 9 \quad \rightarrow \quad K = 7$$

ESERCIZIO 6.

Dato il seguente diagramma di Bode delle ampiezze:



si determinino le funzioni di trasferimento $G(s)$ e $G_c(s)$, supposte entrambe a fase minima.

RISPOSTA:

$$G(s) = \frac{40}{\left(1 + \frac{s}{20}\right)\left(1 + \frac{s}{50}\right)}$$

$$G_c(s) = \frac{2\left(1 + \frac{s}{20}\right)^2}{s\left(1 + \frac{s}{100}\right)}$$

TEST A RISPOSTA MULTIPLA

DOMANDA 1.

Due sistemi dinamici, lineari e stazionari, asintoticamente stabili, collegati in cascata tra loro danno luogo ad un sistema:

- asintoticamente stabile
- semplicemente stabile
- completamente osservabile
- completamente controllabile

DOMANDA 2.

Il moto libero di un sistema dinamico, lineare, stazionario, continuo e di ordine due, è del tipo:

$$\begin{aligned}x_1(t) &= e^{-t}x_1(0) \\x_2(t) &= e^{-2t}x_2(0)\end{aligned}$$

Il sistema considerato:

- è completamente controllabile
- può essere completamente controllabile
- è asintoticamente stabile
- è semplicemente stabile

DOMANDA 3.

La retroazione tra stato stimato (mediante osservatore identità) e ingresso in un sistema dinamico, lineare e stazionario, consente di assegnare arbitrariamente gli autovalori del sistema chiuso in retroazione se il sistema osservato è:

- completamente raggiungibile
- completamente osservabile
- completamente osservabile e raggiungibile
- asintoticamente stabile

DOMANDA 4.

La matrice di trasferimento è una rappresentazione ingresso-uscita che può essere utilizzata:

- per i sistemi non lineari stazionari
- per i sistemi non lineari e non stazionari
- per i sistemi lineari stazionari
- per i sistemi lineari non stazionari

DOMANDA 5.

In base al principio del modello interno, per neutralizzare con errore a regime nullo un modo in ingresso corrispondente ad un polo doppio nell'origine (i.e. un segnale a rampa), occorre che nella funzione di trasferimento di anello del sistema retroazionato:

- sia presente almeno un polo nell'origine
- siano presenti almeno tre poli nell'origine
- siano presenti almeno due poli nell'origine
- il guadagno statico sia finito

DOMANDA 6.

Il luogo delle radici di una funzione di trasferimento di anello, con n poli ed m zeri ($n > m$), presenta almeno un asintoto reale:

- quando $K > 0$ (luogo diretto) e $n - m$ è dispari
- quando $K > 0$ (luogo diretto) e $n - m$ è pari
- quando $K < 0$ (luogo inverso) e $n - m$ è dispari
- quando $K < 0$ (luogo inverso) e $n - m$ è pari

DOMANDA 7.

Il regolatore standard di tipo PID espresso con la cosiddetta *formulazione classica*:

$$C(s) = K_p \left(1 + T_d s + \frac{1}{T_i s} \right)$$

- è un sistema fisicamente realizzabile
- non è un sistema fisicamente realizzabile
- è sempre caratterizzato da una coppia di zeri reali distinti
- è sempre caratterizzato da una coppia di poli reali distinti

DOMANDA 8.

Il sistema avente la seguente funzione di trasferimento:

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

può essere reso asintoticamente stabile con uno schema ad anello chiuso che includa:

- un regolatore P
- un regolatore PI
- un regolatore PD
- un filtro passa-basso del primo ordine